

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale



Tesi di laurea magistrale

Materiali per l'Additive Manufacturing: caratteristiche e procedure certificative per l'aerospazio

Relatori

Prof. Giacomo **Frulla**

Ing. Matteo **Vazzola**

Candidato

Matteo **Paviolo**

Anno accademico 2020-2021

Ringraziamenti

Prima di procedere con la trattazione, vorrei dedicare qualche parola a tutti coloro che mi sono stati vicino in questo percorso di crescita personale e professionale.

Per prima cosa vorrei ringraziare il mio relatore Frulla Giacomo, sempre pronto a darmi le giuste indicazioni durante ogni fase della stesura dell'elaborato, con la sua infinita disponibilità; grazie a Lei ho accresciuto le mie competenze e le mie conoscenze.

Un ringraziamento particolare va al mio Tutor Vazzola Matteo dell'azienda TPS Aerospace che mi ha aiutato a condurre le ricerche e a trovare del materiale utile per la realizzazione della tesi.

Ringrazio i miei genitori che mi sono sempre stati accanto e senza i quali non avrei mai potuto intraprendere questo percorso di studi e i miei nonni per il loro appoggio incondizionato e per la loro pazienza.

Ringrazio la mia fidanzata Erika per avermi trasmesso la sua forza; grazie per tutto il tempo che mi hai dedicato e per esserci stata sempre.

Ringrazio, infine, i miei amici per essere stati presenti durante quest'ultima fase del mio percorso di studi e tutti i miei colleghi incontrati in questi anni accademici.

SOMMARIO

In questa tesi, si considera l'analisi e il confronto dei materiali Additive Manufacturing e la caratterizzazione dei processi certificativi sia per materiali metallici che per quelli polimerici.

L'analisi inizia considerando la storia e lo sviluppo dell'Additive nel tempo e vengono prese in considerazione le tecniche più utilizzate per la produzione, senza dimenticare la caratterizzazione delle polveri e le tipologie di macchine impiegate per realizzare componenti 3D.

Si considera anche la microstruttura e i difetti presenti nei materiali realizzati tramite Additive Manufacturing; in particolare si considera la microstruttura dei principali materiali metallici (AlSi10Mg, AISI 316L, Inconel 625 e 718 e Ti6Al4V). Per quanto riguarda i difetti vengono considerati tutti i parametri principali come ad esempio la porosità, la finitura superficiale e l'anisotropia.

Successivamente, vengono riportate alcune proprietà per i principali materiali utilizzati in ambito AM, distinguendoli tra materiali metallici e polimerici, utilizzati soprattutto in ambito aerospaziale e si effettua, nel caso dei materiali metallici, la differenziazione tra metodologie standard di realizzazione e metodi per la stampa 3D.

All'interno della tesi si riporta anche un resoconto sulla certificazione dei componenti realizzati tramite produzione additiva, cercando di valutare il roadmap per l'ottenimento di un componente in AM. In particolare, si effettua una valutazione per la certificazione del personale, delle macchine, dei materiali e delle attrezzature.

Infine, vengono riportate delle analisi dettagliate per quanto concerne il confronto tra due tipologie differenti di materiali. Per prima cosa si confrontano l'ULTEM 9085 e l'ULTEM 2400, cioè due materiali polimerici ed in particolare il primo risulta essere l'unico certificato NCAMP e quindi è fondamentale per confrontare le caratteristiche degli altri materiali e per osservare quello che deve essere il processo certificativo per l'ottenimento delle parti.

La stessa analisi viene condotta anche per due materiali metallici l'Al7075 e l'AlSi10Mg. In questo modo si effettua il confronto tra le caratteristiche di un materiale utilizzato tramite metodologie standard di realizzazione ed un materiale tipicamente impiegato per l'Additive Manufacturing.

Parole chiave: Additive Manufacturing, Certificazione, NCAMP, Polveri, Materiali metallici e polimerici, AlSi10Mg, ULTEM 9085, Proprietà fisiche e meccaniche, Microstruttura, Difetti.

ABSTRACT

In this work, we consider the analysis and comparison of Additive Manufacturing materials and the characterization of certification processes for both metallic and polymeric materials.

The analysis begins by considering the history and development of the Additive over time and the techniques most used for production are taken into consideration, without forgetting the characterization of the powders and the types of machines used to make 3D components.

The microstructure and defects present in materials made through Additive Manufacturing are also considered; the microstructure of the main metallic materials is considered (AlSi10Mg, AISI 316L, Inconel 625 and 718 and Ti6Al4V). About defects, all the main parameters are considered, such as porosity, surface finish and anisotropy.

Subsequently, some properties are reported for the main materials used in the AM field, distinguishing them between metallic and polymeric materials, used above all in the aerospace field and, in case of metallic materials, the differentiation between standard manufacturing methods and methods for 3D printing.

The work also includes a report on the certification of components made in additive manufacturing, trying to evaluate the roadmap for obtaining a component in AM. An assessment is carried out for the certification of personnel, machines, materials, and equipment.

Finally, detailed analyses are reported regarding the comparison between two different types of materials. First of all we compare the ULTEM 9085 and ULTEM 2400, that is two polymeric materials and in particular the first is the only NCAMP certified and therefore it's essential for comparing the characteristics of the other materials and to observe what the certification process for obtaining parts.

The same analysis is also conducted for two metal materials, Al7075 and AlSi10Mg. In this way, a comparison is made between the characteristics of a material that uses standard manufacturing methods and a material typically used for AM.

Keywords: Additive Manufacturing, Certification, NCAMP, Powders, Metallic and polymeric materials, AlSi10Mg, ULTEM 9085, Physical and mechanical properties, Microstructure, Defects.

INDICE

1. INTRODUZIONE ALL'ADDITIVE MANUFACTURING	10
1.1 Storia dell'Additive Manufacturing	10
1.2 Panoramica sull'Additive Manufacturing	13
1.3 Tecniche di produzione Additive Manufacturing	16
1.3.1 Powder Bed Deposition (PBF).....	17
1.3.2 Selective Laser Melting (SLM).....	18
1.3.3 Electron Beam Melting (EBM)	20
1.3.4 Direct Metal Deposition (DMD).....	22
1.3.5 Selective Laser Sintering (SLS)	24
1.3.6 Fused Deposition Modeling (FDM).....	25
1.3.7 Stereolitografia (SLA).....	27
1.3.8 Stampa ad iniezione	28
1.4 Tipologie di macchine per la produzione additiva	28
1.5 Caratterizzazione delle polveri per l'Additive Manufacturing	31
2. MICROSTRUTTURA E DIFETTI NEI MATERIALI	38
2.1 Microstruttura dei materiali Additive Manufacturing	38
2.1.1 AlSi10Mg.....	38
2.1.2 AISI 316L	40
2.1.3 Inconel 625 e 718	43
2.1.4 Ti6Al4V.....	44
2.2 Analisi sulla geometria	44
2.3 Preriscaldamento del materiale	45
2.4 Post-lavorazione termica.....	45
2.5 Finitura superficiale	46
2.6 Porosità.....	47
2.7 Strategia di scansione.....	51
2.8 Tensioni residue	52
2.9 Anisotropia	52
2.10 Altri tipi di difetti in base al materiale.....	53
2.11 Valutazione non distruttiva	55
3. ANALISI E PROPRIETÀ DEI MATERIALI.....	58

3.1 ULTEM 2400	58
3.2 ULTEM 9085	65
3.3 Confronto delle proprietà tra ULTEM 9085 e ULTEM 2400	70
3.4 Stainless Steel 316L	71
3.4.1 Metodi standard	71
3.4.2 Additive Manufacturing	79
3.5 AlSi10Mg	84
3.5.1 Metodi standard	84
3.5.2 Additive Manufacturing	87
3.6 Ti6Al4V	91
3.6.1 Metodi standard	91
3.6.2 Additive Manufacturing	95
3.7 Inconel 625	103
3.7.1 Metodi standard	103
3.7.2 Additive Manufacturing	109
3.8 Inconel 718	112
3.7.1 Metodi standard	112
3.7.2 Additive Manufacturing	114
3.9 Life cycle costing	120
3.9.1 Preventivo per la realizzazione di un provino	124
4. CERTIFICAZIONE PER L'ADDITIVE MANUFACTURING	127
4.1 Certificazione ISO 9001	129
4.2 Procedure operative standard NCAMP (SOP)	131
4.3 Panoramica del processo certificativo per parti in AM	134
4.4 Attività di normazione relativa all'additive	137
4.5 Roadmap sugli standard Additive Manufacturing	141
4.5.1 Piano di lavoro e roadmap per ASTM ed ISO	141
4.5.2 Aree prioritarie sugli standard AM	143
4.5.3 Dettaglio di alcune delle principali normative	144
4.6 Certificazione per personale, macchine, materiali e attrezzature	148
4.6.1 Qualifiche per gli operatori	148
4.6.2 Fornitura, consegna, installazione e messa in servizio di una macchina	151
4.6.3 Certificazione dei materiali	154
4.6.4 Qualificazione delle apparecchiature	161

4.7	Analisi delle lacune e delle barriere di standardizzazione AM.....	165
4.8	Percorso certificativo per l'AICS	167
4.9	Sintesi dei requisiti certificativi	172
5.	CERTIFICAZIONI E PROPRIETÀ PER ULTEM 9085 E 2400	174
5.1	Introduzione alla certificazione dell'ULTEM 9085	174
5.2	Processo produttivo ULTEM 9085.....	174
5.2.1	Scopo	174
5.2.2	Standard ASTM	175
5.2.3	Manutenzione e controllo della macchina.....	176
5.2.4	Proprietà fisiche del filamento	176
5.2.5	Proprietà fisiche del campione come stampato.....	177
5.2.6	Proprietà meccaniche del campione come stampato.....	177
5.2.7	Formato di denominazione dei campioni NIAR.....	178
5.3	Risultati dei test per il materiale polimerico prodotto in AM.....	181
5.4	Procedure certificative per ULTEM 9085	184
5.4.1	Inizializzazione	184
5.4.2	Fabbricazione.....	186
5.4.3	Rimozione della parte.....	186
5.4.4	Rimozione del supporto	187
5.4.5	Identificazione e conservazione delle parti fabbricate.....	187
5.5	Garanzia di qualità e controllo delle ispezioni	187
5.5.1	Test e controllo di qualità.....	187
5.5.2	Ispezione visiva	188
5.5.3	Conservazione della qualifica	197
5.5.4	Garanzia di qualità	198
5.5.5	Posizioni rappresentative dei fogli di costruzione.....	198
5.6	Procedure certificative per lo stampaggio ad iniezione.....	204
5.6.1	Campionatura	204
5.6.2	Produzione.....	204
5.6.3	Qualità	204
5.6.4	Analisi dei due metodi: DSC e TGA	205
6.	CERTIFICAZIONE E PROPRIETÀ PER AL7075 E ALSI10MG	207
6.1	Caratteristiche generali per l'Al7075	207
6.2	Qualificazione del processo per l'Al7075	209

6.2.1 Classificazione, applicabilità e limitazioni.....	209
6.2.2 Documenti applicabili.....	209
6.2.3 Requisiti generali.....	210
6.2.4 Caratteristiche degli impianti ed attrezzature.....	211
6.2.5 Procedure di processo e controllo.....	213
6.2.6 Personale impiegato nell'attività.....	214
6.2.7 Requisiti di qualificazione e riqualificazione del processo.....	214
6.2.8 Processo.....	214
6.2.9 Controllo dei requisiti del processo e delle parti.....	220
6.2.10 Controlli.....	221
6.2.11 Criteri di accettazione.....	222
6.3 Caratteristiche dell'AlSi10Mg.....	229
6.3.1 Proprietà meccaniche di parti in AlSi10Mg prodotte tramite SLM.....	229
6.3.2 Trattamenti termici.....	230
6.3.3 Materiali e parametri per il processo SLM.....	232
6.3.4 Valutazione della scorrevolezza e della densità di impacchettamento.....	234
6.3.5 Resistenza a trazione dei campioni AlSi10Mg.....	235
6.3.6 Resistenza a fatica.....	238
6.4 Confronto delle proprietà tra Al7075 e AlSi10Mg.....	240
6.5 Dimensionamento del cassone alare.....	241
CONCLUSIONI.....	246
BIBLIOGRAFIA.....	247
APPENDICE I.....	251
FORTUS380 e 450.....	251
EOSINT M400.....	252
TruPrint 1000.....	254
Altre tipologie di macchine 3D.....	256
APPENDICE II.....	257
ANTERO 800NA (PEEK).....	257
Digital ABS.....	261
Nylon 12.....	262
TPU 92A.....	265
PC.....	266

ULTEM 1010	268
Comparazione dei materiali per l'additive manufacturing	270
Maraging steel M300	270
Comparazione dei materiali per l'additive manufacturing	272
APPENDICE III.....	273
Stabilimento dei materiali ammessi.....	273
Dati di progetto	273
Procedure di prova	276

1. INTRODUZIONE ALL'ADDITIVE MANUFACTURING

1.1 Storia dell'Additive Manufacturing

L'idea di realizzare dei componenti metallici partendo dalle polveri fuse, attraverso l'utilizzo di un fascio laser, nasce nel 1971. In quell'anno, il francese Pierre Ciraud, brevettò una tecnica di produzione che determinava il deposito di uno strato di materiale sottoforma di polvere, su un substrato e a quel punto si aveva la solidificazione del materiale attraverso un fascio di energia.

Nonostante questa tecnica sia molto differente rispetto alle moderne tecnologie di stampa additiva, il processo di Ciraud si avvicina molto ad essa, infatti si riescono a produrre parti estremamente complesse, senza dover utilizzare stampi per la colata. Tuttavia, l'idea non fu commercializzata, perché sia la tecnologia laser che quella dei computer era ancora agli albori.

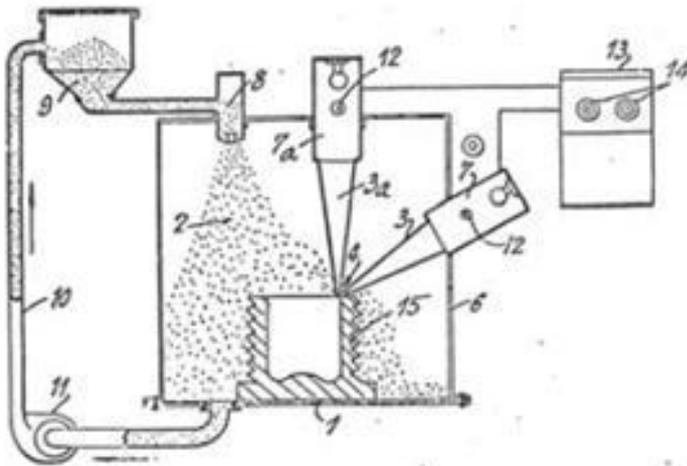


Fig. 1.1: immagine del processo di Ciraud, relativa al deposito della polvere di materiale

Ross Housholder, nel 1977, registrò il brevetto relativo ad una tecnologia che per la prima volta si focalizzava sulla stratificazione dei layer, in quanto l'oggetto veniva realizzato fondendo un primo strato di materiale, a cui ne venivano sovrapposti altri fino a quando non si otteneva il pezzo. In figura 1.2, si osserva come questa invenzione si avvicini molto al processo additive manufacturing moderno; tuttavia, anche in questo caso, come per il processo di Ciraud, non fu possibile l'utilizzo di questa tecnica a causa degli elevatissimi costi dei laser.

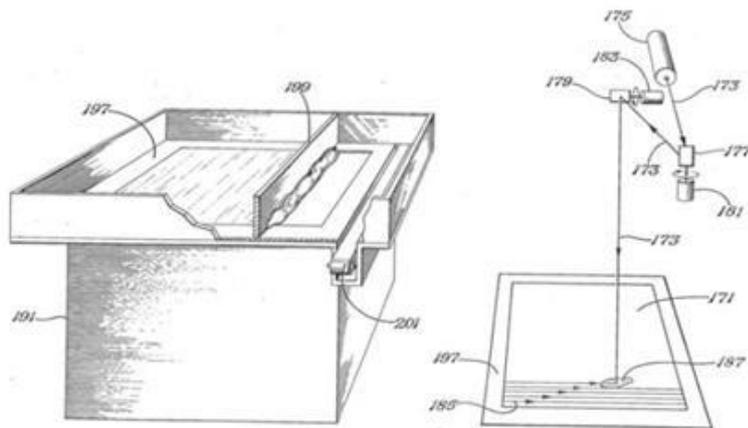


Fig. 1.2: immagine della tecnica di Housholder relativa alla stratificazione dei layer

Nel 1984 venne depositato il brevetto di Chuck Hull per permettere la diffusione della tecnologia descritta al suo interno, inoltre fu lui il fondatore della 3D Systems. Nel brevetto c'era il dettaglio del metodo di lavoro e la strumentazione necessaria all'ottenimento di oggetti tridimensionali realizzati tramite la sovrapposizione degli strati. Le prime applicazioni utilizzavano una resina liquida, ma Hull intuì che tale processo non doveva essere limitato ai soli liquidi, per cui riportò nel brevetto un concetto più generico di "stereolitografia", cioè una tecnica di stampa tridimensionale che poteva essere estesa a tutti quei materiali capaci di modificare il proprio stato fisico e solidificare. Solo in un secondo tempo si utilizzò la polvere come materiale di partenza. Infatti, nel 1997 la 3D Systems sosteneva che la stereolitografia utilizzasse un mezzo liquido, mentre un'altra tecnologia di stereolitografia, nota come Selective Laser Sintering (SLS), si basa sulla solidificazione di strati tramite un mezzo in polvere.

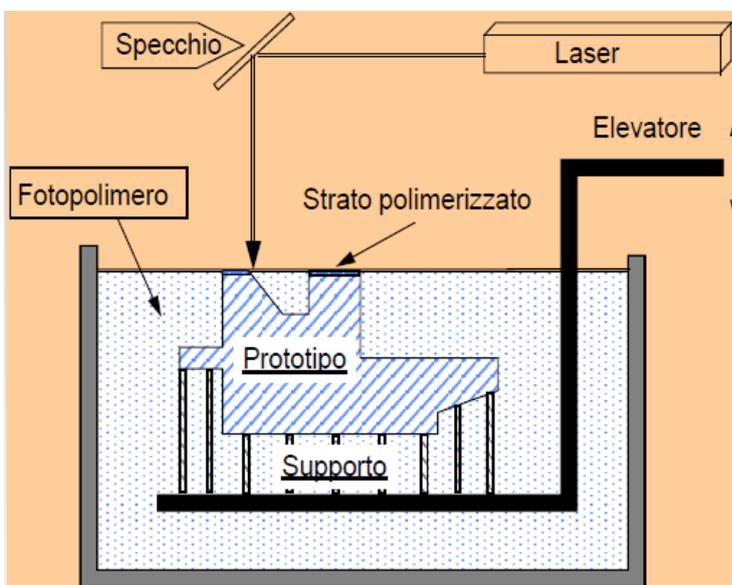


Fig. 1.3: schema della stereolitografia

Con questa tecnica ogni strato viene ottenuto tramite una sorgente laser, che è in grado di azionare in modo selettivo, in conformità con la geometria dello strato da realizzare, la reazione termoindurente di un fotopolimero liquido. A quel punto la piattaforma di lavoro, che è immersa all'interno del materiale liquido, si abbassa di una certa quantità, in modo tale da permettere la lavorazione di un nuovo strato. Il principio alla base di questa invenzione, cioè la creazione di un oggetto fisico tramite una sequenza di strati sovrapposti, venne utilizzato anche nelle tecniche successive ed è attualmente ancora in uso.

Sempre nel 1997, la EOS decise di acquisire la 3D Systems e tutti i brevetti relativi alla tecnologia SLS. I file STL suddividono il disegno CAD in sezioni orizzontali che vengono inviate alla stampante per la produzione dell'oggetto. Attualmente la EOS possiede i principali brevetti relativi alla tecnologia di sinterizzazione laser e si è imposta sul mercato grazie alla realizzazione del sistema laser sintering denominato EOSINT M250, che risale al 1994 e della sua versione aggiornata, cioè l'EOSINT M270 del 2004.

Carl Deckard, Joe Beaman e Paul Forderhase, tramite lo studio della stereolitografia, idearono, nel 1986, la Selective Laser Sintering (che era stata introdotta in precedenza), questa tecnica è simile a quella osservata in precedenza, ma il fotopolimero liquido è rimpiazzato da un termoplastico in polvere. Il processo determina che una sorgente laser, avente una potenza maggiore rispetto alla tecnica precedentemente utilizzata, fonda in maniera selettiva lo strato di polvere interessato; dopo di che la piattaforma di lavoro si abbassa di una certa quantità ed un rullo deposita un nuovo strato di polvere già predisposto per la nuova lavorazione. Rispetto alla stereolitografia si hanno due vantaggi principali: è possibile realizzare parti definite in materiale termoplastico, inoltre si ha grande facilità nel rimuovere i supporti costituiti dalla polvere non fusa.

Nel 1988 Scott Crump depositò il brevetto sulla Fused Deposition Modeling (FDM). Questa tecnologia permette di ottenere diversi strati sovrapposti uno sull'altro tramite la deposizione di un filamento di materiale termoplastico presente all'interno di una bobina e successivamente viene estruso. L'estrusione è consentita attraverso due testine: una per il materiale del componente e l'altra per quello del supporto. Anche in questo processo il vantaggio principale è quello di poter utilizzare un materiale termoplastico che permette di ottenere parti definitive.

Nel 1993 il professor Emanuel Sachs del MIT (Massachusetts Institute of Technology), ideò la Three Dimensional Printing, una tecnologia di stampa che permette di ottenere elementi colorati in modo tale da avere una foto più realistica. Il limite è insito nel materiale utilizzato perché non consente la realizzazione di parti definitive e relega l'utilizzo di questa tecnica soltanto alla prototipazione concettuale.

Un anno fondamentale per l'Additive Manufacturing è stato il 1995, infatti per la prima volta la tecnologia consentì la fusione di polveri di metallo e di realizzare oggetti con una densità comparabile a quella ottenibile tramite l'industria tradizionale. Tale risultato è stato ottenuto tramite la tecnica del Selective Laser Melting (SLM), che è stata sviluppata dal Fraunhofer Institute.

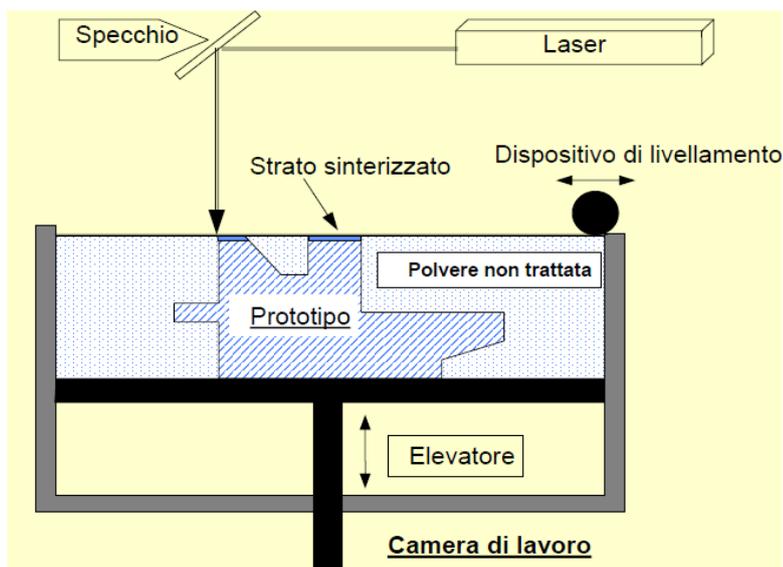


Fig. 1.4 Schema Selective Laser Melting

Infine, nel 2002, venne sviluppato l'Electron Beam Melting (EBM), la tecnologia consiste nel bombardare tramite un fascio di elettroni, opportunamente focalizzato ed accelerato, uno layer di polvere metallica, nell'impatto l'energia cinetica si trasforma in energia termica e questo determina la completa fusione delle polveri, determinando una densità ancora più elevata rispetto al SLM.

1.2 Panoramica sull'Additive Manufacturing

In generale per ottenere un componente attraverso Additive Manufacturing (AM) bisogna considerare il seguente processo produttivo:

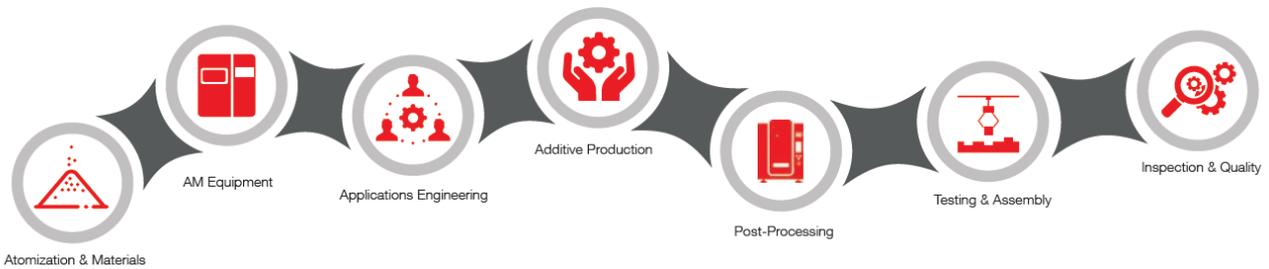


Fig. 1.5: ciclo produttivo per la realizzazione di un componente AM

	Polymers		Metals			
Process Technology	Polymer PBF	Material Extrusion	Laser PBF	Electron PBF	Directed Energy Deposition	Hybrid DED/CNC
Production Materials	Polyamides PAEKs	Ultem® Polyamide 12	17-4 PH 15-5 PH 316L Tool Steel Ti 6-4 Ti 6-4 ELI Ti CP IN718 IN625 HAS X AlSi10Mg CoCrMo	CoCrMo Ti 6-4 Ti 6-4 ELI Ti CP IN718 TiAl	Ti 6-4 Ti 6-4 ELI Ti CP Ti 6-2-4-2 13-8 17-4 PH 304 316L 410 420 4047 IN625 IN718 Tool Steel	Same as DED?
Applications	Ducts Brackets Fixtures UAV parts	Brackets Composite Tooling	Near Net Shape Parts	Part Preforms	Part Repair/Large Parts	TBD

Tabella 1.1: materiali e processi per l'AM

Da quello che si evince dalla tabella 1.1 si osserva che ci sono due categorie principali, cioè i polimeri e i metalli. All'interno si può osservare un'ulteriore suddivisione in base al tipo di lega o di polimero usata:

1) Metalli

- Leghe di titanio:
 - ✓ Ti-6Al-4V;
 - ✓ Ti64_grade5;
 - ✓ Ti64_grade23;
- Leghe di alluminio:

- ✓ AISi10Mg;
- ✓ AIF357;
- Acciai:
 - ✓ 17-4PH;
 - ✓ 15-5PH;
 - ✓ Maraging Steel M300;
 - ✓ StainlessSteel 316L;
- Superleghe di nichel:
 - ✓ Inconel 625;
 - ✓ Inconel 718.

2) Polimeri termoplastici

- ULTEM 1010;
- ULTEM 9085;
- ANTERO 800NA (PEKK): Polieterchetonchetone;
- ASA: Acrilo Nitrile Stirene Acrilato;
- Digital ABS: Acrilonitrile Butadiene Stirene;
- Nylon 6;
- Nylon 12;
- Nylon 12CF;
- TPU 92A: Poliuretano Termoplastico;
- PC: Policarbonato;
- PC-ABS: Policarbonato/Acrilonitrile Butadiene Stirene;
- PLA: Acido Polilattico;
- PPSF: Polyphenylsulfone.

Dopo aver sottolineato i materiali polimerici più utilizzati in ambito aerospaziale bisogna effettuare una primissima analisi sulle caratteristiche di questi materiali e sulle differenze di ognuno di essi. Ad esempio, se si vuole avere una resistenza a rottura elevata bisogna considerare il PVA, mentre in termini di durabilità i più performanti sono l'ASA e il Policarbonato.

	 ABS Learn More	 Flexible Learn More	 PLA Learn More	 HIPS Learn More	 PETG Learn More	 Nylon Learn More	 Carbon Fiber Filled Learn More	 ASA Learn More	 Polycarbonate Learn More	 Polypropylene Learn More	 Metal Filled Learn More	 Wood Filled Learn More	 PVA Learn More
<input type="checkbox"/> Compare Selected	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ultimate Strength	40 MPa	26 - 43 MPa	65 MPa	32 MPa	53 MPa	40 - 85 MPa	45 - 48 MPa	55 MPa	72 MPa	32 MPa	20 - 30 MPa	46 MPa	78 MPa
Stiffness	5 / 10	1 / 10	7.5 / 10	10 / 10	5 / 10	5 / 10	10 / 10	5 / 10	6 / 10	4 / 10	10 / 10	8 / 10	3 / 10
Durability	8 / 10	9 / 10	4 / 10	7 / 10	8 / 10	10 / 10	3 / 10	10 / 10	10 / 10	9 / 10	4 / 10	3 / 10	7 / 10
Maximum Service Temperature	98 °C	60 - 74 °C	52 °C	100 °C	73 °C	80 - 95 °C	52 °C	95 °C	121 °C	100 °C	52 °C	52 °C	75 °C
Coefficient of Thermal Expansion	90 µm/m·°C	157 µm/m·°C	68 µm/m·°C	80 µm/m·°C	60 µm/m·°C	95 µm/m·°C	57.5 µm/m·°C	98 µm/m·°C	69 µm/m·°C	150 µm/m·°C	33.75 µm/m·°C	30.5 µm/m·°C	85 µm/m·°C
Density	1.04 g/cm ³	1.19 - 1.23 g/cm ³	1.24 g/cm ³	1.03 - 1.04 g/cm ³	1.23 g/cm ³	1.06 - 1.14 g/cm ³	1.3 g/cm ³	1.07 g/cm ³	1.2 g/cm ³	0.9 g/cm ³	2 - 4 g/cm ³	1.15 - 1.25 g/cm ³	1.23 g/cm ³
Price (per kg)	\$10 - \$40	\$30 - \$70	\$10 - \$40	\$24 - \$32	\$20 - \$60	\$25 - \$65	\$30 - \$80	\$38 - \$40	\$40 - \$75	\$60 - \$120	\$50 - \$120	\$25 - \$55	\$40 - \$110
Printability	8 / 10	6 / 10	9 / 10	6 / 10	9 / 10	8 / 10	8 / 10	7 / 10	6 / 10	4 / 10	7 / 10	8 / 10	5 / 10
Extruder Temperature	220 - 250 °C	225 - 245 °C	190 - 220 °C	230 - 245 °C	230 - 250 °C	220 - 270 °C	200 - 230 °C	235 - 255 °C	260 - 310 °C	220 - 250 °C	190 - 220 °C	190 - 220 °C	185 - 200 °C
Bed temperature	95 - 110 °C	45 - 60 °C	45 - 60 °C	100 - 115 °C	75 - 90 °C	70 - 90 °C	45 - 60 °C	90 - 110 °C	80 - 120 °C	85 - 100 °C	45 - 60 °C	45 - 60 °C	45 - 60 °C
Heated Bed	Required	Optional	Optional	Required	Required	Required	Optional	Required	Required	Required	Optional	Optional	Required
Recommended Build Surfaces	Kapton Tape, ABS Slurry	PEI, Painter's Tape	Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	Glass Plate, Glue Stick, Kapton Tape	Glue Stick, Painter's Tape	Glue Stick, PEI	Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	Glue Stick, PEI	PEI, Commercial Adhesive, Glue Stick	Packing Tape, Polypropylene Sheet	Painter's Tape, Glue Stick, PEI	Painter's Tape, Glue Stick, PEI	PEI, Painter's Tape
Other Hardware Requirements	Heated Bed, Enclosure Recommended	Part Cooling Fan	Part Cooling Fan	Heated Bed, Enclosure Recommended	Heated Bed, Part Cooling Fan	Heated Bed, Enclosure Recommended, May Require All Metal Hotend	Part Cooling Fan	Heated Bed	Heated Bed, Enclosure Recommended, All Metal Hotend	Heated Bed, Enclosure Recommended, Part Cooling Fan	Wear Resistant or Stainless Steel Nozzle, Part Cooling Fan	Part Cooling Fan	Heated Bed, Part Cooling Fan

Tabella 1.2: caratteristiche di alcuni materiali usati per l'AM

È importante sottolineare non soltanto le caratteristiche meccaniche, fisiche e termiche, ma è molto importante sottolineare lo sviluppo progressivo della produzione additiva nel tempo. In particolare, si evince che fino al 2010 le pubblicazioni sono sempre state bassissime se non addirittura nulle, mentre negli ultimi anni la produzione additiva è diventata sempre più importante e ciò risulta anche dall'aumento esponenziale delle pubblicazioni.

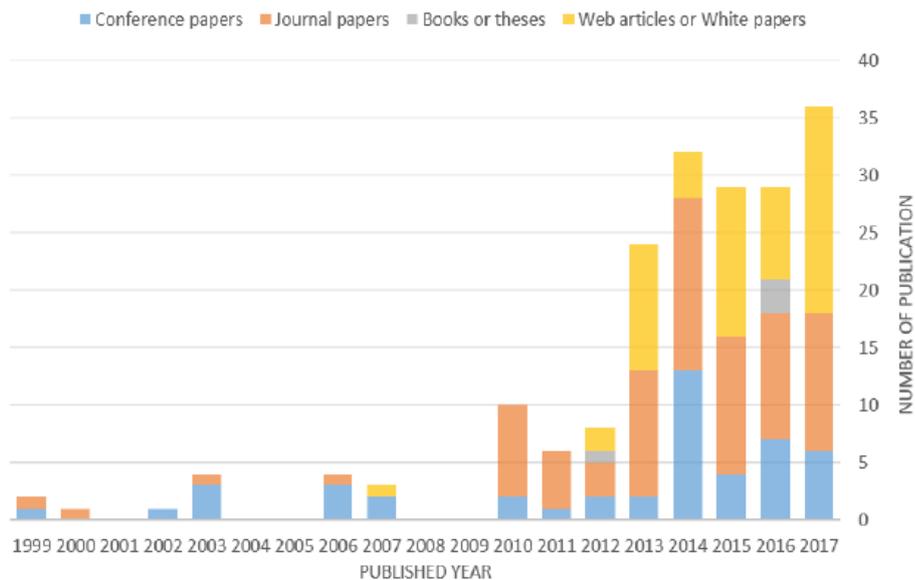


Fig. 1.6: aumento delle pubblicazioni relative all'AM nel tempo

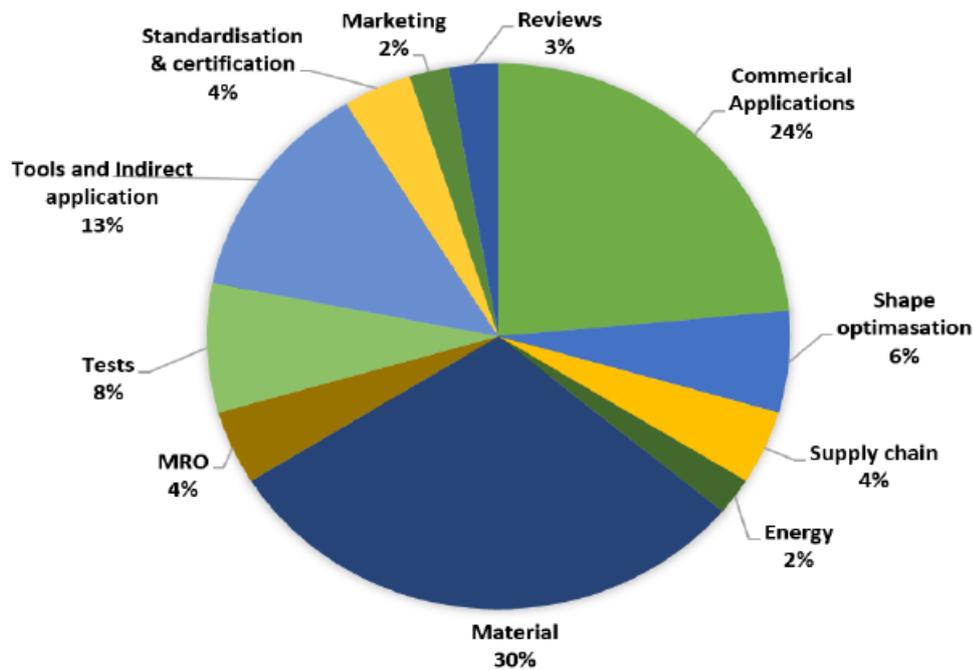


Fig. 1.7: argomenti trattati nelle varie pubblicazioni

1.3 Tecniche di produzione Additive Manufacturing

La produzione additiva in metallo è un processo che consente di partire da un modello CAD e di creare un oggetto 3D sovrapponendo, uno dopo l'altro, i sottili strati di polvere metallica. Questa tecnologia può produrre forme complesse, che altrimenti sarebbero impossibili da ottenere con metodi di fusione o tecniche sottrattive come fresatura o elettroerosione. Di seguito sono riportati i vantaggi di questa tecnica:

- Produzione di geometrie complesse, ad esempio strutture trabecolari e canali conformi per ottimizzare le prestazioni;
- Consolidamento di più pezzi per ridurre il numero di componenti; si ha più affidabilità e meno magazzino;
- Strumento complementare: può essere integrato nei processi di produzione esistenti per ridurre il numero di passaggi, i tempi di commercializzazione e i costi;
- Creazione di componenti personalizzati o su misura per ottimizzare le prestazioni;
- Leggerezza: consente di introdurre solo il materiale realmente necessario, con una significativa riduzione degli sprechi;
- Riduzione dei costi di attrezzatura: fabbricazione diretta dei pezzi senza bisogno di attrezzature e stampi;
- Iterazioni di progetto rapide direttamente in produzione.

È importante anche la panoramica del processo di produzione additiva di un metallo:

- Il modello CAD 3D del componente viene trasformato in strati bidimensionali, con uno spessore solitamente compreso tra 30 e 100µm;
- Un sottile strato di polvere viene distribuito sulla piastra di base e il laser inizia a fondere in modo selettivo le aree di polvere che corrispondono ad una sezione 2D dei dati CAD del pezzo;

- La piastra di base si sposta in basso e un altro strato di polvere viene distribuito sopra il primo. Il processo viene ripetuto fino all'ottenimento del componente 3D in metallo;
- Le lavorazioni successive possono includere interventi di sabbiatura, trattamento termico e lavorazioni di finitura, in base alle necessità.

Per avere risultati ottimali con qualsiasi metodo di fabbricazione, i progettisti devono trovare il giusto compromesso tra i requisiti dell'applicazione e i limiti imposti dal processo. La produzione additiva non fa eccezione e anche se la fusione laser a letto di polvere garantisce una maggiore libertà, bisogna conoscerne i limiti. DfAM è un sottoinsieme rispetto al DfM (Design for Manufacturing), che ha lo scopo di ridurre i tempi di produzione e a ridurre gli scarti di materiale e il numero di revisioni di progetto prima dell'introduzione sul mercato di un prodotto. La produzione additiva offre la possibilità di generare pezzi semi-finiti, con significativa riduzione dei requisiti di post processo e conseguente accelerazione dello sviluppo. Rimane la necessità di considerare i processi a valle, come ad esempio i trattamenti termici, le lavorazioni, i trattamenti superficiali, l'anodizzazione e così via. Di seguito sono riportate le caratteristiche dei prodotti pensati per la produzione additiva:

- Tengono conto fin dalle prime fasi di progetto dell'orientamento di costruzione;
- Riducono al minimo il numero di superfici che richiedono supporti;
- Prendono in considerazione i processi a valle;
- Sfruttano la libertà di aumentare la complessità senza aumentare i costi.

Per massimizzare le prestazioni si utilizzano le seguenti polveri metalliche:

- Lega di alluminio: AlSi10Mg;
- Cobalto-cromo;
- Acciaio Maraging;
- Leghe di nichel: Inconel 625 e 718;
- Acciaio inox 316L;
- Leghe di titanio: Ti6Al4V.

Le caratteristiche delle polveri sono fondamentali per una buona fusione laser del letto di polvere. Scorrevolezza, compattazione e morfologia delle particelle sono le caratteristiche fondamentali che consentono dosaggi e fusioni delle polveri ripetibili e prevedibili.

Il software QuantAM per la preparazione dei file permette di elaborare in modo semplice e rapido i modelli CAD. QuantAM dispone di strumenti potenti ed intuitivi per lo sviluppo dei processi e si integra perfettamente con il software di controllo per assicurare un rapido accesso ai dati di processo. Il software QuantAM guida l'utente durante le quattro fasi della preparazione, per creare file leggibili dal sistema di produzione additiva e consentire l'uso di un'ampia varietà di materiali. Di seguito sono elencate le fasi di preparazione della costruzione:

- Orientamento: impostazione dell'angolo del componente in relazione alla piastra di base;
- Supporto: applicazione di materiale per supportare il componente sulla piastra di base;
- Layout: disposizione rapida dei componenti sulla piastra di base, per ottimizzare lo spazio;
- Sezioni: generazione del codice macchina e visualizzazione diretta dei percorsi di scansione dei dati di esposizione.

1.3.1 Powder Bed Deposition (PBF)

La Powder Bed Deposition (PBF) prende in considerazione tutti quei processi che si servono di un metodo di focalizzazione dell'energia, che sia un fascio di elettroni o un fascio laser, per poter fondere in modo

selettivo uno strato di un letto di polvere. Attraverso la rifusione si ha l'adesione dello strato al resto della parte.

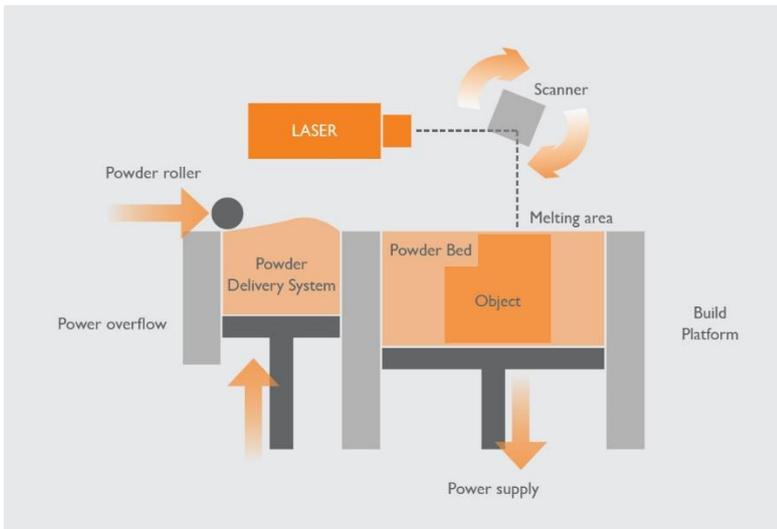


Fig. 1.8: processo produttivo PBF

Le due sottocategorie SLM ed EBM, anche se utilizzano entrambi il principio del letto di polvere per la fusione selettiva a livello di strati, presentano delle differenze significative nella configurazione dell'hardware. Il sistema EBM presenta (come si vedrà meglio nel paragrafo 1.3.3) un fascio di elettroni a scansione ad elevata potenza, che utilizza bobine magnetiche per far coincidere e deviare il fascio spazialmente. L'SLM (analizzato nel dettaglio nel paragrafo 1.3.2) ha in genere un sistema di controllo per osservare il percorso del laser e la sua focalizzazione, lenti e uno specchio o un galvanometro per la posizione del raggio; anche la suddivisione delle polveri viene gestita diversamente. I sistemi SLM utilizzano generalmente un sistema di alimentazione e lame di distribuzione che portano la polvere sulla superficie di costruzione, mentre i sistemi EBM adoperano tramogge (apparecchio costituito essenzialmente da un recipiente a pareti inclinate munito di un'apertura sul fondo, chiusa da un portellino) di polvere e un rastrello metallico.

Una macchina PBF necessita di un substrato di costruzione che è la piastra iniziale per dare supporto meccanico e termico al materiale di costruzione. Il processo SLM elabora e blocca il substrato mentre quello EBM sinterizza la polvere che circonda la piastra per fornire maggiore stabilità. Quando vengono stesi gli strati successivi della polvere, gli strati già esistenti non devono muoversi; il substrato aiuta con la funzione di supporto meccanico. Ha anche una funzione di scarico termico per dissipare il calore. Il funzionamento di una macchina PBF è regolato dai dettagli del metodo di scansione e dai parametri di processo. A quel punto il processo di costruzione è completato e si procede con la rimozione della polvere in eccesso dalla camera di costruzione.

Per quanto riguarda le parti prodotte con EBM, in questo caso la polvere passa attraverso un recovery-system per togliere e recuperare la polvere sinterizzata vicino alle pareti. Per i processi SLM, la polvere intorno alle parti non si sinterizza e può essere setacciata direttamente.

1.3.2 Selective Laser Melting (SLM)

La tecnologia Selective Laser Melting (SLM) costituisce una variante principale dei processi di stampaggio 3D che si basa sul deposito e successiva fusione del letto di polvere attraverso un fascio laser. La

realizzazione delle parti si effettua all'interno di una camera in atmosfera controllata ricca di azoto o argon al fine di ridurre il più possibile la formazione di ossidi e il conseguente infragilimento sui prodotti ottenuti. Attualmente, questa tecnologia, considerando adeguati accorgimenti durante il processo, è in grado di produrre componenti con una densità molto vicina al 100% e senza la presenza di porosità. Questa tecnica si può considerare in alternativa ai più tradizionali processi di lavorazione tramite deformazione plastica e processi di fonderia; in tutti e due i casi per l'ottenimento del componente bisogna considerare uno strato di sovrametallo nelle zone di accoppiamento, in questo modo si garantisce la successiva finitura superficiale realizzata attraverso lavorazioni con asportazione di truciolo.

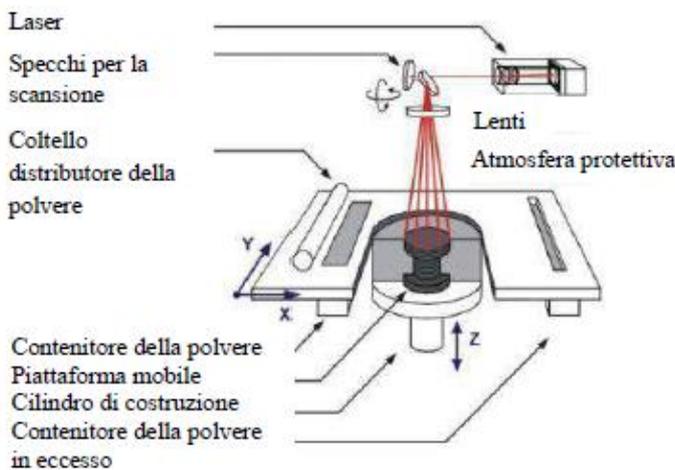


Fig. 1.9: schema per il Selective Laser Melting

Il processo si sviluppa con la deposizione del primo strato di polvere su una piattaforma mobile per mezzo di un coltello distributore, per poi avere la fusione del layer tramite un fascio laser. Una volta raffreddato e solidificato la piattaforma si abbassa tramite un apposito cilindro permettendo la deposizione di un secondo strato di polvere che viene fuso a sua volta e lasciato raffreddare. Questo procedimento si ripete fino a quando l'oggetto viene ultimato e tutta la polvere non fusa viene raccolta in un apposito contenitore per poter essere riutilizzata. Nel processo SLM non è previsto il preriscaldamento del letto di polvere, infatti viene portato direttamente a fusione partendo dalla temperatura ambiente, per questo motivo si hanno degli effetti contrastanti:

- I grani, quando sono fusi, presentano un grande sbalzo termico se portati alla temperatura ambiente; la solidificazione effettuata con grande rapidità determina la nascita di grani di piccole dimensioni e ciò permette di ottenere componenti con proprietà meccaniche più elevate rispetto a quelle ottenibili tramite fonderia o deformazione plastica.
- Il grande salto termico, però, determina un elevato ritiro del materiale; per evitare il distacco del componente dalla base su cui è situato, è fondamentale inserire una piattaforma di lavoro che abbia un materiale compatibile con quello delle particelle metalliche.
- Un'altra possibile conseguenza del forte sbalzo termico è la nascita di tensioni residue dentro il materiale; per la loro rimozione bisogna sottoporre a successivi trattamenti termici il pezzo realizzato.

Una volta conclusa la lavorazione, si rimuove la piattaforma di lavoro che può essere fusa e riutilizzata; questa fase risulta essere complicata perché si utilizza un materiale resistente in grado di impedire il distacco del componente.

La potenza del fascio laser assume i valori tra i 20 e i 1000W e tra 20 e 100μm per lo spessore del layer; la velocità di scansione invece può arrivare fino a 15m/s. Il diametro del laser a livello della polvere è di 150-

180µm e solitamente c'è la sovrapposizione tra le passate. I materiali utilizzati sono: lega di alluminio, AlSi10Mg; Cobalto-Cromo; acciaio per stampi; acciaio inox; lega di titanio, Ti6Al4V; Inconel 625 e Inconel 718.

I vantaggi principali di questa tecnologia sono: la possibilità di ottenere componenti in materiale definitivo; l'elevata produttività; la possibilità di realizzare componenti con una qualità superiore rispetto a quelli tradizionali come la fonderia o la deformazione plastica; infine, si ha uno stato di avanzamento tecnologico superiore rispetto alle altre tecniche di Additive Manufacturing per i metalli. Un limite difficile da superare si osserva nel volume massimo situato a circa mezzo metro cubo; la motivazione è dettata dall'elevato peso del cubo metallico che non consente in modo banale gli spostamenti millesimali fondamentali per l'elevatore per effettuare il processo di costruzione. La SLM viene utilizzata anche per l'ottenimento di stampi, anche se si ha un costo superiore del 10-15% rispetto agli stampi ottenuti tramite tecniche tradizionali, ma con questo processo si ottiene una produttività ed una qualità superiore.

1.3.3 Electron Beam Melting (EBM)

La tecnologia Electron Beam Melting (EBM) costituisce una variante principale dei processi di stampaggio 3D che si basa sul deposito e successiva fusione di un letto di polvere mediante un fascio di elettroni. Il processo si basa sulla deposizione del primo strato di polvere sopra una piattaforma mobile tramite l'aiuto di un coltello distributore, seguito da un veloce preriscaldamento della polvere attraverso un fascio di elettroni non focalizzato e successivamente la fusione dello stesso con un fascio focalizzato.

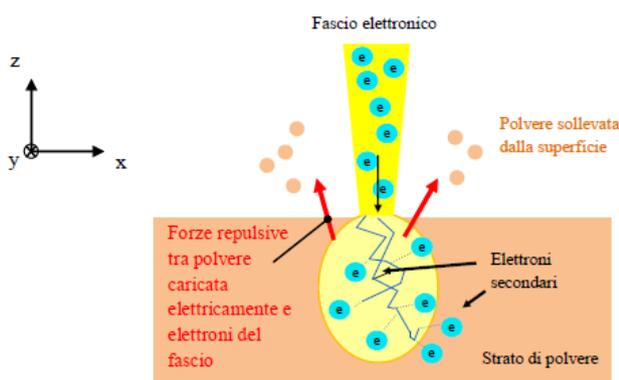


Fig. 1.10: preriscaldamento della polvere

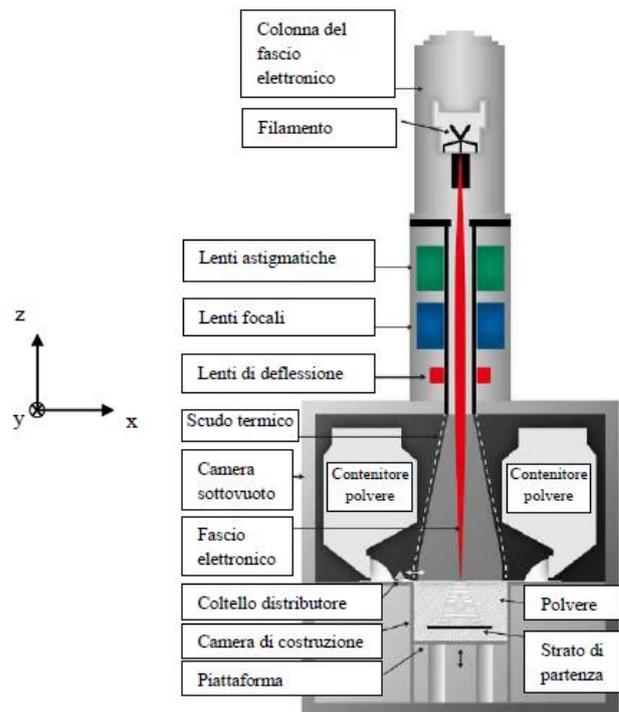


Fig. 1.11: schema per l'Electron Beam Melting

Questo si origina per effetto termoionico, assoggettando un filamento di tungsteno ad una differenza di potenziale ΔV e facendolo percorrere da una certa intensità di corrente i e attraverso una serie di lenti comandate dal software della stampante 3D viene fatto coincidere e indirizzato sulla polvere da fondere. L'intera produzione dei componenti si effettua all'interno di una camera posta sottovuoto con valori di pressione inizialmente inferiori a 0.01Pa, per ridurre il più possibile sia la formazione di ossidi che le influenze reciproche tra il fascio e le particelle che si trovano in atmosfera. Nel momento in cui si effettua la

fusione, si introduce elio nella camera per non consentire il caricamento elettrico delle polveri e per aumentare la conduzione termica e dunque il raffreddamento, raggiungendo pressioni di 1Pa. Una volta che si è raffreddato e solidificato lo strato fuso, il piano si abbassa attraverso un apposito cilindro consentendo il deposito di un secondo strato di polvere che viene fuso a sua volta e lasciato raffreddare. Questa sequenza procede fino a quando l'oggetto viene ultimato. La necessità del preriscaldamento delle polveri, rispetto alla tecnologia SLM, deriva dall'interazione degli elettroni del fascio elettrico con la polvere depositata, infatti il fascio carica elettricamente quest'ultima generando un agglomerato di cariche negative, che portano alla creazione di una forza elettrostatica repulsiva, la quale se predomina sulle forze coesive tra le particelle porta all'espulsione della polvere infusa dalla superficie, permettendo la formazione di una nuvola che impedisce l'ottenimento della parte. A seguito del processo produttivo, nonostante non sia necessario eseguire dei trattamenti termici, è necessario un trattamento superficiale di sabbiatura al fine di eliminare l'agglomerato di polvere parzialmente sinterizzata che circonda il componente. Questa polvere in eccesso viene poi recuperata e riutilizzata per la costruzione di nuovi componenti. Tutto ciò può eventualmente essere seguito anche da un trattamento di lucidatura, nel caso sia necessario per raggiungere la qualità superficiale desiderata dall'applicazione considerata.

Si evince che il processo di lavorazione si suddivide nei seguenti passaggi:

1. Si deposita uno strato di polvere metallica, che presenta una granulometria di 45-80 μ m e si ha un successivo livellamento del letto tramite un apposito rullo.
2. Si utilizza una sorgente di elettroni, composta da un filamento metallico (che come detto è il tungsteno), che viene riscaldata ad una temperatura di circa 800°C; a questa temperatura il filamento rilascia un fascio di elettroni che si proietta sullo strato di polvere in modo che possa essere preriscaldato e reso più compatto.
3. Lo stesso filamento metallico si porta ad una temperatura maggiore di 2500°C; il fascio, sempre di elettroni, risulterà essere accelerato da un anodo fino a quando si raggiunge una velocità pari a circa la metà della velocità della luce. Il fascio accelerato viene fatto passare attraverso due campi magnetici: il primo con il compito di focalizzare il fascio di elettroni, mentre il secondo serve per controllare la deviazione; il fascio viene proiettato in maniera selettiva sul letto di polvere.
4. L'impatto tra il fascio di elettroni e le particelle metalliche trasforma l'energia cinetica in energia termica causando la fusione della sezione metallica interessata.
5. Successivamente l'elevatore si abbassa permettendo così la lavorazione dello strato successivo. Una volta terminato il processo si ottiene un blocco compatto di polvere da cui si estrae, tramite pallinatura, il componente finito.

Il preriscaldamento del letto di polvere presenta due vantaggi: da una parte la necessità di avere uno sbalzo termico inferiore per raggiungere la temperatura di fusione delle polveri; dall'altra la possibilità di compattare lo strato, tramite l'impatto con il fascio di elettroni, il quale deve essere opportunamente accelerato e uno strato di polvere non compattato causerebbe il distacco della polvere impedendo il raggiungimento di una qualità adeguata.

L'azienda che produce le macchine che utilizzano questa tecnologia è la svedese ARCAM. Questa macchina, attualmente, viene impiegata principalmente per l'ottenimento di componenti nel settore aerospaziale. I materiali più utilizzati per il processo EBM sono: la lega di titanio, Ti6Al4V; Cobalto-Cromo; Inconel 718.

L'EBM permette la realizzazione di componenti definitivi, con geometrie non realizzabili con le tecniche di lavorazione tradizionali; inoltre, se comparata con i processi di fusione tradizionali, garantisce una qualità del componente che è confrontabile con i getti ottenuti per microfusione avendo un minor consumo di materiale (non c'è la necessità, ad esempio, della materozza) e di energia. Le tolleranze e le rugosità

superficiali sono peggiori rispetto alle tecniche come SLS o SLM, così come per le lavorazioni in cui si ha l'asportazione di truciolo. Nelle zone di accoppiamento è fondamentale inserire uno strato di sovrametallo (1-2mm circa) per la successiva finitura superficiale. Un'altra limitazione riguarda la rimozione dei supporti che si effettua manualmente e per mezzo di una pallinatrice; la polvere eliminata viene miscelata con una polvere vergine, per poi essere di nuovo utilizzata.

1.3.4 Direct Metal Deposition (DMD)

La tecnologia Direct Metal Deposition (DMD) costituisce uno dei processi principali per lo stampaggio 3D che si basa sul rilascio e contestuale fusione del materiale, sia esso sottoforma di filo o di polvere. L'ottenimento dei componenti si realizza dentro una camera in atmosfera controllata ricca di elio o argon, per permettere la riduzione della formazione di ossidi e il conseguente infragilimento del prodotto. Questa tecnica permette di ottenere la simultanea deposizione e fusione della polvere del materiale con un fascio laser attraverso un ugello mobile di tre assi. La deposizione del materiale procede fino a quando l'oggetto viene ultimato. Per cui si osserva che questo processo apporta direttamente il materiale all'interno della zona di interesse attraverso la considerazione di un principio corrispondente alla saldatura.

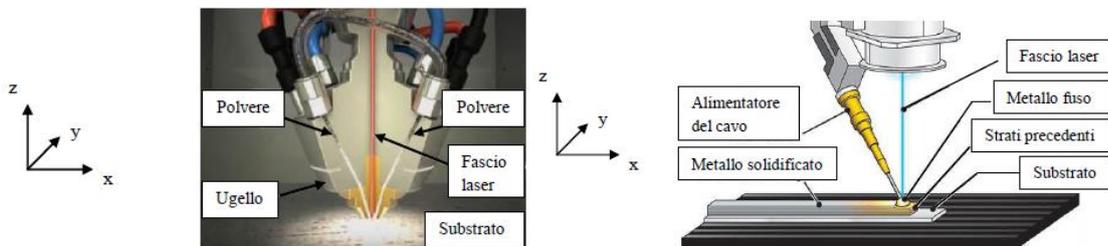


Fig. 1.12: schema per la Direct Metal Deposition

Il macchinario è caratterizzato da una testina collocata al di sopra della piattaforma di lavoro e si muove lungo il piano XY. La testina è composta da tre ugelli: ce ne sono due alle due estremità e forniscono un getto di polvere metallica sulla zona interessata, mentre l'ugello presente al centro emette un fascio laser che riesce a fondere le particelle metalliche; la fusione si verifica esattamente nel punto in cui si esegue la lavorazione. Il concetto alla base di questa tecnica è semplice, anche se i parametri del processo devono essere analizzati dettagliatamente in modo tale da garantire una qualità metallurgica soddisfacente degli strati depositati. Nel corso del processo, visto tutte le lavorazioni che hanno a che fare con particelle meccaniche, è necessario predisporre di un gas di copertura nella zona di interesse per la lavorazione, in modo da scongiurare l'ossidazione.

Un grande vantaggio per questa tecnica è l'elevata flessibilità dei materiali adoperati durante tutta la lavorazione; infatti si possono realizzare tramite leghe metalliche differenti modificando la natura delle particelle utilizzate durante la produzione, generando una zona di transazione continua, caratterizzata da una miscela delle due leghe. Nelle tecniche tradizionali, invece, per ottenere componenti metallici realizzati tramite leghe differenti, bisogna effettuare una saldatura con il conseguente ottenimento del cordone di saldatura che rappresenta un punto di debolezza e spesso può causare la rottura. Dal punto di vista geometrico, visto le caratteristiche del processo, non si hanno limitazioni riguardanti il volume realizzabile perché è la testina che si muove nel piano ed in prossimità del componente in fase di lavorazione. Tuttavia, per le stesse ragioni, si hanno dei limiti riguardo le forme geometriche realizzabili, ad esempio è impossibile ottenere elementi sporgenti. Questo limite può essere superato aggiungendo materiale in eccesso, che viene poi lavorato con le tecniche convenzionali per l'asportazione di materiale.

Visto che la tecnologia è in fase di sviluppo, esistono più fornitori e i quattro principali sono: OPTOMECH (USA), DMD 3D (USA), DGM Mori Seiki (Giappone) e Prima Industrie (Italia). A proposito dei materiali, non c'è una limitazione relativa a quelli che possono essere utilizzati, infatti l'unico requisito da dover rispettare è che il materiale metallico possa arrivare a fusione. I principali materiali adottati sono: leghe di alluminio, Cobalto-Cromo, acciaio per la realizzazione di stampi, acciaio inox, lega di titanio Ti6Al4V, Inconel 625 e Inconel 718.

I vantaggi di questa tecnologia sono:

- Possibilità di realizzare componenti finiti scegliendo tra un'ampia gamma di materiali metallici;
- Possibilità di ottenere pezzi metallici realizzati tramite leghe differenti senza il problema del cordone di saldatura;
- Una maggiore produzione, se confrontata alle altre tecniche additive;
- Assenza di restrizioni sul volume massimo di lavoro.

Invece, gli svantaggi principali sono:

- Scarsa libertà geometrica per la realizzazione del componente;
- Necessità di effettuare la finitura attraverso lavorazioni in cui bisogna asportare il materiale.

L'automotive e l'aerospazio sono i settori in cui questa tecnologia è più utilizzata. Inoltre, questa tecnologia si distingue dai processi PBF per la possibilità di riparare componenti depositando sopra la zona danneggiata del nuovo materiale. Lo spessore del layer è compreso tra 40 e 1000µm; la velocità di scansione è solitamente tra 150-1500mm/s e il diametro del laser a livello della polvere di 300-3000µm. Di seguito è riportato il confronto tra le tre tecnologie fin qui considerate, in cui la sigla DED rappresenta la Direct Energy Deposition.

	SLM	EBM	DED
E_d	<100 J/mm ³	150÷900 J/mm ³	90÷220 J/mm ³
Potenza fascio	20÷1000 W	3000 W	/
Diametro fascio	50÷180 µm	140÷250 µm	300÷3000 µm
Velocità di scansione	$v_{scan} < 15$ m/s	$v_{scan} = 10$ m/s $i_{scan} = 0.005A \div 0.01$ A [12] $i_{scan} = 0.025A \div 0.03$ A [16]	$v_{scan} = 150 \div 1500$ mm/s
Spessore layer	20÷100 µm	50÷200 µm	40÷1000 µm
Preriscaldamento	200÷500 °C	700 °C $v_{prerisc} = 10$ m/s $i_{prerisc} = 0.025 \div 0.03$ A	<200 °C
Velocità di raffreddamento	$v_{raff} = 10^3 \div 10^8$ K/s	$v_{raff} = 10^3 \div 10^4$ K/s	$v_{raff} < 10^3$ K/s
Rugosità (Ra)	4÷10 µm 10÷25 µm [13] 9÷10 µm [14]	40 µm	7÷20 µm 61÷91µm (LENS) [14]

	SLM	EBM	DED
Dimensioni massime componente	500 mm x 280 mm x 320 mm	/	2000 mm x 1500 mm x 750 mm
Dimensioni camera di costruzione	/	Ø350 mm x 380 mm (Arcam A2X)	/
Volume rate	40 g/h=160 g/h	/	500 g/h
Atmosfera	Azoto o argon	Vuoto con introduzione di elio in fase di costruzione	Elio o argon
Dimensioni delle polveri	20=63 µm	45=100 µm	/
Accuratezza	da ±0.02 mm=0.05 mm a 25 mm	/	da ±0.125 mm=0.25 mm a 25 mm
Costi	450000=600000 €	450000=600000 €	500000=800000 €

Tabella 1.3: confronto per le tecniche SLM, EBM e DED

1.3.5 Selective Laser Sintering (SLS)

La sinterizzazione laser (SLS) fa uso di un laser, che emette radiazioni infrarosse, per sinterizzare le polveri del materiale utilizzato, che possono essere delle polveri di polimeri termoplastici, polveri ceramiche o polveri metalliche.

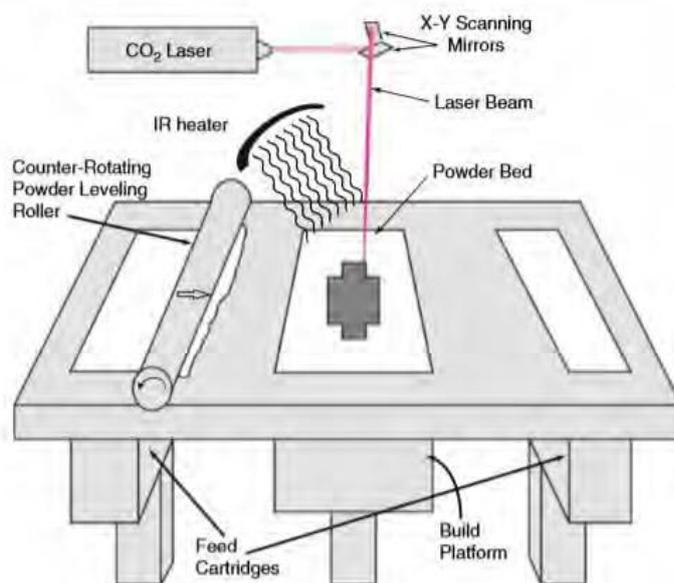


Fig. 1.13: processo di sinterizzazione laser

Inizialmente viene steso, da un apposito apparato, un sottile strato di polvere fusibile se sottoposto a calore; la temperatura interna viene mantenuta prossima a quella di fusione del materiale in modo tale da minimizzare l'energia richiesta al laser. Il laser di CO₂ segue le traiettorie necessarie a tracciare la sezione e fornisce l'energia termica necessaria a provocare la fusione localizzata delle polveri, lasciando inalterate quelle zone circostanti; si ha così la creazione della sezione grazie alla sinterizzazione dei granelli di polvere. La tavola si abbassa della quantità voluta, viene depositato un ulteriore strato di polvere e il tutto si ripete fino alla creazione dell'ultima sezione. Il vantaggio è che si possono utilizzare diverse tipologie di polveri e non c'è la necessità dell'utilizzo di supporti visto che è la polvere non sinterizzata che permette di sostenere i piani superiori. Alla fine del processo bisogna togliere dal pezzo la polvere inutilizzata; questa operazione

non è troppo complessa e nel caso si considerino polveri metalliche e ceramiche, si può effettuare anche un trattamento termico per il miglioramento delle caratteristiche.

I vantaggi principali di questa tecnica sono:

- Buona stabilità del pezzo;
- Ampia gamma di materiali utilizzabili;
- Assenza di strutture di supporto;
- Limitata fase di post-processo.

Ci sono anche alcuni svantaggi come l'alto consumo di potenza del laser e la finitura superficiale non ottimale.

I principali parametri costruttivi da tenere in considerazione sono: la densità di energia fornita, l'orientamento del componente, la temperatura interna, la temperatura del letto di polvere, lo spessore di uno strato, la consistenza della polvere e il tipo di materiale.

Le macchine SLS sono in grado di lavorare direttamente con un'ampia gamma di metalli: termoplastici, ceramici e compositi. La maggior parte dei materiali utilizzati sono sicuri, atossici, semplici da usare e possono essere facilmente conservati, riciclati e smaltiti. Questi materiali sono: i poliammidi, il Nylon, gli elastomeri termoplastici, i policarbonati, i metalli (anche se è preferibile la tecnica SLM) e i ceramici.

1.3.6 Fused Deposition Modeling (FDM)

La Fused Deposition Modeling (FDM) è una tecnica di fabbricazione additiva molto semplice e diffusa. Il processo parte dal riscaldamento di un filamento polimerico (contenuto all'interno di apposite bobine), che permette di spingerlo, tramite un sistema di ingranaggi, dentro la camera di fusione, e ciò permette di iniziare il processo di rammollimento. Il materiale diventa molle dentro questa camera (chiamata "hot end") e poi la pressione esercitata dal filo sulla testa permette l'estrusione del materiale tramite un ugello. Questa tecnica si applica soprattutto in ambito estetico (design) o per l'ottenimento di prototipi concettuali e funzionali.

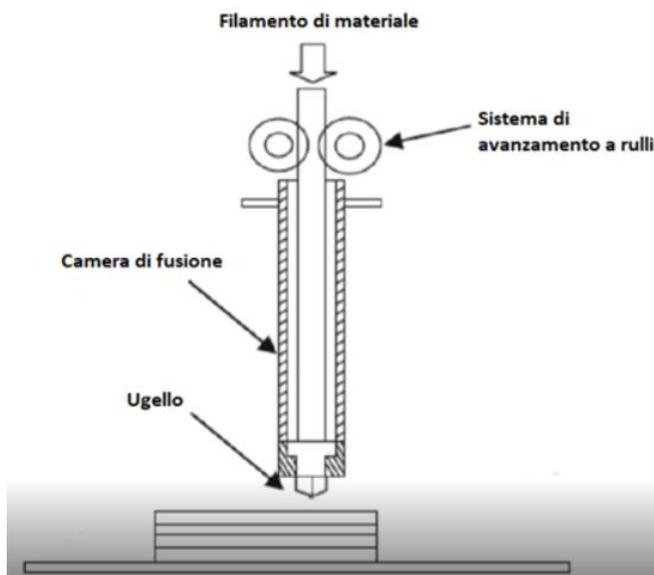


Fig. 1.14: tecnica di realizzazione FDM

Le stampanti FDM presentano due diverse categorie:

- Le cosiddette “stampanti low cost”: possiedono prestazioni limitate e i materiali non sono testati e/o certificati. Queste macchine presentano un basso costo e sono realizzate per uso domestico, infatti si possono trovare in qualsiasi centro commerciale;
- Macchine di stampa 3D FDM per uso industriale e professionale: hanno caratteristiche e materiali certificati e presentano delle prestazioni adeguate. Queste macchine permettono, spesso, di ottenere parti definitive e funzionali.

Per questa tecnica produttiva serve avere un'alimentazione in grado di produrre una pressione elevata in modo tale da poter estrudere il polimero attraverso l'ugello. Dal punto di vista termico, si devono trovare dei materiali con un intervallo di utilizzo che non porti ad un degrado. Il polimero è un isolante, per cui la camera deve essere abbastanza piccola da permettere una temperatura omogenea all'interno del materiale che sta modificando il suo stato e che incamera calore. In uscita dal sistema di estrusione si ha un filo che presenta caratteristiche intermedie tra fluido e viscoso e che dovrà avere un certo tipo di geometria, visto che esce da un ugello. Il filamento di materiale si posiziona sul piano di lavoro e successivamente sui vari strati. La capacità di eliminare le irregolarità nella parte sottostante della struttura è collegata alla fluidità del polimero dopo i primi due secondi dalla deposizione. Il sistema potrà contare su un materiale isolante, dove la parte esterna arriva velocemente al di sotto della temperatura di transizione vetrosa mentre quella interna ci mette un po' più di tempo. Il problema principale è che il materiale polimerico una volta uscito dall'estrusore formi una crosta solida sulla parte esterna, rimanendo ancora liquido all'interno. Questo può portare a delle difficoltà relative alla densificazione e al ritiro del materiale con il diminuire della temperatura. I livelli di porosità riscontrati con la tecnica FDM sono abbastanza alti e per limitarli bisogna lavorare sulla temperatura di transizione vetrosa del polimero e sulla portata del materiale che viene estrusa nell'unità di tempo.

Le stampanti 3D relative a questa tecnica permettono di direzionare il materiale lungo l'asse perpendicolare al piano di lavoro; quando ciò avviene tutte le sue proprietà, tra cui quelle meccaniche, diventano anisotrope. Per ridurre l'effetto di ciò, si considera la flessibilità dell'additivo, infatti si direziona l'architettura di costruzione dell'oggetto a piacere. Le macchine professionali per la fabbricazione additiva permettono una compattazione efficace tra i vari layer, in modo tale da ridurre di molto eventuali difetti, come porosità residue e distacco degli strati e ciò permette di avere caratteristiche abbastanza isotrope in tutti i piani dello spazio. I componenti ottenuti con questa tecnica hanno bisogno di supporti. Questi ultimi si possono realizzare con lo stesso materiale del componente o con un materiale solubile, che modifica la sua composizione chimica in base al materiale utilizzato e se si realizza un componente in PLA è possibile utilizzare come struttura di supporto il PVA, visto che quest'ultimo è solubile in acqua o soda caustica.

L'alimentazione avviene a filo (1.5-8mm) e si considerano le seguenti proprietà: il colore, la stabilità chimica e quella termica. Le maggiori famiglie di materiali che si adottano sono: ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PLA (acido polilattico), PVA (Polyvinil Alcohol), Nylon, PC (policarbonato), PEEK e ULTEM. In generale per riuscire ad utilizzare nel modo migliore il PEEK ed l'ULTEM è fondamentale prendere qualche accorgimento in più rispetto agli altri polimeri; ad esempio, si può considerare una camera e un piano riscaldato fino a 180-200°C ed oltre a ciò si considera un sistema di presa a vuoto in modo tale da tenere ben ancorati i pezzi alla piattaforma di costruzione (per evitare problemi di “warping”, cioè di ritiro dimensionale della parte). Questi tecnopolimeri, infatti, hanno prestazioni molto elevate, ma è molto complessa la loro gestione e la gestione della macchina, sia durante la fase effettiva di stampa che nella successiva operazione di post processo (rimozione dei supporti).

1.3.7 Stereolitografia (SLA)

La stereolitografia venne introdotta intorno alla metà degli anni '80, ma si è affermata solo nel decennio successivo, come una delle tecniche portanti della fabbricazione additiva. Da quel momento, la capacità della SLA di realizzare prototipi complessi in maniera rapida e precisa ha cambiato completamente il settore della progettazione.

Così come avviene con altri processi di fabbricazione additiva, come la SLS, la SLA dipende moltissimo dall'impegno di sistemi laser per la realizzazione delle parti. I pezzi sono stati realizzati tramite la polimerizzazione di strati sottilissimi di resina liquida termoindurente con l'ausilio di un fascio laser ultravioletto (UV), proiettato sulla superficie della resina per consentire il passaggio allo stato solido. Il processo si ripete per ogni strato di resina non polimerizzata fino al completamento del pezzo. I componenti fabbricati attraverso la stereolitografia dovranno poi essere sottoposti a post-trattamento, che prevede un ciclo di polimerizzazione UV permettendo così la completa solidificazione della superficie esterna e fa fronte ad eventuali requisiti di finitura aggiuntivi.

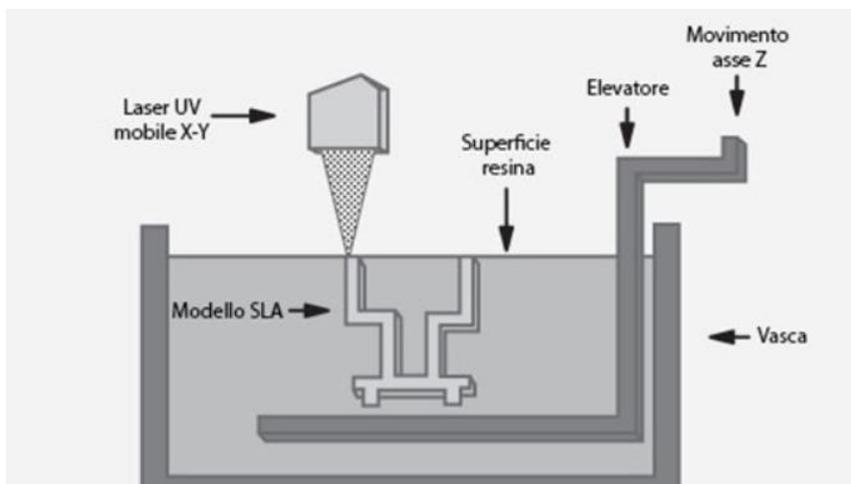


Fig. 1.15: schema riguardante la tecnica di stereolitografia

A differenza delle generazioni precedenti del processo SLA, i macchinari moderni mettono a disposizione un'ampia gamma di materiali in grado di produrre fedelmente le caratteristiche, come il polipropilene, l'ABS e i policarbonati con rinforzo in fibra di vetro. Le proprietà meccaniche dei materiali utilizzati nella SLA si limitano solo a riprodurre quelle dei materiali termoplastici utilizzati nei processi di stampaggio convenzionali. I pezzi fabbricati tramite SLA non consentono di avere le stesse caratteristiche di robustezza e resistenza delle parti realizzate mediante sinterizzazione, fusione, stampaggio o lavorazione con macchine. Per cui la stereolitografia è l'opzione più logica per i prototipi in cui la valutazione della forma e dell'adattamento costituisce il fattore preponderante.

La fabbricazione tramite stereolitografia consente di realizzare degli strati con spessori tra 0.1 e 0.025mm, con dettagli di dimensioni fino a 0.05mm, per cui tramite questa tecnica è possibile la riproduzione di dettagli molto complessi e con finiture superficiali che non presentano quasi scalinature.

Possono esserci dei problemi nella fase di post-trattamento a causa dell'elevata viscosità della resina fotopolimerizzabile utilizzata nella stereolitografia, per cui non bisogna utilizzare dei diametri di piccole dimensioni.

1.3.8 Stampa ad iniezione

Uno dei materiali più comuni ottenuti con questa tecnica è l'ULTEM 2400. Con la stampa ad iniezione si porta a fusione alla temperatura di 200-250°C in questo modo il granulo viene liquefatto e trattando un materiale termoplastico, si ha la modifica della struttura nel momento in cui vengono riscaldati, al contrario dei termoindurenti, che al primo riscaldamento modificano la struttura in modo permanente. Nella figura 1.16 si osserva uno schema della macchina per eseguire la stampa ad iniezione per un materiale termoplastico. Per l'analisi più dettagliata di questo processo si fa riferimento a [14].

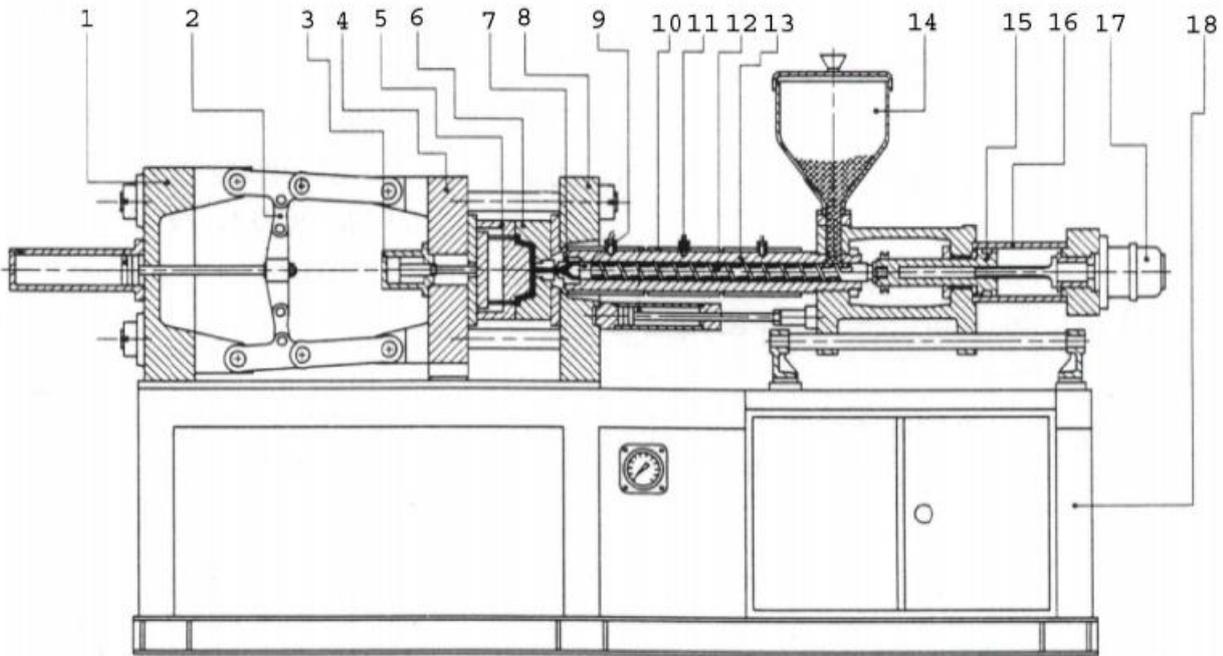


Figura 1.16: sezione longitudinale di una pressa ad induzione a vite punzonante del tipo a doppia ginocchiera. Legenda: 1. Testata stampo; 2. Chiusura a doppia ginocchiera; 3. Estrattore oleodinamico; 4. Piastra mobile; 5. Semistampo mobile; 6. Semistampo fisso; 7. Ugello di iniezione; 8. Piastra fissa; 9. Camera di plastificazione; 10. Resistenze elettriche di riscaldamento; 11. Termocoppia; 12. Vite punzonante di plastificazione; 13. Cilindro di plastificazione; 14. Tramoggia; 15. Pistone iniezione; 16. Cilindro iniezione; 17. Motore oleodinamico; 18. Basamento.

1.4 Tipologie di macchine per la produzione additiva

Esistono diverse tipologie di macchine che servono a realizzare componenti in Additive Manufacturing, ma tutte hanno in comune il fatto che bisogna partire sempre dall'oggetto realizzato tramite CAD. Le caratteristiche principali relative a questi macchinari sono: le dimensioni della camera di lavoro; gli spessori ammissibili di ogni strato di polvere che servono a formare la parte finale; la complessità del componente che si vuole realizzare; e infine il materiale che si vuole utilizzare, dove la differenziazione più importante riguarda sicuramente l'utilizzo di un materiale metallico o polimerico. All'interno della tesi viene riportato l'esempio di due macchine in particolare che sono la Fortus900 e la EOSIN M290, ma ovviamente esistono anche altre tipologie di macchine che possono essere utilizzate ed alcune di queste sono riportate nell'appendice I.

La macchina Fortus900 è il più preciso e potente sistema di produzione per i materiali FDM. Le dimensioni della camera di lavoro sono di 914x610x914mm. Il sistema comprende due scomparti per i materiali, in modo da ottenere la massima efficienza nella fase di produzione senza dover interrompere il processo di Additive Manufacturing. Fortus 900 presenta cinque diverse opzioni di spessore (0.127, 0.178, 0.254, 0.330, 0.508mm), che consentono di trovare il giusto equilibrio tra il livello di accuratezza dei dettagli e la velocità di stampa. La possibilità di stampare pezzi monolitici permette la realizzazione di geometrie grandi e complesse che prima non erano possibili se non attraverso l'assemblaggio di componenti stampati attraverso sistemi 3D printing di dimensioni minori. Pur consentendo la realizzazione di componenti di grandi dimensioni, Fortus 900 assicura elevati livelli di accuratezza, resistenza e durezza. Tutti i sistemi Fortus FDM offrono un'ampia gamma di materiali termoplastici disponibili a seconda delle caratteristiche del pezzo e delle esigenze del cliente. Di seguito sono riportati i materiali che utilizzano questo tipo di macchinario per la produzione, considerando anche lo spessore delle lamine.

Material Options							
Material	Layer Thickness					Support Structure	Available Colors
	0.020 inch (0.508 mm)	0.013 inch (0.330 mm)	0.010 inch (0.254 mm)	0.007 inch (0.178 mm)	0.005 inch (0.127 mm)		
ASA	●	●	●	●	●	Soluble	<ul style="list-style-type: none"> ■ Black ■ Dark Gray ■ Light Gray □ White ■ Ivory ■ Dark Blue ■ Green ■ Yellow ■ Orange ■ Red
ABS-M30™	○	●	●	●	○	Soluble	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ivory □ White ■ Black ■ Red ■ Blue ■ Dark Gray
ABS-M30i™	○	●	●	●	○	Soluble	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ivory
ABS-ESD7™	○	○	●	●	○	Soluble	<ul style="list-style-type: none"> ■ Black
Antero™ 800NA	○	○	●	○	○	Breakaway (support structure)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Natural
PC-ABS	○	●	●	●	○	Soluble	<ul style="list-style-type: none"> ■ Black
PC-ISO™	○	●	●	●	○	Breakaway	<ul style="list-style-type: none"> ■ Translucent Natural □ White
PC	○	●	●	●	○	Breakaway, Soluble	<ul style="list-style-type: none"> □ White
ULTEM™ 9085 resin	○	●	●	○	○	Breakaway	<ul style="list-style-type: none"> ■ Tan ■ Black
ULTEM 1010 resin	●	●	●	○	○	Breakaway	<ul style="list-style-type: none"> ■ Natural
PPSE	○	○	●	○	○	Breakaway	<ul style="list-style-type: none"> ■ Tan
FDM Nylon 12™	○	●	●	●	○	Soluble	<ul style="list-style-type: none"> ■ Black
FDM Nylon 6™	○	●	●	○	○	Soluble	<ul style="list-style-type: none"> ■ Black
ST-130™	○	●	○	○	○	Breakaway	<ul style="list-style-type: none"> ■ Natural

Tabella 1.4: materiali che utilizzano la Fortus 900 per la produzione

Other Specifications	
System Size and Weight	2772 x 1683 x 2027 mm (109.1 x 66.3 x 78.1 in); 2869 kg (6325 lbs.) With Manufacturing Light Tower: 2772 x 1683 x 2281 mm (109.1 x 66.3 x 89.8 in.)
Achievable Accuracy	Parts are produced within an accuracy of +/- .089 mm or +/- .0015 mm per mm whichever is greater (+/- .0035 in. or +/- .0015 in. per in. whichever is greater).+ Z part accuracy includes an additional tolerance of -0.000/+ slice height. Note: Accuracy is geometry-dependent. Achievable accuracy specification derived from statistical data at 95% dimensional yield. See Fortus 900mc accuracy white paper for more information.
Network Communication	10/100 base T connection. Ethernet protocol.
Operator Attendance	Limited attendance for job start and stop required.
Operating Environment ¹	Maximum room temperature of 29 °C (85 °F). Maximum room humidity of 80%.
Power Requirements ¹	230 VAC (three phase) 50/60Hz, Voltage fluctuation +/- Current 40A
Additional Requirements ¹	Compressed Air Required 90-120 psi with a minimum flow of 20 CFM
Regulatory Compliance ¹	CE, NRTL Listed
Software	All Fortus systems include Insight and Control Center™ job processing and management software. Compatible with Grabcad Print for use with job reports, scheduling and remote monitoring.
Operating System	Microsoft Windows 8.1 and Windows 8 (Pro, Enterprise), Microsoft Windows 7 (Pro, Enterprise, Ultimate), Microsoft Windows Vista (Business, Enterprise, Ultimate), Microsoft Windows Server 2008, Microsoft Windows Server 2003

¹ See Fortus 900mc Site Prep Guide for detailed power and environmental specs

Tabella 1.5: alcune specifiche riguardanti la Fortus 900



Fig. 1.17: macchina Fortus 900

EOSINT M290 è la macchina di dimensioni medie ed è utilizzata per applicazioni di fusione diretta delle polveri di metallo; questa macchina è caratterizzata da:

- Laser in fibra con una potenza di 400W ed ottiche di precisione per il dimensionamento del fascio lungo tutto il piano di lavoro ed esso è inferiore ad 0.1mm e garantisce un'elevata risoluzione nella riproduzione dei dettagli;
- Camera di lavoro da 250x250x325mm;
- Lavorazioni in modalità duale, infatti è sia in argon che in azoto;
- Materiali a disposizione: acciaio inox (17-4; 15-5; 316L), acciaio marangonico (1.2709); superleghe base cromo (Co-Cr ASTM75 e dentale), superleghe base nichel (IN718,1N625,HX), titanio (Ti6Al4V Grado 5; Ti CP Gr2; ELI), alluminio (AlSi10Mg); inoltre gli spessori di costruzione possono essere variabili;
- Accessori per il cambio della polvere metallica (IPCM);
- Parametri di processo ottimizzati da EOS per incrementare le prestazioni della tecnologia;
- Sistema di eliminazione dei condensati tramite una filtrazione a doppio stadio e turbina di depressione, ugelli specifici di creazione del flusso laminare ad alta velocità (5m/sec);
- Numero elevato di sensori per monitorare i parametri di processo ed elaborare i rapporti di qualità;
- Architettura software per la gestione dei dati anche di grandi dimensioni.

Technical Data EOS M 290

Building volume	250 mm x 250 mm x 325 mm (9.85 x 9.85 x 12.8 in)
Laser type	Yb-fibre laser; 400 W
Precision optics	F-theta-lens; high-speed scanner
Scan speed	up to 7.0 m/s (23 ft/sec)
Focus diameter	100 µm (0.004 in)
Power supply	32 A
Power consumption	max. 8.5 kW / typical 3.2 kW
Nitrogen generator	integrated
Compressed air supply	7,000 hPa; 20 m ³ /h (102 psi; 706 ft ³ /h)
Dimensions (W x D x H)	
System	2,500 mm x 1,300 mm x 2,190 mm (98.4 x 51.2 x 86.2 in)
Recommended installation space	min. 4,800 mm x 3,600 mm x 2,900 mm (189 x 142 x 114 in)
Weight	approx. 1,250 kg (2,756 lb)
Data preparation	
Software	EOS RP Tools; EOSTATE; EOSPRINT; Materialise Magics RP with SG+ and further modules
CAD interface	STL. Optional: converter for all standard formats
Network	Ethernet

Tabella 1.6: dati tecnici della macchina EOSINT M290



Fig. 1.18: macchina EOSINT M290

1.5 Caratterizzazione delle polveri per l'Additive Manufacturing

Per prima cosa si può osservare come le caratteristiche della polvere influiscano sulle proprietà del prodotto finito; infatti, il materiale, nel processo SLM, viene sottoposto all'irraggiamento e lo si introduce all'interno della macchina sotto forma di polvere. La qualità delle polveri risulta essere influenzata dall'assenza di satelliti, dalla sfericità, dalla densità apparente (porosità interne), dalla rugosità superficiale, dalla distribuzione granulometrica e dalle dimensioni.

L'intervallo delle particelle, per l'AM, varia tra i 20 e i 60µm, per cui questo consente di depositare uno strato di polvere con uno spessore di alcune decine di millimetri. Per migliorare il grado di impaccettamento le particelle più piccole occuperanno gli spazi vuoti lasciati da quelle più grandi. Si osserva come le particelle più fini abbiano una scarsa scorrevolezza, questo perché la forza di attrazione è inversamente proporzionale alle dimensioni delle particelle e questo determina una maggiore difficoltà nell'ottenere uno strato di polvere omogeneo.

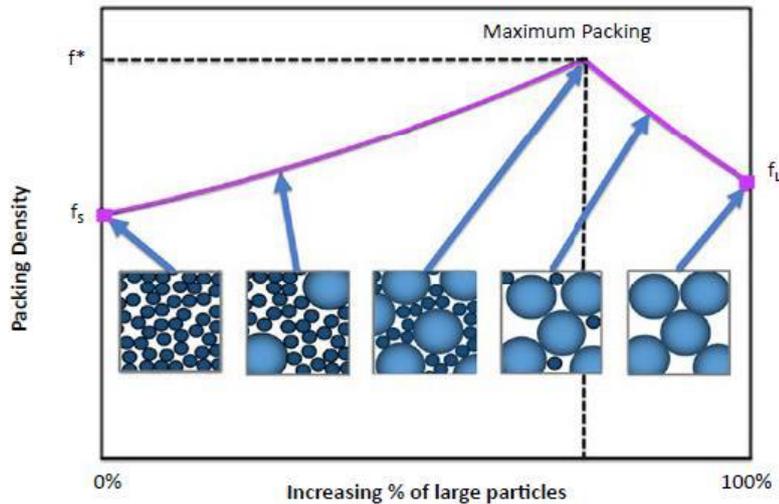


Fig. 1.19: rapporto tra la dimensione e l'impacchettamento delle particelle di polvere

Le particelle più piccole presentano una riflessività maggiore o un minor assorbimento del fascio laser rispetto a quelle più grandi, però si fondono prima, permettendo l'unione delle particelle più grandi; per cui si evince che anche sui processi di microfusione, oltre ovviamente al grado di impaccettamento, la granulometria gioca un ruolo fondamentale. Gioca un ruolo importante anche la forma delle particelle che viene rappresentata tramite tre parametri che sono la circolarità, la convessità e l'allungamento. La forma è la caratteristica di maggior spicco per la densificazione nei processi AM e si osserva che le polveri sferiche, con una superficie liscia, hanno un impaccettamento migliore (layer densi ed omogenei), mentre con polveri di forma irregolare sono presenti agglomerati e porosità.

						
Circularity is a measure of the closeness to a perfect circle. Circularity is sensitive to both changes in overall form and edge roughness.	Circularity = 1	Circularity = 0.64	Circularity = 0.89	Circularity = 0.67	Circularity = 0.50	Circularity = 0.35
Convexity is a measure of the edge roughness of a particle. Convexity is sensitive to changes in edge roughness but not overall form.	Convexity = 1	Convexity = 0.96	Convexity = 1	Convexity = 1	Convexity = 0.59	Convexity = 0.69
Elongation is a measure of the length-width relationship. Elongation is unaffected by edge roughness – a smooth ellipse has a similar elongation to a spiky ellipse of similar aspect ratio.	Elongation = 0	Elongation = 0.82	Elongation = 0	Elongation = 0.79	Elongation = 0.24	Elongation = 0.83

Tabella 1.7: parametri più diffusi e forme caratteristiche delle particelle in relazione ai valori di questi parametri

Attraverso l'allungamento si riconoscono le particelle aghiformi, che presentano un allungamento vicino ad 1, da quelle con geometria più regolare, in cui l'allungamento è vicino ad 0 e l'allungamento si calcola come il rapporto tra la lunghezza e la larghezza delle particelle. La circolarità, invece, specifica quanto la particella

è vicina alla forma sferica (circolarità uguali ad 1). Infine, la convessità è definita come il rapporto tra il perimetro di un guscio convesso ed il perimetro della particella stessa, per cui le particelle lisce presentano una convessità vicino ad 1, mentre quelle con forma irregolare saranno caratterizzate da valori più bassi.

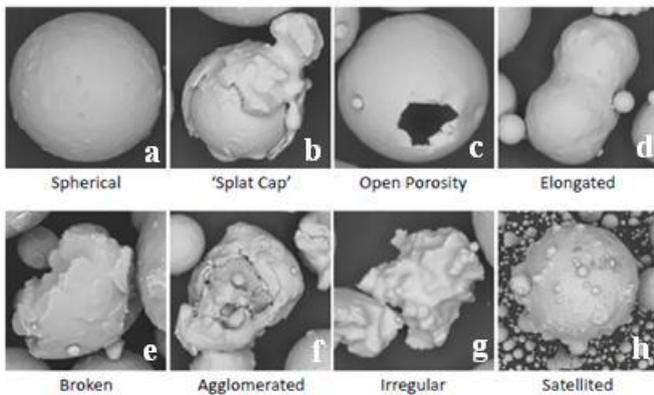


Fig. 1.20: singole particelle metalliche con differenti forme e caratteristiche superficiali

Per spiegare quanto facilmente le polveri scorrono tra loro, si utilizza il rapporto di Hausner, ossia il rapporto tra la tap density (rapporto tra la massa della polvere e il volume occupato dalla polvere dopo che è stata controllata per un periodo di tempo definito) e la densità apparente; in questo modo si comprende la capacità di compattamento delle polveri.

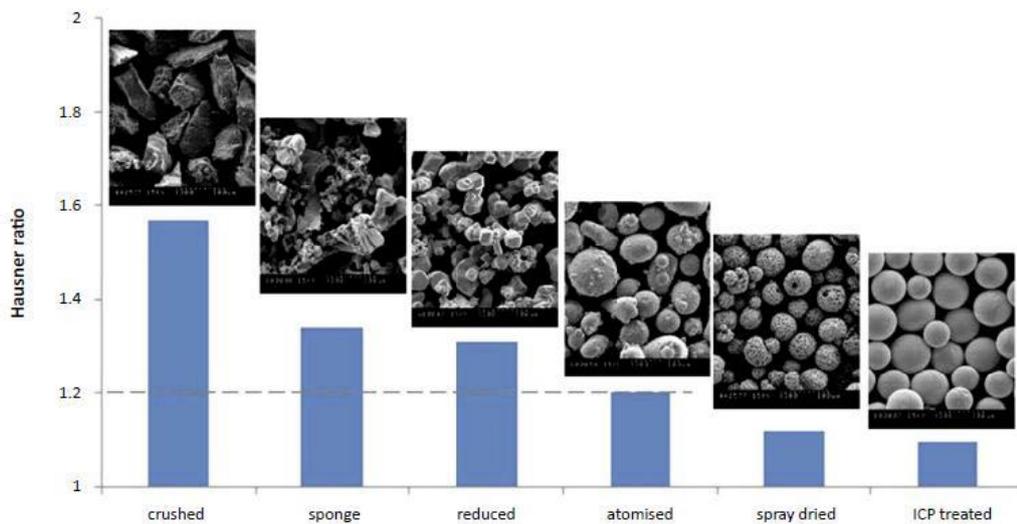


Fig. 1.21: rapporto di Hausner in base alle caratteristiche morfologiche delle polveri e ai processi

Le porosità interne si possono formare durante il processo di atomizzazione e sono difetti tendenzialmente non voluti, che però devono essere considerati nella produzione additiva, visto che si utilizzano le polveri. Una trattazione più esaustiva riguardo la porosità verrà affrontata nel paragrafo 2.6.

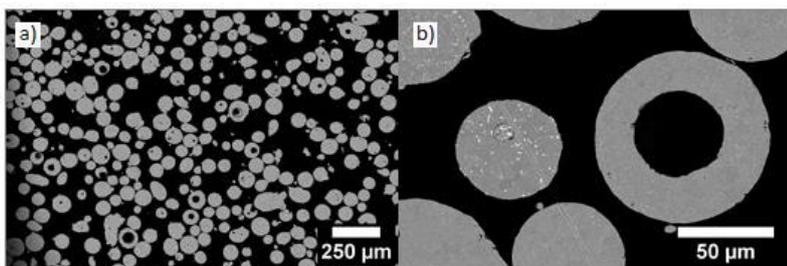


Fig. 1.22: a) particelle di polvere che presentano porosità interne; b) dettaglio di una particella porosa

Le caratteristiche della polvere quali la dimensione, la forma e la sua composizione sono importantissime per la determinazione delle proprietà statiche e a fatica dei componenti ottenuti per fabbricazione additiva. La composizione chimica può influire sulla maggior parte delle proprietà chimico-fisiche e di conseguenza anche sulle tensioni di snervamento e rottura, così come sulla durezza, sulla deformazione a rottura e sulla tenacità, ne è un esempio la sensibilità degli acciai alla variazione percentuale di carbonio al loro interno. La dimensione della polvere influenza la sinterizzazione e la fusione che avviene durante il processo di AM perché ipotizzando che le polveri siano tutte della stessa grandezza, la presenza di polveri con dimensioni inferiori favorisce la densificazione, cioè permette di ridurre la porosità.

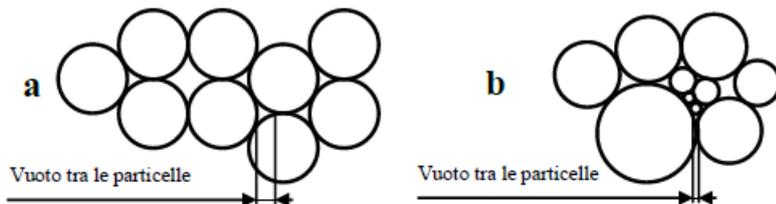


Fig. 1.23: particelle con uguali dimensioni (a); particelle con dimensioni differenti (b)

La forma della polvere è uno dei fattori che influenza il flusso delle particelle insieme, ad esempio, alla tensione superficiale, alle forze elettrostatiche e d'attrito tra di esse. La forma sferica in particolare lo aumenta, determinando una maggiore densità del componente. Anche il metodo con cui si ottengono le particelle per la fabbricazione additiva, ovvero il processo di atomizzazione, può influire sulle prestazioni dei prodotti finiti; infatti, viene favorito il processo di atomizzazione a gas rispetto a quello ad acqua perché le polveri ottenute con quest'ultimo metodo presentano residui di ossigeno maggiori che possono comportare non solo una più elevata formazione di ossidi, dannosi per le proprietà meccaniche perché caratterizzati da elevata fragilità, ma può favorire anche il fenomeno del balling (formazione di piccole sfere di dimensioni analoghe al diametro del fascio che possono determinare la formazione di discontinuità nei vari strati e lungo il percorso dello stesso e pertanto porosità).

Si evince che le polveri AISI 316L sono caratterizzate da una morfologia sferica e da dimensioni variabili, nel range di 10-40 μ m, coerentemente con quanto dichiarato dal produttore. Le percentuali rientrano negli intervalli indicati nell'ASM Handbooks per AISI 316L, ad eccezione del cromo, leggermente eccedente la forchetta compositiva nominale. Nell'analisi compositiva non compare la percentuale di carbonio falsata dal supporto su cui è stata depositata la polvere per l'analisi al microscopio elettronico (SEM).

	Peso%	Atomic%	ASM Handbooks [55] Peso%
Silicio	0.89	1.75	< 1.0
Cromo	19.21	20.50	16.0 - 18.0
Manganese	1.85	1.87	< 2.0
Ferro	63.76	63.35	Bal.
Nichel	11.63	11.00	10.0 - 14.0
Molibdeno	2.65	1.54	2.0 - 3.0
Carbonio	-	-	< 0.03

Tabella 1.8: analisi comparativa della composizione chimica del 316L

Il materiale installato sulla Direct Metal Printing (DMP) è l'alluminio AlSi10Mg. La DMP è una tecnologia sviluppata per la produzione di apparecchiature per l'additive manufacturing, dove un laser in fibra di itterbio di potenza relativamente elevata, solitamente maggiore di 400W, porta a fusione le polveri metalliche in modo selettivo. La matematica 3D CAD del componente di partenza è progressivamente

riprodotta nel letto di polvere metallica, strato su strato. Diverse polveri metalliche possono essere utilizzate con i macchinari DMP, solitamente la polvere viene stratificata con spessori che non superano i 60µm. L'elevata densità di energia concentrabile attraverso le sorgenti laser di ultima generazione consente di utilizzare polveri metalliche monofasiche senza dover aggiungere elementi basso fondenti, che invece erano necessari nelle prime tecniche di fusione selettiva.

MEASUREMENT	CONDITION	METRIC		
		AS-BUILT	AFTER STRESS RELIEF	DIRECT AGEING
Young's modulus (GPa ksi)	ASTM E8M	71 ± 2	73 ± 6	73 ± 6
Ultimate strength (MPa ksi)	ASTM E8M			
Horizontal direction - XY		450 ± 30	310 ± 20	420 ± 30
Vertical direction - Z		420 ± 60	300 ± 20	410 ± 40
Yield strength Rp0.2% (MPa ksi)	ASTM E8M			
Horizontal direction - XY		260 ± 30	200 ± 20	270 ± 20
Vertical direction - Z		230 ± 40	170 ± 20	260 ± 40
Plastic elongation (%)	ASTM E8M			
Horizontal direction - XY		8 ± 4	12 ± 2	6 ± 2
Vertical direction - Z		5 ± 2	9 ± 4	3 ± 2
Hardness, Rockwell B (HRB)	ASTM E18	71 ± 4	50 ± 6	72 ± 4
Impact toughness ³ , typical (J ft-lb)	ASTM E23	3-4	5-12	1-3

Tabella 1.9: caratteristiche meccaniche della polvere di AISi10Mg

La qualità della materia prima e le caratteristiche dimensionali e geometriche della polvere in Inconel 718 hanno un impatto sulle proprietà dei componenti finali. Il riciclo delle polveri ed il loro riutilizzo diventa un tema molto importante da affrontare, soprattutto per dare un costo ai componenti ottenuti tramite SLM. Un lavoro interessante riguarda gli effetti del riuso di polveri in Inconel 718 fino a 14 ricicli. Lo studio viene svolto analizzando, da una parte, le durezze, la microstruttura e le proprietà meccaniche dei componenti finali, mentre dall'altra la composizione chimica e le dimensioni delle polveri. Per quanto riguarda le polveri dopo 14 riutilizzi esse si sono parzialmente aggregate per sinterizzazione. Questo comportamento è confermato dalla distribuzione della dimensione che mostra un aumento, seppur lieve, della dimensione media della polvere. Dalle prove di composizione chimica si osserva una leggera diminuzione della percentuale di Ni (da 52.1 a 51.5%) e un aumento di Nb (da 5.1 a 5.7%). In entrambi i casi la variazione viene supposta influente sulle proprietà finali del componente. Per confermare questi dati e verificare le proprietà meccaniche finali dei componenti sono state eseguite le prove di resilienza attraverso il metodo di prova Charpy. In conclusione, si evince che utilizzare polveri riciclate (fino a 14 volte) non comporta nessun effetto negativo sulle caratteristiche finali dei componenti in Inconel 718. Tramite questo lavoro si evince che le proprietà delle parti realizzati tramite SLM non degradano con il riutilizzo della polvere.

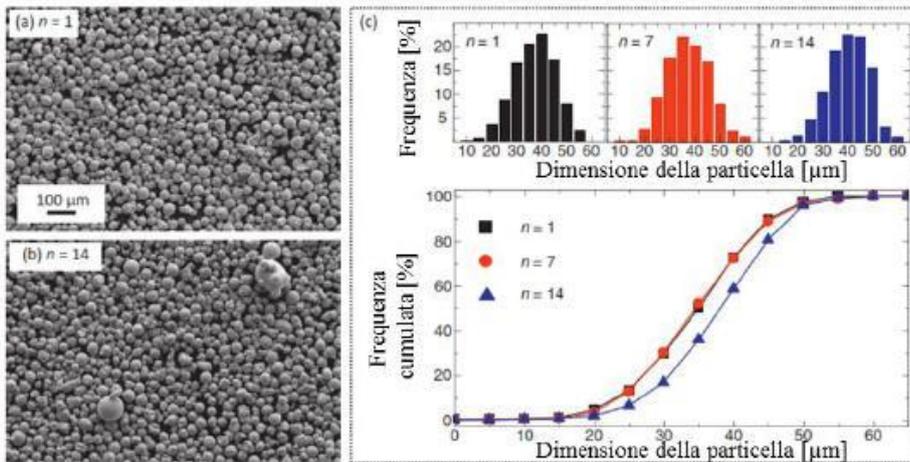


Fig. 1.24: durezza, microstruttura e proprietà meccaniche dei componenti finali; composizione chimica e dimensioni delle polveri

Anche nel caso del riciclaggio per il Ti6Al4V si ha una modifica della composizione chimica delle polveri: se il contenuto di vanadio cambia marginalmente, quello dell'alluminio varia dal 6.14 al 5.93%. La perdita di Al è dovuta alla vaporizzazione di alluminio in macchina a causa della sua bassa pressione parziale. Il riciclaggio della polvere provoca, inoltre un aumento del contenuto di ossigeno dallo 0.08 al 0.19%, al quale si aggiunge una piccola percentuale durante la manipolazione e l'esposizione all'aria. Di conseguenza, la tensione a rottura aumenta da 920 a 1039MPa, la resistenza allo snervamento aumenta da 834 a 960MPa e l'allungamento a rottura scende dal 16 al 15.5%.

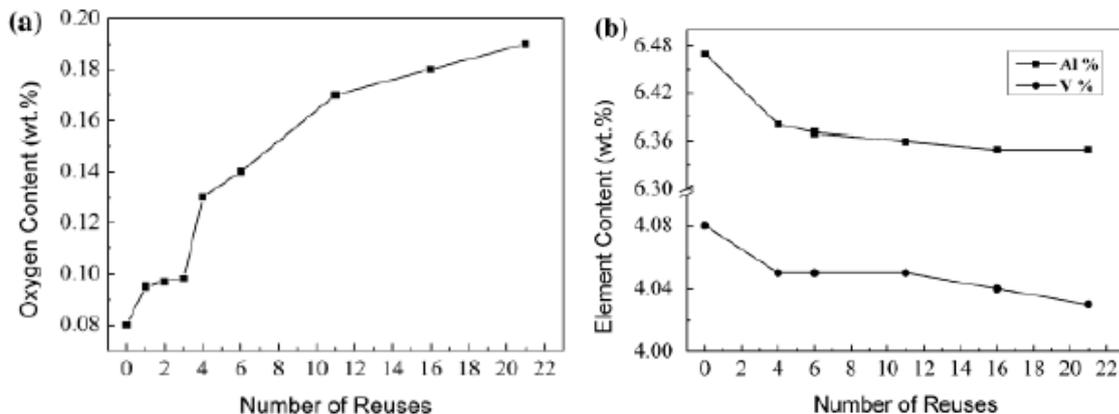


Fig. 1.25: analisi relativa al riciclaggio della polvere per l'Ti6Al4V

Di seguito sono elencate le caratteristiche delle polveri che maggiormente influenzano la qualità dei componenti realizzati tramite AM:

- Dimensioni: deve essere tale da poter essere usata interamente dalla sorgente termica. Essa determina lo spessore minimo dello strato e il grado di finitura superficiale per un componente as-built. In genere le tecnologie PBF utilizzano dimensioni della polvere che variano da 20 a 40μm, l'EBM riesce a processare polveri che possono raggiungere i 100μm; le tecnologie DED utilizzano dimensioni variabili da 45 a 150μm.
- Morfologia: a seconda del processo di produzione, le polveri possono avere diverse morfologie; possono essere aciculari (aghiforme), a scaglie, granulari, irregolari, nodulari, a piastrina, a placche e asferiche. La morfologia più adatta per i processi AM è quella sferica senza alcun satellite. La morfologia delle particelle di polvere determina la densità di impacchettamento e lo scorrimento, svolgendo un ruolo importante soprattutto nelle tecnologie PBF. Essa, a sua volta, influenza lo

spessore dello strato. La morfologia della polvere è meno critica nella DED, ma è comunque fortemente consigliato mantenere una geometria sferica o quasi sferica.

- **Composizione chimica:** determina la composizione finale del componente. È opportuno introdurre la norma ASTM F42 che definisce le specifiche chimiche per la lega Ti6Al4V per processi PBF. È da notare che questo standard richiede solo la conformità chimica per il componente finale e non per le polveri, che potranno adattarsi al processo in cui vengono impiegate. Considerando il processo EBM nel momento in cui la lega viene fusa l'Alluminio in lega si separa dal titanio e raggiunge le alte temperature di lavoro, la cui tensione di vapore vince la tensione superficiale portandolo a vaporizzazione. La pompa utilizzata per mantenere il vuoto nella camera preleva il gas ricco di alluminio riducendo la concentrazione di Al nel bagno fuso; ciò provoca il cambiamento della composizione chimica del componente finale. Per compensare queste perdite spesso la polvere utilizzata contiene quantità maggiori di Alluminio.
- **Flowability:** indipendentemente dal fatto che si tratti di polvere utilizzata per processi PBF o DED, uno strato uniforme dipende da un flusso di polvere buono e consistente. La morfologia delle polveri e le caratteristiche della superficie, comprese le contaminazioni superficiali, possono influenzare il flusso di polvere. Allo scopo di ottenere risultati coerenti e ripetibili, ancora una volta la forma sferica senza satelliti e contaminazioni superficiali sono le caratteristiche richieste per le polveri in AM.
- **Densità delle polveri:** polveri cave con o senza gas intrappolati possono causare difetti di porosità che si ripercuotono sul componente finale. Pertanto, le polveri completamente dense sono altamente raccomandate per l'AM.
- **Effetto dell'umidità:** l'umidità sulla superficie delle particelle di polvere può causare formazione di porosità e diminuire la flowability. È essenziale considerare la polvere in luoghi asciutti ed eventualmente essicarla prima di inserirla in macchina.
- **Effetto del riciclaggio delle polveri:** tutti i processi PBF utilizzano solo una frazione di polvere inutilizzata; d'altra parte il riciclaggio risulta necessario per la fattibilità economica dei processi additivi. Anche se tutti i processi additivi che utilizzano il titanio vengono eseguiti in ambiente inerte o nel vuoto, le polveri riciclate sono esposte a più cicli termici e ciò può causare l'alterazione chimica e fisica del materiale.

2. MICROSTRUTTURA E DIFETTI NEI MATERIALI

2.1 Microstruttura dei materiali Additive Manufacturing

2.1.1 AlSi10Mg

La lega AlSi10Mg è una lega da fonderia trattabile termicamente. La composizione eutettica corrisponde all'11.7% in peso di silicio e ad una temperatura di 577°C. In condizioni di equilibrio termodinamico la solubilità del silicio in alluminio è pari all'1.65% alla temperatura eutettica; questa diminuisce poi progressivamente al diminuire della temperatura ed è pressoché nulla a temperatura ambiente. La lega AlSi10Mg è una lega ipoeutettica che possiede caratteristiche composizionali che la rendono ideale per i processi di Additive Manufacturing. Questa lega ha una composizione vicina all'eutettico che le conferisce una buona colabilità e un ristretto intervallo di temperatura di solidificazione. La presenza di silicio incrementa inoltre l'assorbimento dell'energia del laser, migliora la fluidità del metallo fuso aumentando la bagnabilità del substrato solido da parte del liquido e facilitando quindi il processo SLM. La lega AlSi10Mg contiene infine magnesio che permette la precipitazione di Mg_2Si durante il trattamento termico, causando il rafforzamento della matrice.

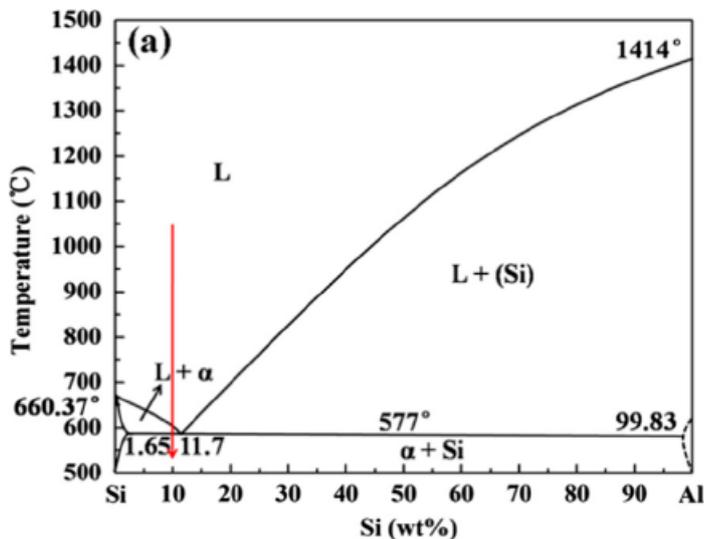


Fig. 2.1: diagramma di fase binario Al-Si

Il processo Selective Laser Melting determina la formazione di una microstruttura fine non ottenibile attraverso un processo di casting convenzionale. Ciò è legato alla piccola dimensione del melt pool che garantisce una rapida solidificazione inibendo l'accrescimento del grano. La microstruttura di un componente in AlSi10Mg, prodotto tramite SLM, presenta una struttura dendritico-cellulare costituita da una matrice di α -Al circondata da un network di fase eutettica α -Al+Si. In alcuni studi è stata inoltre osservata la presenza di Mg segregato a bordo delle celle di α -Al. A causa della condizione di non equilibrio che si verifica durante il processo SLM, la quantità di silicio respinto nella fase liquida durante la solidificazione diminuisce estendendo la solubilità del Si nella matrice di Al a temperatura ambiente fino

all'8%; si ha quindi una soluzione solida α soprassatura. Osservando nel dettaglio la microstruttura è possibile identificare tre differenti regioni, "coarse cellular zone", che è la zona cellulare grossolana; "transition zone o heat-affected zone", che è la zona termicamente alterata; e "fine cellular zone", che è la zona cellulare fine. A causa della distribuzione gaussiana dell'energia del laser la temperatura cambia all'interno della singola traccia di scansione; questa raggiunge il valore massimo nella zona centrale mentre diminuisce gradualmente spostandosi verso i bordi del melt pool. Le tre differenti regioni saranno dunque caratterizzate da una diversa storia termica. La "fine cellular zone" è situata al centro della piscina di fusione e possiede una dimensione media delle celle di $0.5-0.7\mu\text{m}$. La "coarse cellular zone", corrispondente al bordo del melt pool, possiede invece celle di dimensione compresa tra 2 e $4\mu\text{m}$. Si ha infine la zona termicamente alterata associata all'overlapping (sovrapposizione) di tracce di scansione adiacenti e alla rifusione dello strato precedentemente depositato.

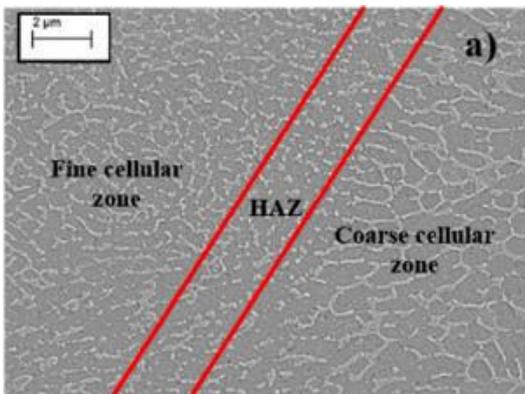


Fig. 2.2: microstruttura della lega AlSi10Mg prodotta mediante SLM

Durante l'elaborazione di parti tramite Selective Laser Melting si raggiungono velocità di raffreddamento dell'ordine di $10^6 - 10^8\text{C/s}$. Queste sono molto più elevate rispetto a quelle raggiungibili nei processi tradizionali (meno di 10^2C/s); la microstruttura sopra descritta si differenzia quindi da quella della stessa lega prodotta tramite un processo di casting convenzionale. Quest'ultima consiste in una struttura grossolana costituita da dendriti di $\alpha\text{-Al}$ circondate dall'eutettico $\alpha\text{-Al+Si}$ avente struttura lamellare o fibrosa a seconda della velocità di raffreddamento. La distanza media tra i dendriti è di circa $70\mu\text{m}$, mentre il silicio eutettico possiede una lunghezza di diversi micron e una larghezza di circa $1\mu\text{m}$.

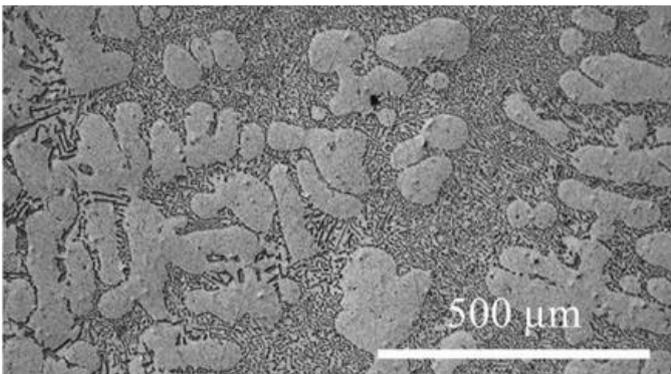


Fig. 2.3: microstruttura della lega AlSi10Mg prodotta mediante processo di casting

L'elevata resistenza e durezza nei vari componenti as-built, cioè realizzati, ma non trattati termicamente, deriva dalla microstruttura e distribuzione molto fine della fase Si nella matrice di alluminio; ciò è causato dal rapido raffreddamento e solidificazione dei processi AM.

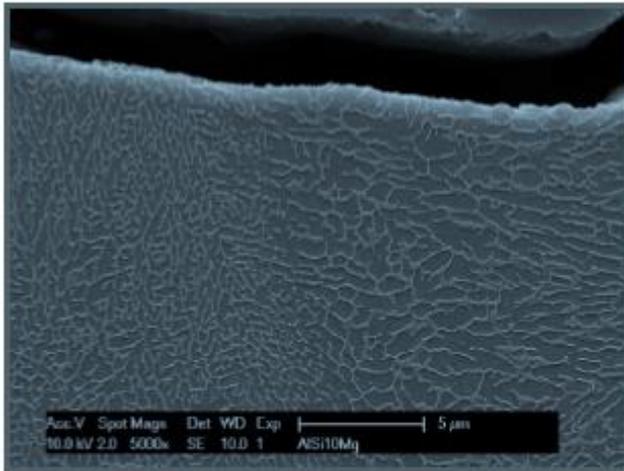


Fig. 2.4: microstruttura caratteristica dell'AISI10Mg

2.1.2 AISI 316L

Le prestazioni dei componenti realizzati in AM sono influenzate dai parametri di processo, dalla microstruttura e dai difetti, ma anche e soprattutto da fattori quali la stampante 3D usata e la tipologia di fabbricazione additiva scelta, i trattamenti superficiali e termici e il materiale. Ad esempio, l'acciaio AISI 316L ha una duttilità tale da permettere di evitare i trattamenti termici di post-processo per il rilassamento delle tensioni. Altre grandezze che influenzano le prestazioni sono le proprietà del laser, come la potenza, la dimensione del diametro focale, la lunghezza d'onda o del fascio elettronico (valori di differenza di potenziale e corrente durante il preriscaldamento e durante la fusione), le polveri per le dimensioni, la distribuzione, la forma e la composizione chimica, infine il tipo di gas utilizzato nella camera di costruzione.

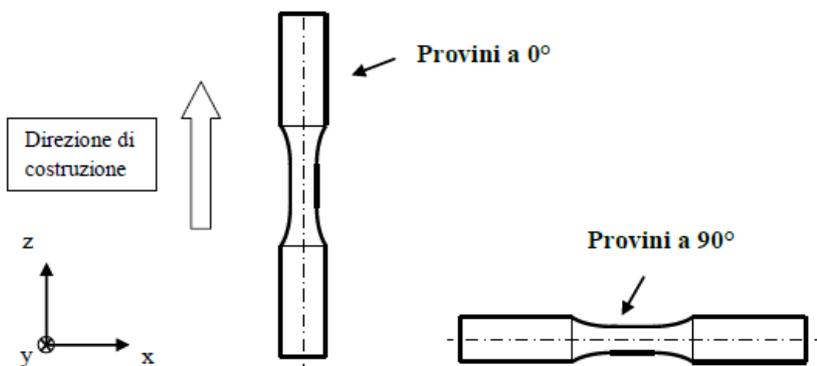


Fig. 2.5: orientazione dei provini rispetto alla direzione di costruzione

L'orientamento della direzione di costruzione determina la variazione delle proprietà meccaniche perché in base a come viene costruito il componente, cioè in base alla solidificazione dei vari strati del materiale, vi sarà una certa direzione della microstruttura a cui corrisponderanno peculiari proprietà meccaniche. Ad esempio, la microstruttura può ostacolare la propagazione della cricca ortogonalmente alla direzione di costruzione (figura 2.6 a) perché il tragitto a minor energia, cioè quello che prevede il passaggio tra un grano e l'altro è più tortuoso e quindi per avanzare deve dissipare una quantità di energia più elevata rispetto al percorso di figura 2.6 b per creare maggiore superficie di cricca.

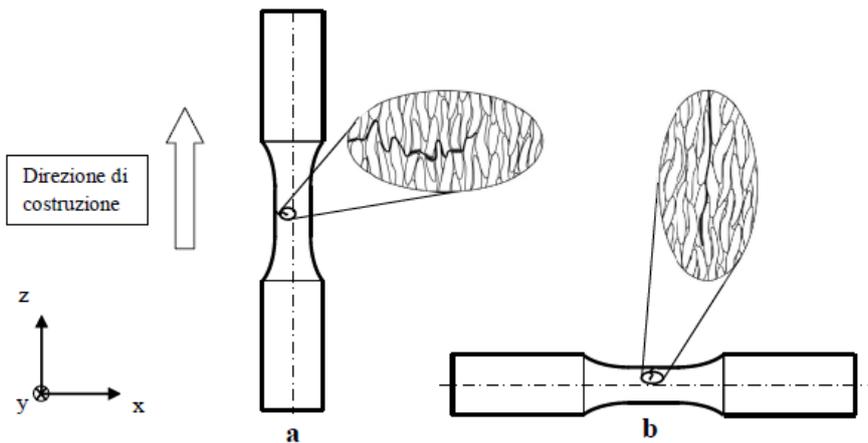


Fig. 2.6: propagazione della cricca nella direzione di costruzione (a); propagazione della cricca perpendicolarmente alla direzione di costruzione (b)

Nonostante questo, i dati fruibili in letteratura sono in contrasto in merito all'orientamento che determina le prestazioni statiche e a fatica più elevate dei componenti. Si osservano tensioni di snervamento e rottura dei campioni orientati a 90° maggiori del 75% rispetto ai campioni a 0° per l'acciaio AISI 316L. La superiorità dei campioni a 90° è stata giustificata considerando che lo strato da fondere dei provini a 90° risulta più ampio di quelli a 0° e quindi con la stessa velocità di scansione ci vuole più tempo per la fusione di un layer e il successivo. Per cui in questo intervallo di tempo c'è una più rilevante dissipazione termica e perciò un abbassamento di temperatura più sensibile. Questo genera un gradiente termico maggiore tra la pozza fusa e gli strati solidificati, ottenendo una solidificazione più rapida e quindi una microstruttura più fine a cui corrispondono proprietà meccaniche più elevate.

Ciascuna tecnologia di additive manufacturing possiede delle particolarità che contribuiscono ad influenzare le performance statiche e a fatica. Ad esempio, l'impiego del SLM è caratterizzato da una velocità di raffreddamento più elevata rispetto all'EBM e ai processi tradizionali e ciò origina una microstruttura più fine e martensitica nei confronti di quest'ultimo e dunque dimostra una maggior durezza e delle tensioni di snervamento e di rottura superiori; però anche la duttilità e la deformazione a rottura saranno inferiori. L'EBM presenta una maggiore rugosità rispetto al SLM perché lo spessore tipico del layer e la dimensione della polvere sono più rilevanti e perciò in condizioni as-built, l'EBM mostra un limite di fatica minore del SLM. La vita a fatica è più breve per i campioni di AM rispetto a quelli tradizionali per la presenza di difetti quali pori, infusi e tensioni residue e per porre rimedio si effettuano dei trattamenti quali l'Hot Isostatic Pressing (HIP) o trattamenti superficiali volti a ridurre la rugosità e quindi migliorare il comportamento a fatica. Un'eccezione riguarda l'acciaio AISI 316L, che ha mostrato un comportamento a fatica analogo a quello ottenuto tradizionalmente senza la necessità di alcun trattamento termico, con la conseguente possibilità di ottenere componenti tramite stampa 3D senza la necessità di costosi trattamenti termo-meccanici successivi raggiungendo le stesse prestazioni dei processi tradizionali.

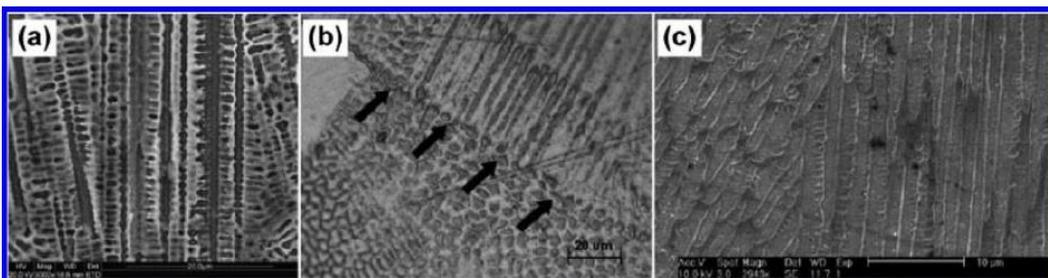


Fig. 2.7: microstruttura dell'acciaio 316L: LS (a); LMD (b); LM (c)

Eseguendo un confronto tra i valori di durezza misurati prodotti con laser melting e quelli della medesima lega ottenuta con metodi tradizionali, si evince che i primi sono superiori ai secondi del 50%. Il decremento della durezza in seguito al trattamento termico induce a pensare che a migliorare le proprietà siano le numerose dislocazioni presenti a bordo cella e intorno alle nano-inclusioni. La rete di dislocazioni agisce da rinforzo, bloccando la formazione e lo spostamento di nuove dislocazioni durante l'indentazione. Questo, oltre alla microstruttura fine, rappresenta l'unico meccanismo di rinforzo, non essendo possibile rinforzare l'acciaio mediante trattamento termico.

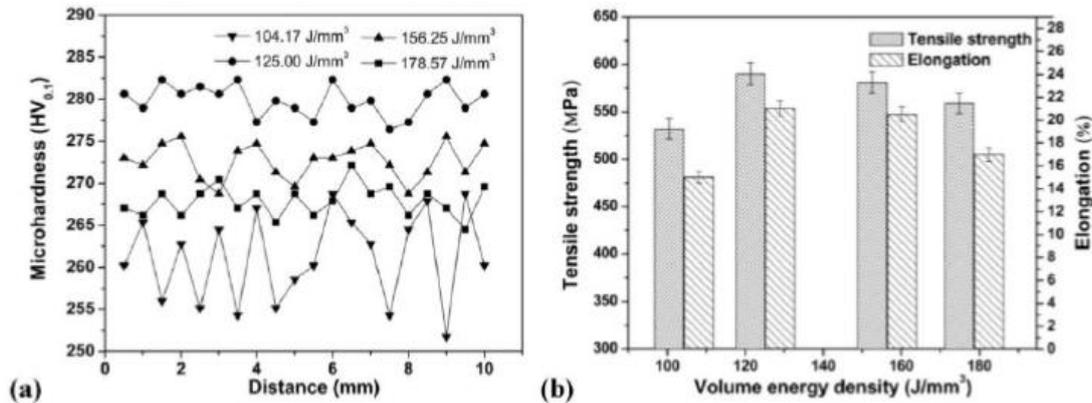


Fig. 2.8: relazione tra la distanza e la microdurezza (a); densità di energia del volume in relazione con la resistenza a trazione (b)

Questi risultati sono correlati alla presenza di difetti: per basse densità di energia si formano vuoti di grandi dimensioni tra gli strati, dovuti alla mancanza di coesione tra i melt pool, che causano la diminuzione della densità. Il valore minimo di durezza si visualizza in corrispondenza del valore di densità di energia minimo in quanto i numerosi pori collassano sotto il carico. Anche l'ingrossamento dei grani contribuisce a ridurre la durezza del materiale.

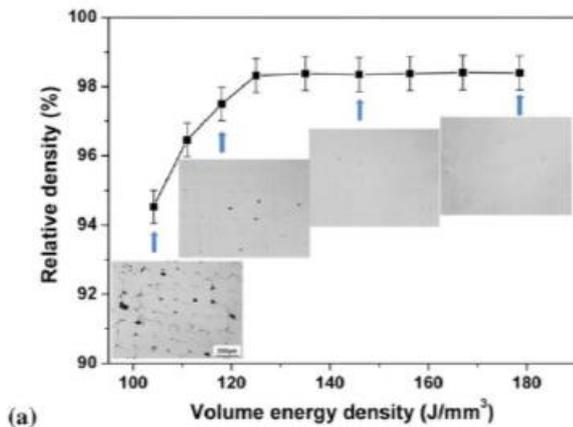


Fig. 2.9: relazione tra la densità di energia del volume e la densità relativa

In letteratura, si osserva che il selective laser melting permette di ottenere migliori proprietà resistenziali rispetto a quelle dei getti tradizionali o dei componenti forgiati, per la microstruttura fine e l'elevata densità di dislocazioni, i pori di grandi dimensioni sono la causa della ridotta duttilità dei componenti. Tuttavia, è bene tenere conto delle elevate tensioni residue che spesso caratterizzano i pezzi processati tramite SLM. Le frequenti espansioni e contrazioni termiche inducono tensioni anche superiori alle proprietà resistenziali del materiale, causando distorsioni, innesco di cricche oppure decremento della resistenza meccanica del componente. Un altro fattore che influenza il comportamento meccanico è la direzionalità dei grani, infatti essa causa anisotropia delle proprietà. La variazione della resistenza meccanica a seconda della direzione di carico è dovuta ai difetti localizzati tra gli strati pertanto nei provini

prodotti verticalmente la resistenza meccanica è minore rispetto a quelli costruiti in orizzontale. Questi ultimi hanno resistenza a trazione superiore a quella indicata dall'ASTM per l'acciaio 316L da deformazione plastica (515MPa) e allungamento analogo. A 125J/mm³ la tensione ultima e l'allungamento sono massimi e pari a 590MPa e 21.1%. La frattura è principalmente di tipo duttile e la dimensione dei dimples (cioè delle micro-cavità) è compatibile a quelle delle celle. Le superfici di frattura dei test a trazione presentano sia dimples sub-micrometrici sia caratteristiche delle fratture fragili. I campioni sottoposti a carico durante la prova di trazione a temperatura elevata (250°C) risultano più fragili rispetto a quelli posti in trazione a temperatura ambiente, pertanto con l'aumentare delle temperature la duttilità diminuisce, in accordo con i risultati delle prove di trazione in tabella 2.1. Sulle superfici di frattura sono visibili molte cavità di dimensioni variabili tra 10 e 150µm che aumentano con la temperatura. Si ipotizza che questi vuoti possano essere siti critici di innesco della frattura. Sono visibili anche polveri sferiche non fuse all'interno delle cavità di grandi dimensioni. Durante i test di trazione, nelle aree fragili e a bassa densità, i melt pool si separano lasciando delle cavità sulla superficie di frattura.

SS316L	YS(MPa)	UTS(MPa)	Uniform elongation (%)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Absorbed energy (J)
SLM at RT	487 ± 3	594 ± 4	–	49 ± 4	58 ± 9	103 ± 4
SLM at ET	376 ± 3	461 ± 3	18 ± 1	31 ± 4	60 ± 11	144 ± 15
HIP at RT/200 °C	220/160	570/450	–	54/42	78/77	–
Criteria RT/ET	220/135	525/415	–	45/-	–	120/-

Tabella 2.1: proprietà meccaniche in base al metodo di AM utilizzato

2.1.3 Inconel 625 e 718

La microstruttura tipica per l'Inconel 625 dello stato as-built, ovvero del materiale appena formato, è quella in cui i grani sono allungati lungo l'asse Z, cioè la direzione di accrescimento del materiale, originando una forte anisotropia. Questi grani crescono in maniera epitassiale (deposizione di sottili strati di materiale cristallino su un substrato massivo, anch'esso cristallino, che ne indirizza la crescita e ne determina le proprietà strutturali) attraverso i vari strati fusi e solidificati seguendo il gradiente termico, anch'esso fortemente direzionato verso il substrato. A causa del rapido raffreddamento, la microstruttura è metastabile. Comunemente si formano strutture dendritiche molto fini di due tipi: colonnari e cellulari. Per questi motivi si necessita di trattamenti termici a valle per ottimizzare la microstruttura e renderla idonea alle varie applicazioni: ad esempio si può ricorrere all'HIP per chiudere le porosità e ricristallizzare il materiale o ad altri trattamenti termici di ricottura o solubilizzazioni ed invecchiamenti.

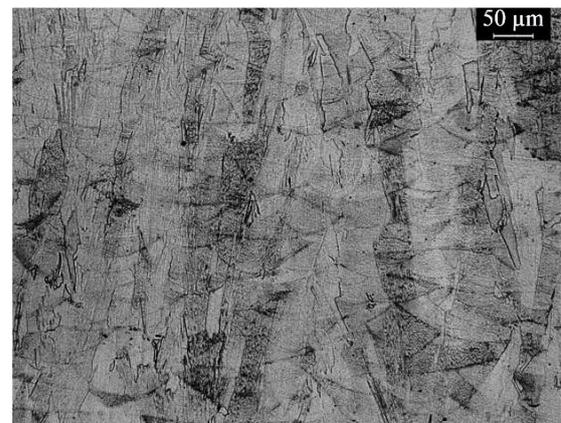


Fig. 2.10: direzione di accrescimento del grano

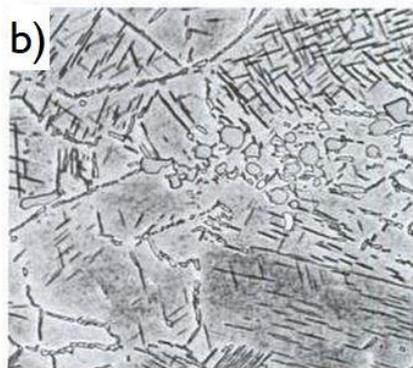


Fig. 2.11: microstruttura per l'Inconel 718

2.1.4 Ti6Al4V

Il Ti6Al4V fa parte della famiglia delle leghe di titanio di tipo alfa+beta, con la microstruttura che può variare in base alla tecnologia utilizzata per la produzione, visto che i gradienti termici e la velocità di raffreddamento differiscono per diverse tecniche di AM (DLD, SLM ed EBM).

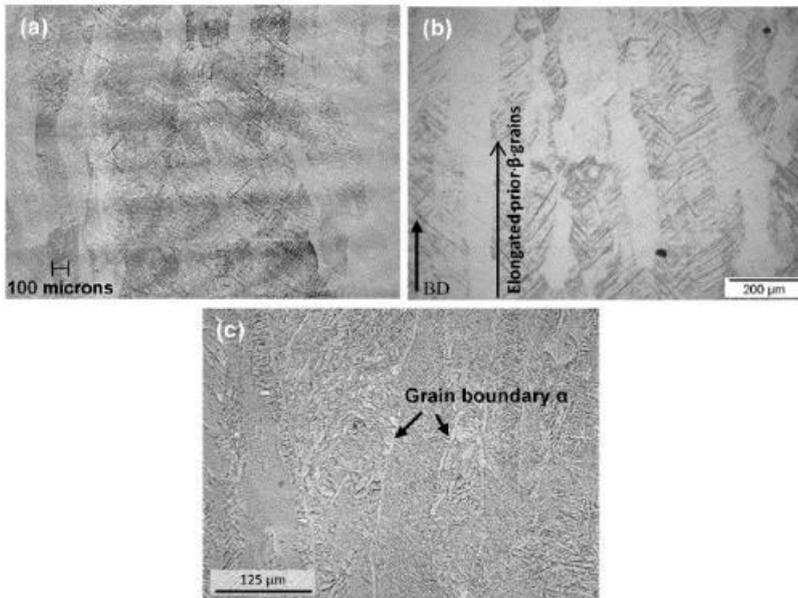


Fig. 2.12: microstruttura per il DLD (a), SLM(b) e EBM (c) per il Ti6Al4V

2.2 Analisi sulla geometria

La geometria di una parte che può essere costruita sarà fortemente influenzata dalla scelta della macchina AM. I valori possono variare notevolmente, quindi dovrebbero essere considerati nella fase di progettazione della parte.

Machine type	Typical layer thickness / μm	Minimum feature size or beam diameter / μm
PBF –SLM e.g. Renishaw	10–50	75–100
PBF –EBM e.g. ARCAM	50	100–200
DED – wire fed e.g. WAAM	3000	16 000
DED – powder fed e.g. Laser blown powder	250	380

Tabella 2.2: spessori tipici degli strati e dimensioni minime delle caratteristiche dei processi di fusione a letto di polvere (PBF) e deposizione diretta di energia (DED)

La geometria della parte è importante anche perché può esserci un deterioramento significativo delle proprietà. Di particolare importanza sono gli sbalzi in cui uno strapiombo è definito come qualsiasi area in cui invece di costruire direttamente su uno strato della parte sottostante, il materiale viene costruito direttamente sulla polvere. Un supporto insufficiente per lo strato sovrastante in fase di realizzazione può creare distorsioni nella parte dovute a tensioni residue. Questa distorsione può essere superata attraverso

l'aggiunta di strutture e diversi sistemi AM consentono diversi livelli di strutture a sbalzo prima che sia necessario aggiungere ulteriori supporti. In generale, i supporti vengono evitati il più possibile nella progettazione della parte in quanto possono influenzare negativamente le proprietà della superficie del componente. Gli sbalzi possono essere ridotti al minimo orientando attentamente la parte nel volume di costruzione.

2.3 Preriscaldamento del materiale

Per molti processi AM viene utilizzato un letto di costruzione riscaldato per riscaldare la materia prima, la piastra di base o il materiale già costruito prima che venga aggiunto lo strato successivo. A temperature più basse (100-200°C) e in base al materiale, il calore fornito rimuove l'umidità e ha un effetto minimo sulle proprietà termiche durante la fusione. Ciò è particolarmente importante nei sistemi a letto di polvere poiché l'elevata area superficiale delle particelle di polvere possono assorbire molta umidità. Una variazione di questo tempo di preriscaldamento potrebbe significare che c'è un maggior contenuto di umidità nel materiale che potrebbe portare all'aumento della porosità e a deviazioni nella composizione chimica; ad esempio, nel contenuto di idrogeno che può causare fragilità e fessurazione in alcune leghe. Il preriscaldamento a questi intervalli di bassa temperatura può essere misurato utilizzando sensori di temperatura all'interno del piano di costruzione e controllato aumentando o diminuendo il livello di riscaldamento.

In sistemi come la macchina AM di fusione del fascio di elettroni, la fase di preriscaldamento viene eseguita dal fascio di elettroni e il materiale preriscaldato può raggiungere temperature relativamente elevate, ad esempio fino a circa 1000°C per superleghe a base di nichel. A seconda della temperatura utilizzata, la lega può diventare sinterizzata dove si unisce in modo lasco attraverso la fusione superficiale. La fase di sinterizzazione riduce la necessità di supporti e il preriscaldamento e la sinterizzazione possono ridurre i livelli di tensione residue e/o distorsioni nel pezzo. Queste temperature di preriscaldamento relativamente elevate influenzeranno anche l'evoluzione microstrutturale del materiale, a causa del tempo, della temperatura e della velocità di solidificazione e di raffreddamento. Di conseguenza in sistemi come l'EBM la deviazione del regime di preriscaldamento del letto di polvere può avere un impatto significativo sulle proprietà meccaniche della parte finale e dovrebbe essere controllata. Questo controllo viene solitamente eseguito a livello della macchina monitorando la temperatura del volume di costruzione e qualsiasi calibrazione dovrebbe garantire che la fase di preriscaldamento non vari significativamente tra le costruzioni. Se la certificazione si basa su un piano di costruzione preriscaldato, la temperatura di preriscaldamento del piano di costruzione deve essere calibrata per garantire che sia alla temperatura corretta e non vari fino ad un certo punto in cui la dispersione nelle proprietà del materiale potrebbe essere influenzata.

2.4 Post-lavorazione termica

Esistono diverse tecniche per la post-elaborazione termica. I trattamenti termici vengono utilizzati per migliorare le proprietà meccaniche e ridurre la dispersione. Molte delle tecniche sono comuni ai metodi di

produzione convenzionali, pertanto verranno delineate le tecniche disponibili e il motivo per cui possono essere applicate alle parti AM.

Alloy	Ti-6Al-4V	Inconel 718
Stress relief	2 hours, 700–730°C [5.75]	0.5 hours at 982°C [5.76] 1065 ± 15°C for 90 min (-5±15 min) [5.77]
Hot isostatic pressing (HIP)	2 hours, 900°C, 900 MPa [5.75] 180 ± 60 min, 895–955°C, >100 MPa [5.78]	4 hours at 1120°C, 200 MPa [5.77]
Solution treat (ST)	Not typical	1 hour at 980°C [5.79]
Aging	Not typical	8 hours at 720°C Cool to 620°C Hold at 620°C for 18 hours total [5.79]

Tabella 2.3: tipiche procedure di post-elaborazione per il Ti6Al4V e l’Inconel 718

2.5 Finitura superficiale

La finitura superficiale descrive una serie di processi che riducono la rugosità superficiale della parte e possono anche rimuovere eventuali impurità superficiali accumulate durante i trattamenti termici. La rugosità superficiale è una misura di quanto varia la superficie di un materiale da una superficie liscia e piatta. Sebbene per alcune applicazioni e caratteristiche la rugosità sia accettabile, i componenti AM possono avere un livello di rugosità superficiale superiore rispetto ai componenti che sono stati lavorati utilizzando tecniche sottrattive. Le libertà di progettazione di AM potrebbero consentire la costruzione di parti più complesse, ma di conseguenza potrebbe essere più difficile produrre la finitura superficiale richiesta utilizzando tecniche di finitura convenzionali. Le tecniche che non richiedono l’accesso della macchina alle superfici interne, ad esempio, possono essere applicabili a queste parti complesse. Per parti meno complesse può essere preferibile la lavorazione convenzionale che richiede l’accesso alla macchina poiché è ampiamente disponibile e tecnologicamente avanzata (controllo numerico preciso, gamma di utensili di lavorazione, ecc...).

I dettagli dei processi di finitura superficiale utilizzati sia per la parte finale che per eventuali provini devono essere registrati poiché avranno un’influenza sulle prestazioni a fatica e sulle sollecitazioni residue nella parte finale. Come con qualsiasi processo utilizzato, la tecnica di finitura superficiale deve essere calibrata per garantire che la finiture fornita dal processo sia coerente e non vari di una quantità superiore a quella consentita.

Una maggiore complessità di progettazione può significare che l’accesso alla macchina per la finitura superficiale non è possibile, ad esempio dove sono presenti strutture interne fini o superfici oscurate. In questi casi vengono talvolta utilizzate tecniche non convenzionali. Le tecniche elettrochimiche, ad esempio, non richiedono l’accesso in linea di vista alla superficie e quindi possono essere più appropriate per parti complesse. Tuttavia, se è importante una finitura superficiale fine, attentamente controllata e riproducibile,

anche su strutture interne/oscurate, potrebbe essere necessario riprogettare la parte per consentire l'accesso alla macchina per le operazioni di lavorazione convenzionali.

	Technique	Description
Mechanical	Milling	Surface roughness is reduced using a multi-axis cutter that cuts away the surface of the material creating a smoother surface.
	Abrasive Flow machining	Surface roughness is reduced by blasting the sample with an abrasive material using pressurized air or fluid. For PBF, the powders for AM can be used as the abrasive media.
	Vibratory or rotary grinding	Part is placed in a bowl or drum with an abrasive grinding media which is then vibrated or rotated, using the relative movement of the media and the part to reduce surface roughness in the part.
	Micro machining process	An oscillating or rotating abrasive tool is used to improve surface roughness. Material removal can be performed in a stepwise process with each step further improving surface roughness.
Thermal	Thermal deburring	The part is placed in a pressure chamber, which is filled with a gas mixture of oxygen and fuel gas. The gas is ignited and due to limited heat conduction and the high temperature, burrs are oxidized and removed.
	Laser polishing	A laser is used to melt a thin layer on the surface of the material leading to reduced surface roughness in the part due to the surface tension of the molten zone [5.86].
Electrochemical	Electro polishing	Cathode surfaces are placed in an electrolyte material with the part as the anode and a current is applied. There is an increase in current density at features such as surface roughness peaks and burrs which will remove them, reducing surface roughness the part.
	Chemical milling	The part is immersed in a strong acid material which is temperature controlled. The chemical preferentially dissolves the peaks due to surface roughness, smoothing the surface.

Tabella 2.4: riepilogo e descrizione dei tipi di finitura superficiale disponibili

2.6 Porosità

Ci sono due elementi principali per il riconoscimento delle porosità e sono la tomografia computerizzata e l'analisi al microscopio ottico della cross section delle particelle. Le porosità possono determinare la formazione di difetti nel pezzo, peggiorando di conseguenza le proprietà.

Tramite la tomografia si effettuano le scansioni 3D delle polveri, infatti ogni scansione presenta migliaia di immagini 2D sovrapposte e ciò permette di realizzare un'immagine tridimensionale.

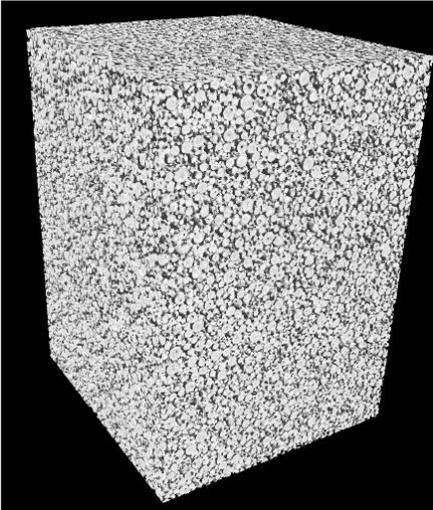


Fig. 2.13: immagine 3D della scansione delle polveri

Un campione di polveri riciclate si può osservare in figura 2.14, in cui si osserva un'immagine bidimensionale; si può notare come, soprattutto nelle particelle di grandi dimensioni, siano evidenti i pori all'interno di ogni particella. Lungo l'asse Z si possono effettuare molte scansioni del campione e ciò permette di rilevare le porosità che altrimenti non potrebbero essere visualizzate da una singola immagine bidimensionale.

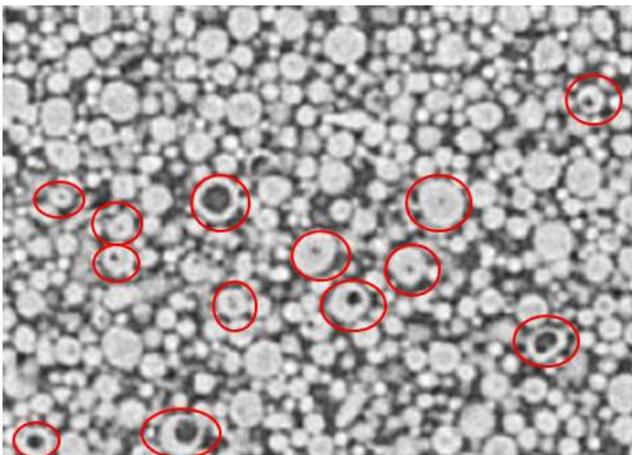


Fig. 2.14: porosità presenti nelle particelle di polvere

L'analisi della cross section presenta una risoluzione dell'immagine più elevata rispetto a quella della tomografia, ma è consentita l'analisi di un solo piano del campione. In figura 2.15 si osservano le particelle derivanti dal lotto in cui lo spessore è di $30\mu\text{m}$ e quello con spessore di $60\mu\text{m}$, in cui si osservano delle porosità, anche di dimensioni paragonabili a quelle delle particelle.

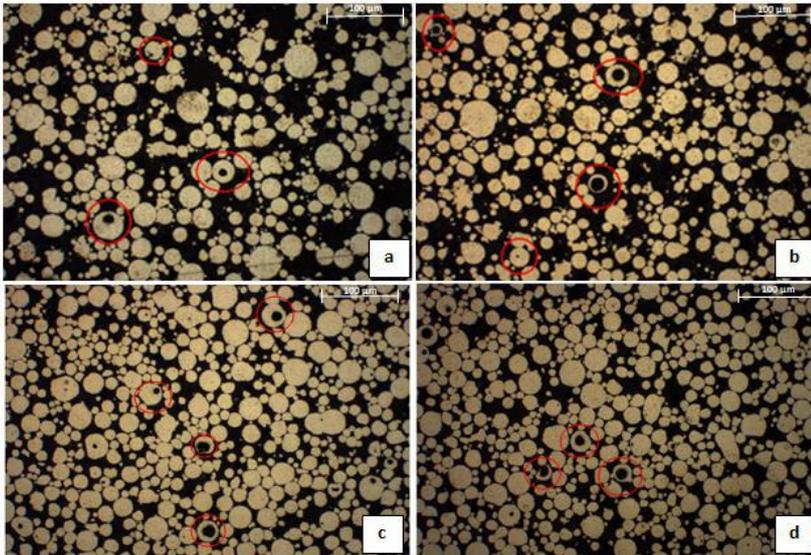


Fig. 2.15: analisi tramite cross section delle polveri: a) vergine, b) riciclata con lotto di 30 μ m; c) vergine, d) riciclata con lotto di 60 μ m

I prodotti realizzati in 316L con AM sono caratterizzati da difetti tipici quali porosità ed infusi la cui presenza è deleteria per le proprietà meccaniche a causa della loro forma, dimensione, posizione e del loro numero, infatti più la forma è irregolare e acuminata, più aumenta il fattore di concentrazione delle tensioni K_t , inoltre più le loro dimensioni sono elevate più riducono la sezione resistente e di conseguenza aumentano le tensioni agenti riducendo la vita a fatica. La formazione di questi difetti non è del tutto evitabile perché la fabbricazione additiva non prevede la compressione e la compattazione delle polveri prima della loro fusione e sinterizzazione, perciò non essendo soggetta a pressioni analoghe a quelle dei processi tradizionali riesce più difficile raggiungere la piena densificazione. L'ottimizzazione dei parametri di processo consente di ovviare a tutto questo, così come la rifusione dei layer o l'adozione di trattamenti termici dopo la produzione, infatti la pressione e le temperature che vengono applicate durante i trattamenti sono tali da chiudere le porosità presenti e fondere la polvere eventualmente rimasta infusa. Altri trattamenti termici quali la ricottura possono modificare la microstruttura e ottenere un comportamento analogo a fatica a quello dei processi tradizionali, così come l'invecchiamento che omogeneizza la microstruttura pur non chiudendo i pori presenti. Lo stesso effetto si ottiene anche tanto più sono prossimi alla superficie e tanto più sono numerosi; si può anche individuare una gerarchia nella posizione dei difetti a partire da quelli distribuiti in tutto il volume, per poi passare ai superficiali, sub-superficiali e interni. La dimensione dei pori risulta meno rilevante della loro posizione e inoltre il loro volume si dimostra di importanza ridotta, perché anche se ridotto, ma associato ad una forma acuminata, può abbattere la vita a fatica più di un campione con un volume di pori maggiore, ma di forma sferica. Quest'ultimo aspetto si spiega sia per il maggior effetto di concentrazione delle tensioni dei pori irregolari, sia considerando che le prestazioni statiche sono influenzate non solo dalla densità, ma anche dalla microstruttura. Anche la disposizione delle porosità risulta importante, perché nel caso si formino parallelamente ai layer e siano disposti ortogonalmente alla direzione di carico, possono concentrare in modo sensibile le tensioni abbattendo la vita a fatica; questo fatto fornisce anche una motivazione sul miglior comportamento a fatica dei provini a 90° rispetto a quelli a 0°.

Sempre nel caso del 316L, realizzato tramite SLM, è possibile raggiungere le dimensioni di 220 μ m, contenenti talvolta particelle di dimensioni di 25 μ m. Qualora venga utilizzata una bassa densità di energia i pori sono numerosi, distribuiti in modo uniforme e hanno forme irregolari. All'interno sono presenti sfere di materiale con dimensioni compatibili a quelle delle polveri pertanto si ipotizza siano polveri non fuse, in accordo con la teoria che le basse energie e la scarsa penetrazione del laser generino un melt pool di

dimensioni ridotte con energia insufficiente a fondere completamente tutte le polveri e assicurare un buon legame tra gli strati. Aumentando la densità di energia a $104.52\text{J}/\text{mm}^3$ la porosità è minima perché la viscosità della fase liquida, dipende dal livello di temperatura, è sufficientemente bassa affinché i vuoti vengano riempiti dal materiale. Incrementando ulteriormente il livello di energia specifica introdotta si ha nuovamente la formazione di pori anche se di forma sferica. In questo caso la densità di energia è sufficientemente elevata da poter causare la vaporizzazione degli elementi basso-fondenti, causando la formazione di pori. Tra le cause dei pori da gas vi è anche la rugosità: i picchi e le valli dovute alla rugosità di uno strato impediscono la deposizione di uno strato successivo omogeneo pertanto la densità di energia può essere insufficiente a fondere completamente la polvere in alcune regioni in cui lo spessore può essere maggiore. Inoltre, il sistema di picchi e valli può intrappolare dei gas sotto lo strato di polvere, che durante il riscaldamento operato dal laser, si espandono facendo spostare la fase liquida. Utile alla soluzione di questo problema è il laser re-melting che consiste nel rifondere con il laser lo strato appena depositato.

Nel caso dell'AlSi10Mg realizzato sempre tramite processi SLM è tipicamente presente una porosità connessa:

- Alla presenza di vapore metallico all'interno del metallo fuso: i gas possono rimanere intrappolati dalla turbolenza superficiale o destabilizzare la traccia di scansione stessa;
- All'incompleta fusione delle polveri metalliche.

Una distanza troppo grande tra due passate ostacolerà la creazione di uno strato continuo di materiale. Inoltre, il vapore metallico tenta di fuoriuscire dalle tracce fluide appena scansionate dal laser; queste ultime possono collassare su sé stesse formando dei vuoti. Per ridurre la porosità si dovrà pertanto stabilizzare le tracce di scansione attraverso la modifica dei parametri di processo, in particolare tale esigenza richiede un aumento della potenza del laser e della velocità di scansione così da velocizzare il tempo di riscaldamento e quindi limitare la formazione dei vapori metallici. La presenza di porosità nella struttura potrebbe essere connessa alle dimensioni delle polveri utilizzate oltre che alla bagnabilità tra cilindro fuso e substrato. Utilizzando polveri di dimensioni elevate (superiori ai $100\mu\text{m}$) è necessario un laser dall'elevata potenza di emissione: il trasferimento di calore nello strato polverulento infatti è ostacolato dalla presenza di vuoto nello spazio tra le particelle. Inoltre, per una fissata densità di energia, la struttura del materiale ottenuta con polveri grandi tende ad essere più porosa di quella ottenuta da polveri fini. L'utilizzo di polveri dalle dimensioni molto piccole può originare altresì porosità nel materiale; i film di ossidazione hanno infatti un'importanza molto superiore quando il rapporto superficie/volume è elevato. La presenza di ossidi va a ridurre la bagnabilità all'interfaccia solido-liquido. Le polveri di alluminio ad oggi più comunemente utilizzate hanno dimensioni comprese tra i 20 e i $50\mu\text{m}$, la polvere utilizzata per realizzare le strutture oggetto di tale trattazione ha esattamente questa dimensione.

I campioni realizzati in Inconel 625 in Selective Laser Melting possono venire realizzati senza fenomeni di cracking e con una porosità residua al di sotto dello 0.3% generata da gas intrappolati nelle particelle di polvere gas-atomizzate e liberati durante la fusione del pozzetto di fusione. Questi ultimi possono misurare in media tra i 75 e i $100\mu\text{m}$ in larghezza e tra i 25 e i $40\mu\text{m}$ in profondità. Il materiale allo stato as-built presenta la struttura tipica delle superleghe AM: grani fini allungati e con un'architettura dendritica di due tipi, una colonnare lungo la direzione Z e una cellulare. I dendriti hanno dimensioni sub-metriche, di quasi due ordini di grandezza inferiori rispetto alle colate tradizionali.

In tabella 2.5 sono riportati i valori medi della porosità dei campioni in lega Ti6Al4V prodotti mediante cast ed EBM. In quest'ultimo caso la porosità è stata determinata sulla sezione parallela e perpendicolare rispetto alla direzione di crescita Z.

Tipologia Campione	Porosità (%)	Deviazione Standard
Cast	0.20	0.06
EBM Perpendicolare	0.51	0.26
EBM Parallelo	0.31	0.16

Tabella 2.5: valori medi della porosità prodotti per casting e per EBM

I valori riportati evidenziano come la porosità del campione ottenuto con tecniche convenzionali quali il casting sia inferiore a quella dei campioni realizzati tramite AM. Tale differenza è dovuta sia ad una minore presenza di difetti, soprattutto nella zona centrale delle superfici analizzate, sia alle dimensioni dei pori che dei lack of fusion, cioè la mancanza di penetrazione, che sono sensibilmente inferiori. Il campione EBM ottenuto lucidando la superficie perpendicolare alla direzione di crescita risulta avere una porosità superiore rispetto agli altri. La sua superficie, infatti, presenta delle porosità di dimensioni confrontabili rispetto a quelle osservate sulla sezione parallela delle porosità del campione, ma queste sono in quantità superiore. In modo particolare, nella lega ottenuta per EBM le porosità presentano dimensioni da 40 a 60 μm , mentre in quella per casting il range è tra 20 e 30 μm . Anche i valori maggiori di deviazione standard sono conseguenza della presenza di pori con dimensioni maggiori nei campioni prodotti per AM rispetto a quelli ottenuti per casting. La presenza di porosità, in modo particolare quelli derivanti da lack of fusion, contribuisce nei campioni di tipo EBM all'anisotropia del materiale; la dimensione maggiore dei lack of fusion, infatti, è perpendicolare alla direzione di realizzazione e la loro forma irregolare può presentare zone non smussate in cui la concentrazione delle tensioni può essere molto alta e portare il materiale alla frattura.

2.7 Strategia di scansione

La traiettoria della fonte di calore durante la costruzione, stato dopo strato, è nota come strategia di scansione. Sono state sviluppate diverse strategie di scansione, ciascuna ottimizzata per particolari tecniche di elaborazione. Scansione dell'isola, un motivo a scacchiera in cui vengono utilizzate tracce bidirezionali alterate per riempire la struttura interna e successiva passata di contorno viene utilizzata per migliorare la finitura superficiale e ridurre la porosità che potrebbe accumularsi alla fine di ogni singola traccia laser. Ogni strato deve essere ruotato di un certo angolo di tratteggio rispetto al precedente, al fine di evitare un'eccessiva microstruttura direzionale e ridurre la concentrazione dei difetti.

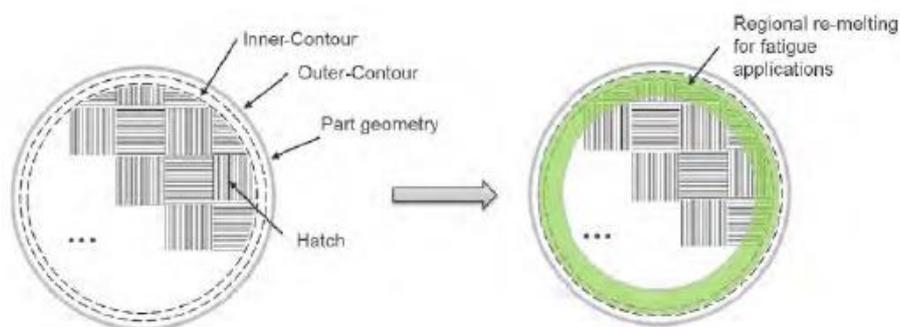


Fig. 2.16: rifusione del contorno proposta

2.8 Tensioni residue

Una delle principali preoccupazioni nelle parti prodotte in AM è la presenza di tensioni residue non trascurabili in tutta la struttura del materiale, che possono avere un impatto grave sulle applicazioni industriali di AM. L'immissione di energia altamente localizzata causa grandi gradienti termici che sono la causa principale delle tensioni residue nelle parti AM. Queste sollecitazioni possono influenzare notevolmente il comportamento disordinato delle parti, causando eventualmente distorsioni e persino crepe nel caso in cui la sollecitazione superi la resistenza a trazione locale del materiale.



Fig. 2.17: esempio di grave incrinatura di parti dopo l'elaborazione SLM

Le tensioni residue dipendono in gran parte dalle proprietà del materiale, come la conduttività della polvere e il coefficiente di espansione termica; geometria del pezzo e struttura di supporto, con parti in parete sottile particolarmente a rischio di deformazione; parametri di processo e strategia di scansione laser. L'ottimizzazione dei parametri macchina è stata studiata a fondo e sono state trovate molte soluzioni pratiche volte a ridurre la gravità del problema: è stato dimostrato che piste laser più corte producono efficacemente tensioni residue inferiori, indicando così la strategia di scansione dell'isola come la migliore per ridurre il problema, soprattutto se abbinato a basse velocità di scansione. Un'altra tecnica ampiamente utilizzata per ridurre le tensioni residue è l'uso di una piastra di costruzione riscaldata che è fondamentale per ridurre i gradienti termici durante la costruzione. Una temperatura di preriscaldamento più alta aumenta anche la diffusione atomica, con conseguente aiuto per l'energia di deformazione interna. La presenza di tensioni residue non trascurabili rende necessario prevedere la deformazione del pezzo utilizzando strutture di supporto appropriate, destinate a dissipare il calore dalla costruzione e a sostenere e bloccare le caratteristiche a sbalzo, nonché adottare trattamenti di post-processo antistress. Una riduzione delle sollecitazioni nell'intervallo 250-300°C per 2h si dimostra efficace per ridurre le sollecitazioni residue nella lega AlSi10Mg. Nuove tecniche di modellazione stanno inoltre iniziando a consentire al progettista di compensare la distorsione ideando parti che raggiungeranno la geometria desiderata dopo il raffreddamento.

2.9 Anisotropia

Uno degli effetti legati alla produzione a strati di leghe metalliche è la creazione di proprietà meccaniche anisotrope. Sebbene la presenza di porosità e di crepe all'interno della struttura siano due problemi fondamentali, anche quello dell'anisotropia non deve essere sottovalutato, infatti, influisce notevolmente sulle prestazioni effettive delle parti AM finali, poiché le loro prestazioni meccaniche dipendono dalla loro

direzione di costruzione. La causa principale dell'anisotropia della parte può essere attribuita alla conduzione del calore direzionale nella parte durante il processo di costruzione: quando gli strati vengono aggiunti nella direzione Z, c'è una complessa storia termica che si traduce in una crescita epitassiale (disposizione di sottili strati di materiale cristallino su un substrato massivo) dei grani lungo la direzione di costruzione. La microstruttura delle parti as-built presenta grani allungati, lungo la direzione di costruzione e ciò si riflette nelle proprietà meccaniche della parte finita; molteplici studi hanno evidenziato differenze significative di allungamento e resistenza alla trazione a seconda della direzione di costruzione della parte. Ciò impone un controllo e una pianificazione rigorosi nella scelta dell'orientamento di costruzione della parte durante la fase di manipolazione del file, per massimizzare le proprietà di interesse ed evitare guasti prematuri. L'anisotropia, essendo correlata a grandi gradienti termici inerenti l'AM, è fortemente influenzata dai parametri di costruzione e può essere mitigata variando la strategia di scansione o applicando il riscaldamento appropriato della piastra di base durante la costruzione. Ciò ridurrà i gradienti termici e rallenterà il raffreddamento della parte, migliorando la diffusione atomica e l'omogeneizzazione della struttura. Un'altra tecnica per ridurre l'influenza dell'anisotropia è l'applicazione di trattamenti termici post-processo, progettati per omogeneizzare la microstruttura del materiale, ottenendo proprietà del materiale più simili in ciascuna direzione.

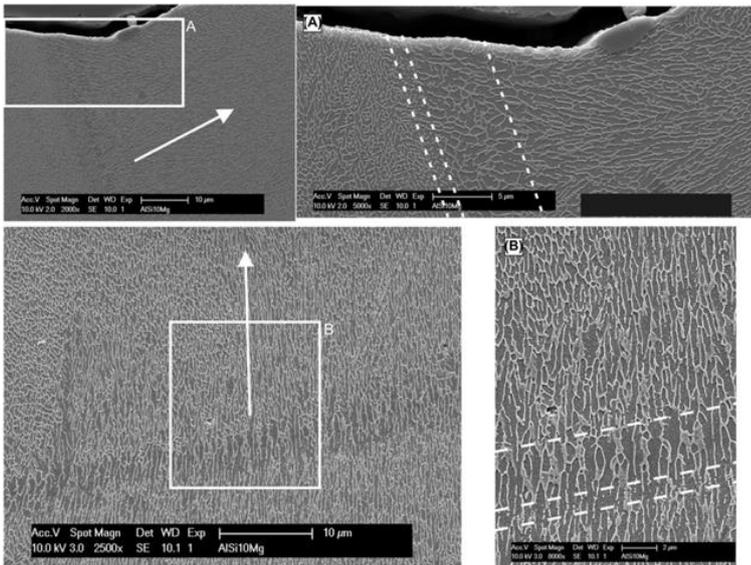


Fig. 2.18: microstruttura SLM per AISI10Mg che mostra dendriti allungati nella direzione della freccia; i grafici a destra sono gli ingrandimenti delle aree nel riquadro bianco

2.10 Altri tipi di difetti in base al materiale

Per gli acciai 316L sono presenti alcune tipologie di difetti che influiscono sulle proprietà meccaniche finali:

1. Delaminazione/decoesione: per delaminazione si intende la scarsa adesione tra gli strati. Questo difetto si ricollega al meccanismo di formazione dei pori e alla presenza di ossigeno nella camera di lavorazione.
2. Balling effect: consiste nella sferoidizzazione della fase liquida per determinare condizioni di temperatura, bagnabilità e tensione superficiale. A seguito di balling, durante il processo, viene impedita la deposizione uniforme della polvere; inoltre, per il debole legame interstrato e gli stress termici, tendono ad insorgere porosità e delaminazione. Elevati punti di fusione comportano

consistenti forze di coesione ed elevate tensioni superficiali che portano la fase liquida a disporsi secondo forme a minor stato di energia ovvero la tendenza ad interrompere il melt pool in gocce sferiche. L'elevata viscosità dovuta alla forte energia di coesione intrinseca al materiale riduce la fluidità della fase liquida e l'elevata conducibilità termica favorisce una rapida solidificazione. La presenza di ossigeno può determinare la formazione di un film di ossidi sulla superficie dei melt pool, compromettendo la bagnabilità tra strati successivi e generando microstrutture sferiche e con pori. Altro fattore importante è la presenza di solfuri, che influiscono sulla tensione superficiale e quindi sulla presenza di difetti.

3. Polveri non fuse: è un difetto associato alla formulazione di vuoti, infatti come descritto sopra, per basse densità di energia il laser non riesce a fondere completamente le polveri che rimangono intrappolate nella traccia liquida.
4. Segregazione: come riportato nella descrizione della microstruttura, i grani sono composti da sub-struttura cellulare con medesimo orientamento cristallografico. Pertanto, la suddivisione in celle viene interpretata come conseguenza al processo di rapida solidificazione che interrompe i processi diffusivi, facendo segregare gli elementi più pesanti come il molibdeno, nichel e ferro a bordo delle celle. In particolare, la segregazione del molibdeno a bordo delle celle può causare un decremento della resistenza alla corrosione.

I più comuni difetti metallurgici che si possono verificare nei componenti prodotti per fusione selettiva in relazione all'AlSi10Mg sono:

1. Cracking: alcune leghe di alluminio, come AlSi10Mg, possono incorrere nel fenomeno di cracking durante la solidificazione o la fusione; le leghe di alluminio infatti hanno un ampio range di temperature di solidificazione, un alto coefficiente di espansione termica e si restringono fortemente solidificando. Il fenomeno del cracking in fase di fusione può essere ridotto minimizzando la dispersione di energia del laser nel letto di polvere. Durante la solidificazione, gli elementi di lega e le impurità sono confinati nei bordi grano e persistono in fase liquida fino a basse temperature; affinché gli stress residui e quindi i fenomeni di cracking siano minimizzati è necessario che il liquido sia sufficiente a riempire le fratture che si generano durante il raffreddamento, in questo modo sono mitigati gli effetti di intaglio; le tensioni residue sono in parte assorbite dal materiale solidificatosi all'interno della fessura. La sensibilità al cracking delle leghe di alluminio processate con macchinari SLM dipende dai parametri di processo adottati. Generalmente parametri consigliati dalle case costruttrici dei macchinari in funzione del materiale adottato sono sufficienti a scongiurare la presenza di fessurazioni nel componente pieno. Nelle strutture reticolari spesso tali parametri non consentono di evitare completamente il cracking.
2. Perdita degli elementi di lega: l'elevata densità di energia concentrata dal laser sulla polvere metallica può provocare l'evaporazione selettiva di alcuni elementi di lega basso fondenti in quanto possiedono una pressione di vapore all'equilibrio superiore. L'evaporazione selettiva degli elementi di lega è responsabile della degradazione delle proprietà funzionali dei componenti ottenuti tramite fusione selettiva con fasci laser. Ad esempio, l'evaporazione del magnesio durante la fusione laser delle leghe di alluminio che lo contengono, può inibire il processo di rafforzamento per precipitazione della lega provocando così la riduzione di numerose proprietà meccaniche desiderabili come: resistenza meccanica, durezza, duttilità, resistenza alla corrosione e suscettibilità al cracking. L'impoverimento degli elementi alliganti inoltre destabilizza la traccia di scansione e genera porosità nel materiale; la perdita degli elementi di lega va pertanto contrastata. A tal proposito è necessario regolare la temperatura del bagno di fusione intervenendo direttamente sulla potenza emessa dal laser. Attraverso l'utilizzo di polveri la cui composizione è appositamente

progettata per compensare la perdita degli elementi di lega è possibile risolvere parzialmente il problema del crollo di proprietà meccaniche dell'instabilità delle tracce di scansione conseguente alla presenza di vapori metallici nel bagno di fusione, problematica che risulta accresciuta nella realizzazione di strutture reticolari.

3. Inclusione di ossidi: l'ossido superficiale inibisce il meccanismo di densificazione favorendo il "balling effect", inoltre è la causa dell'interruzione della crescita dei grani tra i layer. La superficie del bagno di fusione si ricoprirà di uno strato di ossido a causa dell'aria e dei gas intrappolati. Si osserva che lo strato di ossido si forma sia sulla superficie già solidificata che in quella ancora liquida. Lo strato ossidato che si trova nella zona della superficie più elevata del bagno di fusione evapora quando viene raggiunto dal raggio laser, mentre rimane intatto nelle altre superfici. I processi di ossidazione sono ritenuti tra i principali responsabili della presenza di porosità e cracking nei componenti di alluminio e leghe ottenuti per SLM, anche se non sono ancora chiare le dinamiche e i ruoli dell'ossido nella formazione di tali difettosità. Le dinamiche chimico-fisiche che prendono parte al processo di fusione delle polveri non sono ancora totalmente comprese, infatti è estremamente complesso studiare il fenomeno di trasmissione del calore nel letto di polvere: il mezzo non è omogeneo, c'è la formazione di fase liquida e le condizioni non sono stazionarie, per di più tutti i parametri che regolano i flussi termici sono connessi al materiale utilizzato e alla geometria scansionata. Risulta impossibile pertanto formulare un modello generale; per ogni condizione di processo e per ogni materiale si devono considerare diversi modelli previsionali delle proprietà del materiale finito.

2.11 Valutazione non distruttiva

La valutazione non distruttiva (NDE) viene utilizzata in tutti i processi di produzione per verificare la presenza di difetti e fornire garanzia di qualità. Come si osserva in figura 2.19, la tecnica dei test non distruttivi (NDT) utilizzata dipende in gran parte dalla risoluzione richiesta per risolvere i difetti e dalla profondità di ispezione che è richiesta nella parte. Queste tecniche possono essere classificate in superficie, cioè ispezione con penetrazione di colorante (DPI), superficie/vicino alla superficie, cioè Eddy Current Testing (ECT) e misurazioni volumetriche, cioè Ultrasound Testing (UT) e X-Ray Computed Tomography (XRCT). Le tecniche di rugosità superficiale discusse in precedenza hanno una risoluzione molto alta, ma saranno in grado di fornire solo informazioni sulla finitura superficiale della parte.

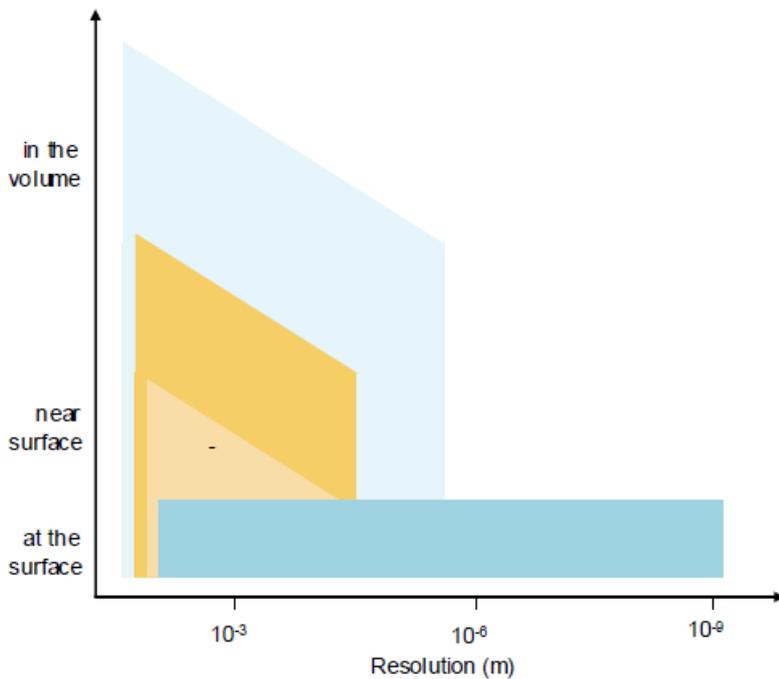


Fig. 2.19: risoluzione e profondità di diverse tecniche di NDE applicate alla produzione additiva

Nei test con dei liquidi penetranti, un colorante viene applicato sulla parte che entra in contatto con eventuali difetti di rottura della superficie. Il colorante in eccesso, che rimane sulla superficie, viene lavato via prima di estrarre il colorante dai difetti in modo che possano essere visualizzati alla luce ultravioletta o bianca, a seconda del tipo di colorante utilizzato. Nonostante il suo ampio utilizzo nell'ispezione di difetti di rottura superficiale, irregolari o ruvidi, le superfici a volte presenti nelle parti AM rendono molto difficili le prove penetranti sulle parti as-built. Invece, i test penetranti possono essere utilizzati su parti lavorate per determinare i difetti di rotture della superficie.

La Eddy Current Testing è una tecnica ampiamente utilizzata che rileva i difetti superficiali e in prossimità della superficie dei materiali elettricamente conduttivi. Quando una corrente alternata scorre attraverso una bobina che viene posizionata vicino alla superficie del campione, il campo magnetico associato indurrà correnti circolari (vortici) nel campione, generando proprio un campo magnetico che interagirà con la bobina magnetica. Dove esistono difetti, la corrente e i campi magnetici vengono interrotti. Questi cambiamenti possono essere misurati e fornire informazioni sulla dimensione dei difetti superficiali e in prossimità della superficie. Come con altri componenti metallici, la finitura superficiale e la struttura dei grani giocano un ruolo nel modo in cui l'ECT riesce a rilevare i difetti, quindi potrebbe essere necessario eseguire i test a correnti parassite su un campione lavorato e potrebbe essere necessario tenere conto delle differenze nella microstruttura osservate negli usi AM, considerando la propagazione delle onde ultrasoniche e la spaziatura temporale tra i segnali riflessi per rilevare e localizzare i difetti in un campione e derivare le proprietà elastiche di un materiale. Il test agli ultrasuoni può essere suddiviso in contatto, immersione senza contatto e senza contatto in aria a seconda di come il segnale acustico viene applicato al campione. Come discusso in precedenza, la rugosità superficiale in molte parti AM può influire sulle tecniche di contatto, quindi potrebbe essere necessario lavorare i campioni prima del test. Inoltre, l'UT può essere anche influenzato dalle microstrutture anisotrope talvolta osservate in AM che potrebbero interferire con il passaggio delle onde ultrasoniche attraverso la parte. Le onde ultrasoniche possono essere generate attraverso un singolo trasduttore o tramite un laser e sono tipicamente di tre tipi: onde longitudinali, di taglio e di superficie. La velocità dell'onda e l'attenuazione dei segnali ultrasonici riflessi possono essere utilizzate per correlare le caratteristiche del materiale come la porosità media e la

dimensione del grano. Inoltre, combinando diversi tipi di onde, sono state effettuate correlazioni con proprietà meccaniche quali la resistenza allo snervamento, la tenacità alla frattura e la durezza. Esistono tuttavia delle limitazioni dell'applicazione del test ultrasonico per determinare queste proprietà e potrebbe essere necessario eseguire dei test distruttivi per calibrare la misurazione ultrasonica. Si consiglia di applicare la finitura superficiale a qualsiasi regione di un componente AM in cui le tecniche NDT richiedono il contatto con la superficie.

In tutte le tecniche radiografiche, come la tomografia computerizzata (TC), la struttura interna di un campione può essere determinata sparando raggi X attraverso il campione e misurando la penetrazione risultante, fornendo informazioni sulla densità e porosità del campione. Nella tomografia computerizzata a raggi X (XRCT), vengono acquisite diverse immagini da diverse angolazioni attraverso il campione che viene ricostruito per formare un'immagine 3D del campione. L'XRCT può essere utilizzato per trovare difetti sia sulla superficie che nel volume della parte con un'ampia gamma di risoluzioni. La scansione Micro XRCT è in grado di fornire una risoluzione su scala micron. Un altro vantaggio della scansione TC è che non è a contatto, quindi non si osservano problemi dovuti alla rugosità superficiale riscontrata in molte altre tecniche NDT.

L'applicazione della misura TC è discussa ulteriormente nella BS EN 16016, ma ci sono tre problemi principali con l'adozione della TC per la qualificazione delle parti AM:

- Le organizzazioni di progettazione AM in genere devono ancora definire una dimensione minima del difetto per la tomografia computerizzata, in modo che i pori o i difetti troppo piccoli per essere rilevati dallo scanner TC potrebbero essere persi ed influenzare le proprietà meccaniche della parte;
- Rumore e artefatti della misurazione nell'immagine che influenzano i risultati;
- Conversione di immagini ed affinamento sull'input dell'utente.

La risoluzione delle misurazioni XRCT ottenute dipende dalla dimensione del punto della sorgente di raggi X, dalle dimensioni del rilevatore, dall'ingrandimento e dal numero di immagini utilizzate per la ricostruzione. La qualità delle immagini in XRCT è tipicamente ottimizzata alterando la potenza della sorgente di raggi X. Inoltre, bisogna considerare il tempo necessario per eseguire la misurazione che dipenderà dalla dimensione del pezzo. Per parti più grandi, risoluzioni maggiori potrebbero non essere disponibili senza eseguire la misurazione per un lungo periodo di tempo. Allo stesso modo, per i materiali metallici altamente assorbenti, i raggi X non possono penetrare nel centro del campione senza l'uso di raggi X di potenza superiore. La scansione CT è una tecnica di imaging e come qualsiasi tecnica imaging potrebbe fornire un'immagine fedele dell'oggetto in esame.

Una volta generata un'immagine ai raggi X, è possibile utilizzare tecniche di elaborazione dell'immagine digitale per determinare proprietà come la porosità e misurare le geometrie interne ed esterne della parte. L'affidamento di queste tecniche sull'input manuale per trovare i bordi nella parte potrebbe portare ad imprecisioni. Esistono tecniche di soglia automatica, ma potrebbero non fornire una misura accurata del bordo della parte o della caratteristica. I componenti di convalida con dimensioni simili alla parte e difetti di dimensioni note possono essere utilizzati per convalidare le informazioni di scansione TC e la sua capacità di trovare difetti.

3. ANALISI E PROPRIETÀ DEI MATERIALI

Molti materiali per la produzione additiva sono simili alle alternative tradizionali, ma alcuni hanno proprietà molto diverse rispetto alle aspettative. Sotto alcuni aspetti, ciò potrebbe essere positivo. Inoltre, solo perché un materiale di stampa 3D ha una composizione chimica uguale o simile ad un materiale stampato ad iniezione, non c'è alcuna garanzia che le sue prestazioni siano equivalenti. Conoscere il design del componente è quindi fondamentale e a volte può indicare che un materiale per la fabbricazione additiva potrebbe essere più adatto rispetto ad un'alternativa tradizionale.

Si effettua un confronto tra le realizzazioni con materiali standard e quelle realizzate con materiali in Additive Manufacturing. In particolare, verranno presi in considerazione due metalli appartenenti alle superleghe di Nichel, un acciaio, un metallo in lega di titanio e un metallo in lega di alluminio. Per quel che concerne l'analisi dell'AM, bisogna anche considerare il metodo migliore per la compattazione delle polveri, cioè il metodo più valido per la creazione del pezzo finito. Un'altra importante indicazione riguarda la differenza sui costi per la realizzazione di due prodotti uguali realizzati con tecniche differenti, per cui è interessante non soltanto il confronto delle prestazioni, ma è anche utile capire la convenienza dell'AM anche da un punto di vista economico.

3.1 ULTEM 2400

L'ULTEM presenta il 40% di fibra di vetro, con un flusso standard di polieterimmide, in cui la temperatura di transizione vetrosa è di 217°C. Questo materiale è autoestinguento con ritardo di fiamma ed è molto usato nel settore aereo, in particolare per realizzare le valvole d'aria e per i rivestimenti interni. Rispetta le normative aeree per gli interni e ha superato le prove per il rilascio di calore e le prove di densità del fumo (bassissima emissione di fumi e gas tossici) e presenta un'ottima resistenza ai fluidi idraulici aeromobili rendendolo idoneo per i veicoli aerei.

ASTM & ISO Properties ¹			
Physical	Nominal Value	Unit	Test Method
Density / Specific Gravity	1.61		ASTM D792
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (337°C/6.6 kg)	4.2	g/10 min	ASTM D1238
Molding Shrinkage - Flow (0.126 in)	0.10 to 0.30	%	Internal Method
Water Absorption (24 hr, 73°F)	0.13	%	ASTM D570
Water Absorption (Saturation, 73°F)	0.90	%	ASTM D570
Mechanical	Nominal Value	Unit	Test Method
Tensile Modulus ²	1.70E+6	psi	ASTM D638
Tensile Strength ³ (Break)	26000	psi	ASTM D638
Tensile Elongation ³ (Break)	2.5	%	ASTM D638
Flexural Modulus ⁴ (3.94 in Span)	1.70E+6	psi	ASTM D790
Flexural Strength ⁴ (Break, 3.94 in Span)	35000	psi	ASTM D790
Impact	Nominal Value	Unit	Test Method
Notched Izod Impact (73°F)	2.1	ft-lb/in	ASTM D256
Unnotched Izod Impact (73°F)	8.0	ft-lb/in	ASTM D4812
Reverse Notch Izod Impact (0.126 in)	9.0	ft-lb/in	ASTM D256
Hardness	Nominal Value	Unit	Test Method
Rockwell Hardness (M-Scale)	114		ASTM D785
Thermal	Nominal Value	Unit	Test Method
Deflection Temperature Under Load 66 psi, Unannealed, 0.252 in	419	°F	ASTM D648
Deflection Temperature Under Load 264 psi, Unannealed, 0.252 in	414	°F	ASTM D648
Vicat Softening Temperature	453	°F	ASTM D1525 ⁵
CLTE - Flow (-4 to 302°F)	8.0E-6	in/in/°F	ASTM E831
RTI Elec ⁶	338	°F	UL 746
RTI Imp ⁶	338	°F	UL 746
RTI Str ⁶	338	°F	UL 746
Electrical	Nominal Value	Unit	Test Method
Volume Resistivity	1.5E+16	ohms-cm	ASTM D257
Dielectric Strength (0.0630 in, in Oil)	610	V/mil	ASTM D149
Dielectric Constant (1 kHz)	3.70		ASTM D150
Dissipation Factor (1 kHz)	2.0E-3		ASTM D150
Arc Resistance ⁷	PLC 5		ASTM D495
Comparative Tracking Index (CTI)	PLC 5		UL 746
High Amp Arc Ignition (HAI) (> 0.06 in)	PLC 4		UL 746
High Voltage Arc Tracking Rate (HVTR)	PLC 4		UL 746
Hot-wire Ignition (HWI) (> 0.06 in)	PLC 0		UL 746
Flammability	Nominal Value	Unit	Test Method
Flame Rating ⁸ (> 0.0098 in)	V-0		UL 94
Glow Wire Flammability Index			IEC 60695-2-12
0.04 in	1760	°F	
0.06 in	1760	°F	
Glow Wire Ignition Temperature			IEC 60695-2-13
0.04 in	1560	°F	
0.06 in	1610	°F	
Oxygen Index	54	%	ASTM D2863
NBS Smoke Density - Flaming, Ds ⁸	1.00		ASTM E662
Processing Information			
Injection	Nominal Value	Unit	
Drying Temperature	302	°F	
Drying Time	4.0 to 6.0	hr	
Suggested Max Moisture	0.020	%	
Suggested Shot Size	40 to 60	%	
Rear Temperature	626 to 752	°F	
Middle Temperature	644 to 752	°F	
Front Temperature	653 to 752	°F	
Nozzle Temperature	653 to 752	°F	
Processing (Melt) Temp	662 to 752	°F	
Mold Temperature	275 to 329	°F	
Back Pressure	43.5 to 102	psi	
Screw Speed	40 to 70	rpm	
Vent Depth	9.8E-4 to 3.0E-3	in	
Injection Notes			
Injection Molding Parameters			
• Drying Time (Cumulative): 24 hrs			

Tabella 3.1: proprietà dell'ULTEM 2400

Nota 1: proprietà tipiche: queste non devono essere interpretate come specifiche.

Nota 2: 0.20in/min.

Nota 3: Tipo I, 0.20in/min.

Nota 4: 0.10in/min.

Nota 5: tasso A (50°C/h), carico 2 (50N).

Nota 6: le classificazioni UL (specifiche sulla resistenza alla fiamma) indicate nella scheda tecnica potrebbero non coprire l'intera gamma di spessori e di colori.

Nota 7: elettrodo in tungsteno.

Nota 8: 4min.

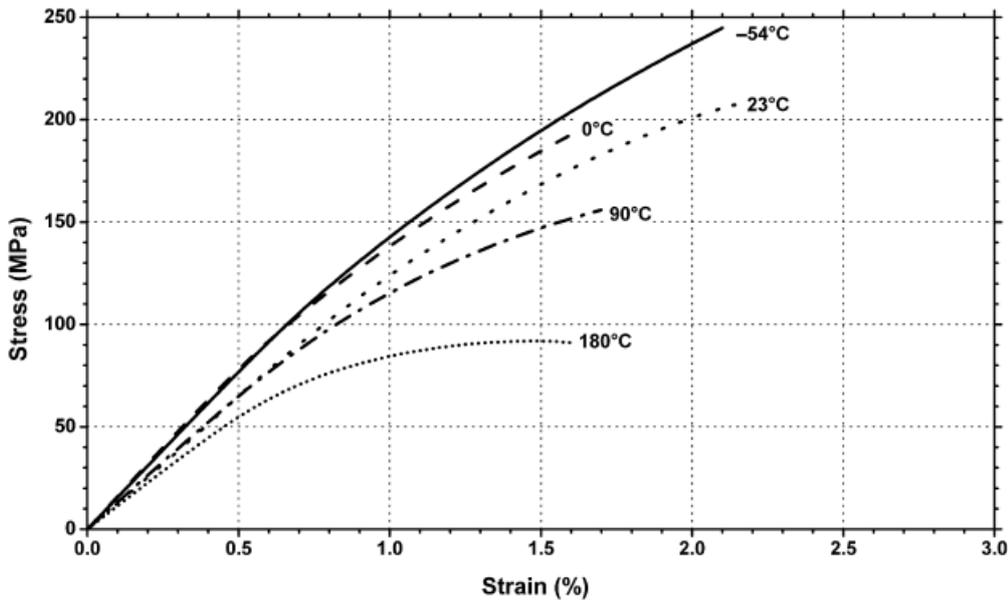


Figura 3.1: fatica vs sforzo al variare della temperatura per l'ULTEM 2400

Gli ULTEM della serie 2000, come il 2400, sono rinforzati con la fibra di vetro. Inoltre, presentano maggiore rigidità e migliore stabilità dimensionale rispetto alla resina ULTEM 1000. Sono disponibili gradi di viscosità bassi; infine, la serie EPR (Enhanced plating, release containing) ha un'adesione di placcatura quattro volte superiore e un flusso migliore del 30% rispetto allo standard ULTEM 2000 relativo a prodotti pieni.

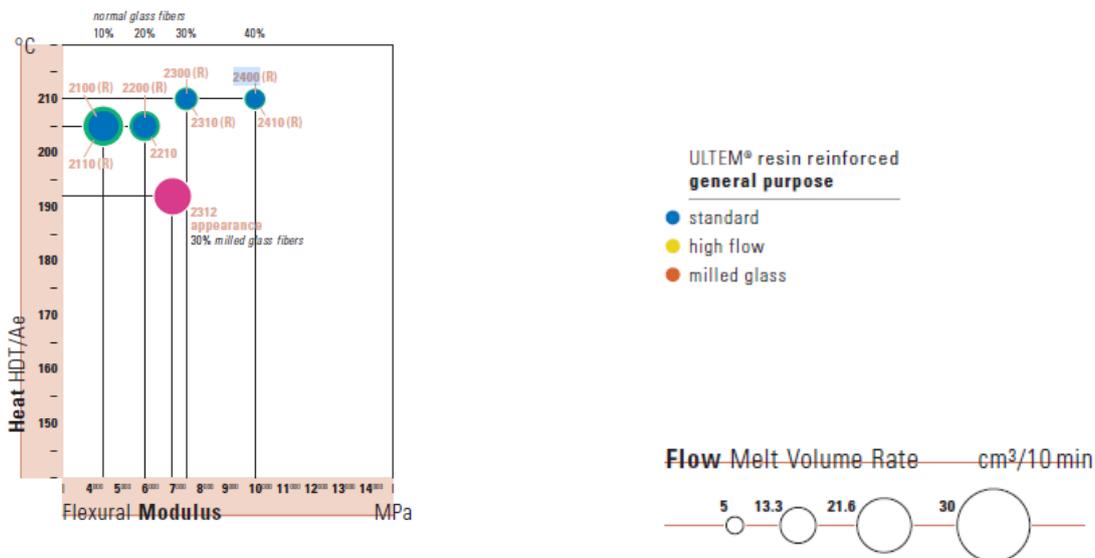


Fig. 3.2: modulo termico in relazione con il flusso

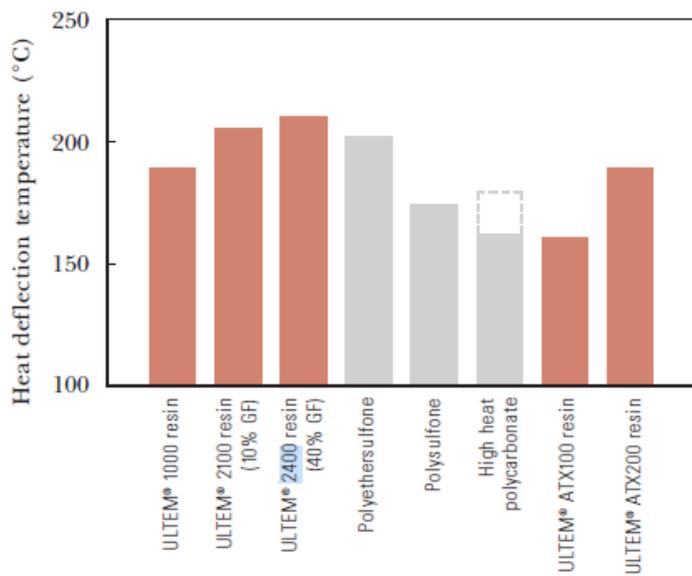


Fig. 3.3: temperatura di deflessione termica

Un'altra importante considerazione di progettazione è l'espansione termica di un materiale, in particolare in applicazioni in cui le parti in plastica sono accoppiate con parti in metallo.

Material	Flow direction ($10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)	Cross flow direction ($10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)
ULTEM® 1000 resin	5	5
ULTEM® 2100 resin	2.6	6
ULTEM® 2200 resin	2.5	6
ULTEM® 2300 resin	2	6
ULTEM® 2312 resin	2.3	2.7
ULTEM® 2400 resin	1.5	4.5
Polysulfone	5.6	
Polysulfone 10% GF	3.6	
High Heat Polycarbonate	7.5	
Brass	1.6-1.8	
Zinc	2.7	
Aluminum	2.2	
Steel	1.2-1.5	

Tabella 3.2: coefficiente di dilatazione termica

Resin Grade	FAR	OSU 25.853	Smoke	Toxicity Ds 4min
ULTEM® 1000 resin series	a(60s)	100/100	<50	pass
ULTEM® 2000 resin series	a(60s)	100/100	<50	pass
ULTEM® CRS 5000 resin series	a(60s)	100/100	<50	pass
ULTEM® 6000 resin series	a(60s)	100/100	<50	pass
ULTEM® 7000 resin series	a(60s)	100/100	<50	pass
ULTEM® 9000 resin series	a(60s)	65/65	<50	pass

ABD 0031 contains requirements for smoke, toxicity and FAR 25.853.
 FAR 25.853 classifies materials for flammability.
 OSU (Ohio State University) calorimeter requirements for larger parts.

Tabella 3.3: prestazioni per le diverse serie di ULTEM

In relazione alle proprietà meccaniche, a temperatura ambiente, la resina ULTEM mostra una resistenza ben superiore a quella della maggior parte dei termoplastici, con uno sforzo di trazione a snervamento di 105MPa (ISO R527) e una resistenza alla flessione di snervamento di 160MPa (ISO 178). Ancora più impressionante è il mantenimento della forza a temperature elevate. A 190°C, una temperatura ben oltre la gamma utile della maggior parte degli altri termoplastici, la resina ULTEM mantiene una sollecitazione di trazione di circa 50MPa (ISO R527).

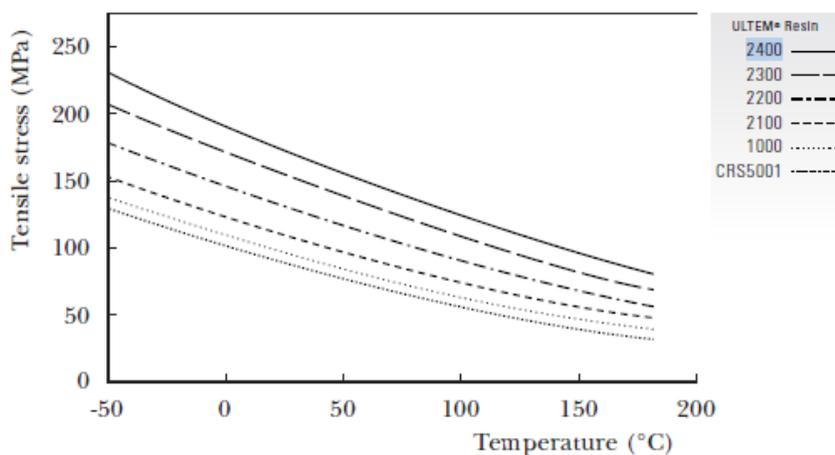


Fig. 3.4: sollecitazione di trazione al variare della temperatura

Un'altra straordinaria proprietà meccanica della resina ULTEM è il suo elevato modulo. Il modulo di flessione di 3300MPa (ISO 178) della resina ULTEM 1000 è uno dei moduli a temperatura ambiente più elevati di qualsiasi tecnopolimero ad alte prestazioni. Nelle applicazioni portanti dove la deflessione è una considerazione primaria, la resina ULTEM non rinforzata fornisce una rigidità strutturale che si avvicina a quella di molte resine rinforzate con il vetro. Inoltre, il modulo di flessione della resina ULTEM rimane eccezionalmente alto anche a temperature elevate. Ad esempio, a 175°C il modulo della resina ULTEM 1000 è superiore a quello della maggior parte dei tecnopolimeri a temperatura ambiente.

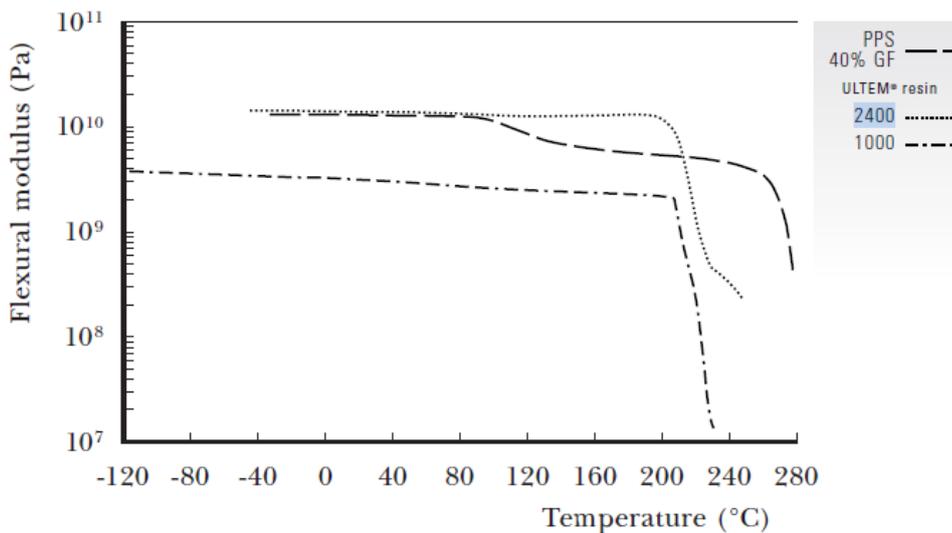


Fig. 3.5: modulo di flessione al variare della temperatura

Pertanto, la resina ULTEM offre ai progettisti l'opportunità di ottenere la rigidità desiderata senza nessuno dei sacrifici associati ai materiali rinforzati con il vetro, come l'aumento dell'usura della macchina e degli utensili e la riduzione del flusso. Dove è richiesta una maggiore rigidità, la serie di resine ULTEM 2000 rinforzata con il vetro fornisce prestazioni aggiuntive con moduli di flessione fino a 13500MPa (ISO 178) a temperatura ambiente.

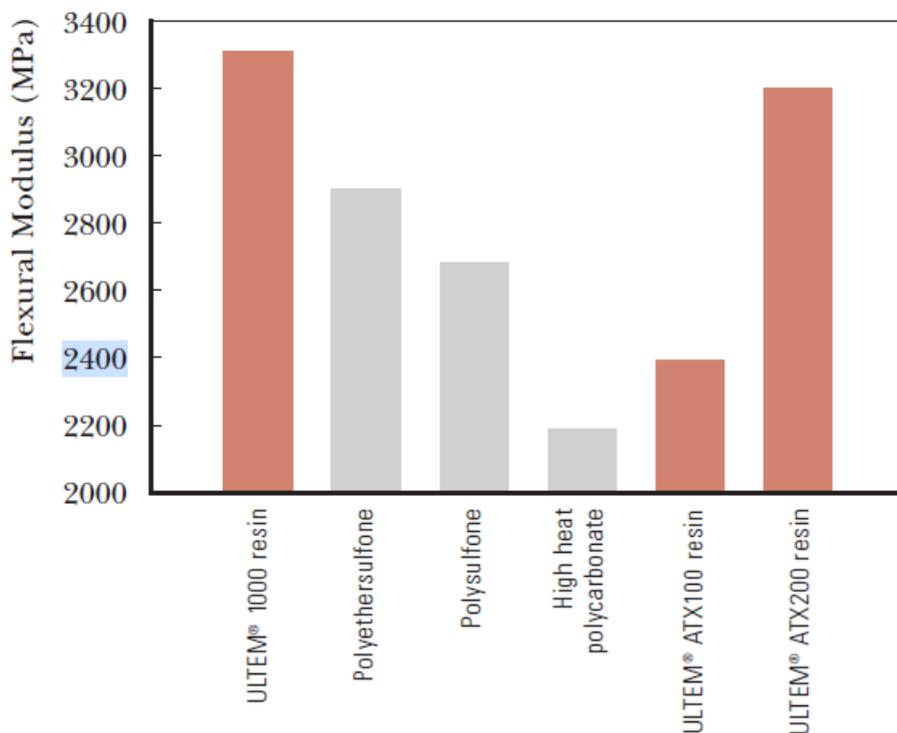


Fig. 3.6: modulo di flessione per diverse tipologie di ULTEM

La fatica è un'importante considerazione di progettazione per parti soggette a sollecitazioni o vibrazioni cicliche. In tali applicazioni, un diagramma di fatica uniaassiale potrebbe essere utilizzato per vedere la durata del processo. Queste curve possono essere utilizzate per determinare il limite di resistenza alla fatica o la massima sollecitazione del ciclo che un materiale può sopportare senza cedimenti.

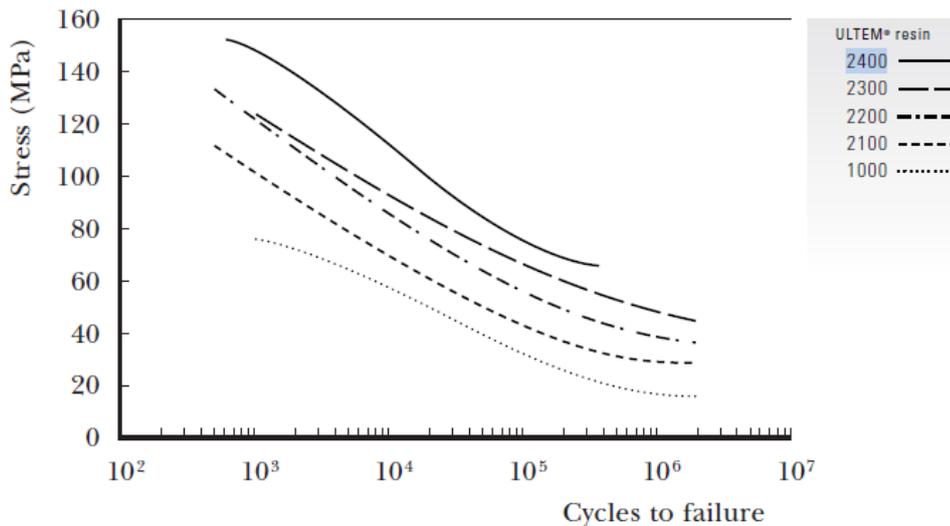


Fig. 3.7: diagramma di fatica uniassiale

Per estrarre il massimo dalle prestazioni della resina ULTEM, il progettista dovrebbe sfruttare appieno le eccellenti proprietà fisiche del materiale, nonché la libertà di progettazione offerta dal processo di stampaggio a iniezione. Bisogna cercare di ridurre al minimo lo stress incorporato nelle applicazioni realizzate con la resina ULTEM perché maggiore è il livello di stress in una parte finita, più è suscettibile agli attacchi chimici.

La sollecitazione incorporata nelle parti può essere ridotta al minimo:

- Evitando pareti sottili e spigoli vivi;
- Evitando transizioni ampie e nette nello spessore della parete;
- Garantendo un riempimento delle parti in modo uniforme ed equilibrato;
- Progettando correttamente nervature e carotaggi per aumentare la rigidità senza aumentare lo spessore della parete.

La resina ULTEM può essere ideale per la progettazione di applicazioni a lungo termine ad alta temperatura e sollecitate meccanicamente. La proprietà del materiale più importante per poter progettare in base a rigidità e resistenza è la curva sforzo-deformazione del materiale.

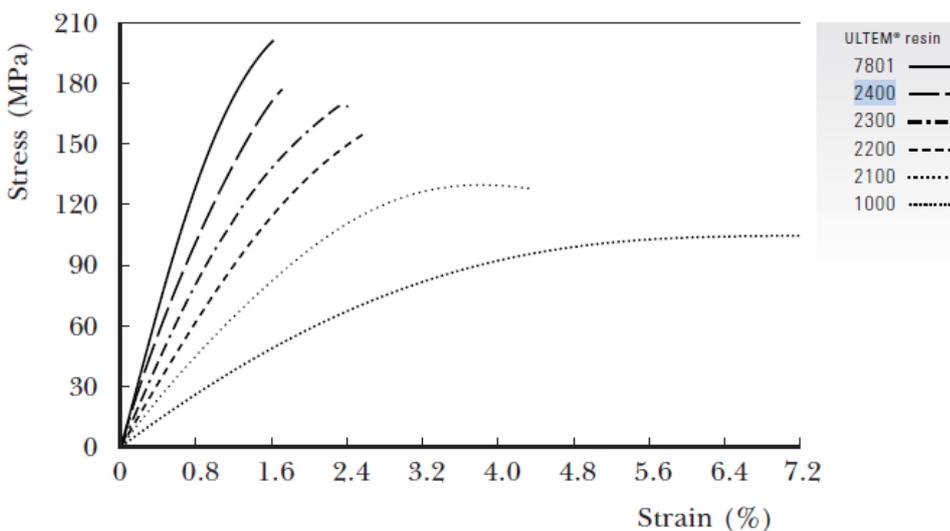


Fig. 3.8: curve dell'ULTEM sforzo-deformazione

I progettisti possono prevedere una velocità di restringimento più accurata per una specifica geometria della parte. Tuttavia, per fornire i dati più affidabili, è necessario utilizzare test ambientali sull'uso finale delle parti finite.

ULTEM® Resin Grade	Parallel to Flow*	Perpendicular to Flow*
1000	0.007	0.007
2100	0.005	0.006
2200	0.003	0.005
2300	0.002	0.004
2400	0.001	0.003
4000	0.003	0.005
4001	0.006	0.007

*Median values

Tabella 3.4: ritiro tipico per vari gradi di resina ULTEM con spessori di parete di 0.125in

Typical Processing Parameters

Typical Injection Molding

Molding Conditions

Processing Parameters	Units	1000	2300	4000	ATX200		ATX100	
		1010	2310	4001	(min.)	(max.)	(min.)	(max.)
Drying Temperature	°F (°C)	—	300 (149)	—	275 (135)	—	275 (135)	
Drying Time (Normal)	h	4	6	4	6	4	6	
Drying Time (Max.)	h	—	24	—	10	—	12	
Maximum Moisture	%	—	0.02	—	0.02	—	0.02	
Melt Temperature	°F (°C)	660 (348)	750 (398)	660 (348)	700 (371)	630 (332)	670 (354)	
Nozzle	°F (°C)	650 (343)	750 (398)	660 (348)	700 (371)	620 (326)	660 (348)	
Front Zone	°F (°C)	650 (343)	750 (398)	660 (348)	700 (371)	630 (332)	670 (354)	
Middle Zone	°F (°C)	640 (337)	750 (398)	650 (343)	690 (365)	610 (321)	650 (343)	
Rear Zone	°F (°C)	630 (332)	750 (398)	640 (337)	680 (360)	590 (310)	630 (332)	
Mold Temperature	°F (°C)	275 (135)	325 (102)	275 (135)	325 (163)	200 (93)	275 (135)	
Back Pressure	psig (MPa)	50 (0.3)	100 (0.7)	50 (0.3)	100 (0.7)	50 (0.3)	100 (0.7)	
Screw Speed	rpm	40	70	40	70	40	70	
Shot to Cylinder Size	%	40	60	40	60	40	60	
Clamp Tonnage	tons/in ²	3	5	3	5	3	5	
Vent Depth	inch	0.0010	0.0030	0.0010	0.0030	0.0010	0.0030	

Tabella 3.5: condizioni tipiche dello stampaggio ad iniezione

3.2 ULTEM 9085

L'ULTEM 9085 termoplastico, uno dei materiali più leggeri e resistenti disponibili per la Tecnologia FDM, utilizzato per prototipi, componenti finali, pezzi di ricambio e attrezzature di produzione. Principali caratteristiche :

- Leggerezza;
- Elevata resistenza al calore;
- Elevata resistenza agli agenti chimici;
- Eccellente resistenza meccanica (trazione/flessione);
- Ritardante di fiamma (V₀).

Materiale certificato FST (Flame, Smoke, Toxicity) e FAR 25.853 in ambito aerospaziale. Grazie a queste certificazioni è adatto per essere utilizzato in condizioni estreme a temperature elevate, come per Aerospace, Automotive e Motorsport. In queste applicazioni viene spesso sostituito ad altri materiali come l'alluminio, ottenendo le stesse performance con peso ridotto fino al 50%. Come anche per altri materiali adatti alla FDM, l'ULTEM 9085 permette geometrie complesse senza limiti di forma (strutture honeycomb).

Property	Test Method	Typical Values
HDT @ 66psi	ASTM D648	177 °C (350 °F)
HDT @ 264psi	Method B	173 °C (343 °F)
Tg	ASTM D648	180 °C (356 °F)
Mean CTE	Method B	45 µm/[m·°C] (25 µin/[in·°F])
Mean CTE	ASTM D7426	32 µm/[m·°C] (18 µin/[in·°F])
Volume Resistivity	Inflection Point	> 6.89*10 ¹⁵ Ω-cm
Dielectric Constant	ASTM E831	2.7
Dielectric Constant	(-50C to 80C)	2.8
Dissipation Factor	ASTM E831	0.002
Dissipation Factor	(80C to 160C)	0.010
Specific Gravity	ASTM D257	1.27
UL Flammability ⁽¹⁾	ASTM D150	V0 – Blue Card #E345258

(1) Applies to the natural version of ULTEM™ 9085 resin only

Tabella 3.6: proprietà fisiche per l'ULTEM 9085

Le parti create attraverso FDM sono anisotrope, per cui la diversa orientazione dei piani determina diverse caratteristiche meccaniche, ecco perché per ogni proprietà si considera più di una orientazione. Questo tipo di orientazione è valida anche per i materiali polimerici presenti nell'appendice II.

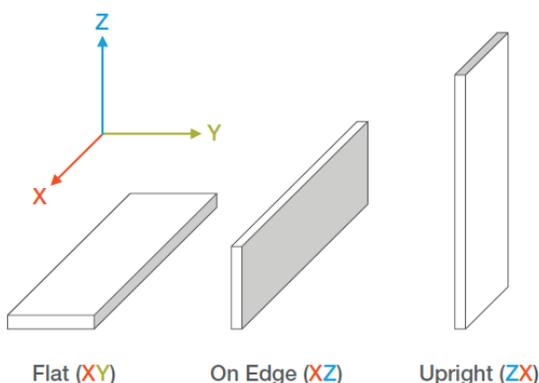


Fig. 3.9: piano di orientazione

		XZ Orientation	ZX Orientation
Tensile Properties: ASTM D638			
Strength @ 0.2% offset yield	MPa	45	38
	psi	6,560	5,540
Ultimate Strength	MPa	77	58
	psi	1,180	8,550
Modulus (Elastic)	GPa	2.61	2.41
	ksi	380	350
Flexural Properties: ASTM D790, Procedure A			
Ultimate Strength	MPa	130	90
	psi	18,940	13,130
Modulus	GPa	2.27	2.62
	ksi	330	380
Compression Properties: ASTM D695			
Strength @ 0.2% offset yield	MPa	63	78
	psi	9,180	11,340
Modulus	GPa	2.62	2.96
	ksi	380	430
Impact Properties: ASTM D256, ASTM D4812			
Izod, Notched	J/m	73.7	69.3
	ft*lb/in	1.4	1.3

Tabella 3.7: proprietà meccaniche per l'ULTEM 9085

	Avg Time to Extinguish (seconds)	Avg Burned Length (inches)	Drip Time to Extinguish (seconds)
12 Second Vertical Ignition per 14 CFR 25.853(a), Appendix F, Part I, Paragraph (a)(1)(ii)			
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build XZ	1.6	0.2	0 (no drips)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build ZX	1.7	0.5	0 (no drips)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XY	2.0	0.2	0 (no drips)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XZ	1.5	0.2	0 (no drips)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build ZX	2.0	0.2	0 (no drips)
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build XZ	1.1	0.3	0 (no drips)
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build ZX	<1	0.4	0 (no drips)
60 Second Vertical Ignition per 14 CFR 25.853(a), Appendix F, Part I, Paragraph (a)(1)(i)			
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build XZ	1.5	1.8	0 (no drips)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build ZX	<1	1.9	0 (no drips)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XY	<1	0.4	0 (no drips)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XZ	3.6	0.6	0 (no drips)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build ZX	<1	0.4	0 (no drips)
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build XZ	<1	1.2	0 (no drips)
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build ZX	<1	1.5	0 (no drips)

Avg Burn Rate (in/min)	
15 Second Horizontal Ignition per 14 CFR 25.853(a), Appendix F, Part I, Paragraph (a)(1)(iv)(v)	
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build XZ	0
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build ZX	0
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XY	0
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XZ	0
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build ZX	0
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build XZ	0
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build ZX	0

Test Mode	Average D _s (maximum) within 4 minutes, (°D _{msd})
Smoke Density per BSS 7238, Rev. C	
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build XZ	Flaming 4
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build ZX	Flaming 5
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XY	Flaming 4
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build ZX	Flaming 4
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build XZ	Flaming 10
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build ZX	Flaming 15

Smoke Density per AIM 2.0007B, Issue 3		
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build XZ	Flaming	5
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build ZX	Flaming	5
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build XZ	Non-Flaming	0
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build ZX	Non-Flaming	0
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XY	Flaming	5
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build ZX	Flaming	6
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XY	Non-Flaming	0
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build ZX	Non-Flaming	0
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build XZ	Flaming	12
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build ZX	Flaming	14
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build XZ	Non-Flaming	0
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build ZX	Non-Flaming	0

	Test Mode	CO ppm	SO ₂ ppm	NO ₂ ppm	HCN ppm	HCl ppm	HF ppm
Toxic Gas Emission per BSS 7239, Rev. A							
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build XZ	Flaming	50	0 (NI)	2	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build ZX	Flaming	50	0 (NI)	2	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XY	Flaming	50	0 (NI)	2	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build ZX	Flaming	50	0 (NI)	2	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build XZ	Flaming	100	0 (NI)	1	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build ZX	Flaming	75	0 (NI)	1	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)

	Test Mode	CO ppm	SO ₂ ppm	NO _x ppm	HCN ppm	HCl ppm	HF ppm
Toxic Gas Emission per AITM 3.0005, Issue 2							
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build XZ	Flaming	92	0	2.8	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build ZX	Flaming	102	0	4	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build XZ	Non-Flaming	2.6	0	0	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build ZX	Non-Flaming	2.2	0	0	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XY	Flaming	61	0	2.3	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build ZX	Flaming	78	0	3.2	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XY	Non-Flaming	4	0	0	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build ZX	Non-Flaming	5	0	0	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build XZ	Flaming	93	0	1	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build ZX	Flaming	103	0	3	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build XZ	Non-Flaming	2	0	0	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build ZX	Non-Flaming	2	0	0	0 (NI)	0 (NI)	0 (NI)

	Peak HRR (kW/m ²)	Time to Peak Heat Release (seconds)	2 Minute Total HRR (kW-min./m ²)
Heat Release Rate of Cabin Materials per 14 CFR 25.853(d), Appendix F, Part IV			
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build XZ	54.5	73	35.5
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip, Build ZX	48.2	66	41.0
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build XY	57.0	57	43.7
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip, Build ZX	56.6	57	52.8
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build XZ	55.4	48	32.7
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip, Build ZX	41.8	51	34.1

Tabella 3.8: risultati dei test su fiamma, fumo e tossicità per l'ULTEM 9085

Sample	TML (%)	CVCM (%)	WVR (%)
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T20 Tip	0.34	0.02	0.35
ULTEM™ 9085 Resin, Natural, T16A Tip	0.37	<0.01	0.38
ULTEM™ 9085 Resin, Black, T16 Tip	0.33	< 0.01	0.22

Testing Observations⁽¹⁾			
Visible Condensate	No	Opaque	N/A
Percent Covered	0%	Interference Fringes	N/A
Thin	N/A	Colored Fringes	N/A
Heavy	N/A	Sample appearance after test	No change
Transparent	N/A		

(1) Observations apply to all tested samples

Tabella 3.9: risultati dei test sull'outgassing per l'ULTEM 9085

3.3 Confronto delle proprietà tra ULTEM 9085 e ULTEM 2400

Si effettua il confronto tra questi due materiali polimerici appena considerati e cioè l'ULTEM 9085 e l'ULTEM 2400. Si evince che la densità specifica è più bassa per il 9085, mentre la resistenza a trazione, il modulo di trazione, la resistenza a flessione e il modulo a flessione sono più elevati per l'ULTEM 2400; al contrario, l'allungamento a trazione è più elevato per il 9085. Per l'impatto Izod si osserva che con l'intaglio il valore è più alto per il 2400, mentre senza intaglio predomina il 9085. Infine, anche nel confronto delle proprietà termiche ed elettriche si vede che le proprietà migliori, in linea di massima si hanno per l'ULTEM 2400. Ad esempio, si osserva che le varie temperature di esercizio sono più elevate per il 2400 rispetto al 9085, mentre non è così per il coefficiente di espansione termica.

	ULTEM 9085	ULTEM 2400	Metodo di prova
Densità specifica	1.27	1.61	ASTM D972
Resistenza a trazione [psi]	11168	26000	ASTM D638
Resistenza allo snervamento a trazione [psi]	6560		ASTM D638
Modulo di trazione [psi]	3.80E+05	1.70E+06	ASTM D638
Allungamento a trazione [%]	5.1	2.5	ASTM D638
Resistenza alla compressione [psi]	9180		ASTM D695
Modulo di compressione [psi]	3.80E+05		ASTM D695
Resistenza alla flessione [psi]	18940	35000	ASTM D790
Modulo a flessione [psi]	3.30E+05	1.70E+06	ASTM D790
Impatto con intaglio Izod [ft lb/in]	1.4	2.1	ASTM D256
Impatto senza Intaglio Izod [ft lb/in]	12.1	8.0	ASTM D4812
Durezza Rockwell		114	ASTM D785
Deflessione termica a 66 psi [°F]	350	419	ASTM D648
Deflessione termica a 264 psi [°F]	343	414	ASTM D648
Temperatura di rammollimento [°F]		453	ASTM D1525
Temperatura di transizione vetrosa [°F]	356	422.6	ASTM D7028
Indice di temperatura relativa [°F]		338	UL 746
Coefficiente di espansione termica [10 ⁻⁶ /°F]	32	8.0	ASTM E831
Classificazione di reazione al fuoco	V-0	V-0	UL 94
Indice di infiammabilità del filo a 0.04in [°F]		1760	IEC 60695-2-12
Indice di infiammabilità del filo a 0.06in [°F]		1760	IEC 60695-2-12
Temperatura di accensione del filo incandescente a 0.04in [°F]		1560	IEC 60695-2-13
Temperatura di accensione del filo incandescente a 0.06in [°F]		1610	IEC 60695-2-13
Indice di ossigeno limite [%]	49	54	ASTM D2863
Densità del fumo	Passato	1	ASTM E662
Resistività del volume [ohm cm]	> 6.89E+15	1.50E+16	ASTM D257
Costante dielettrica	2.7	3.70	ASTM D150
Fattore di dissipazione	2.00E-03	2.00E-03	ASTM D150
Rigidità dielettrica [V/mil]	110-290	610	ASTM D149
Perdita di massa totale [%]	0.41		ASTM E595
Vapore acqueo recuperato [%]	0.37		ASTM E595

Tabella 3.10: confronto delle varie proprietà tra ULTEM 9085 e ULTEM 2400

3.4 Stainless Steel 316L

3.4.1 Metodi standard

L'acciaio inox AISI 316L è una lega austenitica e si distingue dalle altre leghe di acciaio inossidabile per l'elevata percentuale di molibdeno, che garantisce una resistenza superiore alla corrosione e agli agenti atmosferici. In questa lega è maggiore anche la percentuale di nichel per garantire una maggiore stabilità. Inoltre, la lettera "L" indica un basso contenuto di carbonio (Low Carbon) che è uguale o inferiore allo 0.03%. La colata continua ha aumentato l'efficienza riducendo ulteriormente i costi di lavorazione. Le leghe contengono tenori di cromo, nichel e molibdeno molto superiori ai tipi standard 18%Cr-8%Ni. Molti contengono inoltre aggiunte di azoto. Con la crescita delle richieste del mercato ed il miglioramento delle tecnologie, altre leghe saranno certamente aggiunte a questo particolare gruppo di acciai.

Tipo	UNS No.	EN No.	C	N	Cr	Ni	Mo
Tipi standard rappresentativi							
Tipo 304L	S30403	1.4307	0,03	0,10	18,0–20,0	8,0–12,0	
Tipo 321	S32100	1.4541	0,08	0,10	17,0–19,0	9,0–12,0	
Tipo 347	S34700	1.4550	0,08	0,10	17,0–19,0	9,0–13,0	
Tipo 316L	S31603	1.4404	0,03	0,10	16,0–18,0	10,0–14,0	2,00–3,00
Tipo 317L	S31703	1.4438	0,03	0,10	18,0–20,0	11,0–15,0	3,00–4,00
Tipo 309S	S30908	1.4833	0,08	0,10	22,0–24,0	12,0–15,0	
Tipo 310S	S31008	1.4845	0,08	0,10	24,0–26,0	19,0–22,0	

Tabella 3.11: composizione chimica di alcuni tipi di acciai inox tra cui il 316L

La composizione chimica ha un'influenza notevole nella microstruttura metallurgica, nelle proprietà meccaniche, fisiche e per la resistenza alla corrosione. Sia gli elementi di lega volutamente presenti che quelli introdotti involontariamente durante i processi di fabbricazione degli acciai influenzano queste proprietà. I tipi standard a basso carbonio concepiti per la saldatura come il 316L (1.4404) limitano il carbonio allo 0.03% e ciò permette di migliorare la resistenza alla corrosione.

Gli acciai inossidabili austenitici ad elevate prestazioni (HPASS) mantengono buone proprietà meccaniche complessive dei due tipi standard, con una resistenza leggermente superiore ed una duttilità leggermente inferiore allo stato ricotto. L'incrudimento aumenta in modo significativo la loro resistenza. Poiché incrudiscono, presentano un'eccellente formabilità e possono assorbire notevoli livelli di energia in caso di rottura. La loro resistenza è dovuta agli effetti di elementi di lega in soluzione solida di sostituzione e all'idrogeno interstiziale. Queste leghe mantengono buone proprietà a basse e ad alte temperature.

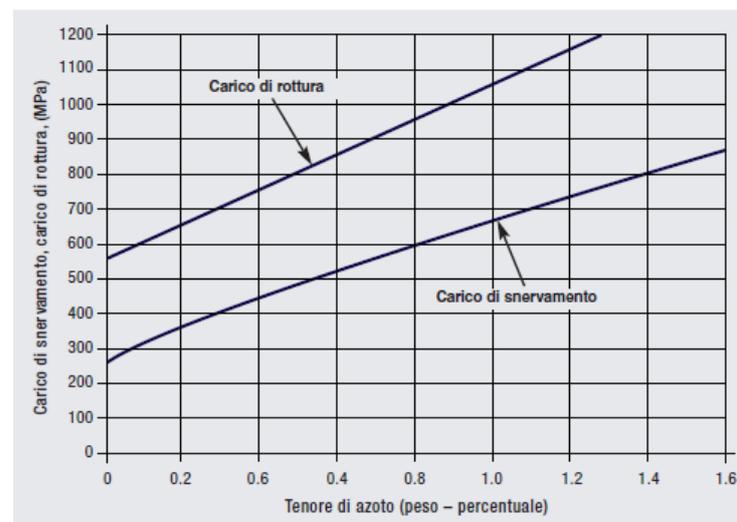
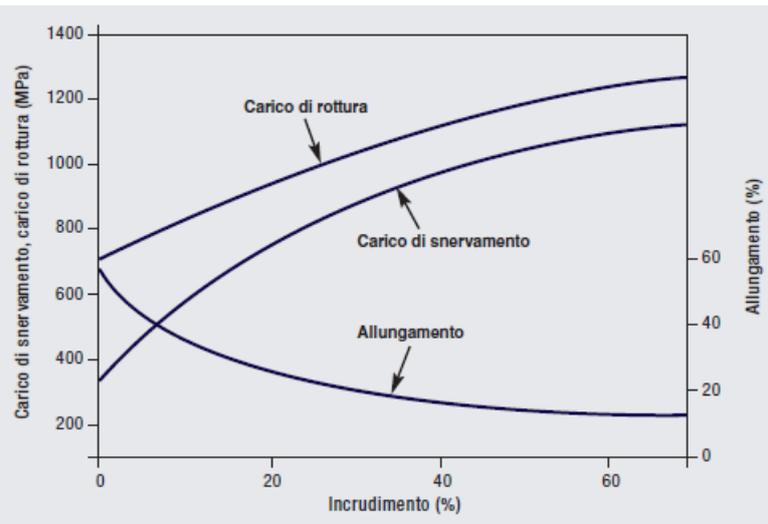


Fig. 3.10: carico di rottura e di snervamento in base al tenore di azoto



Gli acciai inossidabili austenitici non possono essere induriti con trattamenti termici, per cui sono prodotti di norma allo stato ricotto. L'incrudimento aumenta la resistenza, di conseguenza alcuni semilavorati sono prodotti allo stato laminato a freddo quando è richiesta una maggiore resistenza. I processi a freddo, come la formatura, la tornitura in lastra, la forgiatura rotativa e l'imbutitura possono produrre una resistenza molto elevata. L'azoto aumenta l'efficacia dell'incrudimento, così è possibile ottenere una resistenza ancora maggiore quando queste leghe sono lavorate a freddo a confronto con i tipi standard.

Fig. 3.11: carico di rottura, di snervamento e allungamento in relazione con l'incrudimento

Tipo	UNS No.	EN No.	Carico di snervamento allo 0,2 %	Carico di rottura	Allungamento a rottura su 2"	Durezza, max	
			MPa (ksi)	MPa (ksi)	%	Brinell	Rockwell B
Acciai inossidabili austenitici al cromo-nichel							
Tipo 304L	S30403	1.4307	170 (25)	515 (75)	40	201	92
Tipo 321	S32100	1.4541	205 (30)	515 (75)	40	217	95
Tipo 347	S34700	1.4550	205 (30)	515 (75)	40	201	92
Tipo 316L	S31603	1.4404	170 (25)	515 (75)	40	217	95
Tipo 317L	S31703	1.4438	205 (30)	515 (75)	35	217	95
Tipo 309S	S30908	1.4833	205 (30)	515 (75)	40	217	95
Tipo 310S	S31008	1.4845	205 (30)	515 (75)	40	217	95
Acciai inossidabili austenitici ad elevate prestazioni							
Lega 20, 20Cb-3	N08020	2.4660	240 (35)	550 (80)	30	217	95
Lega 825*	N08825	2.4854	310 (45)	655 (95)	30		
317LM	S31725		205 (30)	515 (75)	40	217	95
317LMN	S31726	1.4439	240 (35)	550 (80)	40	223	96
904L	N08904	1.4539	220 (31)	490 (71)	35		90
155N	S31727		245 (36)	550 (80)	35	217	
Lega 28	N08028	1.4563	500 (73)	214 (31)	40		90
456S, Lega 24	S34565	1.4565	415 (60)	795 (115)	35	241	100
20Mo-6	N08026		241 (35)	551 (80)	30	217	95
254N	S32053		295 (43)	640 (93)	40	217	96
25-6MO, 1925 hMo	N08926	1.4529	295 (43)	650 (94)	35		
254 SMO	S31254	1.4547	310 (45)	655 (95)	35	223	96
AL-6XN	N08367		310 (45)	655 (95)	30	241	
UR 66	S31266	1.4659	420 (61)	750 (109)	35		
27-7MO	S31277		360 (52)	770 (112)	40		
3127 hMo, Lega 31	N08031	1.4562	276 (40)	650 (94)	40		
354N	N08354		295 (43)	550 (80)	40	217	96
654 SMO	S32654	1.4652	430 (62)	750 (109)	40	250	

Tabella 3.12: proprietà meccaniche per alcuni tipi di acciai inox

Gli acciai inossidabili austenitici forniscono una buona resistenza ad alta temperatura. Molti dei tipi standard sono stati omologati per applicazioni in apparecchiature in pressione. Il codice ASME Pressure Vessel fornisce tensioni ammissibili di progetto per temperature fino a 427°C. Per applicazioni in forni, in cui la pressione non è significativa, gli acciai standard ed alcuni acciai inossidabili resistenti al calore sono usati a temperature doppie di quelle succitate. Gli HPASS sono progettati per la resistenza alla corrosione, ma hanno anche elevata resistenza ad alte temperature. La maggiore resistenza rispetto ai tipi standard a temperatura ambiente è valida anche ad alte temperature. Nella ricottura di un componente fabbricato, l'alta resistenza in temperatura previene la distorsione dovuta al peso proprio. Tuttavia, se un componente si deforma, ad esempio in saldatura, l'elevata resistenza ne rende difficoltosa la raddrizzatura rispetto al caso di componenti con bassa resistenza. Gli acciai ad alta resistenza possono limitare l'uso di macchine per formatura di una certa potenza, limitando le sezioni che una data macchina è in grado di lavorare.

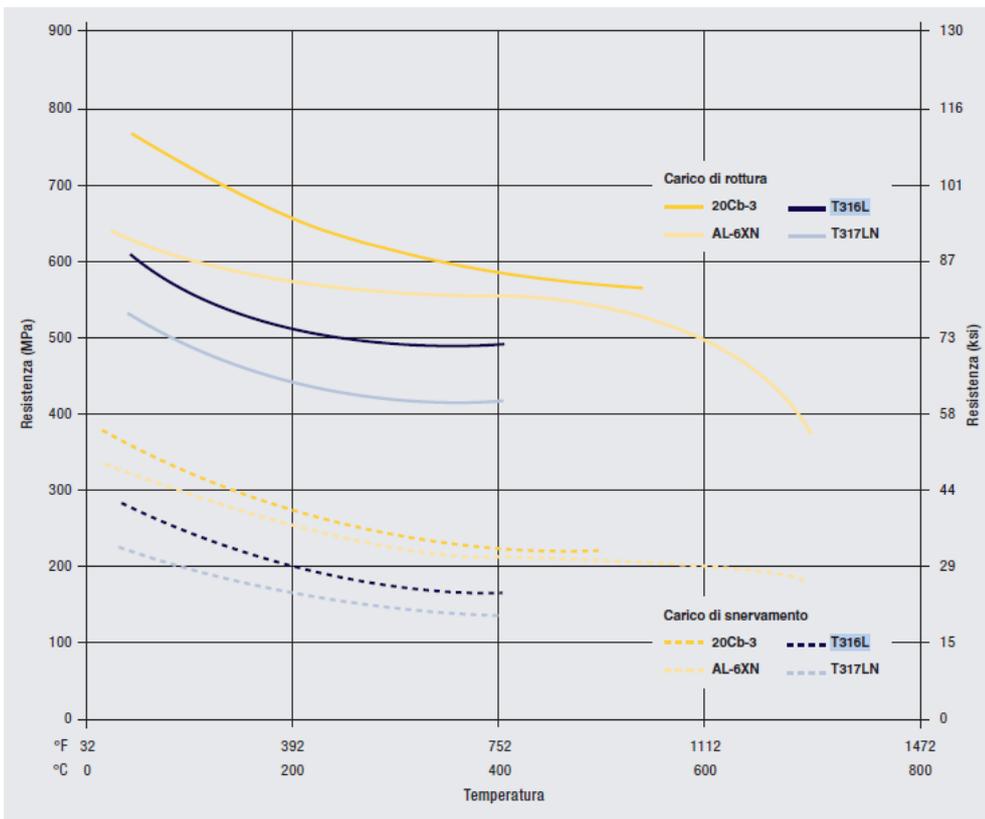


Fig. 3.12: variazione del carico di rottura e di snervamento con la temperatura

Tipo	UNS No.	Densità		Calore specifico		Resistività elettrica		Modulo di Young	
		g/cm ³	lb/in ³	J/kg-K	Btu/lb/°F	Ω-mm ² /m	micro Ω in	GPa	10 ⁶ psi
Tipi standard rappresentativi									
Tipo 304L	S30403	8,03	0,290	500	0,120	0,72	28,3	193	28,0
Tipo 321	S32100	7,89	0,285	500	0,120	0,72	28,3	193	28,0
Tipo 347	S34700	7,97	0,288	500	0,120	0,73	28,7	200	29,0
Tipo 316L	S31603	7,95	0,287	469	0,112	0,74	29,1	193	28,0
Tipo 317L	S31703	7,95	0,287	460	0,110	0,79	31,1	200	29,0
Tipo 309S	S30908	7,89	0,285	500	0,120	0,78	30,7	200	29,0
Tipo 310S	S31008	7,86	0,284	500	0,120	0,85	33,5	200	29,0
Acciai inossidabili austenitici ad elevate prestazioni									
Lega 20, 20Cb-3	N08020	8,08	0,292	502	0,120	1,08	42,5	193	28,0
Lega 825*	N08825	8,14	0,294	440	0,015	1,13	44,5	193	28,0
317LM	S31725	7,95	0,287	460	0,11	0,79	31,1	200	29,0
317LMN	S31726	8,02	0,290	502	0,112	0,85	33,5	200	29,0
904L	N08904	7,95	0,287	461	0,110	0,95	37,4	190	28,0
155N	S31727	8,02	0,290	460	0,109	0,86	33,9	203	29,4
Lega 28	N08028	8,00	0,290	460	0,109	0,99	39,0	105	28,3
4565 S, Lega 24	S34565	8,00	0,290	510	0,122	0,92	36,2	190	28,0
20Mo-6	N08026	8,13	0,294	461	0,110	1,08	42,5	186	27,0
254N	S32053	8,06	0,291	460	0,109	0,93	36,6	188	27,3
25-6MO, 1925 hMo	N08926	8,15	0,294	461	0,110	0,88	34,6	192	27,8
254 SMO	S31254	7,95	0,287	498	0,119	0,85	33,5	200	29,0
AL-6XN	N08367	8,06	0,291	461	0,110	0,89	35,0	195	28,2
UR 66	S31266	8,20	0,297	450	0,113	1,00	39,4	195	28,3
27-7MO	S31277	8,02	0,289	454	0,109	1,00	39,4	191	27,7
3127 hMo, Lega 31	N08031	8,03	0,290	440	0,105	1,00	39,4	195	28,3
354N	N08354	8,16	0,295	440	0,105	1,03	40,6	193	28,0
654 SMO	S32654	8,00	0,290	510	0,122	0,78	30,7	188	27,6

* Lega 825 è una lega base nichel, non un acciaio inossidabile.

Tabella 3.13: proprietà fisiche per alcuni tipi di acciai inox

Tipo	UNS No.	20 °C (68 °F)	100 °C (212 °F)	200 °C (392 °F)	300 °C (572 °F)	400 °C (754 °F)	500 °C (932 °F)
Modulo elastico a trazione GPa (10⁶ psi)							
Tipo 304	S30400	193 (28,0)	193 (28,0)	193 (27,9)	187 (27,1)	183 (26,6)	179 (26,0)
Tipo 321	S32100	193 (28,0)	193 (28,0)	193 (28,0)	188 (27,3)	183 (26,6)	178 (25,8)
Tipo 316L	S31603	200 (29,0)	194 (28,1)	185 (26,9)	177 (25,9)	169 (24,5)	160 (23,2)
317LMN	S31726	200 (29,0)	194 (28,1)	186 (27,0)	179 (26,0)	171 (24,8)	163 (23,6)
4565 S, Lega 24	S34565	193 (28,0)	187 (27,1)	180 (26,1)	173 (25,1)	165 (24,0)	157 (22,9)
25-6MO, 1925 hMo	N08926	193 (28,0)	186 (27,0)	179 (26,0)	173 (25,1)	168 (24,4)	162 (23,6)
254N	S32053	188 (27,3)	184 (26,7)	178 (25,8)	172 (24,9)	165 (23,9)	
AL-6XN	N08367	195 (28,3)	189 (27,4)	180 (26,1)	172 (24,9)	163 (23,7)	158 (23,0)
UR 66	S31266	195 (28,3)		180 (26,1)		165 (23,9)	
354N	N08354	198 (28,7)	194 (28,1)	189 (27,4)	183 (36,5)	177 (25,7)	172 (24,8)
Coefficiente di dilatazione termica lineare medio - temperatura 20 °C (68 °F) a T - 10⁻⁶/K (10⁻⁶/°F)							
Tipo 304	S30400		16,6 (9,20)	16,9 (9,40)	17,4 (9,65)	17,6 (9,75)	18,0 (10,0)
Tipo 321	S32100		16,6 (9,20)				17,1 (9,50)
Tipo 316L	S31603		16,5 (9,16)	16,9 (9,38)	17,3 (9,61)	17,6 (9,78)	18,0 (10,00)
Lega 20, 20Cb-3	N08020		14,9 (8,27)	15,2 (8,44)	15,5 (8,61)	15,9 (8,83)	16,1 (8,94)
317LMN	S31726		16,6 (9,22)	17,2 (9,55)	17,8 (9,89)	18,5 (10,30)	
904L	N08904		15,3 (8,50)	15,7 (8,72)	16,1 (8,94)	16,5 (9,17)	16,9 (9,39)
155N	S31727		15,9 (8,83)	16,4 (9,11)	16,7 (9,28)	17,0 (9,44)	17,2 (9,55)
4565 S, Lega 24	S34565		14,5 (8,00)	15,5 (8,60)	16,3 (9,00)	16,8 (9,30)	17,2 (9,50)
20Mo-6	N08026		14,8 (8,22)	14,9 (8,29)	15,3 (8,52)	15,7 (8,73)	16,0 (8,89)
254N	S32053		14,5 (8,00)	15,0 (8,28)	15,4 (8,55)	15,8 (8,78)	
25-6MO, 1925 hMo	N08926		15,0 (8,33)	15,7 (8,72)	16,1 (8,94)	16,4 (9,11)	16,7 (9,28)
254 SMO	S31254		16,0 (8,89)				17,0 (9,44)
AL-6XN	N08367		15,3 (8,50)	15,5 (8,60)	15,7 (8,80)	16,0 (8,90)	16,0 (8,90)
UR 66	S31266		15,0 (8,33)		16,0 (8,90)		16,5 (9,17)
354N	N08354		14,1 (7,83)	14,6 (8,11)	14,8 (8,22)	15,1 (8,40)	15,4 (8,55)

Tabella 3.14: modulo elastico a trazione e coefficiente di dilatazione termica a diverse temperature

Tipo	UNS No.	20 °C (68 °F)	100 °C (212 °F)	200 °C (392 °F)	300 °C (572 °F)	400 °C (754 °F)	500 °C (932 °F)
Conduttività termica - W/m-K (Btu in/hr ft ² °F)							
Tipo 304	S30400	14,6 (100)	16,2 (112)	17,0 (117)	19,6 (135)	20,3 (140)	21,4 (148)
Tipo 316L	S31603	14,0 (97)	14,9 (103)	16,0 (111)	17,3 (120)	18,6 (129)	19,9 (138)
317LMN	S31726	14,0 (97)	14,4 (100)				
Lega 20, 20Cb-3	N08020	11,6 (81)	13,1 (91)	15,0 (104)	16,6 (115)	18,2 (126)	19,6 (136)
904L	N08904	11,5 (80)	13,1 (91)	15,1 (105)			
155N	S31727	12,5 (87)	14,1 (98)	16,2 (112)	18,2 (126)	19,9 (138)	21,8 (151)
4565 S, Lega 24	S34565	14,5 (101)	14,5 (101)				
20Mo-6	N08026	11,6 (81)	13,1 (91)	15,0 (104)	16,6 (115)	18,2 (126)	19,6(136)
254N	S32053	11,6 (81)	12,5 (87)	14,4 (100)	16,1 (112)	17,6 (122)	
25-6MO, 1925 hMo	N08926	12,0 (83)	12,9 (89)	14,4 (100)	16,5 (114)	18,5 (128)	20,1 (139)
254 SMO	S31254	13,4 (92)	14,5 (100)	15,9 (110)	17,3 (119)	18,7 (129)	20,2 (139)
AL-6XN	N08367	11,5 (80)	13,0 (90)	15,1 (105)	17,2 (120)	19,3 (134)	21,2 (147)
UR 66	S31266	12,0 (83)		13,0 (90)		14,0 (97)	
354N	N08354	11,3 (78)	13,2 (91)	15,3 (106)	17,6 (122)	19,1 (132)	20,8 (144)
654 SMO	S32654	8,6 (59)	9,8 (68)	11,3 (78)	12,6 (87)	14,5 (100)	

Tabella 3.15: conduttività termica a diverse temperature

Gli acciai inossidabili austenitici con maggiori tenori di azoto e quelli laminati per incrementarne la resistenza hanno un ritorno elastico più simile ai tipi duplex in figura 3.13 rispetto ai tipi austenitici standard. Quando il ritorno elastico è considerato correttamente, i tipi legati con azoto ed incruditi permettono di ridurre gli spessori, risparmiando in termini di peso e di costi.

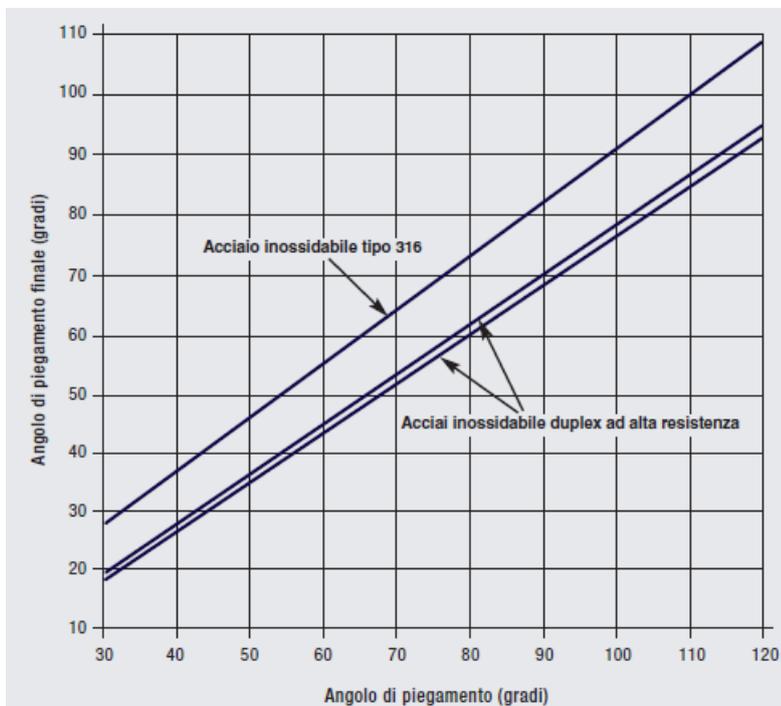


Fig. 3.13: ritorno elastico lamierino acciaio duplex ricotto con spessore di 2mm in 316L

La temperatura minima di ricottura è la minima in grado di dissolvere i carburi ed i precipitati intermetallici. La ricottura deve essere eseguita al di sopra di questa temperatura per assicurare la completa dissoluzione dei precipitati e ripristinare la resistenza alla corrosione. Il limite superiore dell'intervallo di temperatura di ricottura è dato dalla velocità di riscaldamento e dalle dimensioni della sezione e dalla necessità di evitare eccessiva ossidazione, che può risultare difficile da rimuovere. Gli HPASS tendono a formare composti intermetallici che richiedono temperature più elevate per essere dissolti rispetto ai carburi, per cui essi presentano temperature di ricottura maggiori di altri acciai. Una permanenza in temperatura pari a due o tre minuti per millimetro di spessore è sufficiente a dissolvere piccole quantità di carburi ed altre fasi secondarie e a diminuire la durezza di materiali formati a freddo. Nel caso siano presenti grandi quantità di precipitati, sono necessarie permanenze più lunghe. Una ricottura di solubilizzazione troppo lunga o a temperatura eccessiva può causare eccessiva ossidazione, difficoltosa e costosa da rimuovere.

UNS No.	Tipo	Temperatura di ricottura	
		°C	°F
S20101	Tipo 201	1040	1900
S30400/S30403	Tipo 304/304L	1040	1900
S30409	Tipo 304H	1040	1900
S31600/S31603	Tipo 316/316L	1040	1900
S34700	Tipo 347	1040	1900
N08020	Lega 20, 20Cb-3	1150	2100
N08904	904L	1095	2000
N08367	AL-6XN	1105	2025
S31254	254 SMO	1150	2100

Tabella 3.16: temperatura di ricottura per vari tipi di acciai inox austenitici

Gli acciai inossidabili austenitici possono richiedere un raffreddamento rapido dopo ricottura per evitare la precipitazione di carburi di cromo o altre fasi intermetalliche. Tale esigenza e la scelta del mezzo di raffreddamento dipendono dalla sezione e dal tipo. In molte situazioni, sottili sezioni di tipo 316L possono essere raffreddate in aria. Se le sezioni, il tenore di carbonio ed il grado di alligazione aumentano, aumenta anche la necessità di raffreddamenti rapidi. Metodi comuni sono il raffreddamento con getti di aria, spruzzi di acqua o tempra in acqua. Durante la ricottura in vuoto, la tempra con gas inerti può raffreddare senza formazione di ossidi. Se un materiale è soggetto ad ulteriori processi a caldo, dopo la ricottura, ad esempio la saldatura, è meglio raffreddare il più rapidamente possibile, ad esempio con tempra in acqua. Ciò aumenta la possibilità di tollerare gli effetti dannosi di ulteriori cicli termici. La possibilità di deformazione dovrebbe essere considerata durante la scelta di un mezzo di raffreddamento.

Il decapaggio crea la superficie più resistente alla corrosione di tutti i metodi di pulitura. Esso impiega acidi forti che rimuovono gli ossidi grossolani superficiali e si riduce lo strato di cromo sottostante. Poiché il decapaggio dissolve la superficie dell'acciaio inossidabile, deve essere attentamente controllato. I tassi di decapaggio dipendono fortemente dalla lega. Le condizioni impiegate per i tipi 316 possono non essere adeguate per le leghe più resistenti alla corrosione come l'acciaio HPASS 6% Mo.

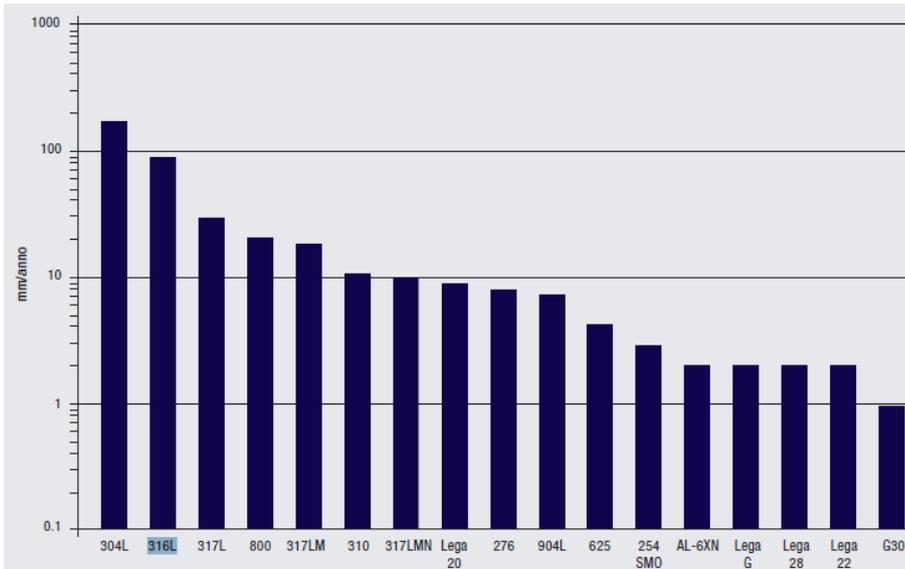


Fig. 3.14: tempi necessari per il decapaggio per gli acciai

È importante non trascurare i possibili effetti negativi di un trattamento di solubilizzazione troppo prolungato e/o effettuato a temperature inutilmente elevate. Aumenti eccessivi della temperatura e del tempo favoriscono infatti un ingrossamento del grano cristallino, sotto la spinta di una forza motrice conseguente alla tendenza spontanea del materiale a ridurre il proprio contenuto di energia attraverso una diminuzione dell'energia superficiale dei bordi, con le conseguenze negative per le proprietà meccaniche del materiale.

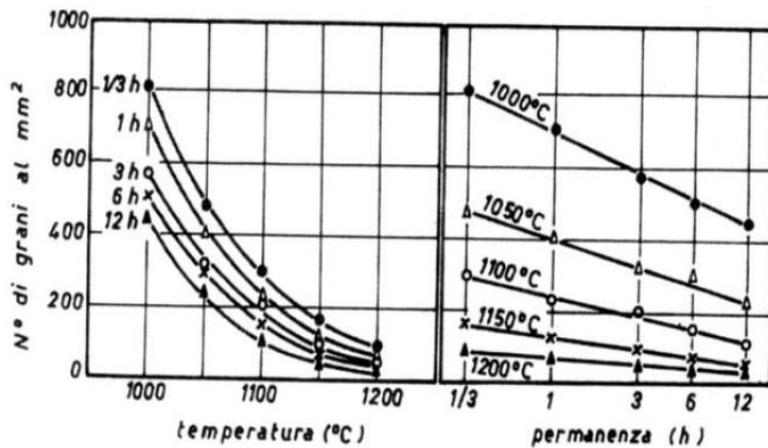


Fig. 3.15: effetti temperatura di trattamento e tempo di permanenza sul numero di grani

Gli acciai stabilizzanti presentano elementi di lega aggiuntivi per la protezione del cromo da fenomeni di sensibilizzazione e di conseguenza si ha un beneficio per la resistenza alla corrosione intergranulare. Per questi acciai occorre che durante la prima fase di solubilizzazione, effettuata per rendere omogenea la composizione della lega austenitica, segua una seconda fase consistente in una permanenza di almeno 2h a 885°C, che ha lo scopo di permettere la precipitazione in forma finemente suddivisa dei carburi degli elementi protettivi aggiunti. La protezione, definita stabilizzazione, è quindi il risultato della presenza nella lega di quantità controllate di elementi che hanno verso il carbonio un'affinità maggiore di quella del cromo, la cui tendenza a formare carburi viene così prevenuta.

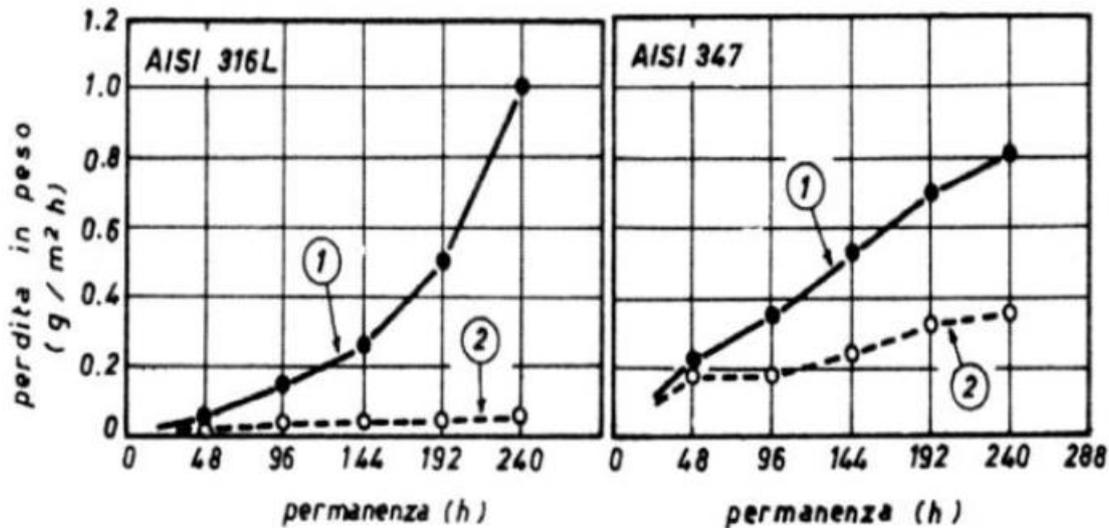


Fig. 3.16: miglioramenti nella resistenza alla corrosione con elementi stabilizzanti

Si osserva il comportamento di campioni volutamente sensibilizzati ai fini sperimentali, non sottoposti al trattamento di stabilizzazione e testati a corrosione in HNO₃ 65%; è stato confrontato con quello di campioni degli stessi acciai, dapprima stabilizzati a 885°C e successivamente sottoposti allo stesso trattamento di sensibilizzazione applicato ai campioni non stabilizzati. Nel caso dell'acciaio austenitico AISI 316L, le perdite di peso per la corrosione intergranulare restano molto limitate anche per tempi lunghi di permanenza nel liquido corrosivo. La stabilizzazione causa la precipitazione di carburi degli elementi stabilizzanti (Nb e Ti) per cui, durante la successiva sensibilizzazione, il carbonio residuo non è sufficiente a causare precipitazione di carburi di cromo ai bordi intergranulari.

Per analizzare la resistenza alla vaiolatura bisogna introdurre la temperatura critica di vaiolatura (CPT). Essa è una caratteristica di uno specifico grado di acciaio inossidabile e di un determinato ambiente. Esiste una temperatura simile per la corrosione interstiziale chiamata temperatura critica di corrosione interstiziale (CCT); essa è in funzione della specifica tipologia di acciaio inossidabile.

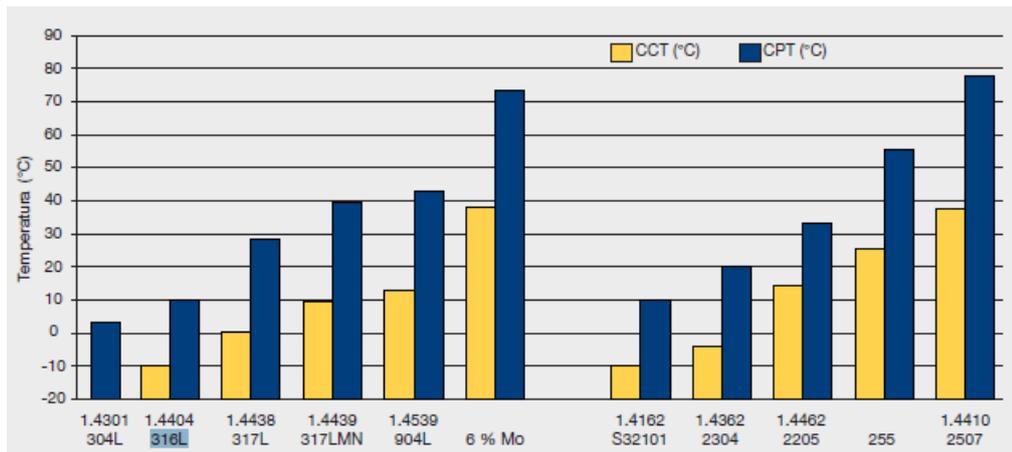


Fig. 3.17: confronto sulla resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale

3.4.2 Additive Manufacturing

Gli acciai inossidabili austenitici sono costituiti da fase austenitica stabile, sono noti per elevata resistenza a corrosione e buone proprietà meccaniche. Il cromo è un elemento che aumenta la temprabilità dell'acciaio, forma carburi che ne incrementano la resistenza ad usura, migliora la stabilità al rinvenimento, la resistenza

a corrosione e all'ossidazione a caldo. Affinché l'acciaio resista a corrosione il contenuto di cromo deve essere superiore al 10.5%, necessario alla formazione di un film protettivo. Il nichel fa aumentare la tenacità, la resistenza, la temprabilità e la saldabilità dell'acciaio. Il molibdeno fa aumentare la resistenza e la durezza; determina la formazione di carburi molto duri e stabili. Inoltre, elimina le fragilità da rinvenimento, rende la martensite più stabile alle elevate temperature, migliora le caratteristiche meccaniche e la resistenza a corrosione. Il manganese è un elemento che migliora la temprabilità, aumenta la resistenza a trazione, la tenacità, la resilienza e la deformabilità a caldo. Causa la diminuzione della conducibilità, la capacità di deformazione a freddo ed aumenta la sensibilità al surriscaldamento.

Density	7.99 g/cm ³
Thermal conductivity	16.2 W/mK
Melting range	1371 °C to 1399 °C
Coefficient of thermal expansion (see note 1)	16 10 ⁻⁶ K ⁻¹

Tabella 3.17: dati generali per il materiale 316L lavorato

Questi dati sono validi nella gamma tra 0 e 100°C. Il materiale è testato a temperatura ambiente da NADCAP e da un laboratorio indipendente accreditato UKAS. La prova di riferimento è la ASTM E8 e viene lavorato prima di effettuare il test. È testato secondo la ASTM E384-11, dopo la lucidatura. Infine è testato secondo JIS B 0601-2001 (ISO 97), dopo la pallinatura.

Element	Mass (%)
Iron	Balance
Chromium	16.00 to 18.00
Nickel	10.00 to 14.00
Molybdenum	2.00 to 3.00
Manganese	≤ 2.00
Silicon	≤ 1.00
Nitrogen	≤ 0.10
Oxygen	≤ 0.10
Phosphorus	≤ 0.045
Carbon	≤ 0.03
Sulphur	≤ 0.03

Tabella 3.18: composizione della polvere per il 316L

	As Built
Upper tensile strength (UTS) (See note 2)	
Horizontal direction (XY)	676 MPa ±2 MPa
Vertical direction (Z)	624 MPa ±17 MPa
Yield strength (see note 2)	
Horizontal direction (XY)	547 MPa ±3 MPa
Vertical direction (Z)	494 MPa ±14 MPa
Elongation at break (see note 2)	
Horizontal direction (XY)	43% ±2%
Vertical direction (Z)	35% ±8%
Modulus of elasticity (see note 2)	
Horizontal direction (XY)	197 GPa ±4 GPa
Vertical direction (Z)	190 GPa ±10 GPa
Hardness (Vickers) (see note 3)	
Horizontal direction (XY)	198 HV0.5 ±8 HV0.5
Vertical direction (Z)	208 HV0.5 ±6 HV0.5
Surface roughness (R_a) (see note 4)	
Horizontal direction (XY)	4 µm to 6 µm
Vertical direction (Z)	4 µm to 6 µm

Tabella 3.19: proprietà meccaniche per il 316L

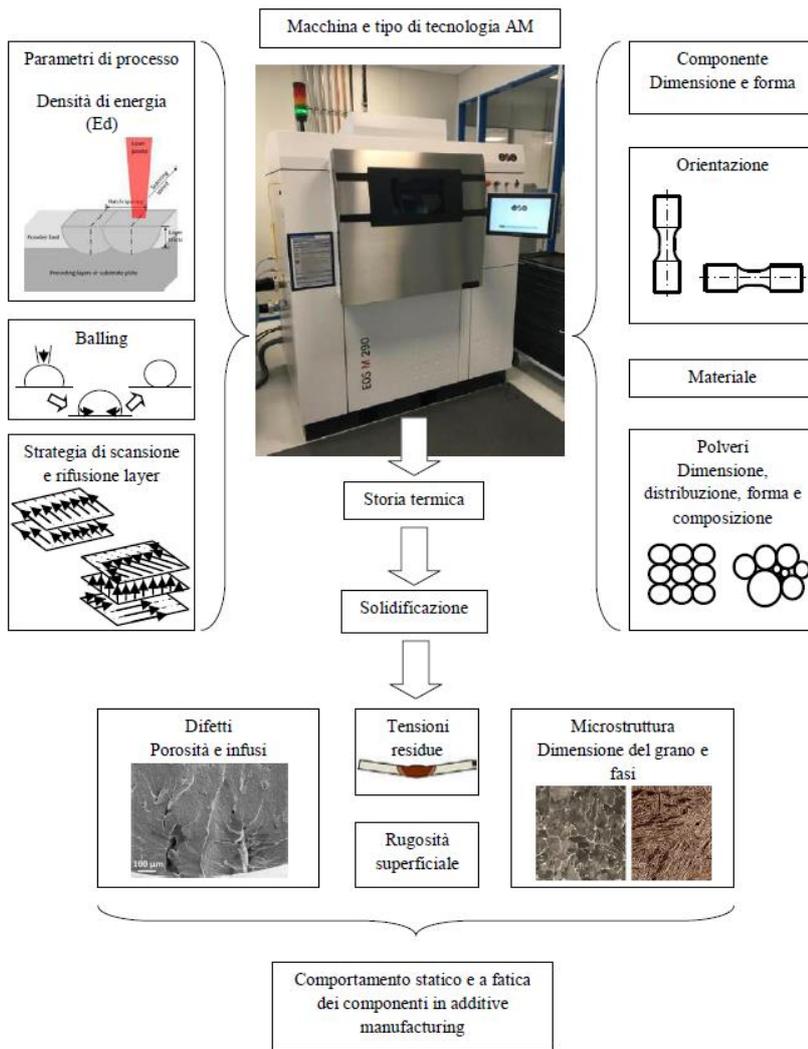


Fig. 3.18: principali fattori di influenza sulle proprietà meccaniche AM

Materiale	Tecnologia	Ref.	Orientazione ^o	Trattamenti Termici	Trattamenti Superficiali	E [GPa]	σ_u [Mpa]	σ_r [Mpa]	ϵ_r [%]	σ_A^o (K) [MPa]	N_A [cicli]	Tipo di prova a fatica	Rapporto di Cielo R	
AISI 316L	TM	[12]	\	R	\	170	485	40	\	\	\	\	\	
		[30]	\	R	\	170	450	40	\	\	\	\	\	
		\	\	R	FC	\	170	480	40	\	\	\	\	\
		\	\	R	FF	\	170-310	480-620	30	\	\	\	\	\
		\	\	R	\	\	170	480	35	\	\	\	\	\
	DMLS	[71]	\	\	NT	FF	310	620	30	\	\	\	\	\
		[21]	90°	NT	L	\	255	530	\	\	270 (-)	10 ⁷	Flessione rotante	-1
		\	0°	NT	L	\	\	\	\	\	110 (-)	1.1-10 ⁶	\	\
		\	0°	HIP	L	\	\	\	\	\	150 (-)	10 ⁷	\	\
		[45]	\	NT	TO	\	500	600.2±2.2	55±2.5	260* (-)	1.6-10 ⁶	\	\	
	SLM	[21]	90°	RL	\	\	180±4	496±5	717±7	28±3	\	\	\	\
		\	45°	RL	\	\	193±5	473±5	680±7	30±3	\	\	\	\
		[46]	0°	NT	\	\	\	\	\	\	108±10 (-)	2-10 ⁶	\	-1
		\	0°	NT	TO	\	\	\	\	\	267±32 (-)	\	\	\
		\	0°	RS	TO	\	\	\	\	\	294±60 (-)	\	\	\
LBM	[12]	\	\	HIP	TO	\	\	\	\	317±7 (-)	\	\	\	
	\	\	0°	NT	\	\	462	565	53.7	\	\	\	\	
	\	\	0°	RS	TO	\	443	595	48.6	\	\	\	\	
	\	\	\	\	\	\	590±17	705±15	44±7	\	\	\	\	
	\	\	\	\	\	\	375±11	635±17	51±3	\	\	\	\	
\	\	\	\	\	\	462*	565*	53.7*	108 (-)	10 ⁷	\	-1		
\	\	\	\	RS	TO	\	\	\	\	294 (-)	\	\	\	

Materiale	Tecnologia	Ref.	Orientazione ^o	Trattamenti Termici	Trattamenti Superficiali	E [GPa]	σ_s [Mpa]	σ_r [Mpa]	ϵ_r [%]	σ_A^o (K _A) [MPa]	N _A [cicli]	Tipo di prova a fatica	Rapporto di Ciclo R
AISI 316L	TM	[21]	\	NT	L	187±4	345±3	563±6	30±3	340 (-)	10 ⁷	Flessione rotante	-1
		[46]	\	NT	\	\	220±5	530-580±5	>40±2.6	240 (-)	2·10 ⁶	Assiale	
										381 (-)		Flessione rotante	

Legenda:

Tecnologia: TM= Traditionally manufactured, SLM= Selective laser Melting, DMLS= Direct Metal Laser Sintering, EBM= Electron Beam Melting, EBFF= Electron Beam Free Forming, LENS= Laser Engineered Net Shape, SMD= Selective Metal Deposition, LMD= Laser Metal Deposition, LBM= Laser Beam Melting, ALM= Additive Layer Manufactured, HPDC= Hot Pressure Die Casting, PDC= Pressure Die Casting.

Trattamenti termici: R= Ricottura, NT= Non Trattato, T= Trattato, HIP (Hot Isostatic Pressing), S= Solubilizzazione, I= invecchiamento, SI= Superinvecchiamento, RL= Rilassamento delle tensioni, RS= Riscaldamento.

Trattamenti superficiali: L= Lucidatura, EL=Elettrolucidatura, P= Micropallinatura, RT= Rettifica, TO= Tornitura, F= Fresatura, U= Lavorato alle macchine utensili, N= Intaglio, SB= Sabbatura, LF= Lavorato a freddo, FF= Finitura a freddo, FC= Finitura a caldo.

^o Ampiezza di tensione $\sigma_A = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$ (Resistenza a fatica)

Tabella 3.20: proprietà statiche e a fatica per componenti in AM, considerando diverse tecnologie, materiali, orientazioni e trattamenti termici

Si analizzano otto campioni in AISI 316L prodotti tramite SLM, aventi una densità di 8g/cm³, utilizzando differenti variabili di processo per valutare l'effetto delle stesse su microstruttura e proprietà meccaniche. Si utilizzano due livelli di potenza (100 e 150W), due differenti valori di hatch spacing (0.05 e 0.07mm), cioè si hanno due passate contigue di laser ed infine due differenti direzioni di crescita (45 e 90°) rispetto al piano di lavoro del laser, per un totale di otto condizioni di processo differenti.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Serie 8
Potenza [W]	100	100	100	100	150	150	150	150
Hatch Space [mm]	0,05	0,05	0,07	0,07	0,05	0,05	0,07	0,07
Angolo di accrescimento	45°	90°	45°	90°	45°	90°	45°	90°
Fluenza = Volume Energy density (VED) [KJ/mm ³]	142,9	142,9	102,0	102,0	214,3	214,3	153,1	153,1
Densità [%]	98,44	98,57	98,56	98,70	99,81	99,54	99,91	100,00

Tabella 3.21: parametri utilizzati per il 316L

Nella tabella 3.22 vengono inoltre riportate le proprietà meccaniche relative alle otto serie di provini e alla barra commerciale in 316L di confronto. Sono riportati tensione di snervamento, resistenza a trazione, allungamento a rottura (A_t) e resistenza a fatica ($\sigma_{50\%}$). Le prove sono state condotte utilizzando un metodo stair case ridotto, con valore di run-out di 300000 cicli. Confrontando i risultati delle prove di trazione ottenuti per le otto serie di campioni con quelli delle barre ricotte e imbutite a freddo, elencate nelle ultime due colonne, si può osservare che le proprietà meccaniche dei componenti processati con SLM sono generalmente comparabili o superiori rispetto a quelle dei componenti processati con metodi tradizionali.

	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6	Serie 7	Serie 8	Barra 316 L – st. ricotto [99]	Barra 316L – st. ricotto e imbutito a freddo [100]
Yield strength $R_{p0.2}$ [MPa]	527	477	541	474	509	431	524	491	205	380
Tensile strength R_m [MPa]	616	555	643	555	649	547	641	569	515	585
Percentage plastic extension at fracture A_t [%]	49	75	61	110	74	114	72	120	60	45
Resistenza a fatica ($\sigma_{50\%}$)							365	295	-	380

Tabella 3.22: proprietà meccaniche relative alle otto serie di provini per il 316L

In conclusione, si può osservare come il SLM è un processo versatile, ma complesso attraverso il quale è possibile produrre, mediante fusione selettiva di polvere metallica, componenti caratterizzati da geometrie complesse ed elevate proprietà meccaniche. La velocità di scansione e lo spessore dello strato sono stati mantenuti costanti (700mm/s e 20 μ m). La microstruttura risulta caratterizzata da melt pool, tipici dei processi additivi, ad indicare il passaggio del laser e da grani colonnari costruiti da celle micrometriche. All'interno delle celle sono presenti nano-inclusioni uniformemente disperse, verosimilmente costituite da silicati, come riportato in letteratura. I difetti osservati nel materiale sono risultati essere appartenenti a tre principali macrocategorie: difetti di riempimento o decoesione, porosità da gas e difetti da tensioni residue. Le superfici di frattura relative ai campioni di trazione hanno presentato una morfologia tipicamente duttile, essendo caratterizzate da dimples sub-micrometriche. Le superfici di frattura dei campioni di fatica presentano la tipica morfologia di una rottura per fatica, costituita da un'area di innesco della cricca, area di propagazione e zona di rottura di schianto. L'innesco è spesso associato a difetti superficiali o sub-superficiali come pori o zone di decoesione. L'area di rottura di schianto ha presentato morfologia prevalentemente duttile, caratterizzata da dimples; tuttavia alcune aree di frattura fragile sono state osservate in corrispondenza di macro-difetti. La formazione dei dimples è correlata alla presenza di nano-inclusioni, rinvenute all'interno delle fossette.

Condizioni	Carico snervamento $R_{p0.2}$ (MPa)	di	Carico di rottura R_m (MPa)	Allungamento (%)
DED	405-415		620-660	32-40
LPBF	554		684	36
Cast	262		552	55

Tabella 3.23: proprietà meccaniche per DED, LPBF (Laser Powder Bed Fusion) e casting

3.5 AlSi10Mg

3.5.1 Metodi standard

La lega di alluminio AlSi10Mg (da fonderia) è utilizzata per getti caratterizzati da pareti sottili e geometrie complesse soggetti a carichi elevati avendo buone proprietà dinamiche, di robustezza e durezza, combinando buone proprietà termiche con un peso ridotto. Lavorazioni tipiche: saldatura, micro-pallinatura, lucidatura e rivestimento.

Tipo di lega Alloy group	Designazione della lega - Alloy group		Composizione chimica (in% di massa) - Chemical compositions (percentage by mass)											Altri - Others ⁽¹⁾	
	Designazione numerica Numerical	Simboli chimici Chemical symbols	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Singoli - Each	Totale - Total
Al cu	EN AB-21000	EN AB-AlCu4MgTi	0,15 (0,20)	0,30 (0,35)	4,2-5,0	0,10	0,20-0,35 (0,15-0,35)	-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15-0,25 (0,15-0,30)	0,03	0,10
	EN AB-21100	EN AB-AlCu4Ti	0,15 (0,18)	0,15 (0,19)	4,2-5,2	0,55	-	-	0,07	-	-	0,15-0,25 (0,15-0,30)	0,03	0,10	
	EN AB-21200	EN AB-AlCu4MnMg	0,10	0,15 (0,20)	4,0-5,0	0,20-0,50	0,20-0,50 (0,15-0,50)	-	0,03 (0,05)	0,05 (0,10)	0,03	0,03	0,05 (0,10)	0,03	0,10
AlSiMgTi	EN AB-41000	EN AB-AlSi2MgTi	1,6-2,4	0,50 (0,60)	0,08 (0,10)	0,30-0,50	0,50-0,65 (0,45-0,65)	-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,07-0,15 (0,05-0,20)	0,05	0,15
AlSi7Mg	EN AB-42000	EN AB-AlSi7Mg	6,5-7,5	0,45 (0,55)	0,15 (0,20)	0,35	0,25-0,65 (0,20-0,65)	-	0,15	0,15	0,15	0,05	0,20 (0,25)	0,05	0,15
	EN AB-42100	EN AB-AlSi7Mg0,3	6,5-7,5	0,15 (0,19)	0,03 (0,05)	0,10	0,30-0,45 (0,25-0,45)	-	-	0,07	-	-	0,18 (0,25)	0,03	0,10
	EN AB-42200	EN AB-AlSi7Mg0,6	6,5-7,5	0,15 (0,19)	0,03 (0,05)	0,10	0,50-0,70 (0,45-0,70)	-	-	0,07	-	-	0,18 (0,25)	0,03	0,10
AlSi10Mg	EN AB-43000	EN AB-AlSi10Mg(a)	9,0-11,0	0,40 (0,55)	0,03 (0,05)	0,45	0,25-0,45 (0,20-0,45)	-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15
	EN AB-43100	EN AB-AlSi10Mg(b)	9,0-11,0	0,45 (0,55)	0,08 (0,10)	0,45	0,25-0,45 (0,20-0,45)	-	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15
	EN AB-43200	EN AB-AlSi10Mg(Cu)	9,0-11,0	0,55 (0,65)	0,30 (0,35)	0,55	0,25-0,45 (0,20-0,45)	-	0,15	0,35	0,10	-	0,15 (0,20)	0,05	0,15
	EN AB-43300	EN AB-AlSi9Mg	9,0-10,0	0,15 (0,19)	0,03 (0,05)	0,10	0,30-0,45 (0,25-0,45)	-	-	0,07	-	-	0,15	0,03	0,10
	EN AB-43400	EN AB-AlSi10Mg(Fe)	9,0-11,0	0,45-0,9 (1,0)	0,08 (0,10)	0,55	0,25-0,50 (0,20-0,50)	-	0,15	0,15	0,15	0,05	0,15 (0,20)	0,05	0,15
	EN AB-43500	EN AB-AlSi10MnMg	9,0-11,5	0,20 (0,25)	0,03 (0,05)	0,40-0,80	0,15-0,60 (0,10-0,60)	-	-	0,07	-	-	0,15 (0,20)	0,05	0,15

Tabella 3.24: composizione chimica di alcune leghe di alluminio

Gruppo di lega - Alloy group	Designazione della lega Alloy designation		Metodo di colata Casting method				Att. all'ottenimento del getto Castability			Altre caratteristiche - Lavorabilità Other properties - Machinability							Caratteristiche meccaniche ⁽¹⁾ Mechanical properties ⁽¹⁾					
	Numerica - Numerical	Simboli chimici - Chemical symbols	In sabbia - Sand casting	In conchiglia - Permanent mould casting	A pressione - Pressure die casting	In cera persa - Investment casting	Fluidità - Fluidity	Resistenza alla cricatura da ritiro - Resistance to hot tearing	Tenuta a pressione - Pressure tightness	Grezzo di fonderia - As cast	Dopo trattamento termico - After heat treatment	Resistenza alla corrosione - Resistance to corrosion	Anodizzazione decorativa - Decorative anodizing	Saldabilità ⁽¹⁾ - Ability to be welded ⁽¹⁾	Attitudine alla levigatura - Ability to be polished	Dilatazione termica lineare - Linear thermal expansion 10 ⁻⁶ /K 293K - 373K	Conduttività elettrica - Electrical conductivity Mε/m ⁽¹⁾	Conduttività termica - Thermal conductivity W/(mK) ⁽¹⁾	Resistenza alla temperatura ambiente ⁽¹⁾ Strength at room temperature ⁽¹⁾	Resistenza ad una temperatura elevata fino a 200°C ⁽¹⁾ Strength at elevated temperature to 200°C ⁽¹⁾	Resistenza ad una temperatura elevata fino a 200°C ⁽¹⁾ Strength at elevated temperature to 200°C ⁽¹⁾	Duttilità (resistenza agli urti) ^{(1)(b)} Ductility (Shock resistance) ^{(1)(b)}
AlCu	EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi	*	*		*	C	D	D	-	A	D	C	D	B	23	da 16 a 23	da 120 a 150	A	B	A	da 80 a 110
	EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti	*	*		*	C	D	D	-	A	D	C	D	B	23	da 16 a 23	da 120 a 150	A	B	A	da 80 a 110
	EN AC-21200	EN AC-Al Cu5MgMn	*	*		*	D	D	D	-	A	D	C	C	B	23	da 16 a 23	da 120 a 150	A	B	A	da 80 a 110
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC-Al Si2MgTi	*	*		*	C	C	C	C	B	B	B	B	B	23	da 19 a 25	da 140 a 160	B		B	-
	EN AC-42000	EN AC-Al Si7Mg	*	*		*	B	A	B	B/C	B	B/C	D	B	C	22	da 19 a 25	da 150 a 170	B	C	C	da 80 a 110
AlSi7Mg	EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3	*	*		*	B	A	B	-	B	B	D	B	C	22	da 20 a 27	da 160 a 180	A	C	A	da 80 a 110
	EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6	*	*		*	B	A	B	-	B	B	D	B	C	22	da 20 a 26	da 150 a 180	A	C	A	da 80 a 110
AlSi10Mg	EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)	*	*		*	A	A	B	B/C	B	B	E	A	D	21	da 18 a 25	da 140 a 170	B	C	C	da 80 a 110
	EN AC-43100	EN AC-Al Si10Mg(b)	*	*		*	A	A	B	B/C	B	C	E	A	D	21	da 18 a 25	da 140 a 170	B	C	C	da 80 a 110
	EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)	*	*		*	A	A	B	B/C	B	C	E	A	C	21	da 16 a 24	da 130 a 170	B	C	C	da 80 a 110
	EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg	*	*		*	A	A	B	B/C	B	B	E	A	D	21	da 20 a 26	da 150 a 180	A	C	A	da 80 a 110
	EN AC-43400	EN AC-Al Si10Mg(Fe)			*		A	A	C	B	-	C	E	C	B/C	21	da 16 a 21	da 130 a 150	B	C	C	da 60 a 90
EN AC-43500	EN AC-Al Si10MnMg			*		A	A	C	B/C	B	B	E	B	D	21	da 19 a 25	da 140 a 170	A	C	A	da 80 a 90	

Tabella 3.25: tecniche più utilizzate per la realizzazione di queste leghe

Dalla tabella si considera che:

A=eccellente; B=buono; C=sufficiente; D=scadente; E=sconsigliato; F=inadeguato.

Per quel che concerne la colata sottopressione si osservano le seguenti caratteristiche meccaniche: il carico unitario di rottura è di 240MPa; il carico limite di snervamento è di 140MPa; si ha l'1% di allungamento percentuale e la durezza Brinell è di 70.

Per quel che concerne le proprietà fisiche si ha che:

- Peso specifico: 2.68 kg/dm³;
- Intervallo di fusione: 550-600°C;
- Calore specifico a 100°C: 0.91J/gK;
- Ritiro lineare in pressocolata: 0.4-0.6;
- Conduttività elettrica: 16-21 MS/m;
- Modulo elastico: 72.6GPa;
- Conduttività termica a 20°C: 130-150W/(m K);
- Dilatazione termica da 20 a 100°C (10⁻⁶): 21 K⁻¹;
- Dilatazione termica da 100 a 200°C (10⁻⁶): 22 K⁻¹;
- Temperatura massima di fusione: 750°C;
- Intervallo ottimo di colata sottopressione: 630-700°C.

1° Livello	2° Livello		3° Livello	
A - Difetti interni	A1	Difetti di ritiro	A1.1	Macro-porosità
			A1.2	Porosità interdendritica
			A1.3	Porosità planare
	A2	Difetti di gas	A2.1	Porosità da aria intrappolata
			A2.2	Porosità da idrogeno
			A2.3	Porosità da umidità residua
			A2.4	Porosità da lubrificante
	A3	Difetti di riempimento	A3.1	Giunzione
			A3.2	Sfogliatura
			A3.3	Goccia fredda
	A4	Fasi indesiderate	A4.1	Inclusione
			A4.2	Struttura non desiderata
	A5	Difetti di contrazione termica	A5.1	Cricca
			A5.2	Cricca a caldo
	1° Livello	2° Livello		3° Livello
B - Difetti superficiali	B1	Difetti di ritiro	B1.1	Ricalo
	B2	Difetti di gas	B2.1	Blister
	B3	Difetti di riempimento	B3.1	Giunzione e vortice
			B3.2	Sfogliatura
			B3.3	Goccia fredda
	B4	Fasi indesiderate	B4.1	Depositi
			B4.2	Contaminazione o inclusione
	B5	Difetti di contrazione termica	B5.1	Cricca
			B5.2	Cricca a caldo
	B6	Difetti di interazione metallo-stampo	B6.1	Erosione
			B6.2	Metallizzazione
			B6.3	Crettature da fatica termica
			B6.4	Segno di espulsione
			B6.5	Corrosione dello stampo
	1° Livello	2° Livello		3° Livello
C - Difetti geometrici	C1	Mancanza di materiale	C1.1	Getto incompleto
	C2	Eccesso di materiale	C2.1	Bava
	C3	Fuori tolleranza	C3.1	Getto deformato

Tabella 3.26: classificazione dei difetti strutturali nei getti e limiti di accettabilità

Trattamento termico	Resistenza a trazione MPa	Resistenza allo snervamento 0,2% MPa	Allungamento %	Durezza	Densità
/	360 MPa +/- 30 MPa	240 MPa +/- +/- 30 MPa	6 +/- 5%	120 +/- 5 HBW	>99,8%
Trattamento termico	Resistenza a trazione MPa	Resistenza allo snervamento 0,2% MPa	Allungamento %	Durezza	Densità
Trattato termicamente	>267 MPa	>200 MPa	10 +/- 2%	-	>99,8%
	Non trattato		Trattato termicamente		
Conducibilità termica	approx. 100 +/- 5 W/m°C		approx. 170 +/- 5 W/m°C		
Calore specifico	approx. 900 +/- 50 J/kg°C		approx. 890 +/- 50 J/kg°C		

Tabella 3.27: proprietà meccaniche per l'AlSi10Mg

Risoluzione	Spessore strati	Dimensione tavola di lavoro	Dimensione min. caratteristica
Alta risoluzione	0,03 mm	250x250x300mm	1,00mm
Risoluzione standard	0,06 mm	250x250x300mm	1,00mm

Tabella 3.28: risoluzione, spessore strati, dimensioni tavola di lavoro e dimensioni minima caratteristica

Risoluzione	0 °	45° inferiore	45° superiore	90 °
Alta risoluzione	Ra 6,3 µm Rz 30,7 µm	Ra 8,2 µm Rz 36 µm	Ra 9,9 µm Rz 45,5 µm	Ra 6,6 µm Rz 32 µm
Risoluzione standard	Ra 6,3 µm Rz 30,7 µm	Ra 15 µm Rz 60 µm	Ra 4 µm Rz 20 µm	Ra 3,5 µm Rz 18 µm

Tabella 3.29: risoluzione e orientamento per AlSi10Mg



Fig. 3.19: alta risoluzione per 30µm e risoluzione standard per 60µm

3.5.2 Additive Manufacturing

L'AlSi10Mg è molto utilizzato in ambito dell'AM grazie alle sue caratteristiche meccanico-termiche e di saldabilità. I provini sono stati prodotti tramite il macchinario EOSINT M270, che permette di produrre componenti in metallo tramite la tecnologia Direct Metal Laser-Sintering (DMLS). I provini sono stati prodotti su una piastra in alluminio 6061 che viene lavorata a macchina utensile per ottenere la superficie più liscia e pulita possibile. I provini sono stati inoltre muniti di supporti alla base, strutture non completamente densificate, atte a non produrre distorsioni durante la crescita e per permettere la facile estrazione del pezzo dalla piastra.

Powder description	Aluminium alloy powder
Layer thickness	25 µm
Laser power	400 W
Additive manufacturing system	AM250

Tabella 3.30: specifiche di processo per l'AlSi10Mg

Presenta le seguenti proprietà:

- Bassa densità;
- Alta resistenza specifica;
- Alta conducibilità termica;
- Altissima conducibilità elettrica;
- Risponde bene una volta terminato il processo.

Density	2.68 g/cm³
Thermal conductivity	130 W/mK to 190 W/mK
Melting range	570 °C to 590 °C
Coefficient of thermal expansion (see note 1)	20 µm/mK to 21 µm/mK

Tabella 3.31: dati generali per l'AlSi10Mg lavorato

Questi dati sono validi nella gamma tra 20 e 100°C. Si ha un alleviamento dello stress a 300±10°C per 2h raffreddato ad aria. Il materiale è testato a temperatura ambiente da NADCAP e da un laboratorio indipendente accreditato UKAS. La prova di riferimento è la ASTM E8 e viene lavorato prima di effettuare il

test. È testato secondo la ASTM E384-11, dopo la lucidatura. Infine, è testato secondo JIS B 0601-2001 (ISO 97), dopo la pallinatura.

Element	Mass (%)
Aluminium	Balance
Silicon	9.00 to 11.00
Magnesium	0.25 to 0.45
Iron	< 0.25
Nitrogen	< 0.20
Oxygen	< 0.20
Titanium	< 0.15
Zinc	< 0.10
Manganese	< 0.10
Nickel	< 0.05
Copper	< 0.05
Lead	< 0.02
Tin	< 0.02

Tabella 3.32: composizione chimica della polvere dell'AlSi10Mg

	As Built	Stress relieved (see note 2)
Tensile strength (UTS) (See note 3)		
Horizontal direction (XY)	442 MPa \pm 6 MPa	334 MPa \pm 1 MPa
Vertical direction (Z)	417 MPa \pm 27 MPa	339 MPa \pm 6 MPa
Yield strength (see note 3)		
Horizontal direction (XY)	264 MPa \pm 2 MPa	211 MPa \pm 2 MPa
Vertical direction (Z)	206 MPa \pm 6 MPa	174 MPa \pm 4 MPa
Elongation at break (see note 3)		
Horizontal direction (XY)	9% \pm 1%	9% \pm 2%
Vertical direction (Z)	6% \pm 2%	4% \pm 1%
Modulus of elasticity (see note 3)		
Horizontal direction (XY)	71 GPa \pm 5 GPa	71 GPa \pm 2 GPa
Vertical direction (Z)	68 GPa \pm 2 GPa	66 GPa \pm 3 GPa
Hardness (Vickers) (see note 4)		
Horizontal direction (XY)	119 HV0.5 \pm 5 HV0.5	103 HV0.5 \pm 5 HV0.5
Vertical direction (Z)	123 HV0.5 \pm 2 HV0.5	98 HV0.5 \pm 5 HV0.5
Surface roughness (R_a) (See note 5)		
Horizontal direction (XY)		5 μ m to 9 μ m
Vertical direction (Z)		7 μ m to 9 μ m

Tabella 3.33: proprietà meccaniche per l'AlSi10Mg

I provini trattati termicamente con stress relieving si sono dimostrati estremamente duttili, arrivando in certi casi a mantenere una solidità strutturale fino al 60% della deformazione. A partire dal 10% di deformazione percentuale in poi i provini tendono a slittare lungo piani orientati a 45°. Lo scorrimento avviene inizialmente lungo una diagonale e successivamente anche su un secondo piano, perpendicolare rispetto al primo piano di scorrimento. Questi slittamenti possono essere associati alla caduta di tensione sul grafico sforzo-deformazione. Il dettaglio e l'approfondimento di questa trattazione è presente nel riferimento [68] della bibliografia.

A SR 25°C	E_{mod}	F _{0,2}	F _{0,2}	dL a F _{0,2}	F _{Rottura}	F _{Rottura}
	GPa	N	MPa	Def%	N	Mpa
A-3	85,6	14855,2	130,5	1,95	38074,9	334,5
A-4	80,9	13873,7	162,0	2,02	17017,0	149,5
A-5	83,5	14310,7	176,8	1,94	27286,2	239,7
Media	83,4	14346,5	156,5	1,97	27459,3	241,3
Dev. Std.	2,35	491,69	23,66	0,04	10530,02	92,52
Dev. Std. %	2,82	3,43	15,12	2,28	38,35	38,35

Tabella 3.34: risultati della prova a compressione

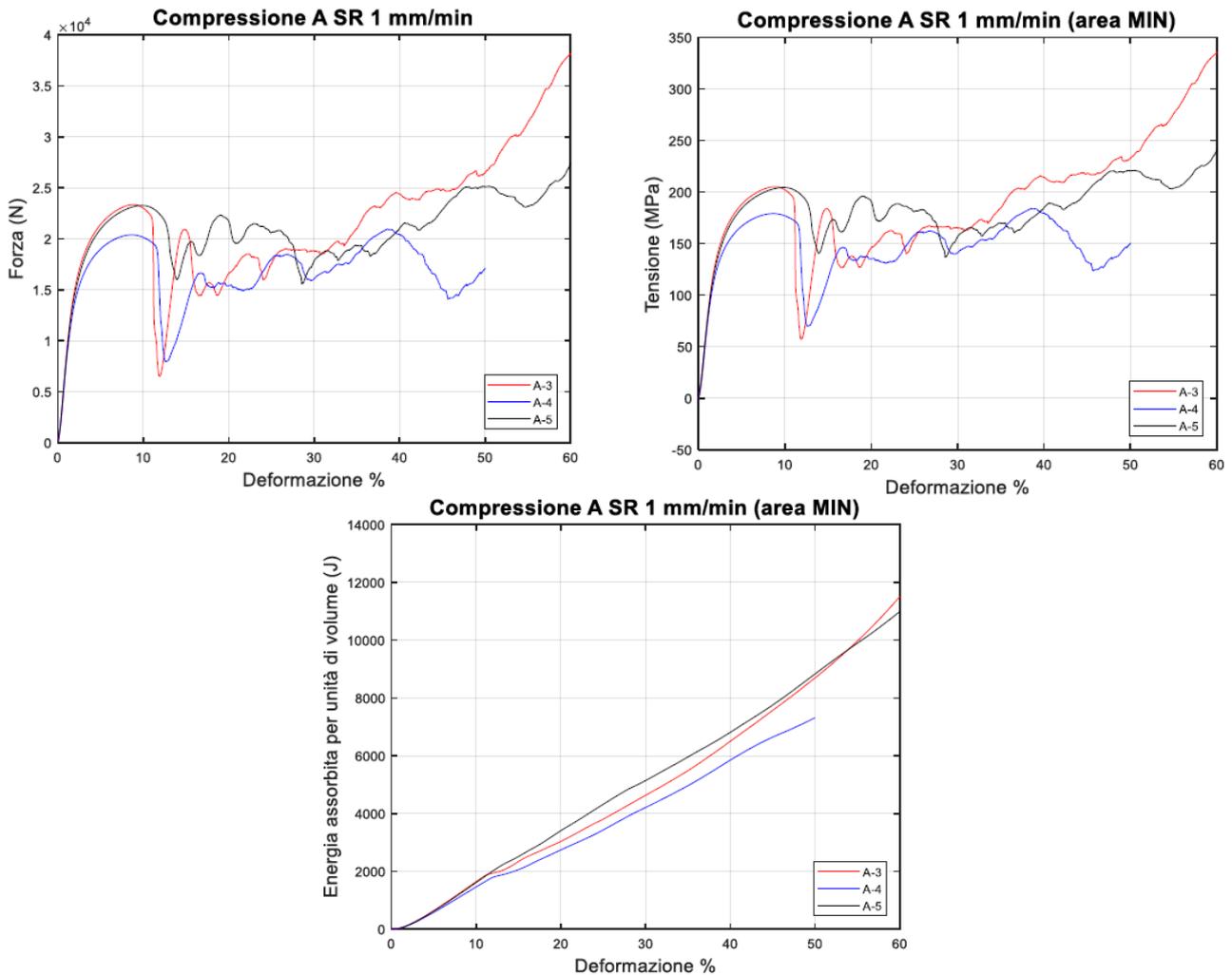


Fig. 3.20: curva forza-deformazione; tensione-deformazione; energia-deformazione

Il materiale oggetto di studio è una lega Al-Si realizzata mediante tecnologia a letto di polvere e fusione Laser. Il materiale è da considerarsi anisotropo (la definizione è riportata nel paragrafo 2.9) e lo sviluppo di provini orizzontali risulta essere peggiore rispetto a quello verticale. Inoltre, la dimensione dei layer di crescita è stata appositamente incrementata per velocizzare i tempi di produzione, ma con l'inconveniente di generare microporosità uniformemente distribuite. Sono state prese in considerazione le prove eseguite sui provini orizzontali a titolo cautelativo.

Sample	Posizione	Alloy	Diametro mm	L0 mm	Rm MPa	Reh MPa	Strizione %
1	orizzontale	AlSi10Mg	6,23	25	340	192	7,5
2	orizzontale	AlSi10Mg	6,23	25	331	193	7,5
3	orizzontale	AlSi10Mg	6,23	25	337	199	8,0
4	orizzontale	AlSi10Mg	6,24	25	359	210	8,0
5	orizzontale	AlSi10Mg	6,21	25	362	191	7,5
6	orizzontale	AlSi10Mg	6,25	25	318	190	7,0
7	orizzontale	AlSi10Mg	6,23	25	375	190	7,0
8	orizzontale	AlSi10Mg	6,22	25	337	195	8,0

Tabella 3.35: risultati delle prove di trazione

		E [Gpa]	UTS [Mpa]	ε [%]	HV
SLM	Direzione XY	68 ± 3	391 ± 6	5,55 ± 0,4	127
	Direzione Z		396 ± 8	3.47 ± 0,6	
Fusione ed invecchiamento		71	300-3017	2,5-3,5	86
HPDC	HPDC+T6	71	300-350	3-5	95-105
		71	330-365	3-5	130-133

Tabella 3.36: proprietà meccaniche in base alle tecnologie standard o AM per AlSi10Mg

Da questi si nota che i provini in SLM mostrano valori maggiori in quasi tutte le proprietà indipendentemente dalla direzione XY o Z. Diverso il rafforzamento per le due direzioni; la presenza di anisotropia dovuta al processo AM genera un comportamento anisotropo che produce allungamento a rottura inferiore per le parti prodotte in direzione XY rispetto a quelle in direzione Z.

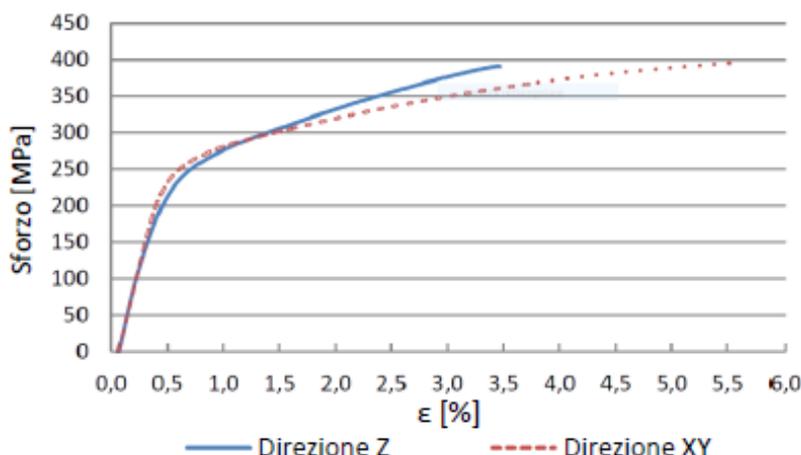


Fig. 3.21: curva sforzo-deformazione per un materiale anisotropo

La curva di compressione ottenuta a partire da un test uniassiale di compressione consente di determinare se il comportamento del materiale è “bending-dominated” (dominato dalla flessione) o “stretch-dominated” (dominato dall’allungamento). Il comportamento bending-dominated caratterizza le strutture cellulari a cella aperta o i materiali cellulari randomici, mentre il comportamento descritto dalla curva stretch-dominated è più comune nei materiali cellulari a cella chiusa o talvolta anche nelle strutture cellulari reticolati periodiche a cella aperta. Il modulo elastico e il campo elastico in strutture stretch-dominated si dimostra generalmente superiore a quello delle strutture bending-dominated che presentano pari densità relativa; tale differenza è dovuta alle differenze nel comportamento della struttura precedente al collasso: le celle che hanno comportamento stretch-dominated possiedono prestazioni meccaniche

relativamente al loro peso che sono superiori alle bending-dominated; sono pertanto da preferire per le applicazioni strutturali nel campo dell'ingegneria meccanica. La regione plastica, in particolar modo, è caratterizzata dalle più marcate differenze; le strutture bending-dominated evidenziano un picco di stress e poi la rottura, seguita da un plateau definito da un valore di tensione pressoché costante e ad un livello inferiore rispetto al picco verificatosi durante la rottura. Questo plateau prosegue all'aumentare della deformazione fino a quando la densità relativa del lattice non si avvicina all'unità; successivamente la curva si impenna, descrivendo la densificazione della struttura reticolare. D'altro canto, nelle strutture stretch-dominated, la rottura è seguita da un incremento circa lineare con un coefficiente angolare inferiore a quello relativo alla curva in campo elastico; successivamente, nelle zone prossime alla densificazione, la curva si impenna analogamente a quanto descritto per le strutture bending-dominated.

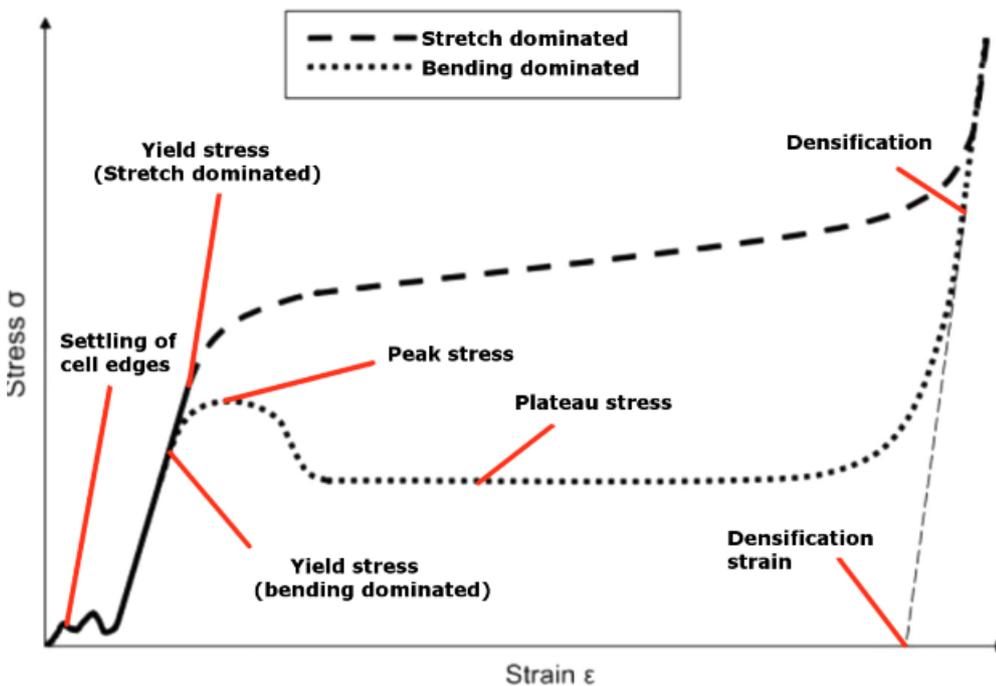


Fig. 3.22: comportamento ideale sforzo-deformazione di una struttura cellulare reticolare sottoposta a compressione

3.6 Ti6Al4V

3.6.1 Metodi standard

La lega Ti6Al4V (denominata anche Ti64) è una lega di tipo alfa+beta. In questo caso la temperatura di transizione tra le due fasi è pari a 970°C; oltre questa temperatura si ha la sola presenza di fase beta.

%	C	N	O	H	FE	TI	AL	V
Min	-	-	-	-	-	Bilanciamento	5,5	3,5
Max	0,08	0,05	0,2	0,125	0,4	Bilanciamento	6,75	4,5

Tabella 3.37: composizione chimica per il Ti6Al4V

PROPRIETÀ FISICHE E MECCANICHE	21°C	93°C	204°C	316°C
Coefficiente di espansione termica $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$		9,54	9,72	9,9
Conduktività termica /kcal/(h.m.°C)	5,95	6,4	7,74	9,08
Modulo di elasticità $\times 10^5$ MPa	1,15	1,1	1,03	9,65

Tabella 3.38: proprietà fisiche e meccaniche a diverse temperature per il Ti6Al4V

Process(*)	Density (%)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Cast	100	840	930	7	15
Cast and forged	100	875	965	14	40
Blended elemental (P+S)	98	786	875	8	14
Blended elemental (HIP)	> 99	805	875	9	17
Prealloyed (HIP)	100	880	975	14	26

(*) P+S = pressed and sintered, HIP = hot isostatically pressed.
Source: R.M. German.

Tabella 3.39: proprietà meccaniche per diverse tecnologie di produzione

$\sigma_{sn}\text{-TRAZIONE} = 785 \text{ MPa}$
$\sigma_R\text{-TRAZIONE} = 875 \text{ MPa}$
$\sigma_R\text{-COMPRESSIONE} = 3 * \sigma_R\text{-TRAZIONE} = 2625 \text{ MPa}$

Tabella 3.40: valori di resistenza della lega Ti6Al4V

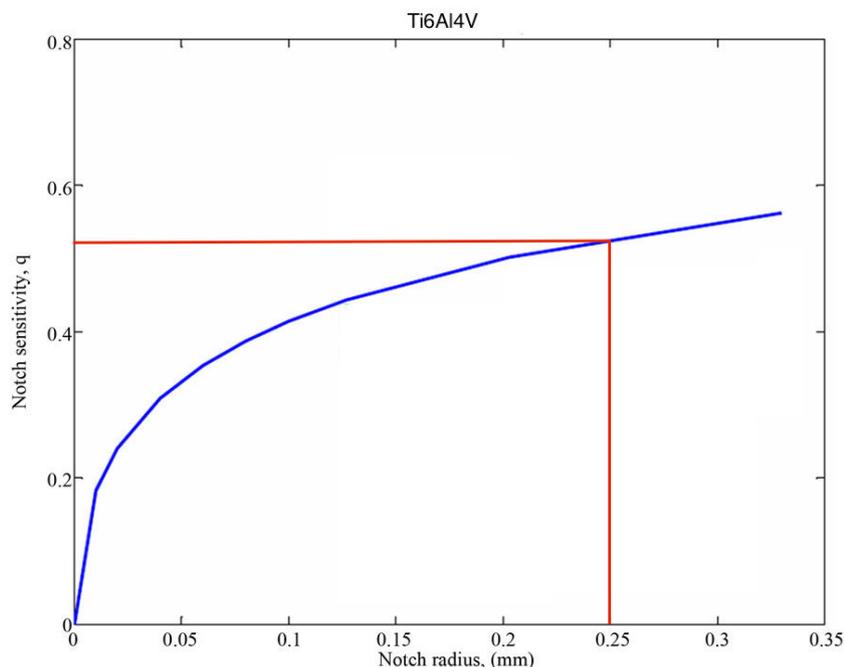


Fig. 3.23: sensibilità all'intaglio per le leghe di Ti6Al4V

Le leghe di titanio offrono un eccellente rapporto robustezza/peso, alta resistenza al creep e all'ossidazione. Sono robuste quanto l'acciaio, ma pari solo al 40% del suo peso e due volte più resistenti dell'alluminio, ma sono più pesanti del 60%. Si hanno le seguenti caratteristiche:

- Bassa densità e quindi notevole leggerezza: il suo peso specifico di circa $4.43\text{kg}/\text{dm}^3$ che lo rende particolarmente vantaggioso quanto ad efficienza;
- Elevato punto di fusione: $1604\text{-}1660^\circ\text{C}$, permette l'utilizzo a temperature particolarmente elevate;

- Basso modulo di Young: insieme ad un'elevata resistenza allo snervamento lo rende un materiale in grado di assorbire molta energia elastica;
- Bassa espansione termica: molto vicina e quindi compatibile a quella di vetri e ceramici;
- Buona trasmissione del calore: la bassa conducibilità termica del titanio potrebbe farlo ritenere non appropriato per lo scambio termico, tuttavia la sua alta resistenza alla corrosione e le sue elevate caratteristiche meccanico-strutturali, consentono di usare il metallo in spessori molto sottili, aumentando considerevolmente il trasferimento di calore;
- Eccellente resistenza alla corrosione: ciò dipende dalla capacità del titanio di ricoprirsi spontaneamente di un film passivo di biossido di titanio che presenta un'eccezionale resistenza alla corrosione.

Le caratteristiche meccaniche più importanti sono:

- Ottima resistenza specifica: data dal rapporto tra carico di rottura a trazione e densità. Tra i 200 e i 500°C è un fattore chiave per le applicazioni in campo aerospaziale;
- Buona resilienza: ovvero scarsa fragilità conseguente alla capacità del materiale di resistere agli impatti assorbendo l'energia che si sviluppa nell'urto;
- Buon carico di snervamento a trazione: misura il carico corrispondente ad un allungamento del 2% di un provino di materiale e varia in rapporto alla composizione chimica.

La scarsa lavorabilità del Ti6Al4V è legata alle stesse caratteristiche meccaniche che lo rendono molto interessante in campo aerospaziale. In particolare, l'elevata resistenza meccanica mantenuta anche alle elevate temperature e la bassissima conducibilità termica (6.7W/mK contro i 50W/mK dell'acciaio AISI 1045). Quest'ultima limita la lavorabilità delle leghe di titanio poiché il calore generato nella zona di taglio non viene efficacemente dissipato all'interno del materiale o attraverso il truciolo. La sua scarsa lavorabilità è anche legata all'elevata affinità chimica con la maggior parte dei materiali degli utensili e questo inconveniente viene favorito dalle elevate temperature di taglio che scaturiscono dai problemi di natura meccanica e termica. Questi problemi portano all'insorgere dell'usura di tipo abrasiva e adesiva e alla formazione di "built-up-edge" (BUE), cioè il tagliente di riporto, che è un cappuccio formato da strati di materiale in lavorazione sovrapposti, depositati in prossimità del tagliente dell'utensile durante un'operazione di taglio dei metalli. Sono inoltre materiali notevolmente sensibili a fenomeni di work-hardening (incrudimento). Il titanio, inoltre, produce un truciolo sottile e segmentato che si muove ad alta velocità sopra la superficie dell'utensile su una piccola zona di contatto. Il truciolo che si forma durante la lavorazione assume la forma a dente di sega e questo è dovuto al fatto che il materiale subisce un'elevata curvatura nella zona di deformazione primaria che provoca la dentellatura del truciolo. Il truciolo può presentarsi inoltre molto rammentato e questo è in parte dovuto alla fragilità del materiale. Come diretta conseguenza di ciò, si ha la nascita di vibrazioni meccaniche dovute alla fluttuazione delle forze di taglio. Sebbene quest'ultime siano confrontabili con quelle riscontrabili per gli acciai, le pressioni di contatto sono molto maggiori. Questo è dovuto alla piccola area di contatto tra truciolo e utensile e come conseguenza di ciò, si manifesta la formazione di profondi crateri di usura sul petto degli utensili. Il modulo elastico relativamente basso del titanio può indurre le parti snelle del componente in lavorazione a deformarsi maggiormente rispetto al caso dell'acciaio, provocando difficoltà nel mantenere le tolleranze e problemi causati dall'attrito con l'utensile.

	Microhardness [HV]	Young's modulus [GPa]	Poisson ratio
Ti-6Al-4V	380 ± 2.5	110 ± 2	0.321
WC-Co	1400 ± 15	610 ± 5	0.22
AlTiN	3490 ± 10	510 ± 3.5	0.25
Mean contact pressure P_m [MPa]	Uncoated (5 - 10 N)	Coated (5 - 10 N)	
		500 - 620	490 - 610
Maximum contact pressure P_o [MPa]	Uncoated (5 - 10 N)	Coated (5 - 10 N)	
		740 - 940	730 - 920

Tabella 3.41: microdurezza Vickers della lega Ti6Al4V

Di seguito vengono elencati i trattamenti termici più diffusi per la lega Ti6Al4V:

1. Distensione (stress relieving): trattamento per ridurre gli stress residui generati durante il processo di fabbricazione. Il processo di distensione favorisce il mantenimento della stabilità geometrica e distensionale del componente. Nelle leghe di titanio può avvenire utilizzando varie combinazioni di temperatura-tempo, ma la riduzione delle tensioni è sostanzialmente legata alla temperatura a cui viene eseguito il trattamento. Questa non deve modificare i risultati di precedenti trattamenti termici, così come la velocità di raffreddamento non deve generare nel materiale gradienti di temperatura eccessivi, che causerebbero a loro volta la formazione di nuovi stress.
2. Ricottura (annealing): nel campo delle tecnologie tradizionali è il trattamento che permette di ottenere le più efficienti combinazioni di duttilità, lavorabilità, stabilità dimensionale e strutturale. La ricottura in campo alfa+beta, invece, genera una struttura "bimodale" anche detta "duplex" costituita da grani equiassici di fase alfa primaria e da una struttura lamellare fine di fase alfa secondaria, riducendo al minimo la presenza e le dimensioni della fase alfa ai bordi grano della fase beta. La sequenza di operazioni, trattamenti termici e deformazioni plastiche, a cui viene sottoposto il materiale prima della ricottura influenza profondamente il risultato finale del trattamento. La struttura bimodale, rispetto a quella lamellare, induce un moderato incremento della resistenza a snervamento ed a fatica a basso numero di cicli ed un elevato aumento della duttilità. Questi incrementi sono dovuti alla microstruttura più fine, sia in termini di dimensioni delle lamelle che di colonie di lamelle ed alla sensibile diminuzione della presenza della fase alfa ai bordi grano che riduce sensibilmente la duttilità del materiale. La tenacità e la resistenza alla propagazione delle cricche risentono del percorso che queste devono seguire durante il loro sviluppo. La microstruttura duplex, essendo più fine rispetto alla microstruttura lamellare, non devierà in maniera apprezzabile le cricche durante il loro accrescimento e quindi i valori di tenacità del materiale saranno modesti.
3. Solubilizzazione ed invecchiamento: questo processo è utile ad incrementare la resistenza meccanica del materiale. Tramite l'invecchiamento si ottiene la formazione del precipitato di rinforzo Ti_3Al nella fase alfa, questa avverrà a temperature inferiori di quella di solubilizzazione del precipitato stesso, temperatura che per la lega Ti6Al4V vale 550°C. Da un punto di vista delle proprietà meccaniche, le particelle Ti_3Al determinano un incremento sostanziale della tensione di snervamento ed una riduzione della duttilità nel caso di strutture lamellari grossolane. Al contrario la tenacità a frattura e la resistenza alla propagazione delle cricche risultano più elevate per microstrutture grossolane rispetto a quelle fini poiché, a parità di altre condizioni, una microstruttura fine non devia il percorso della cricca durante il suo sviluppo, cosa che invece avviene quando la cricca deve superare i bordi di grosse colonie di lamelle o grosse lamelle.

4. Altri trattamenti: vi sono trattamenti atti ad ottimizzare particolari proprietà come la resistenza alla frattura, a fatica e al creep.

3.6.2 Additive Manufacturing

Il titanio grado 23 (Ti6Al4V ELI acronimo di Extra Low Interstitial - elementi interstiziali carbonio ossigeno azoto idrogeno che si inseriscono nel reticolo aumentando la fragilità del materiale con aumento delle proprietà meccaniche variabile con il loro quantitativo) mostra eccellenti proprietà meccaniche e di resistenza alla corrosione con basso peso specifico e biocompatibilità. Per avere materiale molto duttile e tenace è suggerito di ridurre il più possibile gli elementi interstiziali, proprio come è stato fatto per il titanio grado 23 che contiene il 6% alluminio, il 4% vanadio, il 0.13% (massimo) di ossigeno e titanio per il rimanente. Inoltre, rispetto al grado 5, il titanio grado 23 ha una migliore duttilità.

Powder description	Titanium alloy powder
Layer thickness	30 μm and 60 μm
Laser power	200 W
Additive manufacturing system	AM250

Tabella 3.42: specifiche di processo per il Ti6Al4V

Density	4.42 g/cm ³
Thermal conductivity	6 W/mK to 8 W/mK
Melting range	1635 °C to 1665 °C
Coefficient of thermal expansion (see note 1)	$8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ to $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Tabella 3.43: dati generali per il Ti6Al4V lavorato

Questi dati sono validi nella gamma tra 0 e 100°C. Il materiale è ricotto a $850 \pm 10^\circ\text{C}$ per 2h. È testato a temperatura ambiente secondo ASTM E8 e viene lavorato prima di effettuare il test. È testato secondo la ASTM E384-11, dopo la lucidatura. Infine, è testato secondo JIS B 0601-2001 (ISO 97), dopo la sabbiatura con microsferi e si ha l'HIP.

Element	Mass (%)
Titanium	Balance
Aluminium	5.50 to 6.50
Vanadium	3.50 to 4.50
Iron	≤ 0.25
Oxygen	≤ 0.13
Carbon	≤ 0.08
Nitrogen	≤ 0.05
Hydrogen	≤ 0.012
Yttrium	≤ 0.005
Residuals	≤ 0.10 each, ≤ 0.40 total

*ASTM standard composition powder. Renishaw powders are supplied to a tighter specification to minimise batch-to-batch variations. Results quoted in this data sheet are from samples produced using Renishaw's tighter specification powder. Please contact Renishaw for further information about specifications or if you require support in qualifying non-Renishaw powders.

Tabella 3.44: composizione chimica della polvere per il Ti6Al4V

	Heat treated (See note 2)		HIP treated (see note 6)	
	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)
Ultimate tensile strength (UTS) (See note 3)				
Horizontal direction (XY)	1089 MPa	7 MPa	1033 MPa	4 MPa
Vertical direction (Z)	1085 MPa	12 MPa	1034 MPa	7 MPa
Yield strength (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	1007 MPa	5 MPa	947 MPa	4 MPa
Vertical direction (Z)	985 MPa	23 MPa	923 MPa	21 MPa
Elongation at break (See note 3)				
Horizontal direction (XY)	16%	1%	16%	1%
Vertical direction (Z)	14%	1%	17%	1%
Modulus of elasticity (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	129 GPa	7 GPa	127 GPa	3 GPa
Vertical direction (Z)	126 GPa	15 GPa	125 GPa	4 GPa
Hardness (Vickers) (see note 4)				
Horizontal direction (XY)	368 HV0.5	10 HV0.5	352 HV0.5	9 HV0.5
Vertical direction (Z)	372 HV0.5	7 HV0.5	360 HV0.5	7 HV0.5
Surface roughness (R_a) (See note 5)				
Horizontal direction (XY)	4 μm to 6 μm			
Vertical direction (Z)	4 μm to 7 μm			

Density of additively manufactured Ti6Al4V is typically 99.8%, measured optically on a 10 mm \times 10 mm \times 10 mm sample at 75 \times magnification.

Tabella 3.45: proprietà meccaniche con spessore di 30 μm

	Heat treated (see note 2)		HIP treated (see note 6)	
	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)
Ultimate tensile strength (UTS) (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	1091 MPa	6 MPa	1052 MPa	3 MPa
Vertical direction (Z)	1084 MPa	8 MPa	1058 MPa	9 MPa
Yield strength (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	1020 MPa	25 MPa	957 MPa	2 MPa
Vertical direction (Z)	987 MPa	22 MPa	973 MPa	24 MPa
Elongation at break (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	16%	1%	16%	1%
Vertical direction (Z)	17%	1%	18%	1%
Modulus of elasticity (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	132 GPa	9 GPa	127 GPa	3 GPa
Vertical direction (Z)	128 GPa	7 GPa	131 GPa	6 GPa
Hardness (Vickers) (see note 4)				
Horizontal direction (XY)	363 HV0.5	11 HV0.5	361 HV0.5	7 HV0.5
Vertical direction (Z)	363 HV0.5	13 HV0.5	360 HV0.5	10 HV0.5
Surface roughness (R_a) (see note 5)				
Horizontal direction (XY)	3 μm to 4 μm			
Vertical direction (Z)	5 μm to 7 μm			

Density of additively manufactured Ti6Al4V is typically 99.8%, measured optically on a 10 mm \times 10 mm \times 10 mm sample at 75 \times magnification.

Tabella 3.46: proprietà meccaniche con spessore di 60 μm

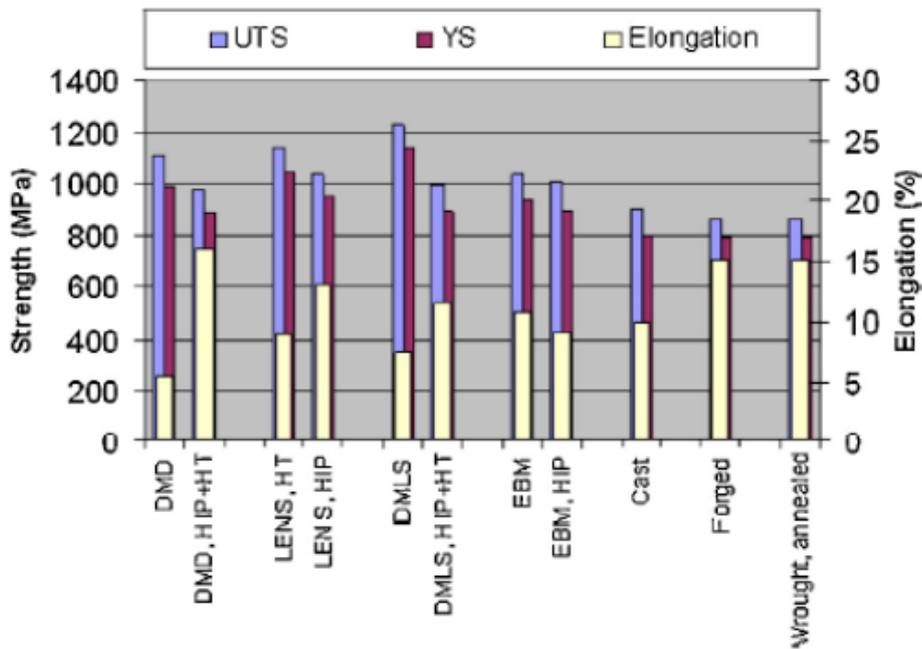


Fig. 3.24: carico a rottura, a snervamento e allungamento a rottura per diversi processi produttivi

	BULK	EBM	SLM		
E [GPa]	104±2	E [GPa]	118±5	E [GPa]	112±2
Rp0.2 [MPa]	790±17	Rp0.2 [MPa]	830±7	Rp0.2 [MPa]	1005±7
UTS [MPa]	872±7	UTS [MPa]	914±10	UTS [MPa]	1166±3
ε [%]	18,1±0,8	ε [%]	13,1±0,4	ε [%]	8,9±0,2
fat lim. 50% [MPa]	445±7	fat lim. 50% [MPa]	391±21	fat lim. 50% [MPa]	381±27

Tabella 3.47: confronto tra le proprietà del Ti6Al4V realizzate con diverse tecnologie

La durezza di entrambi i campioni sottoposti ad LBM ed EBM è circa il 25% superiore a quella relativa allo stesso materiale ottenuto mediante metodi tradizionali, tuttavia, quella del prodotto ottenuto per EBM, utilizzando la prova Rockwell C, è leggermente inferiore alla durezza ottenuta dal prodotto lavorato con SLM: 33HRC contro il 34HRC. Ciò si riflette anche nei dati di proprietà meccaniche in cui sia la tensione di snervamento che UTS sono approssimativamente superiori dell'11% per il campione sviluppato mediante SLM rispetto all'EBM. L'allungamento, sia per EBM che per LBM (SLM), è differente di circa 4-5% rispetto ai prodotti forgiati.

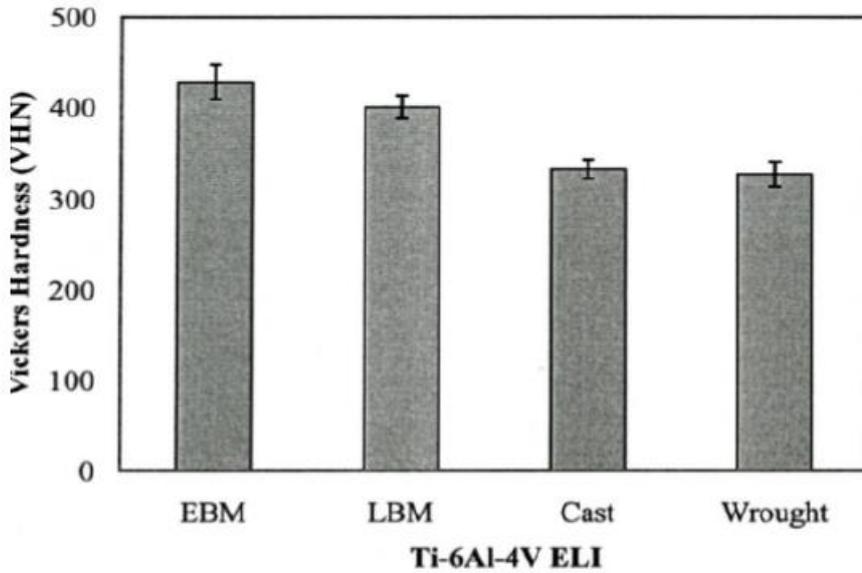


Fig. 3.25: microdurezza relativa ai vari processi

Inoltre, si osserva che ci sono tre differenze tra il campione di Ti6Al4V ottenuto mediante SLS e quello ottenuto mediante metodi tradizionali:

1. Il modulo di Young del materiale lavorato tramite AM ha un valore leggermente inferiore, causato dalla composizione microstrutturale dello stesso;
2. Maggior valore di UTS dovuto al rapido raffreddamento, che accomuna tutti i materiali lavorati mediante selective laser melting, il quale porta ad una microstruttura più fine;
3. A causa della struttura lamellare sottile, l'allungamento risulta molto minore rispetto al materiale di riferimento.

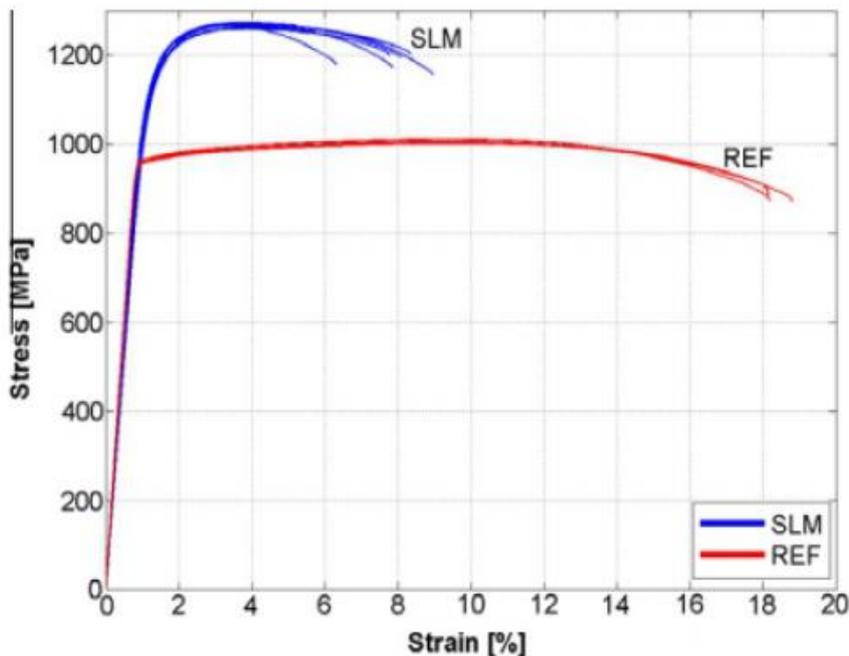


Fig. 3.26: confronto tra i metodi standard e SLM

	E (GPa)	σ_y (MPa)	UTS (MPa)	$\epsilon_{fracture}$ (%)
SLM	109.2 ± 3.1	1110 ± 9	1267 ± 5	7.28 ± 1.12
Reference	120.2 ± 1.9	960 ± 10	1006 ± 10	18.37 ± 0.88

Tabella 3.48: differenze tra SLM e metodo standard per Ti6Al4V

Tutti i dati sopra esposti si riferiscono a materiali non trattati termicamente. Se si eseguono dei trattamenti termici sui componenti in esame si trovano alcune importanti informazioni: confrontando la duttilità del materiale di riferimento e quello in SLS, si nota che l'allungamento del secondo aumenta con l'aumentare della temperatura massima raggiunta, mentre il materiale di riferimento perde fino all'86% della sua capacità di deformarsi a causa del trattamento termico. Questo causa la rapida formazione di cricche e rotture precoci del materiale. La "spaziatura" lamellare è determinata invece dalla velocità di raffreddamento: con velocità di raffreddamento più elevate deriva una minor distanza tra le lamelle; si è quindi capito che ciò che influenza il comportamento del materiale, è in buona parte la temperatura massima che si raggiunge nel trattamento termico. Con l'aumento della temperatura massima, σ_y ed UTS, così come l'allungamento aumentano. Nel complesso i risultati migliori si ottengono dopo 2h a 850°C, seguiti poi da un raffreddamento in forno, oppure 1h a 940°C, con un raffreddamento successivo in aria e tempra per 2h a 650°C seguita anch'essa dal raffreddamento in aria. I risultati, per tutte le proprietà, sono ben al di sopra rispetto agli standard ASTM per forgiati (ASTM F1472).

I metalli hanno una tendenza generale ad ammorbidirsi con l'aumentare della temperatura e non fa eccezione il Ti6Al4V. Il modulo di Young decresce drasticamente con la temperatura. La sensibilità alla velocità di deformazione si osserva anche nelle curve sforzo-deformazione.

Property	Notation	Value (typical range)	Comments
Poisson's ratio	ν	0,33	
Modulus of elasticity (Young's modulus)	E	106-146* GPa	*highest value obtained when α -deformation texture, test direction parallel to high density of basal poles
Yield strength	σ_y	895-1250 MPa	Variation by more than 200 MPa by heat treatment, Oxygen content or texture direction
Elongation to failure	ϵ_f	13-16 %	Indicator for the material ductility or its ability to be deformed
Fracture toughness	K_{Ic}	40-100 MPa(m ^{1/2})	

Tabella 3.49: proprietà meccaniche per Ti6Al4V

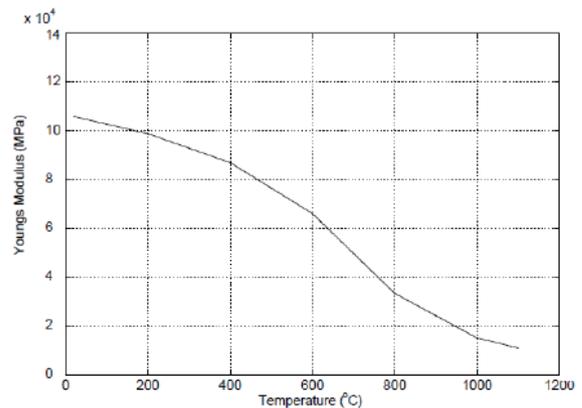


Fig. 3.27: modulo di Young in funzione della temperatura

Inoltre, si riportano anche le curve sforzo-deformazione per le prove a compressione a caldo di Ti6Al4V da 20 a 900°C, con una velocità di deformazione di 0.001s⁻¹, 0.01s⁻¹ e 1s⁻¹:

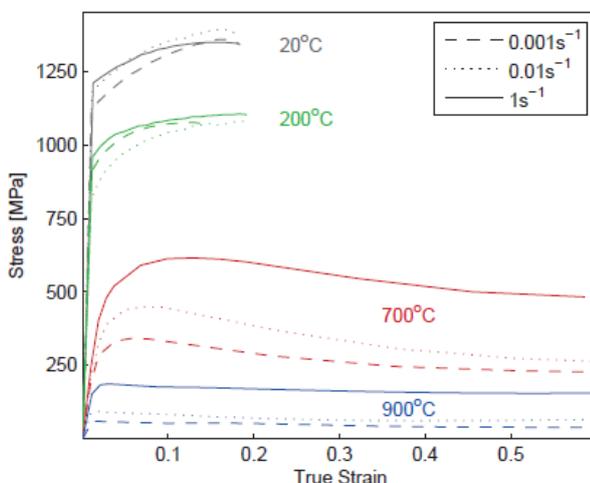


Fig. 3.28: curve sforzo-deformazione per le prove a compressione a caldo con diverse velocità di deformazione

Ad oggi esistono diverse tecnologie AM che processano questa lega; esse hanno in comune la realizzazione del componente strato per strato utilizzando una sorgente energetica, un laser o un fascio di elettroni, che

fonde il materiale realizzando la geometria desiderata. Ogni combinazione dei parametri legati alla sorgente energetica e al materiale creano una specifica storia termica che genera a sua volta una particolare microstruttura e specifiche proprietà meccaniche.

Various AM technologies for processing of titanium and its alloys.			
AM category	Technology	Company	Description
Directed Energy Deposition (DED)	Direct Metal Deposition (DMD)	DM3D Technology LLC (Formerly POM Group)	Uses laser and metal powder for melting and depositing using a patented close loop process
	Laser Engineered Net Shaping (LENS) Direct Manufacturing (DM)	Optomec, Inc. Sciaky, Inc.	Uses laser and metal powder for melting and depositing
	Shaped Metal Deposition or Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)	Not commercialized yet (patented by Rolls Royce Plc.)	Uses electric arc and metal wire for melting and depositing
Powder Bed Fusion (PBF)	Selective Laser Sintering (SLS)	3D Systems Corp. (acquired Phenix Systems)	Uses laser and metal powder for sintering and bonding
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	EOS GmbH	Uses laser and metal powder for sintering, melting and bonding
	Laser Melting (LM)	Renishaw Inc.	Uses laser and metal powder for melting and bonding
	Selective Laser Melting (SLM)	SLM Solutions GmbH	Uses laser and metal powder for melting and bonding
	LaserCUSING	Concept Laser GmbH	Uses laser and metal powder for melting and bonding
	Electron Beam Melting (EBM)	Arcam AB	Uses electron beam and metal powder for melting and bonding

Tabella 3.50: principali tecnologie additive per il Ti6Al4V

La limitazione dell'utilizzo di questa lega è legata all'elevata reattività del titanio. Il vero problema è quindi possedere delle macchine che garantiscano al titanio di non ossidarsi. Queste sono le ragioni per cui la lega è stata utilizzata maggiormente nelle tecniche PBF (Powder Bed Deposition), SLM ed EBM e in maniera ridotta nella DED. I processi PBF permettono, infatti, di avere un controllo maggiore sulle condizioni di lavoro, processando il materiale in atmosfera controllata (SLM) o sottovuoto (EBM). Negli ultimi anni si stanno, comunque, valutando condizioni di lavoro che assicurino sempre di più che il titanio non venga a contatto con l'ossigeno in atmosfera, anche nei processi DED. In particolare, l'esigenza di estendere l'utilizzo della lega nei processi DED è giustificata dal fatto che questa tecnologia permette di impiegare il materiale anche per le riparazioni. Poiché questa lega è utilizzata maggiormente nel campo aerospaziale, ad esempio nella realizzazione delle parti rotanti delle turbine, risulta conveniente intervenire nelle zone danneggiate e non produrre ex novo la paletta.

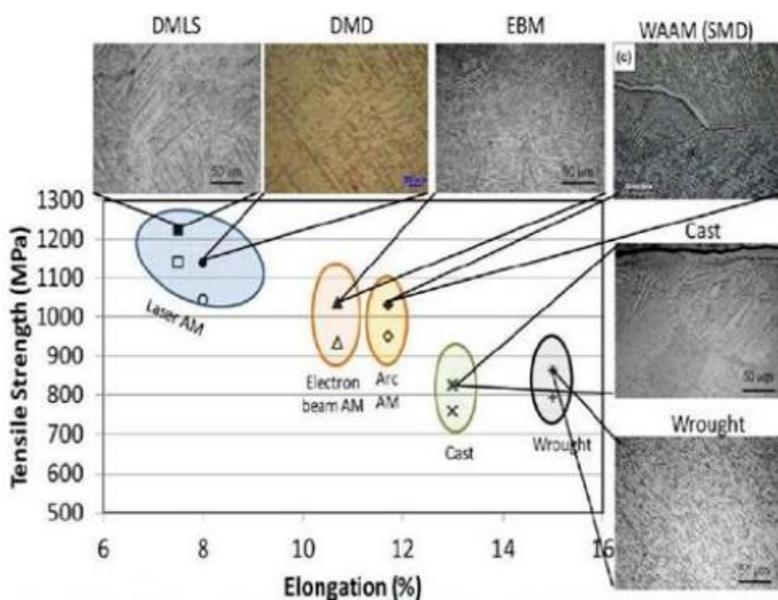


Fig. 3.29: comportamento meccanico per diversi processi a temperatura ambiente

I moduli di elasticità e la rigidità aumentano con l'incremento del contenuto di Al e con la temperatura di ricottura; tuttavia, entrambi decrescono con l'aumento della temperatura. I valori di resistenza a trazione, compressione e tenacità a frattura sono inferiori ai migliori acciai, ma superiori alle leghe di magnesio e alluminio; tuttavia, la densità è circa la metà rispetto agli acciai e pertanto i valori specifici sono competitivi. La lega viene utilizzata ad alte temperature, ma sono necessari trattamenti termici per non avere perdite di efficienza delle proprietà meccaniche. Per quanto riguarda le proprietà termiche, la lega presenta valori molto bassi di conducibilità termica e questo influisce in tutte le lavorazioni e applicazioni che inducono forti gradienti termici. Infatti, inibisce la trasmissione di calore poiché viene accumulato anziché disperso nell'atmosfera circostante. Il coefficiente lineare di espansione termica a 35°C per le leghe alfa e alfa-beta è di $9.5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Un'altra caratteristica di interesse della lega è la resistenza alla corrosione dovuta alla formazione di uno strato di ossido di Ti passivante (TiO_2). Questo è possibile grazie all'elevata reattività del metallo verso l'ossigeno anche in ambienti acidi molto aggressivi come l'ambiente marino, acidi di cloro. Ad alte temperature la resistenza a corrosione decade a causa della dissoluzione dello strato passivante oltre i 400°C sostituito da un multistrato poroso non protettivo. Se la corrosione interessa completamente la gran parte di una superficie si ha corrosione generalizzata o uniforme, mentre se interessa solo alcune zone si ha corrosione localizzata. La corrosione uniforme è facile sia da misurare che da prevedere, comporta un assottigliamento del materiale, ma le rotture catastrofiche dovute all'attacco distruttivo sono molto rare. Una delle forme di corrosione localizzata più comune è il pitting; questo consiste nella formazione di buchi o cavità nel materiale a causa del contatto con un ambiente aggressivo. È considerato come una tipologia di corrosione difficile da rilevare e prevedere infatti è possibile che i pits (fori) vengano ricoperti da prodotti di corrosione. Un altro meccanismo da considerare è la corrosione galvanica: si manifesta quando due materiali con nobiltà diversa o due parti dello stesso materiale esposte a condizioni differenti, sono in contatto in presenza di un elettrolita.

In generale, insieme al TiO_2 sono presenti anche altri due ossidi, TiO e Ti_2O_3 , anche se in quantità molto inferiori rispetto al primo. La principale differenza tra i tre ossidi del titanio sopracitati consiste nel fatto che il TiO_2 presenta un carattere prevalentemente cristallino, quindi migliora la prestazione offerta dallo strato passivante; gli altri elementi costituenti la lega non influenzano la passività del materiale. Pochi studi sono stati condotti riguardo il confronto tra la resistenza a corrosione del Ti6Al4V prodotto per casting e per Electron Beam Melting, ancora meno studi considerano le eventuali differenze nel comportamento tra due piani con orientazioni diverse rispetto alla direzione di crescita nel caso della produzione per EBM. Inoltre, in alcuni casi, i risultati ottenuti dalle prove sperimentali si sono rivelati discordi, così come raramente viene accennata l'orientazione della superficie considerata rispetto all'asse di realizzazione del componente EBM. Questo perché l'additive manufacturing racchiude un insieme di tecnologie recenti e continuamente in fase di sviluppo.

A causa degli elevati gradienti termici i campioni sottoposti ad AM sono inclini a significative tensioni residue che possono cambiare la resistenza a fatica. Si è visto che due campioni ottenuti dal processo PBF laser, presentano valori di tensione residue a trazione di 410 e 550MPa sulla superficie; 0 e 200MPa a 200 μm sotto la superficie. I valori precisi dipendevano dalla forma del campione e dalla posizione di misurazione, cioè nella parte superiore o inferiore del provino stesso. Come per i materiali prodotti con metodi tradizionali, ci sono però trattamenti termici in grado di rimuovere queste tensioni residue, ad esempio 2h a 800°C. Rispetto al processo PBF laser, il processo PBF electron beam dovrebbe creare meno tensioni residue, grazie al lento raffreddamento della camera di generazione. Un tema importante, è che i parametri di lavorazione possono avere un impatto significativo sulla distribuzione delle tensioni residue, che spesso si avvicinano alla tensione di snervamento. In ultima analisi, esse possono avere una frazione significativa del limite di snervamento dei campioni sottoposti ad AM, soprattutto in prossimità delle

superfici: il segno, la grandezza delle sollecitazioni e la loro distribuzione è probabile che dipendano dalla posizione, dalle dimensioni e dalla geometria.

Tra i dati a fatica nella fabbricazione tradizionale di Ti6Al4V si osserva che lo scarso rendimento e l'accelerata crescita della cricca possono essere attribuiti a dei difetti di porosità. Il difetto iniziale che portava poi alla cricca, variava da 20µm a 1.2mm ed è stato attribuito al processo di fusione. In generale, i difetti più grandi sono più dannosi per le prestazioni a fatica, tuttavia i maggiori difetti non sono sempre responsabili della rottura del campione, il che suggerisce che fattori al di fuori della dimensione del difetto, svolgono un ruolo importante nella formazione della cricca a fatica: la vicinanza del difetto ad altri difetti, la superficie e grani grossi favorevolmente allineati. Un approccio comune per eliminare i difetti di porosità nel prodotto ottenuto da processi di fonderia è il sottoporre il materiale ad alta pressione e ad una temperatura elevata, per esempio il processo HIP.

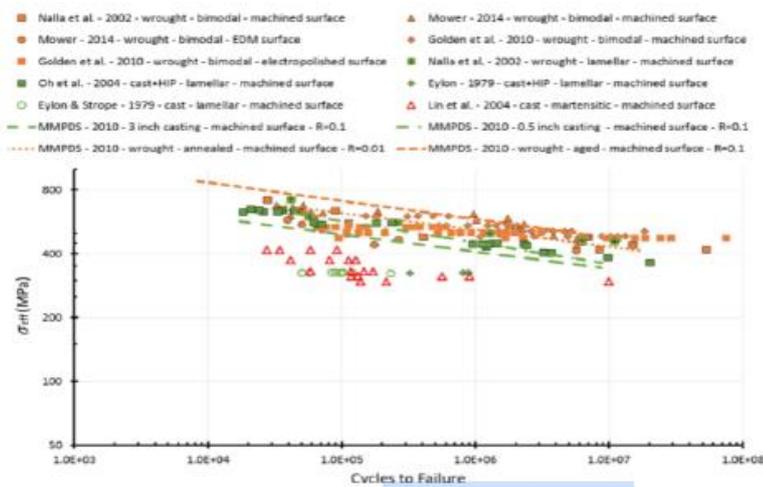


Fig. 3.30: analisi a fatica correlata alla presenza dei difetti

La maggior parte dei dati sulle prestazioni a fatica AM sono stati pubblicati per il processo PBF laser. Supponendo che l'effetto del coefficiente di rapporto R sia contabilizzato utilizzando σ_{eff} e che gli effetti di variazione di forme e dimensioni dei campioni siano trascurabili, si ottiene il seguente grafico:

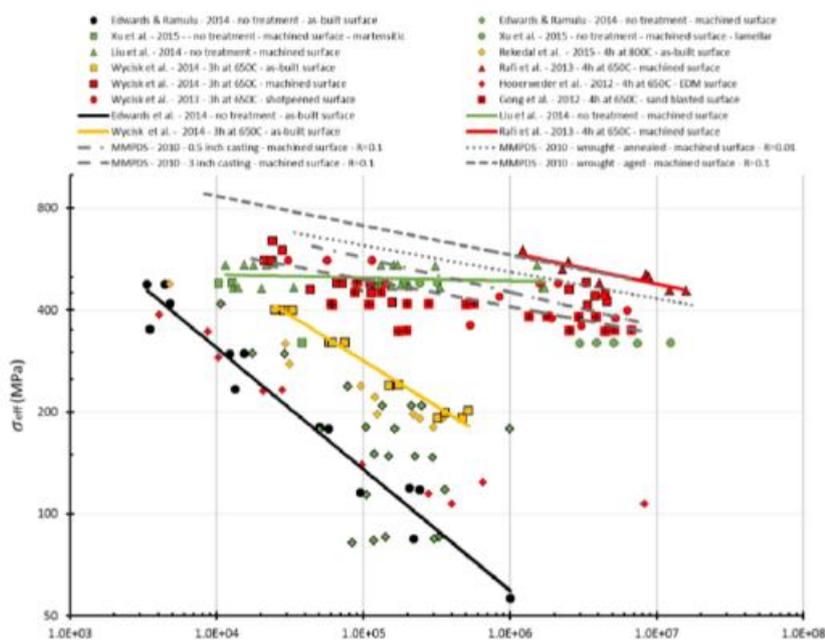


Fig. 3.31: analisi della vita a fatica per il processo PBF laser

I simboli neri identificano che non c'è stato nessun trattamento termico e la superficie è grezza; quelli verdi che non c'è stato nessun trattamento termico e che la superficie è lavorata; i simboli gialli determinano un trattamento termico e superficie grezza, mentre quelli rossi che c'è stato il trattamento termico e la superficie è stata lavorata. Nei campioni in cui è stato fatto un trattamento termico, si osserva che le performance a fatica sono peggiori se si è lungo la direzione del trattamento termico, piuttosto che perpendicolari ed inoltre si nota che il suo effetto è maggiore nei componenti lucidati e/o lavorati rispetto a quelli grezzi.

Nel caso dell'electron beam PBF i provini con la superficie grezza hanno prestazioni simili alla peggiore ottenuta mediante laser PBF, mentre i campioni sottoposti a trattamento termico superficiale (e pallinatura) hanno fornito risultati migliori, ma ancora inferiori al prodotto grezzo. Le analisi dei campioni hanno mostrato la nucleazione delle crepe da difetti in tutti i casi, ma senza aver tentato di classificare la popolazione dei difetti. Le prestazioni a fatica possono essere migliorate dal trattamento HIP, con prestazioni simili al prodotto grezzo.

3.7 Inconel 625

3.7.1 Metodi standard

L'Inconel 625 è una lega di nichel diffusamente impiegata in ragione di un buon compromesso tra proprietà meccaniche e resistenza alla corrosione. Le guarnizioni in Inconel 625, per le quali il mercato spesso impone un limite massimo di durezza di 180HB, sono generalmente prodotte tramite il processo di forgiatura. Questo processo conferisce al materiale durezza molto vicine o addirittura superiori al limite massimo imposto dalle specifiche, rendendo spesso necessario un opportuno trattamento termico per ottenere valori accettabili. La colata centrifuga è l'unico processo fusorio accettato in alternativa alla forgiatura. Questo è giustificato dall'elevata qualità dei prodotti ottenuti con questa tecnologia rispetto ad una più tradizionale.

Nickel	58.0 min.
Chromium	20.0-23.0
Iron	5.0 max.
Molybdenum	8.0-10.0
Niobium (plus Tantalum)	3.15-4.15
Carbon	0.10 max.
Manganese	0.50 max.
Silicon	0.50 max.
Phosphorus	0.015 max.
Sulfur	0.015 max.
Aluminum	0.40 max.
Titanium	0.40 max.
Cobalt	1.0 max.

Tabella 3.51: composizione chimica per Inconel 625

La resistenza dell'Inconel 625 deriva dall'effetto irrigidente del molibdeno e del niobio nella sua matrice di nichel-cromo, cosicché i trattamenti di indurimento non sono necessari. Questa combinazione di elementi è responsabile di una maggiore resistenza per un'ampia gamma di ambienti corrosivi di inconsueta severità come pure di effetti di alta temperatura come l'ossidazione e la carburizzazione. Per le sue caratteristiche di resistenza a rottura, al creep, allo snervamento, notevole resistenza a fatica e a fatica termica risulta essere eccellente per applicazioni aerospaziali.

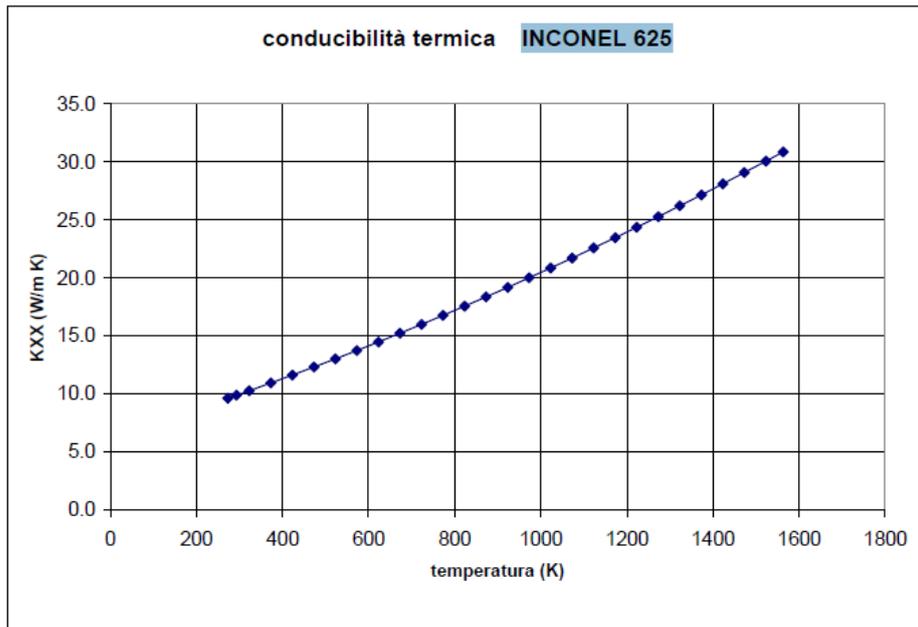


Fig. 3.32: andamento della conducibilità termica in relazione con la temperatura

T (°C)	T (K)	conducibilità termica (W/m K)
0	273	9.6400
100	373	10.9580
200	473	12.3300
300	573	13.7580
400	673	15.2420
500	773	16.7800
600	873	18.3740
700	973	20.0220
750	1023	20.8680
800	1073	21.7260
850	1123	22.5990
900	1173	23.4860
950	1223	24.3860
1000	1273	25.3000
1050	1323	26.2280
1100	1373	27.1700
1150	1423	28.1250
1200	1473	29.0940
1250	1523	30.0780
1290	1563	30.8740

Tabella 3.52: relazione tra conducibilità termica e temperatura

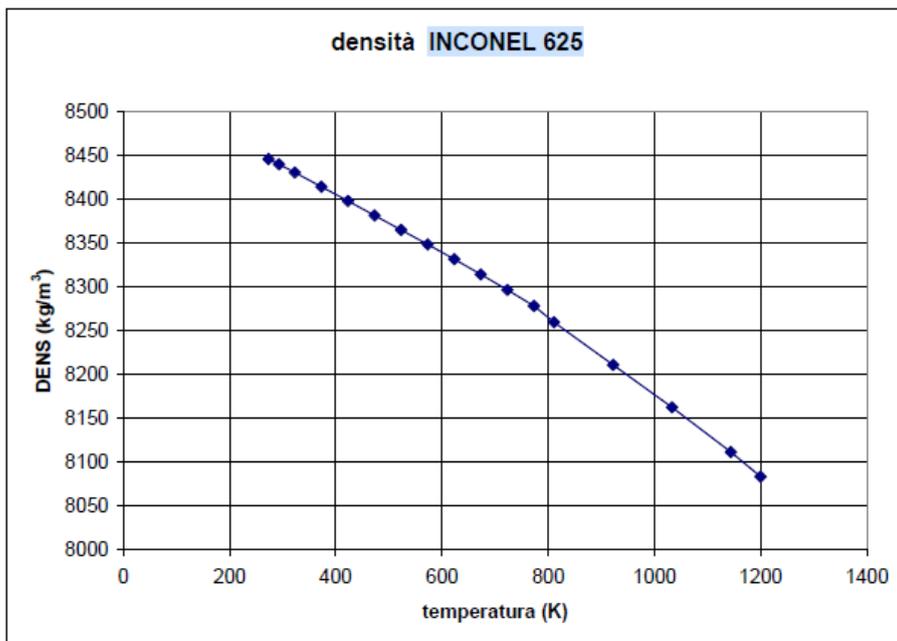


Fig. 3.33: andamento della densità in relazione con la temperatura

T (°C)	T (K)	densità (kg/m³)
0	273	8446.0
20	293	8440.0
50	323	8430.7
100	373	8414.6
150	423	8398.3
200	473	8381.8
250	523	8365.3
300	573	8348.7
350	623	8331.9
400	673	8314.6
450	723	8296.9
500	773	8278.6
538	811	8259.9
649	922	8211.3
760	1033	8162.7
871	1144	8111.9
927	1200	8083.8

Tabella 3.53: relazione tra densità e temperatura

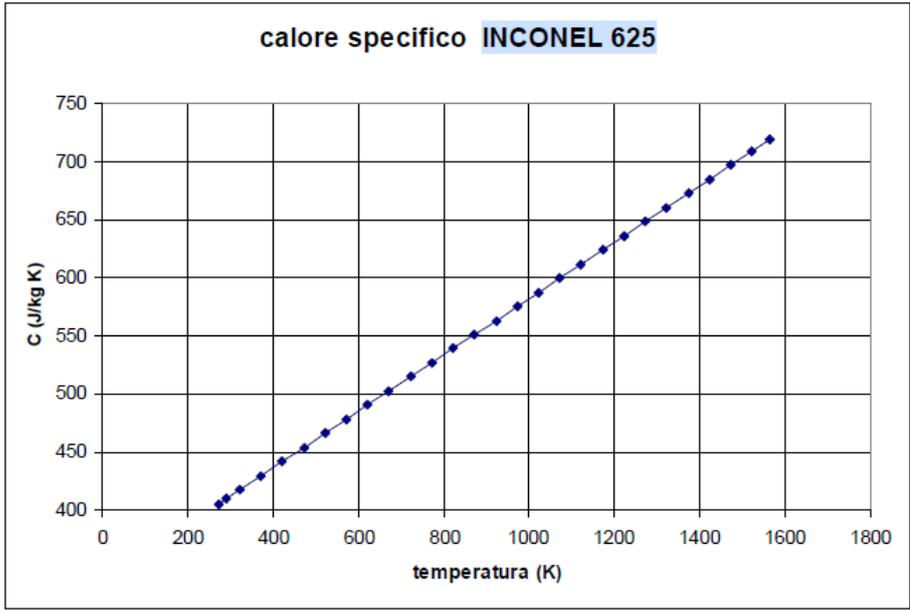


Fig. 3.34: andamento del calore specifico in relazione con la temperatura

T (°C)	T (K)	calore specifico (J/kg K)
0	273	405.50
100	373	429.80
200	473	454.10
300	573	478.40
400	673	502.70
500	773	527.00
600	873	551.30
700	973	575.60
800	1073	599.90
850	1123	612.05
900	1173	624.20
950	1223	636.35
1000	1273	648.50
1050	1323	660.65
1100	1373	672.80
1150	1423	684.95
1200	1473	697.10
1250	1523	709.25
1290	1563	718.97
1350	1623	718.97
1450	1723	718.97

Tabella 3.54: relazione tra calore specifico e temperatura

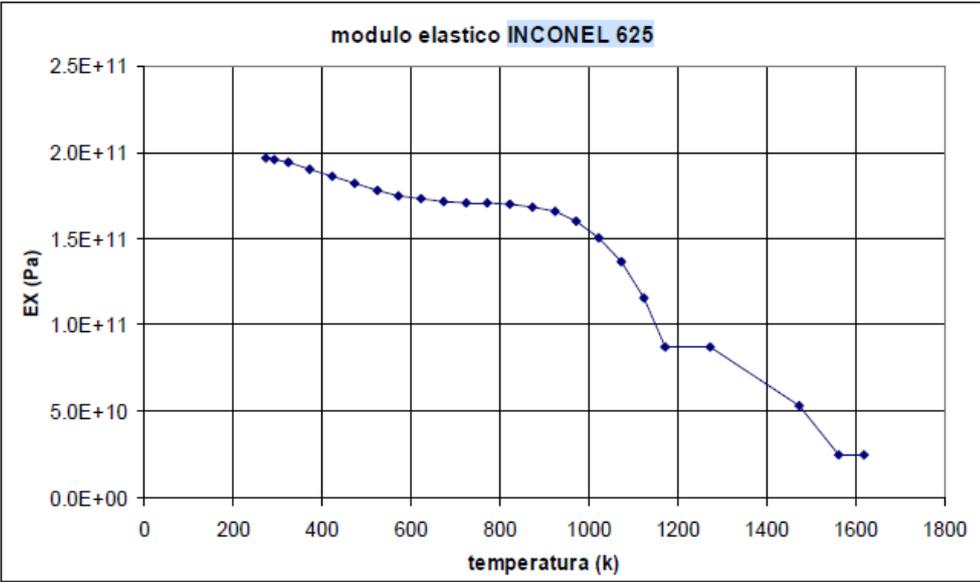


Fig. 3.35: relazione tra modulo elastico e temperatura

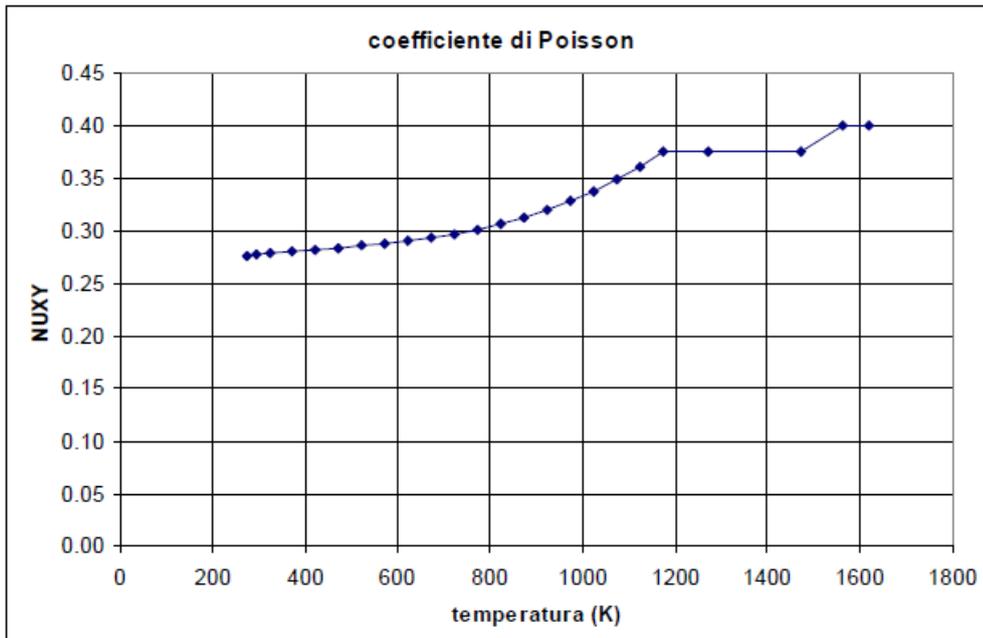


Fig. 3.36: relazione tra coefficiente di Poisson e temperatura

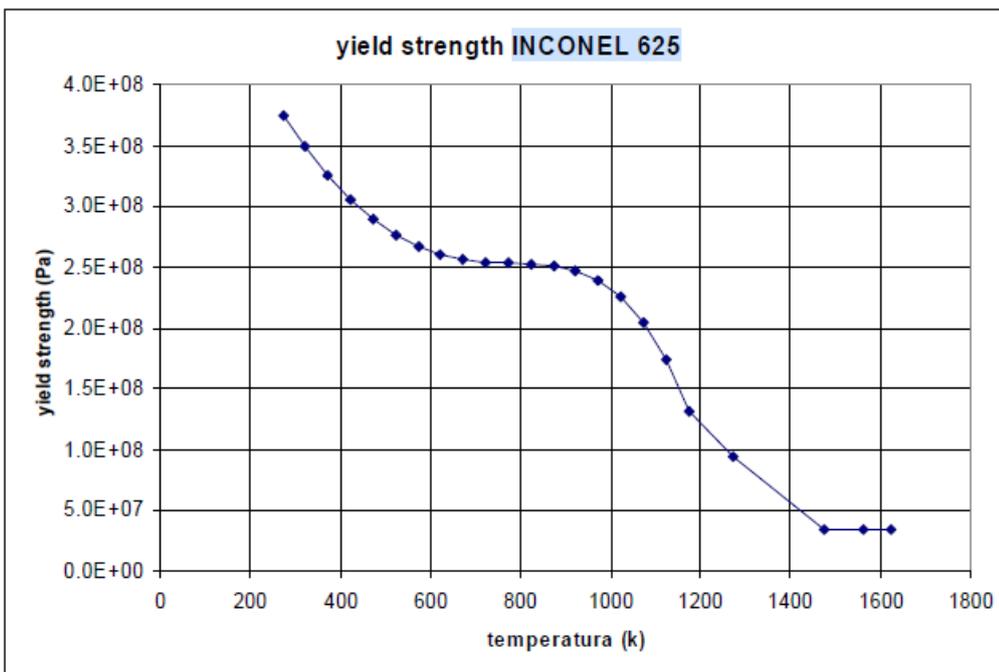


Fig. 3.37: relazione tra tensione di snervamento e temperatura

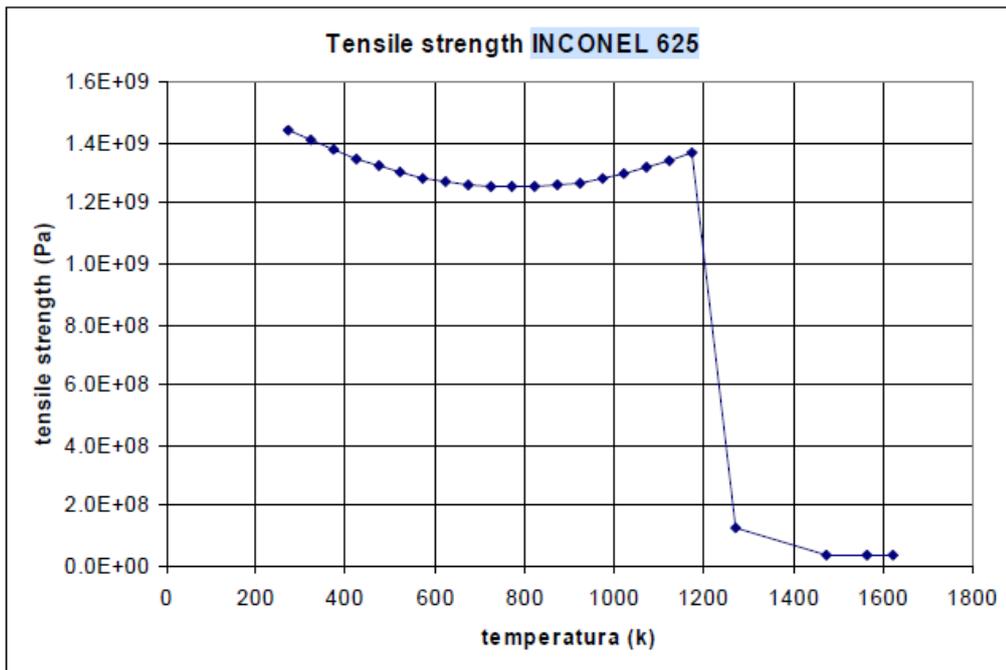


Fig. 3.38: relazione tra carico di rottura e temperatura

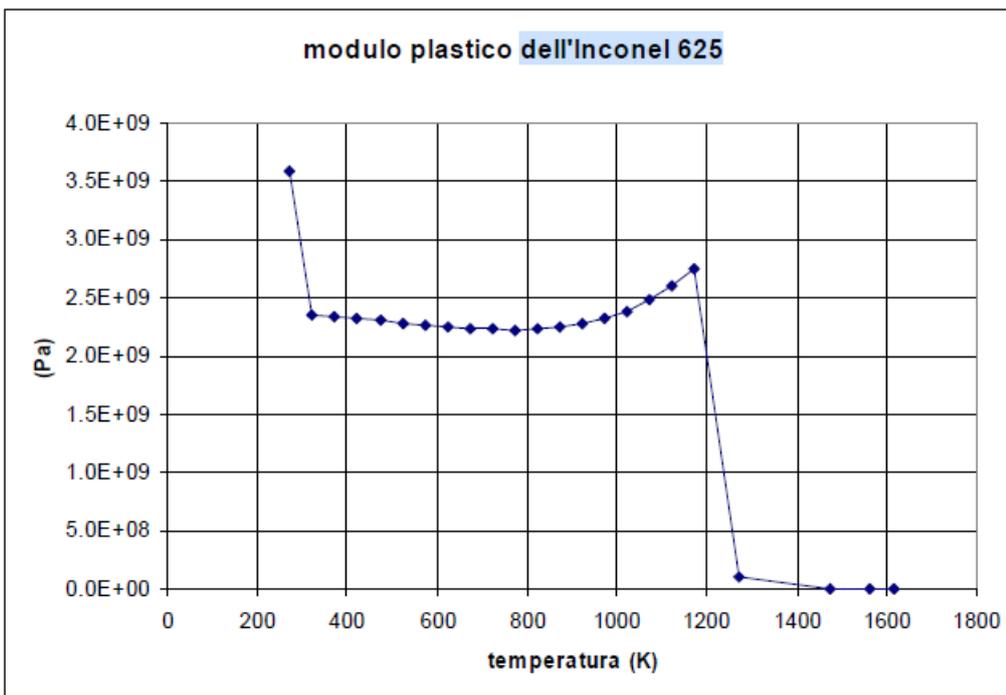


Fig. 3.39: relazione tra modulo plastico e temperatura

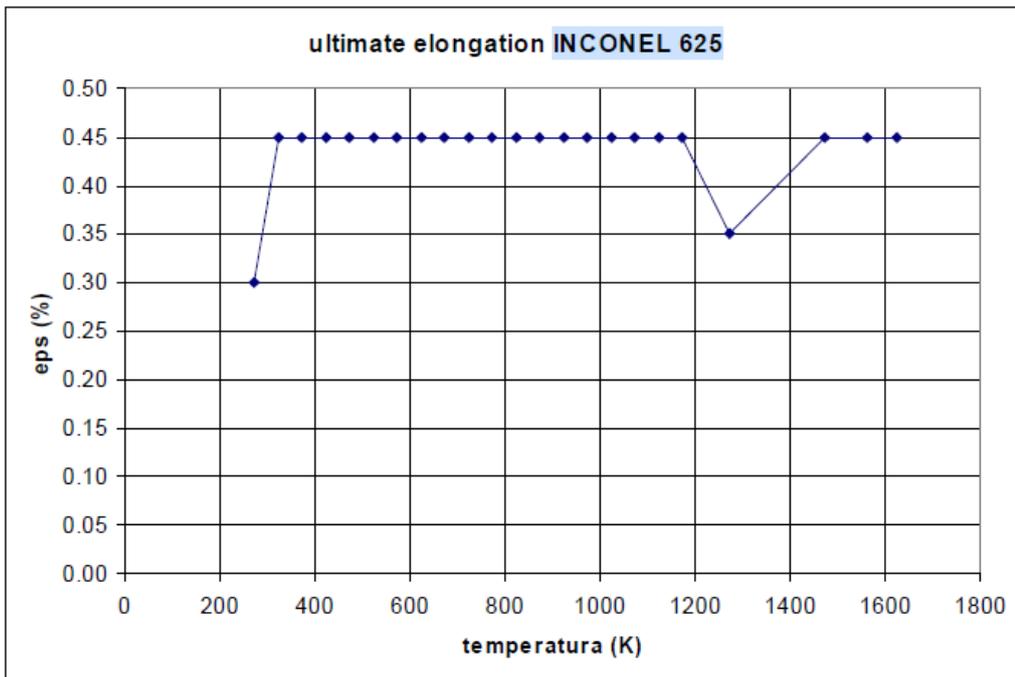


Fig. 3.40: relazione tra allungamento a rottura e temperatura

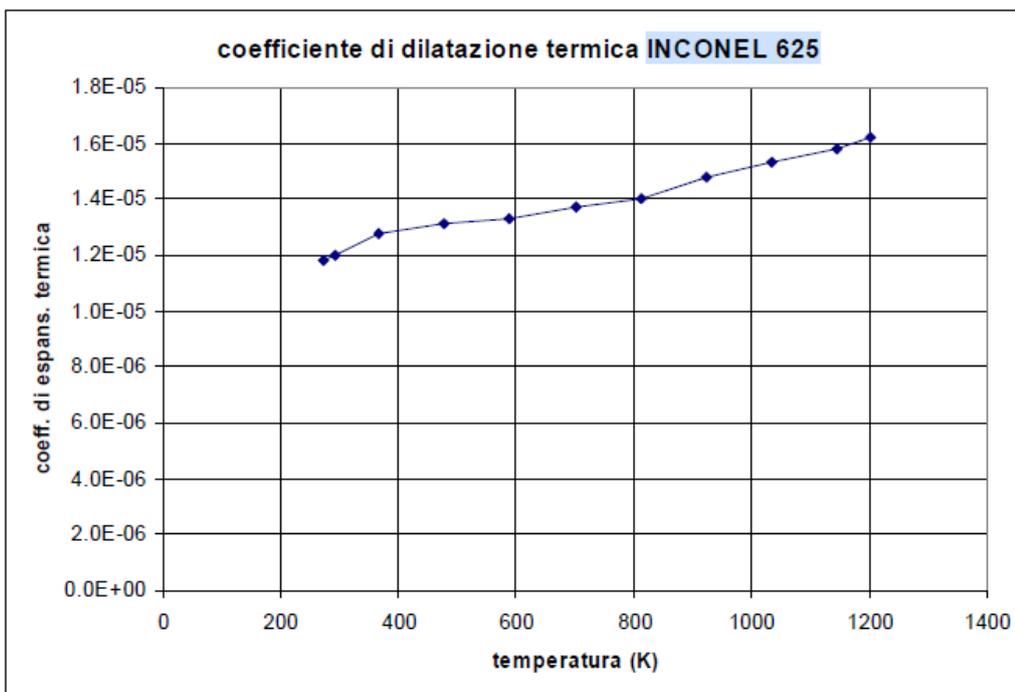


Fig. 3.41: relazione tra coefficiente di dilatazione termica e temperatura

Le condizioni relative all'analisi strutturale sono sostanzialmente valide sia per il laser che per il TIG. I modelli sono geometricamente identici. Per modellare il comportamento del materiale si è scelto di assegnare le curve sigma-epsilon bilineari per ogni valore di temperatura.

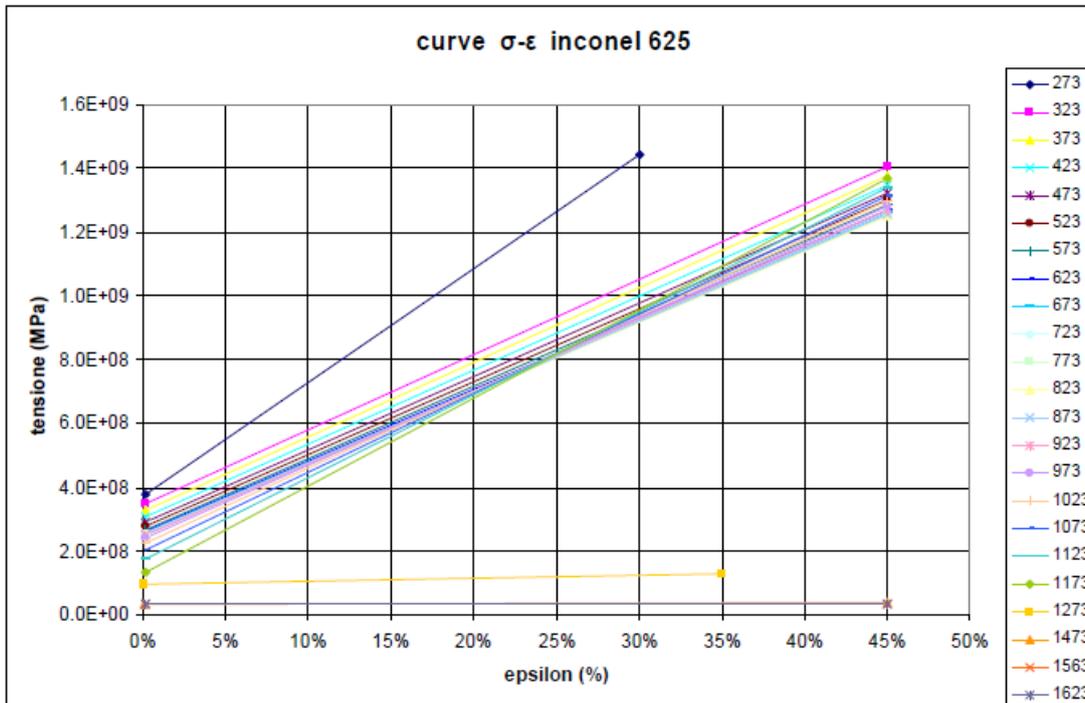


Fig. 3.42: curve σ - ϵ bilineari, in cui si considera solo il tratto plastico

3.7.2 Additive Manufacturing

L'Inconel 625 è una lega di nichel resistente ad alte temperature e alla corrosione, alta resistenza all'usura ed alla rottura con prodotti aventi ottima tolleranza a stress meccanici e termici anche se esposti ad ambiente ossidante. Lavorazioni tramite saldatura, elettroerosione a filo, micropallinatura e lucidatura o rivestimento. Trattamenti termici come la tempra per migliorare le proprietà meccaniche. Principali caratteristiche :

- Buone proprietà di resistenza/duttilità da temperature sottozero fino a oltre 980°C;
- Eccellente resistenza alla fatica e alla corrosione in un'ampia varietà di ambienti corrosivi, tra cui acqua di mare e acidi industriali;
- Non magnetica e antiscintilla;
- Resistente alla carburazione e all'ossidazione a temperatura elevata;
- Eccellente resistenza alla fessurazione da tensocorrosione.

Density	8.44 g/cm ³
Thermal conductivity	9.2 W/mK to 10.7 W/mK
Melting range	1290 °C to 1350 °C
Coefficient of thermal expansion (see note 1)	12.8 10 ⁻⁶ K ⁻¹

Tabella 3.55: dati generali per l'Inconel 625

Questi dati sono validi nella gamma tra 20 e 200°C. Il materiale è ricotto a 1048°C per 1h e successivamente viene raffreddato in forno. È testato a temperatura ambiente secondo ASTM E8 e viene lavorato prima di effettuare il test. È testato secondo la ASTM E384-11, dopo la lucidatura. Infine, è testato secondo JIS B 0601-2001 (ISO 97), dopo la pallinatura.

Element	Mass (%)
Nickel	Balance
Chromium	20.00 to 23.00
Molybdenum	8.00 to 10.00
Iron	≤ 5.00
Niobium	3.15 to 4.15
Cobalt	≤ 1.00
Copper	≤ 0.50
Manganese	≤ 0.50
Silicon	≤ 0.50
Aluminium	≤ 0.40
Titanium	≤ 0.40
Carbon	≤ 0.10
Tantalum	≤ 0.05
Nitrogen	≤ 0.02
Oxygen	≤ 0.02
Phosphorus	≤ 0.015
Sulphur	≤ 0.015

*ASTM standard composition powder. Renishaw powders are supplied to a tighter specification to minimise batch-to-batch variations. Results quoted in this data sheet are from samples produced using Renishaw's tighter specification powder. Please contact Renishaw for further information about specifications or if you require support in qualifying non-Renishaw powders.

Tabella 3.56: composizione chimica della polvere di Inconel 625

	As built		Heat treated (see note 2)	
	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)
Ultimate Tensile strength (UTS) (See note 3)				
Horizontal direction (XY)	1055 MPa	3 MPa	1020 MPa	1 MPa
Vertical direction (Z)	964 MPa	2 MPa	955 MPa	2 MPa
Yield strength (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	767 MPa	9 MPa	633 MPa	1 MPa
Vertical direction (Z)	676 MPa	7 MPa	598 MPa	2 MPa
Elongation at break (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	34%	1%	39%	1%
Vertical direction (Z)	42%	1%	43%	1%
Modulus of elasticity (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	205 GPa	10 GPa	206 GPa	3 GPa
Vertical direction (Z)	186 GPa	11 GPa	200 GPa	2 GPa
Hardness (Vickers) (See note 4)				
Horizontal direction (XY)	331 HV0.5	8 HV0.5	251 HV0.5	13 HV0.5
Vertical direction (Z)	332 HV0.5	8 HV0.5	254 HV0.5	16 HV0.5
Surface roughness (R_a) (See note 5)				
Horizontal direction (XY)	2 μm to 3 μm			
Vertical direction (Z)	6 μm to 7 μm			

Density of additively manufactured In625 is typically 99.8%, measured optically on a 10 mm \times 10 mm \times 10 mm sample at 75 \times magnification.

Tabella 3.57: proprietà meccaniche con strato di 30 μm per l'Inconel 625

	As built		Heat treated (see note 2)	
Ultimate Tensile strength (UTS) (See note 3)	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)
Horizontal direction (XY)	922 MPa	9 MPa	1005 MPa	6 MPa
Vertical direction (Z)	770 MPa	56 MPa	985 MPa	10 MPa
Yield strength (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	667 MPa	11 MPa	600 MPa	4 MPa
Vertical direction (Z)	536 MPa	34 MPa	583 MPa	2 MPa
Elongation at break (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	18%	2%	31%	2 %
Vertical direction (Z)	11%	4%	32%	4 %
Modulus of elasticity (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	175 GPa	16 GPa	208 GPa	4 GPa
Vertical direction (Z)	176 GPa	9 GPa	209 GPa	6 GPa
Hardness (Vickers) (See note 4)				
Horizontal direction (XY)	302 HV0.5	13 HV0.5	279 HV0.5	7 HV0.5
Vertical direction (Z)	308 HV0.5	6 HV0.5	290 HV0.5	8 HV0.5
Surface roughness (R_a) (See note 5)				
Horizontal direction (XY)	1.5 μm to 2 μm			
Vertical direction (Z)	6 μm to 7 μm			

Density of additively manufactured In625 is typically 99.8%, measured optically on a 10 mm \times 10 mm \times 10 mm sample at 75 \times magnification.

Tabella 3.58: proprietà meccaniche con strato di 60 μm per l'Inconel 625

L'Inconel 625 è una lega con intervallo di fusione 1290-1350°C. Presenta un'elevata resistenza a moltissime forme di corrosione in un intervallo di temperatura molto elevato; in aggiunta possiede ottime proprietà meccaniche di resistenza a trazione, tenacità e fatica oltre che eccellente facilità di produzione e ottima saldabilità, grazie al basso contenuto di alluminio e titanio.

Nello stato as-built il materiale mostra resistenze a snervamento e a rottura maggiori rispetto ai valori minimi dei campioni Inconel 625 nello stato forgiato; ciò è spiegato dalla formazione di fini strutture dendritiche con una dimensione media inferiore a 1 μm . In termini di duttilità, essa può variare molto in funzione del livello di porosità nel materiale, oltre che dall'orientamento di costruzione. In generale si riscontra una minore duttilità rispetto ai materiali forgiati; i campioni SLM più duttili hanno valori di allungamenti a rottura che soddisfano appena la duttilità minima imposta dalla norma ASTM B443 per i materiali forgiati. Inoltre, è comprovata l'anisotropia meccanica del materiale a seconda della direzione in esame. Trattamenti termici specifici di solubilizzazione fanno variare il comportamento meccanico, rendendo il materiale meno resistente, ma più duttile ed isotropo. I trattamenti termici di invecchiamento rendono il materiale più resistente ma meno duttile.

Condizione del materiale	σ_y (MPa)	σ_R (MPa)	Allungamento a rottura (%)
As-built (σ_y)	783 \pm 23	1041 \pm 36	33 \pm 1
Invecchiamento diretto a 700 °C 24h	1012 \pm 54	1222 \pm 56	23 \pm 1
Solubilizzato 1150°C 2 h	396 \pm 9	883 \pm 15	55 \pm 1
Solubilizzato 1150°C 2 h + invecchiamento 700°C 24 h	722 \pm 7	1116 \pm 6	35 \pm 5

Tabella 3.59: risultati delle prove di trazione per SLM

La macchina EOSINT M270 per la produzione dei campioni è stata settata nel seguente modo:

- Potenza laser: 195W;
- Temperatura della piattaforma: 80°C;
- Velocità di scansione: 1200mm/s;
- Distanza di scansione (h_d): 0.09mm;
- Spessore degli strati di polvere: 0.02mm.

La strategia di scansione ha previsto delle strisce spesse 5mm con sovrapposizione di 0.12mm e variazione di direzione delle tracce laser di 67° tra uno strato e il successivo. Un ulteriore campione è stato invece realizzato senza variare l'angolo di direzione tra i vari strati e analizzato per poter comparare le caratteristiche microstrutturali risultanti.

Technical Data	
Effective building volume (including building platform)	250 mm x 250 mm x 215 mm (9.85 x 9.85 x 8.5 in.)
Building speed (material-dependent)	2 - 20 mm ³ /s (0.0001 - 0.001 in ³ /sec.)
Layer thickness (material-dependent)	20 - 100 μm (0.001 - 0.004 in.)
Laser type	Yb-fibre laser, 200 W
Precision optics	F-theta-lens, high-speed scanner
Scan speed	up to 7.0 m/s (23 ft./sec.)
Variable focus diameter	100 - 500 μm (0.004 - 0.02 in.)
Power supply	32 A
Power consumption	maximum 5.5 kW
Nitrogen generator	standard
Compressed air supply	7,000 hPa: 20 m ³ /h (102 psi: 26.2 yd ³ /h.)
Dimensions (B x D x H)	
System	2,000 mm x 1,050 mm x 1,940 mm (78.8 x 41.4 x 76.1 in.)
Recommended installation space	approx. 3.5 m x 3.6 m x 2.5 m (137.9 x 141.8 x 100 in.)
Weight	approx. 1,130 kg (2,491 lb.)

Tabella 3.60: dati tecnici del campione analizzato

Materials	Condition	Yield Strength (mpa)	Ultimate Tensile Strength (mpa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
IN625	As-built	743	1043	31.4	49.6
IN625	LPBF+annealing	386	910	54.4	56.6
IN625	As-built (multi-laser)	585	864	58.6	-
IN625	As-built (multi-laser) + heat treatment	507	827	69.3	-
IN625	As-built	641.5	878.5	30	-
MWCNT-IN625	As-built	788	998	19.1	-
MWCNT-IN625	LPBF + heat treatment	585	1000	31.5	-
IN625	Wrought	517	930	40	-

Tabella 3.61: proprietà meccaniche in base ai diversi trattamenti per l'Inconel 625

3.8 Inconel 718

3.7.1 Metodi standard

L'Inconel 718 è una superlega a base di nichel e cromo. Le sue caratteristiche fisiche, la resistenza alle elevate temperature e la sua capacità di lavorare bene in ambienti aggressivi l'hanno portato ad essere impiegato in turbine a gas, motori a reazione, come dischi di turbine per impieghi aeronautici. Questa lega offre un'ottima resistenza agli sforzi, anche a temperature oltre i 700°C, inoltre ha elevata durata a fatica e un'eccezionale resistenza al creep, all'ossidazione e alla corrosione. Altre proprietà caratteristiche delle leghe a base di nichel sono l'elevata resistenza ai carichi termici. L'ottima resistenza agli shock termici e l'elevato punto di fusione. Tutte queste proprietà sono state sfruttate nel campo aerospaziale, dove

l'efficienza dei motori aumenta con la temperatura. Le superleghe, a base principalmente di nichel, conservano eccellenti proprietà meccaniche e chimiche alle temperature più elevate, che contraddistinguono i motori degli aerei. I componenti in superleghe possono essere più piccoli e leggeri di quelli realizzati in acciaio.

Composizione chimica (% in peso)	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Fe
	53,56	19,08	5,22	2,97	0,95	0,49	Ba1.
	C	Si	Mn	P	Cu	B	Co
	0,028	0,11	0,06	0,008	0,04	0,004	0,17
Densità [gr/cm ³]	8,19	Modulo di rigidità [kN/mm ²]				77,2	
Punto di fusione [°C]	1336	Modulo di Young [kN/mm ²]				204,9	
Coefficienti di dilatazione termica [$\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$]	(da 21° a 93°) 13	Temperatura di esercizio [°C]				da -200 a +550	
Conducibilità termica [W/m°C]	11,4						
Carico di rottura [N/mm ²]:							
- stato fisico	1000 - 1200						
- bonificato	1400 - 1600						

Tabella 3.62: caratteristiche dell'Inconel 718 lavorato

La presenza di molibdeno e di niobio all'interno di queste leghe è la causa del fenomeno di strain-hardening (indurimento) che si verifica in fase di lavorazione. In definitiva la scarsa lavorabilità dell'Inconel 718 è da attribuirsi alle seguenti proprietà della lega:

- Elevata resistenza meccanica anche alle alte temperature;
- Sensibilità alla velocità di deformazione con rapido incrudimento;
- Elevata durezza;
- Presenza di strain-hardening;
- Bassa conducibilità termica ad elevata capacità termica (elevate temperature durante il taglio, con picchi fino a 1200°C sul petto dell'utensile);
- Elevata affinità chimica con moltissimi materiali per utensili;
- Tendenza all'adesione, alla deformazione di microsaldature della lega di nichel in lavorazione sugli utensili e tendenza alla formazione di BUE (Built Up Edge);
- Elevate forze di taglio causate dall'elevata resistenza del materiale con possibile innesco di vibrazioni;
- Presenza nella microstruttura di carburi altamente abrasivi (CrC, TiC, MoC, ecc... a bordo grano);
- Piccole aree di contatto tra truciolo e utensile danno luogo ad elevate pressioni di taglio ed elevati carichi termici vicino al bordo del tagliente;
- Formazione di truciolo continuo che ostacola le operazioni di taglio.

Le prove di caratterizzazione sono state effettuate su un disco avente spessore di 20mm, ricavato mediante una troncatrice con lama circolare diamantata. Sul campione è stata misurata la durezza Brinell ed è stata analizzata la microstruttura.

HB 2,5/187,5/15			
Prova			
1	415	6	410
2	417	7	415
3	416	8	412
4	420	9	415
5	419	10	411
Media	415		
Dev. Stan.	5		

Tabella 3.63: prove di caratterizzazione su un disco con spessore di 20mm

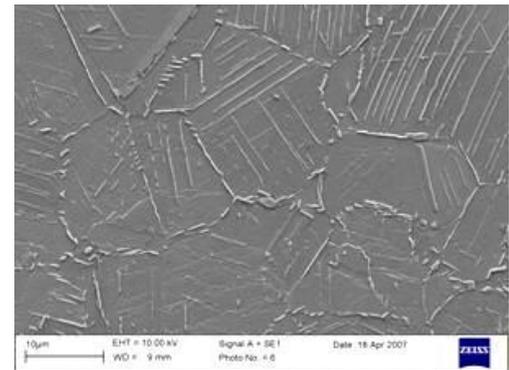


Fig. 3.43: microstruttura dell'Inconel 718

Dopo le prove di durezza, sul materiale è stato effettuato l'attacco chimico al fine di mettere in evidenza la microstruttura. Pur avendo, le superleghe a base di nichel, una composizione generalmente complessa, presentano una microstruttura relativamente semplice, soprattutto se comparata con quella delle leghe di titanio. La microstruttura è data da una matrice austenitica indurita, per soluzione solida, da precipitati coerenti, da vari tipi di carburi e altre fasi distribuite nella matrice stessa e lungo i bordi grano.

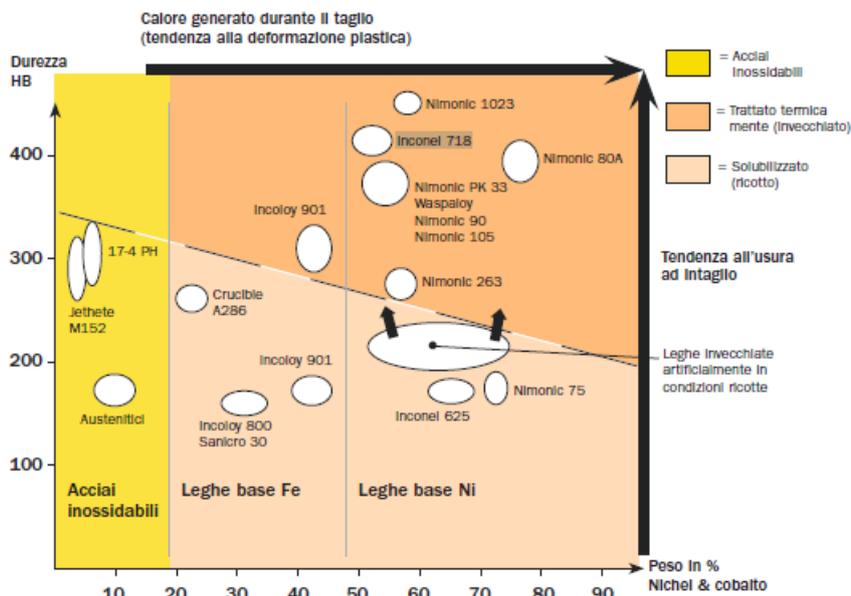


Fig. 3.44: relazione tra il peso percentuale di cobalto e nichel con la durezza di alcuni metalli

3.7.2 Additive Manufacturing

L'Inconel 718 è una lega di nichel resistente alle alte temperature. Questo tipo di materiale è caratterizzato da un'alta resistenza all'usura ed alla rottura, produce parti finite che presentano ottime tolleranze a stress meccanici ed una resistenza termica fino a 980°C. Il materiale è adatto per applicazioni ad alte temperatura come ad esempio parti di turbine a gas ed impianti industriali oltre che per applicazioni criogeniche. Il pezzo in Inconel 718 può essere lavorato tramite saldatura, sottoposto a processo di elettroerosione a filo, micropallinatura ed essere lucidato o rivestito se necessario. Può anche essere sottoposto a trattamenti termici come la tempra per incrementare le proprietà meccaniche. L'Inconel 718 comprende una frazione in massa fino al 55% di nichel, fino al 21% di ferro e di cromo e altri elementi in quantità minore. Le proprietà includono alta resistenza, eccellente resistenza alla corrosione e la temperatura di lavoro è compresa tra -250 e 650°C e la sua temperatura di fusione è di 1336°C. IN718 ha un'ampia gamma di applicazioni nell'industria ed è particolarmente adatto per applicazioni dove è richiesta una buona resistenza alla trazione, allo scorrimento e alla rottura. È adatto per applicazioni in cui è richiesta resistenza

alla corrosione e all'ossidazione ad alte temperature. Le sue eccellenti caratteristiche di saldatura e la resistenza alla fessurazione lo rendono un materiale ideale per la produzione additiva.

Powder description	Nickel alloy powder
Layer thickness	30 μm and 60 μm
Laser power	200 W
Additive manufacturing system	AM250

Tabella 3.64: specifiche di processo per l'Inconel 718

Density	8.19 g/cm ³
Thermal conductivity	6 W/mK to 12 W/mK
Melting range	1260 °C to 1336 °C
Coefficient of thermal expansion (see note 1)	12 $\mu\text{m}/\text{mK}$ to 16 $\mu\text{m}/\text{mK}$

Tabella 3.65: dati generali per l'Inconel 718

Questi dati sono validi nella gamma tra 25 e 760°C. Condizioni di trattamento termico: inizialmente la soluzione viene trattata a $980\pm 10^\circ\text{C}$ per 1h; dopo di che si ha un invecchiamento a $720\pm 10^\circ\text{C}$ per 8h e poi è ulteriormente invecchiato a $620\pm 10^\circ\text{C}$ per 8h. È pressato isostaticamente a caldo (HIP) ed è testato a temperatura ambiente secondo ASTM E8 e viene lavorato prima di effettuare il test. È testato secondo la ASTM E384-11, dopo la lucidatura. Infine, è testato secondo JIS B 0601-2001 (ISO 97), dopo la sabbatura con microsferi.

Element	Mass (%)
Nickel	50.00 to 55.00
Chromium	17.00 to 21.00
Iron	Balance
Niobium and Tantalum	4.75 to 5.5
Molybdenum	2.80 to 3.30
Titanium	0.65 to 1.15
Cobalt	≤ 1.00
Aluminium	0.20 to 0.80
Manganese	≤ 0.35
Silicon	≤ 0.35
Copper	≤ 0.30
Carbon	0.02 to 0.05
Nitrogen	≤ 0.03
Oxygen	≤ 0.03
Phosphorus	≤ 0.015
Sulphur	≤ 0.015
Calcium	≤ 0.01
Magnesium	≤ 0.01
Selenium	≤ 0.005
Boron	≤ 0.005

*ASTM standard composition powder. Renishaw powders are supplied to a tighter specification to minimise batch-to-batch variations. Results quoted in this data sheet are from samples produced using Renishaw's tighter specification powder. Please contact Renishaw for further information about specifications or if you require support in qualifying non-Renishaw powders.

Tabella 3.66: composizione chimica della polvere di Inconel 718

	As built		Solution treated and aged (See note 2)		HIP treated (See note 3)	
	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)
Ultimate tensile strength (UTS) (See note 4)						
Horizontal direction (XY)	1040 MPa	7 MPa	1467 MPa	6 MPa	1379 MPa	3 MPa
Vertical direction (Z)	971 MPa	3 MPa	1391 MPa	9 MPa	1346 MPa	5 MPa
Yield strength (see note 4)						
Horizontal direction (XY)	758 MPa	4 MPa	1259 MPa	5 MPa	1088 MPa	26 MPa
Vertical direction (Z)	636 MPa	19 MPa	1202 MPa	15 MPa	1052 MPa	4 MPa
Elongation at break (see note 4)						
Horizontal direction (XY)	30%	1%	17%	1%	25%	1 %
Vertical direction (Z)	36%	1%	17%	1%	24%	1%
Modulus of elasticity (see note 4)						
Horizontal direction (XY)	186 GPa	5 GPa	195 GPa	13 GPa	207 GPa	4 GPa
Vertical direction (Z)	158 GPa	18 GPa	186 GPa	15 GPa	201 GPa	3 GPa
Hardness (Vickers) (see note 5)						
Horizontal direction (XY)	277 HV0.5	9 HV0.5	418 HV0.5	9 HV0.5	456 HV0.5	11 HV0.5
Vertical direction (Z)	302 HV0.5	8 HV0.5	488 HV0.5	11 HV0.5	463 HV0.5	7 HV0.5
Surface roughness (R_a) (See note 6)						
Horizontal direction (XY)	1.28 μm to 1.36 μm					
Vertical direction (Z)	1.72 μm to 1.96 μm					

Density of additively manufactured In718 is typically 99.8%, measured optically on a 10 mm \times 10 mm \times 10 mm sample at 75 \times magnification.

Tabella 3.67: proprietà meccaniche con strato di 30 μm per l'Inconel 718

	As built		Solution treated and aged (See note 2)		HIP treated (See note 3)	
	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)	Mean	Standard deviation ($\pm 1\sigma$)
Ultimate tensile strength (UTS) (See note 4)						
Horizontal direction (XY)	1057 MPa	11 MPa	1504 MPa	3 MPa	1289 MPa	4 MPa
Vertical direction (Z)	943 MPa	38 MPa	1439 MPa	11 MPa	1228 MPa	24 MPa
Yield strength (see note 4)						
Horizontal direction (XY)	753 MPa	8 MPa	1306 MPa	10 MPa	958 MPa	8 MPa
Vertical direction (Z)	639 MPa	13 MPa	1231 MPa	10 MPa	929 MPa	10 MPa
Elongation at break (see note 4)						
Horizontal direction (XY)	25%	3%	16%	2%	23%	2 %
Vertical direction (Z)	19%	8%	16%	2%	17%	4%
Modulus of elasticity (see note 4)						
Horizontal direction (XY)	203 GPa	10 GPa	202 GPa	4 GPa	219 GPa	6 GPa
Vertical direction (Z)	191 GPa	9 GPa	198 GPa	11 GPa	214 GPa	7 GPa
Hardness (Vickers) (see note 5)						
Horizontal direction (XY)	275 HV0.5	14 HV0.5	465 HV0.5	28 HV0.5	408 HV0.5	11 HV0.5
Vertical direction (Z)	295 HV0.5	11 HV0.5	467 HV0.5	20 HV0.5	418 HV0.5	16 HV0.5
Surface roughness (R_a) (See note 6)						
Horizontal direction (XY)	1.14 μm to 1.70 μm					
Vertical direction (Z)	2.36 μm to 3.0 μm					

Density of additively manufactured In718 is typically 99.8%, measured optically on a 10 mm \times 10 mm \times 10 mm sample at 75 \times magnification.

Tabella 3.68: proprietà meccaniche con strato di 60 μm per l'Inconel 718

Si considera un provino ad L (figura 3.49), caratterizzato da una geometria abbastanza semplice, in modo tale da non implicare un processo di stampa troppo lungo ed un eccessivo costo computazionale. Si noti che tutte le misure mostrate sono espresse in mm. Il materiale utilizzato per la realizzazione del provino è la superlega Inconel 718, sottoforma di particelle sferoidali. In particolare, la polvere impiegata è stata ottenuta tramite la tecnica di atomizzazione a gas.

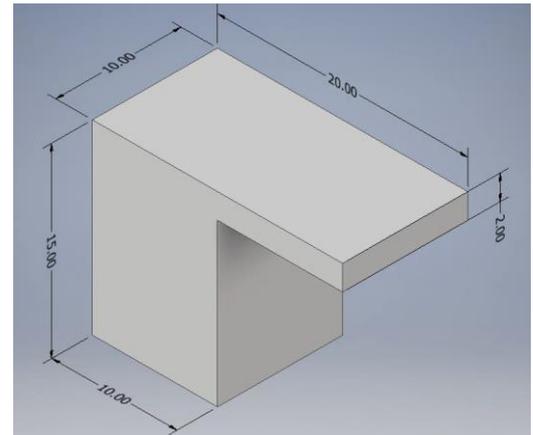


Fig. 3.45: provino ad L in Inconel 718

MetcoAdd 718C	Percentuale in peso							
	Ni	Cr	Fe	Nb+Ta	Mo	Al	Ti	altro
	da bilancio	18	18	5	3	0.6	1	< 0.5
Metcoadd 718C	Range nominale [μm]	D90 [μm]	D50 [μm]	D10 [μm]	Scorrevolezza [s/50 g]	Densità apparente [g/cm ³]	Morfologia	
	-45 - +15	46	30	18	< 18	4-5	Sferoidale	

Tabella 3.69: composizione chimica e caratteristiche fisiche del provino in Inconel 718

Per quanto riguarda i parametri di processo legati al componente da realizzare, a seguito di diverse prove sperimentali, si è giunti alla conclusione che il valore ottimale di tali parametri, al fine di ottenere una densità del componente finito maggiore del 98%, si ha massimizzando le proprietà meccaniche dei pezzi e aumentando la produttività dell'intero processo.

Spessore dello strato [mm]	Potenza laser [W]	Velocità di scansione [mm/s]	Densità di energia volumetrica [J/mm ³]	Distanza di hatch [mm]
0.02	195	850	104.27	0.11

Tabella 3.70: parametri di processo legati al componente da realizzare, a seguito di diverse prove sperimentali

Inerentemente alla strategia di scansione è stato analizzato il contorno di ciascuno strato e successivamente, la parte interna mediante linee trasversali parallele. Inoltre, il percorso di scansione è stato ruotato di 67° da uno strato all'altro al fine di evitare lo sviluppo di stress in una direzione preferenziale.

Spessore dello strato [mm]	Potenza laser [W]	Velocità di scansione [mm/s]	Densità di energia volumetrica [J/mm ³]	Distanza di hatch [mm]	Intervallo di frammentazione [mm]	Distanza di separazione [mm]
0.02	130	1200	10.833	0.5	3.5	0.5

Tabella 3.71: caratteristiche geometriche e parametri di processo inerenti al supporto

Dato che il processo di SLM implica notevoli gradienti termici, affinché la simulazione sia la più realistica possibile è importante considerare la variazione del valore assunto dalle caratteristiche del materiale al variare della temperatura. Nello specifico, si assume che le proprietà meccaniche del materiale (conduttività termica, modulo di Young, coefficiente di Poisson e coefficiente di espansione termica) siano isotropiche e che il valore di densità sia uniforme. Il valore della tensione di snervamento non è stato inserito in quanto è stato considerato il comportamento del materiale solamente in campo elastico. Inoltre,

è necessario sottolineare che le suddette proprietà si riferiscono all'Inconel 718 allo stato solido, infatti secondo la metodologia proposta il modello termomeccanico predice le tensioni residue e le distorsioni utilizzando le proprietà del materiale al di sotto della temperatura di fusione e non tiene in conto né del cambiamento di fase né delle caratteristiche della polvere.

Temperatura [°C]	Densità [g/cm ³]	Conducibilità termica [W/m/°C]	Modulo di Young [GPa]	Coefficiente di Poisson [-]	Coefficiente di espansione termica [µm/m/°C]	Calore specifico a volume costante [J/kg/°C]
20	8.195	10.31		0.294	13	362
21			290	0.291		
37.78			288	0.288		
93.33			284	0.28		
100		11.88		0.28		378
148.89			280			
200		13.6		0.275		400
204.44			276	0.272		
260			271	0.273		
315.56			267	0.271		
371.11			262	0.272		
400	8.1	16.6		0.271	14.8	412
426.67			258	0.276		
482.22			253	0.283		
537.78			248			
593.33			242			
600	8	20.1			16.6	460
648.889			237			
800		26.3				1073
1300		30.75				1573

Tabella 3.72: proprietà fisiche dipendenti dalla temperatura e ricavate dalla letteratura per l'Inconel 718

Si vuole osservare il diverso comportamento a fatica dei provini realizzati tramite AM. Con questo studio si sono voluti confrontare i valori sperimentali di resistenza a fatica per i seguenti provini:

1. As-built;
2. Lavorati tramite la lavorazione di asportazione di truciolo, come la tornitura;
3. Lavorati.

In questo modo si vuole determinare l'influenza delle lavorazioni meccaniche su componenti realizzati tramite diverse tipologie di macchine per la produzione additiva. Un altro studio ha permesso di confrontare provini realizzati con la stessa macchina e stessi parametri di processo produttivo. In questo modo si è voluto determinare l'influenza della resistenza a fatica in funzione della variazione del rapporto di tensione R. I provini sono stati sottoposti sia ad un ciclo alterno simmetrico (R=-1) sia con un ciclo pulsante (R=0.1).

La geometria dei provini testati è quella cilindrica con raggio continuo secondo la norma ASTM E466-15. Eseguendo prove a diversi carichi, si è andato a determinare il numero di cicli necessario a portare il provino a rottura. Il primo studio ha permesso di ottenere curve di Wohler comparative tra i provini realizzati tramite due differenti macchine, sia allo stato as-built, sia sottoposti alla lavorazione di tornitura.

Il secondo, invece, ha permesso di mettere in luce l'influenza di un diverso rapporto R impostato per l'esecuzione del test.

I dati ricavati dalla prova a fatica hanno permesso di determinare la curva di Wohler per provini ricavati da due diverse macchine di AM. Si può notare dal grafico ottenuto come rispetto al materiale as-built, la lavorazione di tornitura conferisca all'Inconel 718 un miglioramento della resistenza a fatica. Si può notare, come la realizzazione degli stessi provini tramite due diverse macchine possa comportare una variazione della resistenza a fatica.

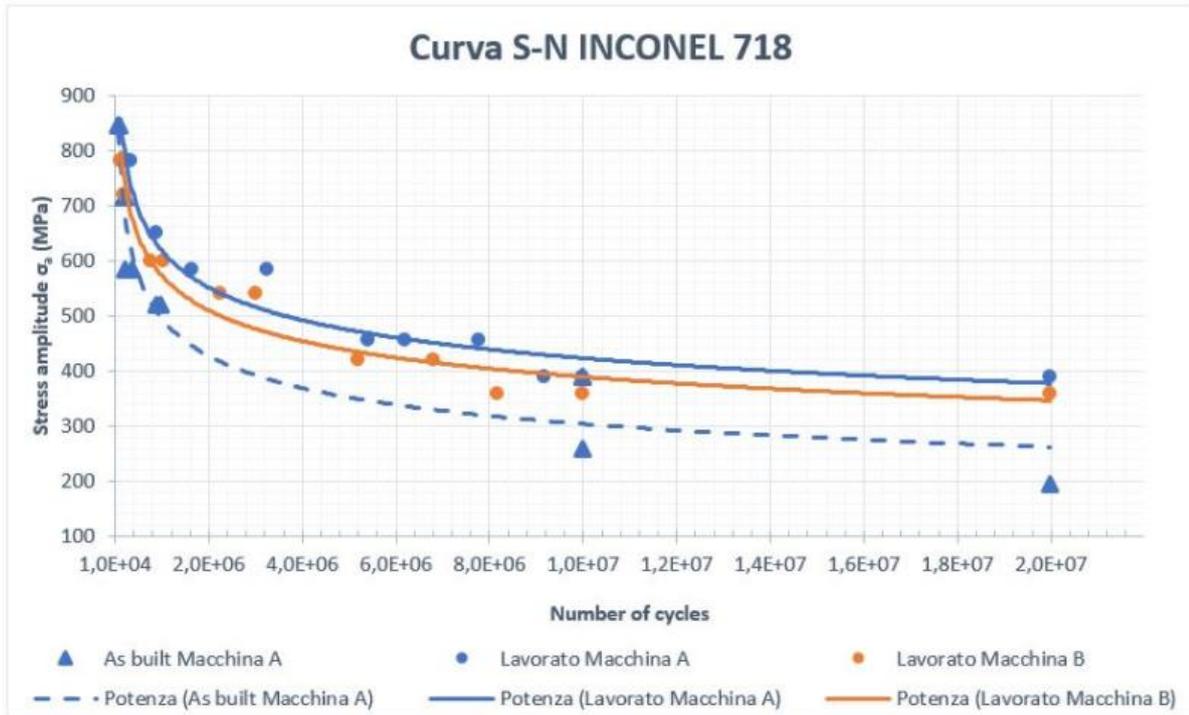


Fig. 3.46: determinazione della curva di Wohler per materiale as-built e tramite due macchine differenti

Nel secondo studio si è messo in evidenza come con $R=-1$ si riducano le caratteristiche di resistenza a fatica, rispetto ad un rapporto $R=0.1$.

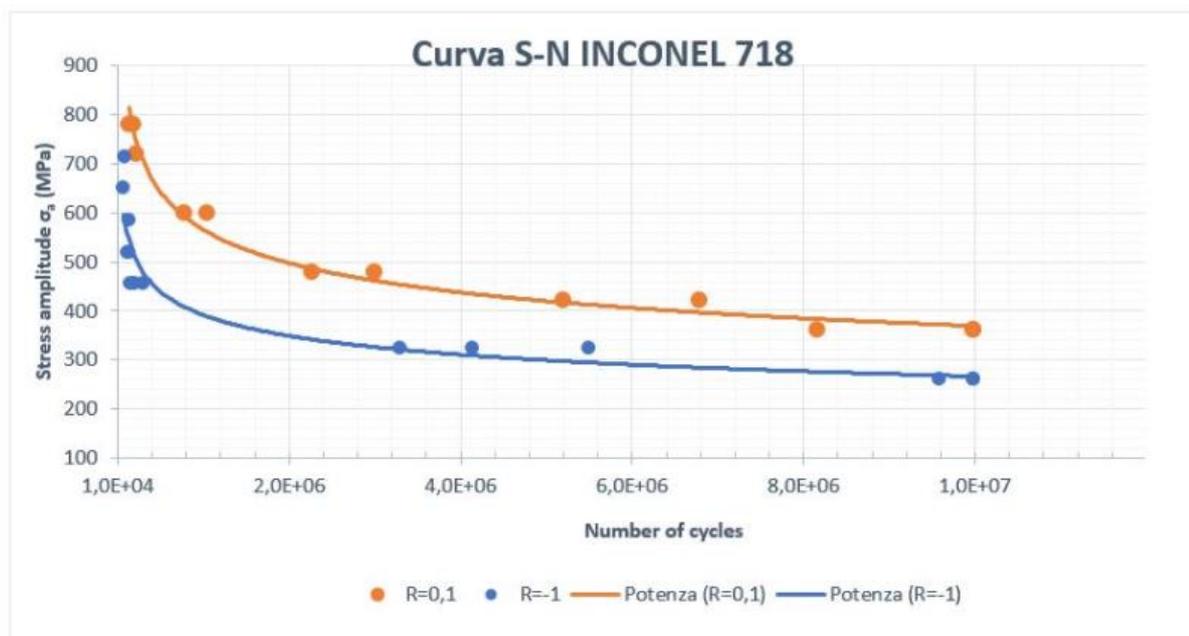


Fig. 3.47: relazione per la variazione del rapporto di tensione

3.9 Life cycle costing

C'è una crescente consapevolezza sul fatto che i costi del ciclo di vita e non solo i costi iniziali, debbano essere considerati quando si selezionano i materiali. I costi del ciclo vita prendono in considerazione:

- Costi iniziali;
- Costi operativi;
- Valore residuo.

L'acciaio inossidabile viene a volte considerato un materiale costoso. Tuttavia, l'esperienza ha dimostrato che utilizzando un materiale resistente alla corrosione, per evitare la futura manutenzione, permette di risparmiare sui costi di messa fuori servizio e ripristino della struttura, che superano di gran lunga i costi iniziali del materiale. Il costo iniziale dei prodotti strutturali in acciaio inossidabile è approssimativamente quattro volte quello dell'equivalente prodotto in acciaio al carbonio. Tuttavia, si avranno risparmi dalla mancanza di operazioni di rivestimento superficiale a intervalli regolari di tempo. L'eccellente resistenza alla corrosione dell'acciaio inossidabile può offrire molti vantaggi tra cui:

- Minori costi e frequenza di ispezioni;
- Minori costi di manutenzione;
- Lunga vita in servizio.

L'acciaio inossidabile ha un elevato valore residuo (valore alla fine della vita della struttura), sebbene questo sia di rado un fattore decisionale per una struttura con una lunga vita di progetto. Il life cycle costing utilizza il principio standard di contabilità del flusso di cassa scontato per ridurre tutti quei costi a valori attuali. Il tasso di sconto comprende inflazione, tassi di interesse bancari, tasse ed eventualmente un fattore di rischio. Questo consente un confronto realistico sulla base delle operazioni disponibili e dei vantaggi potenziali a lungo termine nell'utilizzo dell'acciaio da valutare rispetto alla selezione di altri materiali.

I costi di manodopera per la rimozione delle polveri sono sempre importanti. Il lavoro manuale è direttamente correlato alla complessità della parte e questa rappresenta uno dei fattori che offre la più grande giustificazione, anche se non l'unica, per rendere la parte additive. I produttori AM desiderano quindi sistemi in grado di elaborare parti complesse con il minimo sforzo, poiché ogni ora aggiuntiva impiegata per rimuovere la polvere da strutture reticolari complesse o canali interni riduce la possibilità di rendere quella parte di AM. In luoghi ad alto costo di manodopera, una riduzione del tempo necessario per una parte potrebbe essere il fattore critico nel valutare la fattibilità di realizzare la parte in AM.

In base al tipo di materiale considerato i costi sono differenti. Infatti, se si considera il costo in base al peso si ha che per:

- L'alluminio è di 1.50 \$/lb;
- L'acciaio al carbonio è di 0.30 \$/lb;
- L'acciaio inossidabile è di 1.40 \$/lb.

Se invece si considera il costo in base al volume, si ha che per:

- L'alluminio è di 0.14 \$/in³;
- L'acciaio al carbonio è di 0.084 \$/in³;
- L'acciaio inossidabile è di 0.42 \$/in³.

Se il costo dell'acciaio al carbonio è fatto coincidere con l'unità, il costo dell'alluminio diventa di 2.5 e quello dell'acciaio inossidabile diventa di 4.7. Si può affermare che dato l'alto costo iniziale, l'acciaio inox viene

impiegato principalmente quando il peso non è una componente fondamentale, mentre lo sono la finitura e la saldabilità.

A completamento delle prove di lavorabilità è conveniente effettuare un'analisi economica che permetta di effettuare un bilancio costi-benefici. I costi di produzione, nei processi ad asportazione di truciolo, sono la somma di una serie di fattori costituiti da:

1. Costo delle macchine utensili;
2. Costo della manodopera;
3. Costo dei materiali;
4. Costo dell'attrezzatura;
5. Costo degli utensili;
6. Spese generali.

I costi degli utensili rappresentano un valore minimo dei costi totali di produzione (2-3%). Generalmente, se l'efficienza di un utensile viene incrementata, i benefici ottenibili permettono di diminuire i costi totali o, per lo meno, di lasciarli invariati, ma con una qualità maggiore del pezzo finito. Al fine di valutare l'impatto economico del processo di tornitura, sono stati considerati diversi fattori. Generalmente le condizioni per la massima economicità sono ottenute a velocità inferiori a quelle corrispondenti alla massima produzione. La determinazione della durata economica è stata effettuata ricavando il costo della lavorazione per cm^3 di materiale asportato, in funzione delle diverse velocità di taglio. Il costo è espresso dalla seguente equazione:

$$C = \frac{C_o + s_m}{V_c a_p f_n} + \frac{(C_o + s_m)t_{cu} + \frac{C_{pu}}{N_u} + \frac{C_u}{N_t}}{V_c a_p f_n t_c} \quad [\text{€/cm}^3]$$

Il primo termine rappresenta la parte di costo legata ai parametri di taglio e quindi al tempo di lavoro; il secondo termine rappresenta la parte di costo relativa alla durata dell'utensile ed alla sostituzione. I simboli indicano:

- C_o : costo manodopera;
- s_m : ammortamento macchina + costo energia;
- t_{cu} : tempo cambio utensile;
- C_{pu} : costo portautensile;
- N_u : numero di utilizzazioni del portautensile;
- C_u : costo utensile;
- N_t : numero di taglienti;
- V_c : velocità di taglio;
- a_p : profondità di passata;
- f_n : avanzamento;
- t_c : durata utensile alla velocità V_c , espressa in minuti.

L'andamento del costo di lavorazione raggiunge un valore minimo in corrispondenza di una certa velocità, definita velocità economica V_e .

C [€/cm ³] Costo produttivo per cm ³ rimosso							
Dry	Wet	MQL	MQC	te [min] - Ve [m/min]			
0,2154	0,1739	0,1781	0,2423	Dry	Wet	MQL	MQC
				3,34	5,56	4,23	8,08
t [min/cm ³] Tempo richiesto per rimuovere 1 cm ³							
Dry	Wet	MQL	MQC	tq [min] - Vq [m/min]			
0,2331	0,1716	0,1859	0,1786	Dry	Wet	MQL	MQC
				1,57	2,77	2,02	4,65

Tabella 3.73: costi e tempi di produzione per sistemi di lubro-refrigerazione

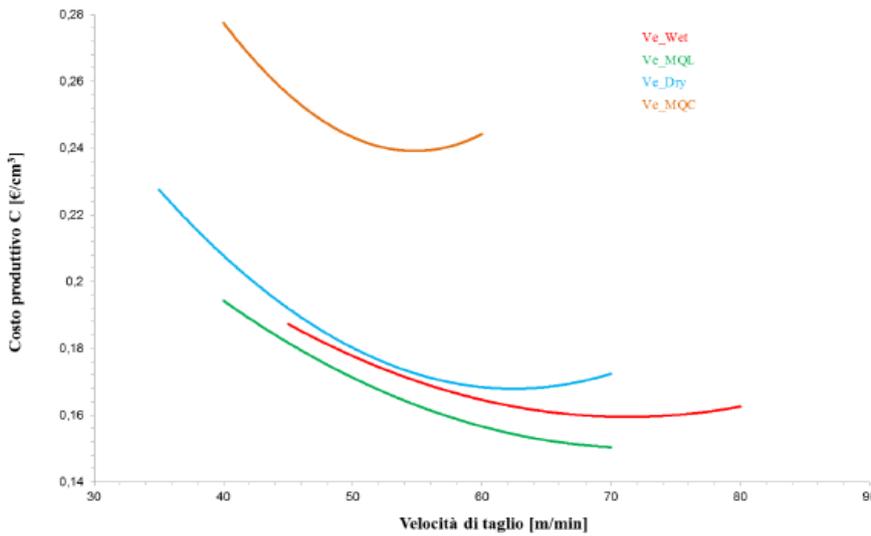


Fig. 3.48: rapporti relativi ai costi di lavorazione, di produttività e di velocità di taglio

Nel caso AM, rispetto alla produzione classica, non c'è la necessità di alcun tipo di attrezzatura aggiuntiva dedicata annullando così l'influenza della dimensione del lotto di produzione sul costo finale del componente. Tutte queste tecnologie sono la forza motrice per l'evoluzione della tecnologia AM da tecnica prototipale a tecnica di produzione industriale. Proprio la relativa novità delle tecnologie AM, unita alla loro iniziale vocazione come tecnologia di prototipazione, è il maggiore limite ad una sua diffusione in ambito industriale.

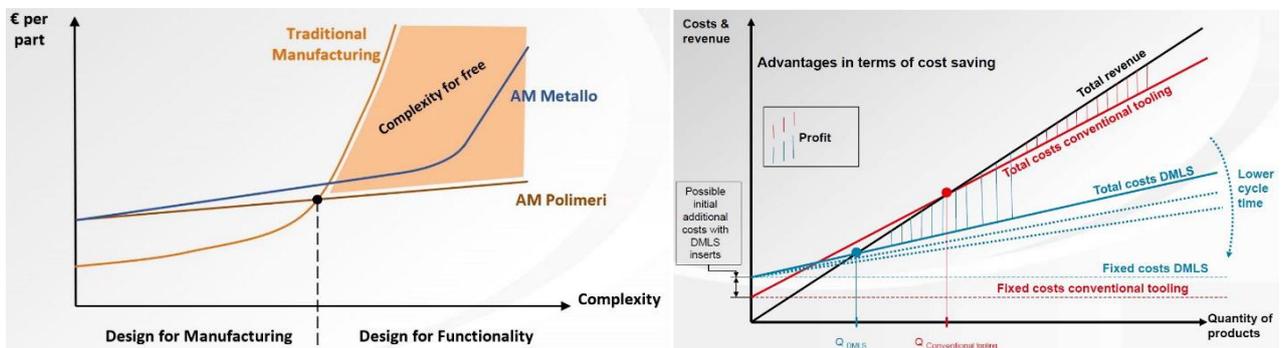


Fig. 3.49: costo delle parti in base alla complessità; qualità di produzione in relazione al costo

Uno svantaggio dell'AM è il costo elevato dei materiali, infatti è di circa 110€/kg per l'alluminio e circa 400€/kg per il titanio. È importante considerare i costi del pannello multifunzionale finale riprogettato per l'AM.

Parametro	Valore	Unità di misura
Tempo Design	160	h
Costo Ingegneria	70	€/h
<i>Costo Riprogettazione</i>	<i>11200</i>	€
Costo materiale	110	€/kg
Altezza componente (comprensiva supporti)	52.84	mm
Layer thickness	30	µm
Layer	1761	numero
Volume di riempimento della camera	3302.5	cm ³
Volume del componente con sovrametalli	1760	cm ³
Densità materiale	2.67	g/cm ³
Peso del componente (senza supporti)	8.818	kg
Peso del componente (con supporti)	10	kg
Costo materiale per il job	1100	€
Volume delle polveri non utilizzate	1542.5	cm ³
Peso delle polveri non utilizzate	3.913	kg
Recupero costo delle polveri	430.38	€
<i>Costo del materiale per il componente</i>	<i>669.62</i>	€
Costo orario macchina (outsourcing)	110	€
Velocità di stampa	8	mm ³ /s
Tempo costruzione	67	h
Costo produzione del job	7370	€/job
Costo orario operatore	25	€/h
Tempo di set-up	2	h/job
Costo del presidio	50	€
Numero pezzi	1	Componenti/job
<i>Costo Additive Manufacturing</i>	<i>7420</i>	€
Tempo trattamento termico	2	h
Costo Trattamento termico	100	€/job
Costo orario dell'operatore	20	€/h
<i>Costo del Trattamento Termico</i>	<i>140</i>	€/lotto
Tempo post-processing	12	h/pezzo
Costo foratura	30	€/operazione
Costo spianatura	60	€/operazione
Costo maschiatura	35	€/operazione
Forature	6	n. operazioni
Spianature	2	n. operazioni
Maschiature	2	n. operazioni
Costo operatore	20	€/h
<i>Costo Post-Processing</i>	<i>610</i>	€
Costo totale	20'039.62	€
Tempo totale di realizzazione	241	h

Tabella 3.74: costi del manello multifunzionale finale riprogettato per AM

Il grande vantaggio della tecnologia è dato anche dal fatto che la produzione del componente può iniziare immediatamente dopo la fine della fase di design della parte evitando, inoltre, i ritardi dovuti al tooling che generalmente sono caratterizzati da tempi abbastanza lunghi e che sono costosi. L'AM si configura come tecnologia valida per piccoli e medi lotti di produzione di prodotti metallici ad alto valore aggiunto e la convenienza è accentuata quando vengono esaltate le potenzialità di libertà di progettazione offerte dal processo attraverso un redesign oculato. Sfruttare l'AM significa anche realizzare in un unico componente diverse parti, il che riduce il costo, il tempo e i problemi di qualità risultanti dalle operazioni di assemblaggio il cui costo, inoltre, è minimizzato. Il redesign può avere un ottimo rapporto caratteristiche/peso che permette di soddisfare i requisiti funzionali imposti insieme alla minimizzazione del volume di materiale impiegato e quindi del peso finale.

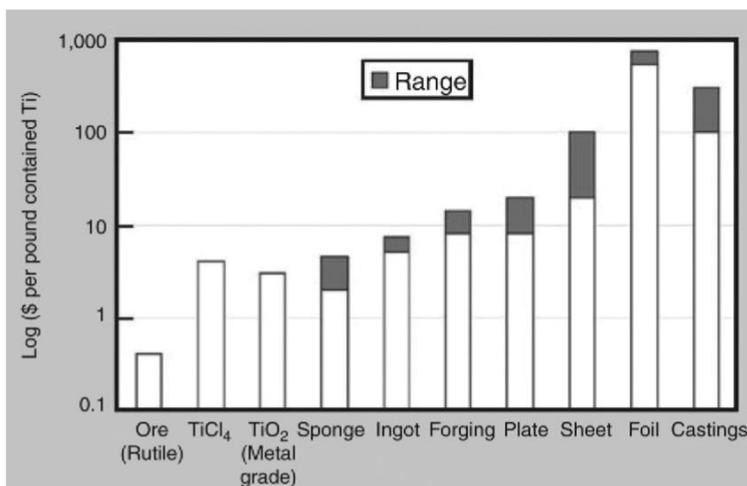


Fig. 3.50: costo del titanio nelle varie forme

3.9.1 Preventivo per la realizzazione di un provino

Si considera un provino con le dimensioni di figura 3.51 ad osso di cane:

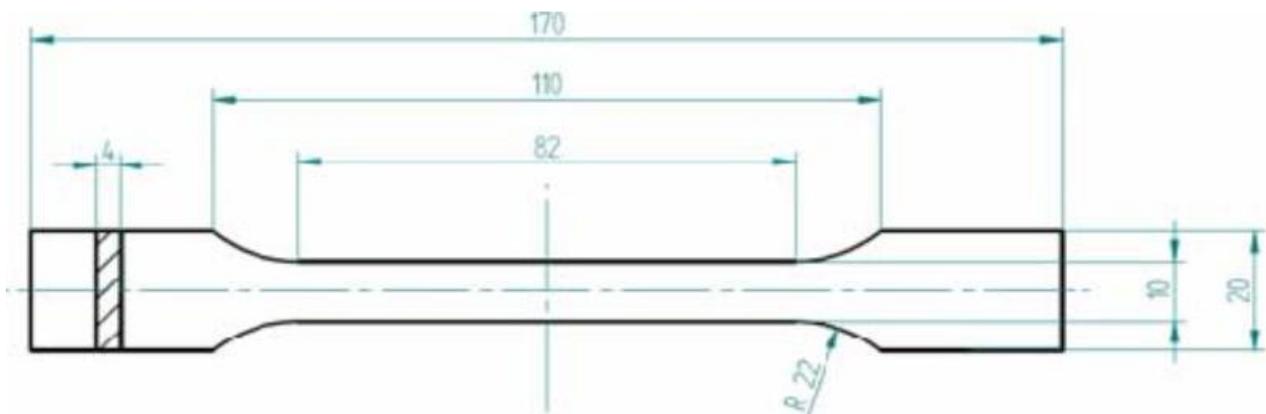


Fig. 3.51: provino ad osso di cane

Attraverso queste informazioni, tramite Catia V5 è stato possibile realizzare il provino in forma tridimensionale ottenendo il seguente campione:

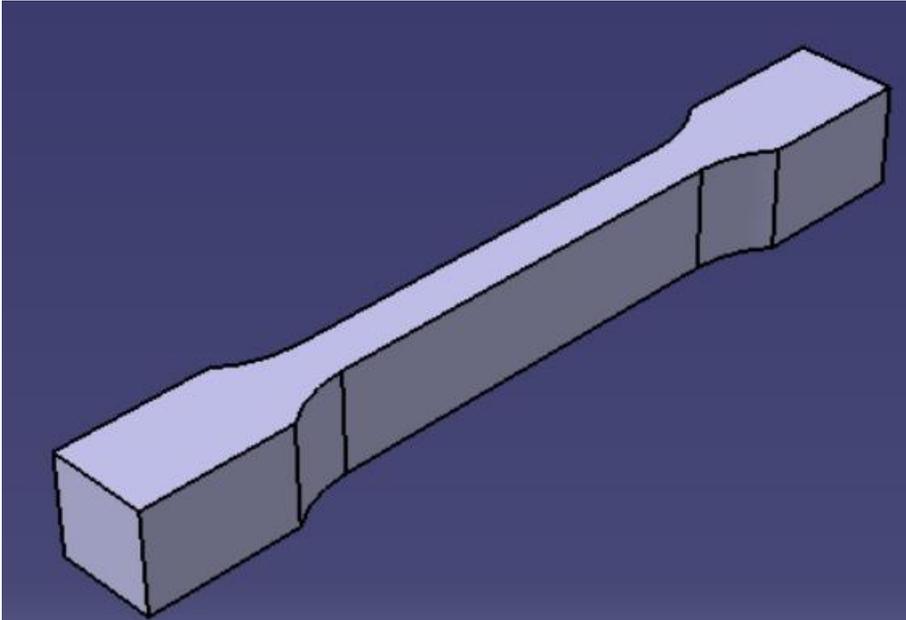


Fig. 3.52: realizzazione del provino in 3D

Dopo di che si è ottenuto il preventivo di questo provino sia considerando lavorazioni CNC, in cui si considerano lavorazioni meccaniche di precisione che implementano strumentazioni classiche come i torni e le frese, che lavorazioni tramite la stampa 3D; ciò è stato possibile inserendo il provino di riferimento sul sito disponibile nel riferimento [45] e scegliendo un materiale CNC e uno per la stampa 3D.

A titolo esemplificativo si valuta l'alluminio 7075 (Ergal) per quanto riguarda la lavorazione CNC, in cui si considera una tolleranza di $\pm 10\text{mm}$ e nessuna finitura. Nella tabella 3.75 si possono osservare i costi per l'ottenimento di queste parti, sia in base alla quantità necessaria che in base ai tempi di consegna, ipotizzando che l'ordine venga effettuato il 21/01/2021.

QTY	27/01/2021	GIO 04/02/2021	VENERDÌ 12/02/2021
1	€ 282,81	€ 208,74	€ 134,67 
2	€ 365,71	€ 269,93	€ 174,15
3	€ 445,62	€ 328,91	€ 212,20
4	€ 524,44	€ 387,09	€ 249,73
5	€ 602,16	€ 444,45	€ 286,74
10	€ 974,26	€ 719,10	€ 463,93
50	-	€ 2.185,79	€ 1.410,18
100	-	€ 2.193,03	€ 1.414,8 

Tabella 3.75: costi per la realizzazione del provino standard in Al7075

La stessa analisi è stata condotta considerando il Nylon PA12 in cui si considera una stampa 3D classica, con una struttura nera anch'essa classica. Nella tabella 3.76 si possono osservare i costi per l'ottenimento di

queste parti, sia in base alla quantità necessaria che in base ai tempi di consegna, ipotizzando che l'ordine avvenga il 21/01/2021.

QTY	27/01/2021	VENERDÌ 29/01/2021	DOMENICA 03/02/2021
1	€ 49,92 €	€ 37,94	€ 19,97 
2	€ 99,72 €	€ 75,78	€ 39,87
3	€ 149,32	€ 113,50	€ 59,74
4	€ 198,79 €	€ 151,07	€ 79,48
5	€ 248,06	€ 188,57	€ 99,22
10	€ 492,25	€ 373,99 €	€ 196,84 €
100	€ 4.208,83	€ 3.198,68	€ 1.683,96
1000	-	-	€ 13.375,1 

Tabella 3.76: costi per la realizzazione del provino AM in Nylon PA12

4. CERTIFICAZIONE PER L'ADDITIVE MANUFACTURING

L'Organismo di Certificazione TEC Eurolab permette di qualificare i processi in Additive Manufacturing, un settore che non è ancora regolamentato e standardizzato. Per qualificare il processo dovranno essere soddisfatti i criteri di accettabilità in funzione del tipo di polvere utilizzata, del procedimento, delle variabili di processo, delle prove a fatica, della difettologia, della tomografia e della rugosità superficiale. Per verificarne l'affidabilità, i prodotti saranno sottoposti a prove di laboratorio (distruttive e non). Una volta certificato il processo, se non vengono apportate modifiche al processo stesso, la certificazione non ha scadenza.

Il settore della manifattura additiva si sta sviluppando rapidamente, specialmente nel campo della produzione seriale. La produzione additiva consente di realizzare oggetti completamente nuovi e di ridurre significativamente le catene di approvvigionamento. Quando si parla di Additive Manufacturing o manifattura additiva si intende una tecnica di produzione che, utilizzando delle tecniche differenti, permette di ottenere prodotti e manufatti dalla generazione e addizione di successivi strati di materiale. Tuttavia, esistono molti standard e requisiti, ma le linee guida per le best practices sono ancora limitate. Ciò significa che produttori, clienti e fornitori del settore devono costantemente adattarsi, il che è costoso e richiede tempo.

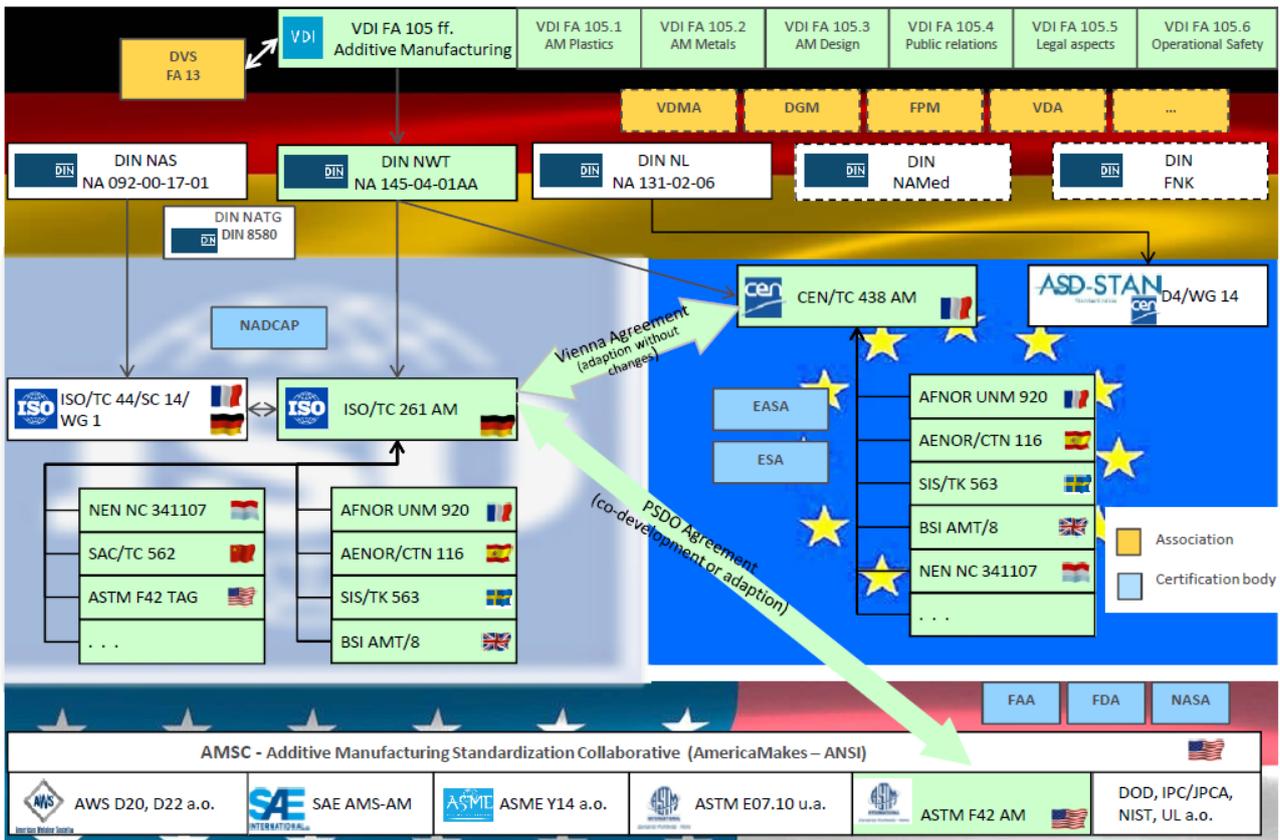


Fig. 4.1: standardizzazione dell'Additive Manufacturing nel mondo

Per spiegare meglio la figura 4.1 si considera la vasta esperienza industriale di RINA, la quale ha da tempo riconosciuto i vantaggi della tecnologia additiva; inoltre possiede la capacità di gestire l'intera catena del valore, della materie prime, cioè le polveri, fino ad arrivare ai prodotti e ai componenti finali. Come detto,

dato che l'AM rappresenta un processo relativamente nuovo, la sua standardizzazione è ancora in corso. Diverse organizzazioni tra cui ASTM ed ISO si stanno occupando della definizione e dell'adozione di linee guida e raccomandazioni. Tuttavia, l'importanza per il mercato della qualifica e della certificazione è innegabile, in particolare quando è richiesta l'"idoneità allo scopo". Per soddisfare questa esigenza, RINA ha definito una linea guida per la certificazione delle parti metalliche prodotte tramite AM. Questa descrive il processo per ottenere la certificazione dei componenti realizzati tramite additive manufacturing, seguendo un approccio sistematico attraverso le diverse fasi di progettazione e produzione. Lo scopo è supportare l'uso delle tecnologie AM come metodo di produzione alternativo. RINA fornirà inoltre all'industria una linea guida per la certificazione di parti, componenti e prodotti realizzati dai processi AM.

Gli standard più utilizzati in ambito aeronautico per AM sia per FAA che per EASA sono ASTM, SAE ed ISO e vengono utilizzati sia per la produzione che per la manutenzione dei componenti per l'aeromobile. Gli standard affrontano vari problemi relativi all'additive come la progettazione dei file CAD, i materiali, le condizioni di processo, la post lavorazione e le procedure di valutazione della qualità.

In ambito aerospaziale i materiali più usati sono le leghe di Titanio e le superleghe di Nichel, ma si stanno cercando materiali sempre più innovativi, con nuovi processi di modellazione. Boeing ha scoperto i polimeri ritardanti di fiamma, superando il test di infiammabilità.

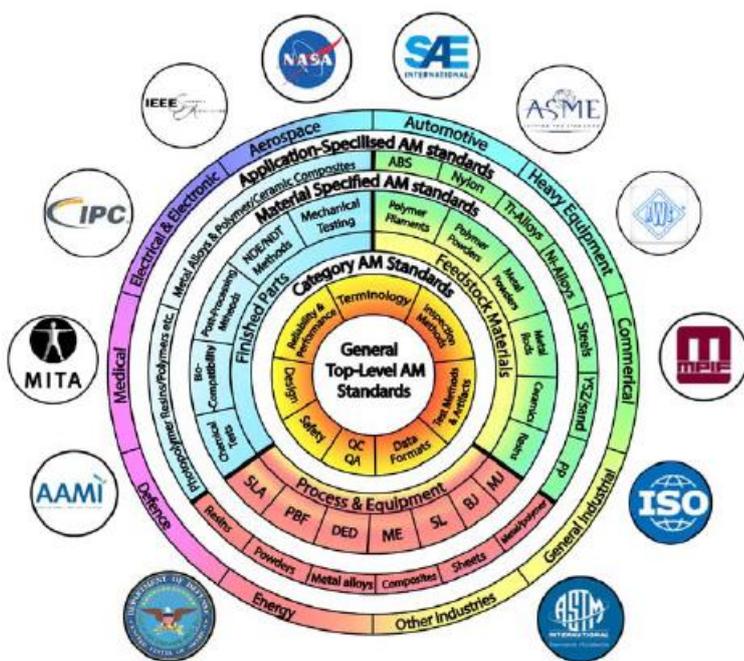


Fig. 4.2: materiali, processi e certificazioni AM in ambito aerospaziale

Si è cercato di classificare gli standard generalmente correlati al processo di produzione additiva e gli aspetti critici tramite il diagramma a ruota presentato nella figura 4.2. Si nota che sono stati compiuti alcuni progressi in termini di sviluppo degli standard relativi all'AM in generale e all'AM e alla combinazione dell'industria aerospaziale. Una ricerca approfondita delle informazioni disponibile ha portato ad osservare che esistono oltre cento standard (alcuni dei quali verranno trattati nello specifico in seguito), per lo più in fase di sviluppo o in alcuni casi già sviluppati, relativi direttamente o indirettamente alla produzione additiva. Gli standard affrontano varie questioni relative all'AM, come la progettazione dei file CAD, i materiali, le condizioni di processo, la post-elaborazione e le procedure di valutazione della qualità.

La ruota è organizzata per identificare gli standard AM a partire da quelli più generali di primo livello al mozzo centrale, che fanno riferimento agli aspetti fondamentali delle tecnologie AM. Gli standard specifici

del materiale e del processo sono presentati nell'anello anulare successivo. Questi affronteranno le questioni collegate agli standard relativi alle forme di base dei materiali, alle tecniche di lavorazione e alla finitura post-elaborazione e ai metodi di controllo. Gli standard relativi alle materie prime e ai metodi per produrli nelle forme richieste per la lavorazione additiva sono situati nel successivo anello. Gli standard specifici dell'applicazione si trovano nell'anello esterno. Come illustrato attorno a questi anelli, ci sono più di una dozzina di organizzazioni coinvolte nel processo di sviluppo di questi standard. In generale, ASTM ed ISO hanno collaborato e sono responsabili della generazione della maggior parte degli standard generalmente correlati alla produzione additive manufacturing. La maggior parte degli standard AM relativi al settore aerospaziale sono in fase di sviluppo da parte di SAE, mentre organizzazioni governative come la NASA sembrano fornire linee guida, sebbene sia difficile accertare il ruolo esatto. Tuttavia, lo sviluppo complessivo degli standard relativi alla combinazione AM e aerospaziale è lento, probabilmente a causa dei continui cambiamenti in atto nelle tecnologie che sono ancora in crescita.

4.1 Certificazione ISO 9001

Le norme della serie ISO 9000 sono state specificate dall'International Organization for Standardization per esporre i requisiti per i sistemi di gestione della qualità all'interno delle aziende. Si tratta di norme generali e flessibili, applicabili ai processi e settori aziendali più svariati. La ISO 9001 è lo standard più conosciuto ed utilizzato per i sistemi di gestione della qualità di tutto il mondo. Questo è un certificato il cui possesso dimostra che le attività dell'impresa rispecchiano i requisiti minimi della norma ISO 9001; così facendo il cliente finale può avere piena fiducia nei servizi e nei prodotti immessi sul mercato, in modo tale che corrispondano a determinate specifiche e che tutte le fasi relative alla loro realizzazione siano ripercorribili e verificabili.

La ISO 9001 è una normativa che serve a migliorare in modo continuativo e costante l'azienda, con l'obiettivo di ottimizzare la struttura organizzativa. Si tratta di una scelta strategica per le imprese che vogliono aumentare la propria produzione e abbattere i costi. Le tempistiche di certificazione sono legate in primo luogo alle dimensioni e alla complessità dell'azienda che ne fa richiesta e possono variare dai 3-4 mesi ad un anno.

La certificazione ISO 9001 deve essere richiesta ad un ente certificatore avvalendosi di una società di consulenza specializzata nella creazione e nella gestione di Sistemi di Gestione della Qualità (SGQ). Una volta realizzati tutti i passi per creare ed implementare il sistema di gestione della qualità e dopo aver implementato correttamente la norma ISO 9001 nel tessuto aziendale e nei processi aziendali, si richiederà all'ente certificatore di verificare ed attestare la conformità dell'azienda rispetto ai requisiti delineati dall'ISO 9001. Il processo certificativo consiste in diverse fasi, le quali avranno il compito di individuare le carenze dell'azienda rispetto alla norma di riferimento e mettere a punto un programma di interventi finalizzati alla loro riduzione. Questo percorso andrà ad interessare tutti i livelli della struttura aziendale, puntando alla realizzazione di una politica della qualità efficiente e coerente all'interno dell'impresa. Ulteriori passi fondamentali del processo di certificazione sono determinati dalla formazione del personale interno, dalla redazione della documentazione richiesta dall'ente certificatore e dal monitoraggio costante del sistema.

La certificazione ISO 9001 ha una durata triennale e può essere rinnovata ripetendo il percorso descritto in precedenza. Alla fine del triennio le aziende devono attivare alcune procedure per rinnovare il certificato

ISO 9001. Tali procedure normalmente non sono inserite nel lavoro di check-up e di auditing del sistema di gestione qualità che vengono attuate ogni anno e culminano in una piccola verifica che si fa con l'ente certificatore chiamata visita di sorveglianza. Come si capisce dal termine, questa verifica annuale, si attua per evitare che l'azienda dopo aver attuato la qualità dopo i primi mesi non facciano più le cose nel migliore dei modi fino alla scadenza triennale del certificato. Proprio per spingere le aziende ad un miglioramento continuo e ad un riesame continuo del sistema di gestione qualità si attua questa scadenza annuale dove si verificano da parte dell'ente certificatore i progressi effettuati nell'implementazione e nel miglioramento del sistema di qualità.

La norma 9100 serve a tutte le organizzazioni che progettano, sviluppano o forniscono prodotti e servizi per il mercato aerospaziale e della difesa, oltre alle organizzazioni che forniscono servizi logistici, di manutenzione di materiali o pezzi di ricambio per i propri prodotti o servizi. È una norma, quindi, che si applica anche a tutte le organizzazioni che operano nel settore della manutenzione aerospaziale e che commercializzano parti per il settore aeronautico.

La stesura dello standard 9100 è realizzata dall'International Aerospace Quality Group, IAQG, fondato dall'Industria Aerospaziale nel 1998, che ha sviluppato i requisiti specifici per i sistemi di gestione della qualità, che devono essere attivati e mantenuti durante tutta la fase di fornitura nelle attività di progettazione, fabbricazione e manutenzione dei prodotti usati nell'ambito aerospaziale e della difesa. Lo standard EN 9100 viene applicato negli Stati Uniti, in Europa e in Asia, per cui è uno standard che vanta un'applicazione internazionale.

La norma aggiornata, si fonda sulla High Level Structure della ISO 9001 e si concentra su due aspetti fondamentali:

- La gestione del rischio;
- Il miglioramento continuo.

Le novità introdotte dalla nuova 9100 puntano a:

- Fornire prodotti di qualità che garantiscano la sicurezza;
- Un sistema di gestione di tutta la "supply chain"
- Migliorare i requisiti di tracciabilità del prodotto;
- Essere in grado di rispondere in maniera conforme alle esigenze sia normative, sia dell'industria e anche dei clienti.

In modo particolare, la revisione dello standard ISO 9100 rispecchia il punto 10 della nuova ISO 9001, in cui si parla del "Miglioramento", che in ottica di Qualità è sempre continuo. Quindi, la nuova versione della normativa in questione interviene sui seguenti elementi:

- Sicurezza dei prodotti;
- Fattori umani;
- Rischio;
- Ricambi contraffatti;
- Gestione della configurazione;
- Gestione dei dati;
- Realizzazione e progettazione del prodotto;
- Supporto post-parto;
- Obsolescenza;
- Verifica del prodotto acquistato;
- Gestione di progetto;
- Progettazione, sviluppo e gestione dei fornitori;

- Manuale di qualità;
- Rappresentante della direzione.

4.2 Procedure operative standard NCAMP (SOP)

Lo scopo di questo paragrafo è quello di descrivere le procedure operative standard impiegate dal National Center for Advanced Materials Performance (NCAMP) per l'acquisizione dei dati sulle proprietà, la qualificazione, la generazione ed i processi di equivalenza dei materiali consentiti. Il processo è progettato per generare dati sulla proprietà del materiale con controlli sufficienti per l'invio alle sezioni di documentazione completa del manuale sui materiali compositi (CMH-17). Il processo di qualificazione dei materiali implica la qualificazione di nuovi materiali nelle specifiche di approvvigionamento, mentre si stabiliscono documenti di controllo del processo e specifiche di processo necessarie per garantire proprietà coerenti ed affidabili per i materiali. Il processo di equivalenza è progettato per valutare gli effetti di piccoli cambiamenti nel materiale o nel processo; confronta un nuovo set di dati con uno esistente utilizzando test statistici delineati nel DOT/FAA/AR-03/19 e la sezione 8.4.1 di MIL-HDBK-17-1F. NCAMP è un centro all'interno del National Institute for Aviation Research (NIAR) ed opera indipendentemente da altri laboratori del NIAR.

Il database delle proprietà dei materiali condiviso dall'NCAMP contiene dati sulle proprietà dei materiali e specifiche di materiali e processi di utilità comune ad un'ampia gamma di progetti aerospaziali. L'intento di NCAMP è quello di promuovere la pubblicazione di dati per materiali compositi avanzati che possono essere utilizzati nella progettazione e certificazione della struttura dell'aeromobile. Tuttavia, non è previsto che i dati forniti soddisfino tutte le esigenze di progettazione di ogni progetto. Ogni utente dovrà valutare i dati disponibili rispetto alle proprietà, agli ambienti, all'architettura del laminato e alle situazioni di carico specifici dei propri progetti. Nella maggior parte delle applicazioni saranno necessari ulteriori test.

L'uso del materiale NCAMP e delle specifiche di processo non garantiscono le prestazioni strutturali o dei materiali. Gli utenti dei materiali devono istruire come minimo, ma non in modo limitato, il controllo di qualità richiesto, eseguire regolarmente dei test di controllo della qualità dell'acquirente, eseguire test periodici di equivalenza/aggiuntivi, condurre azioni di controllo statistico della specifica e condurre audit periodici dei fornitori al fine di implementare correttamente le specifiche NCAMP. Nella maggior parte dei casi, i materiali consentiti pubblicati da NCAMP non sono direttamente utilizzabili come valori di progettazione che soddisfano tutti i requisiti normativi. Gli utenti dei materiali potrebbero dover derivare i valori di progetto dai materiali consentiti forniti per garantire compatibilità con i laminati effettivamente utilizzati, i loro metodi analitici interni, l'approccio alla certificazione e altri fattori. In molti casi, sono necessari test aggiuntivi per integrare i dati NCAMP al fine di derivare un set completo di valori di progetto per un dato programma. La qualità dei test aggiuntivi dipende dalla complessità e dalla criticità della struttura progettata. NCAMP non si assume alcuna responsabilità, espressa o implicita, relativa all'uso dei dati sulla proprietà del materiale, sui materiali consentiti e sulle specifiche.

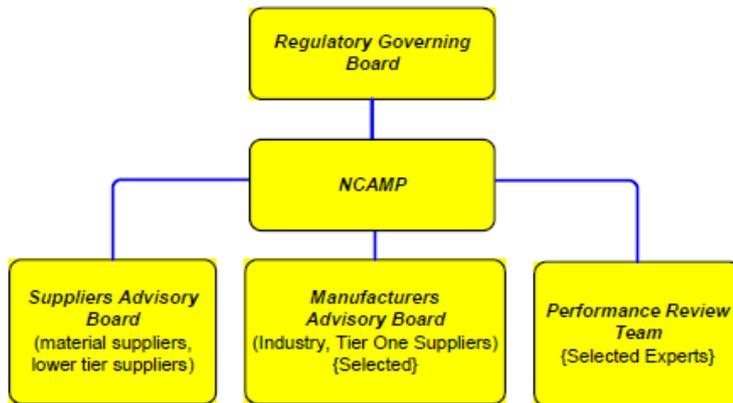


Fig. 4.3: struttura organizzativa NCAMP

Il piano di test è progettato per acquisire dati sulle proprietà dei materiali per la generazione di materiali consentiti e per scopi della loro qualificazione. Di solito viene creato un piano di prova univoco per ogni sistema di materiale; esso deve contenere dettagli e requisiti sufficienti come la temperatura di prova, gli standard dei metodi di prova e le configurazioni dei provini. In generale, le proprietà del materiale sono destinate ad essere condivise all'interno di molte aziende aerospaziali per un'ampia gamma di applicazioni. Le matrici di prova hanno lo scopo di generare dati di livello base, lamina di blocchi di costruzione e laminati di utilità comune; di conseguenza, i dati sulle proprietà del materiale potrebbero non soddisfare tutti i requisiti di un'applicazione specifica. Potrebbero essere necessari ulteriori test per proprietà, ambienti, architettura del laminato e situazioni di carico specifiche delle singole applicazioni. Le specifiche sono collegate ai materiali consentiti attraverso i limiti delle specifiche dei materiali che derivano dai dati sulle proprietà utilizzando la metodologia di riferimento.

La specifica del processo descrive i metodi di fabbricazione dei pannelli di prova da utilizzare per la qualificazione dei materiali, l'equivalenza e le prove di accettazione. Di solito, viene creata una specifica di processo univoca per ogni sistema di resina e come minimo, la specifica del processo deve contenere informazioni sufficienti sul processo di fabbricazione del pannello come utensili, materiali di insacco, procedure di insacco e ciclo di polimerizzazione per garantire la produzione di pannelli di test di qualità coerenti e ripetibili. Questa specifica non contiene tutte le informazioni necessarie e tipicamente richieste in una specifica di processo composito per la fabbricazione di strutture di aeromobili, come le procedure di giunzione strato/anima, qualificazione del personale e requisiti della stanza di layup. Gli utenti devono fare riferimento alle specifiche dei processi aziendali esistenti per tali informazioni.

I piani di test di equivalenza vengono utilizzati per generare un piccolo insieme di proprietà dei materiali a fini statistici tramite il confronto con un ampio set di dati, in genere il set di dati di qualificazione. Di solito viene creato un piano di test univoco per ogni programma di equivalenza. In generale, i metodi e i requisiti di prova sono identici a quelli utilizzati nel programma di qualificazione originale. Il piano di prova deve specificare lo scopo del programma di equivalenza. Maggiori informazioni sul processo di equivalenza, comprese le statistiche del test e le sue limitazioni, possono essere trovate nella sezione 6 del DOT/FAA/AR-03/19 e nella sezione 8.4.1 di MIL-HDBK-17-1F.

Il processo iniziale di qualificazione del materiale e acquisizione dei dati sulle proprietà inizia con la creazione di bozze di versioni dei seguenti documenti NCAMP:

1. Acquisizione dei dati sulle proprietà dei materiali e piano di test di qualificazione;
2. Specifica del materiale;
3. Specifiche del processo.

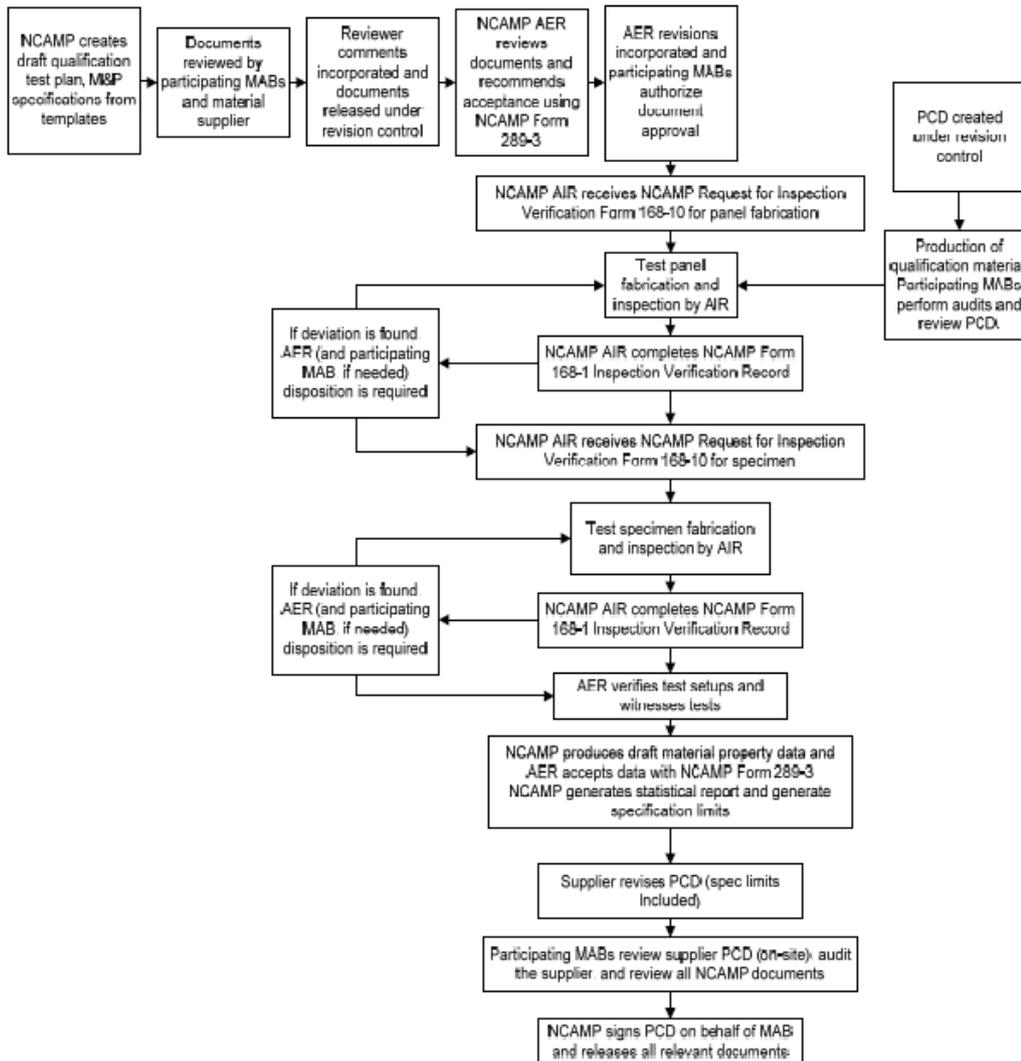


Fig. 4.4: diagramma di flusso del processo di qualificazione dei materiali e sull'acquisizione dei dati per le proprietà

Il programma di equivalenza è delineato nella figura 4.5 che generalmente inizia con la creazione di una bozza di un piano di test di equivalenza. La specifica del materiale e del processo sono solitamente le stesse del programma di qualificazione; qualsiasi deviazione deve essere indicata nei documenti applicabili. Il richiedente partecipante e l'azienda di certificazione devono accettare la deviazione. I documenti di un programma precedente che sono stati esaminati dai membri dell'NCAMP vengono solitamente utilizzati come "modello" per creare la bozza dei documenti. I partecipanti al programma esamineranno la bozza dei documenti. Dopo di che i loro commenti sono stati incorporati e vengono rilasciati sotto il controllo di revisione e inviati ad un NCAMP AER (Authorized Engineering Representative) per la revisione. L'NCAMP AER raccomanderà l'approvazione dei documenti ai partecipanti al programma utilizzando il modulo NCAMP 289-3. Tutti i partecipanti al programma devono concordare con i documenti e fornire l'autorizzazione all'NCAMP per l'approvazione dei documenti.

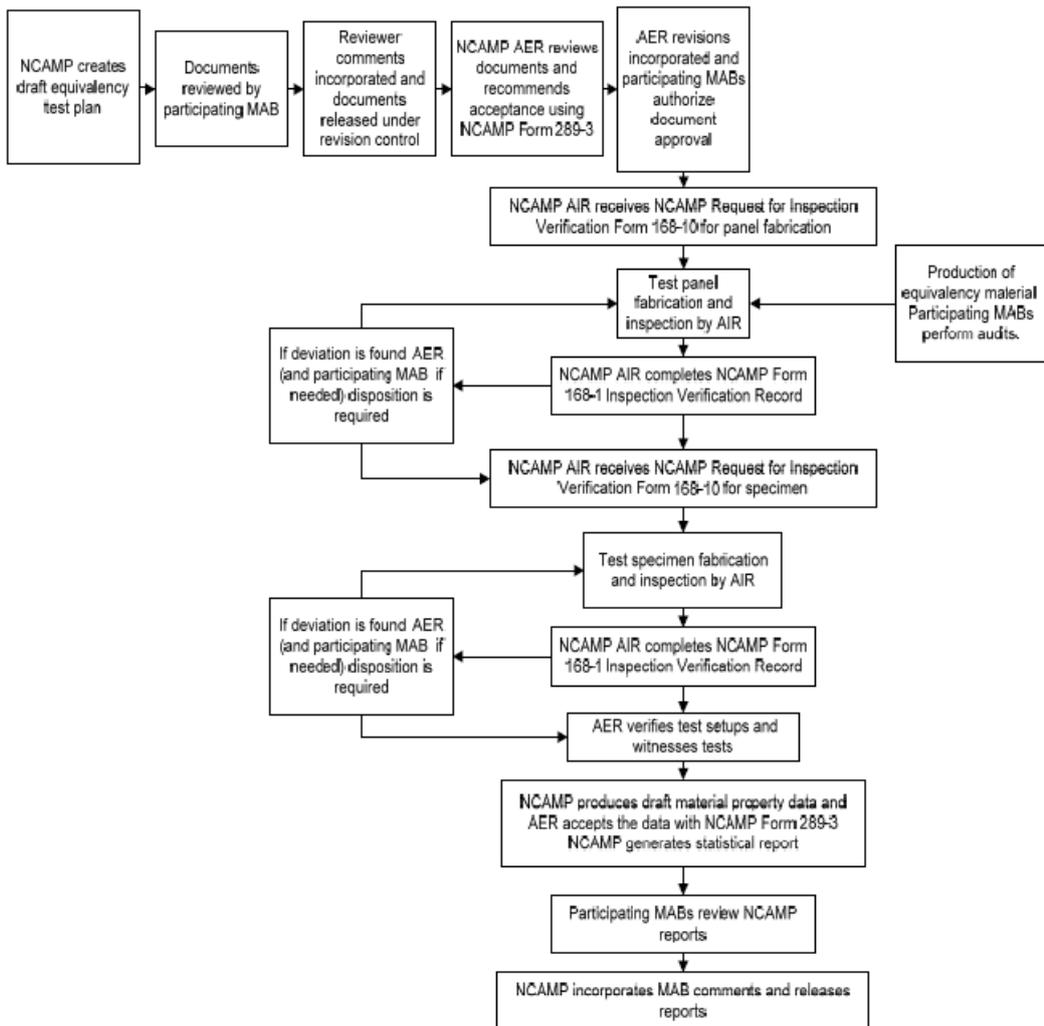


Fig. 4.5: diagramma di flusso del processo di equivalenza per i produttori di parti

Le revisioni alle specifiche dei materiali NCAMP, alle specifiche di processo, ai rapporti sui dati delle proprietà dei materiali e ai rapporti sui materiali consentiti devono essere conformi alla figura 4.6. NCAMP inizia il processo creando bozze di documenti con la presenza di rilevazioni sulle modifiche, insieme ad una descrizione dettagliata e il motivo del cambiamento. I documenti verranno caricati sul portale NCAMP dove i membri riceveranno una notifica via e-mail del processo di revisione e le istruzioni su come scaricare i documenti.

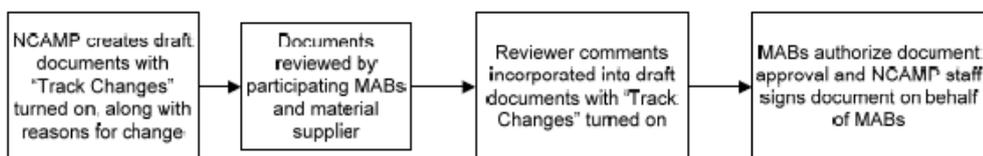


Fig. 4.6: diagramma di flusso del processo di revisione del documento NCAMP

4.3 Panoramica del processo certificativo per parti in AM

Affinché un sistema aereo venga accettato nel registro degli aeromobili militari (MAR), deve passare attraverso il processo di certificazione del sistema aereo militare (MACP) come definito nell'articolo della

regolamentazione RA5810. Per le parti da utilizzare su aeromobili esistenti è probabile che l'uso di una parte AM sia classificata come una modifica importante rispetto a quella della sua certificazione di tipo militare (MTC) originale perché rappresenterà almeno una modifica al processo di produzione. Una guida alla classificazione delle modifiche come maggiori o minori è fornita nell'articolo della regolamentazione RA5820. L'aeromobile normalmente dovrà passare attraverso il MACP in modo che la MAA (Midlands Aerospace Alliance), in qualità di autorità indipendente, possa valutare se le disposizioni di aeronavigabilità in atto per il sistema aereo siano adeguate; se adeguate verrà rilasciato un MTC aggiornato. La modifica deve essere giustificata dal DO al Type Airworthiness Authority (TAA). Gli avvisi di regolamentazione (RN) MAA/RN/2016/12 e MAA/RN/2016/13 forniscono spiegazioni rispettivamente sugli MTC e sulle modifiche di progettazione approvate.

In figura 4.7 è rappresentato uno schema semplificato del processo MCRI (Military Certification Review Item) in base al quale un'organizzazione di progettazione (DO) approvata giustifica che una parte sia aeronavigabile. Il processo fa parte del MACP per l'emissione dell'MTC o per l'emissione di un certificato di modifica del progetto approvato (ADCC) laddove non esiste un MTC. In entrambi i casi ciò sarà sostenuto dalla produzione di un rapporto di certificazione del tipo (TCR). Una parte AM deve soddisfare i requisiti di resistenza strutturale e fatica come specificato in Def Stan 00-970 parte 1 sezione 3.

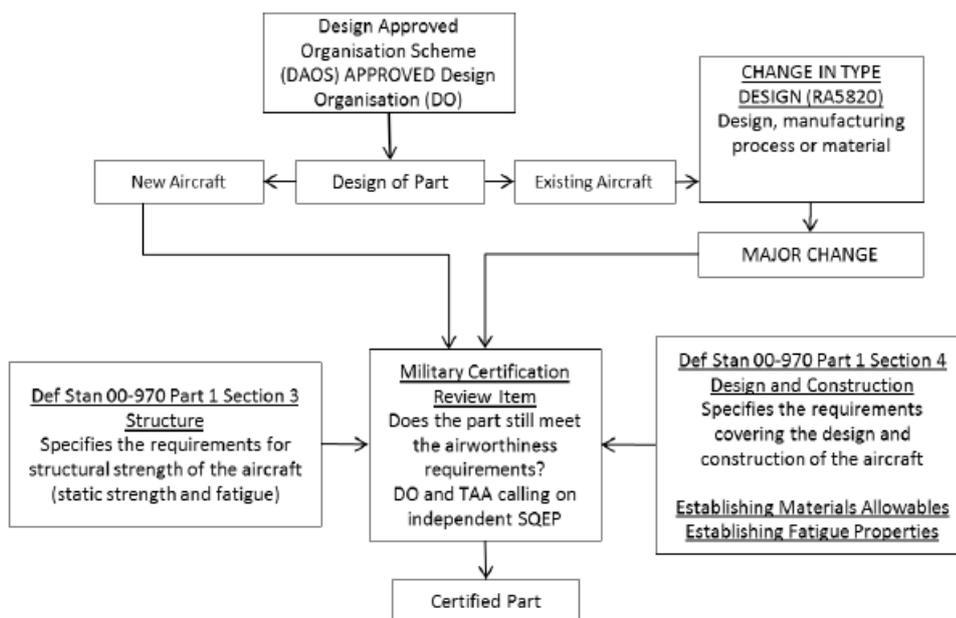


Fig. 4.7: schema semplificato del processo attraverso il quale una parte può essere certificata come aeronavigabile da un DO approvato dal TAA, che può chiamare una persona indipendentemente adeguatamente qualificata ed esperta (SQEP) per supportare il processo MCRI

A causa della natura dell'AM, si può presumere che anche per i nuovi aeromobili una parte AM richiederà un processo di tipo MCRI fino a quando non saranno stati stabiliti processi e procedure per la progettazione e la certificazione delle parti e le caratteristiche del processo di produzione per ciascuna. Si raccomanda che una parte AM, sia per un aeromobile nuovo che esistente, sia soggetta al processo MCRI fino a quando la tecnologia non è sufficientemente matura per mantenere la variabilità in modo prevedibile e ripetibile (REC3.1). I metodi da utilizzare per stabilire i materiali ammissibili e le proprietà di fatica delle parti sono specificati nella Def Stan 00-970 Parte 1 Sezione 4.

È necessario stabilire che il progetto del tipo di un aeromobile soddisfi gli standard di aeronavigabilità appropriati, come richiesto da RA5810 e stabilito dalla MAA; altre autorità di aeronavigabilità hanno norme

simili. Come parte del TCB Telecommunication Certification Body) è richiesto un processo di certificazione per dimostrare che il progetto soddisfi i requisiti stabiliti per l'apparecchiatura.

Le RA della MAA forniscono requisiti AMC e linee guida per la progettazione di aeromobili per soddisfare i requisiti di aeronavigabilità per le operazioni militari nel Regno Unito. Lo standard di difesa 00-970 (Def Stan 00-970), i requisiti di progettazione e aeronavigabilità per aeromobili di servizio fornisce lo standard di progettazione che deve essere mantenuto per tutta la vita del velivolo. È un documento ampio: è diviso in otto parti (esclusa la parte 0 che è la guida), che copre tutti i tipi di aeromobili militari, motori e le relative apparecchiature e include allegati e opuscoli che forniscono ulteriori indicazioni su altri standard applicabili e correlati (ad esempio specifiche del dipartimento della difesa degli Stati Uniti), nonché indicazioni sui metodi di conformità accettabili e informazioni tecniche supplementari.

A colpo d'occhio la struttura del documento è mostrata in figura 4.8. Lo standard contiene definizioni di diversi tipi di aeromobili utilizzati nelle operazioni militari e quale parte è applicabile a ciascun tipo di aeromobile e utilizzo militare.

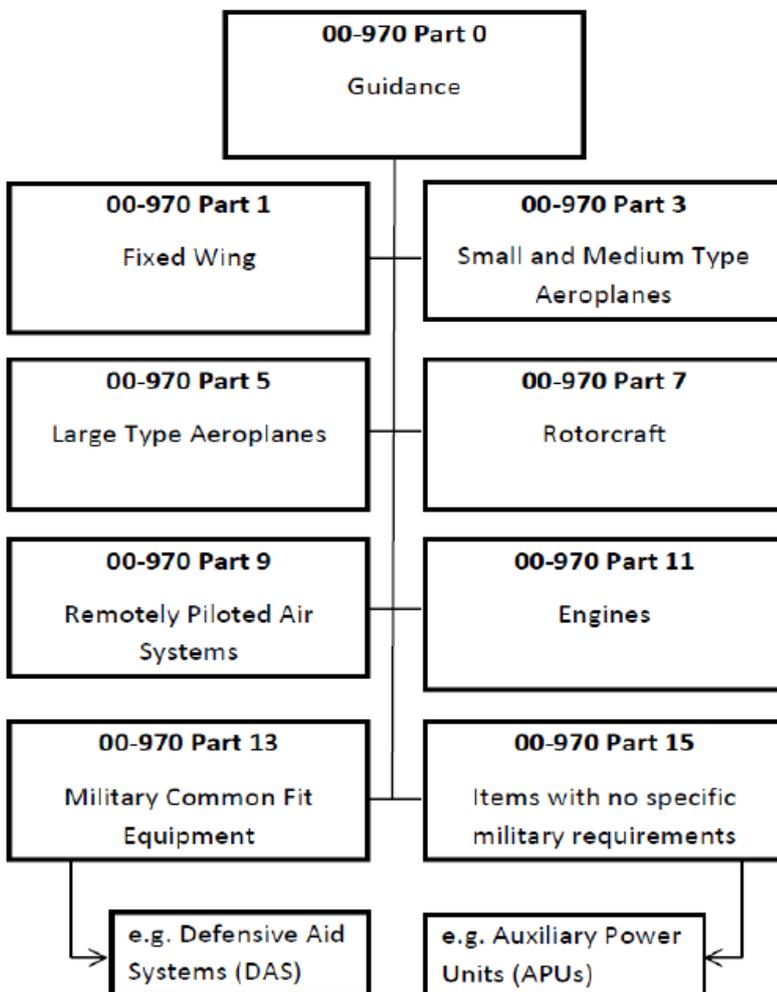


Fig. 4.8: panoramica della struttura di Def Stan 00-970

4.4 Attività di normazione relativa all'additive

Di seguito si effettua una panoramica sulle attività di normazione inerenti l'AM e si propone come un documento di lavoro utile per individuare le norme pubblicate e i documenti in via di sviluppo da parte delle principali organizzazioni che si occupano di normativa sull'argomento in oggetto, essendo che il lavoro principale è il risultato della proficua collaborazione tra l'ISO/TC 261 e l'ASTM F42.

Nel giugno 2018 la America Makes and AISI Additive Manufacturing Standardization Cooperation (AMSC) hanno pubblicato la versione 2.0 della Standardization Roadmap for Additive Manufacturing. La roadmap identifica 93 gaps e propone le relative raccomandazioni, suddivise nelle seguenti aree:

- Progettazione;
- Materiali e processi;
- Qualificazione e certificazione;
- Prove non distruttive;
- Manutenzione.

18 gaps sono indicati con alta priorità, 51 con media priorità e 24 con bassa priorità. In 65 casi si ritiene che siano necessarie attività aggiuntive di ricerca e sviluppo. Tutte le SDos (Standards Development Organizations), comprese l'ISO e la ASTM, stanno aggiornando le priorità nel campo dell'Additive Manufacturing tenendo conto del documento AMSC.

Gruppo di lavoro	Denominazione	Convenor	Paese
ISO/TC 261/WG 1	Terminology	Klas BOIVIE	NO
ISO/TC 261/WG 2	Processes, systems and materials	Markus LAKOMIEC	DE
ISO/TC 261/WG 3	Test methods and quality specifications	Benoit VERQUIN	FR
ISO/TC 261/WG 4	Data and Design	Eujin PEI	UK
ISO/TC 261/JWG 5	Additive manufacturing in aerospace applications	Ralph KROPP	DE
ISO/TC 261/WG 6	Environment, health and safety	François RICHARD	CA

Tabella 4.1: gruppi di lavoro dell'ISO/TC 261

Identificazione del documento	Titolo
ISO 17296-2:2015	Additive manufacturing -- General principles -- Part 2: Overview of process categories and feedstock
ISO 17296-3:2014	Additive manufacturing -- General principles -- Part 3: Main characteristics and corresponding test methods
ISO 17296-4:2014	Additive manufacturing -- General principles -- Part 4: Overview of data processing
ISO/ASTM 52900:2015	Additive manufacturing -- General principles -- Terminology
ISO/ASTM 52901:2017	Additive manufacturing -- General principles -- Requirements for purchased AM parts
ISO/ASTM 52910:2018	Additive manufacturing -- Design -- Requirements, guidelines and recommendations
ISO/ASTM 52915:2016	Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2 (that replaces the originally envisaged ISO 17296-1)
ISO/ASTM 52921:2013	Standard terminology for additive manufacturing -- Coordinate systems and test methodologies

Tabella 4.2: lista dei documenti ISO/TC 261

Identificazione	Titolo	Note
ISO/ASTM DIS 52900	Additive manufacturing -- General principles -- Terminology	Sostituirà la ISO/ASTM 52900:2015
ISO/ASTM DIS 52902	Additive manufacturing -- Test artefacts -- Standard guideline for geometric capability assessment of additive manufacturing systems	
ISO/ASTM DIS 52903-1	Additive manufacturing -- Standard specification for material extrusion based additive manufacturing of plastic materials -- Part 1: Feedstock materials	

Identificazione	Titolo	Note
ISO/ASTM DIS 52903-2	Additive manufacturing -- Standard specification for material extrusion based additive manufacturing of plastic materials -- Part 2: Process -- Equipment	
ISO/ASTM AWI 52903-3	Additive Manufacturing -- Standard Specification for Material Extrusion Based Additive Manufacturing of Plastic Materials -- Part 3: Final parts	Chiarimento: AWI (Approved Work Item), stage 10.99
ISO/ASTM DIS 52904	Additive manufacturing -- Process characteristics and performance -- Standard practice for metal powder bed fusion process to meet critical applications	
ISO/ASTM CD 52905	Additive manufacturing -- General principles -- Non-destructive testing of additive manufactured products	Diventerà un Technical Report
ISO/ASTM CD TR 52906	Additive manufacturing -- Non-destructive testing and evaluation -- Standard guideline for intentionally seeding flaws in additively manufactured (AM) parts	
ISO/ASTM DIS 52907	Additive manufacturing -- Technical specifications on metal powders	
ISO/ASTM DIS 52911-1	Additive manufacturing -- Technical design guideline for powder bed fusion -- Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals	
ISO/ASTM DIS 52911-2	Additive manufacturing -- Technical design guideline for powder bed fusion -- Part 2: Laser-based powder bed fusion of polymers	
ISO/ASTM CD TR 52912	Additive manufacturing - Design - Functionally graded additive manufacturing	Publicazione prevista per l'inizio 2019
ISO/ASTM DIS 52915	Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2	Sostituirà la versione del 2016
ISO/ASTM WD 52916	Additive manufacturing -- Data formats -- Standard specification for optimized medical image data	
ISO/ASTM CD 52921	Standard terminology for additive manufacturing -- Coordinate systems and test methodologies	Sostituirà la versione del 2013
ISO/ASTM WD 52932	Additive manufacturing -- Environmental health and safety - Standard test method for determination of particle emission rates from desktop 3D printers using material extrusion	
ISO/ASTM WD 52941	Additive manufacturing -- System performance and reliability -- Standard test method for acceptance of powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application	
ISO/ASTM WD 52942	Additive manufacturing -- Qualification principles -- Standard guideline for qualifying machine operators of powder-bed based laser beam machines in aerospace applications	

Tabella 4.3: lista di documenti in via di sviluppo da parte dell'ISO/TC 261

Le attività di normazione inerenti alle tecnologie additive sono svolte dal comitato tecnico F42 Additive Manufacturing dell'ASTM International che è principalmente composta dai seguenti sottocomitati:

- F42.01: metodi di prova;
- F42.04: design;
- F42.05: materiali e processi:
 - o F42.05.01: metalli;
 - o F42.05.02: polimeri;
 - o F42.05.03: applicazioni mediche;
 - o F42.05.04: applicazioni aerospaziali.
- F42.06: ambiente, salute e sicurezza;
- F42.91: terminologia.

Documento	Stato	Titolo
ASTM F2924-14	attivo	Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion
ASTM F3001-14	attivo	Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) with Powder Bed Fusion
ASTM F3049-14	attivo	Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes
ASTM F3055-14a	attivo	Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion
ASTM F3056-14e1	attivo	Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06625) with Powder Bed Fusion
ASTM F3091 / F3091M-14	attivo	Standard Specification for Powder Bed Fusion of Plastic Materials
ASTM F2971-2013	attivo	Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing
ASTM F3122-2014	attivo	Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes
ASTM F3184 - 16	attivo	Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion
ASTM F3187 - 16	attivo	Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals
ASTM F3213-17	attivo	Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum via Powder Bed Fusion
ASTM F3301-18a	attivo	Standard for Additive Manufacturing – Post Processing Methods – Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion
ASTM F3302-18	attivo	Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Standard Specification for Titanium Alloys via Powder Bed Fusion
ASTM F3303-18	attivo	Standard for Additive Manufacturing – Process Characteristics and Performance: Practice for Metal Powder Bed Fusion Process to Meet Critical Applications
ASTM F3318-18	attivo	Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Specification for AISi10Mg with Powder Bed Fusion – Laser Beam
ISO/ASTM52900-15	attivo	Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology
ISO/ASTM52901-16	attivo	Standard Guide for Additive Manufacturing – General Principles – Requirements for Purchased AM Parts
ISO/ASTM52921-13	attivo	Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies
ASTM F2792-12a	ritirato	Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Ritirato nel 2015 e sostituito dal documento ISO/ASTM52900-15)

Tabella 4.4: lista dei documenti pubblicati dall'ASTM F42

Il CEN/TC 438 è stato fondato nel 2015 con i seguenti obiettivi principali:

- Rendere disponibile un insieme di norme europee relativamente ai processi, alle procedure di test, ai parametri qualitativi, alle regole fondamentali per i contratti di fornitura e alla terminologia basata, ove possibile, su norme Internazionali;

- Applicare il Vienna Agreement (trattato tra gli stati) con ISO/TC 261 in modo da assicurare consistenza ed armonizzazione;
- Rafforzare il collegamento tra i programmi europei di ricerca e la normalizzazione relativamente alle tecnologie additive.

Identificazione	Titolo	Stato
EN ISO/ASTM 52921:2016	Standard terminology for additive manufacturing — Coordinate systems and test methodologies (ISO/ASTM 52921:2013)	Pubblicata
EN ISO 17296-2:2016	Additive manufacturing — General principles - Part 2: Overview of process categories and feedstock (ISO 17296-2:2015)	Pubblicata
EN ISO 17296-3:2016	Additive manufacturing — General principles — Part 3: Main characteristics and corresponding test methods (ISO 17296-3:2014)	Pubblicata
EN ISO 17296-4:2016	Additive manufacturing — General principles — Part 4: Overview of data processing (ISO 17296-4:2014)	Pubblicata
EN ISO/ASTM 52900:2017	Additive manufacturing — General principles — Terminology (ISO/ASTM 52900:2015)	Pubblicata
EN ISO/ASTM 52915:2017	Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2 (ISO/ASTM 52915:2016)	Pubblicata
prEN ISO/ASTM 52902	Additive manufacturing — General principles — Standard test artifacts	Registrata
prEN ISO/ASTM 52905	Additive manufacturing — General principles — Non-destructive testing of additive manufactured products	Registrata
prEN ISO/ASTM 52903-2	Additive Manufacturing — Standard Specification for Material Extrusion Based Additive Manufacturing of Plastic Materials — Part 2 Process - equipment	Registrata
prEN ISO/ASTM 52903-3	Additive Manufacturing — Standard Specification for Material Extrusion Based Additive Manufacturing of Plastic Materials — Part 3: Final parts	Registrata
prEN ISO/ASTM 52911-1	Additive manufacturing — Technical Design Guideline for Powder Bed Fusion — Part 1: Laser based Powder Bed Fusion of Metals	Registrata
prEN ISO/ASTM 52911-2	Additive manufacturing — Technical Design Guideline for Powder Bed Fusion — Part 2: Laser based Powder Bed Fusion of Polymers	Registrata
prEN ISO/ASTM 52907	Additive manufacturing — Technical specifications on metal powder	Registrata
prEN ISO/ASTM 52900	Additive manufacturing - General principles - Terminology (ISO/ASTM DIS 52900:2018)	Registrata
prEN ISO/ASTM 52915 rev	Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2	Registrata
prEN/ISO/ASTM TR 52912	Technical Report for the Design of Functionally Graded Additive Manufactured Parts	Registrata
prEN ISO/ASTM 52901	Additive manufacturing — General principles - Requirements for purchased AM parts (ISO/ASTM 52901:2017)	Registrata
prEN ISO/ASTM 52941	Additive manufacturing — System performance and reliability — Standard test method for acceptance of powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application	Registrata
EN ISO/ASTM 52942	Additive manufacturing — Qualification principles — Standard guideline for qualifying machine operators of powder bed-based laser beam machines in aerospace applications	Registrata

Tabella 4.5: lista dei documenti pubblicati dal CEN/TC 438

All'interno della struttura della VDI (Verein Deutscher Ingenieurteg) tedesca, le attività di normazione relative all'AM sono state condotte dalla VDI Fachausschuss GPL FB1_FA105. Il comitato tecnico FA105 è stato fondato nel 2003 ed è composto dai seguenti sottocomitati:

- FA105.1: materiali plastici per AM;
- FA105.2: materiali metallici per AM;
- FA105.3: design per AM;
- FA105.4: relazioni pubbliche per AM;
- FA105.5: aspetti legali per AM;
- FA105.6: sicurezza operativa per AM.

Documento (mese/anno)	Titolo
VDI 3405 (12/2014)	Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - Basics, definitions, processes
VDI 3405-2 (08/2013)	Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - Beam melting of metallic parts - Qualification, quality assurance and post processing
VDI 3405-1 (10/2013)	Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - Laser sintering of polymer parts - Quality control
VDI 3405-2.1 (07/2015)	Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - Laser beam melting of metallic parts; Material data sheet aluminium alloy AlSi10Mg
VDI 3405-3 (12/2015)	Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - Design rules for part production using laser sintering and laser beam melting
VDI 3405 -2.1 Berichtigung (01/2017)	Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - Laser beam melting of metallic parts - Material data sheet aluminium alloy AlSi10Mg - Corrigendum concerning standard VDI 3405 Part 2.1:2015-07
VDI 3405 -2.2 (07/2017)	Additive manufacturing processes - Laser beam melting of metallic parts - Material data sheet nickel alloy material number 2.4668
VDI 3405-6.1 (06/2018) Draft in Tedesco	Additive manufacturing processes - User safety on operating the manufacturing facilities - Laser beam melting of metallic parts
VDI 3405-2.3 (07/2018)	Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - Beam melting of metallic parts - Characterisation of powder feedstock
VDI 3405-1.1 (09/2018)	Additive manufacturing processes - Laser sintering of polymer parts - Qualification of materials
VDI 3405-3.5 (09/2018)	Additive manufacturing processes, rapid manufacturing - Design rules for part production using electron beam melting
VDI 3405-7 (09/2018) Draft in Tedesco	Additive manufacturing processes - Quality grades for additive manufacturing of polymer parts

Tabella 4.6: lista dei documenti pubblicati dalla VDI FA105

4.5 Roadmap sugli standard Additive Manufacturing

4.5.1 Piano di lavoro e roadmap per ASTM ed ISO

La roadmap è costituita da tre compiti principali:

- Raccogliere e valutare le informazioni da altre tabelle di marcia pertinenti e sviluppi più importanti in questo settore;
- Trasformare il risultato e le conclusioni di questa raccolta di informazioni e associarlo al sondaggio sulle parti interessate e sui requisiti AM;
- Raccogliere feedback, finalizzare e pubblicare la roadmap per la standardizzazione al servizio della tecnologia AM.

Il progetto SASAM (Support Action for Standardisation in Additive Manufacturing) ha anche esaminato i contributi delle parti interessate degli standard AM europei attraverso un sondaggio, che consisteva in un totale di 102 intervistati provenienti dall'industria, dalla ricerca e da enti governativi. I risultati del sondaggio includono:

- Gli standard sono utilizzati dalla maggioranza dei partecipanti;
- C'è un urgente bisogno di standard AM;
- È di grande importanza che gli standard AM siano accettati a livello globale ed internazionale;
- I requisiti del cliente (utente finale delle parti AM) sono i diretti interessati per l'utilizzo degli standard, anche per i prossimi standard AM;

- Gli argomenti prioritari per la standardizzazione AM sono i materiali, processi/metodi e metodi di prova;
- L'affidabilità delle macchine e dei processi dovrebbe migliorare grazie allo sviluppo e all'applicazione degli standard;
- L'argomento più comune per la necessità di standard è la qualità o la qualificazione (del sistema, dei materiali, delle parti e del controllo qualità);
- Le opportunità di mercato sono direttamente correlate agli standard futuri.

SASAM ha evidenziato le esigenze delle parti interessate dell'UE nello sviluppo degli standard AM. Questa attività di standardizzazione consentirà all'industria AM nell'UE di espandersi rapidamente nel business AM esistente, come quello aerospaziale e in nuovi settori. Dopo aver valutato i documenti esistenti e il piano di lavoro congiunto tra ASTM F42 ed ISO/TC 261, sono stati redatti accordi chiave sulla base dei seguenti principi:

- Un set di standard AM da utilizzare in tutto il mondo;
- Roadmap e struttura organizzativa comuni per gli standard AM;
- Utilizzare ed elaborare gli standard esistenti, modificati per AM quando necessario;
- ISO/TC 261 ed ASTM F42 dovrebbero lavorare insieme e nella stessa direzione per efficienza ed efficacia.

È stato raggiunto un consenso da tutte le parti per seguire le linee guida redatte da SASAM.

TRL	Goals	
NIL	Certification for quality of life enhancing applications	2014–2018
NIL	Certification for energy saving applications	2016–2020
NIL	General mechanical applications	2018–2022
Productivity/other		
5-6	Post-processing	2016–2018
7-9	Process monitoring	2016–2018
5-6	Lattice Structures	2018–2022
5-6	Database with material properties	2015–2019
Materials		
5-6	Ti grade 1	2014–2016
5-6	CoCr	2017–2019
1-4	Al	2018–2020
5-6	TAI	2015–2017
5-6	Tool steel	2018–2020
7-9	TAI 64	2016–2018
5-6	Inconel 635 and 718	2016–2017
5-6	Stainless steel	2018–2020
1-4	Gold and bronze	2021–2022
7-9	PA12	2015–2017
1-4	ABS	2017–2019
7-9	PA11	2016–2018
5-6	MED610	2019–2022
5-6	Rubber-like	2018–2020
5-6	PEEK	2020–2022
7-9	PA flame retardant	2016–2018
1-4	Ceramics alumina	2019–2022
Process stability/product quality		
1-4	Fatigue testing	2015–2017
1-4	Creep	2019–2021
7-9	Geometrical tolerance	2014–2015
5-6	Flexural strength	2016–2018
5-6	Shear resistance	2020–2022
5-6	Impact strength	2017–2019
7-9	Surface texture	2020–2022
7-9	Tensile strength	2014–2016
7-9	Crack extension	2018–2019
7-9	Ageing	2020–2022
7-9	Size, length and angle dimensional tolerances	2014–2016
5-6	Compressive properties	2018–2020
7-9	Hardness	2018–2020
7-9	Appearance	2021–2022

Tabella 4.7: roadmap per la standardizzazione AM pubblicato nel 2015

4.5.2 Aree prioritarie sugli standard AM

SASAM ha redatto alcuni elenchi di aree ad alta priorità per gli standard AM dopo la valutazione dei documenti preparati dalla comunità AM. Dalla struttura della tabella di marcia comune sviluppata da ASTM F42 ed ISO/TC 261, la standardizzazione dei lavori in corso è classificata in cinque aree prioritarie come segue:

- Standard per l'integrazione;
- Standard per la sostenibilità ambientale;
- Standard di qualità e prestazioni;
- Standard di servizio;
- Standard dei rischi.

Due elenchi di elementi ad alta priorità che richiedono attenzione sono stati redatti dal feedback consolidato da SASAM. Il primo elenco consiste nell'accedere agli standard esistenti che hanno rilevanza per il campo AM e successivamente adottarli per l'uso. Il secondo elenco è costituito dalle aree di interesse

per lo sviluppo determinante attraverso un sondaggio con 12 intervistati durante il workshop SASAM. Il progetto SASAM ha identificato un elenco di standard ISO esistenti per l'adozione e l'ulteriore sviluppo nell'area dell'AM e sono:

- ISO/TC 61: plastica;
- ISO/TC 106: odontoiatria;
- ISO/TC 119: metallurgia delle polveri;
- ISO/TC 172/SC9: sistemi elettro-ottici;
- ISO/TC 184/SC4: dati industriali;
- CEN/TC 121: processo di saldatura e affini;
- CEN/TC 138: test non distruttivi.

Il secondo elenco di argomenti e priorità sono le informazioni raccolte dall'indagine. Le priorità sono suddivise in tre argomenti principali: prodotto qualità, materiali (metallo, polimero e ceramica) e altri soggetti. Dall'elenco, gli argomenti con priorità più elevate includono:

- Standard di qualità del prodotto: dimensioni, dimensioni di lunghezza ed angolo, standard di tolleranze dimensionali, tolleranza geometrica, resistenza alla trazione, forza d'impatto, resistenza alla flessione e test di fatica;
- Standard dei materiali: Co-Cr per l'ortopedia, TA6V per le riparazioni aeronautiche, TiAl e Inconel 718 per l'aeronautica;
- Altri standard: post produzione, processo di monitoraggio, raccomandazioni/standard per la pulizia delle strutture reticolari.

L'elenco delle aree prioritarie, degli argomenti e degli standard per l'adozione dell'AM sarà esaminato dalla comunità AM e dagli organismi di normalizzazione per lo sviluppo degli standard.

4.5.3 Dettaglio di alcune delle principali normative

Di seguito sono riportati i dettagli degli standard ASTM per l'AM:

- ASTM F2924-14: specifiche standard per la produzione additiva del Ti6Al4V con fusione a letto di polvere. I componenti richiedono proprietà meccaniche simili alla forgiatura e alle produzioni convenzionali. La specifica copre anche gli standard correlati per la classificazione delle polveri, i metodi di prova e la terminologia che sono applicabili per le materie prime ed il test del prodotto finale per tutte le proprietà richieste. Per ottenere le dimensioni finali e la finitura superficiale, sarà necessaria la post-elaborazione tramite lavorazione meccanica, lucidatura e molatura.
- ASTM F3001-14: specifiche standard per la produzione additiva del Ti6Al4V ELI con fusione a letto di polvere. I componenti richiedono proprietà meccaniche simili alla forgiatura e alle lavorazioni convenzionali. La specifica copre anche gli standard correlati per la classificazione delle polveri, i metodi di prova e la terminologia che sono applicabili per le materie prime e il test del prodotto finale per tutte le proprietà richieste. Per ottenere le dimensioni finali e la finitura superficiale, sarà necessaria la post-elaborazione tramite lavorazione meccanica, lucidatura e molatura.
- ASTM F3049-14: guida standard per la caratterizzazione delle proprietà delle polveri metalliche utilizzate per il processo di produzione additiva. La guida fa riferimento ad altri standard per determinare metodi di prova, pratiche e guide per le polveri metalliche AM. Le polveri di materia prima AM vengono utilizzate per un'ampia varietà di processi AM, come il powder jetting, SLS, EBM, SLM. Le proprietà di queste polveri devono essere note per ottenere prodotti con affidabilità e ripetibilità costanti. La guida funge da riferimento per le parti interessate che producono,

utilizzano o vendono polveri metalliche per i processi AM. Questa guida è applicabile anche in una certa misura, per le polveri di composizione polimerica o ceramica.

- ASTM F3055-14a: specifiche standard per la produzione additiva in lega di nichel (UNS N07718) con fusione a letto di polvere. I componenti richiedono proprietà meccaniche simili alla forgiatura e alle produzioni convenzionali. La specifica copre anche gli standard correlati per la classificazione delle polveri, i metodi di prova e la terminologia che sono applicabili per le materie prime e il test del prodotto finale per tutte le proprietà richieste. Per ottenere le dimensioni finali e la finitura superficiale sarà necessaria la post-elaborazione tramite lavorazione meccanica, lucidatura e molatura.
- ASTM F3091/F3091M-14: specifiche standard per fusione a letto di polvere di materie plastiche. Questa specifica copre i requisiti e l'integrità di qualsiasi componente in plastica fabbricato mediante processi di fusione a letto di polvere, comprese le formulazioni non caricate e le formulazioni contenenti riempitivi, additivi funzionali come ritardanti di fiamma e rinforzi o delle loro combinazioni. Non copre i processi come SLA, FDM che non richiedono l'uso di polvere. I processi di fusione del letto di polvere possono essere riferiti alla ASTM F2792. La specifica include anche l'uso di additivi, riempitivi e rinforzi nella polvere di plastica. Ai fini della tracciabilità, i componenti in plastica da AM sono classificati in tre diverse categorie: classe I, II e III. I componenti di classe I hanno i requisiti più elevati tra tutte le classi. Le parti prodotte come classe I hanno componenti di altissima qualità che sono tracciabili attraverso i documenti prodotti. In fase di test, i componenti di classe I sono soggetti alla certificazione. I componenti di classe II richiedono una minore tracciabilità rispetto ai componenti di classe I. Le parti prodotte come classe II sono componenti di alta qualità che non richiedono una tracciabilità molto dettagliata. I componenti di classe II sono soggetti alla certificazione. Infine, i componenti di classe III vengono utilizzati come linee guida e richiedono una tracciabilità minima. Se non diversamente specificato, non sono richiesti campioni di prova. I componenti di classe III sono generalmente per uso generale e per la prototipazione rapida (insieme di tecniche industriali che servono all'ottenimento fisico del prototipo, a partire da una definizione di tipo matematico dell'oggetto in 3D) in fase iniziale. La specifica descrive anche la fabbricazione di campioni a scopo di prova per le classi I, II, III (se richiesto).
- ASTM F3184-16: specifiche standard per la produzione additiva in lega di acciaio inossidabile (UNS S31603) con fusione a letto di polvere. Questo standard stabilirà che il requisito delle proprietà meccaniche del prodotto deve essere simile ai prodotti forgiati e lavorati. Il prodotto deve anche soddisfare la finitura desiderata e le dimensioni critiche attraverso la post-elaborazione.
- ASTM F3187-16: guida standard per la deposizione diretta di energia (DED) dei metalli. Copre lo spazio delle applicazioni tecnologiche, i limiti del processo, le operazioni della macchina, la documentazione del processo e le migliori pratiche di lavoro. Definisce DED come processo AM che utilizza l'energia per fondere il materiale mentre viene depositato su una superficie. Esistono molti sistemi DED, inclusi raggio laser, fascio di elettroni o energia al plasma. La materia prima del processo DED può essere filo o polvere, che vengono depositati in condizioni di gas inerte.
- ASTM F2971-13: pratica standard per la comunicazione dei dati per i campioni di prova preparati tramite produzione additiva. Per garantire un database comune, è richiesto un formato comune per la segnalazione dei dati per i risultati mediante test o valutazione del campione AM. La pratica descrive una procedura standard per la presentazione dei dati con due scopi. Il primo è quello di stabilire ulteriori requisiti per la comunicazione dei dati, mentre il secondo è fornire un progetto di database delle proprietà dei materiali con le informazioni essenziali. La pratica richiede agli utenti di: conoscere l'elemento di dati minimo richiesto per il reporting; standardizzare i provini, le

descrizioni e i rapporti; assistere i progettisti con un database AM standard generale; migliorare la tracciabilità dei materiali AM; consentire la modellazione e la simulazione computazionale tramite proprietà, parametri e dati sulle prestazioni acquisite dai campioni AM.

- ASTM F3122-14: guida standard per la valutazione delle proprietà meccaniche dei materiali metallici realizzati mediante processo di produzione additiva. I fattori che influenzano le proprietà dei componenti metallici AM sono proprietà del materiale, anisotropia, preparazione del materiale, porosità, preparazione del campione, ambiente di prova, allineamento e presa del campione, velocità di prova e temperatura. Questo standard non copre alcun aspetto correlato alla sicurezza dell'AM e l'utente è responsabile di stabilire le pratiche di sicurezza e salute, in conformità con i requisiti normativi, prima dell'uso precedente. La guida consiste in una raccolta di metodi di prova utilizzati da ASTM per le prove sui materiali nelle aree di deformazione e prove di fatica. Sotto le proprietà di deformazione ci sono: tensione, compressione, cuscinetto, piegatura, modulo, durezza, mentre sotto le proprietà di fatica ci sono: stanchezza, resistenza alla frattura e crescita di crepe. Le linee guida per la rendicontazione devono aderire agli standard applicabili a ciascuna procedura di test. A causa della natura della fabbricazione di polveri metalliche in AM, le proprietà anisotrope saranno aderenti al campione da testare. Questi dati registrati devono essere comunicati in conformità con ISO/ASTM 52921.

Standard ISO/ASTM per l'AM:

- ISO/ASTM 52900-15: terminologia standard per la produzione additiva per i principi generali. Questa terminologia stabilisce e definisce i termini utilizzati in AM. Attualmente esistono sette diverse classificazioni dei processi AM: fotopolimerizzazione, getto di materiale, binder jetting (tecnologia che utilizza un letto di polvere, in cui vengono fatte aderire tramite il legante, cioè il binder, depositato tramite una testa a getto di inchiostro), estrusione di materiale, fusione a letto di polvere, laminazione di fogli e deposizione di energia diretta.
- ISO/ASTM 52915-16: specifiche standard per il formato di file di produzione additiva (AMF). Questa specifica descrive un framework per un formato di interscambio che affronterà le esigenze attuali e future dell'AM. STL, che è il formato standard, contiene solo informazioni sulla mesh e non ha altre disposizioni per fornire altri dati utili come colore, consistenza, materiale e altre proprietà. Man mano che l'AM si evolve, STL non sarà in grado di supportare il database delle informazioni e quindi questa specifica standard è quella di impostare il framework per stabilire un nuovo formato per sostituire STL e soddisfare le crescenti esigenze dell'AM per soddisfare le nuove funzionalità. Il nuovo formato di file aderirà ad un XML (Extensible Markup Language) e dovrà essere in grado di supportare un'operabilità conforme agli standard. Il formato del file dovrà descrivere un oggetto in un modo generale in modo che tutte le macchine possano fabbricare le parti al meglio delle loro capacità. Il formato del file AMF deve anche essere semplice da implementare ed eseguire il debug quando richiesto, scalare bene con la complessità e le dimensioni, avere una durata ragionevole per le operazioni di lettura e scrittura del file.
- ISO/ASTM 52921-13: terminologia standard per la produzione additiva di sistemi di coordinate e metodologie di test. Questa terminologia descrive i termini necessari utilizzati per la misurazione di campioni prodotti in modo additivo e anche i riferimenti sulla piattaforma di costruzione. Questo standard intende essere, dove possibile, conforme all'ISO 841 ed aiutare a chiarire i principi specifici adatti per AM. Questo standard non copre i sistemi non cartesiani. La terminologia cita anche esempi di origine del volume di costruzione, rotazione della parte nelle coordinate XYZ e il riquadro di collegamento perimetrale minimo per il riferimento dell'utente.

Standard ISO per l'AM:

- ISO 17296-2:2015: panoramica delle categorie dei processi e i principi di funzionamento delle macchine AM. Esistono molte terminologie diverse utilizzate nei processi AM e creano confusione quando un utente desidera conoscere il funzionamento del principio alla base di una macchina particolare. Questo standard ISO classifica la quantità delle parti in base alla certificazione, ai test e alla tracciabilità in tre classi, mentre le catene di processo sono classificate in due categorie, vale a dire il processo singolo e il multistep. I processi sono ulteriormente suddivisi in sette diverse categorie che sono: fotopolimerizzazione in vasca, getto di materiale, binder jetting, fusione a letto di polvere, estrusione del materiale, deposizione diretta di energia e laminazione di fogli.
- ISO 17296-3:2014: caratteristiche principali e metodi di prova corrispondenti. Copre le caratteristiche di qualità dei componenti fabbricati, le procedure di prova, gli scopi, il contenuto dei test e gli accordi di fornitura. Le caratteristiche dei componenti sono sviluppate in due parti principali: fornitura delle scorte e requisiti delle parti. I requisiti della materia prima del materiale sfuso sono: dimensione delle particelle di polvere, morfologia, superficie e distribuzione, tocco e densità apparente, fluidità, contenuto di ceneri e contenuto di carbonio. I requisiti delle parti, sono separati in quattro componenti principali: requisiti della superficie, aspetto, struttura della superficie e colore; requisiti geometrici, dimensione, lunghezza, angolo, tolleranze, tolleranze geometriche; requisiti meccanici, resistenza a trazione, impatto, compressione, flessione e fatica, durezza, scorrimento, coefficiente di attrito, resistenza al taglio ed estrusione della fessura; costruire i requisiti dei materiali, densità, proprietà fisiche e chimico-fisiche. Il test dei componenti AM è diviso in tre categorie principali, che sono parti critiche per la sicurezza, parti non critiche per la sicurezza e prototipi. Il documento ISO contiene tre tabelle per i requisiti di prova, cioè una che elenca i test che devono essere soddisfatti, una per i test che sono raccomandati ed infine una per i test che non sono applicabili. I test sarebbero soggetti ad un accordo tra il venditore della parte ed il cliente. Lo standard copre una gamma completa di standard correlati per i requisiti di materiale sfuso, procedure di prova e requisiti del prodotto finale.
- ISO 17296-4:2014: panoramica dell'elaborazione dei dati, rivolta agli utenti di sistemi AM e relativi sistemi software. Descrive i formati di dati esistenti utilizzati in AM e si rivolge agli utenti dal punto di vista della progettazione assistita da computer/ingegneria assistita da computer (CAD/CAE) alla società di ingegneria inversa, agli enti di test e alla produzione additiva. In questo standard ISO si trovano le terminologie utilizzate nella costruzione del modello 3D e il processo da cui il modello 3D viene poligonato e suddiviso in strati. Alcuni formati di dati utilizzati in questa ISO sono STL, VRML ed AMF. Questa ISO stabilisce anche i requisiti per la qualità dei dati. La qualità dei dati è importante in quanto determineranno se la parte stampata in 3D è di alta qualità. Per ottenere oggetti di alta qualità, le superfici dei modelli devono fondersi in modo uniforme e rifinire per ottenere un modello a tenuta stagna ed essere orientate per una facile identificazione del volume da parte del software. Durante la triangolazione, non devono essere selezionati ausili alla costruzione e tutti i modelli di superficie devono essere convertiti in volumi solidi prima della triangolazione/poligonizzazione, cioè creazione di poligoni in un volume racchiuso. Incluso all'interno dello standard ISO si documentano anche i potenziali errori di formattazione nei dati STL.

4.6 Certificazione per personale, macchine, materiali e attrezzature

4.6.1 Qualifiche per gli operatori

Le tipologie di qualifiche per gli operatori addetti ad eseguire additive manufacturing si suddividono in tre livelli:

Livello 1 (AM Operator): l'operatore a bordo macchina gestisce l'hardware del processo AM, ciò lo fa gestendo la polvere, caricando il batch di stampa, effettuando una manutenzione ordinaria ed eseguendo un primo controllo non distruttivo delle parti prodotte. In particolare, l'operatore ha le seguenti competenze:

- Gestione delle materie prime in sicurezza;
- Teoria di base della tecnologia additiva laser;
- Gestione della stampa (caricamento job, estrazione parte);
- Manutenzione e pulizia ordinaria della macchina;
- Principali caratteristiche qualitative della tecnologia additiva;
- Principali metodi di controllo non distruttivo (volumetrico e superficiale) delle parti.

Livello 2 (AM Application Specialist): lo specialista deve disporre in tavola i componenti e in generale l'organizzazione del batch di stampa (distribuzione ed orientamento parti). Vengono considerate le variabili principali della macchina per ottimizzare la stampa attraverso i requisiti del committente. Vengono considerate le fasi successive al processo additivo: rimozione della piastra di base ed eliminazione dei supporti e trattamento termico. Oltre a un controllo non distruttivo preliminare del componente, si possono considerare le prove distruttive più significative da applicare. In particolare, in aggiunta alle competenze dell'operatore, lo specialista ha le seguenti competenze:

- Teoria base delle altre tecnologie additive;
- Gestione del file di stampa (orientamento e posizionamento parte);
- Gestione dell'intero processo additive manufacturing (rimozione piastra di base, rimozione supporti, trattamento termico);
- Effetti delle variabili fondamentali sul processo;
- Principali metodi di controllo non distruttivo (volumetrico, superficiale, tensioni residue) delle parti;
- Principali metodi di controllo distruttivo (trazioni, resilienze, durezza, metallografici, tensioni residue) delle parti;
- Redazione di istruzioni operative per l'operatore.

Livello 3 (AM Application Engineer): questi operatori si collocano presso il costruttore o il servitore di servizi avanzati, dove vengono effettuate tutte le attività che ruotano intorno al processo di stampa 3D.

L'ingegnere raccoglie, processa ed ottimizza tutte le informazioni fondamentali per ottenere i componenti secondo dei criteri stabiliti fra le parti. In particolare, in aggiunta alle competenze dell'operatore e dello specialista, ha competenze in:

- Definizione della materia prima da utilizzare (alloy design);
- Conoscenza proprietà meccaniche avanzate;
- Analisi ed interpretazione dei dati di laboratorio;
- Creazione di procedure di valutazione sui criteri di accettabilità dei componenti;
- Definizione dei criteri di progettazione dei componenti;
- Valutazione dei trattamenti superficiali/termici successivi;
- Gestione del flusso qualità dell'intero processo additive manufacturing.

I requisiti minimi per ottenere la certifica riguardano:

- Titolo di studio: al fine di poter ottenere la certificazione, è necessario possedere i titoli di studio, in base al livello di riferimento: Livello 1 (AM Operator), cioè qualifica professionale o Diploma; Livello 2 (AM Application Specialist), diploma tecnico in ambito scientifico; Livello 3 (AM Application Engineer), laurea (triennale o specialistica) in ambito scientifico, preferibilmente ambito ingegneristico.
- Addestramento: il richiedente deve avere le conoscenze adeguate per svolgere i compiti previsti dal rispettivo livello di certificazione. I livelli vengono distinti in funzione delle competenze e delle mansioni che l'operatore/tecnico deve ricoprire. I corsi di formazione che permettono di ottenere le competenze necessarie verranno strutturati attraverso sette diverse tipologie di moduli.

Tempi Minimi Di Addestramento per i Livelli 1, 2, 3 [h]			
Fase	Livello 1 AM Operator	Livello 2 AM Application Specialist	Livello 3 AM Application Engineer
Transitoria	24 (oppure 3 CFP)	40 (oppure 5 CFP)	80 (oppure 10 CFP)
Regime	24 (oppure 5 CFP)	40 (oppure 8 CFP)	80 (oppure 16 CFP)

Tabella 4.8: tempi minimi di addestramento e CFP equivalenti

Per tutti i livelli, la durata dell'addestramento si può ridurre fino al 20% per assenze giustificate dal datore di lavoro e dopo approvazione dell'ente certificatore. Il candidato potrà non frequentare le ore previste nei corsi di formazione, utilizzando i CFP equivalenti (1CFP = 8h) di formazione o per la partecipazione ad un evento tecnico o attività didattica, oppure per la pubblicazione di articoli tecnici/memorie o attività di ricerca (ogni attività vale 1 CFP).

- Esperienza industriale: i livelli 1, 2 e 3 devono soddisfare i requisiti minimi previsti nel prospetto di seguito riportato (ridotto del 50% nel periodo di transizione):

Esperienza industriale minima (in mesi)			
LIVELLO DI PARTENZA	LIVELLO DA RAGGIUNGERE		
	1	2	3
-	6	12	24
1		6	18
2			12

Tabella 4.9: requisiti minimi per il livello 1, 2 e 3

La prova documentata dell'esperienza viene confermata dal datore di lavoro e presentata all'Organismo di Certificazione. Il candidato potrà sostenere l'esame di certificazione anche senza avere raggiunto tutti i mesi previsti, l'importante è che l'esperienza non sia inferiore a un mese. Solo dopo questa verifica l'Organismo di Certificazione rilascerà la certifica con validità che parte dal momento in cui tutti i requisiti sono stati soddisfatti. L'esperienza industriale deve essere pratica e ripetitiva e permette di ampliare le conoscenze sulle diverse tecniche e migliorare l'abilità e la capacità di giudizio.

Per ottenere la certificazione, il richiedente, con i requisiti richiesti, deve superare un esame presso il Centro Esame di TEC Eurolab con la presentazione di apposita domanda di certificazione. A seguito dell'esame, l'Organo di Delibera di TEC Eurolab delibererà o meno la certificazione.

Un candidato invia all'Organismo di Certificazione TEC Eurolab quanto segue:

- Domanda di certificazione redatta sull'apposita modulistica dell'Organismo di Certificazione;
- Curriculum Vitae;
- Autocertificazione del titolo di studio;
- Documento attestante l'addestramento conseguito;
- Copia delle eventuali attestazioni/certificazioni in ambito AM;
- Dichiarazione di esperienza firmata dal datore di lavoro completa di documentazione correlata;
- Fotografia formato tessera.

La sessione di esame può essere svolta presso la sede TEC Eurolab, presso la sede dei centri di esame o presso la sede del cliente qualora ci siano i requisiti minimi per effettuare un'attività di certificazione in aula (qualità dei locali e serietà del luogo di esame). L'esame di certificazione è nominativo e può essere effettuato anche con dispositivi digitali. Le modalità di esame comprenderanno delle prove teoriche (quiz) e una prova pratica:

Livello 1: 30 Quiz a risposta multipla, con argomenti di base; 20 Quiz a risposta multipla, per gli Esami Non Distruttivi; Simulazione di caricamento del JOB (Istruzione operativa).

Livello 2: 30 Quiz a risposta multipla, con argomenti di Base; 20 Quiz a risposta multipla, per i controlli Non Distruttivi; 40 Quiz a risposta multipla per Esami Distruttivi; Simulazione di caricamento del JOB (Istruzione operativa)

Livello 3: 30 Quiz a risposta multipla, con argomenti di Base; 20 Quiz a risposta multipla, per i controlli Non Distruttivi; 40 Quiz a risposta multipla per Esami Distruttivi; 60 Quiz a risposta multipla per la progettazione e la gestione di qualità; Simulazione di caricamento del JOB (Istruzione operativa).

La prova scritta si ritiene superata quando il candidato ha risposto correttamente al 70% di domande in ogni modulo. Qualora tale punteggio non sia stato raggiunto su una o più parti dell'esame, è possibile richiedere la ripetizione della sola parte fallita entro sei mesi dalla data d'esame.

I criteri di accettabilità della prova pratica (simulazione del caricamento del JOB) sono stabiliti dall'ispettore TEC Eurolab.

Nel caso la valutazione sia positiva e l'Organismo di Delibera acconsenta la certificazione, TEC Eurolab rilascia un certificato numerato e firmato ed un tesserino con contenuti equivalenti, riportanti:

- Nome e cognome del candidato;
- Data di emissione del certificato;
- Numero identificativo personale del certificato/patentino;
- Data di scadenza del certificato/patentino;
- Livello acquisito;
- Logo dell'Organismo di Certificazione;
- Firma della persona certificata;
- Fotografia del candidato (sul patentino);
- Sistema di protezione nei confronti di tentativi di manomissione (timbro a secco, plastificazione o sistemi equivalenti);
- Firma (nel caso del certificato) del Presidente della Commissione d'Esame e del Responsabile dell'Area Certificazione del Personale.

La validità della certificazione del personale AM dura per quattro anni, indistintamente dal livello conseguito. Con il rilascio del certificato e del corrispondente tesserino, l'Organismo di Certificazione TEC Eurolab attesta la qualifica della persona ma non conferisce nessuna autorizzazione ad operare.

Al termine della sua validità di quattro anni, la certificazione può essere rinnovata, per un ulteriore periodo di 4 anni, tramite esame documentale per tutti i livelli e con l'aggiunta di una prova pratica per il livello 1, previa presentazione a TEC Eurolab della domanda di rinnovo e dei seguenti documenti:

- Evidenza della certificazione scaduta o in scadenza;
- Fotografia formato tessera;
- Dichiarazione firmata dal datore di lavoro attestante: il mantenimento della continuità lavorativa nel settore di riferimento e nelle attività oggetto della certificazione, senza un'interruzione maggiore di 6 mesi; l'assenza di ricezione di Non Conformità in merito alle attività eseguite; la verifica quantitativa e qualitativa delle attività, suddivise nei 4 anni di validità del certificato;

- Evidenza della partecipazione ad eventi tecnici di aggiornamento o corsi specifici, almeno 1 volta nel periodo di validità della certificazione;
- Prova documentale del conseguimento, negli ultimi 2 anni prima della scadenza della certificazione, delle seguenti ore di aggiornamento in ambito AM: Livello 1: 16h (2 CFP); Livello 2: 32h (4 CFP); Livello 3: 64h (8 CFP).

4.6.2 Fornitura, consegna, installazione e messa in servizio di una macchina

L'acquisizione di una macchina per l'Additive Manufacturing con polveri metalliche punta ad una conoscenza più approfondita del 3D prototyping. L'oggetto dell'appalto è la fornitura di una macchina AM per la lavorazione di materiali in polvere metallica e relativi servizi. In particolare, la ditta produttrice dovrà fornire:

- Macchina per l'additive manufacturing con polveri metalliche (MAMPM);
- Periferiche della macchina;
- Software di gestione;
- Materiali di consumo;
- Formazione;
- Consegna, installazione, messa in servizio e prove di collaudo;
- Garanzia, manutenzione e assistenza tecnica;
- Documentazione.

La MAMPM sarà utilizzata per la produzione di prototipi e parti in piccola serie utilizzando principalmente acciai inossidabili, leghe di alluminio, leghe di titanio e altri materiali per tutti i progetti di ricerca.

Caratteristiche tecniche	Definizione requisito
1.Laser allo stato solido in fibra	Potenza minima della sorgente di 350W
2.Ottica di focalizzazione	Configurazione ottica a campo piatto di tipo f-theta
3.Campo di lavoro in pianta (minimo)	250mm x 250mm
4.Diametro del fascio laser	Massimo 100 µm
5.Altezza di costruzione	Maggiore di 250 mm
6.Velocità di scansione del laser	Maggiore di 5 m/s
7.Spessore dello strato minimo	Minore di 30µm
8.Spessore dello strato massimo	Maggiore di 80µm
9. Temperatura di riscaldamento della piattaforma	Non inferiore a 200°C

Tabella 4.10: caratteristiche tecniche minime

La stazione di setacciatura, per quanto concerne la macchina, dovrà operare in atmosfera inerte, in modo da impedire alla polvere di andare incontro a processi ossidativi durante ogni fase del processo di setacciatura, cioè durante l'immissione della polvere, la setacciatura della polvere, il riciclo della polvere e la raccolta degli scarti. La lavorazione di materiali in polvere metallica dovrà comprendere almeno tre kit completi per il cambio della polvere, ognuno con i seguenti elementi:

- Elementi della MAMPM: un set di condotti per l'immissione e la rimozione della polvere per ogni materiale;
- Elementi della stazione di setacciatura: un set di condotti per l'immissione e la rimozione della polvere per ogni materiale;
- Due contenitori di polvere per ogni materiale.

Inoltre, dovrà includere i seguenti software:

- Sistema operativo della macchina e software di gestione dei parametri di processo;
- Software di preparazione dei dati per Additive Manufacturing Materialise Magics (AMMM) o equivalente compatibile con il processore di fabbricazione.

La lavorazione di materiali in polvere metallica dovrà comprendere ancora:

- Materiali di consumo per 500h di lavoro della macchina compresi, ma non limitati a filtri, spazzole, agente di pulizia specifico, spatole e guanti in lattice;
- Polveri di metallo: 60kg di lega di alluminio (AlSi10Mg) in polvere, 55kg di lega di titanio in polvere (Ti6Al4V) e 100kg di acciaio inossidabile (AISI 316L) in polvere;
- Piattaforme di lavorazione: 40 piattaforme in lega di alluminio, 5 in lega di titanio e 15 in acciaio inossidabile.

La lavorazione di materiali in polvere metallica dovrà comprendere una formazione avanzata per l'utilizzo della macchina, in lingua italiana o in inglese e una formazione specifica per il software. La formazione avanzata per l'utilizzo della macchina dovrà essere garantita ad un minimo di dieci tecnici e dovrà tenersi presso i locali dell'amministrazione. La durata della formazione dovrà essere complessivamente di almeno sette giorni, ovvero del maggior termine offerto in sede di gara, dei quali;

- Cinque, dal secondo giorno successivo all'esito positivo delle prove di collaudo, per un minimo di 4h al giorno;
- Due giorni, a sei mesi dall'esito positivo delle prove di collaudo, per un minimo di 4h al giorno.

Il totale di ore di formazione avanzata per l'utilizzo della macchina dovrà essere di almeno 28h. Tale formazione dovrà avere ad oggetto, a titolo esemplificativo e non esaustivo:

- Informazione tecnica sulla macchina;
- Formazione esaustiva sulla sicurezza;
- Funzionamento standard della macchina;
- Manutenzione ed assistenza;
- Risoluzione dei problemi;
- Pulizia della macchina e cambio della polvere;
- Preparazione dei dati;
- Regole di progettazione.

La formazione specifica del software, per un totale di 12h, riguarderà una formazione specifica per il software della macchina e una formazione aggiuntiva relativa all'AMMM, o equivalente e dovrà essere fornita a minimo dieci tecnici. La durata di questa formazione specifica sarà di tre giorni e dovrà essere tenuta presso i locali dell'amministrazione, in italiano o in inglese. Tale formazione dovrà essere fornita entro il primo semestre dalla data di stipula del contratto, da stipularsi di concreto con il responsabile unico del procedimento, per un minimo di 4h al giorno.

La lavorazione di materiali in polvere metallica dovrà includere ulteriormente:

- L'installazione del sistema;
- La messa in opera del sistema;
- Le prove di conformità e sicurezza;
- Le prove di collaudo dell'intera fornitura al fine di verificare che gli obiettivi siano raggiunti.

La garanzia avrà la durata minima di 12 mesi a decorrere dalla data di emissione del certificato di conformità sottoscritto dalle parti. Il costo dei pezzi di ricambio durante il periodo di garanzia è da intendersi compreso nell'offerta.

La manutenzione dovrà avere la durata di 12 mesi, a decorrere dalla data di emissione del certificato di verifica di conformità e riguarderà:

- Interventi presso le strutture dell'amministrazione, riparazione e sostituzione di ogni parte difettosa delle attrezzature, entro tre giorni lavorativi dal ricevimento della chiamata che potrà essere effettuata tramite telefono o PEC;
- Interventi di manutenzione preventiva e di calibrazione;
- Assistenza tecnica, in caso di malfunzionamento della macchina per difetti non da imputare ad un errato uso della stessa.

Gli interventi di calibrazione verranno effettuati in presenza del personale dell'amministrazione, con cadenza almeno annuale, mentre gli interventi di manutenzione preventiva dovranno essere effettuati con una frequenza almeno semestrale.

La ditta appaltatrice dovrà fornire, contestualmente alla consegna della macchina, la seguente documentazione in lingua inglese o in italiano:

- Istruzioni per l'uso con indicazioni circa eventuali controlli regolari da effettuare da parte dell'operatore;
- Manuale di installazione;
- Piano di manutenzione preventiva;
- Manuale operativo per la macchina ed il software;
- Scheda di sicurezza per il trattamento delle polveri;
- Dichiarazione di conformità CE (requisiti essenziali per la commercializzazione).

L'intero processo di fabbricazione comprendente la MAMPM, le sue specifiche e le opzioni dovranno essere conformi alle norme di legge vigenti in materia di sicurezza ed ai relativi regolamenti di attuazione.

Nella tabella 4.11 sono riportati alcuni tempi di realizzazione della fornitura e di prestazione dei servizi, oggetto del presente appalto, decorrenti dalla data di stipula del contratto (tempo T0):

Milestone	Data
Stipula del contratto	T0
Consegna del macchinario	T0 + 8 settimane
Completamento dell'installazione, messa in opera e prove di collaudo	T0 + 10 settimane
Verifica di conformità	60 giorni dal completamento dell'installazione e messa in opera

Tabella 4.11: tempi di realizzazione della fornitura

Una penale giornaliera dello 0.8 per mille dell'importo contrattuale sarà applicata nel caso di ritardo rispetto a tutti i termini previsti all'interno del presente report, per la fornitura e tutti i servizi connessi.

La ditta appaltatrice dovrà fornire le seguenti informazioni entro quattro settimane dalla data di stipula del contratto:

- Dimensioni ed ingombro della macchina e delle periferiche;
- Stato delle connessioni elettriche;
- Stato delle connessioni per l'aria compressa.

La ditta dovrà eseguire le seguenti attività presso le strutture dell'amministrazione:

- Formazione del personale circa il funzionamento e la manutenzione dell'offerta e circa il relativo software;

- Servizi di manutenzione, garanzia e assistenza tecnica.

Inoltre, la ditta, è responsabile per l'imballaggio e in tutti i casi dovrà assicurarsi che l'apparecchiatura venga fornita all'amministrazione senza danni ed eventuali deterioramenti relativamente alle prestazioni a causa delle condizioni di trasporto. Il trasporto e lo smaltimento dell'imballaggio sono a cura e spese della ditta.

Il verbale di ultimazione delle prestazioni dovrà essere effettuato, a cura dell'amministrazione, entro dieci giorni dalla comunicazione della ditta appaltatrice di intervenuta ultimazione, previ i necessari accertamenti in contraddittorio con la ditta stessa. La verifica di conformità avrà ad oggetto, a mero titolo esemplificativo:

- La conformità della fornitura alle specifiche minime, nonché alle specifiche migliorative presentate in sede di offerta;
- La conformità della documentazione;
- La conformità della formazione alle specifiche ed alle specifiche presentate in sede di offerta.

La verifica di conformità è avviata entro 15 giorni e conclusa entro 60 giorni dalla fine della presentazione. L'accertamento sarà effettuato e documentato dal certificato di verifica di conformità. All'esito delle operazioni il soggetto incaricato rilascia il certificato di verifica di conformità e lo trasmette per l'accettazione alla ditta, la quale deve firmarlo nel termine dei 15 giorni dal ricevimento dello stesso. All'atto della firma la ditta può aggiungere le contestazioni che ritiene opportune. L'accertamento della regolarità delle presentazioni non esonera la ditta da eventuali responsabilità per difetti, imperfezioni e difformità che non fossero emersi all'atto della già menzionata verifica e venissero accertati solo successivamente.

Un'altra considerazione nella progettazione per la polvere AM è la rimozione della polvere una volta che la parte è stata costruita. Per questo motivo le strutture completamente chiuse dovrebbero essere progettate tenendo conto della rimozione della polvere per evitare che rimanga intrappolata all'interno. Oltre alle strutture chiuse, la polvere può anche essere difficile da rimuovere nelle strutture strette con l'estremità aperta, come ad esempio i tubi, poiché la polvere si compatta e non può essere rimossa facilmente. Le modifiche al progetto potrebbero includere l'aggiunta di un foro nel progetto della parte per la fuoriuscita della polvere o la considerazione della post-lavorazione per rimuovere la polvere. È inoltre necessario considerare la dimensione degli spazi per rimuovere la polvere, poiché anche dove esiste un foro per la rimozione, la sua natura può rendere impossibile la rimozione completa della stessa.

Per alcuni processi AM la differenza di densità del materiale fuso porta ad un restringimento durante la fusione che può distorcere la parte dalla geometria richiesta. Se ciò influisse negativamente sulle caratteristiche chiave della parte, potrebbe essere necessario aggiungere del materiale per far sì che si ottenga il pezzo con la geometria corretta. Inoltre, si potrebbe modificare il modello CAD per prendere in considerazione il restringimento. Tuttavia, si tratta di un'operazione relativamente complessa che richiede modelli semplificati che attualmente sono solo parzialmente rappresentativi.

4.6.3 Certifica dei materiali

Nelle tabelle seguenti sono stati valutati gli standard ASTM ed ISO per determinarne l'applicabilità alla produzione additiva. Per ogni standard viene fornita una delle tre classificazioni. Se è necessario prestare particolare attenzione alla norma, vengono fornite note specifiche. L'elenco comprende gli standard per i materiali plastici e i compositi. Le seguenti etichette vengono utilizzate per valutare l'applicabilità dello standard:

- Sì: lo standard dovrebbe essere applicabile alla produzione additiva con modifiche minime o nulle;

- Sì con guida: lo standard dovrebbe essere generalmente applicabile per la produzione additiva, ma potrebbero esserci dei limiti alla sua applicabilità e probabilmente sono necessarie alcune modifiche o considerazioni aggiuntive. Questi includono:
 - o Limiti geometrici sui provini;
 - o Post-elaborazione richiesta in modo tale che i campioni costituiti tramite produzione additiva soddisfino i requisiti standard; questo include tipicamente la finitura superficiale, i requisiti dimensionali o i requisiti pre-crack;
 - o Requisiti di isotropia dei materiali. I campioni AM spesso hanno anisotropia intrinseca. I metodi di misurazione che specificano l'applicabilità per i materiali isotropi possono ancora funzionare, ma i risultati possono avere maggiori incertezze. Ciò include la considerazione della separazione delle proprietà del materiale e della parte;
 - o Considerazioni specifiche sull'applicazione, come temperature di prova elevate o ambienti di immersione.
- No: lo standard richiede campioni che non possono essere costruiti tramite AM; anche modifiche importanti potrebbero non essere adeguate. Un altro metodo è più adatto per la misurazione o la misurazione semplicemente non è applicabile.

In alcuni casi gli standard sono stati identificati ed elencati nell'indice di applicabilità, ma non sono stati specificamente rivisti.

Standard Designation	Standard Name	Applicable for AM Testing?	Notes
ASTM E0006	Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing	Not a test method	This is not a testing standard, it is a terminology document
ASTM A370	Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products	Yes	For steel, refers to several other testing standards for basics and adds additional requirements/guidance, includes hardness, tension and impact testing
ASTM A1058	Standard Test Methods for Mechanical Testing of Steel Products—Metric	Yes	Same as ASTM A370 but in SI units

Standard Designation	Standard Name	Applicable for AM Testing?	Notes
ASTM B557	Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products	Yes	ASTM B557 is for Al and Magnesium, ASTM E8 is the basic method
ASTM E8	Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials	Yes with Guidance	Basic method for tension testing at room temperature (10°C – 38°C, 50°F – 100°F). Not all specimen types can be made additively (e.g., wire and sheet). Includes requirements for powder metallurgy materials that should cover AM specimens.
ASTM E0021	Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials	Yes with Guidance	Like ASTM E8 but at elevated temperatures (assume > 38°C/100°F). Yes with guidance that depends on application.
ASTM E0292	Test Methods for Conducting Time-for-Rupture Notch Tension Tests of Materials	Yes with Guidance	Similar to ASTM E8 but uses notched specimens. This test is done at elevated temperatures and with constant loads. Pre-test specimens need post-processing (after AM building) to achieve dimensional requirements.
ASTM E0740	Practice for Fracture Testing with Surface-Crack Tension Specimens	Yes with Guidance	Similar to ASTM E8 but for plate with an existing flaw. Possible specimen thickness limitations for AM specimens.
ASTM E1450	Test Method for Tension Testing of Structural Alloys in Liquid Helium	Yes with Guidance	Similar to ASTM E8 but done at cryogenic temperatures. May require possible application-specific guidance.
ISO 6892-1:2009	Metallic materials -- Tensile testing -- Part 1: Method of test at room temperature	Yes with Guidance	Basic ISO method similar to ASTM E8, includes additional test sample geometries (sheet, wire, etc.) that may not be appropriate for AM.
ISO 6892-2:2011	Metallic materials -- Tensile testing -- Part 2: Method of test at elevated temperature	Yes with Guidance	Similar to ISO 6892-1 and ASTM E8 but at elevated temperatures. Sheet and wire specimens may not be appropriate for AM.
ISO 15579:2000	Metallic materials -- Tensile testing at low temperature	Yes with Guidance	Similar to ISO 6892-1 and ASTM E8 but at low temperatures (between 10°C and -196°C.) Sheet and wire specimens may not be appropriate for AM, also potentially application specific.
ISO 19819:2004	Metallic materials -- Tensile testing in liquid helium	Yes with Guidance	Similar to ISO 6892-1 and ASTM E8 but at a very low temperature (-269°C or 4.2K, liquid He temperature.) Also can be done at cryogenic temperatures (less than -196°C or 77K.) Sheet and wire specimens may not be appropriate for AM, also potentially application specific.
ISO 26203-1:2010	Metallic materials -- Tensile testing at high strain rates -- Part 1: Elastic-bar-type systems	No	Similar to ISO 6892-1 but for sheet materials such as those for car bodies, and at high strain rates (> 10 ² s ⁻¹). These parts cannot currently be built on commercial AM systems due to their large size.
ISO 26203-2:2011	Metallic materials -- Tensile testing at high strain rates -- Part 2: Servo-hydraulic and other test systems	No	Similar to ISO 6892-1 but for sheet materials such as those for car bodies, and at high strain rates (10 ² s ⁻¹ to 10 ³ s ⁻¹). These parts cannot currently be built on commercial AM systems due to their large size.
ASTM E9	Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature	Yes with Guidance	Basic test for axial-load compression testing of metals at room temperature. Not all of the sample types (e.g., thin sheets) can be made additively.
ASTM E0209	Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates	Yes with Guidance	Similar to ASTM E9 but for specimens that are heated at a uniform temperature (up to and beyond 1000°F/538°C). Yes, depending on application.
ASTM E0238	Test Method for Pin-Type Bearing Test of Metallic Materials	Yes with Guidance	Basic and only method for pin-type bearing. The surface finish requirements and some thickness requirements are problematic for some metal-based commercial AM systems.
ASTM E0111	Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus	Yes	Limited to materials, temperatures, and stresses where creep is negligible. ASTM E8 and ASTM E9 are the basic tension and compression methods; this provides additional guidance (number of trials, specimens, temperature etc.) and defines the three moduli. Provides guidance for both high and low temperatures.
ASTM E0143	Test Method for Shear Modulus at Room Temperature	Yes	Basic method for shear modulus at room temperature only.
ASTM E1875	Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Sonic Resonance	Yes with Guidance	Instead of macro deformation, uses sonic resonance (which may be considered micro deformation.) This standard covers room, elevated, and very low temperatures in the range -195°C to 1200°C. Strict requirements for isotropic materials may be a problem for some AM parts/processes.
ASTM E1876	Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration	Yes with Guidance	Similar to ASTM E1875 but with an impulse instead of a body resonance. This might be considered micro-scale deformation. States that can be performed at non-room temperatures. Strict requirements for isotropic materials may be a problem for some AM parts/processes.
ASTM E0466	Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials	Yes with Guidance	Basic method; fatigue testing of axial un-notched and notched specimens subjected to constant amplitude periodic forcing function in air at room temp. Used to test effect of variations in material, geometry, surface condition, etc. Test is finished when it fails or a certain number of cycles are reached. Samples will require post-processing to achieve recommended surface roughness and notch geometry.
ASTM E0467	Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Forces in an Axial Fatigue Testing System	Not a test method	A "method for testing the tests." This is not a test method.
ASTM E0468	Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials	Not a test method	Not a method, it's about what to report.
ASTM E0606	Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing	Yes	Similar to ISO 1099; strain-controlled instead of force-controlled fatigue. Uniqueness is that it yields the determination of cyclic stresses and strains at any time during the tests.

Standard Designation	Standard Name	Applicable for AM Testing?	Notes
ASTM E0647	Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates	Yes with Guidance	Determines fatigue crack growth rates from near-threshold to K _{max} controlled instability. Possible anisotropy issues.
ASTM E1049	Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis	Not a test method	Not a test method but still potentially useful for fatigue analysis of AM specimens.
ASTM E1823	Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing	Not a test method	
ASTM E1942	Guide for Evaluating Data Acquisition Systems Used in Cyclic Fatigue and Fracture Mechanics Testing	Not a test method	
ASTM E2368	Practice for Strain Controlled Thermomechanical Fatigue Testing	Yes with Guidance	Uniform temperature and strain fields over the specimen are simultaneously varied and independently controlled. AM samples would likely need post-processing.
ASTM E2714	Test Method for Creep-Fatigue Testing	Yes with Guidance	Determines deformation and crack formation or nucleation as a consequence of constant-amplitude strain-controlled tests or constant-amplitude force-controlled tests (ASTM E0606 and ASTM E0466, ISO 12106 and ISO 1099.) Typically done at elevated temperatures and involves sequential or simultaneous application of loading conditions necessary to generate cyclic deformation/damage enhanced by creep deformation/damage or vice-versa. The difference with the basic method is the long hold time.
ASTM E2760	Test Method for Creep-Fatigue Crack Growth Testing	Yes with Guidance	ASTM E2760 is to ASTM E0647 as ASTM E2709 is to ASTM E0606 or ASTM E0466. Concerns fatigue cycling with long loading/unloading rates and/or hold times to cause creep deformation at the crack tip and the creep deformation be responsible for enhancing the crack growth per loading cycle.
ASTM E2789	Guide for Fretting Fatigue Testing	Yes	ASTM E0466 is the basic method. Small amplitude motion, usually tangential, between two solid surfaces in contact.
ISO 1099:2006	Metallic materials -- Fatigue testing -- Axial force-controlled method	Yes with Guidance	Samples are similar to ASTM E0466; stress vs. cycles to failure. Can be done at high temperatures. Basic method. AM samples will require post-processing to achieve recommended surface roughness.
ISO 1143:2010	Metallic materials -- Rotating bar bending fatigue testing	Yes with Guidance	Circular cross-section samples, rotated and subjected to bending moment. Application specific, post-processing may be required.
ISO 1352:2011	Metallic materials -- Torque-controlled fatigue testing	Yes	Similar to ISO 1352 but for torque.
ISO 12106:2003	Metallic materials -- Fatigue testing -- Axial-strain-controlled method	Yes with Guidance	Similar to ISO 1099 but for low-cycle fatigue tests. Imposed constant strain rate; test starts by testing elastic region to measure modulus (checked vs nominal), test stops are failure. High and low temps mentioned. Samples will require post-processing to achieve recommended surface roughness.
ISO 12108:2002	Metallic materials -- Fatigue testing -- Fatigue crack growth	Yes with Guidance	Primarily intended for isotropic materials; variety of samples and tests.
ISO 12111:2011	Metallic materials -- Fatigue testing -- Strain-controlled thermomechanical fatigue testing method	Yes with Guidance	Similar to ISO 12106 but with the addition of temperature cycling. Samples will require post-processing to achieve recommended surface roughness.
ASTM B645	Standard Practice for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness Testing of Aluminum Alloys	Yes with Guidance	Fracture toughness is resistance to crack extension; Basic test method for plane-strain fracture toughness of aluminum. Supplements E399 and B646. Samples will require post-processing to achieve recommended surface roughness and dimensional tolerances.
ASTM B909	Standard Guide for Plane Strain Fracture Toughness Testing of Non-Stress Relieved Aluminum Products	Yes with Guidance	ASTM E399 or ISO 12737 is basic method. ASTM B909 provides supplemental information for plane-strain toughness testing of Al where complete stress relief is not possible. Additive manufacturing samples will require post-processing to achieve recommended surface roughness and dimensional tolerances.
ASTM B646	Standard Practice for Fracture Toughness Testing of Aluminum Alloys	Not a Test Method	Provides guidelines for test selection for fracture toughness properties of Al, particularly for quality assurance and material release purposes. Provides supplemental information on specimen size, analysis, and interpretation of results, particularly for varying thicknesses.
ASTM E0023	Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials	Yes with Guidance	Notched-bar impact testing of metals by Charpy (simple-beam) and Izod (cantilever-beam) tests. Describes 4 differences between two tests (sample notches, holding mechanism, impact location, sample dimension). Additive manufacturing samples will require post-processing to achieve recommended dimensional tolerances.
ASTM E0399	Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K _{IC} of Metallic Materials	Yes with Guidance	Basic method. See also ISO 12737. For metals under linear-elastic, plane-strain conditions using fatigue pre-cracked specimens subjected to a slowly increasing crack-displacement force. May require post-process machining for notch.
ASTM E1221	Test Method for Determining Plane-Strain Crack-Arrest Fracture Toughness, K _{IA} , of Ferritic Steels	Yes with Guidance	Samples may require post-processing.
ASTM E1290	Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement	Yes with Guidance	Determines critical crack-tip opening displacement (CTOD) values, used to measure cleavage crack initiation toughness for materials that exhibit a change from ductile to brittle behavior with decreasing temp. Notches may require post-processing (additional machining).
ASTM E1304	Test Method for Plane-Strain (Chevron-Notch) Fracture Toughness of Metallic Materials	Yes with Guidance	Chevron-shaped-notch, notches may require post-processing (additional machining).
ASTM E1820	Test Method for Measurement of Fracture Toughness	Yes with Guidance	This also appears to be the basic ASTM method for fracture toughness. Load a fatigue pre-cracked test specimen to induce either unstable crack extension and/or stable crack extension. Need to measure force versus load-line displacement or crack mouth opening

Standard Designation	Standard Name	Applicable for AM Testing?	Notes
			displacement or both. ASTM E1921 recommended for testing ferric steels that undergo cleavage fracture in the ductile-to-brittle transition. Notches may require post-processing (additional machining).
ISO 148-1:2009	Metallic materials -- Charpy pendulum impact test -- Part 1: Test method	Yes with Guidance	Break notched test piece with a single blow from a swinging pendulum. Mention of heated or cooled tests in a liquid or gaseous medium. Notches may require post-processing (additional machining).
ISO 148-3:2008	Metallic materials -- Charpy pendulum impact test -- Part 3: Preparation and characterization of Charpy V-notch test pieces for indirect verification of pendulum impact machines	Not a Test Method.	This is about sample prep.
ISO 12135:2002	Metallic materials -- Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness	Yes with Guidance	Fracture toughness (resistance to crack extension) in terms of stress intensity factor (K), crack-tip displacement (δ), loading parameter (J) and resistance curves for homogenous metallic materials. Continually increasing force applied to sample by uniaxial tension or 3-point bending. Notches may require post-processing (additional machining).
ISO 12737:2010	Metallic materials -- Determination of plane-strain fracture toughness	Yes with Guidance	Similar to ASTM E399. Determines plane-strain fracture toughness (K _{Ic}) of homogeneous metallic materials using a specimen that is notched and pre-cracked by fatigue, and slowly increasing crack displacement force. Notches may require post-processing (additional machining).
ISO 14556:2000	Steel -- Charpy V-notch pendulum impact test -- Instrumented test method	Yes with Guidance	Similar to ISO 148 but for steels. Notches may require post-processing (additional machining).
ISO 22889:2007	Metallic materials -- Method of test for the determination of resistance to stable crack extension using specimens of low constraint	Yes with Guidance	ISO 12135 is the basic method. ISO 22889 applies to samples that are very small (i.e., have size sensitivity). May require post-processing.
ISO 27306:2009	Metallic materials -- Method of constraint loss correction of CTOD fracture toughness for fracture assessment of steel components	Not a test method	Converts fracture toughness from lab specimens to equivalent toughness for structural components. This is not a test method; it is a description for how to use method.
ASTM E0740	Practice for Fracture Testing with Surface-Crack Tension Specimens	Yes with Guidance	Covers design, prep, and testing of surface-crack specimens. Test is performed with continuously increasing force and excludes cyclic and sustained loadings. Determines residual strength of a specimen with a semi-elliptical or circular-segment fatigue crack. Requires post-processing to make initial pre-crack.
ASTM E1457	Test Method for Measurement of Creep Crack Growth Times in Metals	Yes with Guidance	Determines creep crack growth in metals at elevated temps using pre-cracked specimens subjected to static or quasi-static loading conditions. Requires post-processing to make initial pre-crack.
ASTM E1681	Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials	Yes with Guidance	Appears to be basic method, requires environmental chamber. Requires post-processing to make initial pre-crack since most metal-based AM cannot produce a test specimen with a small-enough crack.
ASTM E2472	Test Method for Determination of Resistance to Stable Crack Extension under Low-Constraint Conditions	Yes with Guidance	For low-constraint conditions (crack-length-to-thickness and un-cracked ligament-to-thickness ratios are greater than or equal to 4) and that are tested under slowly increasing remote applied displacement. Requires post-processing to make initial pre-crack.
ASTM B769	Standard Test Method for Shear Testing of Aluminum Alloys	Yes with Guidance	Double-shear loading using a tension or compression testing machine. Requires post-processing in order to meet surface finish specification.
ASTM B565	Standard Test Method for Shear Testing of Aluminum and Aluminum-Alloy Rivets and Cold-Heading Wire and Rods	No	Metal wire, rivets, and rods are difficult to make via additive manufacturing
ASTM E0010	Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials	Yes with Guidance	Basic method for Brinell; tests at temperatures outside of nominal (10°C to 35°C) permitted. Requires post-processing in order to meet surface finish specification.
ASTM E0018	Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials	Yes with Guidance	Basic method for Rockwell; tests at temperatures outside of nominal (10°C to 35°C) permitted. Requires post-processing in order to meet surface finish specification.
ASTM E0140	Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness	Not a test method.	Tables that convert hardness values of one type of tests to other types.
ASTM E0384	Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials	Yes with Guidance	Basic methods for Knoop and Vickers; tests at temperatures outside of nominal (10°C to 35°C) permitted. Post-processing likely necessary for proper specimen surface roughness.
ASTM E0448	Practice for Scleroscope Hardness Testing of Metallic Materials	Yes with Guidance	Dynamic indentation hardness (drop and bounce). This is the basic method. Requires post-processing in order to meet surface finish specification.
ASTM B647	Standard Test Method for Indentation Hardness of Aluminum Alloys by Means of a Webster Hardness Gage	Yes with Guidance	Webster gage for Al only. This is a portable handheld device useful for <i>in-situ</i> measurements; good for production/quality control purposes. Not as sensitive as Rockwell or Brinell. Requires post-processing in order to meet surface finish specification.
ASTM B648	Standard Test Method for Indentation Hardness of Aluminum Alloys by Means of a Barcol Impressor	Yes with Guidance	Barcol gage for Al only. This is a portable handheld device useful for <i>in-situ</i> measurements; good for production/quality control purposes. Not as sensitive as Rockwell or Brinell. Requires post-processing in order to meet surface finish specification.

Standard Designation	Standard Name	Applicable for AM Testing?	Notes
ASTM B724	Standard Test Method for Indentation Hardness of Aluminum Alloys by Means of a Newage, Portable, Non-Caliper-Type Instrument	Yes with Guidance	Newage gage for Al only. Good for large pieces that can't be measured with a caliper-type instrument. Requires post-processing in order to meet surface finish specification.
ISO 4545-1:2005	Metallic materials -- Knoop hardness test -- Part 1: Test method	Yes with Guidance	Basic Knoop test like ASTM E0384. Requires post-processing in order to meet surface finish specification.
ISO 6506-1:2005	Metallic materials -- Brinell hardness test -- Part 1: Test method	Yes with Guidance	Basic Brinell test like ASTM E0010. Requires post-processing in order to meet surface finish specification.
ISO 6507-1:2005	Metallic materials -- Vickers hardness test -- Part 1: Test method	Yes with Guidance	Basic Vickers test like ASTM E0384. Requires post-processing in order to meet surface finish specification.
ISO 6508	Metallic materials -- Rockwell hardness test -- Part 1: Test method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)	Yes with Guidance	Basic Rockwell test like ASTM E0018. Requires post-processing in order to meet surface finish specification.
ISO 14577	Metallic materials -- Instrumented indentation test for hardness and materials parameters -- Part 1: Test method	Yes with Guidance	This test considers the force and displacement of the indentation during plastic and elastic deformation; monitoring the complete cycle of increasing and removal of test force. Requires post-processing in order to meet surface finish specification.
ISO/TR 29381:2008	Metallic materials -- Measurement of mechanical properties by an instrumented indentation test -- Indentation tensile properties	Not a Test Method	Can derive tensile properties from indentation measurements via one of three methods (representative stress-strain, inverse FEA methods, or neural networks). Not a test method.
ASTM E0132	Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature	Yes with Guidance	Basic method, tension tests, requires extensometers; room temp only. Requires post-processing; specimens should be stress-relieved, isotropic and homogeneous.
ASTM E0290	Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility	Yes	Bend testing for ductility of materials
ASTM E0837	Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method	Yes with Guidance	Isotropic and linearly-elastic materials only; drill hole at center of strain rosette, and measure strains. If AM materials are anisotropic then this method may not be applicable.
ASTM E0915	Test Method for Verifying the Alignment of X-Ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement	No	This is not a materials test method, it is a method for verifying the alignment of an X-ray machine.
ISO 7438:2005	Metallic materials -- Bend test	Yes	Like ASTM E0290.
ISO 11531:1994	Metallic materials -- Earing test	No	Metal AM systems cannot easily make samples with thicknesses of 100 µm.
ISO/TR 14936:1998	Metallic materials -- Strain analysis report	Yes with Guidance	The standard applies to sheet but the thickness requirements are not specified. AM cannot make a very thin sheet.
ASTM E0003	Guide for Preparation of Metallographic Specimens	Not a test method	Not a mechanical test method, but important for micro-structural analysis.
ASTM E0007	Terminology Relating to Metallography	Not a test method	Terminology.
ASTM B348	Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Billets	Not a test method	Not a mechanical test method, but does contain useful specs for various materials that could be compared to those that are made additively.
ASTM B211	Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Bar, Rod, and Wire	Not a test method	Not a mechanical test method, but does contain useful specs for various materials that could be compared to those that are made additively.

Tabella 4.12: prove meccaniche di parti metalliche

Standard Designation	Standard Name	Applicable for AM?	Notes
ASTM B212	Standard Test Method for Apparent Density of Free-Flowing Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel	Yes	
ASTM B213	Standard Test Methods for Flow Rate of Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel	Yes	
ASTM B214	Standard Test Method for Sieve Analysis of Metal Powders	Yes with Guidance	Applicable for sieves with openings from 45 µm to 1000 µm. Not suitable for powders smaller than 45 µm.
ASTM B215	Standard Practices for Sampling Metal Powders	Yes	
ASTM B243	Standard Terminology of Powder Metallurgy	Not a test method	Terminology, not a test method.
ASTM B329	Standard Test Method for Apparent Density of Metal Powders and Compounds Using the Scott Volumeter	Yes	
ASTM B417	Standard Test Method for Apparent Density of Non-Free-Flowing Metal Powders Using the Carney Funnel	No	AM powders are typically free flowing, in fact they flow exceptionally well.
ASTM B527	Standard Test Method for Determination of Tap Density of Metallic Powders and Compounds	Yes	
ASTM B703	Standard Test Method for Apparent Density of Metal Powders and Related Compounds Using the Arnold Meter	Yes	
ASTM B761	Standard Test Method for Particle Size Distribution of Metal Powders and Related Compounds by X-Ray Monitoring of Gravity Sedimentation	Yes with Guidance	Test method works best "for the analysis of elemental tungsten, tungsten carbide, molybdenum, and tantalum. Other metal powders may be analyzed using this method with caution as to significance until actual satisfactory experience is developed." It appears that this only works for particles with sizes > 25 µm (and minimum size depends on species).
ASTM B822	Standard Test Method for Particle Size Distribution of Metal Powders and Related Compounds by Light Scattering	Yes	
ASTM B855	Standard Test Method for Volumetric Flow Rate of Metal Powders Using the Arnold Meter and Hall Flowmeter Funnel	Yes	
ASTM B923	Standard Test Method for Metal Powder Skeletal Density by Helium or Nitrogen Pycnometry	Yes	
ASTM B964	Standard Test Methods for Flow Rate of Metal Powders Using the Carney Funnel	Yes	
ASTM C177	Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus	Yes with Guidance	Method uses solid specimens, applicability to powder specimens is uncertain.
ASTM E161	Standard Specification for Precision Electroformed Sieves	Not a Test Method	This standard presents the specifications for precision electroformed sieves, and is not a test method.
ASTM E1409	Standard Test Method for Determination of Oxygen and Nitrogen in Titanium and Titanium Alloys by the Inert Gas Fusion Technique	No	This method will likely not work with metal powders since as part of the method the surface of the material must first be removed, either chemically or mechanically. Given the small diameters of AM powders, this is very impractical, and may completely consume the powder under test.
ASTM E1447	Standard Test Method for Determination of Hydrogen in Titanium and Titanium Alloys by Inert Gas Fusion Thermal Conductivity - Infrared Detection Method	No	This method requires solid form specimens.
ASTM E1461	Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method	No	This method requires homogeneous isotropic solid disc specimens.
ASTM E1569	Standard Test Method for Determination of Oxygen in Tantalum Powder by Inert Gas Fusion Technique	No	This method is only for tantalum powders.
ASTM E2792	Standard Test Method for Determination of Hydrogen in Aluminum and Aluminum Alloys by Inert Gas Fusion	No	This method does not seem to be applicable to powder samples.

Tabella 4.13: test relativi alla polvere metallica

4.6.4 Qualificazione delle apparecchiature

La qualificazione e la convalida dei processi sono necessarie per garantire che il funzionamento dei processi rientri in una finestra di elaborazione ottimale predeterminata per ottenere una produzione commerciale sostenibile. Lo standard industriale ISO 9000 richiede una buona documentazione per stabilire un processo di produzione controllato. Il concetto di convalida si concentra sulla definizione di prove documentate, che assicurano che un processo specifico produca costantemente un prodotto che soddisfi le sue specifiche predeterminate e gli attributi di qualità. Ogni processo di produzione deve essere convalidato e quindi includere tutte le attrezzature importanti utilizzate durante il processo. È da notare che questi regolamenti non forniscono istruzioni specifiche riguardo i requisiti di queste documentazioni di qualificazione. Le singole aziende possono progettare il proprio sistema di documentazione di convalida e qualifica in base ai propri sistemi di qualità. Le attività di validazione o qualificazione vengono svolte con un'attenta pianificazione delle prove e dei criteri di accettazione che vengono preventivamente definiti. Questi criteri dovrebbero essere elencati in un documento pre-approvato chiamato protocollo. La convalida di solito incorpora il concetto di qualificazione. Ciò significa che, in generale, la qualificazione può essere vista come un sottoinsieme della convalida.

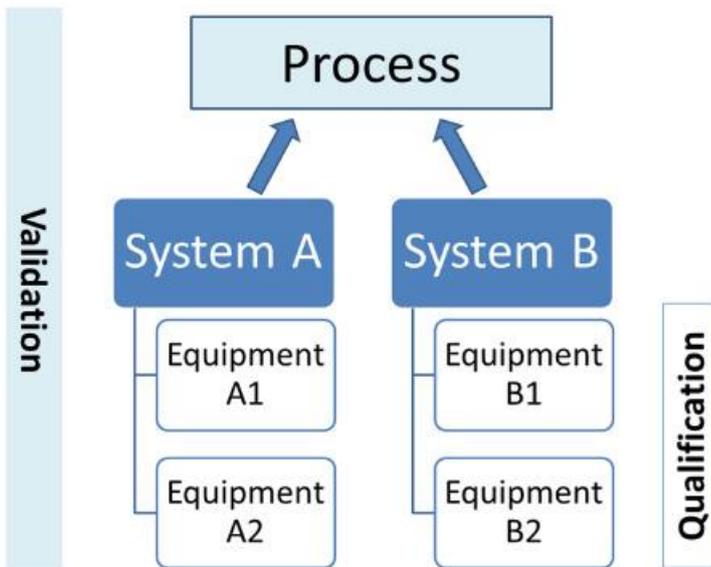


Fig. 4.9: qualifica come sottoinsieme di attività durante la convalida

La qualificazione e la convalida sono importanti per stabilire e mantenere un sistema di gestione della qualità controllata durante la produzione. Un processo di produzione convalidato può essere monitorato continuamente attraverso un approccio di controllo statistico del processo per garantire la qualità del prodotto. La qualificazione e la convalida supportano anche l'implementazione del miglioramento continuo delle apparecchiature e dei processi di produzione. Di conseguenza il proprietario del processo ne avrà una maggiore conoscenza attraverso l'esecuzione della qualifica.

Di seguito si osserva un esempio di un tipico piano di qualificazione delle apparecchiature (EQ):

- Design Qualification (DQ);
- Installation Qualification (IQ);
- Operation Qualification (OQ);
- Performance Qualification (PQ).

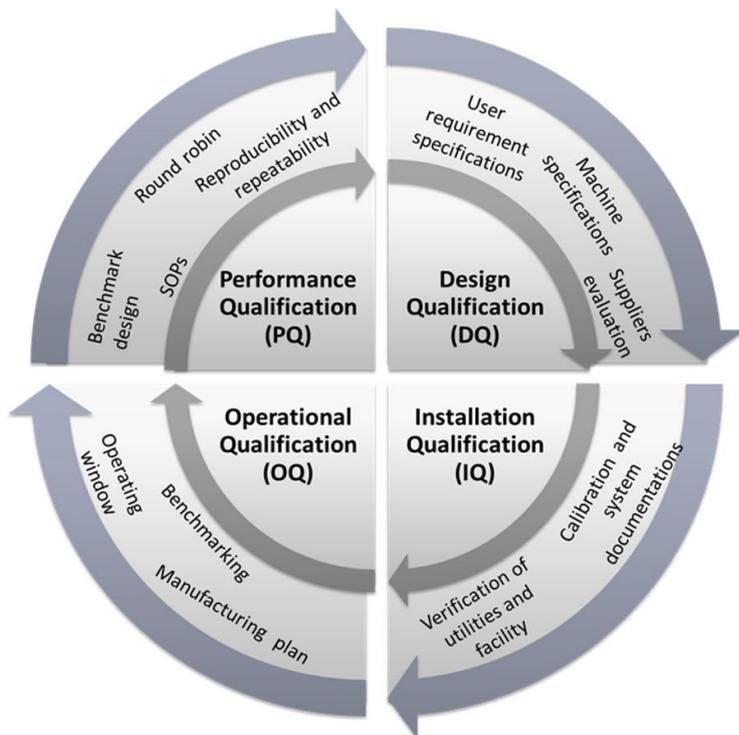


Fig. 4.10: quattro fasi di qualificazione in un tipico piano di qualificazione delle apparecchiature

In ogni fase di qualificazione, un protocollo dovrebbe essere pre-approvato dal gruppo di qualità. Il protocollo dovrebbe definire chiaramente i test necessari da condurre durante ogni fase di qualificazione insieme ai criteri di accettazione. Dopo ogni fase di qualificazione dovrebbe essere prodotto un rapporto. I rapporti documentano i risultati dei test condotti. Il rapporto dovrebbe anche documentare e affrontare eventuali risultati fuori specifica o non conformità riscontrati durante le attività di qualificazione.

La qualificazione del progetto (DQ) definisce le specifiche funzionali e operative delle apparecchiature e dettaglia le decisioni consapevoli nella sezione del fornitore. L'apparecchiatura viene fornita con le funzioni e i criteri di prestazione richiesti per soddisfare le esigenze degli utenti. La valutazione di un fornitore documentata in questa fase garantirà anche che il fornitore abbia capacità di supporto sufficienti per fornire formazione e supporto successivo IQ. È anche importante garantire che il fornitore sia in grado di fornire supporto per il prodotto o supporto per l'aggiornamento del software per tutto il ciclo di vita della macchina. L'elenco seguente mostra i passaggi consigliati che dovrebbero essere considerati in un DQ:

1. Descrizione dell'uso previsto per l'apparecchiatura e specifiche dei requisiti dell'utente;
2. Descrizione delle specifiche funzionali, operative e di sicurezza;
3. Descrizione del computer e del software;
4. Valutazione di fornitori o venditori.

La qualificazione dell'installazione (IQ) stabilisce la certezza che sia l'hardware che il software dell'apparecchiatura soddisfino le intenzioni di progettazione approvate e che le raccomandazioni del produttore siano adeguatamente considerate. L'IQ stabilisce che l'apparecchiatura è come specificata e correttamente installata. In questa fase dovrebbe essere verificata anche l'integrazione con altre apparecchiature e servizi. In IQ, l'ambiente di installazione viene controllato anche per un uso stabile e sicuro dell'apparecchiatura. Si riporta un test generale dell'IQ dei sistemi AM:

1. Controllare il sito di installazione per considerare le raccomandazioni del produttore;
2. Ispezione fisica della macchina;

3. Verifica della documentazione di sistema, inclusi hardware e software. Potrebbe includere schede tecniche, requisiti delle specifiche funzionali della macchina e del software, materiale di costruzione e certificati per sottocomponenti critici;
4. Verificare la scheda dei dati di sicurezza dei materiali consigliati per la stampante;
5. Verificare la disponibilità della documentazione relativa alle apparecchiature, come manuali operativi, registri e dischi di installazione del software;
6. Verificare la disponibilità del requisito di calibrazione che il componente sia calibrato correttamente con la documentazione;
7. Definire la frequenza di manutenzione e calibrazione con le raccomandazioni del produttore.

Nel panorama commerciale dei sistemi AM, i fornitori che dispensano il sistema saranno in gran parte in grado di assistere l'IQ. Il fornitore che può mettere a disposizione la documentazione IQ ed eseguire parte del test funzionale come test di accettazione in fabbrica presso la sede del produttore. Ciò aumenterà l'efficienza e l'affidabilità di un IQ ben pianificato.

La qualificazione operativa (OQ) è necessaria durante il passaggio dallo sviluppo del prodotto all'attrezzatura di produzione effettiva o quando si ottimizza il processo testando diversi parametri operativi. L'OQ conferma che sia l'hardware che il software dell'apparecchiatura sono in grado di funzionare in modo coerente entro i limiti e le tolleranze stabiliti. Le funzioni critiche del processo devono soddisfare le specifiche operative e rispondere adeguatamente in condizioni di guasto. Quindi è necessario testare lo scenario peggiore e fornire una dimostrazione documentata che l'apparecchiatura funzionerà come previsto durante il funzionamento agli estremi dell'intervallo di funzionamento proposto. Poiché le condizioni operative per diversi materiali o caratteristiche di progettazione possono variare in AM, è quindi importante identificare tutti i materiali o le applicazioni previste che verranno prodotte utilizzando la particolare apparecchiatura AM. Ciò garantirà che l'OQ possa essere eseguito in modo realistico e per evitare test di qualificazione eccessivamente estesi. Si riporta un test OQ generale dei sistemi AM:

1. Verificare che tutti i prerequisiti OQ siano completi in quanto tutte le sezioni IQ siano completate o che eventuali sezioni non eseguite non influiscano sulle attività di esecuzione dell'OQ;
2. Sono in atto e approvate procedure operative standard e tutta la formazione individuale richiesta è documentata e disponibile;
3. Verificare che tutti i sottosistemi o gli strumenti critici per il funzionamento del sistema siano calibrati;
4. Eseguire test di interruzione dell'alimentazione e ripristino e documentare gli effetti di questi eventi sul controllo del sistema;
5. Preparare un modello standard come documento di controllo del processo con le importanti informazioni di configurazione del documento da compilare insieme alle parti finite;
6. Le parti del test per il dispositivo sono progettate specificatamente e si adattano allo scopo previsto in OQ.
7. Determinare i parametri di stampa corrispondenti e i parametri di processo critici;
8. Gli attributi critici di qualità della parte dovrebbero essere testati per coprire l'intervallo operativo previsto della macchina, incluso lo scenario peggiore;
9. Verificare i metodi di prova standard per misurare gli attributi critici di qualità e caratterizzare gli attributi, comprese le diverse proprietà come le proprietà meccaniche, resistenza alla trazione, allungamento a rottura, qualità della superficie, densità delle parti e proprietà termiche;
10. Stabilire un piano di produzione per standardizzare le operazioni di stampa durante l'OQ. Gli esempi di un piano di produzione dovrebbero includere: geometria della parte, postazione nel volume di costruzione e orientamento; informazioni sulle materie prime e movimentazione dei

materiali; requisiti della piattaforma/camera di costruzione; configurazione della macchina, parametri di stampa, come modalità di stampa, impostazioni di esposizione laser e strategia del percorso laser; monitoraggio del processo; procedura di rimozione delle parti; procedura di post-processo del pezzo.

Di seguito viene fornito un elenco di standard o elementi di lavoro rilevanti durante l'OQ: ASTM F2971-13, ISO/ASTM52921-13, ISO/ASTM52915-16, ASTM F3122-14.

La qualificazione delle prestazioni (PQ) è il processo per dimostrare che l'apparecchiatura funziona costantemente come previsto e soddisfa tutti i criteri di accettazione prestabiliti. La PQ viene generalmente eseguita in condizioni che rappresentano le condizioni di produzione ordinaria. Il PQ include l'integrazione di procedure operative standard, personale e sistemi, piano di costruzione e materiali per verificare che l'apparecchiatura produca costantemente e ripetutamente l'output richiesto. Di seguito si riporta il test PQ generale per sistemi AM:

1. Procedure operative standard approvate, come il funzionamento del sistema, delle apparecchiature di prova, il piano di campionamento, il metodo di prova;
2. Dovrebbe essere disponibile la certificazione delle materie prime;
3. La progettazione della parte di riferimento e la configurazione di costruzione dovrebbero essere rappresentative di tutti gli scenari di esecuzione di produzione previsti;
4. È necessario verificare i requisiti di calibrazione e manutenzione del sistema;
5. Gli attributi critici di qualità delle parti sono definiti e caratterizzati. La proprietà funzionale della parte di riferimento dovrebbe essere considerata;
6. Un piano di produzione pre-approvato e dettagliato con le specifiche sulla sequenza di produzione, sui parametri della macchina e della lavorazione, sulle materie prime, sulla post-elaborazione utilizzata e sulla procedura di misurazione utilizzata;
7. La precisione e la robustezza del piano di produzione possono essere verificate utilizzando una procedura pilotata prima del PQ;
8. I parametri critici del processo vengono testati per la riproducibilità e la ripetibilità;
9. Le variazioni nella parte del dispositivo da testare dovranno concentrarsi sugli effetti tra operatori, costruzioni e misurazioni.

La PQ potrebbe essere un'attività ampia e costosa poiché una varietà di parametri e variabili di elaborazione è consentita nella creazione di qualsiasi parte AM. È quindi un consenso logico eseguire PQ come parte di un test per ottenere un elevato livello di fiducia in specifiche apparecchiature AM. Sono state fatte analogie per imparare dai test per i metodi analitici come indicato in ASTM E691 e ASTM E1169 per portare nuovi valori nei test dei processi AM. I protocolli standard di studio erano uno degli elementi d'azione prioritari identificati nella tabella di marcia della scienza delle misurazioni per la produzione additiva basata sui metalli. Di seguito è riportato un elenco di standard o elementi di lavoro pertinenti di ASTM per PQ: F2924-14, F3001-14, F3049-14, F3055-14a, F3056-14e1, F3091/F3091M-14, F3184-16 e F3187-16.

Un'altra considerazione importante nella qualificazione delle apparecchiature AM è la convalida del sistema informatico. Tutte le apparecchiature AM sono sistemi di computer collegati per la fabbricazione automatica e digitale. Le applicazioni software in AM potrebbero includere l'uso per la trasformazione delle coordinate, il consolidamento del lavoro di costruzione e la previsione dei parametri di processo. Anche se ora non è un prerequisito per convalidare il software operativo del sistema AM, il principio di Computer System Validation (CSM) contribuirà al sistema di qualità totale in un sito di produzione AM. La qualità di una parte stampata è direttamente correlata alla qualità del file di input e quindi al software di elaborazione della stampante. Questa sezione evidenzia le considerazioni chiave su CSV (Comma-Separated

Values) e record elettronici, che sono fondamentali in AM. CSV applica la definizione di convalida ad un sistema informatico. Seguendo i principi di validazione del processo, CSV richiede un flusso di qualificazione simile a quanto segue:

- Utente per fornire le specifiche dei requisiti dell'utente;
- Fornitore del sistema informatico per fornire specifiche di progettazione e funzionali;
- IQ, OQ e PQ del sistema informatico per verificare che i requisiti dell'utente siano soddisfatti.

4.7 Analisi delle lacune e delle barriere di standardizzazione AM

Questo paragrafo raccoglie un elenco delle principali lacune e barriere basate sui risultati precedenti dei processi SASAM. Nonché la roadmap della produzione additiva pubblicata da AMSC. L'elenco è suddiviso nei seguenti argomenti corrispondenti a diversi segmenti della catena AM:

- Modellazione e design;
- Materiali;
- Processo: comprese attrezzature e post-elaborazione;
- Prodotto: inclusi i test.

Inoltre, una categoria generale e un'analisi settoriale sono state considerate specificamente per l'industria aerospaziale. Questo elenco di lacune sarà utilizzato per definire le priorità e le azioni per affrontarle da discutere nelle sessioni di esperti e da includere nella roadmap AM.

Gap Name	Description
Increased industry engagement on standards development	To accelerate AM market take up, industry should be further engage in CEN, ASTM and ISO standars development. Possible barriers concerning time and money to follow this activity should be minimized.
Decision support: additive vs. subtractive	A guidelines or a ISO/PAS publicly available specification would be useful for helping users understand the advantages/disadvantages of AM processes vs. traditional manufacturing processes while also providing decision criteria so informed design/manufacturing decision can be made.
Machine operator training and qualification	It is required to develop AM operator training and qualification standards or guidelines.

Tabella 4.14: tabella riassuntiva generale delle lacune di standardizzazione

Gap Name	Description
Process-specific design guidelines	The design guideline for PBF is currently the sole process-specific design guideline available. There is development work in the pipeline to push to other process specific design guidelines, taking into account that ASTM and ISO identify 7 types of AM processes. Application-specific design guidelines for Medical Application is on-going as part of ISO/TC261/JG70.
Application-specific design guidelines	As industry fields mature in particular AM applications, best practices should be recorded. For example, design for assembly, for printed electronics, for medical, etc.
Design guide for surface finish post-processing	AM is challenged with meeting the surface finish requirements of many fatigue critical parts. Many third party surface enhancement processes (such as micro-machining, Isotropic Super Finishing, Drag Finishing, and laser micromachining) have been used to bring the finish to an acceptable level. A design guide is required to provide a means to design for these third party finishing enhancement techniques.
Design and manufacturing process feasibility	Since different AM processes have different design requirements, manufacturing requirements, and manufacturing capabilities (e.g., overhang angles, minimum member thickness, minimum hole diameter, etc.), it is often challenging to determine if a design is feasible for a given AM process. A standard for reporting machine inputs and capabilities is needed to enable design tools to determine manufacturing feasibility.
AM simulation	AM process simulation tools are becoming an important aspect of the AM design process by enabling the designer to understand and mitigate residual stress and process dependent deformation. A standard is needed to enable verification and validation of applicable process simulation tools.
Design documentation	In most cases, upon completion of an engineering design, there will be a requirement to completely document it. AM offers the capability to create new designs that were never conceived of before. Consequently, new standards are required to assist in the documentation of these designs. They should cover aspects such as content of a technical data package, new dimensioning and tolerancing requirements, definitive standard AM file format, terminology, documentation for in-process monitoring, documentation for new functional surface features, specification to procure parts from third parties, etc.
Design verification and validation	The verification and subsequent validation of a design are important steps to ensure it fulfills its goals and application. In this sense, standardization gaps have been identified regarding methods of configuration and version control as well as the measurement of AM features such as complex shapes or internal features.

Tabella 4.15: tabella riassuntiva delle lacune di standardizzazione per il design

Gap Name	Description
Precursor material properties	Precursor material requirements differ, even within one materials family, from one AM equipment manufacturer or application to another. While a large body of work pertaining to standard test methods is being carried out globally, more work is needed to address the variation in AM precursor materials. Standards and criteria are required for assessing the following precursor materials' parameters and link them with the AM process: flowability, spreadability, particle size/particle size distribution, particle morphology, presence of hollow particles, etc.
Powder specifications	There is a need to develop AM process-specific powder specifications to facilitate procurement of metal powders for use in AM machines.
Storage of materials	Guidance on storage of AM materials is needed.
Recycling powder	A standard is needed for the re-use of material that was already printed, as well as for the material that was not printed but is already within the system. Guidelines for sieving reused powder prior to mixing should be also created.

Tabella 4.16: tabella riassuntiva delle lacune di standardizzazione per i materiali

Gap Name	Description
Machine calibration and preventive maintenance	There are no known industry standards addressing machine calibration and preventive maintenance.
Machine health monitoring	There are no known industry standards addressing AM machine health monitoring (observing the machinery to identify changes that may indicate a fault).
Parameter control	Standards are needed to identify requirements for demonstrating that a set of process parameters produces an acceptable part, and for ensuring that those process parameters remain consistent from build to build.
Adverse machine environmental conditions: effect on component quality	There is a need for developing standards and specifications to address external environmental factors that could negatively impact component quality.
Environmental Health and Safety (EHS)	There is a need for standards to address EHS in the AM process and the protection of machine operators.
Cybersecurity	Best practices to protect digital files used in the AM process are required.
Hot Isostatic Pressing (HIP)	The existing HIP standards do not fully address AM material-related issues.
Process monitoring	No standards have been identified to address process monitoring. Standards should account for motion control components that guide measurement and remediation of error in positioning systems where possible in AM machines.
Standard protocols for round robin testing	AM materials, equipment and process need to be qualified to repeatedly produce high-quality parts. The availability of several types of processes, machines and materials complicates this action. These protocols are needed to enable independent testing of processes and equipment and to establish trust on the technology.

Tabella 4.17: tabella riassuntiva delle lacune di standardizzazione per il processo

Gap Name	Context
Mechanical properties	It is necessary to develop standards that identify the means to establish minimum mechanical properties for a specific material made by a given AM system using a given set of AM parameters for a given AM build design.
Microstructure	A standard for characterization and acceptance criteria of AM microstructures should be developed.
Dimensional metrology of internal features	Standards are needed for the dimensional measurement of internal features of AM objects.
Coupon testing	For a given application there is not a clear method or best practice document to help determine the applicability and validity of coupon testing to a specific type of component or feature.
Nondestructive evaluation (NDE) methods	There is a need for standard test methods to accept/reject AM parts in the basis of nondestructive methods.
Terminology for the identification of AM flaws detectable by nondestructive evaluation	The development of standardized terminology to identify and describe flaws is required.

Tabella 4.18: tabella riassuntiva delle lacune di standardizzazione per la produzione

Infine, si può considerare l'applicazione degli standard per i requisiti aerospaziali: occorre dimostrare agli organi di certificazione che la base tecnica ed industriale dell'AM potrebbe essere in linea con le normali pratiche del settore. Gli standard sono necessari per sviluppare un percorso chiaro per l'accettazione.

4.8 Percorso certificativo per l'AICS

L'obiettivo è quello di creare un percorso di certificazione per l'additive manufacturing supportato da tutte le parti in causa. Per questo scopo Stratasys ha sviluppato l'Aircraft Interior Certification Solution (AICS), che include una specifica configurazione della Fortus 900 per garantire risultati di costruzione coerenti ed affidabili ed un set di dati per ULTEM 9085. Questo prodotto dà alle compagnie aeree il processo per la realizzazione del materiale e gli standard necessari per lo sviluppo di parti del velivolo realizzate con additive manufacturing. I permessi di progettazione sviluppati attraverso il processo NCAMP, con FAA che ha il compito di supervisore, risiede nel pubblico dominio, accessibile a qualsiasi azienda aerospaziale.

Il prodotto AICS è costituito dai seguenti componenti:

- Specifiche di materiali e processi;
- Certificato del materiale ULTEM 9085;
- Configurazione degli interni degli aeromobili Fortus 900;
- Set di dati consentito dal design B-Basis;

- Guida al processo sulla qualificazione del sistema.

La specifica del materiale regola la produzione della resina grezza ULTEM 9085 e la sua conversione in filamento. Ci si concentra sulla criticità delle caratteristiche dello stock grezzo per garantire ai clienti un materiale di alta qualità. Le tecniche di ispezione, seguendo gli standard di qualità stabiliti dall'industria dell'estrusione, vengono utilizzate per convertire il materiale in materia prima affidabili e ad alte prestazioni per le stampanti 3D Stratasys. La specifica del materiale è stata verificata dai principali OEM (Original Equipment Manufacturer) aerospaziali oltre al NIAR (National Institute of Aviation Research) e al FAA. Questi audit di successo forniscono la certezza che la base di installazione utilizzi materie prime di alta qualità e permetta di superare le principali preoccupazioni per la qualità della parte finale che è una sfida da dimostrare per altri processi AM e per i fornitori. La specifica del processo controlla l'intero flusso di lavoro dalla gestione dei materiali alla rimozione, ispezione e consegna delle parti installate con la resina ULTEM 9085. La specifica del processo fornisce anche le informazioni necessarie a garantire il Fortus 900mc, che opera all'interno delle specifiche per il raggiungimento e il mantenimento della qualifica della stampante. Questo documento è stato il risultato di diversi anni di isolamento e convalida dei parametri per trovare un equilibrio tra la libertà di progettazione illimitata e la produzione di parti stabili e ripetibili. Tutti e due questi documenti forniscono le specifiche e la guida necessarie per ottenere risultati coerenti e consentire una tracciabilità documentata per la produzione della materia prima.

Una considerazione fondamentale per la certificazione degli interni degli aeromobili è la resina certificata ULTEM 9085, le cui proprietà sono riportate nel paragrafo 3.2. Il filamento di resina certificato ULTEM 9085 viene fornito con una documentazione completa per fornire agli utenti la totale tracciabilità dalla resina grezza, passando per il filamento, fino ad arrivare alla parte finita. Un certificato di analisi per la resina grezza include i risultati dei test per una serie di proprietà del materiale. I metodi sono conformi agli standard FAR 25.53 e ASTM. Questo documento identifica anche il part number del materiale. Stratasys fornisce un certificato di analisi sul filamento prodotto a partire dalla materia prima. I risultati si ottengono considerando la forza di trazione, il contenuto di umidità e il flusso di fusione. Questo documento riflette il numero di produzione di Stratasys e il numero della resina SABIC, cioè del fornitore. Un certificato di conformità della produzione Stratasys specifica che il filamento è prodotto secondo le specifiche stabilite e fornisce informazioni sull'identificazione del materiale, compreso il numero della bobina del filamento. Le informazioni contenute in questi documenti creano una catena completa di tracciabilità dalla resina ULTEM 9085 grezza fino alla bobina di filamento.

Un altro elemento fondamentale del prodotto AICS è l'Aircraft Interiors Configuration Fortus 900mc. Questo, appositamente configurato, serve per produrre i risultati di costruzione coerenti ed affidabili con la resina ULTEM 9085 certificata. È disponibile come nuovo sistema di produzione acquistato o come aggiornamento hardware e software ai sistemi Fortus 900mc esistenti. Utilizzando un processo di deposizione di materiale avanzato, la configurazione degli interni degli aerei Fortus 900mc, fornisce una produzione e dei risultati coerenti. Si ha quindi la ripetibilità delle proprietà meccaniche necessarie per dimostrare l'equivalenza ai requisiti di progettazione. Inoltre, questa configurazione si traduce in una maggiore resistenza alla trazione finale, rispetto ai risultati dei test sulla configurazione standard Fortus 900mc.

La creazione del set di dati sulle proprietà del materiale (ammissibili di progettazione B-Basis) fornisce un altro elemento critico della certificazione. NCAMP, che è una divisione di NIAR, sviluppa questi dati e lavora con la FAA e i partner industriali per testare e qualificare i materiali per l'aerospazio. I risultati dei test verranno archiviati in un database dei materiali, accessibili al pubblico. Per sviluppare questo set di dati, NCAMP ha stabilito un piano di test completo e revisionato dalla FAA. Il piano di test comprendeva la produzione di 4700 provini in resina ULTEM 9085, provenienti da più lotti di materiale. Questi provini sono

stati prodotti attraverso diverse stampanti 3D Fortus 900mc, per tenere conto della variabilità del materiale, delle stampanti e della posizione della stampante.

Property	Method
Flammability Drip Time	FAR 25.853
Flammability Extinguishing Time	FAR 25.853
Flammability Burn Length	FAR 25.853
NBS Smoke and Density	FAR 25.853
Heat Release Peak	FAR 25.853
Specific Gravity	ASTM D792
Flexural Strength and Modulus	ASTM D790
Tensile Strength and Modulus	ASTM D638 (Type I)
MFR 295°C @ 6.7KG	ASTM D1238

Tabella 4.19: proprietà da dover testare

Property	Condition/Method*
Thickness	ASTM D3171-11/or applicable mechanical test method.
Density	ASTM D792-08
Photomicrograph	CP6101 and CP6102
CTE by TMA	ASTM D228/E831
Glass Transition Temperature, Tg by DMA flexural loading	Dry and Wet – ASTM D7028

* Where the applicable standard allows variations in specimen form or test method, the specific parameters to be used will be specified in the test work instructions and reported in the final test report.

Tabella 4.20: altre proprietà importanti da considerare

Test Type	Test Type (5)	Property	Number of Lots x Number of Machines x Number of Coupons		
			Test Temperature/Moisture Condition		
			CTD	RTD	ETW1
OHT	ASTM D5766 Open Hole Tension (1) X	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
OHT	ASTM D5766 Open Hole Tension (1) Y	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
OHT	ASTM D5766 Open Hole Tension (1) Z	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
OHT	ASTM D5766 Open Hole Tension (1) Z (45)	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
FHT	ASTM D6742 Filled Hole Tension (2) X	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
FHT	ASTM D6742 Filled Hole Tension (2) Y	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
FHT	ASTM D6742 Filled Hole Tension (2) Z	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
FHT	ASTM D6742 Filled Hole Tension (2) Z (45)	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
OHC	ASTM D6484 Open Hole Compression (1) X	Strength		3x2x4 (4)	3x2x4
OHC	ASTM D6484 Open Hole Compression (1) Y	Strength		3x2x4 (4)	3x2x4
OHC	ASTM D6484 Open Hole Compression (1) Z	Strength		3x2x4 (4)	3x2x4
OHC	ASTM D6484 Open Hole Compression (1) Z (45)	Strength		3x2x4 (4)	3x2x4
FHC	ASTM D6742 Filled Hole Compression (2) X	Strength		3x2x4	3x2x4
FHC	ASTM D6742 Filled Hole Compression (2) Y	Strength		3x2x4	3x2x4
FHC	ASTM D6742 Filled Hole Compression (2) Z	Strength		3x2x4	3x2x4
FHC	ASTM D6742 Filled Hole Compression (2) Z (45)	Strength		3x2x4	3x2x4
SSB	ASTM D5961 Single Shear Bearing (3) X	Strength & Deformation		3x2x4	3x2x4
SSB	ASTM D5961 Single Shear Bearing (3) Y	Strength & Deformation		3x2x4	3x2x4
SSB	ASTM D5961 Single Shear Bearing (3) Z	Strength & Deformation		3x2x4	3x2x4
SSB	ASTM D5961 Single Shear Bearing (3) Z (45)	Strength & Deformation		3x2x4	3x2x4
IZOD Impact	ASTM D256 IZOD Pendulum Impact X	Impact Resistance		3x2x4	
IZOD Impact	ASTM D256 IZOD Pendulum Impact Y	Impact Resistance		3x2x4	
IZOD Impact	ASTM D256 IZOD Pendulum Impact Z	Impact Resistance		3x2x4	
IZOD Impact	ASTM D256 IZOD Pendulum Impact Z (45)	Impact Resistance		3x2x4	

(1) Open-hole configuration: 0.25 inch hole diameter, 1.5 inch width.

(2) Filled-hole test configuration: 0.25 inch diameter, see section 2 NTP AM-P-001 document for fastener callout, 1.5 inch width.

(3) Single shear bearing test configuration: 0.25 inch hole diameter, 1.5 inch width, see section 2 of NTP AM-P-001 document for fastener callout, e/D=3, ASTM D5961-08 Procedure C.

(4) Back-to-back strain gages needed on the first two specimens. If no buckling is observed, the remaining modulus specimens will require strain gage on one side of the specimens only.

Appropriate extensometer may be used in place of the strain gage.

(5) All holes will be drilled/reamed by machine.

Tabella 4.21: altre considerazioni sulle proprietà

Extended Contact	Exposure	Test Condition	Code
100 Low Lead Aviation Fuel (ASTM D910)	90 days min. @ 70°F±10°F	70°F	FS11RT
	90 days min. @ 70°F±10°F	180°F	FS11ET
ASTM D1655 Jet A Fuel (other jet fuel may be used but its type must be reported)	90 days min. @ 70°F±10°F	70°F	FS12RT
	90 days min. @ 70°F±10°F	180°F	FS12ET
MIL-PRF-5606 Hydraulic Oil	90 days min. @ 70°F±10°F	70°F	FS13RT
	90 days min. @ 70°F±10°F	180°F	FS13ET
MIL-PRF-83282 Hydraulic Oil	90 days min. @ 70°F±10°F	70°F	FS14RT
	90 days min. @ 70°F±10°F	180°F	FS14ET
MIL-PRF-7808 Engine Oil	90 days min. @ 70°F±10°F	70°F	FS15RT
	90 days min. @ 70°F±10°F	180°F	FS15ET
MIL-PRF-23699, Class STD Engine Oil	90 days min. @ 70°F±10°F	70°F	FS16RT
	90 days min. @ 70°F±10°F	180°F	FS16ET
Sea Water (ASTM D1141 or equiv.)	90 days min. @ 70°F±10°F	70°F	FS17RT
	90 days min. @ 70°F±10°F	180°F	FS17ET
Skydrol LD-4 (SAE AS1241, Type IV, Class 1)	90 days min. @ 70°F±10°F	70°F	FS18RT
	90 days min. @ 70°F±10°F	180°F	FS18ET
50% Water with 50% Skydrol LD-4 (SAE AS1241, Type IV, Class 1)	90 days min. @ 70°F±10°F	70°F	FS19RT
	90 days min. @ 70°F±10°F	180°F	FS19ET
Short Duration Contact	Exposure	Test Condition	Code
MEK washing fluid. ASTM D740	90 minutes min. @ 70°F±10°F	70°F	FS21RT
	90 minutes min. @ 70°F±10°F	180°F	FS21ET
Polypropylene Glycol Deicer (Type I) SAE AMS 1424	90 minutes min. @ 70°F±10°F	70°F	FS22RT
	90 minutes min. @ 70°F±10°F	180°F	FS22ET
Isopropyl Alcohol Deicing Agent (TT-I-735)	48±4 hours @70°F±10°F	70°F	FS23RT
	48±4 hours @70°F±10°F	180°F	FS23ET
Control Tests	Exposure	Test Condition	Code
Distilled Water	90 days min. at 70°F±10°F	70°F	FS31RT
	90 days min. at 70°F±10°F	180°F	FS31ET
Dry	Dry per section 6.1 NTP AM-P-001	70°F	FS32RT
	Dry per section 6.1 NTP AM-P-001	180°F	FS32ET
85% Relative Humidity	Per section 6.1 NTP AM-P-001	70°F	FS33RT
	Per section 6.1 NTP AM-P-001	180°F	FS33ET

Tabella 4.22: test sulla sensibilità ai fluidi

Per aiutare i clienti con l'implementazione, Stratasys fornisce una guida al processo. Viene fornito un kit di strumenti di equivalenza per stabilire la qualità e gli standard di coerenza per la produzione di provini di equivalenza. L'unica attrezzatura fornita dal cliente necessaria è un forno di essiccazione sottovuoto e una scala di milligrammi. È inoltre incluso il supporto tecnico in loco di tre giorni per la convalida della configurazione del sistema precedentemente realizzato. Un documento di controllo del processo fornisce una guida specifica sui requisiti e sui limiti di ingegneria, materiali e controllo di processo per la produzione di provini per le prove di equivalenza. Si includono informazioni per l'impostazione ed il controllo del processo, la preparazione del file di stampa, la fabbricazione e l'ispezione. Una parte fondamentale di questa soluzione è la convalida del funzionamento soddisfacente del sistema prima della produzione di prova.

L'Aircraft Interior Certification Solution fornisce alle aziende aerospaziali gli strumenti e il processo per ottenere la certificazione additiva per parti prodotte per installazioni su aeromobili utilizzando l'ULTEM 9085 qualificato NCAMP. Il prodotto crea un chiaro percorso per la certificazione delle parti ed evita la necessità per le aziende di creare la propria serie di permessi di progettazione. Si ha semplicemente bisogno di mostrare l'equivalenza ad un lotto di prova molto più piccolo utilizzando la configurazione Aircraft Interiors Fortus 900mc. La combinazione del prodotto AICS e dei requisiti di progettazione della

resina ULTEM 9085 aiuta le aziende aerospaziali a risparmiare tempo e risorse finanziarie ed accelerare l'implementazione di parti prodotte attraverso AM certificate.

La soluzione per la certificazione degli interni degli aeromobili include i seguenti elementi ed è disponibile presso StratasyS:

- Resina certificata ULTEM 9085;
- Documentazione dei materiali e dei processi;
- Configurazione degli interni degli aerei Fortus 900mc;
- Kit di strumenti di equivalenza;
- Documento di controllo del processo.

4.9 Sintesi dei requisiti certificativi

I temi da dover affrontare per la certificazione Additive Manufacturing, relativa alle applicazioni aerospaziali, valgono sia per gli standard ISO che a quelli ASTM e riguardano:

- La terminologia;
- I processi, i sistemi ed i materiali;
- I metodi di prova e le specifiche di qualità;
- Il design;
- L'ambiente, la salute e la sicurezza.

La roadmap per gli standard considerati per la certificazione AM richiede la considerazione dei seguenti aspetti:

- Raccogliere e valutare le informazioni relative a sviluppi inerenti il settore aerospaziale;
- Trasformare i risultati per associarli alle parti interessate e ai requisiti AM;
- Raccogliere feedback, finalizzare e pubblicare la roadmap per la standardizzazione AM.

Sempre in relazione alla certificazione della produzione additiva, da quello che si evince nei paragrafi precedenti, si osserva che esistono cinque aree prioritarie per la certificazione ASTM F42 ed ISO/TC 261:

- Standard per l'integrazione;
- Standard per la sostenibilità ambientale;
- Standard delle qualità e delle prestazioni;
- Standard di servizio;
- Standard dei rischi.

Infine, l'analisi riguarda, come si evince dal paragrafo 4.6, una certificazione più specifica, cioè che deve considerare nel dettaglio il personale, le macchine, i materiali e le apparecchiature.

Per il personale si osserva che esistono tre livelli di qualificazione:

- Livello 1: operatore che gestisce l'hardware del processo AM;
- Livello 2: operatore che gestisce l'organizzazione del batch di stampa;
- Livello 3: operatore che gestisce tutte le attività intorno alla stampa 3D.

Per le macchine si devono considerare le informazioni sulle caratteristiche tecniche minime, come si desume dalla tabella 4.10. Bisogna considerare la formazione del personale per l'utilizzo della macchina e del software collegato; inoltre, per lavorazioni tramite macchine che utilizzano la polvere bisogna includere:

- L'installazione del sistema;
- La messa in opera del sistema;
- Le prove di conformità e sicurezza;
- Le prove di collaudo sull'intera fornitura.

Infine, sempre in relazione con le macchine, bisogna considerare anche la manutenzione, in particolare tramite:

- Interventi presso le strutture dell'amministrazione e riparazione/sostituzione di ogni parte difettosa delle attrezzature;
- Interventi di manutenzione preventiva e di calibrazione;
- Assistenza tecnica per il malfunzionamento per difetti non imputabili all'utilizzo della macchina.

Per i materiali ci sono una serie di standard da dover rispettare per l'AM ed essi sono ripresi dagli standard validi per i processi tradizionali; i principali sono:

- ASTM A370: metodi di prova e definizioni per test meccanici per la produzione di acciai;
- ASTM B557: prove di trazione in alluminio lavorato e pressofuso;
- ASTM E0111: metodi di prova per il modulo di Young, per il modulo tangente (pendenza della curva σ - ϵ) e per il modulo di corda (pendenza della corda tra due punti qualsiasi della curva σ - ϵ);
- ASTM E0143: metodo di prova per il modulo di taglio alla temperatura ambiente;
- ASTM E0606: pratica per il metodo di fatica controllato;
- ASTM E2789: guida per le prove di fatica da sfregamento;
- ISO 1352:2011: test di fatica con il controllo della coppia per i materiali metallici;
- ASTM E0290: metodi di prova per prove di flessione del materiale per la duttilità;
- ASTM B212: metodo di prova standard per la densità apparente di polveri metalliche scorrevoli;
- ASTM B213: metodo di prova standard per la portata di polveri metalliche scorrevoli;
- ASTM B215: pratiche standard per il campionamento delle polveri metalliche;
- ASTM B822: metodo di prova standard per la distribuzione dimensionale delle particelle e dei composti correlati mediante la diffusione della luce.

Per le apparecchiature si ha una suddivisione della qualificazione in quattro parti:

- Qualificazione del progetto;
- Qualificazione dell'installazione;
- Qualificazione operativa;
- Qualificazione delle prestazioni.

5. CERTIFICAZIONI E PROPRIETÀ PER ULTEM 9085 E 2400

5.1 Introduzione alla certificazione dell'ULTEM 9085

Document No.	Document Title
SSYS 300001-0001	Stratasys PEI Resin Specification
NMS 085	Aerospace Filament Specification (ULTEM 9085)
NMS 085/1	Aerospace Filament Specification (ULTEM 9085)
SSYS 400337-0001	Production Quality Documentation
FM93268	Certificate of Compliance
SSYS 108313-0009	Fortus 900mc Quick Reference CARD
SSYS 402737-0001	Fortus 900mc 3D Production System User Guide, SN >1000
SSYS 108314-0011	Fortus 900mc 3D Production System User Guide

Tabella 5.1: documenti Stratasys/NCAMP

5.2 Processo produttivo ULTEM 9085

5.2.1 Scopo

Questo processo descrive il metodo di fabbricazione utilizzando la resina termoplastica ULTEM 9085 certificata in ambito aerospaziale, ottenuta tramite la stampante Fortus 900mc di Stratasys, attraverso la tecnica di Fusion Deposition Modeling (FDM). Questa specifica copre: il materiale costituente, la configurazione della macchina, il software operativo, la calibrazione della macchina e i parametri di macchina e la costruzione e i criteri di accettazione. In aggiunta, all'interno delle istruzioni sono presenti delle specifiche, infatti si consiglia agli utenti di ottenere direttamente una guida pratica dal produttore della macchina per: la sua configurazione, la progettazione delle parti e la determinazione dei parametri di costruzione corretti.

Questa specifica non contiene tutte le informazioni necessarie tipicamente richieste per la fabbricazione di parti FDM come la qualifica del personale, i requisiti della struttura o qualsiasi criterio di accettazione delle parti. Gli utenti devono fare riferimento alle specifiche dei processi aziendali esistenti per tali informazioni. Inoltre, i metodi di prova ed i risultati descritti in questo documento intendono fornire proprietà di base del materiale prodotto tramite Additive Manufacturing, essenziale per la maggior parte di metodi ed analisi e sono coerenti con il manuale per i materiali compositi a matrice polimerica, cioè il CMH-17-1G. Questo report contiene dati sulle proprietà dei materiali di utilità comune per un'ampia gamma di progetti. I dati sulle proprietà dei materiali sono stati generati con NCAMP; le specifiche dei test sono state ispezionate da NCAMP tramite l'Authorized Inspection Representatives (AIR) e il test è stato assistito dall'AER. Tuttavia, i dati potrebbero non soddisfare tutte le esigenze di un programma aziendale specifico; proprietà specifiche, ambienti, orientazione di costruzione e situazioni del carico potrebbero richiedere test aggiuntivi.

L'utilizzo dei materiali e delle specifiche di processo NCAMP non è garanzia di adeguate prestazioni dei materiali e delle strutture. Gli utenti che utilizzano i materiali dovrebbero essere coinvolti attivamente nella

valutazione delle prestazioni e della qualità dei materiali, inclusi a titolo esemplificativo, ma non esclusivo, l'esecuzione di regolari test di controllo della qualità dell'acquirente, l'esecuzione di equivalenze periodiche o test aggiuntivi, la partecipazione ad attività di gestione delle modifiche ai materiali, il controllo statistico del processo e lo svolgimento di regolari audit dei fornitori.

L'analisi statica dei dati, inclusi i calcoli dei valori di base B, è stata fornita in un report separato, che è l'Additively Manufactured Polymer ULTEM 9085 Qualification Statistical Analysis Report NCP-RP-2018-007 Rev N/C. Per questo programma di qualificazione è stato utilizzato il piano di test NCAMP NTP AM-P-001. Le revisioni più recenti delle specifiche del materiale e del processo possono contenere informazioni e parametri di processo più aggiornati, ma qualsiasi variazione rispetto al programma di qualificazione deve essere attentamente considerata. I produttori di parti che desiderano utilizzare i dati sulle proprietà del materiale, i valori consentiti e le specifiche possono essere in grado di farlo dimostrando la capacità di riprodurre le proprietà del materiale originale e questo processo è noto come equivalenza. Maggiori informazioni su questo processo di equivalenza, compreso le statistiche dei test e le sue limitazioni, possono essere trovate nella Sezione 6 di DOT/FAA/AR-03/19 e nella Sezione 8.4.1 di CMH-17-1G.

Le compagnie aeree non dovrebbero utilizzare i dati pubblicati in questo rapporto senza inserire la specifica del materiale NCAMP NMS 085/1. L'NMS 085/1 può avere requisiti aggiuntivi elencati nel documento di controllo del processo dei materiali (PCD) e altre specifiche delle materie prime, che impongono controlli di qualità essenziali sulle materie prime e sulle apparecchiature e sui processi di produzione di queste materie prime. NMS 085/1 è una specifica gratuita del materiale per l'industria aerospaziale, pubblica e non proprietaria di una singola azienda.

5.2.2 Standard ASTM

Tutti i test erano conformi a standard, metodi e procedure riconosciuti a livello nazionale. I metodi di prova delle proprietà meccaniche specifiche applicabili al programma di prova includono:

- ASTM D256-10: metodo di prova standard per la determinazione della resistenza all'impatto del pendolo IZOD per le materie plastiche;
- ASTM D638-14: metodo di prova standard per le proprietà di trazione delle materie plastiche;
- ASTM D695-15: metodo di prova standard per le proprietà di compressione delle materie plastiche rigide;
- ASTM D790-17: metodo di prova standard per le proprietà di flessione di materie plastiche non rinforzate e rinforzate e materiali isolanti elettrici;
- ASTM D3418-15: metodo di prova standard per temperature di trazione ed entalpie di fusione e cristallizzazione di polimeri mediante la calorimetria a scansione differenziale (Differential Scanning Calorimetry);
- ASTM D5379-12: metodo di prova standard per le proprietà di taglio dei materiali compositi con il metodo di intaglio a V;
- ASTM D5766/D5766M-11: metodo di prova standard per la resistenza alla trazione a foro aperto di laminati compositi a matrice polimerica;
- ASTM D5961/D5961M-17: metodo di prova standard per la risposta del cuscinetto di laminati compositi a matrice polimerica;
- ASTM D6484/D6484M-14: metodo di prova standard per la resistenza alla compressione a foro aperto di laminati compositi a matrice polimerica;
- ASTM D6742/D6742M-12: pratica standard per prove di trazione e compressione a fori riempiti di laminati compositi a matrice polimerica;

- ASTM D7028-07 (2015): metodo di prova standard per la temperatura di transizione vetrosa (DMA Tg) di compositi a matrice polimerica mediante analisi meccanica dinamica (DMA).

5.2.3 Manutenzione e controllo della macchina

Sub-System	Description
Head	Critical sub-components within the head consist of drive motors, heater blocks, drive wheels, on-board electronics
Platen	Scratching of the build surface can result in lack of vacuum
X, Y, or Z Motor	Mechanism that drives belt or screw controlling gantry motion or platen location. Observed faults, shifts, and motion failures will result in replacing these motors and requiring requalification.
Gantry Rail	Structures holds the head and bridge and controls and maintains rigidity during x and y motions.
Master Computer	On-board computing system
Universal Power Supply	Critical component of the electrical system to regulate incoming power to all electronics on an FDM System

Tabella 5.2: componenti critici del sottosistema

5.2.4 Proprietà fisiche del filamento

Property ⁽¹⁾	Number of Replicates	Requirements ⁽²⁾
Pull Force	One of the first three canisters in the batch	≤ 1.75 lbs, ind ⁽³⁾
Diameter ⁽⁵⁾	'Continuously'	0.0675 to 0.0739 inch, ind ⁽⁴⁾ 0.07070 ± 0.00040 inch, avg ⁽⁴⁾
Ovality ⁽⁵⁾	'Continuously'	0.0028 inch (max), ind
DSC ⁽⁶⁾	Three canisters per batch	177.86 to 183.09 °C, ind 352.14 to 361.57 °F, ind

Tabella 5.3: proprietà fisiche del filamento (tipo 1)

Nota 1: le procedure specifiche dovrebbero essere identiche a quelle utilizzate nel programma di qualificazione del materiale originale.

Nota 2: "Ind" si riferisce a misurazioni individuali. "Avg" si riferisce alla media delle misurazioni. "Max" si riferisce alla misura massima.

Nota 3: picchi di forza fino a 3.75lb (1.70kg) con il test Stratasys SSYS 106194-0000 sono accettabili a condizione che soddisfino uno dei seguenti criteri: la lunghezza della punta superiore a 1.75lb non supera i 3 piedi (0.914m) o la lunghezza della punta superiore a 2.75lb non supera 1 piede (0.305m). Questo test è responsabilità del produttore e non deve essere ripetuto dall'acquirente.

Nota 4: l'eccezione del diametro a causa di un difetto locale è consentita se è entro 0.0739in al massimo di diametro per 0.6in di lunghezza. I diametri delle aree difettose devono essere inclusi nel calcolo della media del diametro ed inoltre, deve soddisfare il requisito che il 99.73% delle letture del diametro rientri nell'intervallo specificato da 0.0679 a 0.0735in.

Nota 5: il produttore deve misurare "continuamente" su una bobina una volta raffreddata e confezionata. Questo test è di responsabilità del produttore e non è necessario che venga ripetuto dall'acquirente.

Nota 6: testato in forma di filamento con il metodo di prova ASTM D1356, non come stampato.

5.2.5 Proprietà fisiche del campione come stampato

Property	Test Method ⁽¹⁾	Requirements ⁽²⁾
Thickness	ASTM D3171 or applicable mechanical test method	0.1172 to 0.1402 inch, avg ⁽³⁾

Tabella 5.4: proprietà fisiche del campione come stampato (tipo 1)

Nota 1: le procedure specifiche dovrebbero essere identiche a quelle utilizzate nel programma di qualificazione del materiale originale.

Nota 2: "Ind" si riferisce a misurazioni individuali. "Avd" si riferisce alle misurazioni medie.

Nota 3: calcolato dagli spessori dei provini stampati di qualificazione effettivi. Almeno tre misurazioni dello spessore attraverso la larghezza e la lunghezza del provino da ciascun campione elencato nella tabella del paragrafo successivo utilizzando un micrometro sferico o equivalente.

5.2.6 Proprietà meccaniche del campione come stampato

Property	Test Method ⁽¹⁾	Requirements ⁽²⁾
Tension Strength and Modulus ⁽³⁾ Room Temperature, Ambient Orientation: XY	ASTM D638 Type 1	Strength: Min. Ind. \geq 7.94 ksi Strength: Average \geq 9.06 ksi Modulus: 0.31 to 0.36 msi, avg
Compression Strength and Modulus ⁽⁴⁾ Room Temperature, Ambient Orientation: XY	Modified ASTM D695	1.0% Offset Strength: Min. Ind. \geq 9.72 ksi 1.0% Offset Strength: Average \geq 11.31 ksi Modulus: 0.35 to 0.41 msi, avg
Flex Strength and Modulus ⁽⁵⁾ Room Temperature, Ambient Orientation: XY	ASTM D790	Strength: Min. Ind. \geq 13.64 ksi Strength: Average \geq 15.58 ksi Modulus: 0.33 to 0.38 msi, avg

Tabella 5.5: proprietà meccaniche del campione come stampato (tipo 1)

Nota 1: le procedure specifiche dovrebbero essere identiche a quelle utilizzate nel programma di qualificazione del materiale originale.

Nota 2: "Ind" si riferisce a misurazioni individuali. "Avd" si riferisce alla media di cinque esemplari. Produttore: è richiesto un set di cinque campioni per ogni "primo", "centro" e "fine" di un lotto di resina che può essere utilizzato per produrre più lotti di filamenti da parte del produttore.

- Verrà utilizzato un set di cinque campioni dal "primo" filamento per rappresentare il lotto di filamenti da 1 a 1/3 del numero totale dei lotti di filamenti dello stesso lotto di resina grezza.
- Un set di cinque campioni dal filamento "medio" verrà utilizzato per rappresentare il filamento da 1/3 a 2/3 del numero totale di lotti di filamenti dello stesso lotto di resina grezza.
- Un set di cinque campioni dal filamento "finale" verrà utilizzato per rappresentare il lotto del filamento 2/3 fino all'ultimo lotto di filamenti dello stesso lotto di resina grezza.

Acquirente: è richiesto un set di cinque campioni per ciascun lotto di resina che può essere utilizzato per produrre più lotti di filamenti dal produttore.

Nota 3: i campioni vengono stampati secondo D638_XY_T16A. Il fornitore del materiale è tenuto a stampare i campioni secondo l'ultima versione di NPS 89085. L'intervallo di definizione del modulo: da 1000 a 3000 $\mu\epsilon$.

Nota 4: i campioni vengono stampati secondo D695_XY_T16A. Il fornitore del materiale è tenuto a stampare i campioni secondo l'ultima versione di NPS 89085. L'intervallo di deformazione del modulo: da 2000 a 6000 $\mu\epsilon$.

Nota 5: i campioni vengono stampati secondo D790_XY_T16A. Il fornitore del materiale è tenuto a stampare i campioni secondo l'ultima versione di NPS 89085. L'intervallo di deformazione del modulo: da 5000 a 20000 $\mu\epsilon$, utilizzando il deflettometro.

5.2.7 Formato di denominazione dei campioni NIAR

Tutti i campioni sono stati identificati in modo univoco utilizzando il seguente sistema di riferimento: numero del documento del piano di prova; ID del produttore per il materiale in AM; codice del materiale; ID di fabbricazione; macchina per l'identificazione della serie ID; tipo di test effettivo; posizione del campione; condizioni del test; numero del campione. Per esempio, NTPAMP001-SY-UM9085-RPM-A-M1-XT-13-RTD-3 indica: SY, materiale realizzato in AM; UM9085, nome del materiale; RPM, fabbricante; A, lotto del materiale AM; M1, ID della macchina, in cui si considera la direzione di prova, in particolare la trazione X e la posizione del provino, cioè l'angolo inferiore destro; 3, condizione del test considera la temperatura ambiente allo stato asciutto e il numero del campione.

Le istruzioni di prova, come si può osservare in figura 5.1, sono i vari assi su cui sono stati stampati i provini con la direzione di stampa dei raster (griglia) a $\pm 45^\circ$ rispetto all'asse di stampa. Sono stati stampati alcuni provini per sostituire i punti omessi a causa di anomalie dei test. Questi esemplari sono contraddistinti da una (R) alla fine del nome della stringa. Allo scopo di tracciare grafici ed analisi dei dati, viene fatto riferimento ad un ID assegnato per i lotti (batch), ovvero: AM Batch A come n.1, AM Batch B come n.2, ecc....

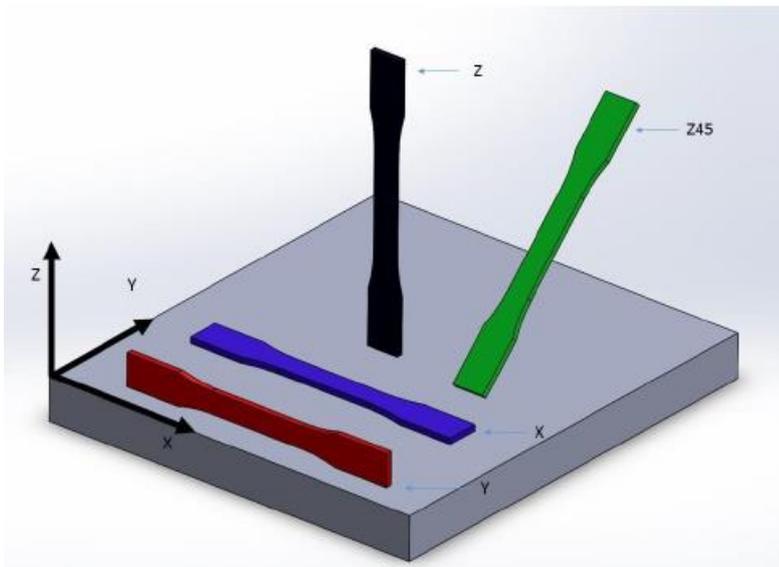


Fig. 5.1: orientamento di stampa dei provini con una griglia a $\pm 45^\circ$

I quattro orientamenti di costruzione sono X, Y, Z e Z (45°). Gli orientamenti di costruzione in questo caso non sono specifici per nessun progetto, pertanto un'attenta considerazione dovrebbe essere data alla validità derivante da questo programma sulla base degli orientamenti specifici del progetto in una struttura da certificare. Inoltre, vengono sottolineate anche quelle proprietà e le combinazioni di prova che si ritiene costituiscano il caso peggiore, che in generale è caldo umido per le proprietà del materiale della matrice polimerica.

Test Type	Test Type (6)	Property	Number of Batches x Number of Machines x Number of Coupons		
			Test Temperature/Moisture Condition		
			CTD	RTD	ETW1
OHT	ASTM D5766 Open Hole Tension X (1)	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
OHT	ASTM D5766 Open Hole Tension Y (1)	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
OHT	ASTM D5766 Open Hole Tension Z (1)	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
OHT	ASTM D5766 Open Hole Tension Z (45) (1)	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
FHT	ASTM D6742 Filled Hole Tension X (2)	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
FHT	ASTM D6742 Filled Hole Tension Y (2)	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
FHT	ASTM D6742 Filled Hole Tension Z (2)	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
FHT	ASTM D6742 Filled Hole Tension Z (45) (2)	Strength	3x2x4	3x2x4	3x2x4
OHC	ASTM D6484 Open Hole Compression X (1,3)	Strength		3x2x4 (5)	3x2x4
OHC	ASTM D6484 Open Hole Compression Y (1,3)	Strength		3x2x4 (5)	3x2x4
OHC	ASTM D6484 Open Hole Compression Z (1,3)	Strength		3x2x4 (5)	3x2x4
OHC	ASTM D6484 Open Hole Compression Z (45) (1,3)	Strength		3x2x4 (5)	3x2x4
FHC	ASTM D6742 Filled Hole Compression X (2,3)	Strength		3x2x4	3x2x4
FHC	ASTM D6742 Filled Hole Compression Y (2,3)	Strength		3x2x4	3x2x4
FHC	ASTM D6742 Filled Hole Compression Z (2,3)	Strength		3x2x4	3x2x4
FHC	ASTM D6742 Filled Hole Compression Z (45) (2,3)	Strength		3x2x4	3x2x4
SSB	ASTM D5961 Single Shear Bearing X (4)	Strength & Deformation		3x2x4	3x2x4
SSB	ASTM D5961 Single Shear Bearing Y (4)	Strength & Deformation		3x2x4	3x2x4
SSB	ASTM D5961 Single Shear Bearing Z (4)	Strength & Deformation		3x2x4	3x2x4
SSB	ASTM D5961 Single Shear Bearing Z (45) (4)	Strength & Deformation		3x2x4	3x2x4
IZOD Impact	ASTM D256 IZOD Pendulum Impact X	Impact Resistance		3x2x4	
IZOD Impact	ASTM D256 IZOD Pendulum Impact Y	Impact Resistance		3x2x4	
IZOD Impact	ASTM D256 IZOD Pendulum Impact Z	Impact Resistance		3x2x4	
IZOD Impact	ASTM D256 IZOD Pendulum Impact Z (45)	Impact Resistance		3x2x4	

Tabella 5.6: matrice di prova meccanica (proprietà di guida di progettazione)

Nota 1: configurazione di prova a foro aperto, con il diametro del foro di 0.25in (6.35mm) e larghezza di 1.5in (38.1mm).

Nota 2: configurazione di prova a foro pieno: diametro del foro di 6.35mm e larghezza di 38.1mm.

Nota 3: devono essere riportati i valori di forza allo 0.2 e all'1%. Per tutti i dati, compreso il modulo, verrà utilizzato un range di deformazione di 2000-6000µε.

Nota 4: configurazione di prova del cuscinetto a taglio singolo, con diametro del foro di 6.35mm e larghezza di 38.1mm.

Nota 5: sui primi due campioni possono essere utilizzati estensimetri schiena contro schiena. Se non si osserva alcuna instabilità, i campioni del modulo rimanenti richiederanno un estensimetro solo su un lato dei campioni. Se vengono utilizzati solo estensimetri l'instabilità potrebbe non essere identificabile.

Nota 6: tutti i fori verranno perforati/alesati dalla macchina.

Si evince che queste proprietà sono state determinate per ogni tipo di test e di orientazione della costruzione. I test sono stati eseguiti dal NIAR attraverso un Composites Laboratory o da un laboratorio approvato sotto la supervisione dell'NCAMP.

Property	Condition/Method (Note 1)	Min Replicates per Test Type and Build Orientation
Thickness	ASTM D3171-15/or applicable mechanical test method.	All data from mechanical test specimens
Density	ASTM D792-13	Per Note 3
Photomicrograph	CP6101 and CP6102	Per Note 3
CTE by TMA	ASTM E228/E831	Per Note 4
Glass Transition Temperature, T _g by DMA flexural loading	Dry and Wet – ASTM D7028	1 Dry, 1 Wet (Note 2 & 3)
Flammability Drip Time	FAR 25.853 (D) Appendix F, Part IV	Per Note 5
Flammability Extinguishing Time	FAR 25.853 (A), Appendix F, Part I, (a), 1, (i): 60 sec	Per Note 5
Flammability Burn Length	FAR 25.853 (A), Appendix F, Part I, (a), 1, (i): 60 sec	Per Note 5
NBS Smoke and Density	FAR 25.853 (D), Appendix F, PART V	Per Note 5
Heat Release Peak	FAR 25.853 (D) Appendix F, Part IV	Per Note 5

Tabella 5.7: matrice dei test fisici

Nota 1: laddove la norma applicabile consenta variazioni nella forma del campione o nel metodo di prova, i parametri specifici da utilizzare saranno specificati nelle istruzioni di lavoro di prova e riportati nel rapporto di prova finale.

Nota 2: totale minimo di 24 a secco e ad umido per ogni sistema di materiale.

Nota 3: si effettua la prova del primo provino di: ogni lotto, macchina e orientamento di costruzione. Esempio: testare il primo provino nella direzione X per il lotto A, macchina 1. Quindi testare il primo provino nella direzione X, lotto A, macchina 2. Bisogna continuare in questo modo attraverso tutte le combinazioni di orientamento, macchina e lotto.

Nota 4: minimo un provino per ogni lotto e orientamento alla costruzione. È richiesta una sola posizione di costruzione.

Nota 5: minimo tre provini per orientamento di costruzione. È richiesta una sola posizione di costruzione.

Per l'analisi delle condizioni ambientali, sono stati eseguiti i seguenti test dal NIAR Composites Laboratory sotto la supervisione di NCAMP.

Cold Temperature Dry: CTD = $-65 \pm 5^\circ\text{F}$ ($-53.9 \pm 15^\circ\text{C}$).

Room Temperature Dry: RTD = $70 \pm 10^\circ\text{F}$ ($21.1 \pm 12^\circ\text{C}$).

Room Temperature Wet: RTW = $70 \pm 10^\circ\text{F}$ ($21.1 \pm 12^\circ\text{C}$).

Elevated Temperature Dry: ETD1 = $180 \pm 5^\circ\text{F}$ ($82.2 \pm 15^\circ\text{C}$).

Elevated Temperature Wet: ETW1 = $180 \pm 5^\circ\text{F}$ ($82.2 \pm 15^\circ\text{C}$).

All'interno di ogni metodo e ambiente di test, la modalità di errore è stata valutata immediatamente dopo ogni test da un ingegnere del personale NCAMP o NCAMP AER. Nei casi in cui una deformazione eccessiva (come la compressione), potrebbe non essere stata ottenuta una modalità di errore appropriata. Tutti i campioni testati sono stati fotografati digitalmente dopo ogni test al fine di documentare la modalità di guasto.

Per i test a secco i campioni sono stati essiccati a $250 \pm 5^\circ\text{F}$ per almeno 24h. Dopo l'asciugatura, i campioni sono stati conservati in un essiccatore fino al test meccanico. In alternativa, gli esemplari possono essere lasciati in condizioni ambientali di laboratorio per un massimo di 14 giorni fino al collaudo meccanico (non è stata richiesta l'essiccazione se i campioni sono stati testati entro 14 giorni dalla data di polimerizzazione). La condizione ambientale del laboratorio è definita come $70 \pm 10^\circ\text{F}$. Dal momento che l'assorbimento di

umidità e il tasso di desorbimento per il polimero è molto bassa a temperatura ambiente, non era necessario mantenere i livelli di umidità relativa.

Per il condizionamento ad umido, i campioni sono stati essiccati a 250±5°F per un minimo di 24h prima di essere portati all'equilibrio a 160±5°F e 85±5% di umidità. L'equilibrio di umidità efficace è stato raggiunto quando il contenuto medio di umidità del campione è cambiato meno dello 0.02% per due letture consecutive distanti 7±0.5 giorni e può essere espresso da:

$$\frac{W_i - W_{i-1}}{W_b} < 0.0002$$

Dove: W_i è il peso corrente; W_{i-1} è il peso precedente; W_b è il peso di base prima del condizionamento.

5.3 Risultati dei test per il materiale polimerico prodotto in AM

Additively Manufactured Material:		Stratasys Certified ULTEM™ 9085 / Fortus 900mc										Stratasys Certified ULTEM™ 9085 / Fortus 900mc -4545 Properties Summary									
Material Specification:		NMS 086/1																			
Process Specification:		NPS 89085																			
Tg(dry):	353.51°F	Tg(wet):	349.41°F	Tg METHOD: ASTM D7028																	
Date of raw material manufacture	Aug 2015, Mar 2016, Sept 2016	Date of testing	Aug 2017 - Feb 2019																		
Date of filament manufacture	Mar 2016, Dec 2016, Feb 2017	Date of data submittal	Feb 2019																		
Date of coupon manufacture	Mar 2017 - Aug 2018	Mean Values of Mechanical Property Summary Data Data was not normalized and reported as-measured only																			
		X Direction					Y Direction					Z Direction					Z45 Direction				
		CTD	RTD	RTW	ETD1	ETW1	CTD	RTD	RTW	ETD1	ETW1	CTD	RTD	RTW	ETD1	ETW1	CTD	RTD	RTW	ETD1	ETW1
Tension 0.2% Offset Yield Strength [ksi]	6.71	5.54	5.46	--	4.67	7.79	6.56	6.74	--	5.70	6.80	5.54	6.27	--	4.61	6.61	5.37	5.99	--	4.51	
Tension Strength [ksi]	12.96	9.73	9.41	--	6.75	13.59	11.18	10.94	--	7.71	10.72	8.55	7.88	--	5.42	9.77	7.96	8.31	--	5.79	
Tension Modulus [ksi]	0.39	0.34	0.33	--	0.30	0.43	0.38	0.38	--	0.34	0.39	0.35	0.36	--	0.31	0.39	0.34	0.35	--	0.31	
Compression 0.2% Offset Strength [ksi]	10.02	8.05	7.56	7.95	8.72	11.83	11.34	9.63	10.87	9.88	11.36	9.18	8.91	8.57	9.58	11.03	8.94	8.03	7.48	8.17	
Compression 1.0% Offset Strength [ksi]	15.47	12.25	12.24	10.52	11.82	18.65	16.69	13.90	14.11	12.92	17.86	13.52	12.78	11.21	11.99	16.61	13.02	12.18	9.94	11.01	
Compression Modulus [ksi]	0.40	0.38	0.43	0.35	0.43	0.44	0.43	0.41	0.40	0.42	0.42	0.38	0.37	0.35	0.38	0.39	0.36	0.37	0.33	0.37	
Flex Strength [ksi]	21.69	16.72	--	--	12.95	24.30	18.94	--	--	14.58	15.69	13.13	--	--	9.54	14.32	12.45	--	--	9.95	
Flex Modulus [ksi]	0.41	0.35	--	--	0.33	0.42	0.38	--	--	0.36	0.37	0.33	--	--	0.30	0.36	0.31	--	--	0.28	
V-Notch 0.2% Offset Strain Strength [ksi]	4.71	3.51	2.99	--	2.84	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
V-Notch 5% Strain Strength [ksi]	5.69	5.63	5.48	--	4.74	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
V-Notch Ultimate Strength [ksi]	5.68	4.82	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
V-Notch Modulus [ksi]	0.15	0.14	0.14	--	0.13	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
OHT Strength [ksi]	8.33	6.56	--	--	4.54	8.40	8.88	--	--	5.24	4.49	4.20	--	--	2.84	5.74	5.07	--	--	3.95	
FHT Strength [ksi]	10.07	7.41	--	--	5.28	13.18	10.05	--	--	6.82	8.77	7.30	--	--	4.60	8.19	6.63	--	--	5.05	
OHC 0.2% Offset Strength [ksi]	--	6.36	--	--	4.90	--	9.17	--	--	7.15	--	8.49	--	--	6.61	--	8.34	--	--	6.28	
OHC 1.0% Offset Strength [ksi]	--	8.97	--	--	6.27	--	12.34	--	--	8.86	--	11.78	--	--	8.45	--	11.24	--	--	7.62	
FHC 0.2% Offset Strength [ksi]	--	8.86	--	--	5.18	--	10.28	--	--	8.02	--	9.57	--	--	7.17	--	8.96	--	--	6.49	
FHC 1.0% Offset Strength [ksi]	--	9.65	--	--	6.82	--	14.23	--	--	10.20	--	13.20	--	--	9.23	--	12.15	--	--	8.37	
SSB 2% Offset Strength [ksi]	--	14.56	--	--	11.91	--	14.77	--	--	12.40	--	12.63	--	--	12.40	--	15.47	--	--	12.39	
SSB Ultimate Strength [ksi]	--	29.49	--	--	22.24	--	28.51	--	--	21.99	--	22.45	--	--	18.87	--	27.08	--	--	21.42	
Izod Energy [J]	--	0.30	--	--	--	--	0.24	--	--	--	--	0.23	--	--	--	--	0.26	--	--	--	
Izod Impact Resistance [J/m]	--	94.91	--	--	--	--	73.73	--	--	--	--	69.31	--	--	--	--	78.99	--	--	--	

Tabella 5.8: dati di riepilogo dei test meccanici

A causa dell'incoerenza dei dati del test per ASTM D256 Izod Impact Resistance Test, i valori di base B non sono stati calcolati. Questo metodo di prova non sarà un requisito nei prossimi test di equivalenza, ma è riportato solo come riferimento.

L'analisi condotta da Stratasys tiene conto di varie prove, come la trazione, la compressione, la flessione, ecc...; nella nostra analisi si considera l'esempio solamente della trazione con i rispettivi grafici. Altre analisi che sono state effettuate riguardando ad esempio il confronto della sensibilità dei fluidi, i risultati dei test di infiammabilità, densità del fumo, rilascio del calore e densità relativa. Per il dettaglio di queste analisi e di molte altre si considera il riferimento [38].

Material: Stratasys Certified ULTEM™ 9085 / Fortus 900mc		Dogbone Tension Stratasys Certified ULTEM™ 9085 / Fortus 900mc -45/45 Build Orientation: X			
Test method: ASTM D 638-14		Modulus calculation: 1000 to 3000 microstrain			
		CTD	RTD	RTW	ETW1
Test Temperature [°F]		-65	70	70	180
Moisture Conditioning		Dry	Dry	Equilibrium	Equilibrium
Equilibrium at T, RH				160 F,85%	160 F,85%
Source code: Prefixed by NTPAMP001-SY-UM9085-RPM-		X-MX-XT-X-CTD-X	X-MX-XT-X-RTD-X	X-MX-XT-X-RTW-X	X-MX-XT-X-ETW1-X
		Measured	Measured	Measured	Measured
XT 0.2% Offset Yield Strength [ksi]	Mean	6.714	5.544	5.461	4.675
	Minimum	5.557	4.890	5.252	3.982
	Maximum	8.917	5.980	5.705	5.249
	C.V.(%)	10.582	4.550	3.239	6.116
	No. Specimens	24	24	8	24
	No. Material Batches	3	3	1	3
XT Strength [ksi]	Mean	12.965	9.728	9.406	6.754
	Minimum	11.465	8.743	8.995	6.129
	Maximum	14.501	10.144	9.885	7.356
	C.V.(%)	5.131	3.369	3.957	4.566
	No. Specimens	24	24	8	24
	No. Material Batches	3	3	1	3
XT Modulus [Msi]	Mean	0.388	0.337	0.330	0.302
	Minimum	0.357	0.316	0.317	0.276
	Maximum	0.423	0.358	0.347	0.343
	C.V.(%)	4.598	2.513	3.372	5.172
	No. Specimens	24	24	8	24
	No. Material Batches	3	3	1	3

Material: Stratasys Certified ULTEM™ 9085 / Fortus 900mc		Dogbone Tension Stratasys Certified ULTEM™ 9085 / Fortus 900mc -45/45 Build Orientation: Y			
Test method: ASTM D 638-14		Modulus calculation: 1000 to 3000 microstrain			
		CTD	RTD	RTW	ETW1
Test Temperature [°F]		-65	70	70	180
Moisture Conditioning		Dry	Dry	Equilibrium	Equilibrium
Equilibrium at T, RH				160 F,85%	160 F,85%
Source code: Prefixed by NTPAMP001-SY-UM9085-RPM-		X-MX-YT-X-CTD-X	X-MX-YT-X-RTD-X	X-MX-YT-X-RTW-X	X-MX-YT-X-ETW1-X
		Measured	Measured	Measured	Measured
YT 0.2% Offset Yield Strength [ksi]	Mean	7.792	6.561	6.739	5.698
	Minimum	6.762	5.934	6.410	4.636
	Maximum	8.582	7.135	7.187	6.260
	C.V.(%)	6.407	5.009	3.514	6.656
	No. Specimens	24	24	8	24
	No. Material Batches	3	3	1	3
YT Strength [ksi]	Mean	13.594	11.183	10.937	7.707
	Minimum	11.584	10.391	10.381	7.264
	Maximum	15.050	12.274	12.541	8.140
	C.V.(%)	6.814	3.816	6.136	3.261
	No. Specimens	24	24	8	24
	No. Material Batches	3	3	1	3
YT Modulus [Msi]	Mean	0.433	0.377	0.376	0.339
	Minimum	0.410	0.366	0.356	0.322
	Maximum	0.455	0.389	0.407	0.365
	C.V.(%)	2.370	1.520	4.182	3.312
	No. Specimens	24	24	8	24
	No. Material Batches	3	3	1	3

Material:		Stratasys Certified ULTEM™ 9085 / Fortus 900mc			
Test method:		ASTM D 638-14			
Modulus calculation:		1000 to 3000 microstrain			
		CTD	RTD	RTW	ETW1
Test Temperature [°F]		-65	70	70	180
Moisture Conditioning		Dry	Dry	Equilibrium	Equilibrium
Equilibrium at T, RH				160 F,85%	160 F,85%
Source code: Prefixed by NTPAMP001-SY-UM9085-RPM-		X-MX-ZT-X-CTD-X	X-MX-ZT-X-RTD-X	X-MX-ZT-X-RTW-X	X-MX-ZT-X-ETW1-X
		Measured	Measured	Measured	Measured
ZT 0.2% Offset Yield Strength [ksi]	Mean	6.804	5.540	6.270	4.612
	Minimum	6.194	5.255	5.724	4.162
	Maximum	7.512	5.832	6.687	5.108
	C.V.(%)	5.855	2.506	5.388	5.485
	No. Specimens	24	24	8	24
No. Material Batches		3	3	1	3
ZT Strength [ksi]	Mean	10.720	8.550	7.876	5.416
	Minimum	8.730	8.313	6.912	4.902
	Maximum	11.880	9.085	8.776	5.719
	C.V.(%)	6.225	2.126	6.805	3.966
	No. Specimens	24	24	8	24
No. Material Batches		3	3	1	3
ZT Modulus [Msi]	Mean	0.394	0.347	0.359	0.307
	Minimum	0.377	0.338	0.350	0.290
	Maximum	0.424	0.358	0.372	0.331
	C.V.(%)	2.854	1.842	2.365	3.789
	No. Specimens	24	24	8	24
No. Material Batches		3	3	1	3

Material:		Stratasys Certified ULTEM™ 9085 / Fortus 900mc			
Test method:		ASTM D 638-14			
Modulus calculation:		1000 to 3000 microstrain			
		CTD	RTD	RTW	ETW1
Test Temperature [°F]		-65	70	70	180
Moisture Conditioning		Dry	Dry	Equilibrium	Equilibrium
Equilibrium at T, RH				160 F,85%	160 F,85%
Source code: Prefixed by NTPAMP001-SY-UM9085-RPM-		X-MX-Z45T-X-CTD-X	X-MX-Z45T-X-RTD-X	X-MX-Z45T-X-RTW-X	X-MX-Z45T-X-ETW1-X
		Measured	Measured	Measured	Measured
Z45T 0.2% Offset Yield Strength [ksi]	Mean	6.606	5.367	5.692	4.513
	Minimum	5.837	4.976	5.237	3.871
	Maximum	7.780	6.129	6.443	5.135
	C.V.(%)	8.314	5.470	8.067	7.124
	No. Specimens	24	24	8	24
No. Material Batches		3	3	1	3
Z45T Strength [ksi]	Mean	9.768	7.957	8.307	5.795
	Minimum	8.848	7.415	8.008	5.383
	Maximum	10.877	8.792	8.606	6.172
	C.V.(%)	4.773	4.908	2.886	3.646
	No. Specimens	24	24	8	24
No. Material Batches		3	3	1	3
Z45T Modulus [Msi]	Mean	0.387	0.341	0.349	0.311
	Minimum	0.348	0.304	0.334	0.290
	Maximum	0.424	0.356	0.363	0.338
	C.V.(%)	4.808	3.973	3.132	4.398
	No. Specimens	24	24	8	24
No. Material Batches		3	3	1	3

Tabella 5.9: proprietà di trazione in X, Y, Z e Z45

Per riassumere quest'analisi si considera il grafico in figura 5.2; i risultati dell'asse Y avevano un valore di resistenza maggiore rispetto agli altri assi. L'eccezione è rappresentata dai test SBB (Squared Between Batches), che mostrano i risultati rispetto all'asse Z inferiori rispetto agli altri assi. Per i test di compressione del foro aperto e pieno, i risultati dell'asse X sono inferiori rispetto alle altre direzioni. La forza è inversamente proporzionale alla temperatura per tutte le proprietà testate. La resistenza alla compressione a secco è maggiore di quella umida per tutti gli assi a temperatura ambiente, ma solo per l'asse Y a temperature elevate. Per la forza di equilibrio dello 0.2%, i risultati di umidità a temperatura elevata sono più forti dei risultati di umidità a temperatura ambiente, mentre vale la relazione opposta per le forze di equilibrio dell'1%. La variazione è maggiore nella condizione CTD rispetto alle altre condizioni.

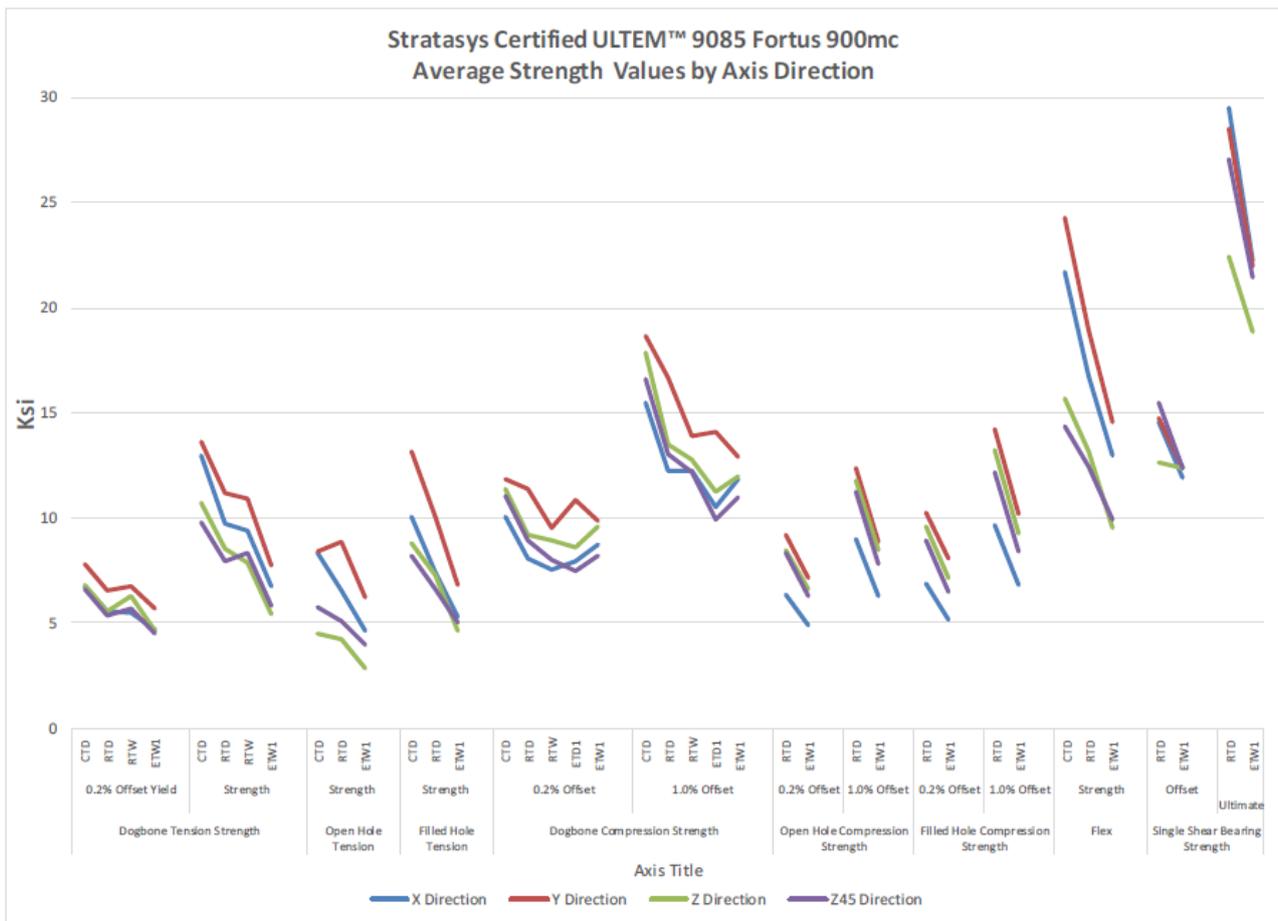


Fig. 5.2: analisi dei risultati in relazione agli assi di riferimento e alla tipologia dei provini

5.4 Procedure certificative per ULTEM 9085

5.4.1 Inizializzazione

Centro di controllo: le parti devono rimanere nella stessa posizione impostata dal centro di controllo, nessun riposizionamento delle parti è accettabile. Se una parte viene spostata dall'operatore, il lavoro deve essere riavviato in modo che essa venga ricentrata nella posizione originale. Anche il riposizionamento della parte dell'interfaccia può essere disabilitato in base all'SSYS 108314-0011 e all'SSYS 402737-0001.

Il tempo di riscaldamento e stabilizzazione della macchina deve essere al minimo per ciascun set del materiale. Se il tempo di riscaldamento minimo non viene raggiunto prima dell'inizio del lavoro, esso deve essere annullato e la macchina deve essere riscaldata fino al tempo minimo per la combinazione specifica dei materiali. La temperatura del piano del forno deve essere stabilizzata a 185°C con un intervallo accettabile di 20°C quando misurato nella posizione anteriore destra e posteriore sinistra.

Il materiale deve avere un contenuto di umidità inferiore allo 0.01% quando testato secondo ASTM D7191. Se il contenuto di umidità del materiale non soddisfa questi criteri il materiale verrà essiccato nuovamente e ritestato. Se il contenitore si guasta una seconda volta, il materiale deve essere rifiutato e smaltito da un'autorità approvata dall'utente.

La preparazione del materiale deve essere condotta entro i seguenti limiti:

1. Rimuovere il tappo superiore dal contenitore;
2. La temperatura del forno sottovuoto deve essere di $68 \pm 5^{\circ}\text{C}$;
3. Il contenitore deve essere posizionato verticalmente nel forno a vuoto una volta che il forno ha raggiunto la temperatura impostata;
4. Il materiale deve essere essiccato in forno per un minimo di 12h se il materiale non soddisfa i requisiti di umidità.

I valori di disponibilità della macchina rientrano nei seguenti limiti:

1. Un controllo dell'essiccatore deve essere eseguito prima della fabbricazione e contrassegnato come completato in base alla documentazione di manutenzione programmata dall'utente:
 - Registra la lettura del manometro PSI-G per il sistema di monitoraggio del lavoro designato dall'utente;
 - Il misuratore del punto di rugiada deve essere inferiore o uguale a -40°C ;
 - Registrare il valore per il sistema di monitoraggio del lavoro designato dall'utente.
2. Un test del motore deve essere eseguito dal servizio Stratasys, prima della fabbricazione e contrassegnato come completato in base al sistema di monitoraggio del lavoro designato dall'utente:
 - I valori di coppia per i risultati del test devono essere entro il 25% della coppia massima senza la presenza del filamento;
 - I valori di coppia per i risultati del test devono essere compresi tra il 9 e il 14% della coppia massima con la presenza del filamento;
 - Registrare il valore di coppia per il sistema di monitoraggio del lavoro designato dall'utente.
3. Un test di avvio deve essere eseguito dal servizio Stratasys, prima della fabbricazione e contrassegnato come completato in base al sistema di monitoraggio del lavoro designato dall'utente:
 - I risultati di accelerazione della punta da 200 a 300°C dovrebbero richiedere meno di 45 secondi;
 - Registra il valore del tempo di riscaldamento del liquefatore per il sistema di monitoraggio del lavoro designato dall'utente.

Il volume del materiale deve essere sufficiente per completare l'intera costruzione senza attivare la procedura di "cambio materiale" autorizzata dal sistema FDM. Se la quantità di materiale è insufficiente, il contenitore deve essere sostituito con un contenitore in grado di soddisfare questi criteri.

La durata della punta deve essere sufficiente per completare la costruzione e rimanere al di sotto del consumo massimo consentito del volume della punta di 369.2 pollici (equivalente a tre contenitori pieni). Se la durata della punta non è sufficiente, la punta deve essere sostituita con un'altra in base alle procedure approvate, poiché le punte non possono essere sostituite durante la costruzione di una parte.

Il caricamento del materiale deve essere eseguito secondo la procedura delineata SSYS 108314-0011 e SSYS 402737-0001. Se la procedura di caricamento del materiale non viene eseguita, il materiale deve essere rimosso e ricaricato in conformità con le procedure. I fogli di costruzione del materiale devono essere posizionati sulla piastra per ottenere il vuoto. La spia relativa al vuoto deve illuminarsi di verde per indicare un vuoto accettabile prima che il lavoro venga avviato.

Il secchio di spurgo deve essere svuotato prima di iniziare la costruzione. Il mancato svuotamento non farà fallire la costruzione del pezzo a meno che il trabocco del secchio di spurgo non si verifichi durante la compilazione.

La procedura di calibrazione della punta deve essere eseguita secondo la calibrazione delle punte del liquefatore SSYS 108314-0011 e secondo le specifiche elencate in SSYS 402737-0001:

1. I valori di equilibrio della punta devono essere registrati finché il percorso dell'utensile di supporto non è centrato tra tutti gli indicatori di zero in X e Y. Il mancato raggiungimento di questa calibrazione comporterà la sostituzione delle punte. Se la seconda serie di suggerimenti non soddisfa questi criteri, bisogna contattare il rappresentante dell'assistenza Stratasys;
2. Lo spessore dello strato di supporto della scatola in Z deve misurare entro ± 0.0005 pollici (0.01mm). Il mancato raggiungimento di questa calibrazione comporterà la sostituzione delle punte. Se la seconda serie di suggerimenti non soddisfa questi criteri, bisogna di nuovo contattare il rappresentante dell'assistenza Stratasys.

Il dispositivo luminoso di monitoraggio deve essere verde prima di iniziare la costruzione; se così non fosse, bisogna seguire le istruzioni sul touchscreen della macchina per risolvere il problema. Se il problema non viene risolto da queste istruzioni bisogna contattare il rappresentante dell'assistenza Stratasys. Bisogna eseguire il test manuale del peso e registrare il peso all'inizio di ogni costruzione.

5.4.2 Fabbricazione

Prima di rimuovere la costruzione verificare che sia completa al 100% toccando il display della macchina. Le costruzioni rimosse prima del completamento totale verranno invalidate.

Le costruzioni non conterranno alcun guasto delle parti indipendentemente dalla posizione all'interno del pezzo costruito. Se è presente questo incidente dovrà essere segnalato all'autorità designata dall'utente.

I pezzi non incontreranno uno stato di ripresa in nessun momento durante la realizzazione. I pezzi che presentano questo inconveniente devono essere eliminati dalle autorità designate dall'utente.

I pezzi non riscontreranno errori in nessun momento durante la compilazione. Se è presente questo, i pezzi dovranno essere eliminati dall'autorità designata dall'utente.

5.4.3 Rimozione della parte

Il vuoto deve essere isolato dal display prima di rimuovere la parte e il foglio di costruzione della macchina. La mancata interruzione del vuoto prima della rimozione della parte non determina il fallimento nella costruzione a meno che la parte non sia deformata o danneggiata durante il processo.

Le parti devono essere rimosse almeno 30 minuti dopo che la piastra ha raggiunto la fine della posizione per la costruzione del pezzo e possono essere lasciate nella camera di costruzione per un massimo di 48h.

Le parti devono essere rimosse dal foglio di costruzione prima di raggiungere la temperatura ambiente.

Le parti devono essere rimosse manualmente dal foglio di costruzione senza l'uso di strumenti a contatto diretto con le parti.

È necessario prestare attenzione alle geometrie delle caratteristiche fini per non distorcere le parti durante la rimozione. Inoltre, bisogna indossare i guanti resistenti al calore per la rimozione del pezzo e del foglio di costruzione della piastra e finché le parti non si sono raffreddate a temperatura ambiente.

5.4.4 Rimozione del supporto

Bisogna rimuovere il foglio di costruzione con la parte attaccata al forno prima di separare il pezzo dal foglio di costruzione; se la parte si delamina dal foglio di costruzione, il pezzo non deve essere rifiutato.

La rimozione del supporto deve essere eseguita mentre le parti si trovano ad una temperatura compresa tra 90 e 160°C e il supporto può essere facilmente rimosso senza danneggiare la parte.

Nel caso in cui la rimozione del supporto non possa essere completata prima del raffreddamento della parte, esse devono essere riscaldate in un forno a 130-175°C fino a quando non raggiungono la temperatura del forno e i supporti possono essere facilmente rimossi. Le parti non possono superare il limite delle 2h fuori dal forno, mentre è ancora in corso la procedura di rimozione del supporto.

Bisogna indossare guanti resistenti al calore e protezione per gli occhi mentre si tenta di rimuovere il supporto dalle parti. Se necessario, utilizzare pinze ad ago, sonde o un coltello per rimuovere il materiale di supporto. È necessario prestare attenzione durante la sua rimozione per evitare rotture di piccoli elementi e misurazioni del pezzo.

Bisogna prestare particolare attenzione quando si rimuove il materiale di supporto dalle sezioni sottili della parte, per non forzarla. Esso si rimuove utilizzando una superficie di lavoro generalmente piana. Inoltre, è consentito l'uso della carteggiatura manuale per rimuovere il materiale di supporto in eccesso o per soddisfare i requisiti di finitura superficiale.

Tutte le rilevazioni devono essere documentate nel ciclo di produzione prima di essere avviate.

5.4.5 Identificazione e conservazione delle parti fabbricate

Le parti complete sono compatibili con tutti i principali inchiostri e possono essere etichettate direttamente una volta raffreddate.

Le parti devono essere conservate in un sacchetto sigillato ad una temperatura compresa tra 60 e 95°F.

Le buste sigillate devono essere adeguatamente etichettate secondo i metodi di identificazione delle parti dell'utente. Le parti in sacchetti senza etichetta devono essere smaltite dall'autorità designata dall'utente.

5.5 Garanzia di qualità e controllo delle ispezioni

La garanzia della qualità deve assicurare che il sistema FDM sia adeguatamente controllato per produrre costantemente parti di qualità che soddisfino i requisiti di questa specifica.

5.5.1 Test e controllo di qualità

Il materiale di tipo I deve essere ispezionato in conformità con queste specifiche:

- Devono essere soddisfatti tutti i requisiti del disegno tecnico applicabile;
- Tutte le condizioni non conformi devono essere presentate sulla documentazione di rifiuto appropriata;
- Tutte le parti devono essere pesate individualmente e il peso della parte deve essere registrato in base al sistema di monitoraggio del lavoro designato dall'utente.

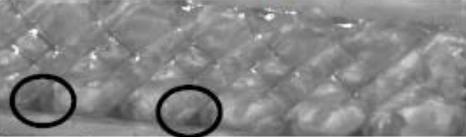
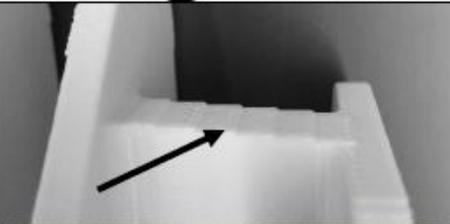
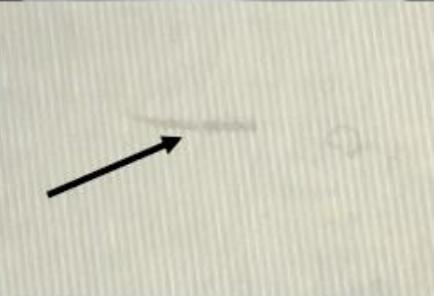
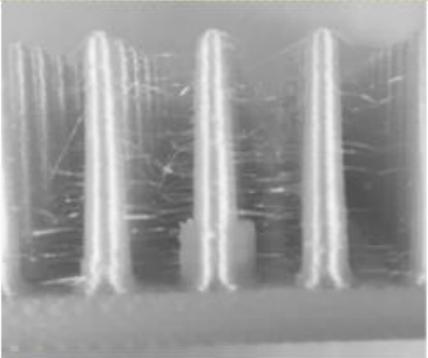
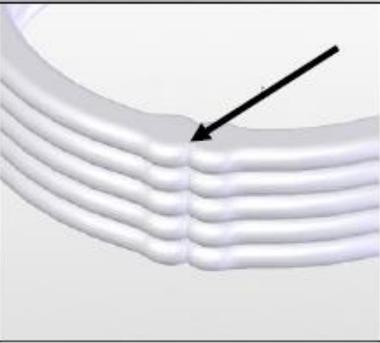
5.5.2 Ispezione visiva

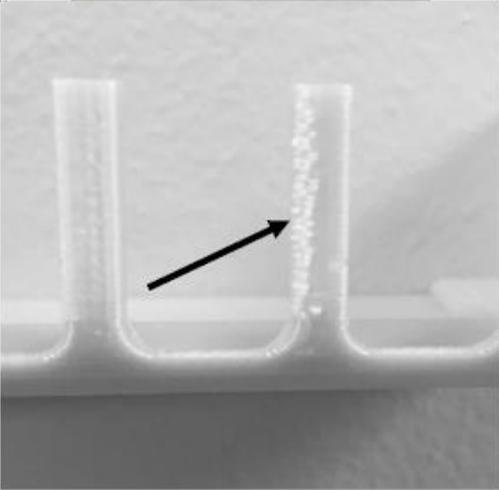
In questo paragrafo viene in parte ripreso quello che era stato trattato nel capitolo 2 inerente i difetti presenti nei materiali utilizzati in AM. In particolare, si differenziano i difetti accettabili, con problematiche solo estetiche, da quelli non accettabili che invece devono essere evitati.

Le seguenti anomalie sono inerenti al processo FDM e sono ritenute estetiche, ma sono accettabili nella misura specificata da questo documento:

Anomalies	Definition	Allowable Limit
Porosity	Incomplete part fill inherent to the process due to FDM bead microstructure gaps.	Acceptable levels are determined by the tuning process of the material, deviations from the tuning process are captured in other defect descriptions
Stairstepping	Visible, perceptible lines or ridges between successive build layers that are typical on highly curved surfaces.	Ridges should not be greater than the height of the deposition slice for the appropriate tip
Scratches	Shallow cut or scrape on the surface of a part occurring from routine handling, such as support removal.	Scratches shall not be greater than 2mm ² in surface area or greater than one layer deep
Stringing	Short/thin lengths of filament that protrude from the part surface due to residual melted extrudate being drawn away from the part as if a string.	Hairs of 0.2mm that can be removed without damaging the surface of the part
Seams	The start/stop location of a build contour layer.	Seams are inherent to FDM builds and are acceptable, as long as the seam does not expose or extend 25% of the layer height.
Faceting	File resolution artifact that results in flat surfaces on the FDM part where curved surfaces were intended.	Minor faceting is acceptable More extreme faceting should be addressed during file/model preparation prior to part processing. Acceptable levels of faceting are defined by the tolerances imposed on the features of the part by the responsible engineering authority
Contamination	Discontinuous black flakes	Less than 10 flakes per 5 mm.
Bubbles	Small voids found throughout the entirety of the part	Voids must be contained within the thickness of a single bead
Ooze Dits	Small material particles common on seams and can be sanded to be removed	Ooze dits should not expose or extend beyond a single layer thickness
Color Striation	Gradual change from dark to light color	Pigmentation is allowed as long as color does not display dark brown or black which is an indication of burnt material
Stabilizer wall indentions	Repeated pattern of pox marks on the outer 1/3 rd of a contour that is in contact with a stabilizer wall	Stabilizer walls shall not penetrate through the exterior contour it is connected to at any point on the part.
Pin holes	Small divot in surface caused by removal of support structure, typically seen around vertical holes	Must be smaller than 2mm ²

Tabella 5.10: anomalie comuni inerenti al processo FDM

Anomalies	Picture / Figure
Porosity	
Stairstepping	
Scratches	
Stringing	
Seams	

Anomalies	Picture / Figure
Faceting	
Contamination	
Bubbles	
Ooze Dits	

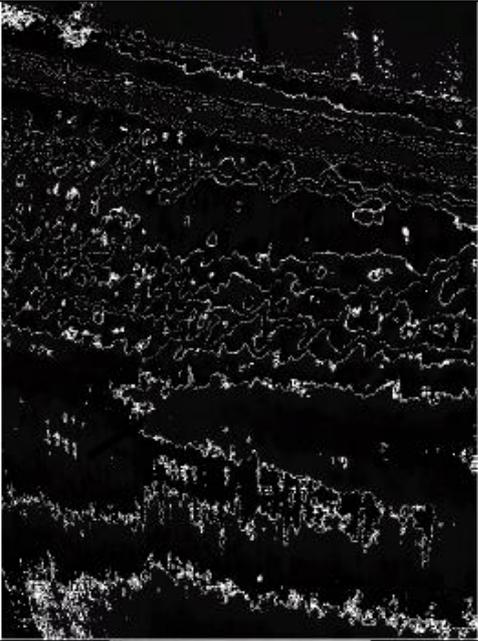
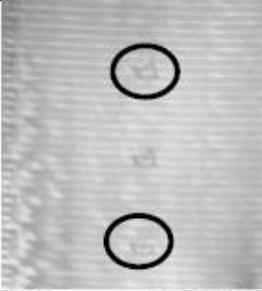
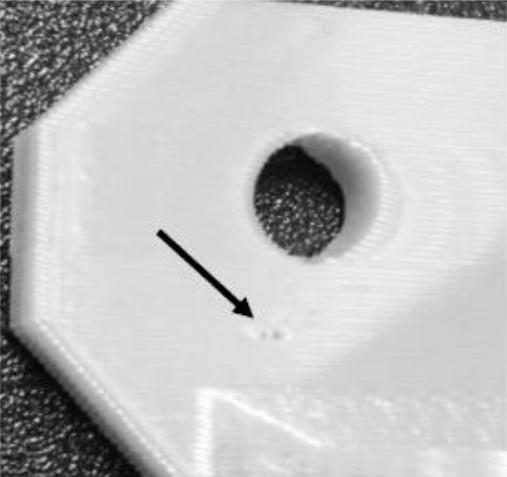
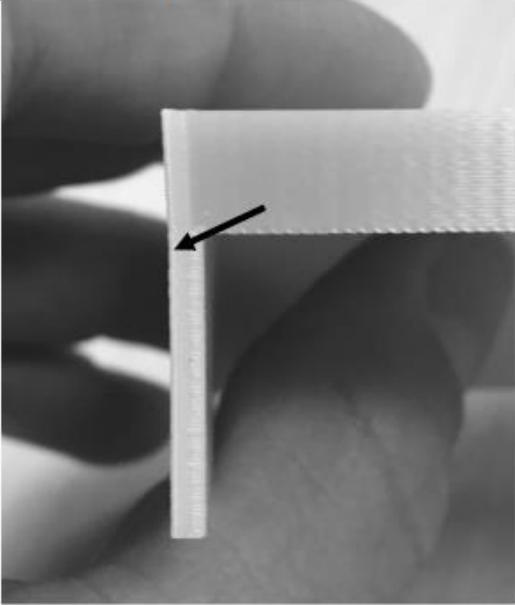
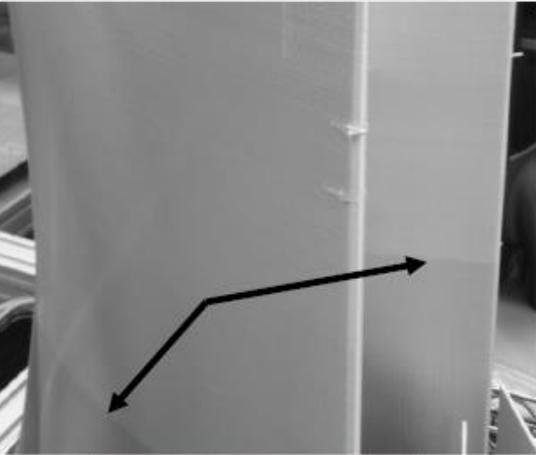
Anomalies	Picture / Figure
Color Striation	
Stabilizer wall indentions	
Pin holes	

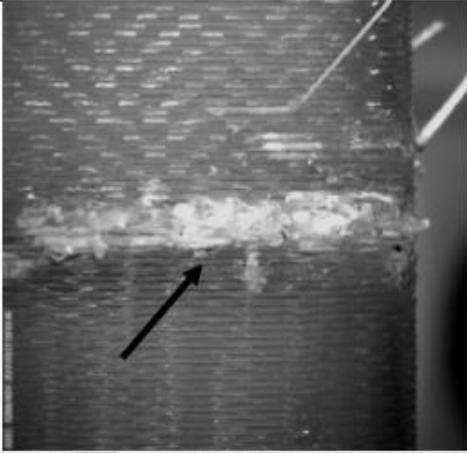
Tabella 5.11: esempi rappresentativi di anomalie accettabili

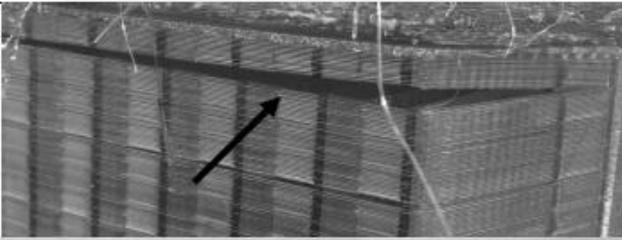
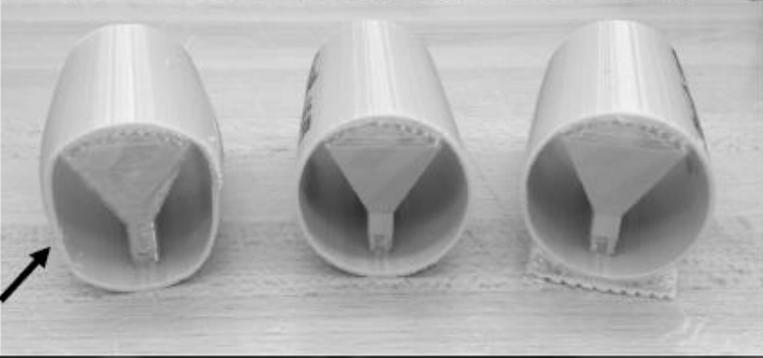
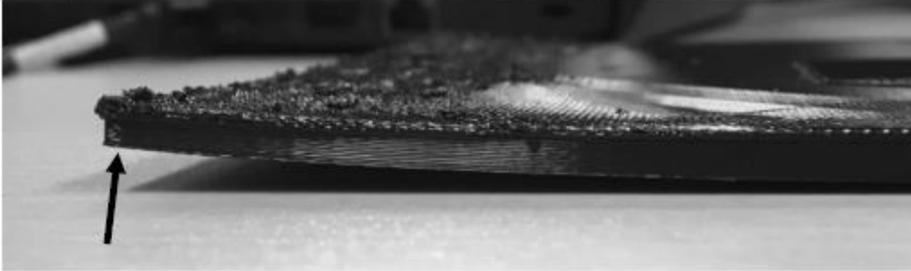
Le parti con i difetti inaccettabili devono essere rifiutate ed eliminate dall'autorità designata dall'utente:

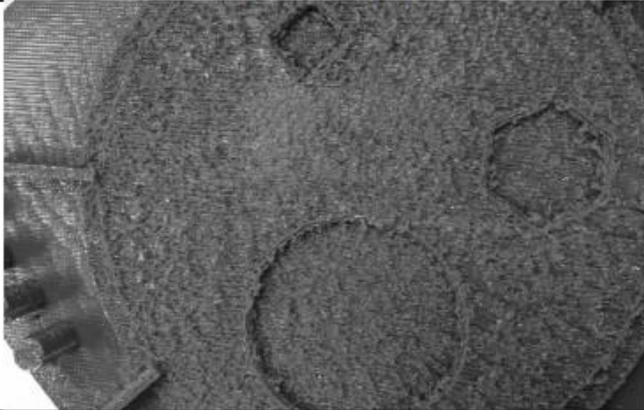
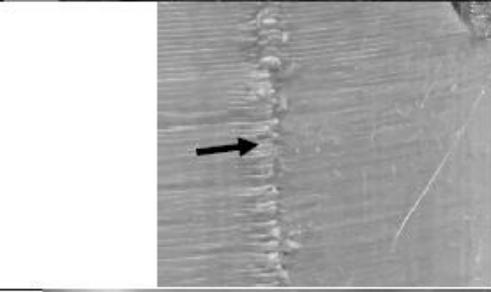
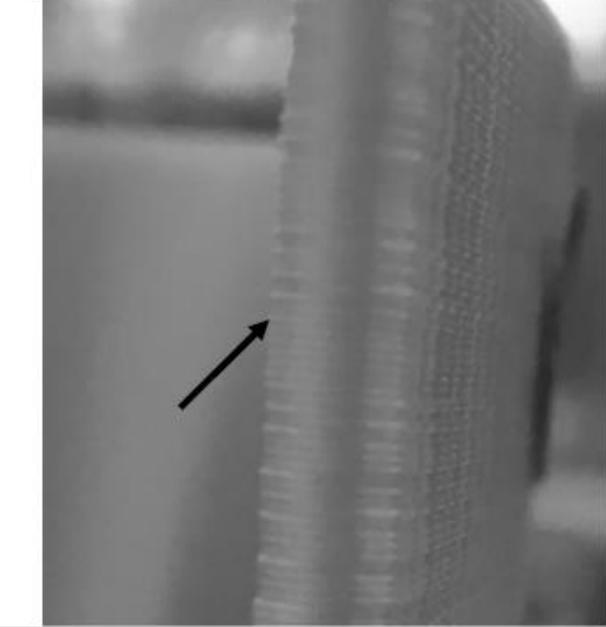
Defect	Definition
Sink	Thin vertical wall pulls in just below horizontal stiffener, causing a deviation in dimensions greater than 1% for verticality
Start/Stop Error	Machine triggers an error that causes the build to pause or stop
Burn	Discoloration seen as dark brown or black color change to the material, can be in streaks or sections of beads that are greater than 0.08mm ²
Embedded Support	Excess support in model material leaving discoloration
Contamination	Cluster of black flakes (continuous mass) greater than 5mm in any dimension, not to be confused with scattered black flakes (discontinuous flakes)
Crack	Sharp break in a feature
Delamination	Separation from two model layers
Warpage	Deformation of features due thermal mass and residual stress build up causing failures in meeting tolerances required for the part
Curl	Deformation of features and surfaces due to excessive part shrinkage (can cause delamination from support interface, greater than 0.5 mm/250 mm
Overfill	Excessive material deposition causing bead structure disruption, visible globs of material and loss of definition to bead cross section circularity
Heavy Seams	Seams in excess of 3mm. greater than bead width
Vertical Surface Uniformity	Waviness of vertical wall over multiple layers, a function of gantry repeatability, oven temp and Z stage consistency, in which the stacking of layers are inconsistent and result in a toolpath greater than 1500 micro-in RA
Under-fill	Gaps between adjacent rasters particularly in the raster straightaways with a depth of over ½ the bead height, width be about ¼ of the bead width and length of about 12mm.
Purge Blobs	Extrusion from a purge gets redistributed and embedded into a part inclusion for the purge part

Tabella 5.12: elenco dei difetti delle parti

Defects	Picture / Figure	
Sink		
Start/Stop Error		
Burn		

Defects	Picture / Figure	
Embedded Support		
Contamination		

Defects	Picture / Figure
Crack	
Delamination	
Warpage	
Curl	

Defects	Picture / Figure	
Overfill		
Heavy Seams		
Vertical Surface Uniformity		

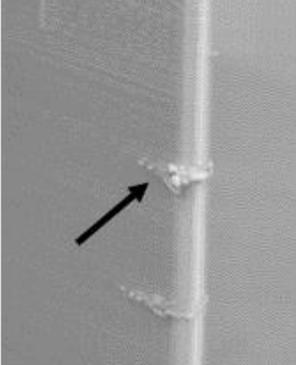
Defects	Picture / Figure	
Under-fill		
Purge Blobs		

Tabella 5.13: esempi rappresentativi di anomalie inaccettabili

5.5.3 Conservazione della qualifica

La qualificazione del materiale di tipo I si è basata sul sistema e sui processi delineati all'interno di questa specifica. Qualsiasi modifica al materiale, alla macchina, al software, inclusa la posizione fisica è considerata una modifica al processo. Tutte le modifiche al sistema devono essere sottoposte all'autorità di progettazione competente per la revisione e la disposizione tramite un avviso di modifica avanzata (Advanced Change Notice).

Spetta al produttore mantenere il sistema secondo i requisiti delineati nel manuale di produzione. Qualsiasi deviazione dalla manutenzione prescritta deve essere considerata non conforme e le contromisure devono essere disposte dall'autorità di progettazione competente. Riparare come definito da qualsiasi azione non delineata nel manuale per la normale manutenzione, deve essere considerato una modifica al sistema e sottoposto all'autorità di progettazione competente per la revisione e la disposizione.

Il software utilizzato nella produzione del materiale di tipo I è l'unica approvata per la produzione di questo tipo di materiale. Le più recenti versioni dovranno essere inviate all'autorità di progettazione competente per la revisione e la disposizione. Una volta approvata una versione più recente del software, questa specifica verrà aggiornata per elencare tutte le versioni approvate.

5.5.4 Garanzia di qualità

I dati di monitoraggio del processo devono essere conformi alla specifica del processo aziendale applicabile dall'utente o dalla pratica approvata. Ai fini della qualificazione del materiale e dell'equivalenza, i dati di monitoraggio del processo dovrebbero essere forniti alle organizzazioni approvate in conformità con il piano di test applicabile. Il test di controllo del processo non è richiesto per la fabbricazione di parti finite.

Attraverso l'ispezione visiva si verifica che non vi siano difetti evidenti come le deformazioni. I prodotti finiti, per la qualificazione del materiale e dell'equivalenza devono essere etichettati in conformità con il piano di prova accettabile a scopo identificativo.

Una procedura NDI (Network Device Interface) deve ancora essere sviluppata per i materiali polimerici prodotti tramite additive manufacturing in modo che sia efficiente in termini di tempo e costi per la qualificazione del materiale e il livello di costruzione della parte. In questo momento lo standard del settore consiste nell'utilizzare un rigoroso processo di ispezione visiva e dimensionale dei tagliandi o delle parti prodotte in modo additivo.

5.5.5 Posizioni rappresentative dei fogli di costruzione

Queste posizioni rappresentative sono determinate attraverso due orientazioni: sinistra (L) o destra (R):

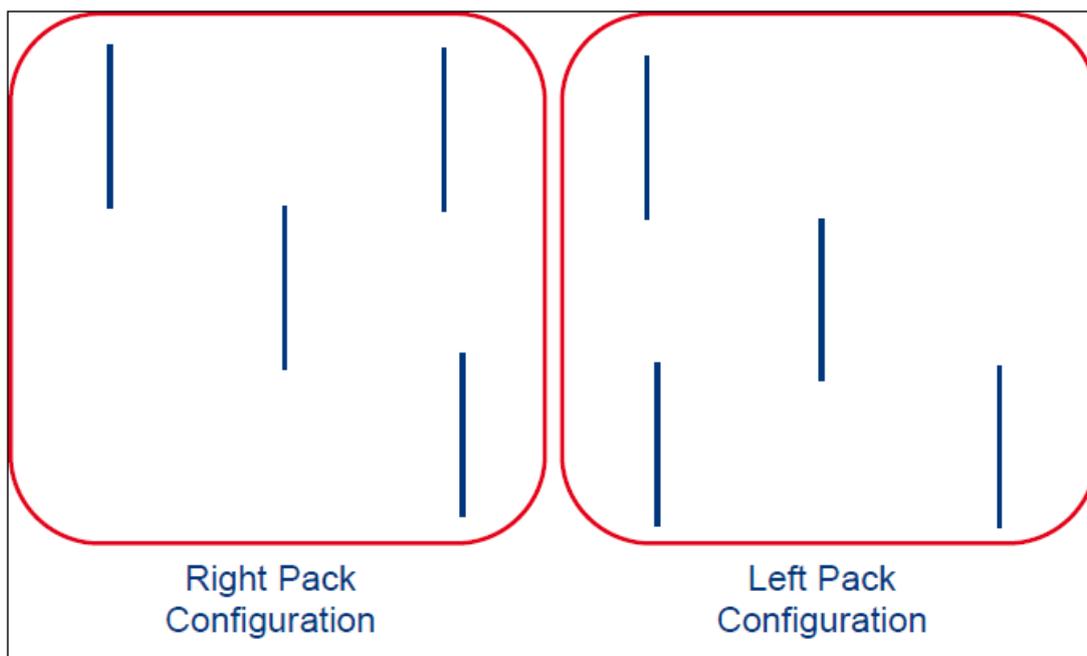


Fig. 5.3: configurazione dei fogli di costruzione

Build Name	Pack File Name	.CMBs Contained	Quantity	Locations (R or L)	Orientations
Build 1_Machine 1	Pack1_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> • D790_XZ_T16A.cbm (12) • D638_XZ_T16A.cmb (12) 	<ul style="list-style-type: none"> • 12 • 12 	Left	XZ
Build 1_Machine 2	Pack1_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> • D790_XZ_T16A.cbm (12) • D638_XZ_T16A.cmb (12) 	<ul style="list-style-type: none"> • 12 • 12 	Right	XZ
Build 2_Machine 1	Pack2_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> • D638_XY_T16A.cmb (12) • D638_ZX_T16A.cmb (12) 	<ul style="list-style-type: none"> • 12 • 12 	Right	XY, ZX
Build 2_Machine 2.cmb	Pack2_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> • D638_XY_T16A.cmb (12) • D638_ZX_T16A.cmb (12) 	<ul style="list-style-type: none"> • 12 • 12 	Left	XY, ZX
Build 3_Machine 1.cmb	Pack3_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> • D790_ZX_T16A.cmb (12) • D790_XY_T16A.cmb (12) 	<ul style="list-style-type: none"> • 12 • 12 	Right	ZX, XY
Build 3_Machine 2.cmb	Pack3_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> • D790_ZX_T16A.cmb (12) • D790_XY_T16A.cmb (12) 	<ul style="list-style-type: none"> • 12 • 12 	Left	ZX, XY
Build 4_Machine 1.cmb	Pack4_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> • D638_ZX45_T16A.cmb (4) • D790_ZX45_T16A.cmb (12) 	<ul style="list-style-type: none"> • 4 • 12 	Left	ZX45

Build Name	Pack File Name	.CMBs Contained	Quantity	Locations (R or L)	Orientations
Build 4_Machine 2.cmb	Pack4_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D638_ZX45_T16A.cmb (4) D790_ZX45_T16A.cmb (12) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 12 	Right	ZX45
Build 5_Machine 1.cmb	Pack5_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D638_ZX45_T16A.cmb (8) 	<ul style="list-style-type: none"> 8 	Left	ZX45
Build 5_Machine 2.cmb	Pack5_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D638_ZX45_T16A.cmb (8) 	<ul style="list-style-type: none"> 8 	Right	ZX45
Build 6_Machine 1.cmb	Pack6_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D256_ZX_T16A.cmb (4) D5961_ZX_T16A.cmb (8) D695_XY_T16A.cmb (16) D256_ZX45_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 8 16 4 	Right	ZX, XY, Z45
Build 6_Machine 2.cmb	Pack6_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D256_ZX_T16A.cmb (4) D5961_ZX_T16A.cmb (8) D695_XY_T16A.cmb (16) D256_ZX45_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 8 16 4 	Left	ZX, XY, Z45
Build 7_Machine 1.cmb	Pack7_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5961_ZX_T16A.cmb (8) D5961_XY_T16A.cmb (8) 	<ul style="list-style-type: none"> 8 8 	Left	XZ, XY
Build 7_Machine 2.cmb	Pack7_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5961_XZ_T16A.cmb (8) D5961_XY_T16A.cmb (8) 	<ul style="list-style-type: none"> 8 8 	Right	XZ, XY
Build 8_Machine 1.cmb	Pack8_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5961_ZX_T16A.cmb (8) 	<ul style="list-style-type: none"> 8 	Right	ZX
Build 8_Machine 2.cmb	Pack8_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5961_ZX_T16A.cmb (8) 	<ul style="list-style-type: none"> 8 	Left	ZX
Build 9_Machine 1.cmb	Pack9_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D256_XZ_T1A.cmb (4) D256_XY_T1A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Left	XZ, XY
Build 9_Machine 2.cmb	Pack9_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D256_XZ_T1A.cmb (4) D256_XY_T1A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Right	XZ, XY
Build 10_Machine 1.cmb	Pack10_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5961_XY_T16A.cmb (12) D695_ZX45_T16A.cmb (16) D695_ZX_T16A.cmb (16) 	<ul style="list-style-type: none"> 12 16 16 	Right	XY, ZX45, ZX
Build 10_Machine 2.cmb	Pack10_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5961_XY_T16A.cmb (12) D695_ZX45_T16A.cmb (16) D695_ZX_T16A.cmb (16) 	<ul style="list-style-type: none"> 12 16 16 	Left	XY, ZX45, ZX
Build 11_Machine 1.cmb	Pack11_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5766_XY_T16A.cmb (12) 	<ul style="list-style-type: none"> 12 	Left	XY
Build 11_Machine 2.cmb	Pack11_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5766_XY_T16A.cmb (12) 	<ul style="list-style-type: none"> 12 	Right	XY

Build Name	Pack File Name	.CMBs Contained	Quantity	Locations (R or L)	Orientations
Build 12_Machine 1.cmb	Pack12_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5766_ZX45_T16A.cmb (4) D5766_ZX_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Right	ZX45, ZX
Build 12_Machine 2.cmb	Pack12_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5766_ZX45_T16A.cmb (4) D5766_ZX_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Left	ZX45, ZX
Build 13_Machine 1.cmb	Pack13_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5766_XZ_T16A.cmb (8) 	<ul style="list-style-type: none"> 8 	Left	XZ
Build 13_Machine 2.cmb	Pack13_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5766_XZ_T16A.cmb (8) 	<ul style="list-style-type: none"> 8 	Right	XZ
Build 14_Machine 1.cmb	Pack12_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5766_ZX45_T16A.cmb (4) D5766_ZX_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Right	ZX45, ZX
Build 14_Machine 2.cmb	Pack12_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5766_ZX45_T16A.cmb (4) D5766_ZX_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Left	ZX45, ZX
Build 15_Machine 1.cmb	Pack15_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D695_XZ_T16A.cmb (16) D5766_XZ_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 16 4 	Left	XZ
Build 15_Machine 2.cmb	Pack15_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D695_XZ_T16A.cmb (16) D5766_XZ_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 16 4 	Right	XZ
Build 16_Machine 1.cmb	Pack12_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5766_ZX45_T16A.cmb (4) D5766_ZX_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Right	ZX45, ZX
Build 16_Machine 2.cmb	Pack12_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5766_ZX45_T16A.cmb (4) D5766_ZX_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Left	ZX45, ZX
Build 17_Machine 1.cmb	Pack17_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5766_XZ_T16A.cmb (4) D5766_XY_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Right	XZ, XY
Build 17_Machine 2.cmb	Pack17_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5766_XZ_T16A.cmb (4) D5766_XY_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Left	XZ, XY
Build 18_Machine 1.cmb	Pack12_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5766_ZX45_T16A.cmb (4) D5766_ZX_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Left	ZX45, ZX
Build 18_Machine 2.cmb	Pack12_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5766_ZX45_T16A.cmb (4) D5766_ZX_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Right	ZX45, ZX
Build 19_Machine 1.cmb	Pack17_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5766_XZ_T16A.cmb (4) D5766_XY_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Right	XZ, XY
Build 19_Machine 2.cmb	Pack17_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5766_XZ_T16A.cmb (4) D5766_XY_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Left	XZ, XY

Build Name	Pack File Name	.CMBs Contained	Quantity	Locations (R or L)	Orientations
Build 20_Machine 1.cmb	Pack12_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5766_ZX45_T16A (4) D5766_ZX_T16A (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Left	ZX45, ZX
Build 20_Machine 2.cmb	Pack12_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5766_ZX45_T16A (4) D5766_ZX_T16A (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 11 	Right	ZX45, ZX
Build 21_Machine 1.cmb	Pack17_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5766_XZ_T16A.cmb (4) D5766_XY_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Right	XZ, XY
Build 21_Machine 2.cmb	Pack17_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5766_XZ_T16A.cmb (4) D5766_XY_T16A.cmb (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Left	XZ, XY
Build 22_Machine 1.cmb	Pack12_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D5766_ZX45_T16A (4) D5766_ZX_T16A (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Left	ZX45, ZX
Build 22_Machine 2.cmb	Pack12_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D5766_ZX45_T16A (4) D5766_ZX_T16A (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 4 	Right	ZX45, ZX
Build 23_Machine 1.cmb	Pack23_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D6484_XY_T16A (8) 	<ul style="list-style-type: none"> 8 	Right	XY
Build 23_Machine 2.cmb	Pack23_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D6484_XY_T16A (8) 	<ul style="list-style-type: none"> 8 	Left	XY
Build 24_Machine 1.cmb	Pack24_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D6484_ZX45_T16 (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 	Left	ZX45
Build 24_Machine 2.cmb	Pack24_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D6484_ZX45_T16 (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 	Right	ZX45
Build 25_Machine 1.cmb	Pack25_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D6484_XZ_T16A (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 	Right	XZ
Build 25_Machine 2.cmb	Pack25_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D6484_XZ_T16A (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 	Left	XZ
Build 26_Machine 1.cmb	Pack24_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D6484_ZX45_T16 (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 	Left	ZX45
Build 26_Machine 2.cmb	Pack24_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D6484_ZX45_T16 (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 	Right	ZX45
Build 27_Machine 1.cmb	Pack27_T16A_L	<ul style="list-style-type: none"> D6484_ZX_T16A (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 	Left	ZX45
Build 27_Machine 2.cmb	Pack27_T16A_R	<ul style="list-style-type: none"> D6484_ZX_T16A (4) 	<ul style="list-style-type: none"> 4 	Right	ZX45

Build Name	Pack File Name	.CMBs Contained	Quantity	Locations (R or L)	Orientations
Build 28_Machine 1.cmb	Pack27_T16A_L	• D6484_ZX_T16A (4)	• 4	Left	ZX45
Build 28_Machine 2.cmb	Pack27_T16A_R	• D6484_ZX_T16A (4)	• 4	Right	ZX45
Build 29_Machine 1.cmb	Pack25_T16A_R	• D6484_XZ_T16A (4)	• 4	Right	XZ
Build 29_Machine 2.cmb	Pack25_T16A_L	• D6484_XZ_T16A (4)	• 4	Left	XZ
Build 30_Machine 1.cmb	Pack30_T16A_R	• D6484_ZX45_T16 (4)	• 4	Right	ZX45
Build 30_Machine 2.cmb	Pack30_T16A_L	• D6484_ZX45_T16 (4)	• 4	Left	ZX45
Build 31_Machine 1.cmb	Pack31_T16A_L	• D6484_XY_T16A (8)	• 8	Left	XY
Build 31_Machine 2.cmb	Pack31_T16A_R	• D6484_XY_T16A (8)	• 8	Right	XY
Build 32_Machine 1.cmb	Pack30_T16A_R	• D6484_ZX45_T16 (4)	• 4	Right	ZX45
Build 32_Machine 2.cmb	Pack30_T16A_L	• D6484_ZX45_T16 (4)	• 4	Left	ZX45
Build 33_Machine 1.cmb	Pack25_T16A_L	• D6484_XZ_T16A (4)	• 4	Left	XZ
Build 33_Machine 2.cmb	Pack25_T16A_R	• D6484_XZ_T16A (4)	• 4	Right	XZ
Build 34_Machine 1.cmb	Pack27_T16A_R	• D6484_ZX_T16A (4)	• 4	Right	ZX
Build 34_Machine 2.cmb	Pack27_T16A_L	• D6484_ZX_T16A (4)	• 4	Left	ZX
Build 35_Machine 1.cmb	Pack25_T16A_L	• D6484_XZ_T16A (4)	• 4	Left	XZ
Build 35_Machine 2.cmb	Pack25_T16A_R	• D6484_XZ_T16A (4)	• 4	Right	XZ
Build 36_Machine 1.cmb	Pack27_T16A_R	• D6484_ZX_T16A (4)	• 4	Right	ZX
Build 36_Machine 2.cmb	Pack27_T16A_L	• D6484_ZX_T16A (4)	• 4	Left	ZX

Tabella 5.14: test relativi all'orientazione dei fogli di costruzione

5.6 Procedure certificative per lo stampaggio ad iniezione

5.6.1 Campionatura

La campionatura ha lo scopo di verificare che lo stampo, controllato in ogni sua parte, realizzi in modo corretto il particolare richiesto dal cliente utilizzando dispositivi specifici come la verifica dimensionale necessaria, le macchine di misura a contatto (Coordinate Measuring Machine), le macchine di misura ottiche (Vision Measuring Machine) e gli strumenti da banco tradizionali. Inoltre, bisogna definire i parametri di processo e le capacità di processo per la successiva produzione; contando su macchine moderne e costantemente mantenute, si può definire la capacità di processo per i nuovi prodotti utilizzando tecniche di SPC (Statistical Process Control), garantendo così uno standard qualitativo costante per tutte le successive forniture. Bisogna stabilire i limiti tecnologici del processo produttivo e qualificare il prodotto mediante l'utilizzo di dispositivi di misura appropriati al fine di ottenere il benessere da parte del cliente e congelare il processo produttivo. L'intera fase di campionatura è seguita da personale qualificato ed in continua collaborazione con il cliente; al termine della stessa ed in caso di esito positivo, vengono registrati tutti i dati necessari alla preparazione di specifiche istruzioni operative indispensabili per la realizzazione della successiva produzione.

5.6.2 Produzione

Trattamenti di pre-stampaggio: attraverso l'utilizzo di varie attrezzature (essiccatori a ricircolo d'aria, deumidificatori) si rendono le materie prime prive di umidità residua al fine di garantire stabilità al processo produttivo, verificando periodicamente la conformità del materiale alle specifiche del produttore.

Stampaggio ad iniezione: può contare su presse ad iniezione moderne, personalizzate con l'integrazione dei controlli estesa alle attrezzature ausiliarie e costantemente mantenute. Le macchine sono dotate di software che permettono il controllo statistico di predeterminati parametri di processo (SPC), garantendo il monitoraggio della maggior stabilità possibile.

Assemblaggio: si può eseguire l'assemblaggio di particolari utilizzando varie attrezzature, tra le quali la saldatura ad ultrasuoni.

5.6.3 Qualità

Il controllo della qualità dispone di strumenti da banco di tipo tradizionale e di moderni dispositivi di misura quali macchine di misura a contatto e macchine di misura ottiche. Grazie ad essi ed alla specializzazione dei tecnici si può verificare periodicamente le quote critiche di ogni particolare. Su richiesta si possono eseguire studi di capacità (Cp-Cpk) mediante l'utilizzo di tecniche SPC utilizzate in fase di campionatura. Si esegue anche la comparazione dei pezzi ai modelli matematici, attraverso specifici software di misura. Inoltre, ci sono attrezzature dedicate alla verifica della saldatura ad ultrasuoni mediante prove di strappo, sia in trazione che in compressione. Si possono effettuare analisi sul contenuto di umidità della materia prima polimerica e sui particolari stampati (analizzatore di umidità Sartorius MA100), oltre al controllo del peso specifico (bilancia elettronica analitica Sartorius ME254 S) sia sulla materia prima che sui particolari finiti. Nel caso siano necessarie indagini più approfondite, vengono utilizzati laboratori esterni all'azienda accreditati specializzati nelle prove specifiche sui materiali plastici quali ad esempio DSC (Calorimetria differenziale a scansione), per la misura della viscosità in soluzione e TGA per il melt flow index e altre.

Dal 2000 il sistema di qualità aziendale è certificato dall'ente TUV Sud secondo le norme UNI EN ISO 9001 e dal 2008 è stata ottenuta la certificazione ambientale ISO 14001.

Infine, è anche importante il monitoraggio e per usufruire di questo controllo aggiuntivo vengono utilizzati dei sensori di pressione in cavità (prodotti Kistler). Grazie alla centralina CoMo Injection, tali sensori rilevano la corretta pressione in cavità e permettono, in caso di anomalie, di isolare la singola stampata, così da garantire un processo più stabile e qualitativamente migliore. Una volta definita la curva di pressione ideale, è possibile correlare i rilievi alle dimensioni del pezzo e quindi essere certi che, laddove la curva si ripeta, i pezzi risultino uniformi. Ai fini di una maggiore flessibilità in produzione, queste informazioni consentono di trasferire lo stampo a presse diverse. Una volta definita la curva ideale, è sufficiente ripeterla su presse differenti per ottenere i medesimi risultati dimensionali.

5.6.4 Analisi dei due metodi: DSC e TGA

La prova DSC (Differential Scanning Calorimetry) è una tecnica termo-analitica e consiste nel sottoporre il campione a riscaldamenti controllati attraverso rampe termiche prestabilite in una camera e rilevando, mediante una termocoppia, la differenza di flusso termico tra il campione stesso e un riferimento noto mantenuti nelle stesse condizioni di riscaldamento, in funzione della temperatura. È importante specificare se la prova viene effettuata registrando il flusso termico in uscita o in entrata dal campione, vale a dire se in modo esotermico o endotermico, per poter interpretare le curve nel modo corretto. Quando il campione è sottoposto ad una transizione di fase, i flussi di calore al suo interno cambiano e dalla loro analisi è possibile ricavare informazioni importanti sul materiale. Da una prova DSC in modalità esotermica, possono essere ricavate: la temperatura di cristallizzazione, riconoscibile come un picco presente nella curva (dal momento che la cristallizzazione è un fenomeno esotermico); la temperatura di fusione, individuata da un punto di minimo dal momento che è un fenomeno endotermico; la temperatura di transizione vetrosa (T_g), individuabile come un punto di flesso dal momento che il polimero mostra una capacità termica superiore oltre la transizione vetrosa. In alcuni casi, è inoltre possibile apprezzare la cosiddetta "cold crystallization", ovvero un picco di cristallizzazione durante la fase di riscaldamento. Questo è dovuto al fatto che se il polimero è stato precedentemente soggetto a raffreddamento molto rapido, durante la prima fase di riscaldamento le catene possono risistemarsi ed eventualmente organizzarsi in domini cristallini. Da questi dati si può valutare sia il controllo qualità, che il grado di cristallinità del materiale.

La cella centrale garantisce un'efficace riscaldamento e raffreddamento, con una più rapida risposta del segnale e sensibilità e risoluzione dei sensori di flusso superiori; l'isolamento termico è molto efficace e questo permette misure riproducibili e precise. La diminuzione di temperatura è ottenuta attraverso barre di raffreddamento in nichel che collegano il forno di argento ad alta conducibilità con gli anelli di raffreddamento. In questo modo il processo è veloce, accurato e versatile. Il sistema di raffreddamento è ad azoto liquido e può raggiungere i -180°C nella prova, con rampe di raffreddamento ad aria come alternativa economica. Tra il campione e i sensori è posizionata una termocoppia, che controlla le condizioni del forno indipendentemente dagli altri sensori. La portata di gas di spurgo è controllata attraverso un sistema flessibile e varia da $0\text{mL}/\text{min}$ a $240\text{mL}/\text{min}$ con incrementi di $1\text{mL}/\text{min}$ e funziona per aria, ossigeno, azoto e anche elio; all'occorrenza vengono anche preriscaldati prima dell'ingresso nella camera con il campione. La fornace e i sensori mostrano lunghi tempi di vita e di conservazione; si può arrivare a rampe termiche di $200^\circ\text{C}/\text{min}$ senza perdere in linearità del riscaldamento e si può arrivare fino a circa 550°C . La preparazione del campione è importante e può essere guidata attraverso set di stampi e matrici opzionali.

La prova TGA (Thermogravimetric Analysis) consiste nel misurare la variazione di peso di un campione soggetto ad una rampa termica prestabilita in funzione della temperatura o isotermicamente in funzione del tempo. Il materiale in forma di pellet, piccoli frammenti o polvere, così che la temperatura al centro del campione sia molto vicina a quella misurata nel gas, viene collocato in un crogiolo appoggiato su una bilancia di aria o azoto. Il test è valido anche su materiali di natura inorganica. Attraverso questa prova si può valutare l'eventuale presenza di grandi quantità di umidità residua, dal momento che in quel caso si osserverebbe una perdita di peso evidente del campione intorno a 100°C. Si può seguire inoltre il processo di degradazione del polimero osservando di quanti step esso è caratterizzato, a quale temperatura T_0 inizia e verificare la quantità di filler inorganico residuo. Si può infine visualizzare la curva in derivata, per registrare la temperatura alla quale è presente il massimo della velocità di degradazione.

Viene garantita una lunga durata di vita dello strumento. È presente una termocoppia di controllo vicino al campione ed una sopra ad esso; questo controllo permette di interrompere immediatamente la prova se le due temperature misurate mostrano uno scarto superiore ad un certo limite. In questo modo è possibile registrare contemporaneamente la temperatura del campione e la velocità con cui questo viene riscaldato. Il sistema assicura un flusso di gas costante e preciso attraverso valvole automatiche, che permettono anche il cambio quasi istantaneo per una buona riuscita della prova. La bilancia assicura grande precisione ed affidabilità anche fino a 1000°C. È integrato un sistema orizzontale di gas di spurgo che scorre attraverso il campione e in parte nella camera per pulirla da residui della degradazione, si limita inoltre il galleggiamento del campione mediante un controllo automatico. I gas svolti dal campione per degradazione o anche derivanti da reazioni chimiche, possono essere raccolti ed analizzati online da spettrometri di massa o a infrarossi in uscita dal forno della TGA. I crogioli sono disponibili in alluminio o in platino da 50 μ L e 100 μ L e in ceramica da 100 μ L, 250 μ L e 500 μ L; in ogni caso quelli in alluminio o platino garantiscono una precisione superiore data dalla pulizia più agevole ed elevata inerzia chimica, ma l'alluminio non si può utilizzare oltre i 600°C. Quelli in ceramica possono essere utilizzati per campioni più grandi o a bassa densità o che reagiscono con il metallo. Sul mercato sono disponibili accessori come il forno aggiuntivo EGA, inerte e resistente all'adsorbimento dei prodotti di degradazione, ideato per realizzare combinazioni TGA/MS (spettrometro di massa) e TGA/FTIR (spettrometro agli infrarossi).

6. CERTIFICAZIONE E PROPRIETÀ PER AL7075 E ALSI10MG

6.1 Caratteristiche generali per l'Al7075

La lega di alluminio 7075 rappresenta l'insieme delle leghe a base di alluminio nelle quali i principali elementi in lega sono magnesio e zinco. Essa è caratterizzata dalla densità di 2.80g/cm^3 .

Elem.	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Ti	Cr	Altro
%	Bal	5.10	2.10	1.20	0.5	0.4	0.3	0.2	0.18	0.15 tot
pond.		6.10	2.90	2.00	max	max	max	max	0.28	

Tabella 6.1: range di composizione della lega 7075

La famiglia 7075 prende in considerazione le leghe che sviluppano le massime caratteristiche meccaniche ottenibili con le leghe di alluminio. Per questo, da quando è stata introdotta la 7075-T6 nel 1943 è la principale famiglia ad essere utilizzata nell'industria aerospaziale assieme alla 2024.

La lega 7075 venne inizialmente utilizzata allo stato T6. Esso prevedeva di eseguire un trattamento termico di solubilizzazione a 480°C , tempra in acqua e invecchiamento artificiale a 120°C per 24h, oppure in alcuni casi un invecchiamento a due stage in cui il primo prevedeva 4h a 96°C ed il secondo 8h a 157°C . Con questo trattamento si notò che la lega sviluppava le massime performance a trazione: poteva raggiungere un carico di rottura pari a 570MPa , un carico di snervamento pari a 501MPa e un allungamento dell'11%.

Subito dopo la sua introduzione questa nuova lega venne impiegata nella progettazione di aeromobili e nel 1945 costituì il materiale adatto per i correntini (elementi alari longitudinali che hanno la funzione di equilibrare i momenti flettenti e che forniscono supporto alle lamiere del rivestimento) ed il rivestimento della parte superiore dell'ala del Boeing B-29 Super Fortress, diminuendo il suo peso di 180kg rispetto alla versione precedente.

Negli anni successivi le proprietà del 7075 vennero studiate al variare del trattamento termico. Questo fu necessario poiché la lega allo stato T6 era particolarmente soggetta a cricche dovute a tensocorrosione, corrosione esfoliante (corrosione che si sviluppa fra le superfici esterne dei grani metallici propagandosi parallelamente alla superficie del metallo) e pitting.

La ricerca di un materiale con migliore comportamento a corrosione portò all'introduzione degli stati di tipo T7. Essi prevedevano solubilizzazione e tempra come per i T6, ma a differenza di questi erano caratterizzati da temperature di trattamento più alte e soprattutto prevedevano un invecchiamento del materiale. Così facendo i valori di resistenza meccanica venivano sacrificati a favore di un miglioramento della stabilità dimensionale, essenziale nei prodotti destinati al servizio alle alte temperature e di una diminuzione degli stress residui riducendo le deformazioni dopo lavorazioni a macchina.

I primi due importanti stati di tipo T7 furono il T73 ed il T76. Essi erano stati sviluppati appositamente per le leghe della famiglia 7000, caratterizzate da un tenore in rame superiore all'1.25%, per il 7075. Questi trattamenti avevano lo scopo di aumentare la resistenza alla corrosione esfoliante e alle cricche dovute a tensocorrosione. Inoltre, il sovrainvecchiamento aumentava la tenacità della lega e in alcune condizioni

innalzava la velocità di sviluppo e propagazione delle cricche a fatica. Tuttavia, i trattamenti di invecchiamento che conducono le leghe allo stato T73 e T76 risultano molto complessi perché richiedono estremo controllo delle variabili di processo come durata, temperatura, velocità di riscaldamento e stato del materiale di partenza; per questo motivo non è possibile riportare delle indicazioni precise.

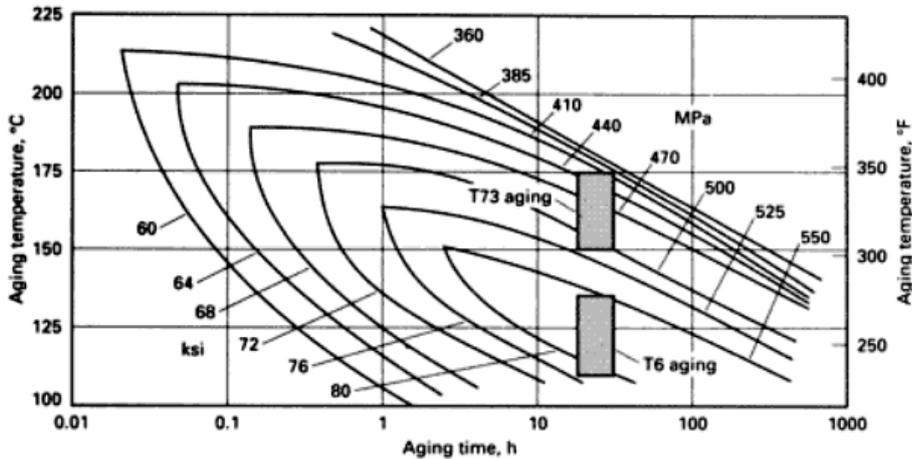


Fig. 6.1: andamento della tensione di snervamento in ksi e MPa della lega 7075 al variare del tempo di invecchiamento

Nonostante i migliori comportamenti a corrosione ottenuti nelle 7075-T73 e 7075-T76, la diminuzione della resistenza meccanica rispetto al T6 rimaneva un problema non trascurabile: la penalizzazione del carico di rottura poteva raggiungere anche il 15%. Questo portò allo sviluppo di un trattamento chiamato Retrogression and re-aging heat treatment, indicato con RRA. Tale trattamento veniva applicato alla lega già allo stato T6, permettendole di ottenere comportamenti a corrosione paragonabili a quelli della 7075-T73 ma con una riduzione della resistenza meccanica minore, tra il 5 e il 7%. Il trattamento RRA prevedeva due step: uno di retrogressione, condotto ad una temperatura tra i 180 ed i 200°C per un tempo variabile tra i 30 ed i 40 minuti, seguito da uno step di re-invecchiamento condotto a 120°C per 24h.

Negli anni 2000 è cominciato lo studio del comportamento del 7075 con l'aggiunta di scandio tra lo 0.1 e lo 0.5%. Lo scandio fornisce il massimo rafforzamento per punto percentuale ottenibile, più di qualsiasi altro elemento, aumentando notevolmente resistenza e tenacità.

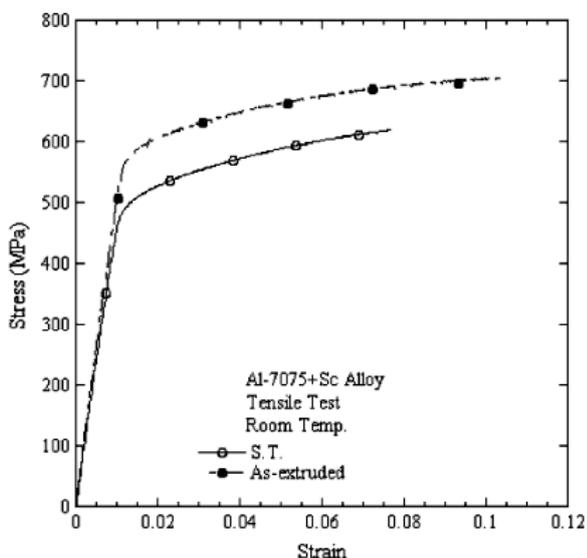


Fig. 6.2: prova di trazione per due provini di lega 7075 più 0.1% di Sc allo stato solubilizzato ed estruso

Si nota dalla figura 6.2 che la lega 7075+Sc allo stato estruso raggiunge una tensione di snervamento pari a 553MPa e un carico di rottura di 706MPa contro i 500MPa e i 570MPa della 7075-T6. Le ricerche più recenti stanno sviluppando materiali compositi a matrice di alluminio. Essi si stanno diffondendo nel campo aerospaziale, oltre a quello automobilistico e marittimo, grazie ad un miglioramento delle caratteristiche meccaniche, della resistenza all'usura, dell'alta conducibilità termica e del basso coefficiente di dilatazione termica. Questi studi stanno sperimentando una lega 7075 contenente il 5% in peso di grafite rinforzata con ossido di alluminio Al_2O_3 variabile tra il 2 e l'8%. Il composito ibrido così ottenuto dimostra che la durezza e la resistenza a trazione, compressione e flessione, risultano via via maggiori all'aumentare della quantità della fase ceramica, ma la più grande innovazione è la presenza di grafite che rilascia sulla superficie uno strato grafiteo che agisce come lubrificante solido e ciò permette di ridurre il coefficiente di attrito, migliorando il comportamento ad usura.

6.2 Qualificazione del processo per l'Al7075

La Norma Tecnica Aziendale (NTA) 71250 stabilisce i requisiti per il trattamento termico delle leghe di alluminio definendo:

1. Le caratteristiche degli impianti ed equipaggiamenti;
2. Le caratteristiche dei materiali ausiliari;
3. Le condizioni di processo;
4. I requisiti di Qualità ed i controlli da applicare per la qualificazione/riqualificazione del processo, per il suo controllo/monitoraggio e per l'accettazione delle parti processate.

La norma richiede qualificazione periodica degli impianti per NTA 98252.

6.2.1 Classificazione, applicabilità e limitazioni

La norma è applicabile ogni volta che viene richiamata dai disegni e/o da altri documenti, per i trattamenti di:

1. Ricottura (ricristallizzazione);
2. Solubilizzazione;
3. Precipitazione (invecchiamento);
4. Distensione.

di leghe di alluminio, placcate e non, con forni a circolazione forzata di aria ed a bagni di sali fusi. Questa norma non è applicabile per il trattamento termico dei rivetti. Le fusioni o parti ricavate da esse vanno trattate per AMS-H-6088 o AMS 2771; inoltre, le parti saldate non possono essere trattate nei forni a sali fusi.

6.2.2 Documenti applicabili

NTA 71251: trattamento termico e maneggio Ribattini in lega 2024.

NTA 72252: sgrassaggio alcalino chimico.

NTA 72254: sgrassaggio con vapori di solvente.

NTA 72261: disossidazione con deoxidizer.

NTA 72268: detersione manuale.

NTA 75650: formatura, raddrizzatura ed accoppiamento di parti metalliche.

NTA 94551: ispezione conducibilità elettrica IACS leghe di alluminio.

NTA 95051: durezza materiali metallici.

NTA 98252: impianti per trattamenti termici dell'alluminio e sue leghe, requisiti, certificazione, controlli periodici.

ASM 2750: pirometry, per l'analisi della temperatura.

AMS 2772: heat treatment of aluminium alloy raw materials (trattamento termico delle materie prime in lega di alluminio).

AMS 2770: heat treatment of wrought aluminium alloy parts (trattamento termico per parti lavorate in lega di alluminio).

AMS-H-6088: heat treatment of aluminium alloys (trattamento termico delle leghe di alluminio).

AMS 3025: polyalkylene glycol heat treat quenchart (diagramma di Quenchart per il trattamento termico del polialchilenglicole).

ASTM D445: standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (metodo di prova standard per la viscosità cinematica di liquidi trasparenti e opachi).

ASTM B557: standard methods of tension testing wrought and cast aluminium and magnesium alloy products (metodi standard di prova di trazione in alluminio lavorato e pressofuso e leghe di magnesio).

ASTM G34: exfoliation corrosion susceptibility in 2000 and 7000 series aluminium alloys (susceptibilità alla corrosione da esfoliazione nelle leghe di alluminio serie 2000 e 7000) (EXCO test).

6.2.3 Requisiti generali

Il processore deve disporre di impianti completi di forni, vasche di spegnimento e di lavaggio, frigoriferi, equipaggiamenti e strumentazione che deve essere in grado di garantire:

1. Il soddisfacimento dei requisiti di processo richiesti, che devono essere mantenuti nel tempo.
2. Il governo ed il monitoraggio dei parametri di processo, stabiliti nel corso della qualificazione, in particolare bisogna assicurare il controllo del campo e dell'uniformità di temperatura attraverso l'utilizzo di termoregolatori e termometri e dei tempi di processo con l'uso di temporizzatori.

La strumentazione di governo e di controllo dei processi deve risultare per scala, sensibilità ed accuratezza e deve essere in grado di apprezzare le misure dei parametri ai quali si lavora con le tolleranze previste. La strumentazione di controllo dei parametri di lavoro deve essere verificata e certificata periodicamente con una frequenza definita e idonea ad assicurare il suo costante e corretto funzionamento.

Come si evince dai requisiti generali del processo, se non diversamente autorizzato il trattamento va eseguito sull'intera parte.

Inoltre, il riscaldamento di parti incrudite e/o solubilizzate ed invecchiate può causare perdite delle caratteristiche meccaniche. Il riscaldamento delle parti nel ciclo produttivo dovuto ai trattamenti chimico/fisici quali: ossidazione anodica; alodine, che serve a proteggere l'alluminio dalla corrosione senza ulteriori trattamenti; sgrassaggio, essiccazione e bondizzazione, che è la cromazione dell'alluminio ed è un trattamento galvanico che previene la tendenza dell'alluminio ad essere aggredito da agenti ambientali e ne migliora la verniciabilità, non crea problemi se le temperature sono conformi a quanto previsto dalle specifiche. Negli altri casi, esiste un controllo automatico della temperatura di esposizione, infatti le parti non dovrebbero mai riscaldarsi a tal punto da non poter essere toccate a mani nude (50-60°C). Altre operazioni di riscaldamento, non previste dal ciclo di fabbricazione sono sempre vietate.

Le interruzioni del ciclo di trattamento sono vietate ad eccezione delle seguenti specifiche. Nel ciclo di trattamento di invecchiamento sono ammesse delle interruzioni, dovute al carico/scarico delle parti nel forno, se conformi ai seguenti limiti:

1. L'interruzione, cioè il periodo nel quale la temperatura è inferiore al campo ammesso, non deve superare i 10 minuti;
2. È ammessa una sola interruzione durante il trattamento delle leghe serie 7000 se la temperatura di trattamento è maggiore di 149°C;
3. Per altre leghe o differenti temperature le interruzioni massime consentite sono quattro. In ogni caso, il tempo di invecchiamento previsto deve essere rispettato.

Forgiati in lega di alluminio serie 2000 e 7000 possono essere trattati alla condizione fisica -01 per facilitare l'ispezione ultrasonica o per migliorare la lavorabilità di macchina. La condizione -01 è realizzabile purché prima venga effettuato un trattamento di solubilizzazione e raffreddamento a temperatura ambiente. L'invecchiamento di forgiati nella condizione -01 non è permesso; è necessario in questi casi un trattamento di solubilizzazione seguito da spegnimento (tempra).

La presenza di tracce di olio e di umidità sulle parti o nel forno, determina, durante il trattamento a temperature maggiori di 370°C, problemi di ossidazione ad alta temperatura, con la possibile formazione di bollature superficiali. Per prevenire tale problema si raccomanda l'uso di ammonio fluoborato. La quantità da utilizzare può essere determinata in base all'esperienza, ma in ogni caso non deve mai essere inferiore a 1g per ogni m³ di volume del forno. La presenza di ammonio fluoborato durante il trattamento di materiale placcato provoca dislocazioni o macchie sulla superficie. Bisogna evitare di trattare, per almeno le due cariche successive all'uso, le parti placcate con requisiti di aspetto. Il prodotto va utilizzato osservando le prescrizioni del servizio di sicurezza.

I parametri di processo da utilizzare tengono conto, in alcuni casi, come per i forgiati, anche degli spessori di partenza del materiale da cui le parti da trattare sono ricavate. Per parti di geometria complessa, ricavate da forgiati o blocchi di grosso spessore, per evitare verifiche e calcoli per ogni carica, è consigliato creare delle schede di processo sulle quali riportare:

1. Numero del disegno e denominazione della parte;
2. Specifica di processo;
3. Natura del materiale, condizione fisica da realizzare;
4. Spessore del materiale in origine e della parte (spessore maggiore);
5. Temperature e tempi di processo;
6. Descrizione dei provini da trattare congiuntamente;
7. Valori di conducibilità e durezza richiesti.

6.2.4 Caratteristiche degli impianti ed attrezzature

Gli impianti da utilizzare, del tipo a circolazione d'aria forzata o a bagno di sali fusi, devono possedere le caratteristiche previste dalla specifica NTA 98252 ed essere qualificati in conformità alla stessa. Si riportano le tolleranze di uniformità della temperatura e il tipo di equipaggiamento da impiegare in funzione del trattamento a cui sono destinati.

Trattamento	Classe	Uniformità Richiesta	Tipo di equipaggiamento per NTA 98252
Solubilizzazione	2	$\pm 5.5^{\circ}\text{C}$	B
Invecchiamento Artificiale (1)	2	$\pm 5.5^{\circ}\text{C}$	B
	1	$\pm 3^{\circ}\text{C}$	A
Ricottura (completa) Distensione (ricottura parziale)	3	$\pm 8^{\circ}\text{C}$	B
	5	$\pm 14^{\circ}\text{C}$	B

Tabella 6.2: caratteristiche dei forni

Nota 1: per i forni per i quali è richiesta un'uniformità di $\pm 3^{\circ}\text{C}$ è obbligatorio l'uso di equipaggiamenti di tipo A. L'uniformità di temperatura di $\pm 3^{\circ}\text{C}$ è richiesta per l'ottenimento di particolari condizioni fisiche e/o per particolari leghe.

Equipaggiamento di Tipo A:

1. Pirometro di regolazione: lo strumento deve regolare e monitorare la temperatura. La termocoppia deve essere posizionata nel punto della zona termica in cui la temperatura risulta più vicina a quella media del campo di processo.
2. Registratore multicanale: lo strumento, indipendente dal regolatore, avrà due termocoppie per ogni zona termica posizionate in modo da registrare le temperature minima e massima, ed una termocoppia addizionale per ogni porzione di 3.5m^3 di zona di lavoro utilizzata in ogni zona termica. Il registratore avrà la funzione di consentire il controllo del tempo a quella temperatura.
3. Pirometro di allarme per la sovratemperatura: lo strumento, indipendente dal regolatore, deve avvisare a mezzo allarme gli operatori e contemporaneamente interrompere la fonte di riscaldamento salvaguardando la carica in trattamento e l'impianto stesso. La termocoppia del pirometro di allarme deve essere posizionata nella parte più calda di ciascuna zona termica.

Equipaggiamento di tipo B:

1. Pirometro di regolazione: lo strumento deve regolare e monitorare la temperatura. La termocoppia deve essere posizionata nel punto della zona termica in cui la temperatura risulta più vicina a quella media del campo di processo.
2. Registratore multicanale: lo strumento, indipendente dal regolatore, deve avere due termocoppie per ogni zona termica posizionate in modo da registrare gli estremi delle temperature ed il tempo in quella temperatura.
3. Pirometro di allarme per la sovratemperatura: lo strumento, indipendente dal regolatore, deve avvisare a mezzo allarme gli operatori e contemporaneamente interrompere la fonte di riscaldamento salvaguardando la carica in trattamento e l'impianto stesso. La termocoppia del pirometro di allarme deve essere posizionata nella parte più calda di ciascuna zona termica.

Nel caso in cui i forni manifestino un malfunzionamento, il personale deve avvertire i servizi tecnici di officina, che valuteranno, in base alle informazioni fornite dall'operatore e sulla scorta dei risultati dei sopralluoghi effettuati, i provvedimenti da adottare. Per l'interruzione dei cicli, in genere, durante la solubilizzazione, non è consentita alcuna interruzione, mentre per altri trattamenti quali invecchiamento o ricottura essa è consentita. Se l'interruzione è tale che la temperatura non scende fuori dal campo di tolleranza previsto, si può continuare a trattare le parti. Qualora l'interruzione/i non ecceda, in termini di durata e numero, quanto ammesso dalle istruzioni di processo applicabili, il ciclo di trattamento può essere portato regolarmente a termine, assicurando il tempo corretto di trattamento mediante il recupero del tempo di interruzione. Eventi quali sovratemperatura o sottotemperatura, se perduranti nel tempo, richiedono il blocco immediato delle parti ed opportune indagini da parte degli enti competenti. Se

l'interruzione del ciclo non rientra nel campo di tolleranza previsto si deve immediatamente avvertire l'ufficio preposto per l'emissione dei provvedimenti da adottare. Tutte le operazioni devono essere annotate nel registro delle operazioni, così come anche eventuali interruzioni o malfunzionamenti devono essere riportati nel log-book a bordo impianto. Il tempo necessario di processo, in ogni caso, non deve mai essere al di fuori del campo indicato nelle istruzioni di processo applicabili, quindi, se previsto dalle istruzioni di processo, il tempo di eventuali interruzioni deve essere opportunamente recuperato.

Le vasche di spegnimento devono essere qualificate congiuntamente ai forni ed avere le caratteristiche come previsto dalla NTA 98252.

La vasca di lavaggio ad immersione o a spruzzo è alimentata con acqua potabile e ha la funzione di rimuovere i residui di glicole o di sali.

Il frigorifero è utilizzato per evitare l'invecchiamento delle leghe per effetto dell'esposizione ad una temperatura ambiente ed è costituito da una camera frigo, all'interno della quale è mantenuta una temperatura di -23°C o inferiore. Il frigo deve essere equipaggiato con un registratore avente una accuratezza di $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

L'attrezzatura per il caricamento delle parti, in acciaio resistente al calore ed alla corrosione, deve essere realizzata in modo da assicurare i requisiti di spazatura, di circolazione dei fluidi tra le parti e da ridurre al minimo le distorsioni delle stesse. Questa attrezzatura deve essere progettata in maniera tale da facilitare il trasferimento dal forno alla vasca di spegnimento ed evitare che il fluido refrigerante rimanga intrappolato, con il rischio di essere trasferito all'interno del forno. La massa deve essere ridotta al minimo per evitare un tempo di recupero del forno elevato ed un eccessivo riscaldamento del fluido di spegnimento. Il sistema di aggancio e sostentamento delle parti deve escludere la possibilità di ampie superfici di contatto e il danneggiamento meccanico.

Il processo di prova e di controllo deve disporre di:

1. Attrezzatura e strumentazione adeguata al controllo dei materiali e delle soluzioni chimiche impiegate nel processo;
2. Attrezzatura e strumentazione di prova adeguata per il controllo della strumentazione degli impianti e per la conduzione delle prove richieste sul processo e sul prodotto processato;
3. Attrezzatura e strumentazione devono risultare per scala, sensibilità ed accuratezza in grado di consentire le misurazioni/controlli con le tolleranze relative stabilite. Le stesse devono risultare assoggettate a controllo/taratura e certificazione periodica con una frequenza definita e idonea ad assicurare il loro costante e corretto funzionamento.

L'uso eventuale di laboratori esterni per la costruzione di prove richiede l'autorizzazione e la successiva qualificazione degli stessi da parte della qualità Alenia.

6.2.5 Procedure di processo e controllo

Il processore deve disporre, mantenere aggiornate ed utilizzare, nell'applicare il processo, di procedure contenenti almeno le seguenti informazioni:

1. Materiali, impianti ed attrezzature da utilizzare;
2. Flusso del processo con le relative fasi operative;
3. Raccomandazioni e requisiti;
4. Parametri di processo.

Il processore deve disporre, mantenere aggiornate ed utilizzare, nel controllare il processo e le parti processate, di procedure in cui si riportano almeno le seguenti informazioni:

1. Controlli da eseguirsi con riferimento alla loro frequenza;
2. Metodologie di controllo e responsabilità della conduzione, sia sul processo che sulle parti processate;
3. Registrazione dei controlli.

Il processore deve disporre, mantenere aggiornate ed utilizzare, nel controllare il processo, di proprie metodologie di analisi, di controllo e di prova, standardizzate ed aventi una sensibilità e riproducibilità adeguate alle misure ed alle tolleranze previste, quando questa specifica non le preveda. Il processore ha l'obbligo di mantenere e rendere disponibili i risultati di tutti i controlli eseguiti ed i provini testati per il periodo previsto dalle procedure di qualità Alenia applicabili e comunque almeno fino alla successiva visita ispettiva o riqualificazione del processo.

6.2.6 Personale impiegato nell'attività

Il personale di produzione e di controllo qualità che gestisce o controlla i processi deve risultare istruito ed abilitato secondo quanto previsto nella IAS R01 (addestramento ed abilitazione del personale addetto ai processi speciali ed alle attività critiche). Il corso di istruzione deve assicurare una conoscenza minima sulla metallurgia dell'alluminio e delle sue leghe, un'adeguata interpretazione dei requisiti della specifica, delle varie fasi del processo, dei metodi di controllo e dei danni che un errato processamento può arrecare alle parti. Questi requisiti saranno verificati nel corso delle fasi di qualificazione/riqualificazione con la conduzione di controlli e prove e/o con l'analisi dei rapporti di prova redatti dal processore. Nessuna modifica agli impianti, equipaggiamenti, metodologie di controllo, materiali, parametri e flusso di processo che possa influire sui risultati del processo deve essere apportata senza preliminare verifica e successiva approvazione della direzione di progettazione.

6.2.7 Requisiti di qualificazione e riqualificazione del processo

La qualificazione del processo e dell'impianto è collegata al soddisfacimento di tutti i requisiti previsti da questa specifica. La qualificazione del processo, se non diversamente richiesto dalla qualità Alenia, ha una durata di tre anni. La riqualificazione del processo e dell'impianto è subordinata alla verifica del mantenimento dei requisiti generali. La funzione di qualità Alenia può richiedere, a propria discrezione, in aggiunta a quanto stabilito, la verifica di uno o più dei requisiti previsti per la fase di qualificazione.

6.2.8 Processo

Materiali ausiliari: Ammonio fluoborato tecnico (NH_4BF_4 : 95% minimo) o un prodotto equivalente; carta neutra Kraft, Spec. UU-P-268, o prodotto equivalente.

Flusso di processo: si riporta il tipico flusso di processo di bonifica:

1. Verifica dell'identità del materiale da trattare, dello stato fisico da realizzare, delle dimensioni quando necessario.
2. Verifica delle condizioni superficiali e pulizia.
3. Caricamento delle parti da trattare sulle attrezzature.
4. Stabilizzazione del forno e successivo caricamento nello stesso.
5. Trattamento di solubilizzazione.
6. Spegnimento.

7. Lavaggio, quando necessario.
8. Verifica del ciclo termico e rilascio dei materiali trattati.
9. Immagazzinamento in frigo, quando necessario.
10. Operazioni intermedie: formatura, raddrizzatura, ecc..., come da ciclo.
11. Verifica dell'identità del materiale da trattare, dallo stato fisico da realizzare.
12. Verifica delle condizioni superficiali e pulizia.
13. Caricamento delle parti da trattare sulle attrezzature.
14. Stabilizzazione del forno e successivo caricamento nello stesso.
15. Invecchiamento.
16. Verifica del ciclo termico e controlli.

I primi dieci punti sono collegati alla solubilizzazione, mentre i restanti sono relativi all'invecchiamento.

Le parti o i materiali per essere assoggettati al trattamento devono essere privi di contaminanti quali: fondenti di saldatura, rivestimenti chimici ed organici, lubrificanti di formatura o taglio, inchiostri, grassi, sudiciume o altre contaminazioni o materiali estranei. Le parti da trattare a temperature inferiori potranno essere deterse con solvente per NTA 72254 oppure per NTA 72268 purché la sola detersione escluda rischi di corrosioni o attacchi del materiale nel corso del processo. Su parti ricavate da lamiera o estrusi e parti non assemblate, previa approvazione scritta della funzione materiali e processi di Alenia Aeronautica, è possibile effettuare la sola detersione manuale secondo la NTA 72268 anche su parti da trattare a temperature maggiori di 200°C.

La posizione delle parti sugli attrezzi deve assicurare il contenimento sicuro all'interno del volume di lavoro certificato del forno (prove di uniformità per NTA 98252). Inoltre, deve essere tale da minimizzare la distorsione delle stesse durante il processo di solubilizzazione, montarle con la lunghezza o asse maggiore in posizione verticale. Il posizionamento dei materiali deve assicurare la circolazione dell'aria e del liquido di spegnimento tra le varie parti. Prima di procedere con il trattamento termico richiesto dal ciclo di lavoro le parti devono essere fissate in modo sicuro sulle apposite attrezzature di caricamento. Per quanto riguarda le operazioni di caricamento delle parti sugli attrezzi, gli operatori devono osservare le seguenti regole di carattere generale:

1. Verificare l'integrità delle attrezzature prima del caricamento delle parti.
2. Gli attrezzi devono essere completamente asciutti prima di inserire la carica nel forno.
3. La posizione delle parti sugli attrezzi deve assicurare il loro sicuro contenimento all'interno del volume di lavoro del forno certificato.
4. La posizione delle parti sugli attrezzi deve minimizzare la distorsione delle stesse durante il processo termico e/o fase di spegnimento. Pertanto, è sempre preferibile disporre le parti da trattare verticalmente.
5. Le parti devono essere distanziate in modo tale che sia assicurata la libera circolazione dell'aria e del liquido di spegnimento.
6. Per quanto possibile, la carica deve essere composta da parti con spessori poco diversi per attenersi alle prescrizioni dei tempi di permanenza a regime.
7. La carica di lavoro deve essere costruita da parti di materiali richiedenti le stesse temperature e tempi di processo. Le eccezioni a tale prescrizione sono contenute nelle specifiche di processo applicabile.

Se non diversamente indicato, nelle fasi di solubilizzazione e spegnimento devono essere soddisfatti i seguenti requisiti:

1. Sovrapposizione di parti o parti con bordi a contatto sono sempre vietate.

2. L'entità della carica deve essere ridotta ad un volume tale da consentire il rispetto delle temperature previste per il fluido di spegnimento.
3. Materiali o parti di spessore inferiore a 6mm devono essere spaziate tra loro di almeno 50mm.
4. Materiali o parti di spessore maggiore di 6mm devono essere spaziate tra loro di almeno 50mm più due volte il loro massimo spessore.
5. Parti piccole (come macchinati, lamiere piegate e tratti di estrusi) con spessore al di sotto di 6mm e lunghezza inferiore a 150mm possono essere trattate ponendole in un cesto, spaziandole tra loro di almeno 6mm e disponendo le parti in strati distanti tra loro di almeno 100mm.

Le parti con geometria complessa richiedono spaziature maggiori da definire caso per caso.

Per i trattamenti di invecchiamento, ricottura, distensione devono essere soddisfatti i primi tre punti dell'elenco precedente. Lamiere e piastre o parti da esse ricavate con superficie di qualità "Premium" possono essere protette con carta neutra Kraft durante il trattamento di invecchiamento. Anche in questo caso le parti devono essere distanziate di almeno 50mm.

La carica di processo deve essere inserita nel forno già stabilizzato e il più rapidamente possibile. Il forno sarà stabilizzato considerando il pirometro di regolazione alla temperatura di set previsto nelle tavole applicabili e riscaldandolo per il tempo sufficiente per il raggiungimento della temperatura impostata. Il pirometro di allarme/sicurezza per sovratemperatura sarà puntato ad una temperatura di 2.5°C superiore a quella massima del campo di processo. Quando la temperatura di lavoro (temperatura di settaggio) viene portata ad un differente valore, il forno deve essere stabilizzato alla nuova temperatura prima dell'inserimento della carica se non diversamente indicato. Il tempo di trattamento previsto dopo l'inserimento della carica deve essere conteggiato a partire dal momento in cui la termocoppia più fredda raggiunge la minima temperatura del campo di tolleranza ed il pirometro regolatore raggiunge la temperatura di settaggio. Bisogna rispettare il requisito per il tempo di recupero della temperatura per il trattamento di solubilizzazione dei materiali placcati. Per il trattamento di invecchiamento il tempo di recupero della temperatura non deve superare le due ore.

I materiali o le parti devono essere trattati con le temperature ed i tempi previsti. Nel trattare i materiali e/o le parti devono essere rispettati i tempi massimi previsti. Per i materiali o parti non placcati il tempo non deve mai superare, se non diversamente indicato, il doppio del valore massimo indicato. Cariche contenenti materiali placcati di vario spessore sono trattabili solo se i tempi minimi e massimi per ogni singolo spessore sono rispettati. Quando la carica non presenta materiali placcati, il materiale può presentare spessori variabili, l'importante è che il tempo di trattamento previsto per il materiale di spessore maggiore non superi di due volte quello previsto per quello di spessore inferiore e possa quindi essere soddisfatto quanto previsto. Il processo di solubilizzazione è influenzato per parti o materiali di grosse sezioni (blocchi forgiati) anche dalle condizioni originali. Nel definire il tempo bisogna tener conto anche dello spessore originale del materiale di partenza oltre che dello spessore al momento del trattamento. Quando si tratta il materiale placcato, il volume della carica e la distribuzione delle parti deve assicurare il rispetto dei seguenti tempi di recupero della temperatura:

1. Parti placcate con spessore fino a 2.5mm: la termocoppia più fredda del forno o della carica deve raggiungere la temperatura minima del campo di tolleranza specificato entro 30 minuti.
2. Parti placcate con spessore maggiore di 2.5mm: la termocoppia più fredda del forno o della carica deve raggiungere la temperatura minima del campo di tolleranza specificato entro 60 minuti.

Lo spegnimento deve essere rapido e senza soluzione di continuità. L'intervallo di tempo dovuto al trasferimento della carica tra il forno e la vasca deve essere ridotto al minimo possibile e non deve mai superare determinati valori.

Se la temperatura delle parti, prima dell'ingresso nella vasca di spegnimento, non scende al di sotto di 480°C per la lega 2219 o 415°C per le altre leghe, il tempo di trasferimento può essere superiore rispetto a quello previsto. È necessario che tale requisito di temperatura sia verificato tramite prove sperimentali su materiali di spessore pari al minimo che si intende trattare e che sia, inoltre, dimostrato mediante test metallografici, che le parti superino il requisito di suscettibilità alla corrosione intergranulare. Tali prove dovranno essere effettuate alla qualifica dell'impianto e ripetute annualmente ed ogni volta che vengono effettuati interventi di manutenzione o modifiche all'impianto e/o al processo. La procedura per effettuare le suddette prove e i rapporti contenenti i risultati delle stesse dovranno essere approvate, per iscritto, dalla funzione laboratori materiali e processi di Alenia.

Il tempo di trasferimento della carica deve essere calcolato a partire dal momento in cui la porta del forno inizia ad aprirsi fino al momento in cui l'ultima parte della carica è all'interno della soluzione o dell'acqua di spegnimento. Per i forni a sali fusi, il tempo di trasferimento inizia quando il primo angolo della carica emerge dal bagno di sali fusi fino a quando l'ultimo angolo della carica è totalmente immersa nel liquido di spegnimento.

Ad esclusione di alcune eccezioni tutte le leghe devono essere spente per immersione in acqua. La temperatura dell'acqua immediatamente prima dell'immersione deve essere non superiore a 32°C e durante l'intera fase non deve eccedere i 38°C se non diversamente indicato. Per le parti in lega 6061 l'uso di acqua calda alla temperatura massima di 90°C quando l'acqua provoca distorsioni o tensioni interne non accettabili. I forgiati devono essere immersi in acqua calda; in alternativa lo spegnimento di alcune leghe e condizioni fisiche può essere realizzato con soluzione di glicole.

Per lo spegnimento delle parti come mezzo temprante, in alternativa all'acqua, può essere utilizzata una soluzione di acqua e glicole polialchilenico. Tale soluzione, realizzata in accordo ai requisiti riportati nella AMS 3025, può essere di Tipo 1 o Tipo 2. Le concentrazioni inoltre devono presentare un determinato valore e il pH della soluzione stessa deve essere compreso tra 7.5 e 8.7. Dopo lo spegnimento le parti devono essere completamente risciacquate per rimuovere i residui della stessa soluzione.

La determinazione della concentrazione del glicole polialchilenico deve essere basata o su un test di viscosità (in accordo alla ASTM D445) o su un metodo rifrattometrico.

La concentrazione deve essere controllata tramite il metodo della viscosità o del metodo rifrattometrico ogni settimana e quando la concentrazione della soluzione viene variata. In aggiunta, la concentrazione deve essere controllata trimestralmente con il metodo della viscosità.

Per quanto riguarda le caratteristiche dei rifrattometri da utilizzare, la frequenza di calibrazione degli stessi ed i metodi di calibrazione da utilizzare, bisogna fare riferimento ai requisiti richiesti dalla AMS 2770.

Tipo di soluzione (1)	Legha	Forme	Spessore massimo in mm (3)	Concentrazione della soluzione % (1) (4)	Note
1	2024	Lamiere, estrusi	1.02	34 max	(2)
			1.60	28 max	
			1.80	22 max	
			2.03	16 max	
	2219	Lamiere, estrusi	1.85	22 max	(2)
	6061	Lamiere, piastre, barre, estrusi	6.35	40 max	
			9.52	32 max	
			25.4	22 max	
	7049 7050 7075	Lamiere, piastre, barre	2.03	40 max	
			6.35	34 max	
			9.52	28 max	
			12.7	22 max	
	6061 7075	Forgiati	25.4	Da 18 a 22	
			50.8	Da 11 a 15	
			63.5	Da 8 a 12	
	7049 7149	Forgiati	25.4	Da 18 a 22	
50.8			Da 11 a 15		
76.2			Da 8 a 12		
7050	Forgiati	25.4	Da 28 a 32		
		50.8	Da 24 a 28		
		76.2	Da 18 a 22		
		101.5	Da 13 a 17		
7049 7050 7075	Estrusi	6.35	28 max		
		9.52	22 max		
2	2024	Lamiere, estrusi	1.02	34 max	(2)
			1.60	22 max	
			2.03	16 max	
	6061 7049 7050 7075	Lamiere, piastre, barre	1.02	34 max	
			4.83	20 max	
			6.35	18 max	
			25.4	Da 11 a 15	
	6061 7075	Forgiati	50.8	Da 8 a 12	(5)

Tabella 6.3: concentrazione delle soluzioni di glicole polialchilenico

Nota 1: le soluzioni di tipo 1 o 2 e le relative concentrazioni devono essere conformi alla AMS 3025. Le concentrazioni sono percentuali volumetriche del polimero non diluito così come fornito dal produttore.

Nota 2: applicabile solo alle condizioni fisiche T4 o T42. Quando è richiesta la condizione fisica T6 o T62, lamiere e piastre fino a 6.35mm incluso, le parti possono essere raffreddate in una soluzione di tipo 1 e 2 con una concentrazione massima del 22%.

Nota 3: lo spessore è la minima dimensione della sezione più larga.

Nota 4: dove è indicata solo la concentrazione massima, può essere utilizzato il 4% del campo purché il massimo indicato non venga superato.

Nota 5: è proibito per la lega 7075 in condizione fisica T6 con spessori superiori a 25mm.

Le parti devono essere mantenute nel mezzo raffreddante per almeno 2 minuti per ciascuna unità di spessore di 25mm o frazione di essa. Bisogna determinare il tempo mettendolo in relazione con lo spessore massimo della sezione. Per le parti richiedenti immagazzinamento in frigo o mantenimento della condizione -W il tempo massimo di immersione non deve risultare maggiore di due volte il tempo minimo.

Un lavaggio ad immersione in acqua fredda sotto agitazione, di durata necessaria alla completa pulizia delle parti, è da effettuare nei seguenti casi:

- Quando per lo spegnimento delle parti è utilizzato il glicole, al fine di rimuovere il film dello stesso glicole dall'attrezzo e dalle parti;
- Per parti processate con l'utilizzo di bagni di sali fusi per la rimozione dei residui di sale dalle parti stesse.

Per le parti che richiedono successivamente un immagazzinamento in frigo occorre osservare le limitazioni temporali imposte.

L'immagazzinamento in frigo è utilizzato per il mantenimento della condizione di solubilizzazione quando sono richieste operazioni di fabbricazione intermedie (formatura, raddrizzatura, ecc...) con materiale in condizione -W. I limiti di immagazzinamento per tempo e temperatura, ammessi per le varie leghe, sono riportati nella NTA 75650. Il trasferimento delle parti in frigo, a conclusione della fase di spegnimento, deve avvenire in un intervallo di tempo di 15 minuti. Qualora questo limite sia superato il tempo deve essere conteggiato e sottratto al limite residuo come previsto dalla NTA 75650. L'immagazzinamento in frigo deve risultare opportunamente controllato in modo da assicurare il rispetto dei tempi previsti.

I materiali da invecchiare artificialmente devono essere assoggettati al ciclo termico previsto. Al termine del tempo di permanenza alla temperatura di trattamento, il raffreddamento delle parti trattate può avvenire o nel forno stesso aprendo le porte o all'aria estraendo le parti e lasciandole raffreddare a temperatura ambiente. I materiali invecchiati naturalmente devono essere rilasciati dal reparto di trattamento allo scadere del tempo previsto, dopo la verifica dei valori di conducibilità e/o durezza previsti. Il materiale potrà essere rilasciato dal reparto anche prima dello scadere del tempo previsto se avrà raggiunto i valori di durezza e conducibilità richiesti. L'invecchiamento naturale può essere accelerato esponendo i materiali ad una temperatura non superiore a 50°C. Le parti dopo spegnimento, prima di essere invecchiate artificialmente, devono essere lasciate per almeno 2h a temperatura ambiente, se non diversamente specificato.

Il processo di ricottura completa ha lo scopo di addolcire il materiale e renderlo più adatto per le operazioni di formatura. I materiali, nelle condizioni fisiche specificate, modificheranno a seguito del trattamento di ricottura completa le loro caratteristiche fisiche in modo irreversibile. Pertanto, quando tale condizione fisica è prevista a disegno, le parti non devono essere sottoposte al trattamento, a meno di specifica autorizzazione da parte della direzione di progettazione. Il trattamento di ricottura completa di un materiale placcato richiede l'autorizzazione da parte della direzione di progettazione. I suddetti materiali devono essere assoggettati al trattamento di ricottura completa:

1. Leghe incrudite (ad esempio: 1100, 3003, 5052, ecc...).
2. Leghe nelle condizioni fisiche seguenti o comunque non riproducibili se non dal fornitore: T3, T36, T81, T86, T87, W51, W52, ecc....

Il processo sarà realizzato con i tempi e le temperature prestabiliti. I materiali dopo la ricottura devono essere solubilizzati ed invecchiati. Le condizioni fisiche ottenibili saranno quindi quelle previste.

Il processo di ricottura parziale si pone l'obiettivo di rimuovere le tensioni residue prodotte da fasi di fabbricazione, come ad esempio la formatura. Il processo trova anche applicazione durante le fasi di fabbricazione per facilitare il completamento della formatura e quindi può essere considerato un processo aggiuntivo o sostitutivo di quello di ricottura completa. La condizione fisica ottenuta da questo trattamento è stabile a temperatura ambiente solo per 24h; dopo di che il materiale può subire un certo indurimento. Pertanto, le eventuali operazioni di formatura devono essere effettuate entro il periodo prestabilito. I materiali nelle condizioni fisiche considerate modificheranno, a seguito del trattamento di ricottura

parziale, le caratteristiche fisiche in modo irreversibile. Pertanto, quando tale condizione fisica è prevista a disegno, le parti non devono essere sottoposte al trattamento di ricottura parziale, a meno di specifica autorizzazione da parte della direzione di progettazione. Sono riportati i tempi e le temperature di processo per i vari materiali ed essi dopo la ricottura devono essere solubilizzati ed invecchiati. Il processo applicato con i tempi previsti può essere utilizzato là dove consentito una sola volta.

Il trattamento di risolubilizzazione deve essere autorizzato dalla direzione di progettazione quando si verificano le seguenti condizioni:

1. Estrusi: i materiali risultano già invecchiati e con una condizione fisica speciale (prodotta dal fabbricante).
2. Prodotti placcati: il numero di ritrattamenti ha superato i limiti indicati nella tabella 6.4.

Deve essere considerato ritrattamento ogni trattamento di solubilizzazione, qualsiasi sia la condizione fisica di partenza.

SPESSORE	RITRATTAMENTI CONSENTITI
Fino a 0.64 mm	0
0.65÷3.17 mm	1
da 3.18 mm in poi	2

Tabella 6.4: ritrattamenti consentiti

I tempi di solubilizzazione eccedenti il massimo (non inferiori a due volte il massimo stesso) sono da considerare come due trattamenti.

3. Materiale in lega serie 7000 non placcato in condizione fisica -T7X: il materiale, pur da trattare a condizioni realizzabili in casa: -T73, -T74 oppure -T76, è già stato risolubilizzato per due volte.
4. Il trattamento è da applicare a parti i cui disegni prevedono esplicitamente proprietà meccaniche minime da rispettare.
5. Parti provenienti da subfornitori. Le parti sono fornite già in condizioni di invecchiamento a “-T”.
6. Il materiale in lega 2024, 7075 e 7050 si trova in una particolare condizione fisica (prodotta solo dal fornitore) e tale è prevista a disegno.

Fanno eccezione: i tubi in 2024-T3XX da formare e gli estrusi di spessore inferiore a 6.35mm in lega 2024-T4XX. La ricottura completa di materiale placcato in condizione fisica di invecchiamento “T” va sempre autorizzata dalla direzione di progettazione.

6.2.9 Controllo dei requisiti del processo e delle parti

Bisogna effettuare le ispezioni per il processo. La strumentazione a bordo impianto deve risultare conforme ai requisiti e correttamente certificata. La natura dei materiali, il loro spessore, le condizioni fisiche da realizzare devono risultare compatibili con il ciclo termico a cui la carica è destinata. Le parti caricate devono risultare propriamente pulite e il loro posizionamento deve risultare conforme ai requisiti.

Deve essere disponibile una registrazione delle parti processate per ogni singola carica con al minimo le seguenti informazioni:

- Numero della carica;
- Numero del disegno e di altri dati necessari per l'identificazione delle parti;
- Quantità delle parti;
- Natura del materiale (lega);
- Natura del fluido di spegnimento con rilievo della temperatura ad inizio e fine operazione (eventuale diagramma di registrazione);

- Tempo di trasferimento della carica.

I dati riportati vanno integrati con il diagramma termico del registratore interessato, identificato con data, numero del forno e numero della carica. Se i requisiti sono soddisfatti l'ispettore di controllo della qualità (o l'operatore certificato) deve apporre il proprio timbro sul diagramma alla fine di ciascun ciclo termico o all'inizio e alla fine quando si usano cicli multipli. Tutte le registrazioni devono essere mantenute per almeno cinque anni, se non diversamente specificato.

Il ciclo di accompagnamento delle parti deve essere timbrato per l'attestazione dell'avvenuto trattamento e le parti rilasciate, solo dopo il completamento delle registrazioni sopra indicate e degli ulteriori controlli riportati in questa sezione. Per le parti da assoggettare ad operazioni di fabbricazione in condizione fisica W sono da registrare anche l'ora e i minuti relativi al completamento del processo di solubilizzazione (ritiro delle parti dal fluido di spegnimento) in modo da consentire la verifica del rispetto dell'intervallo di tempo tollerato per il mantenimento della condizione fisica W.

I frigoriferi usati devono lavorare alla temperatura prevista attraverso controlli giornalieri e le parti in esse contenute devono essere registrate per l'ingresso e l'uscita con data ed ora. La soluzione di glicole deve risultare controllata con la frequenza prevista e conforme ai requisiti di concentrazione. Il collaudo deve inoltre assicurare la rintracciabilità e la gestione dei provini necessari e dei relativi dati di prova.

6.2.10 Controlli

Tutti i materiali trattati termicamente, caratterizzati da limiti di accettabilità per conducibilità e durezza, come previsto dalla NTA 95051 ed NTA 94551, devono essere controllati ed accettati come specificato di seguito:

1. Condurre la prova di conducibilità su ogni singola parte della carica provvedendo a registrare il valore minimo e massimo riscontrato, relativamente a ciascun ordine di lavoro, sul ciclo di lavoro. Questa procedura non risulta applicabile per i casi previsti al punto 3.
2. Condurre la prova di durezza almeno sulle due parti, relative a ciascun ordine di lavoro, che hanno presentato il valore minimo e massimo di conducibilità.
3. Per le parti che non possono essere controllate mediante prova di conducibilità, bisogna effettuare la prova di durezza al 100%. In aggiunta, per parti da trattare in condizione fisica -T7X, devono essere previsti provini dello stesso materiale aventi lo stesso spessore, che saranno trattati insieme alle parti, per la verifica della conducibilità.
4. Parti in lega 6000 devono essere controllate con prove di durezza al 100%. La prova di conducibilità sulle parti in lega 6000 può essere effettuata, ma i risultati devono essere considerati solo come valori di riferimento e non utilizzati come valori di accettazione/scarto.
5. Parti in lega serie 2000 e 6000 possono essere rilasciate prima delle 96h richieste per la precipitazione naturale dopo la solubilizzazione, purché i valori rilevati di conducibilità elettrica e durezza soddisfino i requisiti minimi richiesti.

Il trattamento termico di solubilizzazione ed invecchiamento richiede, per le leghe, le condizioni fisiche e le forme specificate, oltre a controlli di conducibilità e durezza anche la verifica delle caratteristiche meccaniche, con almeno due provette ricavate da campioni trattati congiuntamente alle parti che le stesse provette rappresentano. Per le leghe diverse da quelle di seguito elencate le prove di trazione sono opzionali. Sono invece fondamentali per: estrusi, forgiati e piastre in lega 7050 trattati T74; lamiere, piastre ed estrusi in lega 7075 trattati T76; lamiere in lega 7475 trattate T76X. I campioni devono essere ottenuti dallo stesso grezzo delle parti che essi devono rappresentare (stessa forma, spessore iniziale, lega e

condizione fisica, produttore) e di dimensione tali da consentire di ricavare a fine trattamento provette ad ASTM B557, di diametro 6.35 o 12.7mm. Almeno una delle dimensioni del blocco o blocchetti deve risultare di 19mm minimo. Per i forgiati, quando non sono previste appendici, i campioni possono essere ricavati dal materiale eliminato durante le fasi di sgrassatura. Per i materiali di spessore inferiore a 15.8mm, possono essere utilizzati in alternativa provette piane di larghezza pari a 12.7mm per ASTM B557.

Le provette se non diversamente indicato dai disegni avranno il seguente orientamento:

- Provette relative a lamiere e piastre: la direzione di prova deve risultare parallela al traverso lungo.
- Provette relative a forgiati: l'asse longitudinale del provino deve risultare parallelo alle linee di flusso di forgiatura con una tolleranza di $\pm 15^\circ$.
- Provette relative ad altre forme: l'asse longitudinale del provino deve risultare parallelo alla direzione longitudinale dei grani.

Per i forgiati in lega 7050, spenti in glicole, e di spessore maggiore di 25.4mm le due provette devono essere ricavate, dopo trattamento termico, da apposite appendici o in loro mancanza da campioni sicuramente provenienti dallo stesso forgiato. Lo spessore dei campioni deve risultare, nel momento in cui è trattato congiuntamente al forgiato, uguale allo spessore massimo della sezione del forgiato maggiorato di 6.35mm.

Le provette saranno realizzate dai campioni trattati dopo aver verificato che le parti a cui si riferiscono e loro stessi soddisfino i requisiti di conducibilità elettrica e durezza richiesti. I requisiti da ottenere sono quelli previsti dalla specifica del materiale. Le bollature sulle parti non sono accettabili.

6.2.11 Criteri di accettazione

Eccetto quanto specificato di seguito, la durezza e la conducibilità dei materiali trattati deve risultare conforme ai requisiti della NTA 95051 ed NTA 94551. Per i controlli effettuati deve essere mantenuta la registrazione dei valori minimi e massimi riscontrati facendo riferimento all'ordine di lavoro e al disegno delle parti interessate.

Per le parti, i cui valori non superano quello richiesto, devono essere scartate o temporaneamente sospese in attesa di più approfondita indagine da eseguire a cura del controllo qualità e della direzione di progettazione.

Per i materiali e le condizioni fisiche riportate di seguito deve essere applicato il seguente criterio:
Leghe 7075 e 7175 in condizioni T73:

- Se la conducibilità è compresa tra 38 e 42.5% IACS e la durezza è tra 79.5 e 89HRB oppure 135-154HB (sfera da 10mm, carico di 1000kg) il materiale è accettabile;
- Se la conducibilità eccede il valore di 42.5% IACS le parti devono essere ispezionate per durezza al 100%.

Risulteranno accettabili se la durezza, nelle zone ad alta conducibilità, supera il valore di 81.5HRB (139HB). Qualora la durezza non soddisfi il valore indicato, è possibile accettare le parti del lotto nelle medesime condizioni attraverso delle prove di trazione con provette ricavate dall'area incriminata. La delibera delle parti sarà condizionata all'ottenimento dei requisiti minimi richiesti. Il materiale risultato non accettabile per quanto sopra può essere sottoposto ad un ulteriore invecchiamento artificiale o essere nuovamente solubilizzato ed invecchiato artificialmente. Qualora dopo i suddetti trattamenti soddisfatti i requisiti allora risulterà accettabile.

Resistenza alla corrosione esfoliante: le lamiere di spessore inferiore a 2.5mm saranno esaminate sulla superficie, mentre le lamiere di spessore maggiore o uguale a 2.5mm saranno esaminate in sezione ad una

profondità di un decimo dello spessore della lamiera stessa. Il test condotto in accordo alla ASTM G34 sarà considerato superato se l'entità della corrosione delle lamiere in esame non supererà il grado EB.

Legga	Temperatura di settaggio	Uniformità termica richiesta	Spessore massimo nominale	Fluido e temperatura di spegnimento
2014	501,5 °C	± 5.5 °C	---	ACQUA CALDA A 65.5+82.2 °C
2219	535 °C	± 5.5 °C	---	ACQUA CALDA A 60+71 °C
6061	529.5 °C	± 5.5 °C	---	ACQUA CALDA A 60+71 °C
7049	468 °C	± 5.5 °C	---	ACQUA CALDA 54+71 °C
7050	471.5 °C	± 5.5 °C	---	ACQUA CALDA A 54.5+65.5 °C
			FINO A 25 mm (1) FINO A 50 mm (2)	GLICOLE (3)
7075	465.5 °C	± 5.5 °C	---	ACQUA CALDA A 60+71 °C
			FINO A 25 mm (1)	GLICOLE (3)
7149	468 °C	± 5.5 °C	---	ACQUA CALDA 54+71 °C
7178	466 °C	± 5.5 °C	---	---

Tabella 6.5: trattamento di solubilizzazione e temperature di processo per i forgiati

Nota 1: lo spegnimento in glicole è ammesso se le parti verranno invecchiate a T73.

Nota 2: lo spegnimento in glicole è ammesso se le parti verranno invecchiate a T74.

Nota 3: lo spegnimento in glicole deve essere effettuato in accordo alla tabella 6.3.

Spessore del blocco originale o del forgiato di partenza in mm	Tempo minimo di trattamento in funzione dello spessore al momento del trattamento termico in ore (1)						
	mm	0 ÷ 50.7	50.8 ÷ 101	101.1 ÷ 152	152.1 ÷ 203	203.1 ÷ 254	254.1 ÷ 305
0.0 a 152.4	Ore	3	4	5	---	---	---
152.5 a 203.2		4	5	6	7	--	---
203.3 a 254.0		5	6	7	8	9	---
254.1 a 304.8		6	7	8	9	10	11
304.9 a 355.6		7	8	9	10	11	12
355.7 a 406.4		8	9	10	11	12	13
		---	---	---	---	---	---

Tabella 6.6: trattamento di solubilizzazione e tempi di processo per i forgiati

Nota 1: misurare la dimensione minore della sezione più spessa della parte da trattare. Portarsi nel riquadro che considera questo spessore e leggere il tempo in ore in corrispondenza dello spessore relativo al materiale originale.

Legga	Forma	Temperatura di settaggio	Uniformità termica richiesta
2014	Tutte eccetto forgiati	501.5 °C	± 5.5 °C
2024	Piastre, lamiere, estrusi, tubi	493.2 °C	± 5.5 °C
2098	Tutte	521 °C	± 5.5 °C
2219	Piastre, lamiere, estrusi, tubi (1)	535 °C	± 5.5 °C
6013	Lamiere	568 °C	± 5.5 °C
	Saldati (2)	537 °C	± 5.5 °C
6061	Tutte eccetto forgiati	529.5 °C	± 5.5 °C
7049	Tutte eccetto forgiati	468 °C	± 5.5 °C
7149			
7050	Piastre, estrusi	476.5 °C	± 5.5 °C
7075	Lamiere con spessore ≤ 1.30 mm	493,2 °C	± 5.5 °C
	Piastre, barre, estrusi, tubi, lamiere con spessore ≥ 1.30 mm	465.5 °C	± 5.5 °C
7175	Estrusi	465.5 °C	± 5.5 °C
7178	Tutte eccetto forgiati	466 °C	± 5.5 °C
7475	Lamiere con spessore ≤ 1.30 mm	480 °C	± 5.5 °C
	Lamiere con spessore ≥ 1.30 mm	470 °C	± 5.5 °C

Tabella 6.7: trattamento di solubilizzazione e temperature di processo per altre forme

Nota 1: per tubi saldati in 2219 il tempo sarà il doppio di quello minimo previsto per quel dato spessore.

Nota 2: per saldati in 6013 il tempo, indipendentemente dallo spessore, sarà 20-30 minuti

Spessore in mm	Tempi per forni ad aria in minuti (3)		Tempi per forni a sali in minuti (3)	
	Minimo	Massimo	Minimo	Massimo
Da 0.25 a 0.30	10	15	10	15
0.31 a 0.40	20	25	10	15
0.41 a 0.50	20	30	15	20
0.51 a 0.80	25	35	15	25
0.81 a 1.60	30	40	20	30
1.61 a 2.30	35	45	25	35
2.31 a 3.10	40	50	30	40
3.11 a 6.30	50	60	35	45
6.31 a 12.70	65	1h 15'	45	55
12.71 a 25.40	1h 35'	1h 45'	1h 05'	1h 15'
25.41 a 38.10	2h 05'	2h 15'	1h 25'	1h 35'
38.11 a 50.80	2h 35'	2h 45'	1h 45'	1h 55'
50.81 a 63.50	3h 05'	3h 15'	2h 05'	2h 15'
63.51 a 76.20	3h 35'	3h 45'	2h 25'	2h 35'
76.21 a 88.90	4h 05'	4h 15'	2h 45'	2h 55'
88.91 a 101.60	4h 35'	4h 45'	3h 05''	3h 15'
101.61 a 114.30	5h 05'	5h 15'		
(4)				

Tabella 6.8: trattamento di solubilizzazione e tempi di processo per altre forme

Nota 3: il valore massimo è applicabile solo per il materiale placcato. Per i materiali o parti non placcate il tempo non deve mai superare, se non diversamente indicato, il doppio del valore massimo indicato.

Nota 4: oltre i 114.3mm bisogna aggiungere 30 minuti per ogni incremento di spessore di 12.7mm o sua frazione.

SPESSORE MINIMO IN mm (1)	TEMPO DI TRASFERIMENTO MAX IN SECONDI
0.25 ÷ 0.39	4
0.40 ÷ 0.50	5
0.51 ÷ 0.80	7
0.81 ÷ 2.25	10
2.26 e maggiore	15

Tabella 6.9: trattamento di solubilizzazione e tempi di trasferimento della carica

Nota 1: lo spessore da considerare è la dimensione minima della sezione più sottile tra le parti della carica.

Lega e stato fisico iniziale	Temperatura di settaggio (3)	Tempo di permanenza a temperatura in funzione dello spessore al momento del trattamento. Dimensioni in mm						Condizione fisica finale
		ORE						
		0.0 ÷ 50.7	50.8 ÷ 101.5	101.6 ÷ 152	152.1 ÷ 203	203.1 ÷ 254	254.5 ÷ 305	
2014-W 2014-T4	176.5 °C	8	9	10	11	12	13	2014-T6
2219-W 2219-T4	190.5 °C	26			27	28	29	2219-T6
2219-T352	190.5 °C	18			19	20	21	2219-T7852
6061-W 6061-T4	190.5 °C	8 ÷ 10						6061-T6
7049 -W 7149 -W	23 ÷ 25 ore a 121 °C + 13 ÷ 14 ore a 166 °C (4) (5) (6)							-T73
7050-W fucinato (handforging)	6 ÷ 8 ore a 121 °C + 6 ÷ 8 ore a 176.5 °C (1)							7050-T74
7050-W stampato (die forging)	6 ÷ 8 ore a 121 °C + 8 ÷ 10 ore a 176.5 °C							7050-T74
7075-W	121 °C	24			25	26	27	7075-T6
7075-W	6 ÷ 8 ore a 107 °C + 8 ÷ 10 ore a 176.5 °C (2)							7075-T73
7075- T6	176.5 °C	8	9	10	11	12	13	7075-T73
7075- T652		6	7	8	9	10	11	7075-T7352
7178 - W	121 °C	24			25	26	27	7178 - T62

Tabella 6.10: trattamento di invecchiamento e tempi e temperature di processo per forgiati

Nota 1: quando le parti e/o i provini processati non raggiungono i valori di accettabilità previsti il trattamento a 171-182°C può essere prolungato di ulteriori 6h purché il tempo totale a questa temperatura non superi le 14h.

Nota 2: aggiungere 0.5h per ciascuna unità di spessore 25.4mm o frazione per le parti di spessore maggiore di 50.8mm.

Nota 3: la tolleranza di uniformità termica richiesta è di $\pm 5.5^\circ\text{C}$.

Nota 4: 4-15h se lo spessore è più grande di 51mm.

Nota 5: oltre al tempo di trattamento previsto per il secondo step, è possibile aggiungere altre 4h per ridurre i valori di durezza e/o aumentare la conducibilità.

Nota 6: la tolleranza di uniformità termica richiesta è di $\pm 3^\circ\text{C}$.

Lega e stato fisico iniziale		Forma	Temperatura di settaggio (9)	Tempo in ore	Condizione fisica finale
2014	-W	Tutto eccetto forgiati	Ambiente	96	-T4, -T42
	-T4		176.5 °C	8 ÷ 9	-T6
	-T42				- T62
2024	-W	Lamiere, barre piastre, estrusi, tubi	Ambiente	96	-T4, -T42
	-T3	Lamiere, piastre, tubi stirati, barre e filo trafilato	190.5 °C	11 ÷ 13 per spessori ≤ 2.7 mm (1)	-T81
	-T351				-T851
	-T3	Barre estruse			-T81
	-W	Barre estruse	190.5 °C	12 ÷ 13 per spessori ≤ 12.7 mm (1)	-T6
	-T4				- T62
	-T42				-T8510
	-T3510				-T8511
	-T3511				
	-W	Lamiere, piastre	190.5 °C	9 ÷ 12 per spessori ≤ 12.7 mm (1)	-T6
	-T4				- T62
-T42					
2098	-T351	Tutte	160 °C	17 ÷ 19 (2)	-T851
	-W-T42				- T62
2219	-W	Lamiere, piastre, estrusi, tubi	Ambiente	96	-T42
	-W		190.5 °C	35 ÷ 37	-T6
	-T42				-T62
6013	-W	Lamiere	190.5 °C	4 ÷ 5 ore per spessori ≤ 12.7 mm (1)	-T6
	-T4				-T62
	-T42				
6061	-W	Tutto eccetto forgiati	Ambiente	96	-T4, -T42
	-W		176.5 °C	8 ÷ 10	-T6
	-T4				-T62
	-T42				

Lega e stato fisico iniziale		Forma	Temperatura di settaggio (9)	Tempo in ore	Condizione fisica finale
7049 7149	-W	Barre estruse, profilati	23 ÷ 25 ore a 121 °C (1° Step) + (5) (8)	21 ÷ 22 ore a 166 °C (2° Step) (6) (7) (8)	-T73
	-W			14 ÷ 15 ore a 166 °C (2° Step) (6) (7) (8)	-T76
7050	-W	Estrusi	6 ÷ 8 ore a 121 °C (1° step) + 9 ÷ 11 ore a 176.5 °C (2° Step) (2)		-T74
	-W	Piastre	3 ÷ 6 ore a 121 °C (1° step) + 6 ÷ 8 ore a 176.5 (2° Step) (2)		
7075	-W	Lamiere, piastre, barre, tubi, estrusi	121 °C	22 ÷ 24 (3)	-T6
	-W				-T62
	-W	Barre rullate e lavorate a freddo	6 ÷ 8 ore a 107 °C (1 Step) + 8 ÷ 10 ore a 176.5 °C (2 Step) (2) (3)		-T73
	-W	Estrusi	6 ÷ 8 ore a 107 °C (1 Step) + 6 ÷ 8 ore a 176.5 °C (2 Step) (2) (3)		
	-W	Lamiere e piastre	6 ÷ 7 ore a 107 °C (1 Step) + 26 ÷ 28 ore a 162.5 °C (2 Step) (2) (3)		
	-T6	Barre rullate e lavorate a freddo	176.5 °C	8 ÷ 10 per spessori ≤ 50 mm (3)	-T73
	-T651	Lamiere e piastre	162.5 °C	26 ÷ 28 per spessori ≤ 50 mm (3)	-T7351
	-T6	Estrusi	176.5 °C	6 ÷ 8 per spessori ≤ 50 mm (3)	-T73
	-T6510				-T73510
	-T6511				-T73511
	-T6	Estrusi	160 °C	19 ÷ 21 per spessore ≤ 12.7 (1)	-T76
	-T6510				-T76510
	-T6511				-T76511
	-W	Lamiere e piastre	6 ÷ 8 ore a 107 °C (1° Step) + 16 ÷ 18 ore a 162.5 °C (2° Step) (1) (2)		-T76
	-T6		162.5 °C	16 ÷ 18 per spessori ≤ 12.7 mm (1)	-T76
-T651	-T7651				

Lega e stato fisico iniziale		Forma	Temperatura di settaggio (9)	Tempo in ore	Condizione fisica finale
7175	-W	Estrusi	121 °C	22 ÷ 24	-T6 -T62
		Estrusi	6 ÷ 8 ore a 101 ÷ 112°C (1° step) + 6 ÷ 8 ore a 171 ÷ 182°C (2° step) (3)		-T73
	-T6	Estrusi	176.5 °C	6 ÷ 8 per spessori ≤+ 50 mm (3)	-T73
	-T6510				-T73510
	-T6511				-T73511
7178	-W	Tutte	121 °C	23 ÷ 25	-T62
	-W	Lamiere e piastre	23 ÷ 25 ore a 121 °C (1° Step) + 16 ÷ 18 ore a 163 °C (2° Step) (7)		-T76
	-W	Barre estruse e profilati	23 ÷ 25 ore a 121 °C (1° Step) + 18 ÷ 20 ore a 160 °C (2° Step) (7)		
7475	-W	Lamiere	3 ÷ 5 ore a 120 °C (1° Step) + 16 ÷ 18 ore a 165°C (2° Step) (4) (8)		-T76

Tabella 6.11: trattamento di invecchiamento e tempi e temperature di processo per altre forme

Nota 1: i tempi indicati si riferiscono a spessori fino a 12.7mm. Aggiungere 0.5h per ogni 12.7mm o frazione di esso.

Nota 2: non è necessario alcun intervallo di tempo tra la fase di spegnimento e quella di inizio invecchiamento.

Nota 3: i tempi indicati si riferiscono a spessori fino a 50.8mm. Aggiungere 0.5h per ogni 25.4mm o frazione in eccesso. Quando il trattamento è realizzato a due differenti temperature il tempo da aggiungere deve essere applicato ad entrambe le due differenti temperature. Durante il passaggio da una temperatura all'altra non risulta indispensabile estrarre la carica. Il tempo di permanenza nel secondo campo di temperatura va comunque conteggiato.

Nota 4: il trattamento di invecchiamento deve essere effettuato o entro un'ora dalla fine della solubilizzazione o dopo almeno 96h di permanenza a temperatura ambiente.

Nota 5: il trattamento di invecchiamento deve essere effettuato almeno 48h dalla fine della solubilizzazione. Per evitare che il materiale sia soggetto a fenomeni di stress corrosion, il tempo trascorso tra la fine della solubilizzazione e l'inizio dell'invecchiamento non deve essere superiore a 72h.

Nota 6: 14-15h se lo spessore è più grande di 51mm.

Nota 7: oltre al tempo di trattamento previsto per il secondo step, è possibile aggiungere altre 4h per ridurre i valori di durezza e/o aumentare la conducibilità di parti trattate a T7xx.

Nota 8: la tolleranza di uniformità termica richiesta è di $\pm 3^\circ\text{C}$.

Nota 9: la tolleranza di uniformità termica, salvo diverse indicazioni è di $\pm 5.5^\circ\text{C}$.

Lega	Temperatura di settaggio	Uniformità termica richiesta	Tempo in ore (1)	Raffreddamento
1100 5052 5056 5086 5456	340 °C	$\pm 8^\circ\text{C}$	0.5÷1	All'aria
3003	396 °C	$\pm 8^\circ\text{C}$	0.5÷1	All'aria
SERIE 2000 E 6000	412.5 °C	$\pm 14^\circ\text{C}$	2 minimo	In forno, con velocità di raffreddamento non superiore a 27 °C/ora, fino a 260 °C o a temperatura ambiente. In alternativa raffreddamento in aria a partire da 260 °C
SERIE 7000	1 ora minimo a 426.5 °C $\pm 14^\circ\text{C}$, raffreddare in forno con velocità non superiore a 27 °C/ora fino a 231.5 °C $\pm 5.5^\circ\text{C}$ e mantenere la carica a questa temperatura per 6 ore minimo. Raffreddare quindi in aria.			

Tabella 6.12: trattamento di ricottura completa e tempi e temperature di processo

Nota 1: il tempo è basato sulla reale temperatura delle parti. Quando lo spessore supera i 12.7mm prolungare il tempo di 30 minuti per ogni incremento di ulteriori 12.7mm di spessore o frazione, in modo da assicurare la permanenza delle parti a temperatura per il tempo necessario.

Lega	Temperatura di settaggio	Uniformità termica richiesta	Tempo in ore (1)	Raffreddamento
SERIE 2000 e 6000	340 °C	± 8 °C	0.5÷1	In aria ambiente
7075 7175 7475	340 °C	± 8 °C	0.5÷1	In aria ambiente

Tabella 6.13: trattamento di ricottura parziale e tempi e temperature di processo

Nota 1: il tempo è basato sulla reale temperatura delle parti. Quando lo spessore supera i 12.7mm prolungare il tempo di 30 minuti per ogni incremento di ulteriori 12.7mm di spessore o frazione, in modo da assicurare la permanenza delle parti a temperatura per il tempo necessario.

6.3 Caratteristiche dell'AlSi10Mg

6.3.1 Proprietà meccaniche di parti in AlSi10Mg prodotte tramite SLM

Tipo di processo	Resistenza a rottura (MPa)	Allungamento %	Durezza (HV)
AlSi10Mg SLM	330-455	1,5-7%	125-150
AlSi10Mg cast-alloys	300-317	2,5-3,5%	86

Tabella 6.14: proprietà meccaniche di parti in lega AlSi10Mg prodotte tramite SLM e casting

Le differenze delle proprietà meccaniche per l'AlSi10Mg realizzato tramite SLM e casting sono riconducibili all'affinamento del grano prodotto dal processo SLM. L'effetto della taglia del grano sulle proprietà meccaniche del componente è descritto dalla relazione di Hall-Patch:

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

dove σ è la tensione di snervamento, σ_0 è la resistenza del reticolo al moto delle dislocazioni, k è il coefficiente di Hall-Patch (tipico di ogni materiale) e d è il diametro medio del grano. Secondo la relazione di Hall-Patch il limite di snervamento del materiale aumenta al diminuire della dimensione media del grano. I bordi grano costituiscono infatti un ostacolo al movimento delle dislocazioni poiché in corrispondenza di essi le dislocazioni vengono arrestate a causa della diversa orientazione del grano adiacente. Al diminuire della taglia dei grani si ha un incremento della densità dei bordi grano che incide negativamente sulla facilità di scorrimento delle dislocazioni. È stato evidenziato in alcuni studi come il comportamento al trattamento termico della lega AlSi10Mg prodotta mediante SLM differisca da quello dell'analogia lega realizzata tramite casting.

Il trattamento termico T6 permette di rafforzare la matrice in lega Al-Si-Mg prodotta per casting. La solubilità del Si in Al a temperatura ambiente è in questo caso prossima alla solubilità di equilibrio. Il trattamento di solubilizzazione determina quindi un incremento della solubilità (al limite fino all'1.65%) del Si in Al. Durante l'invecchiamento si verifica poi la precipitazione di Mg_2Si e il rafforzamento della matrice. Al contrario, nella lega AlSi10Mg prodotta mediante SLM, il trattamento di solubilizzazione determina la precipitazione di Si dalla soluzione solida soprassatura e l'ingrossamento del grano. Questa riduce il rafforzamento per soluzione solida e per affinamento del grano.

6.3.2 Trattamenti termici

Parti in lega AlSi10Mg prodotte tramite SLM possono essere utilizzate in diverse condizioni metallurgiche a seconda della specifica applicazione. Il materiale può essere lasciato nella condizione as-built se l'uso finale richiede un'elevata resistenza; in questo caso occorre però evitare alte temperature durante l'esercizio a causa dell'instabilità del materiale. Al contrario, un trattamento termico è necessario nel caso in cui il pezzo venga esposto ad alte temperature durante la messa in opera al fine di garantirne la stabilità. Il processo SLM introduce elevati stress residui all'interno del componente che possono provocare distorsioni ed alterazioni delle proprietà meccaniche del pezzo. Allo scopo di ridurre le tensioni residue le parti possono essere sottoposte a trattamento di stress relieving. La terza opzione consiste in un trattamento termico T6 (indurimento per precipitazione).

Da quanto emerge dalla letteratura la resistenza a rottura dei provini as-built varia tra 320 e 473MPa, mentre l'allungamento a rottura varia tra l'1.4 e il 7.8%. Questa elevata dispersione dei valori può essere attribuita alla diversa composizione della polvere utilizzata, ai differenti parametri di processo e alla differente forma dei provini utilizzati durante i test di trazione. Tali valori sono superiori rispetto a quelli ottenuti per la stessa lega prodotta mediante processi di casting tradizionali. Dall'analisi dei dati presenti in letteratura emerge che nella condizione as-built il materiale possiede generalmente una resistenza a rottura superiore e un allungamento a rottura inferiore rispetto allo stesso sottoposto a trattamento termico, grazie alla microstruttura fine prodotta dal rapido processo di solidificazione.

Molti produttori raccomandano un trattamento di stress relieving prima della messa in esercizio del componente allo scopo di eliminare le tensioni residue.

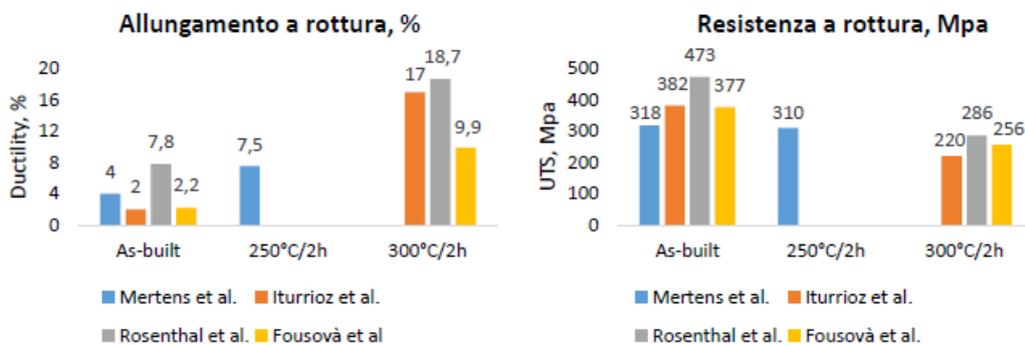


Fig. 6.3: variazione del carico di rottura e dell'allungamento a rottura a seguito di stress relieving

Mertens ha prodotto un trattamento di stress relieving a 250°C per 2h ottenendo una riduzione della resistenza a rottura del 2% ed un aumento dell'allungamento a rottura dell'80%. Tale comportamento è stato attribuito al rilascio delle tensioni residue in quanto gli autori non hanno riscontrato differenze microstrutturali significative tra il provino nella condizione as-built e in seguito a trattamento termico. Iturrioz e Rosenthal hanno invece studiato l'effetto di un trattamento termico a 300°C per 2h. È stato osservato che il materiale trattato mostra una resistenza a rottura di circa il 40% inferiore rispetto all'as-built, mentre l'allungamento a rottura aumenta significativamente raggiungendo valori prossimi al 20%. Risultati analoghi sono stati ottenuti da Fousovà che ha misurato una riduzione della resistenza a rottura da 377 a 256MPa ed un aumento dell'allungamento a rottura dal 2.2 al 9.9% in seguito ad un trattamento termico di stress relieving a 300°C per 2h. Oltre che al rilascio delle tensioni residue, la variazione delle proprietà meccaniche è stata in questi casi attribuita ad un cambiamento nella microstruttura. La persistenza ad alta temperatura determina la parziale rottura del network di Si e la precipitazione di particelle fini di silicio con conseguente riduzione dell'indurimento per soluzione solida e miglioramento

della duttilità. Per cui, il trattamento di stress relieving permette di incrementare notevolmente i valori di duttilità incidendo negativamente sul carico di rottura.

Il trattamento termico T6 porta invece alla formazione di una microstruttura completamente diversa rispetto a quella as-built. Un primo studio per lo sviluppo di un trattamento termico T6 per la lega AlSi10Mg prodotta mediante SLM è stato condotto da Aboulkhair considerando la sola variazione della durezza al variare delle condizioni di invecchiamento. Dallo studio è emerso che il valore più alto di durezza si raggiunge nella condizione as-built (110HV). In seguito al trattamento termico di solubilizzazione si osserva una significativa diminuzione della durezza a causa della precipitazione di particelle Si la cui taglia aumenta al crescere della temperatura. La durezza aumenta poi in seguito ad invecchiamento artificiale per la formazione di precipitati Mg_2Si . Nonostante ciò si ottengono valori di durezza del 12% inferiori rispetto all'as-built. Nel componente processato tramite SLM il rafforzamento può essere attribuito a tre meccanismi principali: affinamento del grano regolato dall'equazione di Hall-Patch, rafforzamento per soluzione solida dovuto alla presenza di elementi in lega e rafforzamento dovuto all'interazione tra le dislocazioni che ne impedisce il movimento reciproco. Dopo il trattamento T6 tutti questi contributi subiscono una riduzione. Durante la solubilizzazione si ha infatti un rilascio degli stress residui, associato ad una diminuzione della densità delle dislocazioni ed un ingrossamento della taglia dei grani che riduce il contributo del rafforzamento dovuto ai bordi grano. Inoltre, la formazione delle particelle di Si sferoidali riduce il rafforzamento per soluzione solida. In seguito all'invecchiamento le proprietà meccaniche aumentano per formazione di precipitati Mg_2Si .

Iturrioz ha osservato che un trattamento termico di solubilizzazione a 450°C per 2h determina una riduzione della resistenza a rottura da 382MPa (as-built) a 189MPa. Tuttavia, dopo solubilizzazione a 550°C per 2h, si misura un incremento della resistenza a rottura da 189MPa (a 450°C) a 248MPa.

L'invecchiamento condotto a 180°C per 12h provoca un ulteriore aumento delle proprietà meccaniche probabilmente in seguito alla precipitazione di ulteriore Mg_2Si . Mertens ha condotto un trattamento termico di solubilizzazione a 510°C per 6h seguito da un invecchiamento a 170°C per 4h. Rispetto all'as-built, la resistenza a rottura del campione trattato diminuisce del 13% mentre l'allungamento a rottura aumenta del 220%. Risultati simili si ottengono anche per Aboulkhair, infatti i campioni in lega di AlSi10Mg prodotti mediante SLM sono stati solubilizzati per 1h a 520°C e successivamente invecchiati artificialmente per 6h a 160°C. In seguito al trattamento di indurimento per precipitazione è stata misurata una riduzione della resistenza a rottura da 333MPa (as-built) a 292MPa e un aumento dell'allungamento a rottura dall'1.4 al 4%. Si può concludere che il trattamento termico T6 consente di ottenere delle proprietà meccaniche intermedie; secondo i risultati presenti in letteratura la resistenza a rottura aumenta rispetto all'as-built senza raggiungere i valori ottenibili con un trattamento di stress relieving.

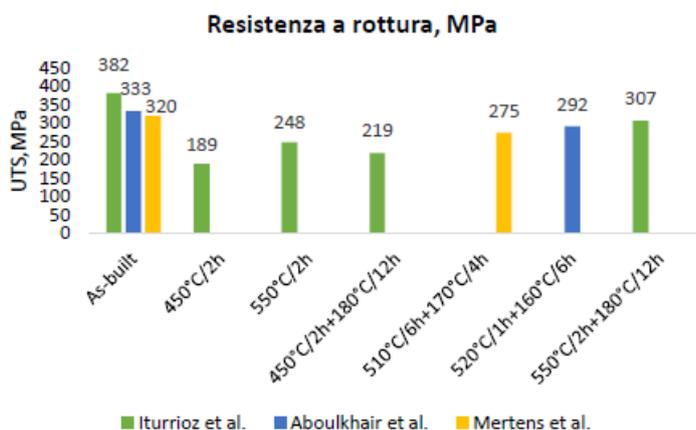


Fig. 6.4: variazione della resistenza a rottura in seguito al trattamento termico T6

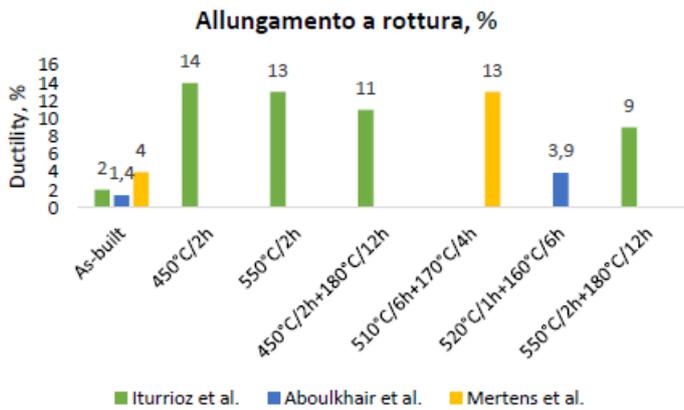


Fig. 6.5: variazione dell'allungamento a rottura in seguito a trattamento termico T6

6.3.3 Materiali e parametri per il processo SLM

EOS ha sostituito la fornitura di polveri con una nuova che presenta caratteristiche migliorate. Per questo motivo si differenziano due lotti tramite la denominazione "batch vecchio" e "batch nuovo". Ognuno di questi lotti di polvere possono, a loro volta, essere suddivisi in polveri "vergini" e "riciclate". Dove quelle "vergini" sono prelevate direttamente dalla confezione sigillata, mentre quelle "riciclate" sono quelle polveri che non arrivano a fusione e che vengono prelevate ed inserite nella camera di produzione nel successivo ciclo. Per cui l'analisi termogravimetrica è stata effettuata considerando quattro campioni di polveri così suddivisi:

1. Batch vecchio:
 - a) Polvere vergine;
 - b) Polvere riciclata.
2. Batch nuovo:
 - c) Polvere vergine;
 - d) Polvere riciclata.

Lo scopo principale è quello di determinare la sensibilità delle polveri all'umidità, che potrebbero causare la formazione di ossidi indesiderati e più in generale di valutare la presenza di eventuali contaminanti. Tramite l'utilizzo di un'atmosfera controllata (elio, azoto, in vuoto o altri gas), si misura la variazione in peso di un materiale in funzione dell'aumento della temperatura o in funzione del tempo e questo lo si fa tramite l'analisi TGA. Considerando una temperatura compresa tra i 25 e i 900°C si ricavano le curve termogravimetriche e in questo intervallo di temperatura si ha una velocità di riscaldamento di 20°C/min sia in aria (atmosfera ossidante) che in atmosfera d'azoto, con flusso di 50ml/min. Tramite questa analisi si può valutare la presenza di reazioni di decomposizione al variare della temperatura, misurare il contenuto di acqua o solventi residui nel materiale e permette di monitorare le reazioni che avvengono in presenza di aria, ossigeno o altri gas reattivi.

In figura 6.6 si considera un intervallo di temperatura tra 30 e 850°C, in ambiente ossidante, per osservare il comportamento delle polveri nuove e riciclate tramite le curve termogravimetriche dei due lotti di polvere AlSi10Mg. Si osserva come l'umidità non sia uno dei fattori che influenza queste polveri, infatti non sono presenti perdite di peso. Si ha una leggera differenza nel comportamento all'ossidazione tra i due lotti, infatti oltre i 550°C, il nuovo lotto di polveri presenta un aumento di peso, che è minore rispetto al batch vecchio, per cui è termicamente stabile; il batch vecchio presenta una maggiore tendenza all'ossidazione e ciò è collegato alla diversa distribuzione granulometrica.

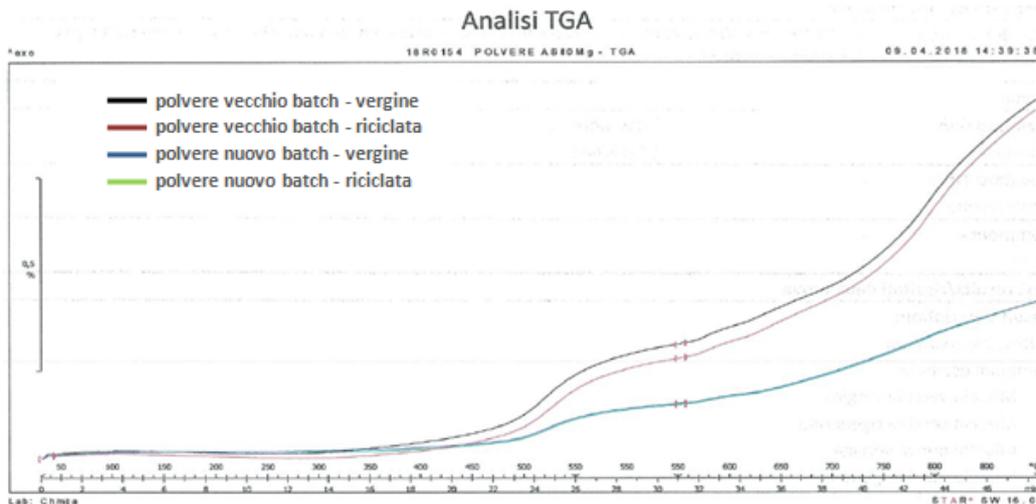


Fig. 6.6: grafico della TGA effettuata sui due lotti di polvere

Inoltre, la EOS sottolinea come la lega AISi10Mg offra una buona resistenza, un'elevata durezza e delle buone proprietà dinamiche ed è quindi utilizzata anche per le parti soggette a carichi elevati. Se vengono richieste una combinazione di buone proprietà termiche e basso peso e possono essere lavorate, saldate, micro-pallinate, lucidate e rivestite i componenti migliori sono in lega di alluminio come l'AISI10Mg.

Elemento	Percentuale in peso
Al	Balance
Si	9,7
Fe	0,2
Cu	< 0,01
Mn	< 0,01
Mg	0,38
Ni	0,01
Zn	< 0,01
Pb	< 0,05
Sn	< 0,05
Ti	0,01
Altri elementi	< 0,15

Tabella 6.15: composizione chimica delle polveri utilizzate

La macchina utilizzata per la tecnica SLM è la EOS M290; i provini vengono sottoposti alle prove meccaniche sia statiche che dinamiche. Vengono considerati diversi set di provini per la determinazione, sulle proprietà meccaniche, dello spessore dello strato di polvere e della rugosità superficiale:

- Job 1:
 - Provini cilindrici per le prove di trazione;
 - Spessore del layer: 30 μ m;
 - Direzione di crescita: asse Z;
 - Temperatura del letto di polvere: 165°C;
 - Trattamento termico: stress relieving a 300°C per 2h;
 - Numero di provini prodotti: 20.

- Job 2:
 - o Provini cilindrici per le prove di trazione;
 - o Spessore del layer: 60 μ m;
 - o Direzione di crescita: asse Z;
 - o Temperatura del letto di polvere: 165°C;
 - o Trattamento termico: stress relieving a 300°C per 2h;
 - o Numero di provini prodotti: 20.

Per ogni lavoro metà dei campioni vengono testati senza modificare la rugosità superficiale (campioni grezzi), mentre i restanti vengono sottoposti a tornitura per garantire una migliore finitura superficiale. Per le prove di fatica vengono realizzati altri tre lavori, tutti con le seguenti caratteristiche:

- Job per prove a fatica:
 - o Provini a clessidra;
 - o Spessore del layer: 30 μ m;
 - o Direzione di crescita: asse Z;
 - o Temperatura del letto di polvere: 165°C;
 - o Trattamento termico: stress relieving a 300°C per 2h;
 - o Numero di provini prodotti: 20.

Per le prove a fatica vengono prodotti 60 provini in totale, metà dei quali sottoposti a tornitura per migliorare la finitura superficiale, mentre i restanti vengono lasciati allo stato grezzo. Per i provini sottoposti alle prove di fatica lo spessore si mantiene costante perché si valuta solo l'effetto della rugosità superficiale.

Parametri	Valori impostati
Distanza	0,19 mm
Velocità	1300 mm/s
Potenza	370 W
Beam offset	0,02 mm
Scansionamento	Lungo asse X con rotazione di 67°
Larghezza riga	7 mm
Sovrapposizione riga	0,02 mm

Tabella 6.16: riepilogo dei parametri di processo usati

6.3.4 Valutazione della scorrevolezza e della densità di impacchettamento

Nell'idealità le particelle dovrebbero essere sferiche e di piccole dimensioni, però molte particelle presentano dei difetti morfologici che le discostano da quelle ideali; inoltre, con le particelle fini si ha una maggiore iterazione che limita la scorrevolezza.

Polvere testata	Risultato prova Hall	Risultato prova Carney
Polvere batch vecchio - mai usata	Fallito	Fallito
Polvere batch vecchio - riciclata	Fallito	Fallito
Polvere batch nuovo - mai usata	Fallito	10,73 s (dopo un picchiettamento)
Polvere batch vecchio - riciclata	Fallito	Fallito

Tabella 6.17: risultati della flowability

Le particelle appartenenti al lotto nuovo mostrano una migliore densità di impacchettamento rispetto a quelle del lotto vecchio. Questo è possibile perché la scorrevolezza è maggiore, così come confermato dal valore del rapporto di Hausner e del CI (Compressibility Index).

Tramite l'analisi morfologica, cioè della flowability e della tap density, si osserva che la qualità della polvere peggiora all'aumentare del numero di volte che viene riciclata e questo, ovviamente, gioca un ruolo fondamentale per la produzione di pezzi senza la presenza dei difetti.

Polvere testata	Densità apparente	Tap density	Rapporto di Hausner	CI (%)
Polvere batch vecchio - mai usata	0,2542 g/cm ³	0,3276 g/cm ³	1,29	22
Polvere batch vecchio – riciclata	0,2660 g/cm ³	0,3682 g/cm ³	1,38	28
Polvere batch nuovo - mai usata	0,3454 g/cm ³	0,4016 g/cm ³	1,16	14
Polvere batch vecchio – riciclata	0,3444 g/cm ³	0,4042 g/cm ³	1,17	15

Tabella 6.18: valori di tap density, rapporto di Hausner ed indice di comprimibilità delle polveri analizzate

6.3.5 Resistenza a trazione dei campioni AlSi10Mg

Vengono effettuate prove di trazione e successiva analisi delle superfici di frattura e prove di fatica i campioni di AlSi10Mg derivanti dal Job 1 e 2. Nelle figure successive si osservano le curve sforzo-deformazione reali dei provini as-built e torniti ottenute dal Job 1 e 2.

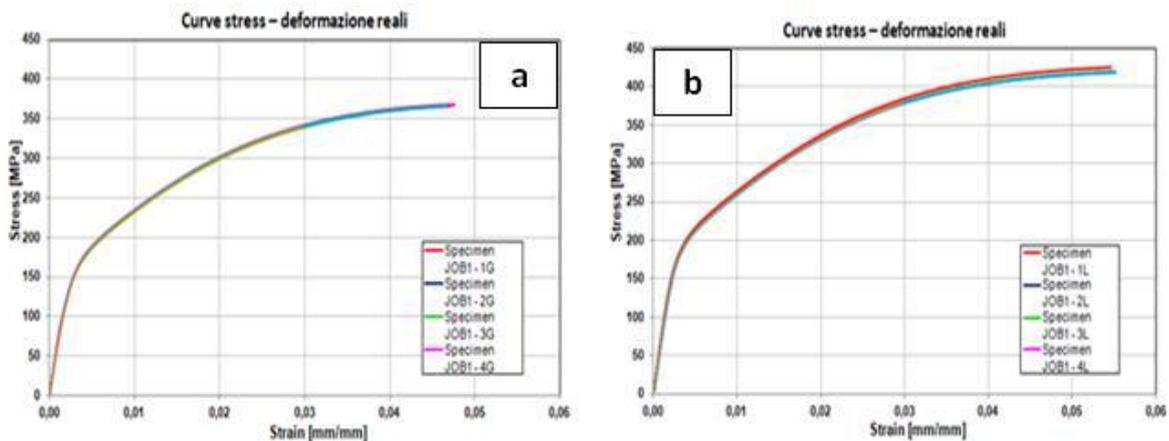


Fig. 6.7: curve sforzo-deformazione realizzate per i provini a) as-built e b) torniti del Job 1

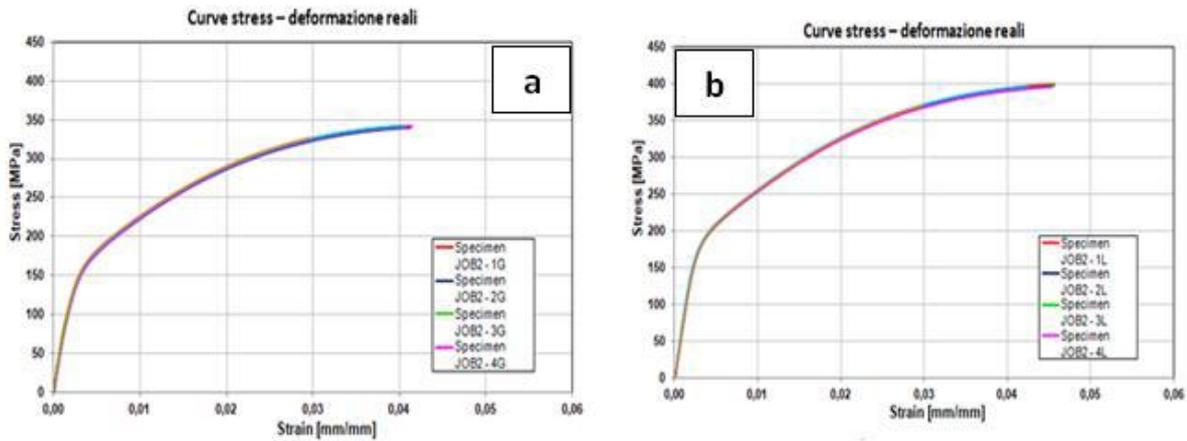


Fig. 6.8: curve sforzo-deformazione realizzate per i provini a) as-built e b) torniti del Job 2

Provino	R_m (MPa)		$R_{p0,2}$ (MPa)		A_r (%)		E (Gpa)	
	Media	Deviazione standard	Media	Deviazione standard	Media	Deviazione standard	Media	Deviazione standard
Job 1 - grezzo	349,6	1,016	184,1	1,74	4,4	0,09	65,5	1,89
Job 1 - tornito	397,7	2,59	210,1	1,77	5,64	0,58	72,9	1,77
Job 2 - grezzo	327,8	0,92	174,6	1,46	3,67	0,19	67,4	1,72
Job 2 - tornito	378,1	2,54	205,3	1,18	3,9	0,39	72,75	1,38

Tabella 6.19: valori medi e deviazione standard delle proprietà meccaniche

I provini prodotti tramite SLM hanno un comportamento a trazione migliore rispetto a quello mostrato dai componenti realizzati con tecniche tradizionali. I provini lisci del Job 1 presentano un carico a rottura maggiore rispetto a quanto riportato dalla scheda tecnica della EOS, mentre l'allungamento percentuale ed il carico di snervamento dei provini sia del Job 1 che del Job 2 risultano inferiori ai valori riportati nella scheda tecnica.

	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A_r (%)
Job 1 - grezzo	349,6	184,1	4,4
Job 1 - tornito	397,7	210,1	5,64
Job 2 - grezzo	327,8	174,6	3,67
Job 2 - tornito	378,1	205,3	3,9
Scheda tecnica EOS	350	230	11
AlSi10Mg colato in sabbia	220	180	1

Tabella 6.20: confronto delle proprietà meccaniche dei provini del Job 1 e del Job 2

Confrontando i risultati ottenuti si può concludere che i provini del Job 1 sia grezzi che torniti presentano un carico di rottura di quasi 20MPa più elevato rispetto ai corrispettivi del Job 2. Tramite ciò si può ipotizzare che uno strato di polvere di 60 μ m non sia ottimale per la resistenza a trazione del materiale. Il vantaggio di utilizzare uno spessore dello strato maggiore consiste nel dimezzare quasi la durata del processo produttivo; per utilizzare tale impostazione sarebbe necessario fare ulteriori prove in modo da ottimizzare gli altri parametri di processo.

Anche la rugosità superficiale gioca un ruolo fondamentale, che determina anche una differenza importante nel carico di rottura; i campioni grezzi, più rugosi, hanno valli sufficientemente profonde da

ridurre il diametro della sezione resistente effettiva riducendo lo sforzo massimo e probabilmente innescando la frattura proprio nella zona dei difetti superficiali.

Nel caso di un diametro inferiore rispetto a quello nominale, la resistenza a rottura e a snervamento risultano compatibili con quelle ottenute usando provini lavorati. Per verificare tale ipotesi è necessario determinare e comparare la rugosità dei campioni grezzi rispetto a quelli torniti e valutare la presenza di valli con profondità di almeno 0.15mm che potrebbero determinare la diminuzione dei valori di resistenza. Sia R_z (distanza massima tra il picco e la valle più profonda data una lunghezza di base L) che R_t (distanza tra due rette parallele alla linea tracciata ad una distanza pari alla media dei cinque picchi più alti e alla media delle cinque valli più profonde nell'intervallo di lunghezza di base L) rilevano una differenza tra creste e valli superiore a 0.15mm.

	Job 1 - grezzo	Job 1 - tornito	Job 2 - grezzo	Job 2 - tornito
R_a	27,16 μm	0.053 \div 0.047 μm	21,9 μm	0.048 \div 0.049 μm
R_z	173,48 μm	0.559 \div 0.404 μm	161,94 μm	0.424 \div 0.455 μm
R_t	224,13 μm	0.707 \div 0.539 μm	237,14 μm	0.548 \div 0.566 μm

Tabella 6.21: risultati della rugosità

Si ha il peggioramento delle caratteristiche a trazione per i campioni as-built in base all'effetto della finitura superficiale sulla resistenza a trazione dei provini realizzati in SLM. I provini torniti non risentono dell'effetto della finitura superficiale poiché il diametro nominale è analogo a quello. Per massimizzare i valori di resistenza meccanica bisogna effettuare delle lavorazioni di finitura superficiale dopo la produzione dei campioni.

In totale sono state analizzate undici immagini in ogni zona (cuore o bordo) dei diversi provini e per ogni zona è stata calcolata la media della percentuale di porosità e ciò è stato eseguito tramite l'utilizzo di un software.

Provino	Media % area porosa	Deviazione standard
Job 1 liscio - zona esterna	0,081	0,03
Job 1 liscio - zona interna	0,088	0,03
Job 1 grezzo - zona esterna	0,127	0,05
Job 1 grezzo - zona interna	0,118	0,04
Job 2 liscio - zona esterna	0,29	0,12
Job 2 liscio - zona interna	0,185	0,08
Job 2 grezzo - zona esterna	0,39	0,26
Job 2 grezzo - zona interna	0,21	0,07

Tabella 6.22: risultati sulla porosità

L'elemento più evidente è che i provini del Job 2 hanno una porosità circa doppia rispetto a quelli del Job 1. Questi pori sono più presenti nella zona periferica piuttosto che al centro del provino, mentre per i provini del Job 1 la differenza tra zona centrale e periferica non è così marcata.

È stata riscontrata una quantità di porosità aperte molto bassa per entrambe le tipologie di provini; in generale, la maggior parte dei difetti dovuti alle porosità si riscontrano sottoforma di pori chiusi.

	Job 1			Job 2		
	Provino 1	Provino 2	Provino 3	Provino 1	Provino 2	Provino 3
Porosità relativa %	0,12	0,04	0,17	0,07	0,07	0,05
Densità di bulk (g/cm³)	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66

Tabella 6.23: risultati per valutare la formazione di porosità aperte in relazione con lo spessore del layer

	Job 1 - liscio	Job 1 - grezzo	Job 2 - liscio	Job 2 - grezzo
Provino 1	113 HB	110 HB	112 HB	110 HB
Provino 2	105 HB	106 HB	112 HB	110 HB
Provino 3	107 HB	106 HB	111 HB	112 HB
Media	108 HB	107 HB	112 HB	111 HB

Tabella 6.24: risultati delle prove di durezza

I prodotti realizzati tramite pressocolata, ad esempio, hanno durezza comprese tra 70 e 100HB, per cui i valori di durezza dei due lavori sono paragonabili a quelli ottenuti con un processo tradizionale. In generale, questi valori sono in linea con quelli dichiarati nei dati tecnici della EOS relativi ai pezzi realizzati in AlSi10Mg.

6.3.6 Resistenza a fatica

Per la resistenza a fatica, si studia il comportamento di provini AlSi10Mg ottenuti mediante SLM sottoposti ad alto numero di cicli sotto sollecitazione assiale simmetrica, imponendo come limite di fatica 10^6 cicli. Si prende in considerazione uno spessore dello strato di polvere di $30\mu\text{m}$ (per motivi tecnici non è stato possibile terminare/effettuare le prove sui campioni con spessore dello strato di $60\mu\text{m}$, anche perché presentando delle caratteristiche meccaniche inferiori sarebbero meno importanti). Su questi campioni si valuta l'influenza della rugosità superficiale sul comportamento a fatica ed i risultati vengono confrontati solo in base al grado di finitura superficiale.

Tramite il metodo dello stair case si possono valutare i risultati della resistenza a fatica. Tramite i valori ottenuti si possono realizzare le curve di Wohler e determinare l'esistenza di un limite di fatica. Sono state prodotte tre curve corrispondenti ad un'affidabilità del 50% (R_{50}), un'affidabilità del 90% (R_{90}) e un'affidabilità e confidenza del 90% ($R_{90}C_{90}$) sia per i provini lisci che per quelli rugosi. I valori numerici di ampiezza dello sforzo nei cicli di fatica sono stati normalizzati con riferimento al valore massimo di ampiezza, che è posto pari a 100, per mantenere la riservatezza industriale.

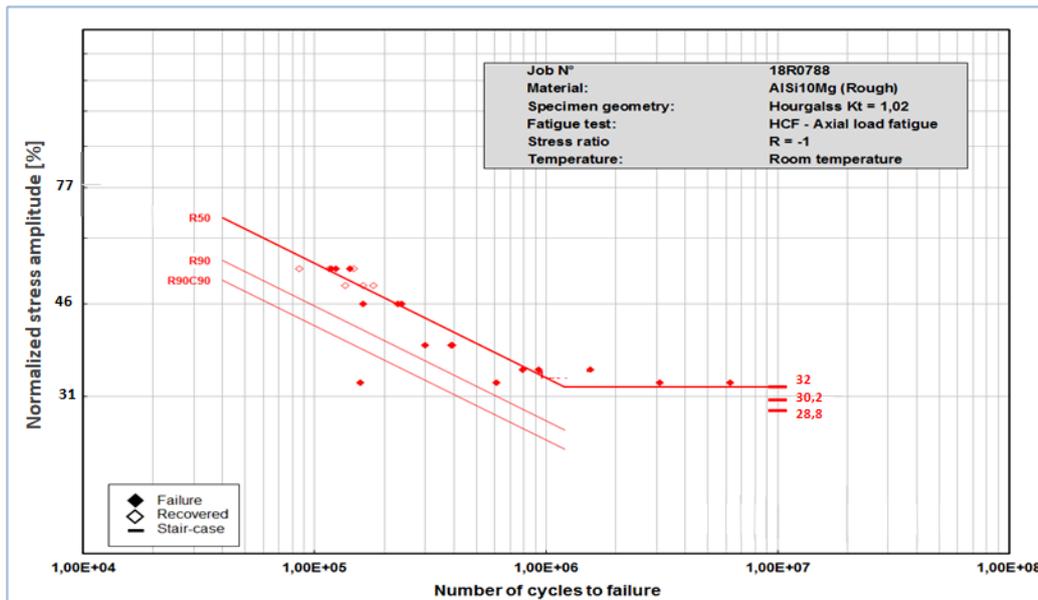


Fig. 6.10: curve di Wohler normalizzate per i provini grezzi

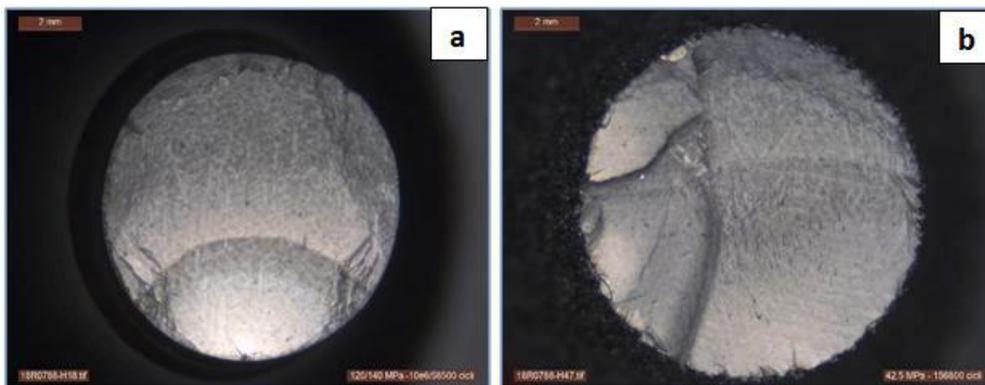


Fig. 6.11: superfici di frattura di a) un provino liscio e di b) un provino rugoso

6.4 Confronto delle proprietà tra Al7075 e AISi10Mg

Nella tabella 6.27 sono riportati i valori delle caratteristiche principali che contraddistinguono due provini: il primo in Al7075, realizzato tramite tecniche standard convenzionali; il secondo in AISi10Mg, realizzato con il metodo SLM relativo all'Additive Manufacturing. Si nota che la densità specifica è più bassa per l'AISi10Mg, così come la resistenza a trazione, la resistenza allo snervamento, l'allungamento a trazione e la durezza Brinell, invece il modulo a trazione è più o meno coincidente nei due casi. Per il coefficiente di espansione termica si osserva che è maggiore per l'Al7075, mentre la resistenza alla frattura è più elevata per l'AISi10Mg. Infine, per quanto riguarda il punto di fusione la temperatura minima è più alta per l'AISi10Mg, mentre quella massima è maggiore per l'Al7075, per cui il range di temperatura di fusione è più elevato per l'Al7075.

	Al 7075	AlSi10Mg	
Densità specifica	2.81	2.68	
Resistenza a trazione [psi]	83000	64107	
Resistenza allo snervamento a trazione [psi]	73000	38290	
Modulo di trazione [psi]	1.04E+07	1.03E+07	
Allungamento a trazione [%]	11	9	
Forza a fatica [psi]	23000		
Resistenza alla frattura [kpi-in ^{1/2}]	18.2		K(IC) in direzione S-L
Resistenza alla frattura [kpi-in ^{1/2}]	22.8		K(IC) in direzione T-L
Resistenza alla frattura [kpi-in ^{1/2}]	26.4		K(IC) in direzione L-T
Resistenza alla frattura [kpi-in ^{1/2}]		52.81	
Modulo di taglio [psi]	3.90E+06		
Resistenza al taglio [psi]	48000		
Durezza Brinell HB	150	119	
Coefficiente di espansione termica lineare a 68°F [10 ⁻⁶ /°F]	13.1		
Coefficiente di espansione termica lineare a 250°C [10 ⁻⁶ /°F]	14		
Coefficiente di espansione termica [10 ⁻⁶ /°F]		11.24-11.80	
Capacità termica specifica [BTU/lb°F]	0.229	0.22	
Conduttività termica [BTU-in/hr-ft ² -°F]	900	900-1315	
Punto di fusione [°F]	890-1175	1058-1094	
Temperatura di ricottura [°F]	775		
Temperatura della soluzione [°F]	807-900		
Temperatura di invecchiamento [°F]	250		
Saldatura per fascio di elettroni	Buono		
Saldatura sotto gas con elettrodo (TIG o MIG)	Poco adatto		
Saldatura per resistenza	Buono		
Saldatura per brasatura	Poco adatto		
Saldatura per imbottitura profonda	Buono		
Saldabilità		Media	
Tornitura con asporto di truciolo	Buono		
Tornitura per lucidatura della superficie	Buono		
Resistenza alla corrosione	Ottimo	Buona	
Anodizzazione di protezione	Buono	Sufficiente	
Anodizzazione brillante	Accettabile		
Anodizzazione decorativa		Cattiva	
Anodizzazione dura	Ottimo		
Resistenza meccanica a caldo		Media	
Lavorabilità all'utensile		Buona	
Colabilità		Buona	
Lucidabilità		Media	
Resistenza alla cricatura di ritiro		Piccola	
Tenuta a pressione		Scarsa	

Tabella 6.27: correlazione tra le proprietà dell'Al7075 e dell'AlSi10Mg

6.5 Dimensionamento del cassone alare

Di seguito vengono riportate le proprietà fisiche, meccaniche e termiche per un provino realizzato attraverso una metodologia tradizionale in AlSi10Mg; in particolare per quanto concerne la colata sottopressione:

- Peso specifico: 2.68 kg/dm³;

- Carico unitario di rottura: 240MPa;
- Carico limite di snervamento: 140MPa
- Allungamento percentuale: 1%
- Durezza Brinell: 70
- Intervallo di fusione: 550-600°C;
- Ritiro lineare in pressocolata: 0.4-0.6;
- Modulo elastico: 72.6GPa;
- Conduttività termica a 20°C: 130-150W/(m K);
- Dilatazione termica da 20 a 100°C (10^{-6}): 21 K⁻¹;
- Dilatazione termica da 100 a 200°C (10^{-6}): 22 K⁻¹;
- Temperatura massima di fusione: 750°C;
- Intervallo ottimo di colata sottopressione: 630-700°C.

Inoltre, vengono riportate anche le proprietà fisiche, meccaniche e termiche per un provino realizzato attraverso una metodologia tradizionale in Al7075:

- Peso specifico: 2.81kg/dm³;
- Tensione di rottura a trazione: 572MPa;
- Tensione di rottura al taglio: 331MPa;
- Tensione di snervamento a trazione: 503MPa;
- Tensione di snervamento a compressione: 292MPa;
- Allungamento percentuale: 11%;
- Resistenza alla fatica: 160MPa;
- Durezza Brinell: 150;
- Intervallo di fusione: 480-640°C;
- Modulo elastico a trazione: 71.7GPa;
- Modulo elastico a compressione: 73.1GPa;
- Modulo elastico di taglio: 26.9GPa;
- Conduttività termica: 130W/(m K);
- Coefficiente di dilatazione termica (10^{-6}): 23.5 K⁻¹;

Le stesse proprietà vengono riportate anche per un provino, sempre in AlSi10Mg, ma realizzato attraverso additive manufacturing:

- Peso specifico: 2.68kg/dm³;
- Tensione di rottura a trazione: 334MPa;
- Tensione di snervamento a trazione: 211MPa;
- Tensione di snervamento a compressione: 169MPa;
- Allungamento percentuale: 9%;
- Durezza Vickers: 103;
- Intervallo di fusione: 570-590°C;
- Modulo elastico a trazione: 71GPa;
- Modulo elastico a compressione: 61GPa, $\beta = \frac{E}{3} * (1 - 2\nu)$, con $\nu=0.31$;
- Modulo elastico di taglio: 26.5GPa, $G = \frac{E}{2} * (1 + \nu)$, con $\nu=0.31$;
- Conduttività termica: 130-190W/(m K);
- Coefficiente di espansione termica (10^{-6}): 20-21K⁻¹;
- Rugosità superficiale: 5-9 μ m.

Adesso si effettua il dimensionamento del cassone alare di un aereo turboelica da trasporto regionale ad ala alta con una capacità di riferimento di 90 passeggeri.

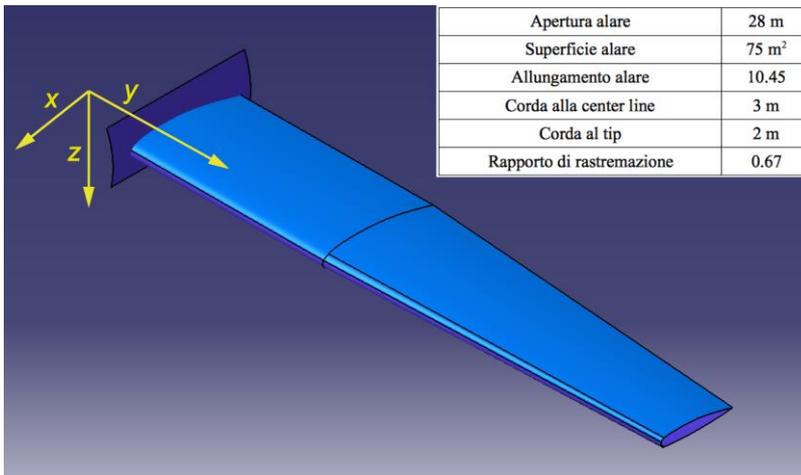


Fig. 6.12: dimensionamento del cassone alare per un aereo regionale

Le dimensioni di ingombro esterno dell'ala forniscono in maniera indiretta quelle relative agli ingombri esterni del cassone, la cui trasversale in un qualsivoglia punto lungo l'asse Y è rappresentata dalla scatola formata dai pannelli di rivestimento curvi e dai longheroni anteriore e posteriore di altezze differenti. Si intende analizzare la soluzione costruttiva che prevede una struttura internamente realizzata in materiale metallico, in particolare si farà riferimento alle leghe di alluminio essendo i materiali di uso più diffuso e composizioni di lega differenti saranno utilizzate in relazione alla prestazione richiesta dall'elemento (resistenza a compressione, a trazione o a taglio, modulo elastico). Per la costruzione di quasi tutti gli elementi del cassone si sceglie di utilizzare la lega di alluminio e zinco ad alta resistenza Al7075-T6. Fanno eccezione il rivestimento del pannello ventrale, per il quale si utilizza la lega di alluminio e rame ad alta tenacità Al2024-T3 per gli elementi di collegamento, rivetti o Hi-Lok.

Di seguito vengo riportate le proprietà meccaniche riguardanti la lega di alluminio 7075:

- Peso specifico: 2.81kg/dm³;
- Tensione di rottura a trazione: 538MPa;
- Tensione di rottura a taglio: 324MPa;
- Tensione di snervamento a trazione: 483MPa;
- Tensione di snervamento a compressione: 475MPa;
- Tensione di snervamento a taglio: 276MPa;
- Modulo elastico a trazione: 71.0GPa;
- Modulo elastico a compressione: 72.4GPa;
- Modulo elastico di taglio: 26.9GPa;
- Allungamento percentuale: 11%.

Dall'insieme dei dati relativi ai carichi applicati su aerei simili a quello considerato, è possibile, utilizzando gli strumenti della teoria tecnica delle travi, studiare il comportamento meccanico dell'ala allo stesso modo di una trave di sezione variabile sottoposta ad opportuni vincoli in corrispondenza dell'attacco alla fusoliera.

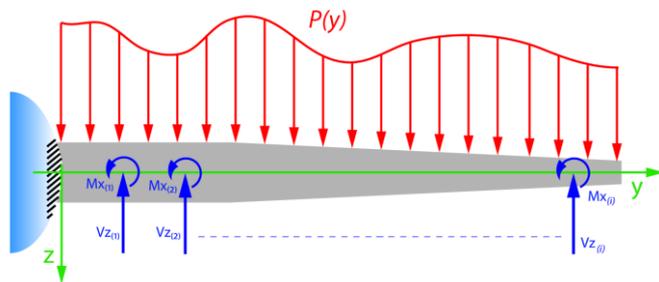


Fig. 6.13: semial/trave incastrata all'attacco con la fusoliera

Dall'applicazione di questo schema sono stati precedentemente ottenuti i carichi equilibrati in particolare relativi alla fase di crociera, quelli dovuti a manovre e alle raffiche e le caratteristiche della sollecitazione, quella dovuta al momento flettente intorno all'asse X, al momento torcente intorno all'asse Y e al taglio in condizioni statiche e affaticanti agenti sull'ala, di seguito rappresentate in forma adimensionale:

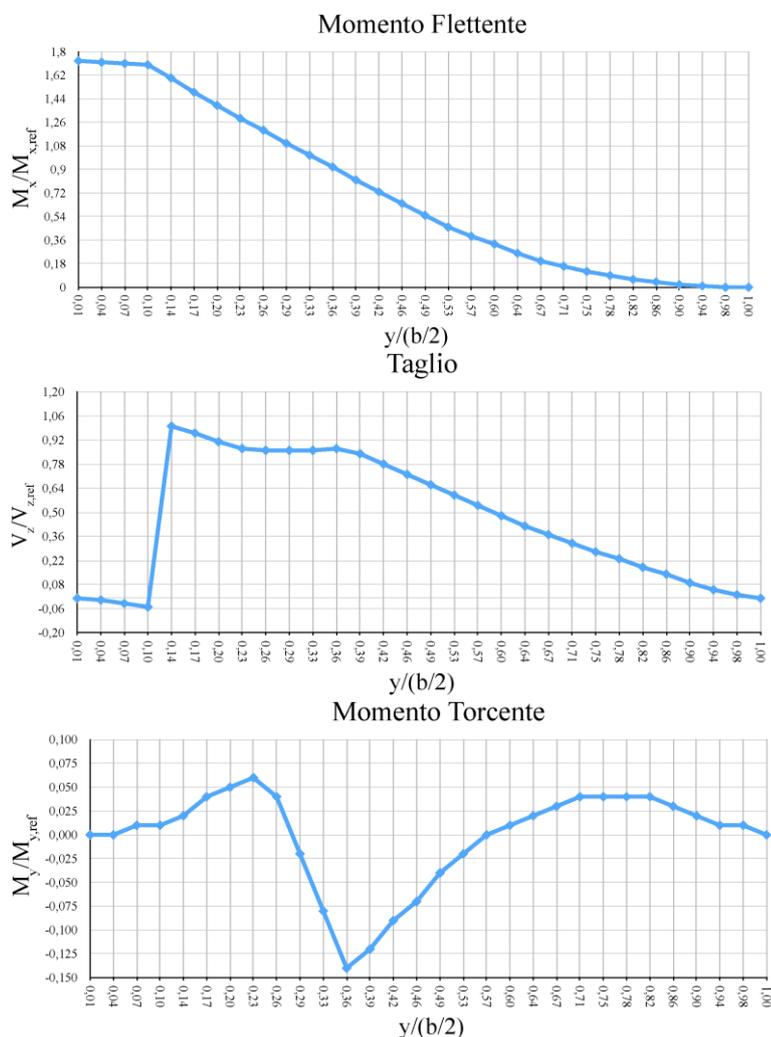


Fig. 6.14: andamento del momento flettente, del taglio e del momento torcente

L'obiettivo principale del progetto dell'ala è quello di conseguire una struttura di minimo peso compatibilmente con i requisiti di resistenza e di costi contenuti. Si hanno due requisiti di resistenza statici:

1. Nessuna parte della struttura può essere soggetta ad un carico limite (Limit Load) superiore a quello di snervamento del materiale. Il carico limite è inteso come il carico massimo che è possibile incontrare durante la vita operativa.
2. La struttura dovrà sopportare anche il carico ultimo (Ultimate Load), pari al carico limite moltiplicato per un fattore di sicurezza (Factor of Safety), per tre secondi senza rompersi:

$$UL = FS * LL$$

Quando non è specificato il fattore di sicurezza è pari a 1.5.

Analizzando lo stesso cassone alare, ma realizzato in Additive Manufacturing con la lega di alluminio AlSi10Mg, si esegue il ridimensionamento del provino e si ottengono le seguenti caratteristiche:

- Peso specifico: 2.68kg/dm³;
- Tensione di rottura a trazione: 346.6MPa;
- Tensione di snervamento a trazione: 190.4MPa;
- Tensione di snervamento a compressione: 150MPa;
- Modulo elastico a trazione: 69.5GPa;
- Modulo elastico a compressione: 60.8GPa;
- Modulo elastico di taglio: 26.1GPa;
- Allungamento percentuale: 18%.

Tramite questa analisi è stato possibile confrontare, in prima approssimazione, le caratteristiche meccaniche non soltanto per un provino in Al7075 rispetto ad un altro in AlSi10Mg, ma si è riusciti a comprendere le differenze e le similitudini relative alla realizzazione di un cassone alare tramite questi due materiali e quindi tramite metodologie standard o tecniche Additive Manufacturing.

CONCLUSIONI

Lo scopo di questo lavoro di tesi è stato quello di fornire delle informazioni a riguardo di quelli che sono i materiali più utilizzati in ambito Additive Manufacturing, cercando di effettuare una rapida disamina per quei materiali, sia metallici che polimerici, che vengono più utilizzati per la stampa 3D.

Il cuore di questo lavoro, però, riguarda l'iter certificativo per l'ottenimento di una parte realizzata in AM; in particolare è stato considerato l'unico processo certificativo codificato, riguardante l'ULTEM 9085, in cui si è valutato il tipo di macchina da utilizzare, le caratteristiche della polvere e infine tutte quelle che sono le prove meccaniche per la convalida di questo materiale specifico. Una volta eseguita questa analisi si è cercato di estenderla anche ad altri materiali, i quali, invece, non sono certificati NCAMP, per capire le caratteristiche peculiari che li contraddistinguono. I materiali considerati in ambito additive sono stati l'ULTEM 2400, come materiale polimerico e l'AlSi10Mg, come materiale metallico e quest'ultimo è stato confrontato anche con un materiale che viene ottenuto tramite metodologie standard come l'Al7075. Tutti questi materiali hanno in comune il grande utilizzo nell'ambito aerospaziale.

Un altro confronto da tenere in considerazione riguarda l'ULTEM 9085 e l'AlSi10Mg; in questo caso si stanno mettendo in relazione due materiali completamente diversi e anche difficilmente paragonabili, ma risulta interessante per capire le proprietà del materiale metallico rispetto a quello polimerico certificato. Da questo confronto si riscontra che la resistenza a trazione, la resistenza a snervamento a trazione, il modulo a trazione e l'allungamento a trazione assumono valori molto più elevati per l'AlSi10Mg, però si ha anche un valore decisamente più elevato per quel che riguarda la densità specifica. Anche il coefficiente di espansione termica è maggiore per l'AlSi10Mg rispetto all'ULTEM 9085. Ovviamente anche le temperature di esercizio sono molto più elevate per l'AlSi10Mg essendo un materiale metallico. Da questa analisi si evince che le proprietà, in generale, sono migliori per il materiale metallico rispetto a quello polimerico, ma il grande vantaggio dell'ULTEM 9085 è la grandissima leggerezza.

L'obiettivo, anche per il futuro, è quello di creare un processo certificativo che sia il più generale possibile, in modo che sia valido per diverse tipologie di materiali e per il numero più alto possibile di parti, anche differenti, che si vogliono realizzare. Inoltre, un altro aspetto importante riguarda la riproducibilità, che prende in considerazione due aspetti principali: da una parte si devono realizzare tanti pezzi in poco tempo e dall'altra tutti i pezzi devono essere uguali, cioè il primo o il millesimo prodotto devono possedere le stesse caratteristiche. Tutto questo permette di rendere la produzione additiva più simile a quella che è la produzione tradizionale, infatti avere una standardizzazione a disposizione permette di evitare le prove pratiche standard perché di queste si hanno già molti dati a disposizione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *A Review on Laser Powder Bed Fusion of Inconel 625 Nickel-based alloy*. (2019). Retrieved from <https://www.repository.cam.ac.uk/bitstream/handle/1810/300245/applsci-10%2000081.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [2] *Acciai Inossidabili*. (n.d.). Retrieved from <http://www.studiovergnani.it/images/termodinamica/ACCIAI%20INOSSIDABILI.pdf>
- [3] AITA: Associazione Italiana Tecnologie Additive. (n.d.). *EOS M290*. Retrieved from <https://www.aita3d.it/eos-sistema-eosint-m290/>
- [4] ALENIA PROCESS STANDARD. (2008). *Trattamenti termici delle leghe di alluminio*. Retrieved from <https://docplayer.it/107736664-Indice-6-requisiti-di-uqalificazione-e-riqualificazione-del-processo-tavola-ii-concentrazione-delle-soluzioni-di-glicole-polialchilenico.html>
- [5] AM-Motion. (2016). *Standardisation report: gaps and procedures*. Retrieved from https://www.rm-platform.com/images/DOCUMENTS/D3.4_AM_standardisation_report.pdf
- [6] Asaro, A. (2020). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/13689/1/tesi.pdf>
- [7] Biscaro, E. (2017). Retrieved from http://tesi.cab.unipd.it/57364/1/Biscaro_Enrico_1130053.compressed.pdf
- [8] Brookes, K. (2018). *Europe salutes metal-based AM*. Retrieved from <https://pdf.sciencedirectassets.com/271940/1-s2.0-S0026065718X00034/1-s2.0-S0026065718300304/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEGwaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIDIARc5bt5MZl3YOkY4zAmGiShZ3ckil88GulNWuvqaBAiEAYybQOFdw1SE6J7fLIF3fTn%2B4oGu7gk7deXs8ZiQrUz>
- [9] Cavinato, E. (2014). Retrieved from http://tesi.cab.unipd.it/45830/1/Tesi_di_Laurea_Cavinato_Eleonora.pdf
- [10] Chua, C. K., Wong, C. H., & Yeong, W. Y. (2017). *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing*. Elsevier Science & Technology.
- [11] Collins, S. (2017). *Quality and Additive Manufacturing...What You Need to Know and Learn*. Retrieved from <https://asq.org/asd/2017/04/quality-and-additive-manufacturing-what-you-need-to-know-and-learn.pdf>
- [12] Condonato, E. (2019). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/12139/1/tesi.pdf>
- [13] Di Marzio, M. (2020). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/15496/1/tesi.pdf>
- [14] DocPlayer. (n.d.). *Stampaggio ad iniezione*. Retrieved from <https://docplayer.it/2188894-Informazioni-tabelle-per-lo-stampaggio-ad-iniezione-dei-materiali-termoplastici.html>
- [15] EUROLAMEC. (2020). *Fused Deposition Modeling*. Retrieved from <https://blog.eurolamec.it/index.php/2020/07/13/semplce-ed-efficace-fused-deposition-modeling-fdm/>
- [16] Forster, A. (2015). *Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials*. Retrieved from <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2015/NIST.IR.8059.pdf>

- [17] Freddo, V. (2014). Retrieved from http://tesi.cab.unipd.it/45704/1/TESI_Freddo_Valentina.pdf
- [18] Frosi, P. (2009). Retrieved from https://art.torvergata.it/retrieve/handle/2108/1079/5690/tesi_dottorato_FROSI.pdf
- [19] Gartmp. (n.d.). *Formule e tabelle per lo stampaggio ad iniezione*. Retrieved from <http://www.gartmp.it/documenti/FORMULARIO%20per%20lo%20stampaggio%20della%20plastica.pdf>
- [20] GE Plastics. (n.d.). *ULTEM® PEI Resin Product Guide*. Retrieved from <https://www.emcoplastics.com/assets/pdf/ultem/ULTEM%20Product%20Brochure%20GE.pdf>
- [21] ISONORM. (2018). *Aggiornamento sulle attività di normazione relative alle*. Retrieved from https://www.aita3d.it/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/10/DTI-2018-10-29-Normativa-AM-rev-1.pdf
- [22] Lazzaretti, E. (2016). Retrieved from http://tesi.cab.unipd.it/51456/1/Tesi_di_Laurea_-_Lazzaretti_Emanuele.pdf
- [23] Leone, V. (2018). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/8655/1/tesi.pdf>
- [24] *Linee guida pratiche per la lavorazione di acciai inossidabili austenitici ad elevate prestazioni*. (n.d.). Retrieved from https://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Austenitics_Italian.pdf
- [25] Lucenti, A. (2019). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/12222/1/tesi.pdf>
- [26] Lunt, M., & Mangham, R. (2018). *Guidance Note on the Qualification and Certification of Additive Manufactured Parts for Military Aviation*. Retrieved from https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/920523/MASAAG_Paper_124.pdf
- [27] M290, E. (n.d.). *The Additive Manufacturing System for the Production of Serial Components, Spare Parts and Functional Prototypes Directly in Metal*. Retrieved from <https://fathommf.com/wp-content/uploads/2020/11/EOSINT-M-290-Brochure.pdf>
- [28] Mariani, E. (2018). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/9587/1/tesi.pdf>
- [29] Marinelli, C. (2018). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/8708/1/tesi.pdf>
- [30] Marinucci, F. (2018). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/9126/1/tesi.pdf>
- [31] *Materiali innovativi nella stampa 3D*. (2005). Retrieved from INNOVA FVG: http://www.innovafvg.it/fileadmin/user_innovafvg/progetti/stampa_3D.pdf
- [32] Maxwell Communication. (n.d.). *Certificazione ISO 9001*. Retrieved from <http://www.maxwellcommunication.it/che-cos-e-la-certificazione-iso-9001/che-cos-e-la-certificazione-iso-9001.html>
- [33] Memko. (n.d.). *Additive Manufacturing and certification of Aircraft Interior components*. Retrieved from <http://www.icas.org/media/pdf/Workshops/2019/ICAC%202019%20Additive%20Manufacturing%20Doug%20McPherson.pdf>
- [34] Montecchio, F. (2018). Retrieved from http://tesi.cab.unipd.it/61039/1/Montecchio_Filippo_1150711.pdf

- [35] NCAMP. (2017). *NCAMP Standard Operating Procedures*. Retrieved from https://www.niar.wichita.edu/coe/ncamp_documents/ncampsop/NSP%20100%20NCAMP%20Standard%20Operating%20Procedure%20March%2027%202017%20%20Rev%20G.pdf
- [36] NCAMP. (2019). *ULTEM 9085 Processing and Qualification*. Retrieved from <https://www.wichita.edu/research/NIAR/Documents/NPS-89085-Rev-C-Process-Spec-April-12-2019-.pdf>
- [37] NCAMP. (2019). *ULTEM 9085 Specification*. Retrieved from <https://www.wichita.edu/research/NIAR/Documents/NMS-085-Slash-1-Rev-Slash-Material-Spec-April-12-2019.pdf>
- [38] NCAMP. (2020). *ULTEM 9085 Qualification data report*. Retrieved from <https://www.wichita.edu/research/NIAR/Documents/CAM-RP-2018-013-NC-Stratasys-Certified-ULTEM-9085-MPDR-Rev-A-12-02-20.pdf>
- [39] NeoNickel. (n.d.). *Ti 6Al-4V (Grado 5)*. Retrieved from <https://www.neonickel.com/generate-alloy-pdf/?id=12113>
- [40] Oerlikon AM. (n.d.). Retrieved from <https://www.oerlikon.com/am/en/offerings/series-production/industrial-additive-manufacturing/>
- [41] Pantarelli, A. (2019). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/10398/1/tesi.pdf>
- [42] Paraddise. (n.d.). ISO/TC 261.
- [43] Passanisi, V. (2015). Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/79618991.pdf>
- [44] Politi, L. (2018). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/12247/1/tesi.pdf>
- [45] *Print online services*. (n.d.). Retrieved from Weerg: <https://www.weerg.com/en/cnc-3d-print-online-services-quote>
- [46] Prospector. (n.d.). *ULTEM™ Resin 2400 - Americas Datasheet*. Retrieved from <https://plastics.ulprospector.com/datasheet/e4200/ultem-resin-2400-americas>
- [47] Protolabs. (2019). *Alluminio AlSi10Mg: specifiche di prodotto*. Retrieved from <https://www.protolabs.it/media/1019400/it-alluminio-data-sheet.pdf>
- [48] Protolabs. (n.d.). *Prototipazione rapida mediante stereolitografia*. Retrieved from <https://www.protolabs.it/risorse/suggerimenti-di-progettazione/la-prototipazione-rapida-mediante-stereolitografia/>
- [49] RAFFMETAL. (n.d.). Leghe di alluminio in colata continua. 40.
- [50] Renishaw. (n.d.). *AlSi10Mg-0403 (200 W) powder for additive manufacturing*. Retrieved from <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-alsi10mg-0403-200-w-powder-for-additive-manufacturing--73121>
- [51] Renishaw. (n.d.). *In625-0402 powder for additive manufacturing*. Retrieved from <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-in625-0402-powder-for-additive-manufacturing--97039>
- [52] Renishaw. (n.d.). *In718-0405 powder for additive manufacturing*. Retrieved from <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-in718-0405-powder-for-additive-manufacturing--94192>

- [53] Renishaw. (n.d.). *SS 316L-0407 powder for additive manufacturing*. Retrieved from <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-ss-316l-0407-powder-for-additive-manufacturing--90802>
- [54] Renishaw. (n.d.). *Ti6Al4V ELI-0406 powder for additive manufacturing*. Retrieved from <https://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-ti6al4v-eli-0406-powder-for-additive-manufacturing--94700>
- [55] Ripamonti, V. (2016). Retrieved from <https://amslaurea.unibo.it/11663/1/tesi.pdf>
- [56] Singamneni, S., Hewitt, A., Chalk, R., & Jordison, D. (2015). Retrieved from Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering: <https://www.longdom.org/open-access/additive-manufacturing-for-the-aircraft-industry-a-review.pdf>
- [57] Stratasys. (n.d.). Retrieved from Overmarch: macchine utensili: <https://www.overmach.it/Prodotti/Prototipazione/274/Fortus-900mc/>
- [58] Stratasys. (n.d.). Certified Additive Manufacturing for Aircraft Interiors.
- [59] Stratasys. (n.d.). *ULTEM™ 9085 resin*. Retrieved from <https://www.stratasys.com/it/materials/search/ultem9085>
- [60] Tebaldo, V. (2015). Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/76527831.pdf>
- [61] TEC-Eurolab. (2018). *Regolamento per la certificazione del personale AM*. Retrieved from <https://www.tec-eurolab.com/public/file/RG12RegolamentocertificazionepersonaleAdditiveManufacturing-6738-6792.pdf>
- [62] TEC-Eurolab. (n.d.). *INCONEL 718: CONFRONTO SU VALORI DI RESISTENZA A FATICA PER PROVINI IN ADDITIVE MANUFACTURING*. Retrieved from <https://www.tec-eurolab.com/eu-it/inconel-718-confronto-su-valori-di-resistenza-a-fatica-per-provini-in-additive-manufacturing.aspx>
- [63] Temponi: trattamenti termici. (n.d.). *Leghe di alluminio per pressofusione: difetti e trattamento termico*. Retrieved from <https://trattamentimetalli.com/leghe-di-alluminio-per-pessofusione-difetti-e-trattamento-termico/>
- [64] Tremamunno, S. (2018). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/7658/1/tesi.pdf>
- [65] Università di Roma. (n.d.). *Capitolato Speciale per la Fornitura, Consegna, Installazione e Messa in Servizio di una Macchina per l'Additive Manufacturing con Polveri Metalliche*. Retrieved from https://web.uniroma1.it/gareappalti/sites/default/files/Capitolato_speciale.pdf
- [66] Vassallo, A. (2018). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/9427/1/tesi.pdf>
- [67] Veronesi, P. (n.d.). *Materiali metallici e trattamenti termici per l'AM*. Retrieved from <http://docplayer.it/108305895-Materiali-metallici-e-trattamenti-termici-per-l-am.html>
- [68] Virgillito, E. (2018). Retrieved from <https://webthesis.biblio.polito.it/8619/1/tesi.pdf>

APPENDICE I

FORTUS380 e 450

La fabbricazione additiva e Fortus 450mc sono un binomio perfetto per la piccola produzione da grande azienda. L'ampia camera di lavoro di questo sistema di prototipazione rapida (406x355x406mm) e i quattro diversi spessori disponibili (0.12, 0.17, 0.25 e 0.33mm), permettono di ottenere il giusto equilibrio tra resistenza, livello di dettaglio e tempi di costruzione FDM più rapidi. Produrre parti complesse con requisiti elevati significa essere in grado di includere in modo semplice hardware, circuiti ed altri materiali non termoplastici nei componenti prodotti, con interruzioni minime per le operazioni di riconfigurazione. La fabbricazione additiva avanzata si unisce alle ultime innovazioni nella tecnologia FDM consentendo di ampliare il processo produttivo grazie alla velocità, all'agilità e alla libertà di progettazione. Si ha un numero ridotto di interruzioni del sistema di produzione in quanto il sistema di stampa è realizzato con molte delle tecniche termoplastiche standard ad elevate prestazioni utilizzate nei processi di produzione tradizionali. Non si ha nessun requisito speciale, infatti i sistemi di stampa Fortus possono essere installati ovunque, in quanto non producono fumi nocivi, sostanze chimiche o residui con la maggior parte dei materiali.

Material Options	LAYER THICKNESS				SUPPORT STRUCTURE	AVAILABLE COLORS
	0.330 mm (0.013 in.)	0.254 mm (0.010 in.)	0.178 mm (0.007 in.)	0.127 mm (0.005 in.)		
ABS-ESD7™		X	X		Soluble	■ Black
ABS-M30™	X	X		X	Soluble	□ Ivory □ White ■ Black ■ Red ■ Blue ■ Dark Gray
ABS-M30i™	X	X	X	X	Soluble	□ Ivory
Antero™ 800NA (450mc only)		X			Breakaway	■ Natural
ASA	X	X	X	X	Soluble	■ Black ■ Dark Blue ■ Dark Gray ■ Green ■ Light Gray ■ Yellow □ White ■ Orange □ Ivory ■ Red
FDM Nylon 12™	X	X	X		Soluble	■ Black
FDM Nylon 12CF™ (450mc only)		X			Soluble	■ Black
PC	X	X	X	X	Breakaway, Soluble	□ White
PC-ABS	X	X	X	X	Soluble	■ Black
PC-ISO™	X	X	X		Breakaway	■ Translucent Natural □ White
ULTEM® 9085 resin (450mc only)	X	X			Breakaway	■ Tan ■ Black
ULTEM 1010 resin (450mc only)	X	X			Breakaway	■ Natural
ST-130 (450mc only)		Only available in 0.330 mm (0.013 in.)			Breakaway	■ Tan

Tabella 1: materiali utilizzati nella macchina Fortus 380 e 450

OTHER SPECIFICATIONS	
System Size and Weight	129.5 cm x 90.2 cm x 198.4 cm (51 x 35.5 x 78.1 in.) 601 kg (1325 lbs.)
Achievable Accuracy	Parts are produced within an accuracy of $\pm .127$ mm ($\pm .005$ in.) or $\pm .0015$ mm/mm ($\pm .0015$ in/in), whichever is greater). Z part accuracy includes an additional tolerance of $-0.000/+$ slice height. Note: Accuracy is geometry dependent. Achievable accuracy specification derived from statistical data at 95% dimensional yield.
Network Communication	10/100 base T connection. Ethernet protocol.
Operator Attendance	Limited attendance for job start and stop required.
Power Requirements	208VAC 3 phase, 50/60 Hz, consumes 18 Amps
Regulatory Compliance	CE
Software	All Fortus systems include Insight™ and Control Center™ job processing and management software. Compatible with GrabCAD Print for use with job reports, scheduling and remote monitoring.
Operating System	Microsoft Windows 8.1 and Windows 8 (Pro, Enterprise), Microsoft Windows 7 (Pro, Enterprise, Ultimate), Microsoft Windows Vista (Business, Enterprise, Ultimate), Microsoft Windows Server 2008, Microsoft Windows Server 2003

Tabella 2: alcune specifiche riguardanti la Fortus 380 e 450



Fig. 1: macchina Fortus 380 e 450

EOSINT M400

EOSINT M400 è la macchina di grandi dimensioni per applicazioni di fusione diretta di polveri di metallo caratterizzata da:

- Laser in fibra da 1000W ed ottiche di precisione per dimensione del fascio lungo tutto il piano di lavoro inferiore ad 0.1mm e garantisce alta risoluzione nella riproduzione dei dettagli;
- Camera di lavoro da 400x400x400mm;
- Lavorazioni in modalità duale sia in argon sia in azoto;
- Diversi materiali a disposizione: acciaio marangico (1.2709); superleghe base cromo (Co-Cr ASTM75), superleghe base nichel (IN718,1N625,HX), titanio (Ti6Al4V grado 5), alluminio (AlSi10Mg) e spessori di costruzione anche variabili;
- Accessori per pulizia rapida della camera di costruzione;

- Opzione per palettizzare il processo ed ottimizzare diverse camere di lavorazione con una sola stazione finale di finitura;
- Parametri di processo sia ottimizzati da EOS per massime prestazioni della tecnologia sia aperti per consentire all'utente sviluppi specifici;
- Sofisticato sistema di eliminazione dei condensati grazie all'utilizzazione di una attrezzatura di filtrazione a doppio stadio e turbina di depressione, ugelli specifici di creazione flusso laminare ad alta velocità (5m\sec);
- Ampia gamma di sensori per il monitoraggio dei parametri di processo ed elaborazione di rapporti di qualità;
- Architettura software per gestire dati anche di grandi dimensioni.

	EOS M 400	EOS M 400-4
Building Volume	400 x 400 x 400* mm (15.8 x 15.8 x 15.8 in*)	400 x 400 x 400* mm (15.8 x 15.8 x 15.8 in*)
Laser type	Yb fiber laser, 1000 W	Yb fiber laser, 4 x 400 W
F-theta lens	1	4
High-speed scanners	1	4
Scanning speed	up to 7.0 m/s (23 ft/s)	up to 7.0 m/s (23 ft/s)
Focus diameter	approx. 90 µm (0.0035 in)	approx. 100 µm (0.004 in)
Power supply	50 A	3 x 50 A
Power consumption	max. 50.2 kW / typical 16.22 kW	max. 45 kW / typical 22 kW
Inert gas supply	7,000 hPa; 15 m ³ /h (102 psi; 706 ft ³ /h)	7,000 hPa; 15 m ³ /h (102 psi; 706 ft ³ /h)

Tabella 3: dati tecnici della macchina EOSINT M400



Fig. 2: macchina EOSINT M400

TruPrint 1000

È la macchina compatta per la stampa 3D con la quale è possibile lavorare polveri metalliche, realizzando con semplicità e rapidità, considerando anche progetti CAD molto complessi. La TruPrint 1000 è la macchina più produttiva nel formato piccolo e offre tutti i vantaggi dell'Additive Manufacturing. Dispone di un campo di costruzione di 100mm di diametro e 100mm di altezza. Con la macchina TruPrint 1000 si possono produrre componenti di qualsiasi forma geometrica. Anche le forme più complesse possono essere trasformate in un componente metallico, in modo semplice e veloce mantenendo un livello eccellente di qualità. La TruPrint 1000 può essere utilizzata per la produzione di pezzi di piccole dimensioni, ma con alta produttività, grazie all'adozione del multilaser.

La TruPrint 1000 si contraddistingue per la rapidità d'installazione, l'economicità nell'uso e l'intuitività del touchscreen. L'opzione multilaser permette di lavorare in modo parzialmente simultaneo con apporto di polvere ed esposizione al laser e serve per ottenere la massima produttività. Due laser a fibra TRUMPF da 200W illuminano contemporaneamente qualsiasi zona dello spazio d'ingombro, permettendo così di ottenere fino all'80% di pezzi in più nello stesso tempo. In questo modo i pezzi saranno disponibili più rapidamente e con massima flessibilità. Una fotocamera integrata nella camera di costruzione TruPrint e l'elaborazione automatica delle immagini permettono il monitoraggio automatico del letto di polvere. In questo modo si ha sempre una panoramica dello stato dei componenti e si possono analizzare i parametri di qualità strato su strato. Il software della macchina fornisce un supporto completamente automatico tra il termine del primo job di costruzione e l'avvio di quello successivo. Il primo job di costruzione pronto viene raccolto nel contenitore di recupero.

La TruPrint 1000 coordina in modo parzialmente simultaneo l'apporto di polvere e l'esposizione al laser. Grazie al coater (macchina che applica un rivestimento a qualcosa) ribaltabile, il processo di apporto di polvere viene accelerato, mentre i tempi improduttivi sono ridotti al minimo, fattore che consente delle velocità di processo più elevate. Lo strumento di apporto con profilo ad X provvede ad un apporto ottimale della polvere, rendendo il processo affidabile e stabile. La TruPrint 1000 permette la lavorazione industriale di metalli amorfi; questi metalli hanno un'altissima resistenza e allo stesso tempo un'elevata elasticità, nonché resistenza alla corrosione e biocompatibilità. Grazie a queste proprietà è possibile ridurre gli spessori delle pareti o lavorarle con strutture bioniche nel design del componente. Il risultato è un minor peso del componente e tempi di produzione accorciati.

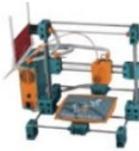
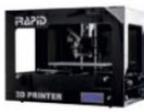
INGOMBRO (CILINDRO)	Diametro 97 mm x 100 mm Altezza
MATERIALI LAVORABILI	Metalli in polvere saldabili, quali ad es.: rame, leghe in rame o metalli preziosi. Disponibilità attuale di materiale fisico e parametri su richiesta.
POTENZA LASER MASSIMA SUL PEZZO IN LAVORAZIONE (LASER A FIBRA TRUMPF)	500 W
DIAMETRO DEL RAGGIO (STANDARD)	200 µm
FREQUENZA DI DEPOSIZIONE	Fino a 25 cm ³ /h ¹
TENORE DI OSSIGENO MINIMO MISURABILE	Fino a 100 ppm (0,01%)
ALLACCIAMENTO E CONSUMO	
ATTACCO ELETTRICO (TENSIONE)	TruPrint 1000: 230 V TruDisk 1020: 400 V
ATTACCO ELETTRICO (INTENSITÀ DI CORRENTE)	TruPrint 1000: 7 A TruDisk 1020: 32 A
ATTACCO ELETTRICO (FREQUENZA)	TruPrint 1000: 50/60 Hz TruDisk 1020: 50/60 Hz
GAS INERTE	Azoto, argon
TIPO DI COSTRUZIONE	
DIMENSIONI (L X A X P)	TruPrint 1000: 1445 mm x 1680 mm x 730 mm TruDisk 1020: 1340 mm x 1430 mm x 728 mm
PESO (INCL. POLVERE)	TruPrint 1000: 650 kg TruDisk 1020: 515 kg

Tabella 4: caratteristiche tecniche di TruPrint 1000



Fig. 3: macchina TruPrint 1000

Altre tipologie di macchine 3D

Stampanti 3D						
	 CHIP Test winner			 CHIP Prezzo/ Prestazioni		
	MAKERBOT REPLICATOR 2	ULTIMAKING ULTIMAKER	SINTERMASK FABBSTER G	PEARL EX1-PLUS	IRAPID	VELLEMAN K8200
Posizione	1	2	3	4	5	6
Prezzo montata/Kit di montaggio	2.350/- euro	2.000/1.400 euro	1.700/- euro	800/- euro	1.000/- euro	-/700 euro
Punteggio complessivo	92,6	87,2	82,4	79,4	73,7	68,2
Qualità di stampa (50%)	100	86	89	87	80	87
Ergonomia (20%)	100	90	88	65	63	19
Dotazione (10%)	64	86	100	95	62	65
Documentazione (10%)	100	81	67	56	48	57
Costi di stampa (10%)	61	97	35	78	100	85
DATI & MISURAZIONI						
Dev. della misura del dado di 2 cm	0,9 mm	1,7 mm	0,5 mm	0,5 mm	0,5 mm	0,5 mm
Dev. dal calcolo del pezzo degli scacchi	126 s	7 s	16 s	402 s	385 s	385 s
Durata del riscaldamento	147 s	132 s	222 s	214 s	148 s	629 s
Durata stampa del dado da 2 cm	29 min	23 min	39 min	33 min	38 min	41 min
Assorbimento per il dado da 2 cm	32 Wh	31 Wh	123 Wh	93 Wh	31 Wh	59 Wh
Usb/Scheda Sd	■/■	■/■	■/■	■/■	■/□	■/□
Piano di stampa riscaldato	□	□	■	■	□	■
Materiale Abs/Pla ²	□/■	□/■	■/■	■/■	□/■	■/■
Volume max di stampa (L x A x P)	285 x 155 x 153 mm	210 x 205 x 210 mm	230 x 210 x 230 mm	225 x 145 x 150 mm	250 x 120 x 150 mm	200 x 200 x 200 mm
Spessore minimo degli strati	0,1 mm	0,1 mm	0,05 mm	0,15 mm	0,05 mm	0,2 mm
Software: numero preset/ formati supportati	3/3	3/4	5/10	1/1	12/1	1/1
Prezzo del filamento al kg (ca.)	68 euro	32 euro	75 euro	30 euro	30 euro	30 euro
Dimensioni, comprese parti sporgenti (L x A x P)	490 x 525 x 405 mm	350 x 580 x 580 mm	650 x 535 x 530 mm	510 x 430 x 465 mm	560 x 420 x 460 mm	675 x 630 x 435 mm
Peso con alimentatore	12,7 kg	8,1 kg	13,7 kg	12,5 kg	12,1 kg	9,4 kg

¹ACRILONITRILE BUTADIENE STIRENE ²ACIDO POLLATTICO (POLILATTATO)

■ SI □ NO

Tabella 5: tipologie di stampanti 3D

APPENDICE II

ANTERO 800NA (PEEK)

Antero 800NA è considerato uno dei termoplastici più performanti tra tutti i materiali FDM disponibili in ambito Additive Manufacturing. Il materiale gode di una significativa resistenza chimica, resiste a idrocarburi, acidi e miscele aggressive. Resiste all'usura in maniera eccezionale, sopporta pressioni estreme e impatti di singolare potenza. Ha inoltre un'elevata resistenza alle alte temperature.

	ULTEM™ 1010	ULTEM 9085	Antero 800NA
Mechanical - XZ			
Tensile Strength	9.3 KSI	10.0 KSI	13.5 KSI
Tensile Modulus	402 KSI	312. KSI	449 KSI
Elongation (Break)	3.3%	5.8%	6.4%
Mechanical - ZX			
Tensile Strength	5.9 KSI	6.1 KSI	6.6 KSI
Tensile Modulus	322 KSI	329 KSI	505 KSI
Elongation (Break)	2%	2.2%	1.2%
Thermal			
HDT (266 psi)	213 °C	153 °C	150 °C / 302 °F
Melting Point	N/A	N/A	310 °C / 590 °F
Glass Transition	215 °C	186 °C	149 °C / 300 °F
Outgassing			
Total Mass Loss (TML)	0.07%	0.41%	0.27%
Collected Volatile Condensable Materials (CVCM)	0.01%	0.01%	0.01%
Water Vapor Recovered (WVR)	0.06%	0.37%	0.15%

Tabella 1: confronto tra ULTEM 1010, ULTEM 9085 e Antero 800NA

	See Price book for all prices	A La Carte	Standard	Engineering	High Performance
Variety of color options	ABS-M30™	✓			
Bio-Compatible	ABS-M30i™	✓			
Static-dissipative	ABS-ESD7™	✓			
Best aesthetics for FDM	ASA	✓			
High tensile and flexural strength	PC	✓			
Bio-compatible, heat resistant	PC-ISO	✓			
Fatigue resistant/tough	FDM Nylon 12™	✓			
High stiffness and toughness	FDM Nylon 12CF™	✓			
High heat resistance/tough	ULTEM 9085	✓			
Highest heat resistance/strong	ULTEM 1010	✓			
Highest chemical resistance, low outgassing, high heat resistance	Antero 800NA	✓			

Tabella 2: caratteristiche principali dei materiali polimerici

Property	Test Method	Typical Values	
		XY	XZ/ZX
HDT @ 66 psi	ASTM D648 Method B	150 °C (302 °F)	
HDT @ 264 psi	ASTM D648 Method B	147 °C (297 °F)	
Tg	ASTM D7426 Inflection Point	149 °C (300 °F)	
Melt Point	ASTM D7426 Peak Heat	300 °C (572 °F)	
Mean CTE	ASTM E831 (40 °C to 140 °C)	35 µm/[m*°C] (20 µin./[in.*°F])	50 µm/[m*°C] (28 µin./[in.*°F])
Volume Resistivity	ASTM D257	> 5.5*10 ¹⁴ Ω*cm	
Dielectric Constant	ASTM D150 1 kHz test condition	3.3	
Dissipation Factor	ASTM D150 1 kHz test condition	0.003	
Specific Gravity	ASTM D257 @23 °C	1.28	

Tabella 3: proprietà fisiche per Antero 800NA

		XZ Orientation ⁽¹⁾	ZX Orientation ⁽¹⁾
Tensile Properties: ASTM D638			
Yield Strength	MPa	90 (3)	No yield
	psi	13,150 (430)	No yield
Elongation @ Yield	%	4.3 (0.3)	No yield
Strength @ Break	MPa	70 (7)	55 (5)
	psi	10,510 (1050)	8,260 (720)
Elongation @ Break	%	6 (1)	1.9 (0.3)
Modulus (Elastic)	GPa	2.9 (0.1)	2.9 (0.1)
	ksi	420 (15)	415 (25)
Flexural Properties: ASTM D790, Procedure A			
Strength @ Break	MPa	No break	90 (13)
	psi	No break	12,640 (1840)
Strength @ 5% Strain	MPa	140 (4)	-
	psi	20,325 (590)	-
Strain @ Break	%	No break	3.3 (0.5)
Modulus	GPa	3.1 (0.1)	2.7 (0.1)
	ksi	445 (10)	395 (13)
Compression Properties: ASTM D695			
Yield Strength	MPa	97 (3)	93 (3)
	psi	14,130 (445)	13,560 (415)
Modulus	GPa	2.35 (0.05)	2.18 (0.06)
	ksi	340 (8)	340 (10)
Impact Properties: ASTM D256, ASTM D4812			
Notched	J/m	45 (4)	30 (8)
	ft*lb/in.	0.8 (0.1)	0.6 (0.2)
Unnotched	J/m	1,550 (460)	150 (40)
	ft*lb/in.	30 (9)	2.9 (0.7)

(1) Values in parentheses are standard deviations.

Tabella 4: proprietà meccaniche Antero 800NA considerando la Fortus 900

		XZ Orientation ⁽¹⁾	ZX Orientation ⁽¹⁾
Tensile Properties: ASTM D638			
Yield Strength	MPa	93 (1)	No yield
	psi	13,500 (80)	No yield
Elongation @ Yield	%	4.3 (0.6)	No yield
Strength @ Break	MPa	70 (8)	45 (5)
	psi	10,470 (1200)	6,650 (765)
Elongation @ Break	%	6 (1)	1.2 (0.3)
Modulus (Elastic)	GPa	3.1 (0.3)	3.5 (0.7)
	ksi	450 (40)	505 (110)
Flexural Properties: ASTM D790, Procedure A			
Strength @ Break	MPa	No break	65 (10)
	psi	No break	9,350 (1515)
Strength @ 5% Strain	MPa	140 (3)	-
	psi	20,550 (480)	-
Strain @ Break	%	No break	2.4 (0.4)
Modulus	GPa	3.1 (0.1)	2.7 (0.1)
	ksi	450 (10)	390 (10)
Compression Properties: ASTM D695			
Yield Strength	MPa	100 (2)	101 (3)
	psi	14,570 (320)	14,600 (440)
Modulus	GPa	2.45 (0.01)	2.30 (0.08)
	ksi	360 (2)	340 (10)
Impact Properties: ASTM D256, ASTM D4812			
Notched	J/m	35 (5)	30 (5)
	ft*lb/in.	0.7 (0.1)	0.5 (0.1)
Unnotched	J/m	1,820 (1250)	75 (30)
	ft*lb/in.	35 (25)	1.5 (0.5)

(1) Values in parentheses are standard deviations.

Tabella 5: proprietà meccaniche Antero 800NA considerando la Fortus 450

Change in Tensile Properties – 168 hour Chemical Exposure (ASTM D543)					
	Reagent	Non-Annealed XZ	Non-Annealed ZX	Annealed XZ	Annealed ZX
Tensile Strength	Dichloromethane	-88%	-81%	-15%	1%
	Ethyl Acetate	-20%	-4%	-19%	-7%
	Jet A	-14%	-3%	11%	-1%
	Methyl Ethyl Ketone	-17%	-7%	-16%	-7%
	Skydrol	-5%	16%	19%	-9%
	Toluene	-17%	-11%	-14%	-9%
	30% Nitric Acid	-8%	6%	-7%	7%
	30% Sulfuric Acid	2%	0%	-4%	1%
	60% NaOH	200%	-5%	7%	1%
	Concentrated Ammonia	2%	-4%	2%	4%
% Elongation @ Break	Dichloromethane	1135%	2264%	-11%	0%
	Ethyl Acetate	9%	-1%	3%	-5%
	Jet A	25%	-1%	45%	2%
	Methyl Ethyl Ketone	21%	-2%	16%	-2%
	Skydrol	24%	26%	48%	-7%
	Toluene	8%	-7%	12%	-7%
	30% Nitric Acid	-10%	8%	-12%	7%
	30% Sulfuric Acid	4%	-3%	-4%	4%
	60% NaOH	9%	-10%	8%	3%
	Concentrated Ammonia	10%	-9%	12%	11%
Tensile Modulus	Dichloromethane	-92%	-93%	-1%	-1%
	Ethyl Acetate	-3%	-4%	-3%	-1%
	Jet A	-3%	-3%	-4%	-3%
	Methyl Ethyl Ketone	-2%	-6%	-4%	-4%
	Skydrol	-3%	-4%	-1%	-4%
	Toluene	-1%	-4%	-3%	-3%
	30% Nitric Acid	0%	-6%	-2%	2%
	30% Sulfuric Acid	2%	0%	2%	-2%
	60% NaOH	-1%	7%	3%	0%
	Concentrated Ammonia	-1%	10%	0%	-8%

Tabella 6: risultati per la resistenza chimica per Antero 800NA

	Avg Time to Extinguish (seconds)	Avg Burned Length (inches)	Drip Time to Extinguish (seconds)				
12 Second Vertical Ignition per 14 CFR 25.853(a), Appendix F, Part I, Paragraph (a)(1)(ii)							
Antero 800NA - Horizontal - XZ	<1	1.23	0 (no drips)				
Antero 800NA - Vertical - ZX	<1	1.11	0 (no drips)				
60 Second Vertical Ignition per 14 CFR 25.853(a), Appendix F, Part I, Paragraph (a)(1)(i)							
Antero 800NA - Horizontal - XZ	1.1	2.45	0 (no drips)				
Antero 800NA - Vertical - ZX	1.1	2.86	0 (no drips)				
	Avg Time to Extinguish (seconds)	Avg Burned Length (inches)	Burn Rate (inches/minute)				
15 Second Horizontal Ignition per 14 CFR 25.853(a), Appendix F, Part I, Paragraph (a)(1)(iv)(v)							
Antero 800NA - Horizontal - XZ	0	0	0				
Antero 800NA - Vertical - ZX	0	0	0				
	Test Mode	Average Ds (maximum) within 4 minutes, ("Dmax)					
Smoke Density per BSS 7238, Rev. C							
Antero 800NA - Horizontal - XZ	Flaming	2					
Antero 800NA - Vertical - ZX	Flaming	2					
Smoke Density per AITM 2.0007B, Issue 3							
Antero 800NA - Horizontal - XZ	Flaming	1					
Antero 800NA - Vertical - ZX	Flaming	2					
Antero 800NA - Horizontal - XZ	Non-flaming	0					
Antero 800NA - Vertical - ZX	Non-flaming	0					
	Test Mode	CO ppm	SO2 ppm	NOx ppm	HCN ppm	HCl ppm	HF ppm
Toxic Gas Emission per BSS 7239, Rev. A							
Antero 800NA - Horizontal - XZ		0	1.3	0.5	1	0.2	64
Antero 800NA - Vertical - ZX		0	1.4	0.5	0	0.2	86
Toxic Gas Emission per AITM 3.0005, Issue 2							
Antero 800NA - Horizontal - XZ	Flaming	60	0	0.9	0.4	0	0
Antero 800NA - Vertical - ZX	Non-flaming	1	0	0	0	0	0
Antero 800NA - Horizontal - XZ	Flaming	50	0	1.3	0	0	0
Antero 800NA - Vertical - ZX	Non-flaming	1	0	0	0	0	0
	Peak HRR (kW/m2)	Time to Peak Heat Release (seconds)	2 Minute Total HRR (kW-min/m2)				
Heat Release Rate of Cabin Materials per 14 CFR 25.853(d), Appendix F, Part IV							
Antero 800NA - Horizontal - XZ	48.4	150	15.5				
Antero 800NA - Vertical - ZX	49.4	92	38.6				

Tabella 7: tossicità, fumi e fiamma per Antero 800NA

Sample	TML (%)	CVCM (%)	WVR (%)
Antero 800NA, T20D tip	0.347	0.004	0.267

Tabella 8: outgassing per Antero 800NA

Digital ABS

Il materiale Digital ABS è una resina fotopolimerica studiata per simulare la plastica standard ABS che coniuga resistenza alle alte temperature con la robustezza. Ideale per prototipi funzionali, pezzi da assemblare a incastro per l'utilizzo in ambienti ad alte o basse temperature, parti elettriche, custodie per telefoni cellulari e carter per motori.

MECHANICAL PROPERTIES ¹	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ Axis	ZX Axis	XZ Axis	ZX Axis
		Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,550 psi	3,750 psi
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,650 psi	4,050 psi	32 MPa	28 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	320,000 psi	310,000 psi	2,230 MPa	2,180 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	7%	2%	7%	2%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	1%	2%	1%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,700 psi	7,000 psi	60 MPa	48 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	300,000 psi	250,000 psi	2,060 MPa	1,760 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4%	3.5%	4%	3.5%

MECHANICAL PROPERTIES	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
		XZ Axis	XZ Axis
		IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	5.6 ft-lb/in	300 J/m

Tabella 9: proprietà meccaniche per l'ABS

THERMAL PROPERTIES ²	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	204°F	96°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	180°F	82°C
Vicat Softening Temperature (Rate B/50)	ASTM D1525	210°F	99°C
Glass Transition (Tg)	DMA (SSYS)	226°F	108°C
Coefficient of Thermal Expansion (flow)	ASTM E831	4.90x10 ⁻⁶ in/in/°F	8.82x10 ⁻⁶ mm/mm/°C
Coefficient of Thermal Expansion (xflow)	ASTM E831	4.70x10 ⁻⁶ in/in/°F	8.46x10 ⁻⁶ mm/mm/°C
Melting Point	-----	Not Applicable ²	Not Applicable ²

Tabella 10: proprietà termiche per l'ABS

ELECTRICAL PROPERTIES ³	TEST METHOD	ORIENTATION	VALUE RANGE
Volume Resistivity	ASTM D257	XZ Axis	4.0x10 ¹⁵ - 3.3x10 ¹⁶ ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	XZ Axis	2.6 - 2.86
Dissipation Factor	ASTM D150-98	XZ Axis	0.0048 - 0.0054
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	XY Axis	100 V/mil
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	XZ Axis	360 V/mil

Tabella 11: proprietà elettriche per l'ABS

SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT STRUCTURE	AVAILABLE COLORS
Fortus 380mc™	0.013 inch (0.330 mm)	Soluble Supports	<input type="checkbox"/> Ivory <input type="checkbox"/> White
Fortus 450mc™	0.010 inch (0.254 mm)		<input checked="" type="checkbox"/> Black <input checked="" type="checkbox"/> Dark Grey
Fortus 900mc™	0.007 inch (0.178 mm)		<input checked="" type="checkbox"/> Red <input checked="" type="checkbox"/> Blue
Stratasys F123™ Series	0.005 inch (0.127 mm) ⁴		

Tabella 12: disponibilità del sistema, spessore dei layer, struttura di supporto e colori disponibili per l'ABS

Nylon 12

Nylon 12, materiale FDM che si caratterizza per l'elevata resistenza all'impatto e alla rottura. Si tratta di un termoplastico adatto alla realizzazione di prototipi funzionali, attrezzature di produzione e parti finite. Il Nylon 12 resiste agli agenti chimici e possiede il più alto indice di rottura e allungamento rispetto agli altri

materiali della gamma FDM. Le sue caratteristiche lo rendono ideale nella produzione di parti soggette a forti vibrazioni e stress ripetitivi, come inserti a frizione e chiusure a pressione. Il Nylon 12 utilizza un supporto solubile, che viene facilmente rimosso immergendo la parte in una soluzione alcalina. Questo fattore consente di sfruttare in modo ottimale le potenzialità offerte dalle Tecnologie Additive, in quanto permette di sviluppare design e geometrie complesse senza alcun vincolo progettuale.

Property	Test Method	Typical Values	
		XY	XZ/ZX
HDT @ 66 psi	ASTM D648 Method B	95 °C (203 °F)	90 °C (194 °F)
HDT @ 264 psi	ASTM D648 Method B	85 °C (185 °F)	75 °C (167 °F)
Tg	ASTM D7426 Inflection Point	35 °C (95 °F)	
Mean CTE	ASTM E831 (-50 °C to 10 °C)	85 µm/[m*°C] (47 µin/[in*°F])	
Mean CTE	ASTM E831 (10 °C to 50 °C)	95 µm/[m*°C] (52 µin/[in*°F])	
Mean CTE	ASTM E831 (50 °C to 70 °C)	100 µm/[m*°C] (55 µin/[in*°F])	
Mean CTE	ASTM E831 (70 °C to 95 °C)	-	80 µm/[m*°C] (33 µin/[in*°F])
Volume Resistivity	ASTM D257	> 6.9*10 ¹³ Ω*cm	
Dielectric Constant	ASTM D150 1 kHz test condition	3.11	2.78
Dielectric Constant	ASTM D150 2 MHz test condition	2.5	
Dissipation Factor	ASTM D150 1 kHz test condition	0.066	0.009
Dissipation Factor	ASTM D150 2 MHz test condition	0.014	0.008
Specific Gravity	ASTM D257 @23 °C	1.01	

Tabella 13: proprietà fisiche per il Nylon 12

		XZ Orientation ¹	ZX Orientation ¹
Tensile Properties: ASTM D638			
Yield Strength	MPa	50 (1)	42 (1)
	psi	7140 (70)	6060 (100)
Elongation @ Yield	%	6.12 (0.07)	5.8 (0.2)
Strength @ Break	MPa	30 (2)	41 (1)
	psi	4840 (245)	5890 (100)
Elongation @ Break	%	30 (20)	6.5 (0.4)
Modulus (Elastic)	GPa	1.50 (0.09)	1.2 (0.1)
	ksi	220 (10)	180 (20)
Flexural Properties: ASTM D790, Procedure A			
Strength @ Break	MPa	No break	No break
	psi	No break	No break
Strength @ 5% Strain	MPa	55 (5)	55 (5)
	psi	8185 (720)	7900 (685)
Strain @ Break	%	No break	No break
Modulus	GPa	1.3 (0.1)	1.2 (0.1)
	ksi	180 (20)	175 (15)
Compression Properties: ASTM D695			
Yield Strength	MPa	325 (30)	555 (50)
	psi	47400 (4730)	80730 (6950)
Modulus	GPa	1.48 (0.07)	1.65 (0.09)
	ksi	215 (10)	240 (13)
Impact Properties: ASTM D256, ASTM D4812			
Notched	J/m	140 (20)	70 (15)
	ft*lb/in.	2.6 (0.4)	1.3 (0.3)
Unnotched	J/m	1800 (240)	320 (130)
	ft*lb/in.	34 (5)	6 (2)

¹ Values in parenthesis are standard deviations.

Tabella 14: proprietà meccaniche per il Nylon 12

SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT MATERIAL	COLOR
Fortus 360mc Fortus 380mc Fortus 400mc Fortus 450mc Fortus 900mc	0.013 inch (0.330 mm) 0.010 inch (0.254 mm) 0.007 inch (0.178 mm)	SR-110	■ Black

Tabella 15: disponibilità del sistema, spessore dei layer, struttura di supporto e colori disponibili per l'ABS

Material	Elongation at break	Tensile Strength	HDT
FDM Nylon 12	30%+	7000 psi	82°C
PC-ABS	6%	5900 psi	110°C
PC	4.8%	9800 psi	138°C

Tabella 16: confronto tra il Nylon 12, l'ABS e il PC

TPU 92A

L'elastomero TPU 92A è progettato per soddisfare le esigenze dei produttori che richiedono elevata resistenza all'allungamento, robustezza superiore e libertà di progettazione.

Grazie al supporto solubile che non prevede l'intervento manuale, la soluzione può ridurre in modo significativo sia il tempo di produzione sia i costi della manodopera. È molto simile alla gomma, ma con una maggiore memoria di forma che lo rende il materiale termoplastico ideale per prototipi del settore automotive, beni di consumo o manifattura industriale, motorsport e educational.

Mechanical Properties	Test Method	Value	
		XY Orientation	XZ Orientation
Shore Hardness (molded)	ASTM D2240	92 Shore A	92 Shore A
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D412	15.6 MPa (2,265 psi)	16.1 MPa (2,332 psi)
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D412	16.8 MPa (2,432 psi)	17.4 MPa (2,519 psi)
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D412	15.3 MPa (2,212 psi)	20.7 MPa (3,000 psi)
Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D412	552%	482%
Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D412	466%	385%
Tensile Stress at 100% Elongation (PSI)	ASTM D412	6.9 MPa (999 psi)	7.6 MPa (1,096 psi)
Tensile Stress at 300% Elongation (PSI)	ASTM D412	11.0 MPa (1,598 psi)	11.9 MPa (1,722 psi)
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	1.8 MPa (255 psi)	2.4 MPa (351 psi)
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	25.6 MPa (3,719 psi)	36.9 MPa (5,349 psi)
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	No break	No break
Tear Strength - Stamped	ASTM D624-C	84.6 N/mm (483 lbF/in)	NA
Compressive Strength, Yield (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	2.6 MPa (384 psi)	2.6 MPa (384 psi)
Compressive Strength, Ultimate (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	2.6 MPa (384 psi)	2.6 MPa (384 psi)
Compressive Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	16.9 MPa (2,457 psi)	16.9 MPa (2,457 psi)
Compression Set at 22 Hours @ 23 °C	ASTM D395	21%	NA
Compression Set at 22 Hours @ 70 °C	ASTM D395	44%	NA

Tabella 17: proprietà meccaniche per il TPU 92A

Thermal Properties	Test Method	Value
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi	ASTM D648	38 °C (100.4 °F)
Heat Deflection (HDT) @ 15 psi	NA	56 °C (132.8 °F)
Vicat Softening Temperature (Rate B/50)	ASTM D1525	95 °C (203 °F)
Glass Transition Temperature (Tg)	DMA (SSYS)	-42 °C (-43.6 °F)
Coefficient of Thermal Expansion (x-direction)	ASTM E831	139 µm/(m·°C) (7.72E-05 in/(in·°F))
Coefficient of Thermal Expansion (y-direction)	ASTM E831	159 µm/(m·°C) (8.83E-05 in/(in·°F))
Coefficient of Thermal Expansion (z-direction)	ASTM E831	176 µm/(m·°C) (9.78E-05 in/(in·°F))

Tabella 18: proprietà termiche per il TPU 92A

Electrical Properties	Test Method	Value	
		XY Orientation	XZ Orientation
Volume Resistivity	ASTM D257	6.09E+10 ohm-cm	7.17E+13 ohm-cm

Tabella 19: proprietà elettriche per il TPU 92°

PC

Il PC-Policarbonato è uno dei materiali termoplastici più diffusi in ambito industriale. Nell'ambito delle Tecnologie di Stampa 3D viene utilizzato per la realizzazione di prototipi funzionali, stampi per termoformatura, attrezzature di produzione e componenti finali. Si tratta di un materiale resistente con ottime proprietà termiche e meccaniche, che combinate agli alti livelli di accuratezza e stabilità consentono di realizzare parti finali che necessitino di buona resistenza a trazione e alle alte temperature. Grazie al supporto di stampa solubile, il PC-Policarbonato si adatta perfettamente alla realizzazione di pezzi dalle forme complesse e articolate, senza per questo comprometterne le caratteristiche. In questo modo è possibile sfruttare in maniera ottimale le potenzialità della Tecnologia FDM che consentono la stampa di parti monolitiche fino a dimensioni di 900x600x900mm. Oltre al PC-Policarbonato "tradizionale", sono disponibili per la Stampa 3D FDM altre due varietà di Policarbonato:

- PC-ISO: policarbonato biocompatibile e certificato ISO 10993- Classe USP VI, ideale per la produzione di parti in ambito medicale/farmaceutico e nel packaging alimentare, sterilizzabile mediante raggi gamma o Ossido di Etilene (EtO);
- PC-ABS (Policarbonato – Acrilnitrile Butadiene Stirene): combina l'elevata definizione superficiale dell'ABS con le proprietà meccaniche e di resistenza del PC.

Property	Test Method	Typical Values	
		XY	XZ/ZX
HDT @ 66 psi	ASTM D648 Method B		145 °C (293 °F)
HDT @ 264 psi	ASTM D648 Method B		140 °C (284 °F)
Tg	ASTM D7426 Inflection Point		140 °C (284 °F)
Mean CTE	ASTM E831 (-50 °C to 120 °C)	-	50 µm/[m*°C] (28 µin./[in.*°F])
	ASTM E831 (-50 °C to 30 °C)	50 µm/[m*°C] (28 µin./[in.*°F])	-
	ASTM E831 (30 °C to 75 °C)	35 µm/[m*°C] (19 µin./[in.*°F])	-
	ASTM E831 (75 °C to 130 °C)	10 µm/[m*°C] (5.5 µin./[in.*°F])	-
Volume Resistivity	ASTM D257		> 6.8*10 ¹⁴ Ω*cm
Dielectric Constant	ASTM D150 1 kHz test condition	2.66	2.84
	ASTM D150 2 MHz test condition	2.53	2.69
	ASTM D150 1 kHz test condition		-0.002
Dissipation Factor	ASTM D150 2 MHz test condition	0.003	0.008
	ASTM D257 @23 °C		1.20

Tabella 20: proprietà fisiche per il PC

		XZ Orientation ¹	ZX Orientation ¹
Tensile Properties: ASTM D638			
Yield Strength	MPa	60 (2)	No yield
	psi	8390 (235)	No yield
Elongation @ Yield	%	4.9 (0.1)	No yield
Strength @ Break	MPa	57 (2)	35 (10)
	psi	8310 (235)	5145 (1310)
Elongation @ Break	%	5.2 (0.4)	1.8 (0.2)
Modulus (Elastic)	GPa	2.25 (0.05)	2.1 (0.1)
	ksi	325 (7)	310 (15)
Flexural Properties: ASTM D790, Procedure A			
Strength @ Break	MPa	No break	75 (5)
	psi	No break	10870 (780)
Strength @ 5% Strain	MPa	90 (2)	-
	psi	13050 (240)	-
Strain @ Break	%	No break	4.5 (0.4)
Modulus	GPa	2.15 (0.04)	1.88 (0.07)
	ksi	310 (6)	270 (10)
Compression Properties: ASTM D695			
Yield Strength	MPa	245 (10)	290 (20)
	psi	35410 (1930)	42055 (2795)
Modulus	GPa	1.95 (0.05)	2.11 (0.09)
	ksi	280 (10)	305 (15)
Impact Properties: ASTM D256, ASTM D4812			
Notched	J/m	75 (10)	25 (7)
	ft*lb/in.	1.4 (0.2)	0.5 (0.1)
Unnotched	J/m	760 (105)	230 (70)
	ft*lb/in.	15 (2)	4 (1)

¹ Values in parentheses are standard deviations.

Tabella 21: proprietà meccaniche per il PC

ULTEM 1010

ULTEM 1010 si contraddistingue per essere il termoplastico FDM con la maggiore resistenza alla trazione, al calore e agli agenti chimici. È un materiale autoestinguente, certificato V₀, che resiste fino alla temperatura di 216°C, per cui elevate caratteristiche di resistenza termica e stabilità termica ed è in grado di sopportare le operazioni in autoclave, associate alla sterilizzazione e alla fabbricazione di strumenti in composito. Grazie a queste caratteristiche tecniche si adatta perfettamente all'utilizzo in applicazioni meccaniche avanzate nei settori Automotive e Aerospace.

Property	Test Method	Typical Values	
		XY	XZ/ZX
HDT @ 66 psi	ASTM D648 Method B	215 °C (415 °F)	
HDT @ 264 psi	ASTM D648 Method B	210 °C (410 °F)	
Tg	ASTM D7426 Inflection Point	210 °C (410 °F)	
Mean CTE	ASTM E831 (-50 °C to 60 °C)	35 µm/[m*°C] (19.5 µin./[in.*°F])	-
	ASTM E831 (60 °C to 205 °C)	30 µm/[m*°C] (16.7 µin./[in.*°F])	-
	ASTM E831 (-50 °C to 110 °C)	-	30 µm/[m*°C] (16.7 µin./[in.*°F])
	ASTM E831 (110 °C to 165 °C)	-	15 µm/[m*°C] (8.3 µin./[in.*°F])
	ASTM E831 (165 °C to 200 °C)	-	5 µm/[m*°C] (2.7µin./[in.*°F])
	Volume Resistivity	ASTM D257	>7.0*10 ¹⁴ Ω*cm
Dielectric Constant	ASTM D150 1 kHz test condition	2.85	
	ASTM D150 2 MHz test condition	-0.002	
Dissipation Factor	ASTM D150 1 kHz test condition	3.1	
	ASTM D150 2 MHz test condition	0	
Specific Gravity	ASTM D257 @23 °C	1.29	

Tabella 22: proprietà fisiche per l'ULTEM 1010

		XZ Orientation ¹	ZX Orientation ¹
Tensile Properties: ASTM D638			
Yield Strength	MPa	No yield	No yield
	psi		
Elongation @ Yield	%	No yield	No yield
Strength @ Break	MPa	80 (5)	30 (10)
	psi	11,490 (710)	4,080 (1280)
Elongation @ Break	%	4.0 (0.4)	1.1 (0.4)
Modulus (Elastic)	GPa	3.0 (0.1)	3.0 (0.4)
	ksi	440 (25)	435 (65)
Flexural Properties: ASTM D790, Procedure A			
Strength @ Break	MPa	No break	80 (13)
	psi	No break	11,830 (1940)
Strength @ 5% Strain	MPa	130 (4)	-
	psi	18,475 (570)	-
Strain @ Break	%	No break	3.2 (0.5)
Modulus	MPa	2.91 (0.05)	2.6 (0.1)
	ksi	420 (7)	380 (20)
Compression Properties: ASTM D695			
Yield Strength	MPa	245 (50)	440 (30)
	psi	35,585 (7245)	63,520 (4460)
Modulus	GPa	2.9 (0.1)	3.2 (0.5)
	ksi	425 (20)	470 (80)
Impact Properties: ASTM D256, ASTM D4812			
Notched	J/m	25 (3)	20 (5)
	ft*lb/in.	0.50 (0.06)	0.41 (0.09)
Unnotched	J/m	260 (60)	70 (30)
	ft*lb/in.	4.9 (1.1)	1.3 (0.5)

¹ Values in parentheses are standard deviations.

Tabella 23 proprietà meccaniche per l'ULTEM 1010

Sample	TML (%)	CVCM (%)	WVR (%)
ULTEM™ 1010 Resin, Natural, T14 tip, Flat (XY)	0.55	0.02	0.39
ULTEM™ 1010 Resin, Natural, T14 tip, Upright (ZX)	0.58	0.03	0.33
Testing Observations⁽¹⁾			
Visible Condensate	No	Opaque	N/A
Precent Convered	0%	Interference Fringes	N/A
Thin	N/A	Colored Fringes	N/A
Heavy	N/A	Sample appearance after test	No change
Transparent	N/A		

(1) Observations apply to all tested samples

Tabella 24: risultati dei test riguardanti l'outgassing per l'ULTEM 1010

Comparazione dei materiali per l'additive manufacturing

Questa comparazione serve a determinare quale materiale polimerico è più adatto in base alle caratteristiche termiche, fisiche e meccaniche che vengono richieste per la realizzazione di un componente.

	MATERIALI PER ADDITIVE MANUFACTURING						
	800NA	ABSM30	NYLON12	TPU92A	PC	ULTEM1010	ULTEM9085
Peso specifico [kg/dm ³]	1.28	1.17-1.18	1.28	1.14	1.1	1.29	1.34
Modulo a trazione [GPa]	3.1	2.23	1.5	0.015	1.9	3	2.15
Modulo a compressione [GPa]	2.45		1.48	0.017	1.95		7.01
Modulo a flessione [GPa]	3.1	2.06	1.3	0.026	1.9	2.9	2.05
Deflessione termica a 0.46 MPa [°C]	150	96	95	38	125	215	
Deflessione termica a 1.82 MPa [°C]	147	82	85	56	100	210	153
Temperatura di transizione vetrosa [°C]	149	108	35	-42	105	210	186
Coefficiente di espansione termica in X [10 ⁻⁶ /°C]	39.23			139			
Coefficiente di espansione termica in Y [10 ⁻⁶ /°C]	53.14			159			
Coefficiente di espansione termica in Z [10 ⁻⁶ /°C]	50.52			176			
Coefficiente di espansione termica medio [10 ⁻⁶ /°C]		88.2	95		35	35	65.27
Resistenza a trazione massima [MPa]	93.1	32	50	16.8	41	80	69
Resistenza a compressione massima [MPa]	100		325	2.6			181
Tensione di snervamento a trazione [MPa]	93.1	31	30	15.6	36		47
Tensione di snervamento a compressione [MPa]	100			2.6	95	245	100
Resistenza alla flessione [MPa]	142	60	55	1.8	68	130	112
Deformazione flessionale a rottura	No Break	4.0%					
Durezza Shore A				92			
Allungamento a rottura	6.40%	7.0%	30%	552%	6.0%	4.0%	5.8%
Allungamento a snervamento	4.31%	2.0%	6.12%	466%	3.0%		2.2%
Impatto con intaglio [J/m]	37	128	140		240	25	48
Impatto senza intaglio [J/m]	1826	300	1800		655	260	172

Tabella 25: proprietà dei materiali polimerici trattati per l'AM

Maraging steel M300

Powder description	Maraging steel
Layer thickness	40 µm
Laser power	200 W
Additive manufacturing system	AM250 and AM 400

Tabella 26: specifiche di processo per l'M300

I maraging steel appartengono alle leghe di acciaio. Presentano una struttura cristallina martensitica ed è rafforzato per invecchiamento a circa 500°C, ecco perché si chiama maraging. Questo materiale a basso contenuto di carbonio ha alta resistenza e durezza e ciò è garantito dalla precipitazione di intermetallici contenenti del carbonio. Inoltre, presenta una buona lavorabilità e alta resistenza a fatica. Il Nichel è il maggior elemento del materiale, insieme al cobalto, al molibdeno e al titanio, che viene usato come intermetallico secondario.

Density	8.1 g/cm ³
Thermal conductivity	14.2 W/mK at 20 °C, 21.0 W/mK at 600 °C, 28.6 W/mK at 1300 °C
Melting point	1413 °C
Coefficient of thermal expansion	10.3 10 ⁻⁶ K ⁻¹

Tabella 27: dati generali per il materiale M300 lavorato

Condizioni di indurimento per invecchiamento: inizialmente si riscalda fino a 500±10°C, per 60-90 minuti e la si mantiene per 6h; dopo di che si riscalda il forno a 300°C e poi si mette il pezzo in aria fresca. Il materiale è testato a temperatura ambiente secondo la prova ASTM E8 e viene lavorato prima di effettuare il test. È testato secondo la ASTM E384-11, dopo la lucidatura. Infine è testato secondo JIS B 0601-2001 (ISO 97), dopo la pallinatura.

Element	Mass / max. %
Iron	Balance
Nickel	17.00 to 19.00
Cobalt	7.00 to 10.00
Molybdenum	4.50 to 5.20
Titanium	0.30-1.20
Silicon	≤ 0.10
Manganese	≤ 0.15
Carbon	≤ 0.03
Phosphorous	≤ 0.01
Sulphur	≤ 0.01

*ASTM standard composition powder. Renishaw powders are supplied to a tighter specification to minimise batch-to-batch variations. Results quoted in this data sheet are from samples produced using Renishaw's tighter specification powder. Please contact Renishaw for further information about specifications or if you require support in qualifying non-Renishaw powders.

Tabella 28: composizione chimica della polvere per l'M300

	As built	Standard deviation (±1σ)	Age hardened (See note 1)	Standard deviation (±1σ)
Tensile strength (UTS) (See note 2)				
Horizontal direction (XY)	1141 MPa	7 MPa	1806 MPa	6 MPa
Vertical direction (Z)	1122 MPa	14 MPa	1794 MPa	9 MPa
Yield strength (see note 2)				
Horizontal direction (XY)	1016 MPa	8 MPa	1753 MPa	20 MPa
Vertical direction (Z)	999 MPa	20 MPa	1730 MPa	20 MPa
Elongation at break (see note 2)				
Horizontal direction (XY)	7.3%	1%	5.5%	1%
Vertical direction (Z)	7.5%	1%	7%	1%
Modulus of elasticity (see note 2)				
Horizontal direction (XY)	160 GPa	5 GPa	170 GPa	8 GPa
Vertical direction (Z)	162 GPa	10 GPa	175 GPa	11 GPa
Hardness (Vickers) (see note 3)				
Horizontal direction (XY)	363 HV0.5	5 HV0.5	542 HV0.5	7 HV0.5
Vertical direction (Z)	355 HV0.5	7 HV0.5	543 HV0.5	8 HV0.5
Surface roughness (R_a) (See note 4)				
Horizontal direction (XY)	3.5 μm to 5 μm			
Vertical direction (Z)	4 μm to 6 μm			

Density of additively manufactured maraging steel M300 is typically 99.8%, measured optically on a 10 mm x 10 mm x 10 mm sample at 75x magnification.

Tabella 29: proprietà meccaniche per l'M300

Comparazione dei materiali per l'additive manufacturing

Anche in questo caso quello che si vuole mostrare in questa tabella è la differenza delle caratteristiche principali dei rispettivi metalli; questo permette di propendere per un metallo piuttosto che per un altro in base alle proprietà che servono per l'ottenimento della parte.

	MATERIALI PER ADDITIVE MANUFACTURING					
	M300	316L	AlSi10Mg	Ti6Al4V	INCONEL718	INCONEL625
Diametro o spessore [mm]	4.00E-05	5.00E-05	2.50E-05	3.00E-05	3.00E-05	3.00E-05
Peso specifico [kg/dm³]	8.1	7.99	2.68	4.42	8.19	8.44
Modulo di elasticità [GPa]	160	197	71	129	186	205
Intervallo di fusione [°C]	1413	1371-1399	570-590	1635-1665	1260-1336	1290-1350
Dilatazione termica [10⁻⁶/K]	10.3	16	20-21	8-9	12-16	12.8
Resistenza a trazione Rm [MPa]	1141	676	442	1089	1040	1055
Carico di snervamento [MPa]	1016	547	264	1007	758	767
Durezza Brinell HB	357	193	114	362	272	326
Allungamento percentuale	7.30%	43%	9%	16%	30%	34%
Tenacità a frattura [MPa m^{1/2}]		19.5	29.2		60	66-67
Conducibilità termica [W/mK]	14.2	16.2	130	6-8	6-12	9.2-10.7
Lavorabilità all'utensile	Buona	Buona	Buona	Buona	Ottima	Buona
Saldabilità	Buona	Buona	Buona	Buona	Ottima	Ottima
Lucidabilità					Buona	Buona
Resistenza alla corrosione	Buona	Ottima		Ottima	Ottima	Ottima

Tabella 30: proprietà dei materiali trattati in additive manufacturing

APPENDICE III

Stabilimento dei materiali ammessi

Se i dati non sono inclusi nella MMDH 00932 (Metallic Materials Data Handbook), come nel caso dell'AM, i dati devono essere ottenuti o derivati dai dati di prova utilizzando gli stessi metodi specificati in MMDH 00932; in questo contesto, per metodi si intendono quelli usati per testare i campioni secondo standard riconosciuti e le tecniche statistiche che dovrebbero essere usate per descrivere i dati risultanti come valori di progetto. Di conseguenza MMDH 00932 è un'utile fonte di guida sui principi e le tecniche utilizzate per derivare i valori di progettazione. Negli Stati Uniti la pubblicazione MMPDS (Metallic Materials Development and Standardization) è simile a MMDH 00932. Viene utilizzata in diverse applicazioni aerospaziali commerciali e militari in tutto il mondo.

Dati di progetto

Il manuale fornisce dati di progettazione sulle seguenti categorie di proprietà:

- Proprietà statiche: resistenza (sollecitazione a trazione finale, sollecitazioni di prova a trazione e compressione, inclusa la resistenza rispetto alla temperatura), sollecitazione di taglio, sollecitazione del cuscinetto, sollecitazione di torsione e tenacità alla frattura;
- Proprietà creep, creep-rottura e stress-rottura;
- Proprietà di fatica;
- Proprietà di propagazione delle crepe;
- Proprietà fisiche e caratteristiche (ad esempio la suscettibilità alla tensocorrosione, saldabilità, ecc...).

Le proprietà statiche sono presentate sotto forma di ammissibilità di progettazione: base A, B o S a seconda della disponibilità dei dati. La disponibilità di un numero sufficiente di dati affidabili per una particolare proprietà determina la base di progettazione ammissibile che può essere citata. I dati di progettazione definiscono i requisiti di progettazione di base A, B e S per l'uso nella progettazione e produzione di parti aerospaziali da materiali metallici.

Base A: un limite di confidenza inferiore del 95% per il valore al di sopra del quale si trova il 99% della popolazione. Ciò significa che esiste una probabilità del 95% che almeno il 99% del materiale rilasciato superi il valore A.

Base B: un limite di confidenza inferiore del 95% per il valore al di sopra del quale si trova il 90% della popolazione. Ciò significa che esiste una probabilità del 95% che almeno il 90% del materiale rilasciato superi il valore B.

Base S: i valori minimi specificati di una specifica del materiale o standard appropriato. Un singolo valore indica un minimo, mentre due valori, ad esempio 390-540, indicano un minimo di 390 con un massimo di 540.

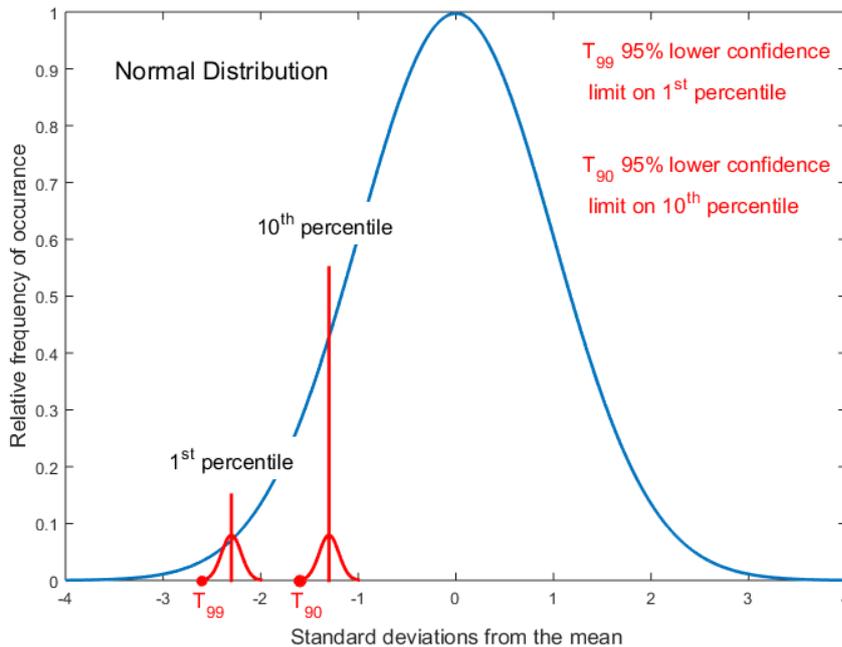


Fig. 1: rappresentazione di elementi ammissibili di progettazione di base A e B. Da una distribuzione statistica di una particolare proprietà

Storicamente non era noto un livello di confidenza statistica per i valori consentiti su base S, tuttavia dal 1975 circa le proprietà meccaniche minime nelle specifiche della Society of American Engineers (SAE)/Aerospace Material Specification (AMS) sono state statisticamente giustificate con una procedura descritta nella parte F del manuale SAE/AMS per la preparazione delle specifiche dei materiali aerospaziali sia metallici che non metallici.

I metalli spesso mostrano proprietà anisotrope come conseguenza della tecnica di lavorazione utilizzata per fabbricare una particolare forma di prodotto, ad esempio laminazione di lastre in lega di alluminio. Di conseguenza, sia MMDH 00932 che MMPDS citano il design ammesso in diverse direzioni, ad esempio la resistenza alla trazione finale negli orientamenti longitudinale, trasversale e trasversale corto per una piastra in lega di alluminio con intervalli di spessore specificati in MMDH 00932. Ciò ha rilevanza per i metalli prodotti con l'additive manufacturing perché la ricerca ha dimostrato che i campioni/parti AM spesso mostrano anche proprietà anisotrope a causa delle strutture dei grani, come risultato della solidificazione direzionale.

I principi e le tecniche statiche utilizzate per stabilire i requisiti di progettazione sono descritti in modo esauriente nella MMDH 00932 nella sezione dei calcoli statistici. Sono applicabili anche quando un designer desidera ottenere i propri valori di progettazione. È importante evidenziare alcuni paragrafi poiché forniscono uno schema dei requisiti per i dati grezzi e la loro analisi statistica, utile quando si discute la loro rilevanza per l'AM.

La sottosezione A3 di MMDH 00932 descrive i requisiti dei dati grezzi. La spinta prevalente è che i dati grezzi utilizzati per stabilire i valori di progetto dovrebbero essere il più rappresentativi possibile dell'intera gamma di materiali accettati dalla specifica, ovvero le procedure statistiche dipendono per la loro stretta validità dal presupposto che i dati del campione siano stati ottenuti selezionando il materiale da testare in modo indipendente e casuale, cioè non ci deve essere la censura dei dati. Solo in alcune circostanze speciali i dati possono essere eliminati.

Nella figura 1 è illustrata una distribuzione di probabilità normale (gaussiana), che è stata dimostrata dall'esperienza per modellare bene le proprietà meccaniche dei materiali metallici (materiali/fabbricazione convenzionali). Pertanto, le procedure statistiche si basano principalmente sulla teoria statistica normale. Di seguito è riportato un elenco che riassume i requisiti di campionamento di alto livello per materiali/produzione convenzionali basati su questa teoria:

- Per derivare direttamente i valori di base A e B è necessario utilizzare un minimo di 100 misurazioni individuali (per ciascuna proprietà di interesse), sebbene siano desiderabili numeri più alti;
- Quando vengono utilizzate le statistiche degli ordini, sono necessari almeno 299 risultati per un valore A e 29 per un valore B;
- Eccezionalmente, come misura provvisoria fino a quando non saranno disponibili ulteriori dati, possono essere utilizzate 30 misurazioni individuali per derivare un valore B (sono necessarie almeno 30 misurazioni per ricavare una stima utile del coefficiente di variazione di una proprietà);
- La derivazione indiretta dei valori A e B utilizzando il metodo del rapporto richiede un numero minimo di risultati da una combinazione specificata di lotti, fusioni e posizioni dei campioni;
- I risultati del test devono coprire la gamma di spessori del materiale a cui devono essere applicabili i valori A e B.

Le procedure di analisi statistica esposte nell'MMDH 00932 ed una breve spiegazione della loro funzione sono riassunte di seguito:

1. Calcolo della media campionaria e della deviazione standard da utilizzare (insieme alla dimensione del campione) quando si utilizza una procedura di progettazione probabilistica invece dei valori di progettazione basati su A, B o S.
2. Confronto dei campioni per garantire che i campioni siano combinati solo quando si può dimostrare che, con un rischio statistico di errore, appartengono alla stessa popolazione.
3. Test sulla bontà di adattamento (test di Anderson-Darling) per verificare che il campione supporti l'ipotesi che sia stato estratto a caso da una distribuzione di probabilità, cioè una distribuzione normale.
4. Calcolo diretto dei valori A e B con metodi per quando: si assume una popolazione normalmente distribuita; o non è stata stabilita una forma di distribuzione.
5. Calcolo dei valori A, B e S con il metodo del rapporto. Questi sono metodi per calcolare e controllare i valori di progetto per alcune proprietà sulla base di una particolare relazione di proprietà con valori di progetto di proprietà di trazione noti calcolati direttamente.
6. Stima del coefficiente di variazione della popolazione. Ciò consente la stima della variabilità di una proprietà, con un livello statistico di fiducia, per aiutare la progettazione sicura.
7. Calcolo dei valori di progetto inferiori e superiori per le proprietà meccaniche. I valori A e B sono valori inferiori, ma a volte i progettisti richiedono limiti di progettazione superiori, ad esempio quando progettano collegamenti deboli intenzionali.
8. Monitoraggio delle proprietà dei materiali da parte degli utensili. Questi sono metodi per monitorare il materiale da utilizzare nella produzione per assicurarsi che le sue proprietà siano ancora valide rispetto ai valori di progetto storici A e/o B in MMDH 00932. Poiché l'AM è un processo separato e distinto dai processi convenzionali come la forgiatura, laminazione, ecc... e non è incluso nella MMDH 00932, questi metodi sono rilevanti a scopo di confronto per informazione.
9. Controllo dei valori S. Questo è un metodo per verificare che i valori S non siano troppo alti se confrontati con le proprietà del materiale rilasciato.

Procedure di prova

La sezione 5 dell'MMDH 00932 definisce le procedure di prova standardizzate da adottare per determinare le proprietà statiche dei materiali metallici a temperature inferiori allo zero, ambiente ed elevate che possono essere impiegate nella derivazione dei dati di progettazione per scopi aerospaziali; MMPDS contiene una guida simile, ma non copre le proprietà dinamiche.

Le procedure di test sono definite da organizzazioni di standardizzazione riconosciute come BSI (British Standards Institution), ISO e ASTM International. Le procedure sono state progettate per parti prodotte in modo convenzionale in cui le relazioni tra il processo di produzione, la forma del prodotto, l'ubicazione, l'orientamento e la progettazione dei provini e le proprietà delle parti finali sono ben stabilite. Questo non è il caso dell'AM ed è necessario prestare grande attenzione nell'interpretare come utilizzare procedure di prova standardizzate per certificare una parte AM come aeronavigabile. La guida è stata emessa dal National US Institute of Standards and Technology (NIST) sull'applicabilità degli standard di test sui materiali metallici esistenti per i campioni di produzione additiva. NISTIR 7847 (National Institute of Standards and Technology Internancy Report) fornisce una panoramica degli standard di prova ASTM ed ISO per le proprietà di deformazione (tensione, compressione, cuscinetto, ecc...) e le proprietà di rottura (fatica, tenacità a frattura e crescita delle cricche), con un'appendice delle definizioni dei termini delle proprietà dei materiali. Questi test standardizzati sono quelli per le proprietà specificate in MMDH e MMPDS. NISTIR 8005 fornisce una breve guida sui fattori che dovrebbero essere considerati quando si valuta l'applicabilità degli standard esistenti per il test di campioni AM; per esempio, l'anisotropia, la porosità, lo spessore di componenti e la sensibilità delle proprietà dei materiali ai parametri di costruzione AM e alle proprietà iniziali della polvere. NISTIR 8005 passa quindi ad elencare gli standard per le prove meccaniche con una valutazione della loro applicabilità ai campioni AM con indicazioni utili per ciascuno.

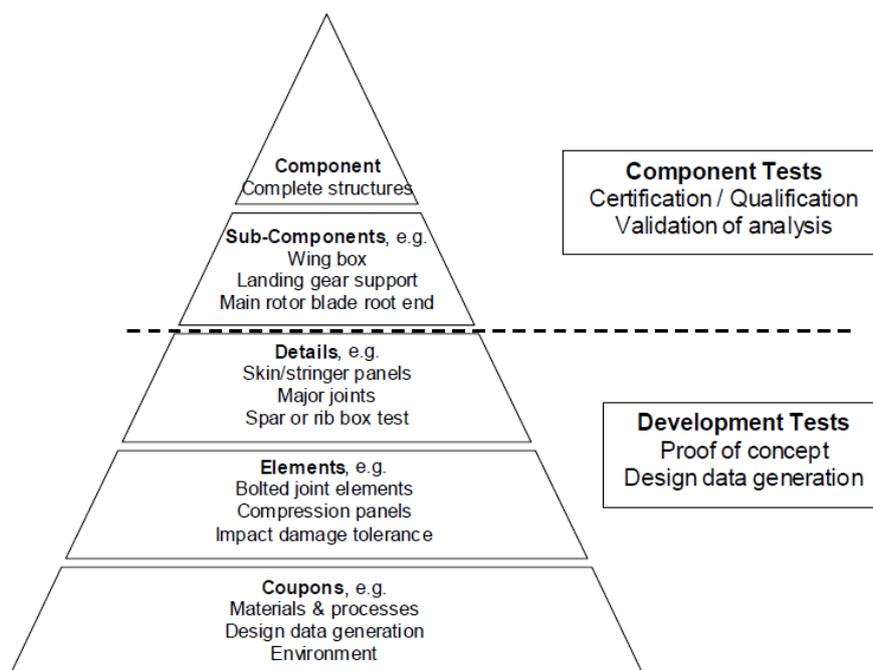


Fig. 2: piramide del test strutturale