

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Simulazione di processo LPBF e prove sperimentali applicate a casi studio aerospaziali

Relatore:

Prof. Enrico CESTINO

Candidata:

Lucia LOIODICE

Anno Accademico 2023/2024

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale



Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Simulazione di processo LPBF e prove sperimentali applicate a casi studio aerospaziali

Relatore Candidata

Prof. Enrico CESTINO Lucia LOIODICE

Correlatore

Prof. Giacomo FRULLA

Supervisore esterno

Ing. Federico VALENTE

Anno Accademico 2023/2024

Sommario

L'industria aerospaziale rappresenta uno dei settori più esigenti in termini di prestazioni, affidabilità e sicurezza dei componenti utilizzati nei velivoli e nei sistemi spaziali. L'introduzione delle tecnologie additive, in particolare della stampa 3D, ha rivoluzionato la progettazione e la produzione di parti e componenti per queste applicazioni critiche. Le tecniche di AM sono basate sul principio fondamentale che il componente finale è ottenuto con addizione di materiale (layer-by-layer). Il rapido sviluppo dell'AM è connesso con alcuni vantaggi, fra i quali si segnala un'elevata accuratezza dimensionale e una riduzione dei tempi di produzione. Tuttavia, l'adozione di questa tecnologia in contesti aerospaziali presenta anche sfide significative legate alla qualità, alla certificazione e alla sicurezza dei componenti fabbricati.

In questo lavoro di tesi si sono studiati alcuni componenti realizzati in additive metallico mediante tecnologia Laser Powder Bed Fusion (LPBF), in particolare il processo Selective Laser Melting (SLM), per applicazioni aerospaziali, in materiale lega di alluminio AlSi10Mg. In particolare i componenti selezionati per lo studio, sono delle parti di collegamento, progettati da uno dei team studenteschi del Politecnico di Torino (DIMEAS), il Team S55, per la costruzione della replica volante in scala 1:8, dell'idrovolante Savoia Marchetti S55X.

Per tali componenti si è svolto un processo di simulazione FEM basato su un modello macroscopico del processo di produzione SLM, implementato nel software AMTOP® V.2.0 sviluppato da ITACAe S.r.l., Asti e SimTech Simulation et Technologie SARL, Parigi. AMTOP® V.2.0 è una piattaforma di strumenti software sviluppata per analizzare e ottimizzare prodotti e processi di produzione additiva. La piattaforma include diversi algoritmi per valutare l'entità delle sollecitazioni e delle distorsioni attraverso un approccio "strato per strato", costituito da cicli di analisi accoppiata termo-strutturale. Il software AMTOP® V.2.0 può determinare una configurazione ottimizzata

dei supporti per ottimizzare un obiettivo desiderato come l'altezza della stampa o il volume dei supporti. L'analisi agli elementi finiti (FEA) viene eseguita tramite un solutore esterno (ad esempio Calculix).

Inoltre, è stato possibile svolgere su uno dei componenti simulati con il software AMTOP® V.2.0, una tomografia computerizzata. tomografia è stata svolta presso Labormet DUE S.r.l., Torino, azienda specializzata in servizi di controllo qualità. La scelta del componente da analizzare si è basata su fattori economici e su fattori legati alla probabilità di avere, per la scansione, risultati che evidenziassero quanto si voleva ricercare. La Tomografia industriale computerizzata a raggi X, prevede un esame radiografico a 360° dal quale si ottiene una ricostruzione tridimensionale analizzabile al computer. Infatti grazie ad appositi supporti l'oggetto viene fatto ruotare sul proprio asse in modo da acquisirne una digitalizzazione completa. La Tomografia industriale computerizzata prevede un'analisi totale del componente, sia interna che esterna, senza recare ad esso il minimo danno e, per questo motivo, il controllo è definito non distruttivo. Presso Labormet Due, per l'attività sperimentale in questione, si è utilizzato il sistema di tomografia X-ray CT PHOENIX V|TOME|X M. L'identificazione dei difetti interni con le rispettive caratteristiche è stata effettuata grazie al modulo Porosity Analysis del software Volume Graphics.

A mia madre, a mio padre, la mia ancora, il mio faro, linfa del mio cuore e della mia esistenza. Alla me bambina, la quale abbraccio e le sorrido, dicendole "ce l'abbiamo fatta!"

Indice

\mathbf{El}	enco	delle tabelle	VIII
\mathbf{El}	enco	delle figure	IX
A	croni	mi	XVIII
1	Intr	oduzione	1
2	Pro	cessi di produzione	5
	2.1	Processo di design AM	6
	2.2	Materiali per AM metallico	
		2.2.1 Polveri metalliche per i processi AM	11
		2.2.2 Trattamenti termici post-processing	
		2.2.3 Leghe metalliche per AM	
	2.3	Processo di produzione LPBF	
3	Cor	ponenti oggetto di studio	26
	3.1	Team S55	26
	3.2	Componenti in AM metallico del Team S55	28
		3.2.1 Componente C-SUP-P1	44
4	Sim	ulazione numerica	46
	4.1	Simulazione di C-SUP-P1	51
		4.1.1 Caso 1: 0:NO_ORIENTATION	51
		4.1.2 Caso 2: 1:ORIENTATION	75
		4.1.3 Confronto tra caso 1 e caso 2	83
	4.2	Simulazione di AS-ATK-CODA-POST	84
		4.2.1 Caso 1: 0:NO_ORIENTATION	85
		4.2.2 Caso 2: 1:ORIENTATION	100

		4.2.3 Confronto tra caso 1 e caso 2	113
5	Ton	nografia Computerizzata	115
	5.1	Set-up sperimentale	115
	5.2	Procedura di scansione	117
	5.3	Risultati e commenti	121
		5.3.1 Analisi dei difetti interni	121
		5.3.2 Analisi confronto con nominale	124
	5.4	Confronto numerico-sperimentale	139
6	Cor	nclusioni	141
$\mathbf{B}^{\mathbf{i}}$	bliog	grafia	151

Elenco delle tabelle

2.1	Confronto caratteristiche meccaniche AlSi10Mg e Scalmalloy	20
3.1	Lista componenti realizzati in AM metallico per il Team S55	29
3.2	Parametri di processo di stampa	42
4.1	Definizione parametri di macchina	49
4.2	Definizione parametri laser data	50
4.3	Definizione parametri Supports	54
4.4	Definizione parametri <i>Plate</i>	54
4.5	Definizione parametri Slicing	55
4.6	Definizione parametri <i>Process Simulation</i>	55
4.7	Definizione parametri $Advanced$	56
4.8	Parametri di simulazione, caso 1 di C-SUP-P1	56
4.9	Risultati caso 1 di C-SUP-P1	72
4.10		75
4.11	Parametri di simulazione, caso 2 di C-SUP-P1	76
	Risultati caso 2 di C-SUP-P1	83
4.13	Confronto dati di input analisi caso 1 e caso 2 di C-SUP-P1	84
	Confronto risultati caso 1 e caso 2 di C-SUP-P1	84
4.15	Parametri di simulazione, caso 1 di AS-ATK-CODA-POST .	85
4.16	Risultati caso 1 di AS-ATK-CODA-POST	99
4.17	Distorsioni caso 1 di AS-ATK-CODA-POST	100
4.18	Parametri di simulazione, caso 2 di AS-ATK-CODA-POST .	100
4.19	Risultati caso 2 di AS-ATK-CODA-POST	112
4.20	Distorsioni caso 2 di AS-ATK-CODA-POST	113
	Confronto dati di input analisi caso 1 e caso 2 di AS-ATK-	
	CODA-POST	113
4.22	Confronto risultati caso 1 e caso 2 di AS-ATK-CODA-POST	114

Elenco delle figure

1.1	Campi impiego AM [1]
1.2	Costo unitario - Numero unità, [4]
1.3	Costo unitario - Complessità design, [4]
1.4	Distribuzione dei costi per l'AM, [4]
2.1	Confronto velocità di processo per PBF e DED, [5] 9
2.2	Confronto caratteristiche meccaniche [5]
2.3	Micrografia SEM di Water Atomisation, [6]
2.4	Micrografia SEM di Gas Atomisation, [7]
2.5	Micrografia SEM di Plasma Atomisation, [8]
2.6	Schema descrittivo del trattamento HIP, [10]
2.7	Confronto curve sforzo-deformazione, [11]
2.8	Schema dei trattamenti di solubilizzazione e invecchiamento,
	[12]
2.9	Incurvamenti sul bordo di ogni layer, [13]
2.10	Resistenza specifica su temperatura per leghe metalliche, [14] 19
2.11	Resistenza allo snervameno e allungamento a rottura (%) per
	la lega Ti6Al4V processata con differenti tecnologie AM [15] 22
2.12	Schema descrittivo dei processi SLM e SLS [16]
3.1	S55_02 realizzato dal Team S55 in esposizione alla mostra
	organizzata dal Centro Storico Fiat, Torino
3.2	Schema posizionamento componenti AM metallico 28
3.3	CM-C-POST-SX CAD
3.4	CM-C-POST-SX reale
3.5	CM-C-POST-DX CAD
3.6	CM-C-POST-DX reale
3.7	CM-C-ANT-SX CAD
3.8	CM-C-ANT-SX reale

3.9	CM-C-ANT-DX CAD
3.10	CM-C-ANT-DX reale
3.11	CM-V-ANT CAD
3.12	CM-V-ANT reale
3.13	CM-V-POST CAD
	CM-V-POST reale
3.15	S-ATK-R CAD
3.16	S-ATK-R e Specch. reale
3.17	AS-ATK-2 CAD
	AS-ATK-2 reale
3.19	AS-ATK-3 CAD
3.20	AS-ATK-3 reale
3.21	AS-ATK-4 CAD
	AS-ATK-4 reale
3.23	AS-ATK-5 CAD
	AS-ATK-5 reale
3.25	ST-ATK-ANT CAD
3.26	ST-ATK-POST CAD
	ST-ATK-ANT e ST-ATK-POST reale
3.28	AS-ATK-CODA-ANT CAD
	AS-ATK-CODA-ANT reale
3.30	ST-ATK-C4 CAD
3.31	A-OBL-ATK CAD
3.32	ST-ATK-C4 e A-OBL-ATK reale
3.33	AS-ATK-CODA-POST CAD
3.34	Specch. AS-ATK-CODA-POST CAD
3.35	AS-ATK-CODA-POST e Specch. AS-ATK-CODA-POST reale 37
3.36	C-SUP-P1 CAD
3.37	C-SUP-P1 reale
3.38	D-ATK-STAB CAD
3.39	D-ATK-STAB reale
3.40	D-ATK-TRAV CAD
3.41	Specch. D-ATK-TRAV CAD
3.42	D-ATK-TRAV e Specch. D-ATK-TRAV reale
	P-ST-D-30 CAD
	P-ST-D-60 CAD
3.45	P-ST-D-30 e P-ST-D-60 reale
3.46	S-ATK-ANT CAD

3.47	S-ATK-ANT reale
	A-P CAD
3.49	Specch. A-P CAD
3.50	A-P e Specch. A-P reale
	AS-AV-ATK CAD
	AS-AV-ATK reale
3.53	C-INF-ATK-FUNI CAD 41
	C-INF-ATK-FUNI reale
	T-P CENTR CAD
	T-P LAT CAD
	Specch. T-P CENTR CAD 41
3.58	Specch. T-P LAT CAD
	T-P CENTR, T-P LAT e specch. reale 41
	Piattaforma <i>job 1</i>
3.61	Piattaforma job 2
3.62	Attacco posteriore tra trave superiore e piano di coda assem-
	blato sul velivolo S55_02
3.63	Castello motore assemblato sullo skin superiore del pianetto
	ventrale del velivolo S55_02
3.64	CAD del componente C_SUP_P1 45
3.65	Vista 1 di C-SUP-P1
	Vista 2 di C-SUP-P1
3.67	Vista 3 C-SUP-P1
	Vista 4 C-SUP-P1
4 1	M. 1. P. C. CLID. D.1
4.1	Mesh di C-SUP-P1
4.2	Importazione file STL
4.3	Interfaccia AMTOP® con caricamento file STL di C-SUP-P1 48
4.4	Selezione macchina
4.5	Parametri di macchina
4.6	Selezione materiale
4.7	1:SIMPLE_SUPPORTS
4.8	2:STAIRS_SUPPORTS
4.9	3:TRUSS_SUPPORTS
4.10	Project data caso 1
	Interfaccia grafica AMTOP® - New supports
	Interfaccia grafica Part_orient_supp_C-SUP-P1
4 13	Vista 1 Part orient sunn C-SUP-P1 58

4.14	Vista 2 Part_orient_supp_C-SUP-P1
4.15	Finestra di controllo
4.16	Dati input dell'analisi e configurazione supporti, caso 1 di C-SUP-P1
4.17	Dati output, caso 1 di C-SUP-P1
	Interfaccia grafica Supp_voxel di C-SUP-P1, caso 1
	Finestra di controllo Supp_voxel di C-SUP-P1, caso 1
	Vista di dettaglio Supp_voxel di C-SUP-P1, caso 1
	File par.inp di C-SUP-P1, caso 1
	Residual stress layer 82, vista 1
	Residual stress layer 82, vista 2
	Residual stress layer 17, vista 1
	Residual stress layer 17, vista 2
	Residual stress layer 45, vista 1
	Residual stress layer 45, vista 2
	Damage layer 82, vista 1
	Damage layer 82, vista 2
	Damage layer 17
4.31	Damage layer 45
	Damage layer 55
	Temperatura layer 82
	Temperatura layer 17
4.35	Temperatura layer 38
4.36	Temperatura layer 39
4.37	Temperatura layer 40
4.38	Distorsioni in direzione x , vista $1 \ldots \ldots \ldots \ldots$
	Distorsioni in direzione x , vista $2 \ldots \ldots \ldots \ldots$
4.40	Distorsioni in direzione y
4.41	Distorsioni in direzione z
4.42	Distorsioni in norma, vista 1
4.43	Distorsioni in norma, vista 2
4.44	Interfaccia grafica Part_orient_supp_C-SUP-P1 orientamen-
	to ottimizzato, vista 1
4.45	Interfaccia grafica Part_orient_supp_C-SUP-P1 orientamen-
	to ottimizzato, vista 2
4.46	Interfaccia grafica Part_orient_supp_C-SUP-P1 orientamen-
	to ottimizzato vista 3

4.47	Dati di input dell'analisi e configurazione supporti, caso 2 di C-SUP-P1	78
4.48		. o 79
	• /	79
		30
		30
		31
		31
		32
		32
		33
	- ·	33
	Interfaccia grafica Part_orient_supp_AS-ATK-CODA-POST,	
		86
4.59	Interfaccia grafica Part_orient_supp_AS-ATK-CODA-POST,	
	vista 2	37
4.60	Dati di input dell'analisi e configurazione supporti, caso 1 di	
	AS-ATK-CODA-POST	37
4.61	Dati output, caso 1 di AS-ATK-CODA-POST	38
4.62	Interfaccia grafica Supp_voxel di AS-ATK-CODA-POST, caso 1	88
4.63	File par.inp di AS-ATK-CODA-POST, caso 1	39
4.64	Residual stress layer 73, vista 1	90
4.65	Residual stress layer 73, vista 2	90
	v	91
4.67	Residual stress layer 10	91
4.68	Damage layer 73, vista 1	92
4.69	Damage layer 73, vista 2	92
		93
4.71	Damage layer 10	93
4.72	Temperatura layer 73, vista 1	94
4.73	Temperatura layer 73, vista 2	94
	1 0	95
4.75	Temperatura layer 10	95
4.76	Distorsioni in direzione x , vista $1 \ldots \ldots \ldots \ldots$	96
4.77	Distorsioni in direzione x , vista $2 \dots \dots \dots \dots \dots$	96
4.78	Distorsioni in direzione y , vista $1 \ldots \ldots \ldots \ldots$	97
4.79	Distorsioni in direzione y , vista $2 \dots \dots \dots \dots$	97
4.80	Distorsioni in direzione z , vista $1 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	98

4.81	Distorsioni in direzione z , vista $2 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	98
4.82	Distorsioni in norma, vista 1	99
4.83	Distorsioni in norma, vista 2	99
4.84	$Interfaccia grafica {\it Part_orient_supp_AS-ATK-CODA-POST}$	
	orientamento ottimizzato, vista 1	102
4.85	Interfaccia grafica Part_orient_supp_AS-ATK-CODA-POST	
	orientamento ottimizzato, vista 2	102
4.86	Interfaccia grafica Part_orient_supp_AS-ATK-CODA-POST	
	orientamento ottimizzato, vista 3	103
4.87	Dati di input dell'analisi e configurazione supporti, caso 2 di	
	AS-ATK-CODA-POST	103
4.88	Dati output, caso 2 di AS-ATK-CODA-POST	104
4.89	Interfaccia grafica Supp_voxel di AS-ATK-CODA-POST, caso	
	2, vista 1	104
4.90	Interfaccia grafica Supp_voxel di AS-ATK-CODA-POST, caso	
	2, vista 2	105
4.91	File par.inp di AS-ATK-CODA-POST, caso 2	105
4.92	Residual stress, vista 1	106
4.93	Residual stress, vista 2	106
4.94	Temperatura, vista 1	107
4.95	Temperatura, vista 2	107
4.96	Damage, vista 1	108
4.97	Damage, vista 2	108
4.98	Distorsioni in direzione x , vista $1 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	109
4.99	Distorsioni in direzione x , vista $2 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	109
4.100	ODistorsioni in direzione y , vista $1 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	110
4.10	1Distorsioni in direzione y , vista 2	110
4.102	2Distorsioni in direzione z , vista $1 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	111
4.103	3Distorsioni in direzione z , vista $2 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	111
4.104	4Distorsioni in norma, vista 1	112
4.105	5Distorsioni in norma, vista 2	112
5.1	Sistema di tomografia PHOENIX V TOME X M, [48]	116
5.2	Schema generale di un sistema tomografico [49]	118
5.3	Sistema rotante del tomografo	119
5.4	Sistema rotante del tomografo con componente posizionato .	119
5.5	Parametri di scansione	120
5.6	Ricostruzione 3D dell'oggetto scansionato, vista 1	120

5.7	Ricostruzione 3D dell'oggetto scansionato, vista 2	120
5.8	Dettaglio difettosità oggetto 3D scansionato	121
5.9	Identificazione porosità nel componente 3D scansionato	122
5.10	Dettaglio identificazione porosità, vista 1	122
5.11	Dettaglio identificazione porosità, vista 2	122
5.12	Identificazione porosità nel componente 3D scansionato e nelle	
	viste in sezione	123
5.13	Dati sulle porosità	123
5.14	Conteggio porosità su dimensione diametro	124
	Conteggio porosità su dimensione diametro, dettaglio % zona i	1125
	Conteggio porosità su dimensione diametro, dettaglio % zona 2	
5.17	Conteggio porosità su dimensione diametro, dettaglio % zona :	3127
5.18	Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 1	127
5.19	Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 2	128
5.20	Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 3	128
5.21	Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 4	128
5.22	Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 5	129
5.23	Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 6	129
5.24	Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 7	129
5.25	Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 8	130
5.26	Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 9	130
5.27	Deviazione in sezione, vista anteriore, dettaglio 10	130
5.28	Deviazione in sezione, vista anteriore, dettaglio 11	131
5.29	Deviazione in sezione, vista anteriore, dettaglio 12	131
5.30	Deviazione in vista assonometrica 3D	131
5.31	Deviazione in vista 3D inferiore	132
5.32	Deviazione in vista 3D superiore	132
	Deviazione in vista 3D destra	133
5.34	Deviazione in vista 3D sinistra	133
5.35	Deviazione in vista 3D anteriore	134
5.36	Deviazione in vista 3D posteriore	134
5.37	Deviazione nel componente 3D e nelle differenti viste in sezione	e135
5.38	Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 1	135
	Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 2	136
	Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 3	136
5.41	Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 4	137
	Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 5	137
	Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 6	138

5.44	Deviazione in sezione, vista anteriore, dettaglio 7	138
5.45	Vista inferiore risultati processo simulato	139
5.46	Vista inferiore risultati processo reale	139
5.47	Vista superiore risultati processo simulato	140
5.48	Vista superiore risultati processo reale	140

Acronimi

AM

Additive Manufacturing

FDM

Fused Deposition Modeling

SLM

Selective Laser Melting

LPBF

Laser Powder Bed Fusion

SLA

Stereolitografia

DLP

Digital Light Processing

UV

Raggi ultravioletti

\mathbf{FFF}

Fused Filament Fabrication

PBF

Powder Bed Fusion

DED

Directed Energy Deposition

CAD

Computer-Aided Design

STL

Standard Triangulation Language

EBM

Electron Beam

DMLS

Direct Metal Laser Sintering

LENS

Laser Engineered Net Shaping

DMD

Direct Metal Deposition

HD

Hatch Distance

$\mathbf{W}\mathbf{A}\mathbf{A}\mathbf{M}$

Wire Arc AM

SMD

Shaped metal Deposition

SEM

Microscopia Elettronica a Scansione

HIP

Hot Isostatic Pressing

CFD

Computational Fluid Dynamics

MTOW

Maximum Take Off Weight

WST

Wing Static Test

\mathbf{EMC}

Electromagnetic Compatibility

FEM

Finite Element Method

\mathbf{CT}

Computed Tomography

Capitolo 1

Introduzione

L'industria aerospaziale rappresenta uno dei settori più esigenti in termini di prestazioni, affidabilità e sicurezza dei componenti utilizzati nei velivoli e nei sistemi spaziali. L'introduzione delle tecnologie additive, in particolare della stampa 3D, ha rivoluzionato la progettazione e la produzione di parti e componenti per queste applicazioni critiche. Da un'indagine condotta da Wohlers [1], si vede come l'industria aerospaziale da sola contribuisca al 18.2%, fig.1.1, del mercato dell'*Additive Manufacturing* (AM) odierno. Per questo motivo, l'aerospazio è considerato uno dei campi più promettenti per quanto riguarda l'AM.

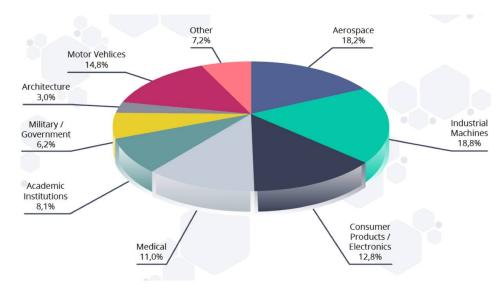


Figura 1.1: Campi impiego AM [1]

Le tecniche di AM sono basate sul principio fondamentale che il componente finale è ottenuto con addizione di materiale (di solito *layer-by-layer*). Il rapido sviluppo dell'AM è connesso con alcuni vantaggi, fra i quali si segnala un'elevata accuratezza dimensionale e una riduzione dei tempi di produzione. Inoltre, determinate tecniche, fra le quali l'FDM, sono anche economiche ed ecologiche, [2].

Le tecniche AM sono ideali per i componenti aerospaziali, poiché questi ultimi richiedono le seguenti caratteristiche fondamentali:

- Geometria complessa;
- Difficoltà di lavorazione dei materiali ed elevati rapporti di peso materiale grezzo peso componente finale: infatti l'industria aerospaziale utilizza materiali costosi molto difficili da lavorare con i metodi classici, creando tanto materiale di scarto (fino al 95%), l'AM riduce lo scarto (fino ad arrivare a circa il 10 20%) e permette forme complesse;
- Produzione personalizzata;
- Produzione a richiesta: gli aeroplani hanno una vita di servizio molto lunga (circa 30 anni) e ci sono quindi alti costi per la manutenzione che possono essere ridotti con l'AM;
- Elevato rapporto prestazioni peso: i componenti aerospaziali devono essere leggeri con elevate prestazioni specifiche.

Tuttavia, l'adozione di questa tecnologia in contesti aerospaziali presenta anche sfide significative legate alla qualità, alla certificazione e alla sicurezza dei componenti fabbricati, [3].

L'AM consente applicazione rivoluzionarie nei campi biomedico, aerospaziale, delle costruzioni civili e delle strutture protettive. Attualmente i materiali di impiego più comuni sono: leghe metalliche, polimeri, compositi, ceramici e calcestruzzo. Per quanto riguarda il settore aerospaziale, i materiali principalmente utilizzati sono metalli avanzati e leghe, poiché i processi tradizionali ad essi connessi sono time-consuming, difficoltosi e costosi.

La convenienza delle tecniche di AM merita alcune considerazioni che sono messe in evidenza nei seguenti grafici.

Nel grafico a sinistra, fig.1.2, è possibile notare come all'aumentare del numero delle unità prodotte tramite AM, il costo unitario rimane costante, contrariamente a quanto avviene per le tecnologie tradizionali, dove invece

il costo si riduce all'aumentare del numero delle unità, quindi è possibile dedurre che per un gran numero di geometrie semplice risulti più conveniente l'utilizzo di tecnologie tradizionali.

Nel grafico a destra, fig.1.3, invece, è possibile notare come all'aumentare della complessità della geometria e del design, il costo unitario per l'AM rimane sempre costante, mentre quello relativo alle tecnologie tradizionali aumenta drasticamente, ciò dimostra come sia evidentemente più conveniente l'utilizzo delle tecnologie AM in casi di geometrie e design particolarmente complessi.

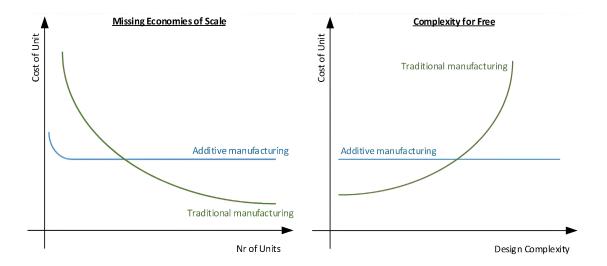


Figura 1.2: Costo unitario - Numero Figura 1.3: Costo unitario - Comunità, [4] plessità design, [4]

Inoltre è possibile dare un'idea sulla distribuzione dei costi per le tecnologie AM, in particolare si nota come gran parte dei costi sia dedicata al costo macchina (74%), il restante quarto dei costi è invece suddiviso tra costi materiale, costi di post-processing e di preparazione, fig.1.4.

La tesi è stata suddivisa in cinque parti principali. La prima parte è di introduzione e descrittiva del processo di produzione scelto (SLM Selective Laser Melting, facente parte delle tecniche LPBF Laser Powder Bed Fusion) per i componenti, che sono stati oggetto di analisi in questo studio. Nella seconda parte si sono introdotti i componenti selezionati, descrivendone la geometria, il materiale e la loro applicazione. Successivamente, nella

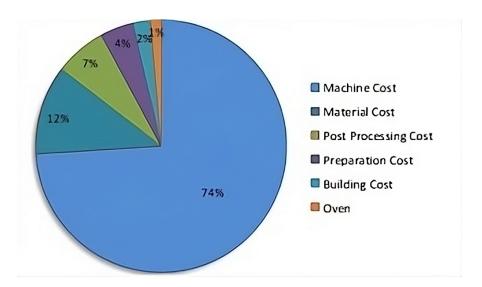


Figura 1.4: Distribuzione dei costi per l'AM, [4]

terza parte viene descritto il processo di simulazione numerica, il software utilizzato che ha portato alla valutazione delle deformazioni interne dei componenti selezionati. Parallelamente, nella quarta parte, è riportata l'analisi sperimentale svolta mediante tomografia computerizzata su uno dei componenti scelti, riportandone risultati riguardo la presenza di difettosità all'interno del componente selezionato rispetto al componente nominale. Infine, nella quinta e ultima parte, viene presentato un confronto numerico sperimentale tramite i risultati ottenuti nei precedenti capitoli.

Capitolo 2

Processi di produzione

Le tecnologie AM comprendono una vasta gamma di processi tra cui ricordiamo:

- VAT Photopolymerization: è una tecnologia di stampa 3D che utilizza la polimerizzazione di resine fotosensibili mediante l'irradiazione con luce ultravioletta o laser per creare oggetti tridimensionali strato per strato. Questo processo è anche conosciuto come SLA o DLP, a seconda della tecnica specifica utilizzata;
- Material Jetting è una tecnologia di stampa 3D che utilizza una testa di stampa simile a quella di una stampante a getto d'inchiostro, ma anziché depositare inchiostro, deposita materiali polimerici o ceramici liquidi in strati sottili su un substrato. Questi materiali vengono solidificati successivamente tramite indurimento UV o termico per creare oggetti tridimensionali;
- Binder Jetting è una tecnologia di stampa 3D che utilizza una combinazione di polvere e un legante per creare oggetti tridimensionali strato per strato. Questa tecnologia è spesso utilizzata per la produzione di parti metalliche, ceramiche o in metallo-ceramica;
- Material Extrusion è una tecnica di stampa 3D che utilizza filamenti di materiali termoplastici o compositi termoplastici per creare oggetti tridimensionali strato per strato. Questa tecnologia è comunemente nota come FDM o FFF;
- Powder Bed Fusion è una tecnica di stampa 3D che utilizza polveri metalliche, ceramiche o polimeriche per creare oggetti tridimensionali

strato per strato. Questa tecnologia è utilizzata principalmente per la produzione di parti metalliche, ma può essere estesa anche ad altri materiali;

- Sheet Lamination è una tecnica di stampa 3D che utilizza fogli sottili di materiale, come carta, metallo o plastica, per creare oggetti tridimensionali strato per strato. Questa tecnologia è meno comune rispetto ad altre tecniche di stampa 3D, ma offre alcuni vantaggi unici in determinate applicazioni;
- Directed Energy Deposition è una tecnica di fabbricazione additiva che utilizza un fascio di energia, solitamente un laser o un fascio di elettroni, per depositare materiali fusi su un substrato, creando oggetti tridimensionali strato per strato. Questa tecnologia è spesso utilizzata per la riparazione, la ricostruzione e la fabbricazione di componenti di grandi dimensioni o complessi.

In particolare, per lo studio svolto, ci si vuole soffermare sul processo PBF, il quale consiste in sottili strati di polveri fine che vengono spalmati e compattati su una piattaforma. In ogni strato, le polveri vengono fuse insieme attraverso un raggio laser, per polveri con basse temperature di fusione/sinterizzazione, o un opportuno liquido legante. Gli strati successivi di polvere vengono laminati sul top degli strati precedenti e fusi insieme, fino a ottenere il pezzo 3D finale. La polvere in eccesso è quindi rimossa sottovuoto e, se necessario, con ulteriori processi come rivestimenti, sinterizzazione o infiltrazioni. La dimensione, distribuzione e impacchettamento delle polveri determinano la densità delle parti stampate, ed essi sono fattori cruciali per determinare l'efficacia del metodo.

2.1 Processo di design AM

Dopo aver selezionato il processo produttivo, il quale deve tenere conto del volume delle parti in rapporto allo spessore del layer e in rapporto al deposition rate (quanto materiale è possibile depositare al minuto), e dell'aspetto economico, è possibile passare al processo di design.

Una delle peculiarità dell'AM è che non si ha estrazione del componente andando a rimuovere del materiale, ma si va ad aggiungere materiale dove necessario, costruendo in questo modo il componente finale. Pertanto, l'AM richiede un punto di vista di progettazione differente dalle tecnologie tradizionali.

In particolare, aggiungendo materiale è possibile ottimizzare il componente senza limitazioni sulla forma finale, e quindi si ha la possibilità di definire anche la conformazione interna, utilizzando strategie vantaggiose per il prodotto finale. Inoltre, è possibile modificare il materiale di strato in strato, ottimizzare la deposizione del materiale, avere un orientamento non convenzionale e avere un componente finale finito in cui il post-processing spesso è molto limitato.

L'obiettivo del processo di design è quindi quello di massimizzare le performance del prodotto finale attraverso la scelta opportuna delle forme, delle dimensioni, della scala gerarchica e dei materiali.

Il processo di design si sviluppa in diversi step:

- 1. Definizione delle specifiche di progetto: è necessario definire nel modo più specifico possibile quali devono essere le performance finali del componente;
- 2. Design preliminare: si deve definire una configurazione che deve essere il più possibile in grado di soddisfare le richieste iniziali, uno degli strumenti utili per fare queste valutazioni è l'ottimizzazione topologica;
- 3. Design di dettaglio: si devono definire le proprietà finali, finitura superficiale e tolleranze, passando quindi a una forma definitiva e attraverso strumenti di analisi strutturale si verifica, almeno in maniera teorica, che il design definitivo rispetti i requisiti iniziali;
- 4. CAD: la fase di creazione del CAD è spesso svolta in modo parallelo alla precedente;
- 5. Geometria volumetrica: conversione in file STL tramite la triangolarizzazione delle superfici;
- 6. Definizione dell'orientamento del pezzo in macchina: influisce sia sulla qualità superficiale sia sulla necessità di supportare le superfici;
- 7. Definizione dei supporti, se necessari: hanno la funzione di supportare il componente che potrebbe collassare;

- 8. Slicing: si va ad "affettare" il componente e i supporti, tramite dei software appositi, in modo tale da creare gli strati che verranno realizzati dalla macchina tramite la deposizione di materiale;
- 9. Definizione del percorso di stampa e dei parametri di processo;
- 10. Manifattura: fase in cui si possono acquisire una serie di dati che possono essere utili a verificare se sono stati rispettati tutti i parametri in input;
- 11. Ispezione e certificazione: verifica delle qualità dimensionali e meccaniche, una fase che può essere molto costosa.

2.2 Materiali per AM metallico

Le tecnologie additive, possono lavorare con una vasta gamma di materiali, ciascuno con caratteristiche e proprietà uniche. Quelli su cui si concentrerà questo studio sono i materiali metallici. In particolare, la scelta dei materiali interviene su diversi aspetti del processo: progettazione, produzione delle materie prime, gestione del processo, post-processing, riciclo e riuso delle materie prime.

In generale, le tecniche AM utilizzate per i materiali metallici sono PBF e DED, è possibile confrontare la velocità dei due processi nel seguente grafico, fig.2.1, che rapporta il deposition rate (cc/h) con il layer thickness (μm) . Nel grafico sottostante, è possibile notare come il processo PBF risulti relativamente lento rispetto ad altre tecnologie, poiché richiede la fusione di strati sottili di polvere metallica uno dopo l'altro. Allo stesso tempo, però, PBF offre alta precisione e dettagli fini, il che lo rende ideale per la produzione di componenti con geometrie complesse e piccoli dettagli. Per quanto riguarda il processo DED, invece, si nota come sia generalmente più veloce di PBF, poiché il materiale viene depositato su un substrato in modo più diretto e continuo, senza la necessità di fondere e solidificare interi strati di polvere metallica. Pertanto, si preferisce PBF per la produzione di componenti con alta precisione e dettagli fini, mentre DED è più adatto per la produzione di componenti di grandi dimensioni e la riparazione di parti esistenti. La scelta tra le due tecnologie dipende, in ogni caso, dalle specifiche esigenze del progetto, compresa la velocità di produzione desiderata, la complessità del pezzo e il materiale utilizzato.

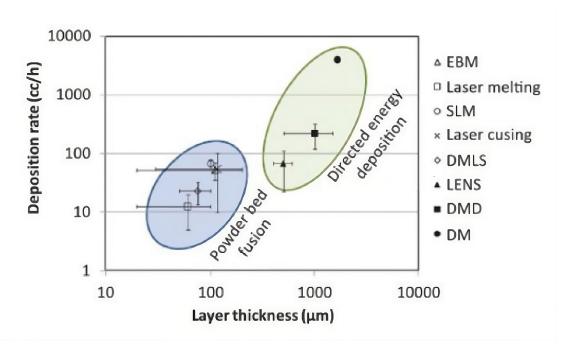


Figura 2.1: Confronto velocità di processo per PBF e DED, [5]

In entrambi questi due processi, durante la fase di fusione del materiale si crea una regione localizzata di materiale fuso, definita *melt pool*. Ciò avviene però, a seconda della tecnologia utilizzata PBF o DED, seguendo principi diversi che conducono alla definizione di condizioni al contorno completamente differenti.

In particolare, nelle tecnologie a letto di polvere (PBF), è possibile visualizzare localmente una serie di particelle metalliche che vengono investite da una grande quantità di energia che arriva mediante laser o fascio elettronico, in modo tale da portare il materiale a fusione e poi alla ri-solidificazione. Tutto ciò avviene in un volume molto piccolo che dipende dallo spessore del layer e dallo *spot*, ossia il diametro della sorgente di energia.

Nelle tecnologie a deposizione diretta (DED), invece, lo spruzzo della polvere avviene co-assialmente al laser e durante questo attraversamento si ha una fusione superficiale della polvere, in modo tale che quando giunge nella pozza fusa, rimanga attaccata alla superficie solidificata. Il fascio laser mantiene fusa, inoltre, anche la superficie appena depositata. Quindi, anche in questo caso il volume interessato comprende anche gli strati precedenti e ciò è fondamentale perché così facendo si riescono fondere due starti, l'uno sull'altro,

in modo tale che non ci siano fenomeni di delaminazione o di distacco di uno strato rispetto all'altro, garantendo quindi, migliori prestazioni meccaniche.

Per poter utilizzare in maniera ottimale questi due processi, è necessaria una prima fase di messa a punto. Nel migliore dei casi, la prima cosa da fare, avendo una macchina per AM e volendo iniziare la produzione con un dato materiale, è quella di creare dei *job* con una serie di combinazioni dei parametri di processo, per poter definire quelle che sono le condizioni di lavoro ideali per quella determinata macchina e quella determinata polvere. I parametri di processo base da definire sono:

- Hatch Distance (HD): distanza tra le tracce successive di deposito del materiale fuso durante la stampa, è un parametro critico che deve essere ottimizzato durante il processo di fabbricazione additiva per garantire risultati di stampa di alta qualità;
- Potenza del laser: quantità di energia luminosa emessa dal laser e ha un impatto significativo sulla velocità di fusione del materiale, sulla profondità di penetrazione e sulla qualità complessiva del processo di stampa;
- Velocità di scansione: definisce la velocità a cui il fascio laser o il fascio di energia viene spostato sopra il materiale di fabbricazione durante il processo di stampa, e ha un impatto significativo sulla qualità, sulla precisione e sulla velocità complessiva del processo di stampa;
- Spot laser: nel contesto del LPBF, rappresenta l'area di influenza del fascio laser sulla superficie del materiale di base o della polvere metallica, e influenza diversi aspetti del processo di stampa, tra cui: la risoluzione, i dettagli dei bordi, il controllo del calore e la velocità di stampa;
- Layer thickness: spessore verticale di ciascuno strato di materiale depositato durante il processo di stampa, ed è un parametro critico che deve essere ottimizzato per ottenere i migliori risultati di stampa in termini di qualità, risoluzione, velocità e resistenza dell'oggetto finito;
- Contour lines: linee che definiscono i contorni esterni o interni di un oggetto tridimensionale durante il processo di fabbricazione additiva e la loro ottimizzazione è importante per garantire risultati di stampa di alta qualità in termini di precisione, finitura superficiale e resistenza dell'oggetto finito.

Oltre a questi parametri di base, ci sono anche altri fattori da considerare come la temperatura della camera di fabbricazione, il pre-riscaldamento del substrato, il tipo e la qualità del materiale di alimentazione e così via. Come già anticipato, quindi, l'ottimizzazione dei parametri di processo è un processo iterativo che richiede esperienza e test per ottenere i migliori risultati.

Si possono, inoltre, confrontare tramite il seguente grafico, fig.2.2, le caratteristiche meccaniche di resistenza a trazione e allungamento a rottura dei componenti prodotti mediante tecnologia a letto di polvere con fascio elettronico (resistenza a trazione $\cong 900MPa$, allungamento a rottura $\cong 9\%$), tecnologia a letto di polvere con laser (resistenza a trazione $\cong 1000 \div 1300MPa$, allungamento a rottura $\cong 8\%$) e materiale ottenuto da casting (resistenza a trazione $\cong 700 \div 800MPa$, allungamento a rottura $\cong 13\%$).

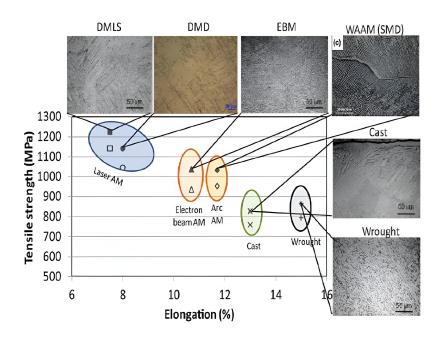


Figura 2.2: Confronto caratteristiche meccaniche [5]

2.2.1 Polveri metalliche per i processi AM

La produzione delle polveri metalliche per i processi AM, generalmente consiste in 3 fasi:

- 1. Metallo puro o lega sotto forma di lingotto: questo è il punto di partenza per la produzione della polvere;
- 2. Produzione della polvere: fase che prende il nome di atomizzazione ed è una fase relativamente complicata;
- 3. Validazione delle polveri: sia dal punto di vista composizionale che dal punto di vista geometrico-morfologico.

Si vuole notare che i range dimensionali, delle particelle prodotte dall'atomizzazione, richiesti per le diverse tecnologie AM, sono:

• tecnologie a letto di polvere:

```
- \text{ EBM: } 45 - 100 \mu m;
```

- SLM e DMLS: $15 - 45\mu m$;

• tecnologie a deposizione diretta: LENS e DED: $25-45\mu m$.

L'atomizzazione può essere di diversa tipologia:

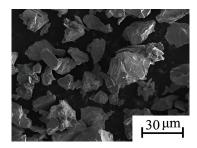
- Water Atomisation;
- Gas Atomisation;
- Plasma Atomisation;
- Altro tipo (ad esempio: centrifugal, ultrasonic).

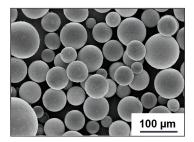
La tecnica di Water Atomisation è possibile utilizzarla soprattutto con materiali non reattivi, come ad esempio l'acciaio. Con questa tipologia, si ha una produzione di particelle con range dimensionale dell'ordine di $0-500\mu m$, pertanto è possibile differenziare la polvere prodotta per tutte le tecnologie di fabbricazione additiva. Tra gli svantaggi si ricorda la necessità di post-processing per poter eliminare l'acqua residua, la forma delle particelle che risulta essere lontana dalla forma sferica e la resa bassa $\cong 20-150\mu m$, fig.2.3.

La Gas Atomisation, invece, è la tecnica più utilizzata per la produzione di polveri metalliche per AM, infatti è adatta si per materiali non reattivi che per leghe reattive. Le particelle hanno lo stesso range dimensionale della Water Atomisation. Inoltre, tra i vantaggi si ricorda la sfericità perfetta delle particelle e la superficie molto liscia di queste, influenzando quindi in maniera positiva la qualità del processo additive. Allo stesso tempo però, tra gli svantaggi si nota, anche in questo caso, la resa bassa $\cong 20-150\mu m$ e la presenza di "satelliti", ovvero delle particelle molto fini che vengono attratte dalla superficie delle particelle più grandi, andando quindi a formare una sorta di agglomerati, fig.2.4.

Infine, la Plasma Atomisation produce particelle con range dimensionale $0-200\mu m$ e tra i suoi vantaggi si ha una migliore sfericità delle particelle rispetto alla Gas Atomisation e un altissima purezza in quanto non si ha fusione. Infatti, il materiale di partenza, in questo caso, risulta essere la polvere metallica, che rappresenta quindi uno svantaggio per questa metodologia, e quindi l'atomizzazione influisce solo sulla forma, fig.2.5.

Nelle figure sottostanti, è possibile visualizzare la scansione a microscopio elettronico delle particelle prodotte dalle tre diverse tipologie di atomizzazione.





sation, [6]

tion, [7]

Figura 2.3: Microgra- Figura 2.4: Microgra- Figura 2.5: Micrografia SEM di Water Atomi- fia SEM di Gas Atomisa- fia SEM di Plasma Atomisation, [8]

A seguito della produzione della polvere, con una delle tecnologie presentate, vi è una fase di post-processing, in cui si classifica la polvere prodotta per range dimensionale, separando quella appartenente al range di nostro interesse, attraverso il processo di setacciatura, il quale deve avvenire in un ambiente controllato per evitare contaminazioni. In questo processo si usano dei setacci che permettono il passaggio di particelle di una determinata dimensione.

Le polveri metalliche per AM, disponibili sul mercato sono relativamente poche, si hanno:

• Leghe di Alluminio: AlSi10Mg (più studiata), AlSi7Mg, AlSi12;

- Leghe di Cobalto: CoCrWC, ASTMF75;
- Acciai: H13, Mirage300 e altri;
- Acciai inossidabili: SS304, SS316L e altri;
- Leghe di Nichel: Inconel 718, Inconel 625, Hastelloy X e altre;
- Leghe di Titanio: Ti6Al4V (materiale ad oggi più certificato per quanto riguarda le applicazioni AM biomedicali e aerospaziali);
- Leghe di rame;
- Materiali preziosi.

Risulta necessario valutare, nel momento in cui si utilizza una nuova polvere metallica per l'AM, alcune caratteristiche fondamentali delle polveri che influiscono sulla qualità del componente finale:

- Composizione chimica;
- Dimensione delle particelle;
- Distribuzione granulometrica;
- Assenza di porosità;
- Scorrevolezza della polvere;
- Densità apparente;
- Morfologia;

Tutte queste caratteristiche sono definite nella normativa ASTM F3049 - Guida Standard della caratterizzazione delle proprietà delle polveri metalliche usate nei processi AM, [9].

2.2.2 Trattamenti termici post-processing

Prima di rimuovere i componenti dalla piattaforma di macchina, è possibile utilizzare alcuni trattamenti termici post-processing per ridurre gli stress residui. Successivamente alla rimozione dalla piattaforma, invece, i trattamenti termici possono essere utilizzati per eliminare porosità interne e migliorare

le prestazioni meccaniche del componente.

L'Hot Isosatic Pressing (HIP) viene utilizzato per eliminare i pori e cricche interne. In questo trattamento si utilizzano pressioni (400-2070bar) e temperature (fino a $2000^{\circ}C$) molto elevate, in questo modo si modifica lo stato interno, andando a chiudere eventuali pori o cricche, fig.2.6, ottenendo un volume leggermente più piccolo ma senza porosità residue. HIP è un trattamento che viene sempre utilizzato nelle applicazioni aerospaziali, per qualsiasi tecnologia additiva. Dopo aver effettuato il trattamento HIP si

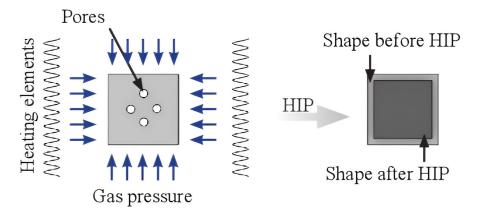


Figura 2.6: Schema descrittivo del trattamento HIP, [10]

possono ottenere i seguenti benefici:

- raggiungere il 100% di densità teorica, in modo da avere una vita a esercizio e a fatica più lunga;
- migliorare l'efficienza di produzione, infatti l'AM combinata con HIP può ridurre l'energia usata del 50% e i costi dei materiali del 90%.

Nonostante ciò, il trattamento HIP modifica le proprietà del materiale e le sue prestazioni. Nel seguente grafico, fig.2.7, è possibile confrontare le curve sforzo-deformazione nei differenti casi: componente senza alcun trattamento (in nero), componente con solo trattamento termico (in rosso) e componente con trattamento HIP a 50bar (in giallo) e a 1050-2000bar (in verde). É possibile notare come il componente as-built, nonostante le porosità abbia resistenza a trazione superiore al componente sottoposto HIP.

In generale quando si parla di metalli processati con AM, è possibile intervenire su quelle che sono le composizioni, le microstrutture, le proprietà

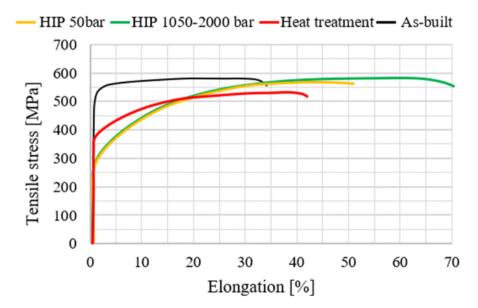


Figura 2.7: Confronto curve sforzo-deformazione, [11]

meccaniche attraverso ulteriori trattamenti termici che modificano lo stato dei grani, e tra questi ricordiamo: trattamento di recovery, trattamento di ricristallizzazione, trattamento di crescita dei grani; e che fanno evolvere la microstruttura, e tra questi ricordiamo: dissoluzione, precipitazione, crescita dei grani.

Un trattamento importante da ricordare, tra i trattamenti di recovery, perché molto diffuso è il trattamento di **Stress Relief**, in cui le condizioni di temperatura non sono elevatissime in quanto è solo necessario che la temperatura favorisca la diffusione allo stato solido degli atomi, in modo che si possano minimizzare gli stress tensionali. Inoltre, la temperatura, spesso, è scelta in modo tale che non avvengano altri fenomeni come la ricristallizzazione e la crescita dei grani, che potrebbero inficiare le proprietà meccaniche.

Molto spesso, però, a seguito dello stress relief, risulta comunque necessario effettuare un trattamento termico a temperature superiori, perché generalmente il materiale prodotto tramite AM presenta una microstruttura particolare in cui le proprietà meccaniche, a seconda della forma e orientamento dei grani, risultano diverse a seconda delle direzioni. Pertanto, si procede con un trattamento termico per omogeneizzare la struttura ed eliminare l'anisotropia dei grani orientati: questo è il trattamento di **ricristallizzazione**.

Inoltre, risulta importante, controllare i fenomeni di **precipitazione** e crescita dei precipitati, attraverso trattamenti termici come il trattamento di solubilizzazione per eliminare i precipitati che si sono formati secondo un percorso non ideale, e il trattamento di invecchiamento per promuovere la formazione di precipitati che aiutano il materiale ad essere più resistente. Come è possibile vedere nella fig.2.8, durante il trattamento di solubilizzazione, nella fase iniziale si ottiene una soluzione 100% solida che conduce al campo monofasico, successivamente si ha un raffreddamento rapido ovvero una tempra, e da qui inizia il trattamento di invecchiamento in condizioni di tempo e temperatura controllate, in modo da sviluppare i precipitati in maniera opportuna. Bisogna evitare la condizione di sovra-invecchiamento perché in tale condizione, i meccanismi di diffusione allo stato solido sono molto favoriti e quindi gli atomi di soluto tenderanno a concentrarsi tutti in alcune zone, lasciando troppe vie di fuga alle dislocazioni.

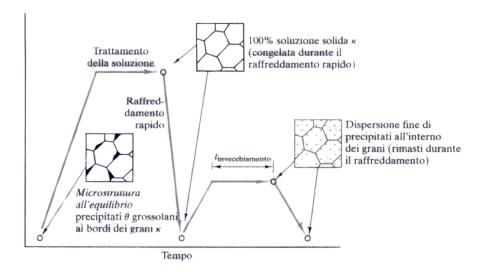


Figura 2.8: Schema dei trattamenti di solubilizzazione e invecchiamento, [12]

Infine, si hanno le **lavorazioni di finitura superficiale**, necessarie perché essendo il componente realizzato strato per strato, sul bordo ogni strato presenterà una sorta di incurvamento, fig.2.9, che dipenderà dallo spessore

del layer e dai parametri di processo. Inoltre, su questi incurvamenti ci possono essere anche una seri di particelle che nono sostate del tutto fuse e quindi è necessario migliorare la finitura superficiale.

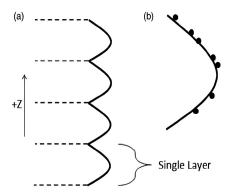


Figura 2.9: Incurvamenti sul bordo di ogni layer, [13]

2.2.3 Leghe metalliche per AM

É possibile confrontare nel grafico sottostante, fig.2.10, la resistenza specifica delle leghe sopracitate (σ/ρ) al variare della temperatura. Si ricorda:

- Leghe di alluminio: $\rho = 2.7g/cm^3$, E = 70GPa;
- Leghe di titanio: $\rho = 4.5g/cm^3$, E = 100GPa;
- Leghe di nichel: $\rho = 8.9g/cm^3$, E = 220GPa;

Si vuole procedere con analisi più specifica delle leghe citate. In particolare, le leghe di alluminio si possono ottenere con differenti combinazioni:

- 1000 Alluminio-Alluminio;
- 2000 Alluminio-Rame;
- 3000 Alluminio-Manganese;
- 4000 Alluminio-Silicio, molto utilizzate nell'AM, si ricorda infatti: Al-Si12;
- 5000 Alluminio-Magnesio;

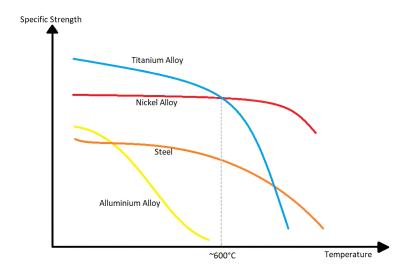


Figura 2.10: Resistenza specifica su temperatura per leghe metalliche, [14]

- 6000 Alluminio-Magnesio-Silicio, molto importanti nel settore aerospaziale, si ricorda infatti: AlSi10Mg;
- 7000 Alluminio-Zinco;
- 8000 Alluminio-altri elementi;

Processare le leghe di alluminio con l'AM risulta essere particolarmente difficile per diverse cause. In primis si ha un problema a livello di assorbimento, infatti, l'alluminio riesce ad assorbire poca energia dai sistemi laser presenti nelle macchine, la quale non risulta sufficiente per portare a fusione la polvere. Per questo motivo si cercano soluzioni alternative che abbiano laser con lunghezze d'onda differenti.

Superata la fase di fusione, l'alluminio risulta avere una viscosità bassa allo stato fuso, pertanto è necessario avere delle *melt pool* di dimensioni molto piccole in modo da concentrare l'energia della fusione in zone limitate. Infatti, le tecnologie a deposizione diretta che utilizzano degli *spot* più grandi rispetto alle tecnologie a letto di polvere, non sono adatte a processare le leghe di alluminio.

L'alluminio presenta, inoltre, una conducibilità termica elevata, pertanto nel momento in cui il laser colpisce la superficie di uno strato già solidificato, si può sviluppare una modifica dello stato tensionale, inducendo degli stress residui. Pertanto, vi è la necessità di inserire opportuni supporti per mitigare lo sviluppo degli stress residui o per aiutare il componente a distribuire le

tensione residue, in modo tale da evitare che il job si stacchi dalla piattaforma o dallo strato precedente.

Infine, l'alluminio richiede alte velocità di scansione.

Tra le leghe di alluminio, si vuole porre particolare attenzione sulla lega AlSi10Mg, che risulta essere la più utilizzata in assoluto. La sua composizione è la seguente: Si 9-11%, Fe $\leq 0.55\%$, Cu $\leq 0.55\%$, Mn $\leq 0.45\%$, Mg 0.2-0.45%, Zn $\leq 0.1\%$, Ti $\leq 0.15\%$, Al tutta la restante parte. La sua densità è $= 2.66g/cm^3$, la porosità residua è = 0.8%, la durezza è $= 105 \pm 5HV$, il modulo di Young è $= 73 \pm 1GPa$.

La lega AlSi10Mg può subire il trattamento di stress relief a una temperatura di $300^{\circ}C$ per 2h, il trattamento di solubilizzazione a $530^{\circ}C$ per 5h e il trattamento di invecchiamento a $160^{\circ}C$ per 12h. L'utilizzo dei trattamenti termici su AlSi10Mg rispetto alla condizione as-built, non porta guadagni sulla resistenza, anzi, riduce la resistenza a rottura ma vi è un guadagno sulla duttilità.

Un'ulteriore lega di alluminio da ricordare è la Scalmalloy, una lega di alluminio, magnesio e scandio. Questa è stata creata appositamente per l'AM, si è riusciti infatti, a creare una combinazione di atomi per la quale, una volta processata in una macchina AM, attraverso la fusione e risolidificazione, la scandio crea dei precipitati con l'alluminio che migliorano le prestazioni meccaniche di questa lega.

Nella tabella 2.1 è possibile mettere a confronto le caratteristiche meccaniche delle due leghe appena descritte.

	$\rho[g/cm^3]$	E[GPa]	$\sigma_y[MPa]$	$\sigma_r[MPa]$	$\epsilon\%$
AlSi10Mg	2.66	73	240	330	6.2
Scalmalloy	2.70	65	450	490	8.0

Tabella 2.1: Confronto caratteristiche meccaniche AlSi10Mg e Scalmalloy

Un'altra importante tipologia di materiali, è quella adatta ad alte temperature, e pertanto ha un ruolo fondamentale nella realizzazione dei motori aeronautici.

In particolare si ricordano le superleghe a base nichel (composizione: cromo, alluminio, titanio, molibdeno, renio e wolfarmio), che hanno una notevole

resistenza a carico statico e buona resistenza a fatica e scorrimento viscoso. Sono adatte ad un utilizzo per temperature operative $> 800^{\circ}C$. Per questa tipologia di leghe è necessario fare attenzione alla composizione della polvere che si utilizza nella processatura, in quanto se sono presenti quantità eccessive di cromo, molibdeno, wolfarmio e renio, si favorisce la precipitazione di fasi intermetalliche, peggiorando il comportamento meccanico delle superleghe. Tra le superleghe a base nichel ci sono: Inconel 625, Inconel 713, Inconel 718, Inconel 738, Inconel 939 (con questa si può già incorrere in fenomeni di cricche), e Hastelloy X (molto complicata da processare ma molto importante in ambito aerospaziale).

Inoltre, tra le leghe adatte ad alte temperature, vi sono anche le leghe a base di titanio, tra queste la più conosciuta per le tecnologie AM è Ti6Al4V, la quale risulta essere molto importante per applicazioni biomedicali e aerospaziali, in quanto possiede buona resistenza specifica. A seconda della tecnologia AM utilizzata su questa lega, si crea una microstruttura differente che dipende dalla velocità di solidificazione e dal gradiente termico. In particolare nella fig.2.11, è possibile notare come la combinazione delle tecnologie AM vada a creare una varietà infinita di comportamenti meccanici, ancora di più se si applicano trattamenti termici differenti.

2.3 Processo di produzione LPBF

Nei precedenti paragrafi si sono descritte tutte le caratteristiche delle polveri e dei materiali utilizzati nell'additive metallico e i vari trattamenti di post-processing che il componente realizzato può subire per migliorare le sue performance meccaniche. In questo paragrafo, ci si vuole concentrare sulla descrizione dettagliata del funzionamento del processo LPBF, ossia quello utilizzato per la realizzazione dei componenti che sono stati studiati in questa tesi.

Il processo LPBF è noto anche come **Selective Laser Sintering (SLS)** o **Selective Laser Melting (SLM)**, la differenza tra i due dipende dalla potenza del laser impiegato. Nella figura 2.12, è rappresentato uno schema descrittivo di come avviene il processo.

Il processo LPBF produce il componente finale per strati dal basso verso l'alto. Sono presenti lateralmente dei serbatoi che contengono polvere vergine

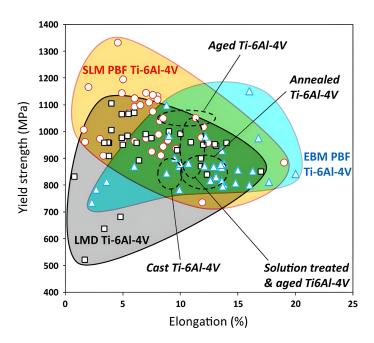


Figura 2.11: Resistenza allo snervameno e allungamento a rottura (%) per la lega Ti6Al4V processata con differenti tecnologie AM [15]

e che possono muoversi tramite un sistema di elevazione, in modo tale che ad ogni abbassamento della piattaforma di costruzione corrisponda un innalzamento del serbatoio contenente polvere vergine. É possibile lavorare con uno o due serbatoi, a seconda che il senso di deposizione sia monodirezionale o bidirezionale (solitamente si lavora con un solo serbatoio in modo da avere dall'altro lato un sistema di raccolta della polvere non utilizzata).

Nel processo SLS, il quale nasce con i polimeri, si utilizza un laser a CO_2 con potenze piuttosto basse, circa 50W, ossia una potenza sufficiente per i polimeri poiché si tiene l'ambiente di lavoro riscaldato, in modo tale che la polvere si trovi ad una temperatura vicina a quella di transizione e quindi la potenza risulti sufficiente a dare quell'apporto termico che permette il passaggio di sinterizzazione tra le particelle vicine.

Nel primo periodo in cui si è iniziato a lavorare con le polveri metalliche, si è cercato di adattare il SLS ai metalli, i quali però fondendo a temperature più elevate, creavano delle complicazioni. Per poter risolvere questi problemi si utilizzavano mix di polveri o polveri rivestite, ma non avendo completa fusione, si otteneva un componente costituito da una miscela di materiali

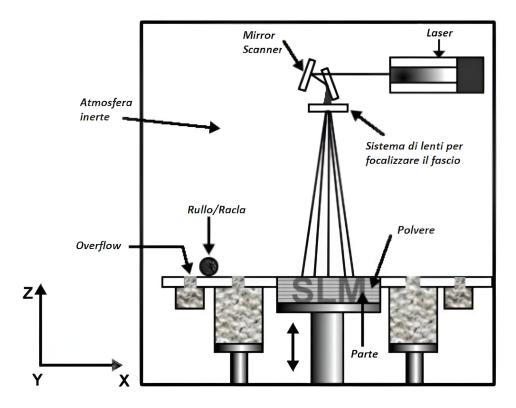


Figura 2.12: Schema descrittivo dei processi SLM e SLS [16]

con elevate porosità residue. Pertanto, sviluppando la tecnologia si è passati ad una nuova sorgente, il laser fibra, il quale presenta diversi vantaggi, tra cui una lunghezza d'onda più bassa rispetto a CO_2 e per cui per i metalli si ha un maggiore assorbimento. In questo modo nasce il processo SLM. Utilizzando questa tipologia di laser è stato possibile aumentare la potenza $(200W,\,400W,\,1000W)$, che focalizzata su uno spot così piccolo, produce una densità di potenza molto elevata che permette di avere un elevato apporto termico e quindi di portare a completa fusione la polvere metallica. Si ottengono, in questo modo, componenti con densità $> 99.7 \div 99.8\%$ e con porosità residue molto piccole e minori rispetto a quelle che si ottengono in fonderia.

In questa tecnologia, i supporti risultano essere necessari per evitare il distacco del componente dalla piattaforma a causa del ritiro per solidificazione. I supporti sono realizzati dello stesso materiale del componente e sono assimilabili a una sorta di "impalcatura" che unisce la piattaforma alla

superficie del componente. Per facilitare la rimozione, molto spesso la superficie di contatto con il componente è dentellata, in modo tale da ridurre la tensione resistente e con non molta pressione, riuscire a rimuovere i supporti.

Le caratteristiche del componente finale prodotto con questa tecnologia sono:

- la superficie del componente presenta una certa rugosità, dovuta principalmente al processo di fusione e risolidificazione del materiale;
- nel processo SLM gli strati sono molto piccoli $(20 \div 60 \mu m)$, pertanto si perde l'effetto della scalettatura dei *layer* e predomina l'effetto di fusione e risolidificazione;
- la rugosità può dipendere anche dalla presenza di particelle non fuse alla superficie;
- granulometria $\cong 35 40 \mu m$;
- rugosità superficiale $\cong 10\mu m$, confrontabile con quella che ci si può aspettare dai processi di fonderia;
- le tolleranze in z sono legate allo spessore del layer, sul piano, invece, sono legate alle dimensioni dello spot del laser (0.1mm), in caso di tolleranze più fini richieste, bisogna ricorrere a lavorazioni di finitura superficiale;
- i limiti del volume del componente sono legati alla dimensione delle camere di lavoro (solitamente circa 250x250x250mm). Esistono anche macchine con camere di lavoro più grandi, realizzate soprattutto per aumentare la produttività e presentano 2 o 4 laser combinati. Infatti, ciò non significa che questa tipologia di macchine siano pensate per componenti più grandi ma principalmente per più componenti di dimensioni medio-piccole, in quanto all'aumentare dei volumi richiesti, aumentano anche le tensioni residue.

Tra le aziende produttrici dei sistemi LPBF si ricorda:

- EOS (Germania), [17];
- Concept Laser (Germania), [18];
- Renishaw (UK), [19];

- 3D Systems (USA), [20];
- SLM Solutions (Germania), [21];
- SISMA (Italia), [22].

Capitolo 3

Componenti oggetto di studio

Le parti che sono state oggetto di studio in questa tesi, sono dei componenti con applicazione aerospaziale, realizzati in lega di alluminio AlSi10Mg, mediante tecnologia SLM, da SPEM Additive [23], Torino, azienda specializzata nel settore AM e commissionati dal team studentesco Team S55 [24], DIMEAS, Politecnico di Torino.

3.1 Team S55

Il Team S55 [25] è un team studentesco del Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale.

Il Team S55 [26] nasce nel Febbraio del 2017 da un piccolo gruppo di studenti del Politecnico di Torino, guidati dalla passione per l'aeronautica e con l'obiettivo di aiutare il gruppo "Replica 55" [27] e [28], nel progettare una replica volante dell'idrovolante Savoia-Marchetti S55X.

Il Team S55, nel corso degli anni, ha focalizzato le sue attività sulla realizzazione di un prototipo volante in scala 1 : 8 (3m di apertura alare) dell'idrovolante S55X, fig.3.1, con propulsione elettrica nella prima versione e propulsione con fuel cell a idrogeno nella seconda versione, portando avanti un progetto aeronautico a 360°. Partendo dal CAD del progetto, attraverso le analisi strutturali (svolte con il codice agli elementi finiti NASTRAN,

usando ANSA come pre-processor, sviluppato da BETA CAE System [29]) e le analisi aerodinamiche [30], [31] e [32] (svolte attraverso simulazioni CFD, usando STAR CCM+ sviluppato da Siemens [33]), il team ha dimensionato e scalato tutti i componenti del velivolo, ponendo sempre particolare attenzione allo studio del Weight & Balance, in particolare alla posizione del centro di massa e al MTOW del velivolo scalato, per poter assicurare delle buone caratteristiche di volo. Successivamente, il prototipo viene testato sperimentalmente sia per la parte strutturale tramite: il WST [34], la determinazione sperimentale del baricentro e dei momenti di inerzia, e la prova sperimentale per spinta delle eliche; sia per i sistemi di bordo, in particolare tramite test sperimentali di EMC; sia per l'interazione fluido-struttura durante la fase di impatto [35], [36] e [37]. Infine il velivolo viene testato durante le prove di volo.

Risulta quindi evidente che la forza trainante del Team S55 è la possibilità di vivere un'esperienza di progettazione integrata tra le varie discipline, non solo tecniche, ma anche manageriali, anticipando in un certo senso, quella che è l'esperienza lavorativa aziendale [38].



Figura 3.1: S55_02 realizzato dal Team S55 in esposizione alla mostra organizzata dal Centro Storico Fiat, Torino

L'idrovolante S55X, fig.3.1 ha la configurazione di un catamarano, dotato di due motori. Vi sono tre timoni che sormontano un piano di coda collegato

alla fusoliera da quattro travi. La realizzazione del prototipo ha richiesto uno studio completo sui materiali più idonei a soddisfare i requisiti della competizione internazionale F4-Scale World Championship. Questa competizione prevede requisiti specifici per quanto riguarda sia l'estetica dell'aeromodello, che deve essere il più vicino possibile all'aereo originale, sia il suo peso massimo (MTOW di 25kg). Per questo, la scelta dei materiali e quindi il processo produttivo sono stati orientati a moderne soluzioni composite leggere (come fibre di carbonio, vetro e Kevlar) [39] e a tecnologie moderne come la produzione additiva AM metallica e plastica [40].

3.2 Componenti in AM metallico del Team S55

Questo studio vuole concentrarsi in particolar modo sui componenti realizzati in AM metallico per applicazione sul prototipo realizzato dal Team S55. Tali componenti rappresentano, nel prototipo, le parti di collegamento tra gli elementi principali del velivolo.

Segue la definizione in dettaglio dei componenti realizzati nella tabella 3.1, con la relativa posizione sul velivolo in fig.3.2.

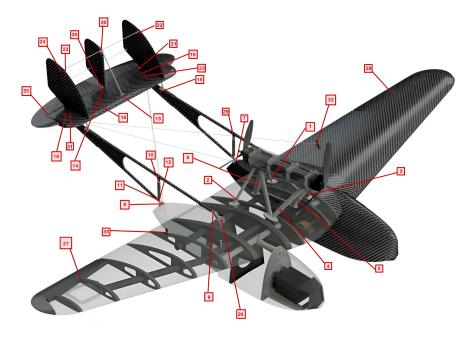


Figura 3.2: Schema posizionamento componenti AM metallico

Numero	Nome	Quantità	Massa [g]	Prezzo unitario [€]	Figura
1	CM-C-POST-SX	1	57.50	269.00	3.3, 3.4
2	CM-C-POST-DX	1	57.00	268.00	3.5, 3.6
3	CM-C-ANT-SX	1	155.60	659.00	3.7, 3.8
4	CM-C-ANT-DX	1	146.10	660.00	3.9, 3.10
5	CM-V-ANT	1	36.40	144.00	3.11, 3.12
6	CM-V-POST	1	38.30	153.00	3.13, 3.14
7	S-ATK-R	1	7.00	30.00	3.15, 3.16
8	Specch. S-ATK-R	1	7.00	30.00	3.15, 3.16
9	AS-ATK-2	2	9.50	41.00	3.17, 3.18
10	AS-ATK-3	2	2.40	11.00	3.19, 3.20
11	AS-ATK-4	2	6.00	26.00	3.21, 3.22
12	AS-ATK-5	2	2.20	11.00	3.23, 3.24
13	ST-ATK-ANT	2	1.80	8.00	3.25, 3.27
14	ST-ATK-POST	2	1.50	8.00	3.26, 3.27
15	AS-ATK-CODA-ANT	2	5.20	21.00	3.28, 3.29
16	ST-ATK-C4	1	2.80	11.00	3.30, 3.32
17	A-OBL-ATK	1	1.00	5.00	3.31, 3.32
18	AS-ATK-CODA-POST	1	9.60	41.00	3.33, 3.35
19	Specch. AS-ATK-CODA-POST	1	9.70	41.00	3.34, 3.35
20	C-SUP-P1	1	10.20	42.00	3.36, 3.37
21	D-ATK-STAB	2	2.20	9.00	3.38, 3.39
22	D-ATK-TRAV	1	1.50	6.00	3.40, 3.41
23	Specch. D-ATK-TRAV	1	1.50	6.00	3.41, 3.42
24	P-ST-D-30	2	1.00	4.00	3.43, 3.45
25	P-ST-D-60	2	1.00	4.00	3.44, 3.45
26	S-ATK-ANT	2	20.40	87.00	3.46, 3.47
27	A-P	1	0.90	4.00	3.48, 3.50
28	Specch. A-P	1	0.80	4.00	3.49, 3.50
29	AS-AV-ATK	2	5.40	21.00	3.51, 3.52
30	C-INF-ATK-FUNI	1	3.30	15.00	3.53, 3.54
31	T-P-CENTR	1	0.50	3.00	3.55, 3.59
32	T-P-LAT	1	0.40	3.00	3.56, 3.59
34	Specch. T-P-CENTR	1	0.50	3.00	3.57, 3.59
35	Specch. T-P-LAT	1	0.40	3.00	3.58, 3.59

Tabella 3.1: Lista componenti realizzati in AM metallico per il Team S55

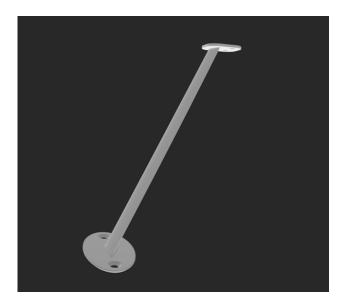


Figura 3.3: CM-C-POST-SX CAD



Figura 3.4: CM-C-POST-SX reale



Figura 3.5: CM-C-POST-DX CAD



Figura 3.6: CM-C-POST-DX reale





Figura 3.7: CM-C-ANT-SX CAD

Figura 3.8: CM-C-ANT-SX reale





Figura 3.9: CM-C-ANT-DX CAD Figura 3.10: CM-C-ANT-DX reale

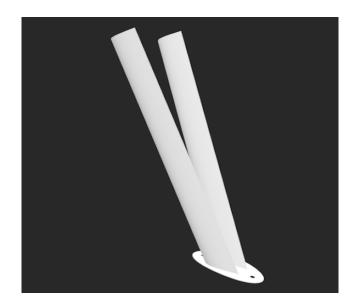


Figura 3.11: CM-V-ANT CAD



Figura 3.12: CM-V-ANT reale

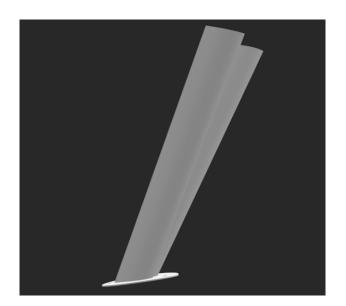


Figura 3.13: CM-V-POST CAD



Figura 3.14: CM-V-POST reale

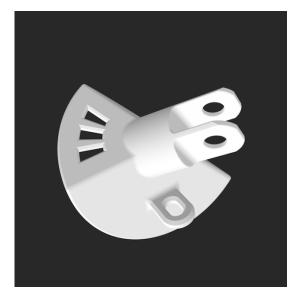




Figura 3.15: S-ATK-R CAD

Figura 3.16: S-ATK-R e Specch. reale

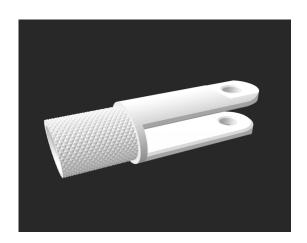


Figura 3.17: AS-ATK-2 CAD



Figura 3.18: AS-ATK-2 reale

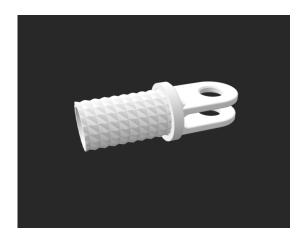






Figura 3.20: AS-ATK-3 reale

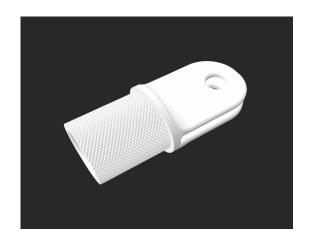


Figura 3.21: AS-ATK-4 CAD



Figura 3.22: AS-ATK-4 reale

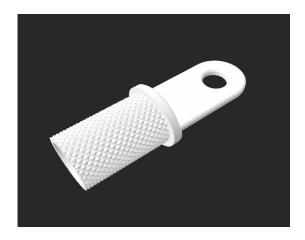






Figura 3.24: AS-ATK-5 reale

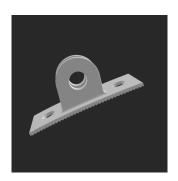


Figura 3.25: STATK-ANT CAD



ST- **Figura 3.26:** ST-ATK- **Figura 3.27:** POST CAD ANT e ST-ATK



Figura 3.27: ST-ATK-ANT e ST-ATK-POST reale

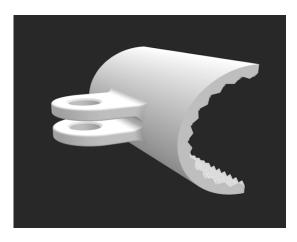




Figura 3.28: AS-ATK-CODA-ANT Figura 3.29: AS-ATK-CODA-ANT CADreale







Figura 3.30: ATK-C4 CAD

ATK CAD

ST- Figura 3.31: A-OBL- Figura 3.32: ST-ATK-C4 e A-OBL-ATK reale







Figura 3.33: ATK-CODA-POST CAD

AS- Figura 3.34: Speech. Figura 3.35: CAD

AS-ATK-AS-ATK-CODA-POST CODA-POST e Specch. AS-ATK-CODA-POST reale



Figura 3.36: C-SUP-P1 CAD



Figura 3.37: C-SUP-P1 reale

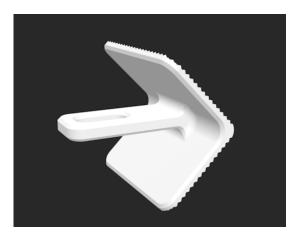




Figura 3.38: D-ATK-STAB CAD

Figura 3.39: D-ATK-STAB reale







Figura 3.40: I ATK-TRAV CAD

D- **Figura 3.41:** Speech. **Figura 3.42:** D-ATK-TRAV CAD TRAV e Speech

Figura 3.42: D-ATK-TRAV e Specch. D-ATK-TRAV reale







D-30 CAD

 $60~\mathrm{CAD}$

Figura 3.43: P-ST- Figura 3.44: P-ST-D- Figura 3.45: P-ST-D-30 $\mathrm e$ P-ST-D-60 reale







Figura 3.47: S-ATK-ANT reale







Figura 3.48: A-P Figura 3.49: Specch. Figura 3.50: CAD

A-P CAD

Specch. A-P reale

A-P e

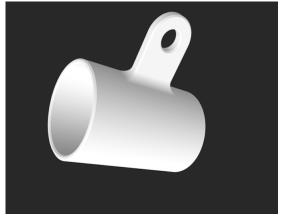






Figura 3.52: AS-AV-ATK reale





Figura 3.53: C-INF-ATK-FUNI Figura 3.54: C-INF-ATK-FUNI rea-CAD le











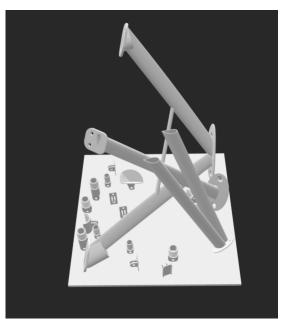
T-P CENTR T-P CAD CAD

Figura 3.55: Figura 3.56: Figura 3.57: Figura 3.58: Figura 3.59: LAT Specch. T-P Specch. T-P T-P CENTR, CENTR CAD LAT CAD T-P LAT e specch. reale

I componenti elencati sono stati realizzati dall'azienda SPEM, distribuendoli in due job separati, fig.3.60 e fig.3.61, in modo da ottimizzare i tempi e i costi di produzione. Nel job 2, sono stati inseriti anche alcuni provini realizzati per prove sperimentali riferite ad altri scopi non inerenti allo studio in esame. I parametri di processo di stampa forniti da SPEM e utilizzati nello studio di simulazione sono quelli indicati nella tabella 3.2:

Macchina	PrintGenius 250 dual laser
Macchina volume	$250mm \times 250mm \times 300mm$
Lega	AlSi10Mg
Layer thickness	0.03mm
Scan speed	1300mm/s
Laser Power	350W

Tabella 3.2: Parametri di processo di stampa



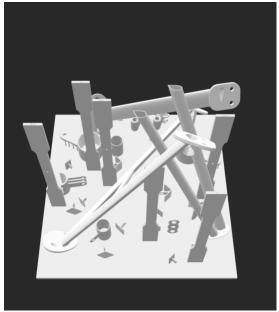


Figura 3.60: Piattaforma job 1

Figura 3.61: Piattaforma job 2

Tra i componenti realizzati dal Team S55 su citati, si è voluto portare avanti lo studio concentrandosi su alcuni di essi. In particolare per l'analisi di simulazione che verrà discussa nel capitolo 4, ci si è concentrati sui componenti 20 C-SUP-P1 e 18 AS-ATK-CODA-POST.

In particolare, per il primo 20 C-SUP-P1, fig.3.36 e 3.37, si è svolta anche l'analisi sperimentale mediante tomografia computerizzata, discussa nel capitolo 5. Tale componente è stato l'unico analizzato sperimentalmente, in quanto per tale studio tomografico risultava necessario, per motivi logistici, produrre il componente in duplice copia (uno per l'applicazione sul prototipo, l'altro

per lo studio sperimentale). Pertanto, confrontando i costi di produzione esplicitati nella tabella 3.1 e supponendo per quali componenti si potessero visualizzare risultati significativi, tale componente è risultato essere il miglior compromesso per budget e risultati.

L'altro componente selezionato 18 AS-ATK-CODA-POST è stato scelto per lo studio di simulazione perchè più significativo per forma e dimensioni. In particolare: 18 AS-ATK-CODA-POST rappresenta l'attacco posteriore tra la trave di coda superiore e il piano di coda, fig.3.62 Anche questo è stato prodotto nella versione destra e sinistra.



Figura 3.62: Attacco posteriore tra trave superiore e piano di coda assemblato sul velivolo S55_02

Si sarebbe voluto anche simulare una gamba con forma a "V" del castello motore 3 CM-C-ANT-SX, posizionato sul pianetto centrale del velivolo, posta sulla parte anteriore, come è possibile visionare in fig.3.63. Non è stato possibile farlo a causa di alcune limitazioni previste nel software AMTOP® (versione beta) utilizzato, che avrebbero portato a risultati molto grezzi e non realistici.



Figura 3.63: Castello motore assemblato sullo skin superiore del pianetto ventrale del velivolo S55 02

3.2.1 Componente C-SUP-P1

Il componente C_SUP_P1, il cui CAD è visibile in fig.3.64, risulta essere uno degli attacchi relativi alla coda del velivolo in particolare si tratta dell'attacco superiore tra la deriva e il timone centrale, il quale permette anche la connessione con il longherone orizzontale superiore che collega i tre timoni di coda.

Si riportano, alcune foto, fig.5.6, fig.5.7, fig.5.10, fig.5.11 del componente reale realizzato, allo scopo di evidenziare già in un primo controllo visivo, alcune difettosità superficiali.



Figura 3.64: CAD del componente C_SUP_P1



Figura 3.65: Vi- **Figura 3.66:** Vi- **Figura 3.67:** Vi- **Figura 3.68:** Vi- sta 1 di C-SUP-P1 sta 2 di C-SUP-P1 sta 3 C-SUP-P1 sta 4 C-SUP-P1

Su tale componente, non è stato effettuato il trattamento di *Stress Relief*. Questo, è uno dei trattamenti termici più importanti che si effettua nell'ambito dell'AM, in particolare nei componenti in metallo ottenuti con le tecnologie LPBF, come descritto nel capitolo 2.2.2. La scelta di non effettuare tale trattamento è dovuto essenzialmente agli scopi di ricerca del lavoro di tesi, in quanto si è ritenuto che, in questo specifico caso, fosse positivo avere delle deformazioni plastiche in modo da rendere più evidenti i risultati, riguardo le difettosità, nella procedura di tomografia computerizzata.

Capitolo 4

Simulazione numerica

Il processo di simulazione FEM svolto, è basato su un modello macroscopico del processo di produzione SLM, implementato nel software AMTOP® V.2.0 sviluppato da ITACAe S.r.l. [41], Asti e SimTech Simulation et Technologie SARL [42], Parigi.

AMTOP® V.2.0 [43] è una piattaforma di strumenti software sviluppata per analizzare e ottimizzare prodotti e processi di produzione additiva. La piattaforma include diversi algoritmi per valutare l'entità delle sollecitazioni e delle distorsioni attraverso un approccio "strato per strato", costituito da cicli di analisi accoppiata termo-strutturale. Il software AMTOP® V.2.0 può determinare una configurazione ottimizzata dei supporti per ottimizzare un obiettivo desiderato come l'altezza della stampa o il volume dei supporti. L'analisi agli elementi finiti (FEA) viene eseguita tramite un solutore esterno (ad esempio Calculix), [44].

Il primo step quando si vuole lavorare in AMTOP® è quello di creare un modello da nuovo scegliendo la cartella dove salvarlo e nominando il progetto, il quale sarà un file con estensione .prj. Si noti che nel percorso della cartella dove si salva non ci devono essere spazi e tale percorso non deve eccedere in lunghezza.

Una volta creato il progetto si dovrà importare la geometria del file in formato STL. Questo formato dovrà contenere una *mesh* già precedentemente creata, che AMTOP® importerà. In questo caso, per la creazione della *mesh*, si è utilizzato il software Autodesk Meshmixer® [45], con il quale si sono ottenute delle *mesh* con triangoli il più possibile equilateri e di dimensioni dello stesso ordine di grandezza dei voxel con cui lavora AMTOP®, fig.4.1.

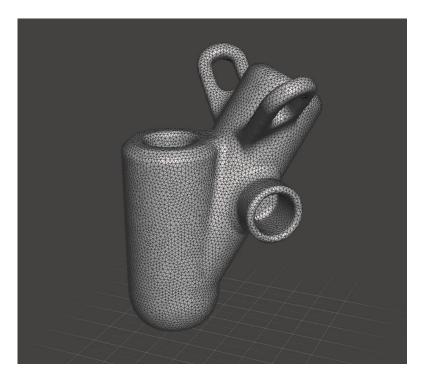


Figura 4.1: Mesh di C-SUP-P1

Per importare la geometria si dovrà scegliere dal menu a tendina il file STL come mostrato in fig.4.2:

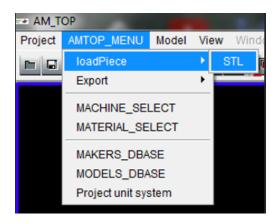


Figura 4.2: Importazione file STL

Una volta caricato il file STL lo si potrà vedere nell'interfaccia grafica, che si presenta nel seguente modo, fig.4.3:

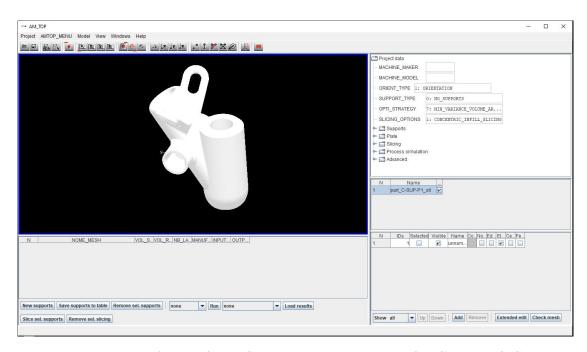


Figura 4.3: Interfaccia AMTOP® con caricamento file STL di C-SUP-P1

Si procede quindi con la selezione della macchina che si vuole usare, dal menu a tendina, fig.4.4, inserendo i relativi parametri di macchina.

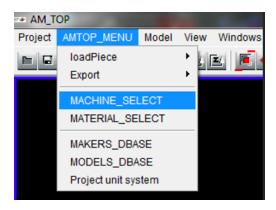


Figura 4.4: Selezione macchina

Per i casi di studio che tratteremo, si inseriscono i parametri forniti dall'azienda SPEM, precedentemente indicati in tabella 3.2. In fig.4.5 è possibile visualizzare in dettaglio i parametri di macchina inseriti.

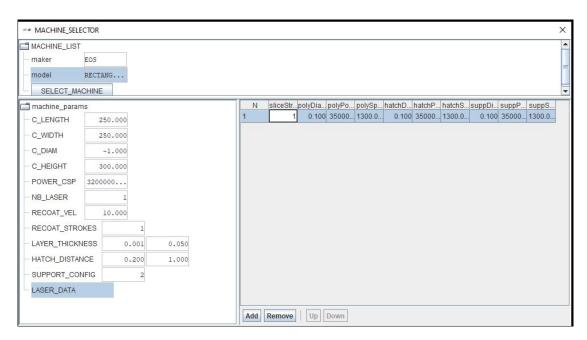


Figura 4.5: Parametri di macchina

Il significato dei diversi parametri di macchina è definito nelle seguenti tabelle $4.1~{\rm e}~4.2$:

C_LENGTH	Lunghezza della camera della macchina $[mm]$	
C_WIDTH	Larghezza della camera della macchina $[mm]$	
C_DIAM	Diametro della camera (per macchine cilindriche, altrimenti $-1)\ [mm]$	
C_HEIGHT	Altezza della camera della macchina $[mm]$	
POWER_CSP	Potenza della macchina $[mW]$	
NB_LASER	Numero dei laser	
RECOAT_VEL	Velocità di stratificazione $[mm/s]$	
RECOAT_STROKES	Numero di movimenti per fare il recoat	
LAYER_THICKNESS	Spessore dello strato (min e max) $[mm]$	
HATCH_DISTANCE	Distanza tra due laser (min e max, definita anche in seguito) $[mm]$	
SUPPORT_CONFIG	Tipo di supporti (si lascia di default perchè definito anche in seguito)	

Tabella 4.1: Definizione parametri di macchina

SLICE	Strategia di slice
PolyDiam	Diametro del laser per il contorno della sezione di uno strato $[mm]$
PolyPower	Potenza del laser per il contorno della sezione $[mW]$
PolySpeed	Velocità del laser per il contorno della sezione $[mm/s]$
HatchDiam	Diametro del laser per percorso interno alla sezione $[mm]$
HatchPower	Potenza del laser per il percorso interno alla sezione $[mW]$
HatchSpeed	Velocità del laser per il percorso della sezione $[mm/s]$
SuppDiam	Diametro del laser per la generazione dei supporti $[mm]$
SuppPower	Potenza del laser per la generazione dei supporti $[mW]$
SuppSpeed	Velocità del laser per la generazione dei supporti $[mm/s]$

Tabella 4.2: Definizione parametri laser data

Si prosegue cliccando sul pulsante *select machine* e nel menu a destra apparirà la macchina selezionata ed il tipo di macchina.

Dal menu AMTOP® si deve inoltre caricare il materiale, fig.4.6, il materiale scelto e le sue caratteristiche fanno parte di un database a disposizione nel software, nel caso in esame si seleziona AlSi10Mg.

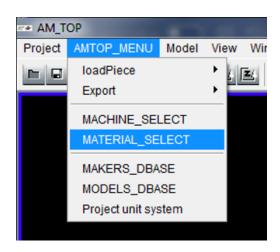


Figura 4.6: Selezione materiale

Nei successivi paragrafi si vuole proseguire con la descrizione del processo di simulazione effettuato per i componenti definiti nel capitolo 3, definendo i parametri utilizzati, i vari step del processo implementato su AMTOP® V.2.0 e i vari casi di ottimizzazione e orientamento studiati.

4.1 Simulazione di C-SUP-P1

4.1.1 Caso 1: 0:NO_ORIENTATION

In questo primo caso, nella definizione dei parametri di input, si è scelto 0:NO_ORIENTATION per quanto riguarda l'orientamento, in modo da valutare, in prima battuta, il componente con lo stesso orientamento fornito dall'azienda SPEM durante il processo di produzione, in quanto gli STL utilizzati sono quelli già orientati forniti dall'azienda.

Successivamente, è possibile definire i tipi di supporto che si vogliono utilizzare, i quali possono essere di 4 tipologie:

- 0:NO_SUPPORTS;
- 1:SIMPLE_SUPPORTS, ovvero quelli usati nei casi di studio di questo elaborato, fig.4.7;
- 2:STAIRS_SUPPORTS, fig.4.8;
- 3:TRUSS_SUPPORTS, fig.4.9;

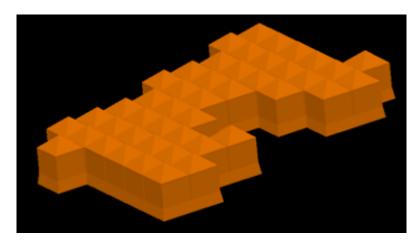


Figura 4.7: 1:SIMPLE_SUPPORTS

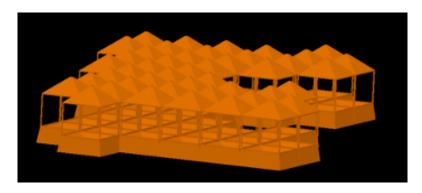


Figura 4.8: 2:STAIRS_SUPPORTS

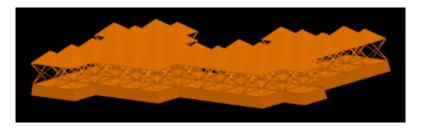


Figura 4.9: 3:TRUSS_SUPPORTS

Si procede con la scelta dei parametri e della strategia di ottimizzazione dei supporti, la quale può essere di 8 diverse tipologie:

- 0:NO_OPTI;
- 1:MIN_VOLUME_OPTI;
- 2:MIN_HEIGHT_OPTI;
- 3:MIN_RATIO_OPTI;
- 4:MIN_PLATE_GAP_OPTI;
- 5:MIN_AREA_VARIANCE_OPTI;
- 6:MIN_AREA_OPTI;
- 7:MIN_VARIANCE_VOLUME_AREA_OPTI;

Nei casi in esame, si utilizzerà sempre la tipologia 1:MIN_VOLUME_OPTI, la quale ottimizza i supporti minimizzandone il volume.

Infine, si deve scegliere una tra le 8 opzioni disponibili di slicing:

- 0:NO_SLICING;
- 1:CONCENTRIC_INFILL_SLICING;
- 2:LINEAR_INFILL_SLICING;
- 3:WAVE_INFILL_SLICING;
- 4:EGGCRATE_INFILL_SLICING;
- 5:RANDOMIZED_INFILL_SLICING;
- 6:POISSON INFILL SLICING;
- 7:STRUCTURAL INFILL SLICING;

Nei casi di studio di questo elaborato, si utilizzerà sempre 1:CONCENTRIC_INFILL_SLICING.

Si ha quindi, una situazione di questo tipo, fig.4.10, dove è necessario ancora definire i parametri relativi alle diverse categorie indicate in figura, il cui significato si definisce nelle tabelle 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7. I rispettivi valori inseriti in questo caso sono indicati nella tabella 4.8.

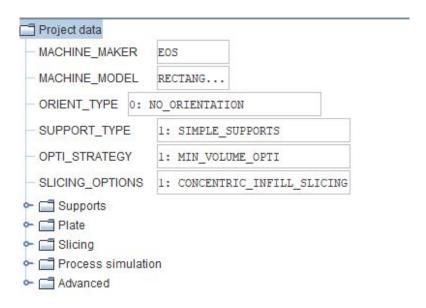


Figura 4.10: Project data caso 1

OHANG	Angolo tra la verticale rispetto al piano della piastra e il piano della
	superficie tangente dell'oggetto creato, quindi se l'angolo è maggiore di
	OHANG allora il supporto viene creato [°]
TOPSIDE	Lato base superiore [mm]
BOTSIDE	Lato base inferiore $[mm]$
THKS	Spessore di parete dei supporti $[mm]$
FILLS	Rapporto da base superiore ed inferiore

Tabella 4.3: Definizione parametri Supports

GAP	Distanza tra la piastra e l'oggetto creato in AM $> 1mm \ [mm]$
PLENGTH	Lunghezza della piastra $[mm]$
PWIDTH	Larghezza della piastra $[mm]$
PHEIGHT	Altezza della piastra [mm]

Tabella 4.4: Definizione parametri Plate

NLAS	Numero di laser
TYPPOW	Potenza tipica della macchina $[mW]$
RECOAT	Tempo di reacoating tra uno strato e l'altro $[s]$
LAYTHK	Spessore dello strato $[mm]$
HATCHDIST	Distanza tra due passaggi laser $[mm]$
JVEL	Velocità del laser $[mm/s]$

Tabella 4.5: Definizione parametri Slicing

MAT_NAME	Nome del materiale caricato da database
MAT_MODEL	Modello del materiale che può essere lineare o non lineare
RELEAS	Tempo trascorso dalla fine del processo $[s]$
PTEMP	Temperatura della piastra $[{}^{\circ}C]$
BTEMP	Temperatura del corpo $[{}^{\circ}C]$
ETEMP	Temperatura dell'ambiente $[{}^{\circ}C]$
EMISS	Coefficiente di emissività $[mW/mm^2]$
AFILM	Coefficiente di convezione termica $[mW/mm^2]$
BFILM	Coefficiente di conduzione termica $[mW/mm \cdot {}^{\circ}C]$
GRAV	Costante di accelerazione grazitazionale $[mm/s^2]$
CONSTRZ	Vincolo sull'asse z $[mN]$
CONSTRXY	Vincolo del piano $x - y [mN]$

Tabella 4.6: Definizione parametri Process Simulation

DIASCALE	Coefficiente moltiplicativo della superficie dello strato,				
	aumentandolo si accorciano i tempi dell'analisi				
	ma si diminuisce l'accuratezza.				
LAYTHKSCALE	Coefficiente moltiplicativo dello spessore del singolo strato				
MEMORY	Memoria da utilizzare (Si consiglia di usare un valore				
	alto \cong 1800 per evitare problemi durante il post-processing)				
NCPU	Numero dei processori da utilizzare				
NINC	Numero dell'incremento (default)				
SUPMAT	Parametro numerico (default)				
TEMPTOL	Parametro di tolleranza che elimina elementi non necessari				
	(-1 per non usarlo)				
ANGTOL	Parametro numerico (default)				
LINTOL	Parametro numerico (default)				

Tabella 4.7: Definizione parametri Advanced

Tabella 4.8: Parametri di simulazione, caso 1 di C-SUP-P1

	Parametro	Valore	Unità di misura
	OHANG	55	[°]
	TOPSIDE	0.300	[mm]
Supports	BOTSIDE	0.800	[mm]
	THKS	0.050	[mm]
	FILLS	0.900	
	GAP	3.000	[mm]
Plate	PLENGTH	160.000	[mm]
	PWIDTH	247.500	[mm]
	PHEIGHT	10.000	[mm]
	NLAS	1	
	TYPPOW	320000.000	[mW]
Slicing	RECOAT	25.000	[s]
	LAYTHK	0.030	[mm]
	HATCHDIST	0.050	[mm]
	\mathbf{JVEL}	1300.000	[mm/s]
	MAT_NAME	AlSi10Mg	
	MAT_MODEL	LINEAR	
	RELEAS	3600.000	[s]
	PTEMP	100.000	$[^{\circ}C]$
	BTEMP	900.000	$[^{\circ}C]$
	•	Continua a	alla pagina seguente

Tabella 4.8 –	Parametri	di	simulazione.	caso	1	di	C-SUP-P1

	Parametro	Valore	Unità di misura
Process Simulation	ETEMP	24.000	$[^{\circ}C]$
	EMISS	0.000	$[mW/mm^2]$
	AFILM	0.010	$[mW/mm^2]$
	\mathbf{BFILM}	1.000	$[mW/mm \cdot ^{\circ} C]$
	GRAV	9800.000	$[mm/s^2]$
	CONSTRZ	0.000	[mN]
	CONSTRXY	10.000	[mN]
	DIASCALE	10.000	
	LAYTHKSCALE	15.000	
	MEMORY	1800	
	NCPU	8	
Advanced	NINC	1	
	\mathbf{SUPMAT}	0.500	
	TEMPTOL	-1.000	
	ANGTOL	0.100	
	LINTOL	0.001	

Successivamente all'inserimento dei dati di input richiesti è possibile procedere con la creazione dei supporti secondo le specifiche definite, cliccando in basso a sinistra su *New supports*, fig.4.11.



Figura 4.11: Interfaccia grafica AMTOP® - New supports

In questo modo, si caricheranno nell'interfaccia grafica, tre diverse entità chiamate parte, supporto, piastra, fig.4.12, fig.4.13, fig.4.14.

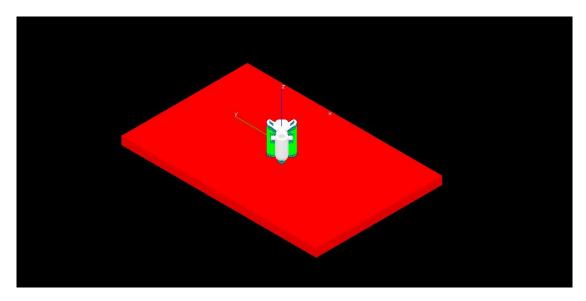
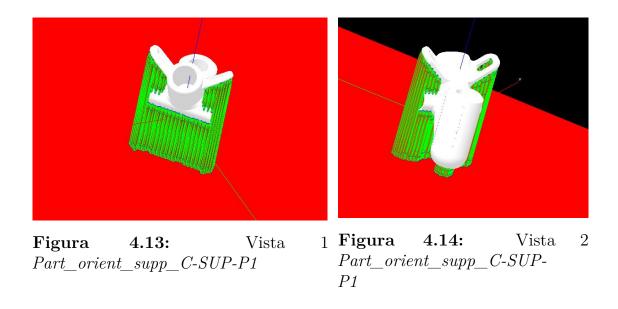


Figura 4.12: Interfaccia grafica Part_orient_supp_C-SUP-P1



Nella finestra in basso a destra, fig.4.15 si potranno visualizzare singolarmente le tre parti oltre che verificare la mesh, gli elementi e i nodi- In questo caso, si sono spuntate tutte e tre le entità e in particolare, anche i nodi e i lati dei supporti.

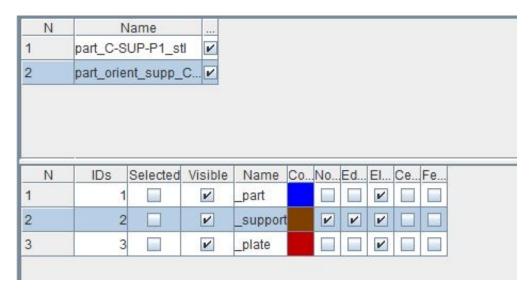


Figura 4.15: Finestra di controllo

A questo punto bisognerà creare i file di input che serviranno per far girare l'analisi. Per far questo bisognerà salvare questa configurazione nella cartella, quindi cliccare in basso a sinistra sul pulsante $Save\ supports\ to\ tables$, fig.4.11. AMTOP®, chiederà di nominare la cartella, quindi dopo aver inserito il nome nella finestra che comparirà, si dovrà premere il tasto invio e poi il pulsante OK.

In questo modo, si creerà una riga nella finestra in basso a destra che definirà i dati di input dell'analisi e la configurazione dei supporti. Si noti che in questa riga, fig. 4.16 vengono definiti importanti parametri quali il volume dei supporti, il rapporto tra il volume dei supporti e il volume complessivo (parte + supporti), il numero degli strati e il tempo del processo.



Figura 4.16: Dati input dell'analisi e configurazione supporti, caso 1 di C-SUP-P1

Si notino i pulsanti *Edit* che permettono di visionare in dettaglio i dati di input, quelli definiti nella tabella 4.8, e i dati di output, fig.4.17, tra cui parametri importanti sulla geometria della configurazione appena scelta.

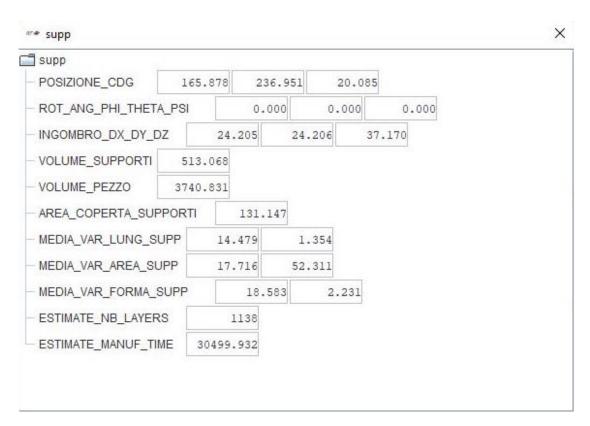


Figura 4.17: Dati output, caso 1 di C-SUP-P1

Per poter creare gli altri file necessari all'analisi da girare si dovrà scegliere l'opzione *pre-proc* e quindi cliccare il tasto *run*. Questa fase di *pre-proc*, porterà alla creazione delle quattro entità (base, parte, supporti e polvere) in termini di *voxel*, fig.4.18, fig.4.19, fig.4.20.

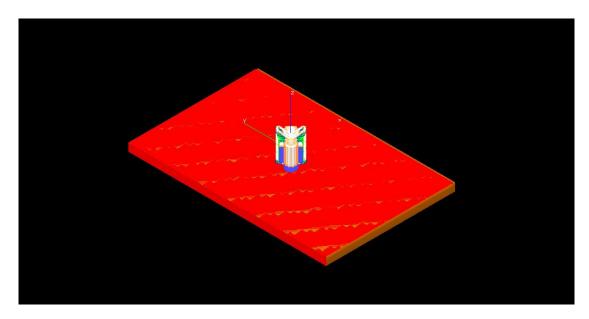


Figura 4.18: Interfaccia grafica Supp_voxel di C-SUP-P1, caso 1

N	N	lame										
1	part_C-S	UP-P1_st										
2	supp		V									
3	supp_vo	cel	V									
N	IDe	Calactad	Minible	Nome	Co	NIo	Ed	EL	Ca	En	4	
N 1		Selected	Visible		Co	No	Ed	1.	Ce	Fe		
N 1 2	IDs 2	Selected	V	Name BASE PART	Co	No	Ed	El	Ce	Fe		
1	2	Selected	V	BASE	Co	No	Ed	V	Ce	Fe		

Figura 4.19: Finestra di controllo $Supp_voxel$ di C-SUP-P1, caso 1

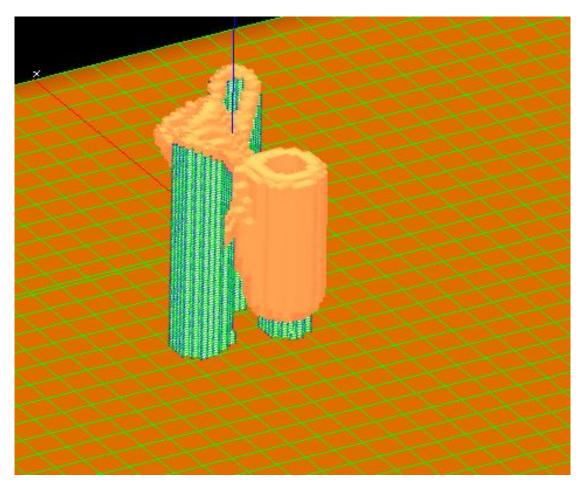


Figura 4.20: Vista di dettaglio Supp_voxel di C-SUP-P1, caso 1

Infine, si potrà far partire l'analisi, selezionando il *run* dal menu a tendina e quindi cliccare sul pulsante *run*. Questo creerà dei file di risultati ed una cartella *plot* dove ci saranno i risultati per ciascuno strato. Da notare, il file *par.inp*, fig.4.21, in cui alla voce *ntlay*, numero totale layer, è possibile vedere quanti saranno gli strati simulati, in questo caso 83.

```
** par.inp created by AMPRO Version Beta
** tottime
                 0.325277075E+04
** time
                 0.491176300E+03
** bdiam
                 0.100000001E+00
** bvel
                 0.130000000E+04
** hatch
                 0.500000007E-01
                 0.250000000E+02
** rectime
** tlay
                 0.29999993E-01
   cgzmx
                 0.697391272E+01
** nclayel
** nplayel
                              344
** ntlayel
                            28437
** nplay
                               16
** ntlay
                               83
** fplot
                0.100000000E+02
   diascale
** laythkscale
                 0.150000000E+02
** temptol
                -0.100000000E+01
** nonlin
                                0
                 0.00000000E+00
** eldx
                 0.00000000E+00
** eldy
** eldz
                 0.000000000E+00
```

Figura 4.21: File par.inp di C-SUP-P1, caso 1

Al termine del processo di simulazione, per vedere i risultati si dovrà scegliere l'opzione history results e quindi cliccare su load results. Questa operazione caricherà i file dei risultati .frd che saranno selezionabili singolarmente per diversi strati da una nuova finestra, in cui per ogni strato sarà possibile scegliere dal menu a tendina, se visualizzare i risultati relativi a temperatura, stress residui (secondo il criterio di Von Mises) e damage, cliccando Show fields. Con damage si intende una misura qualitativa del danneggiamento durante il processo, è funzione del rapporto fra i valori di sollecitazione effettiva e limite ed è quindi, un numero adimensionato con valore compreso tra 0 e 1. Il criterio di Von Mises 4.1, assume che lo snervamento del materiale venga raggiunto quando l'energia di distorsione raggiunge un valore limite, dove la distorsione è la componente della deformazione che provoca una variazione nella forma, ma non nel volume, di un elemento di volume [46].

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \tag{4.1}$$

Nel caso in esame, di seguito si riportano i risultati trovati dal processo di simulazione, per quanto riguarda gli stress residui, fig.4.22, fig.4.23, fig.4.24,

 $\begin{array}{l} {\rm fig. 4.25,\,fig. 4.26,\,fig. 4.27,\,il\,damage,\,fig. 4.28,\,fig. 4.29,\,fig. 4.30,\,fig. 4.31,\,fig. 4.32}\\ {\rm e\,\,la\,\,temperatura,\,fig. 4.33,\,fig. 4.34,\,fig. 4.35,\,fig. 4.36,\,fig. 4.37,\,in\,\,diversi\,\,strati}\\ {\rm del\,\,componente.} \end{array}$

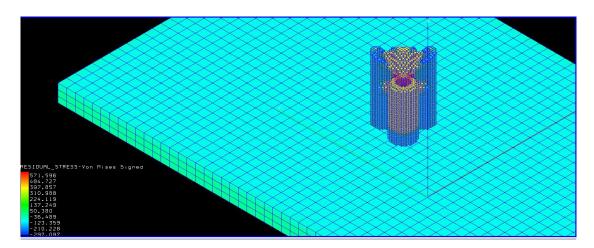


Figura 4.22: Residual stress layer 82, vista 1

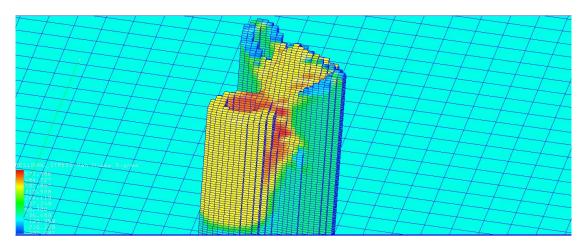


Figura 4.23: Residual stress layer 82, vista 2

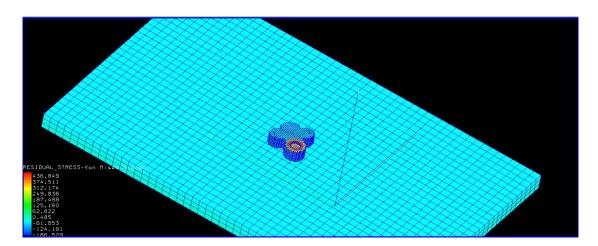


Figura 4.24: Residual stress layer 17, vista 1

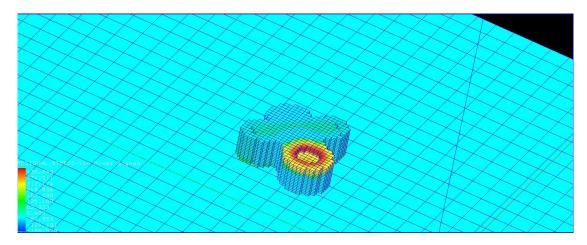


Figura 4.25: Residual stress layer 17, vista 2

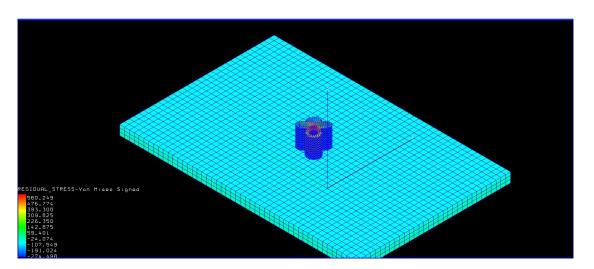


Figura 4.26: Residual stress layer 45, vista 1

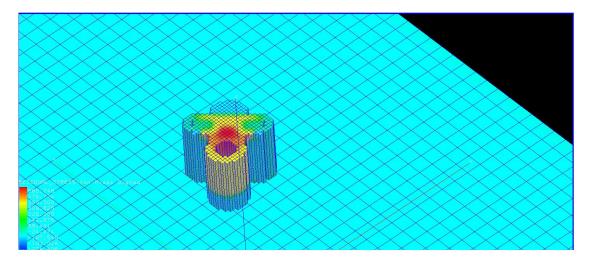


Figura 4.27: Residual stress layer 45, vista 2

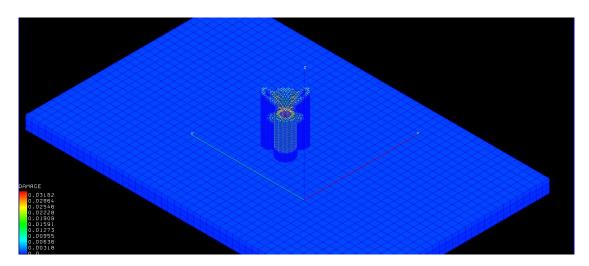


Figura 4.28: Damage layer 82, vista 1

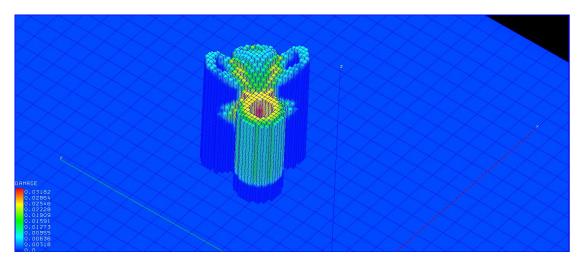


Figura 4.29: Damage layer 82, vista 2

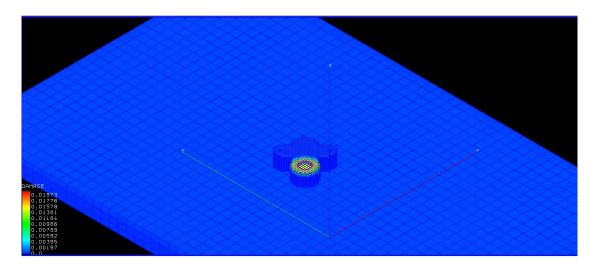


Figura 4.30: Damage layer 17

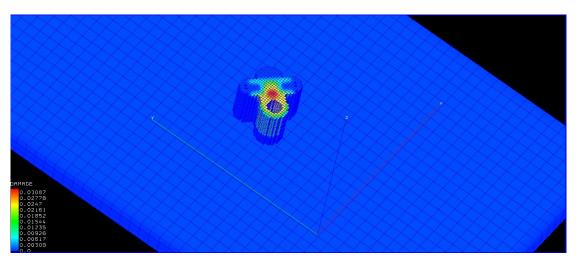


Figura 4.31: Damage layer 45

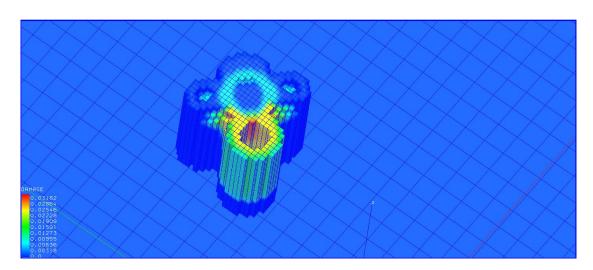


Figura 4.32: Damage layer 55

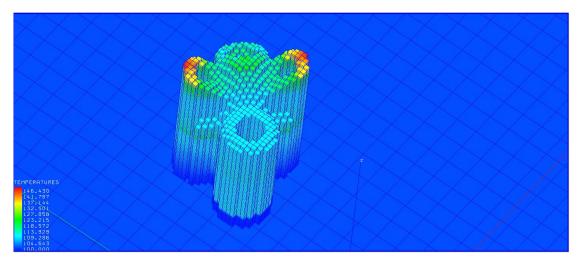


Figura 4.33: Temperatura layer 82

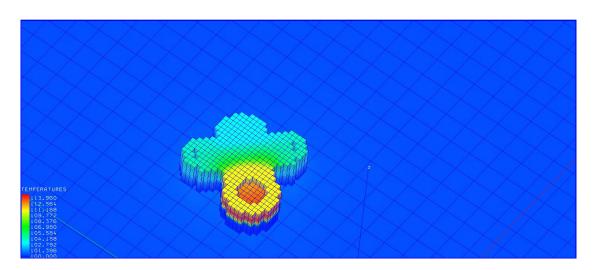


Figura 4.34: Temperatura layer 17

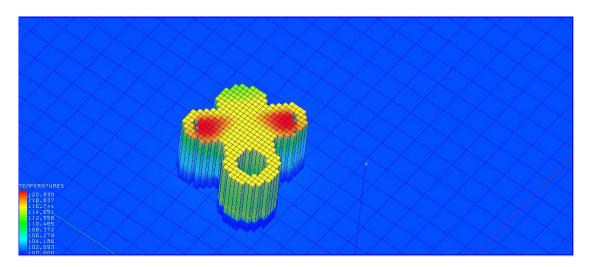


Figura 4.35: Temperatura layer 38

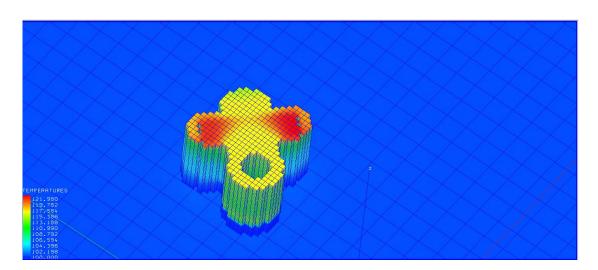


Figura 4.36: Temperatura layer 39

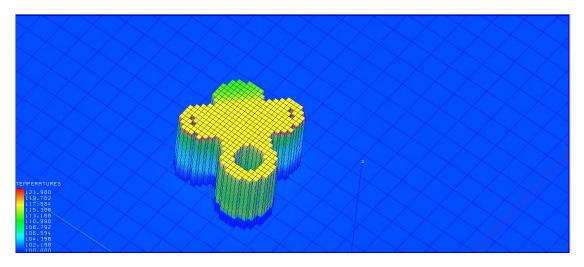


Figura 4.37: Temperatura layer 40

I cui valori massimi caratteristici sono riassunti nella tabella 4.9.

Layer	Stress [MPa]	Damage	Temperatura $[{}^{\circ}C]$
82	571.596	0.03182	146.430
55		0.03182	
45	560.249	0.03087	
40			121.980
39			121.980
38			120.930
17	436.849	0.01973	113.960

Tabella 4.9: Risultati caso 1 di C-SUP-P1

Si noti, come prevedibile, che gli stress maggiori e le temperature più alte, si concentrano nelle zone in cui il componente presenta delle curvature o delle angolature particolari. Inoltre, dal parametro damage, si può valutare qualitativamente un danneggiamento di circa 0.03 rispetto al file STL nominale.

Inoltre, è possibile procedere con un *piece cut* e *run* per poter vedere i risultati relativi alle distorsioni solo in riferimento al pezzo senza supporti e piastra, fig.4.38, fig.4.39, fig.4.40, fig.4.41, fig.4.42, fig.4.43 di cui si riportano i valori massimi caratteristici in tabella 4.10.

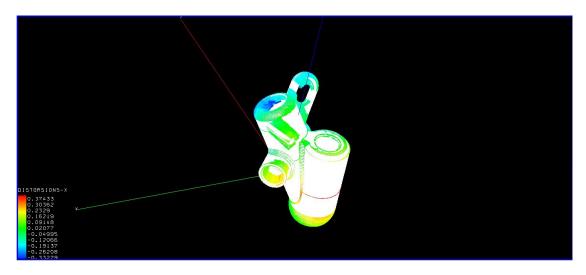


Figura 4.38: Distorsioni in direzione x, vista 1

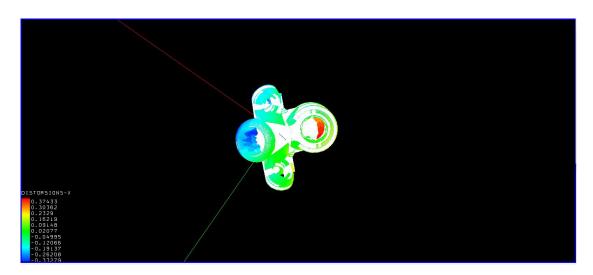


Figura 4.39: Distorsioni in direzione x, vista 2

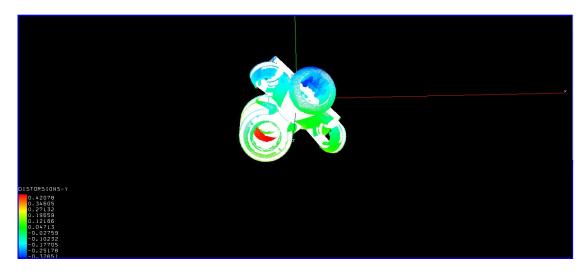


Figura 4.40: Distorsioni in direzione y

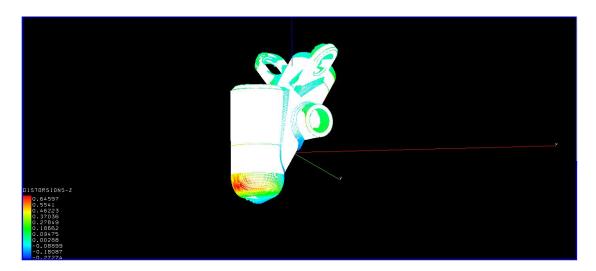


Figura 4.41: Distorsioni in direzione z

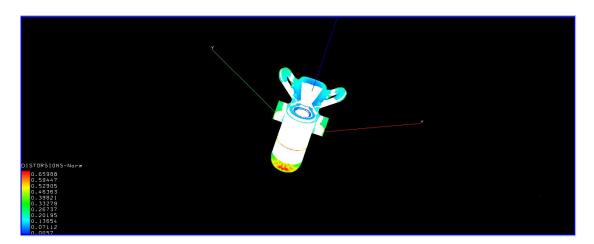


Figura 4.42: Distorsioni in norma, vista 1

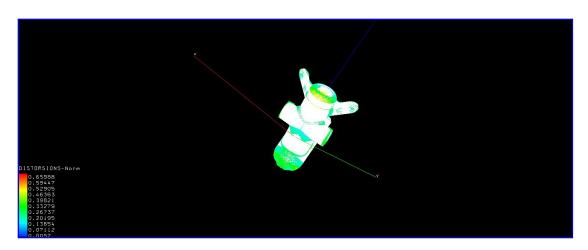


Figura 4.43: Distorsioni in norma, vista 2

Direzione	Distorsione [mm]
x	0.37433
y	0.42078
z	0.64597
norma	0.65988

Tabella 4.10: Distorsioni caso 1 di C-SUP-P1

4.1.2 Caso 2: 1:ORIENTATION

In questo secondo caso, si è voluto valutare come si modificano i risultati imponendo un'ottimizzazione sull'orientamento del pezzo, in modo tale da minimizzare il volume dei supporti.

I parametri di simulazione definiti in questo caso, sono espressi nella tabella 4.11, in questi, rispetto al caso precedente si è voluto modificare anche il parametro BOTSIDE per avere dei supporti che fossero di dimensioni più realistiche.

Tabella 4.11: Parametri di simulazione, caso 2 di C-SUP-P1

	Parametro	Valore	Unità di misura
	OHANG	55	[°]
	TOPSIDE	0.300	[mm]
Supports	BOTSIDE	3.000	[mm]
	THKS	0.050	[mm]
	FILLS	0.900	
	GAP	3.000	[mm]
Plate	PLENGTH	160.000	[mm]
	PWIDTH	247.500	[mm]
	PHEIGHT	10.000	[mm]
	NLAS	1	
	TYPPOW	320000.000	[mW]
Slicing	RECOAT	25.000	[s]
	LAYTHK	0.030	[mm]
	HATCHDIST	0.050	[mm]
	JVEL	1300.000	[mm/s]
	MAT_NAME	AlSi10Mg	
	MAT_MODEL	LINEAR	
	RELEAS	3600.000	[s]
	PTEMP	100.000	$[^{\circ}C]$
	BTEMP	900.000	$[^{\circ}C]$
Proc. Simulation	ETEMP	24.000	$[^{\circ}C]$
	EMISS	0.000	$[mW/mm^2]$
	AFILM	0.010	$[mW/mm^2]$
	BFILM	1.000	$[mW/mm \cdot {}^{\circ}C]$
	GRAV	9800.000	$[mm/s^2]$
	CONSTRZ	0.000	[mN]
	CONSTRXY	10.000	[mN]
	DIASCALE	10.000	
	LAYTHKSCALE	15.000	
	MEMORY	1800	
	NCPU	8	
Advanced	NINC	1	
	SUPMAT	0.500	
	TEMPTOL	-1.000	
	ANGTOL	0.100	
	LINTOL	0.001	

Procedendo con la creazione dei nuovi supporti, si è ottenuto un nuovo orientamento del pezzo rispetto a quello nominale, rappresentato dal componente in blu, in fig.4.44, fig.4.45, fig.4.46.

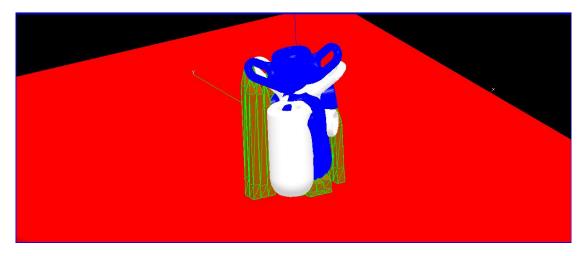


Figura 4.44: Interfaccia grafica *Part_orient_supp_C-SUP-P1* orientamento ottimizzato, vista 1

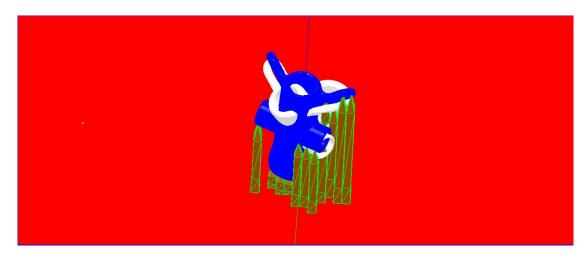


Figura 4.45: Interfaccia grafica *Part_orient_supp_C-SUP-P1* orientamento ottimizzato, vista 2

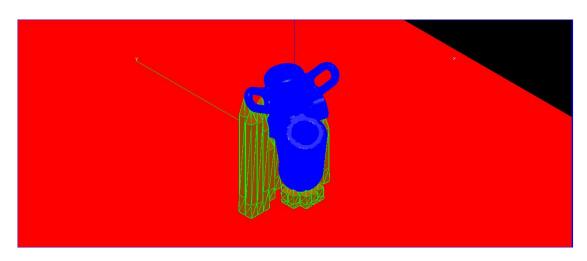


Figura 4.46: Interfaccia grafica *Part_orient_supp_C-SUP-P1* orientamento ottimizzato, vista 3

Salvando i supporti appena creati, si creano i file di input necessari per la simulazione, fig.4.47, da cui è possibile visionare in dettaglio i dati di output, fig.4.48.

N	NOME_MESH	VOL_SUPP	VOL_RATIO	NB_LAYERS	MANUF_TIME	INPUT	OUTP
	supp14	186.043	0.050	1296	32764.658	Edit	Edit

 ${\bf Figura~4.47:}~{\bf Dati~di~input~dell'analisi~e~configurazione~supporti,~caso~2~di~C-SUP-P1$

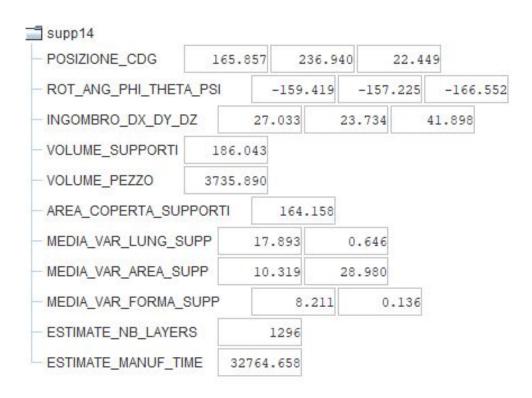


Figura 4.48: Dati output, caso 2 di C-SUP-P1

Procedendo con l'analisi di *pre-processing*, si ottiene la configurazione della geometria sotto forma di voxel, fig.4.49, fig.4.50.

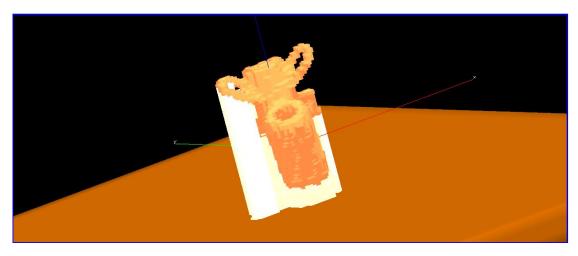


Figura 4.49: Interfaccia grafica Supp_voxel di C-SUP-P1, caso 2, vista 1

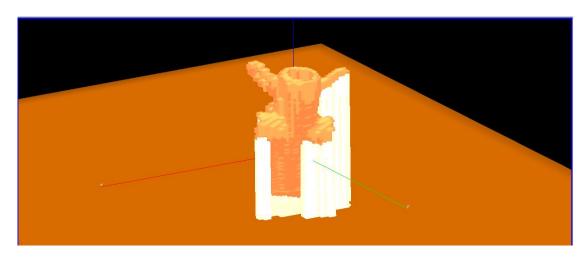


Figura 4.50: Interfaccia grafica Supp_voxel di C-SUP-P1, caso 2, vista 2

Infine, si procede con l'avvio dell'analisi, selezionando il *run*. Si noti dal file *par.inp* che in questo specifico caso, il numero totale dei layer risulta essere 93, fig.4.51.

```
** par.inp created by AMPRO Version Beta
** tottime 0.836764221E+03
** time
                0.234665015E+04
** bdiam
                0.100000001E+00
** bvel
                0.700000000E+04
                0.500000007E-01
** hatch
                0.250000000E+02
** rectime
                0.29999993E-01
** cgzmx
                0.407252922E+02
** nclayel
                             21
                             10
** nplayel
                          29890
** ntlayel
** nplay
                             91
** ntlay
                             93
** fplot
** diascale
                0.100000000E+02
** laythkscale
                0.150000000E+02
** temptol
            -0.100000000E+01
** nonlin
** eldx
                0.000000000E+00
** eldy
                0.000000000E+00
                0.000000000E+00
** eldz
```

Figura 4.51: File par.inp di C-SUP-P1, caso 2

Al termine dell'analisi, è possibile visualizzare gli history results in termini di temperatura, stress residui e damage. Di seguito sono riportati tutti i risultati, fig.4.52, fig.4.53, fig.4.54, fig.4.55, fig.4.56, fig.4.57 esplicitati anche nella tabella 4.12.

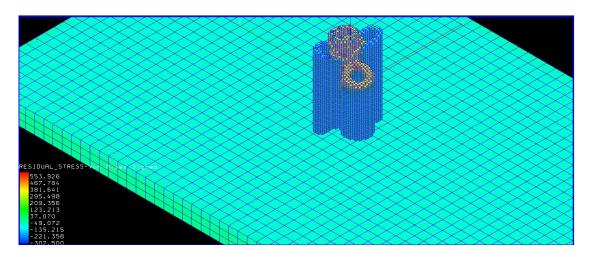


Figura 4.52: Residual stress, vista 1

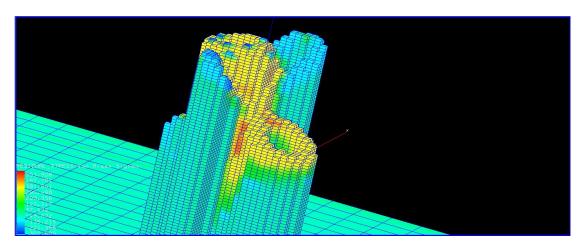


Figura 4.53: Residual stress, vista 2

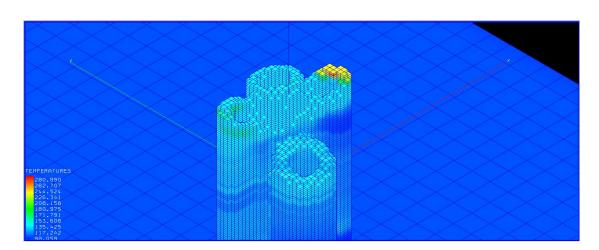


Figura 4.54: Temperatura, vista 1

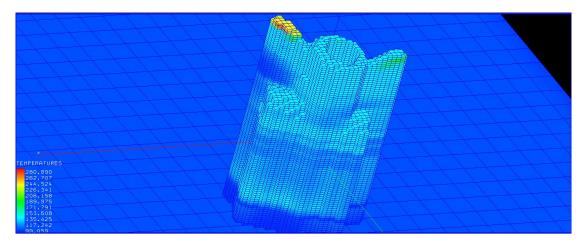


Figura 4.55: Temperatura, vista 2

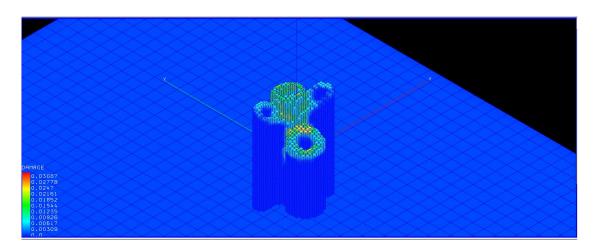


Figura 4.56: Damage, vista 1

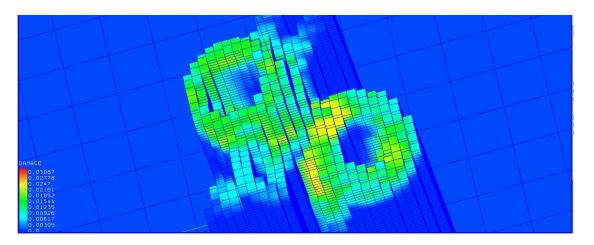


Figura 4.57: Damage, vista 2

Layer	Stress $[MPa]$	Damage	Temperatura $[{}^{\circ}C]$
77	553.926	0.03087	280.890

Tabella 4.12: Risultati caso 2 di C-SUP-P1

4.1.3 Confronto tra caso 1 e caso 2

E' possibile confrontare quindi, i risultati ottenuti nei due casi. In particolare si possono prima di tutto, confrontare i dati di input dell'analisi e la configurazione dei supporti, come espresso in tabella 4.13.

	1	2
$VOL_SUPP [mm^3]$	513.068	186.043
VOL_RATIO	0.137	0.050
NB_LAYERS	1138	1296
	30499.932	32764.658

Tabella 4.13: Confronto dati di input analisi caso 1 e caso 2 di C-SUP-P1

Nel caso 2 rispetto al caso 1, si nota una forte riduzione del volume dei supporti e quindi anche del rapporto tra volume supporti e volume pezzo complessivo, dovuta anche all'aumento del parametro BOTSIDE, a discapito di un aumento del numero di layers e del tempo di produzione.

Inoltre, è possibile confrontare i risultati ottenuti in termini di stress, damage e temperatura, in modo da verificare se un'ottimizzazione di questo tipo può essere conveniente. In particolare, si faccia riferimento alla tabella 4.14.

	1	2
Stress $[MPa]$	571.596	553.926
Damage	0.03182	0.03087
Temperatura $[{}^{\circ}C]$	146.430	280.890

Tabella 4.14: Confronto risultati caso 1 e caso 2 di C-SUP-P1

Si noti, dalle immagini dei risultati dei paragrafi dedicati al caso 1 e caso 2, che i valori massimi di stress, damage e temperatura sono localizzati circa nelle stesse posizioni. Ciò che varia in maniera evidente, è la temperatura che risulta molto più elevata nel componente con orientamento ottimizzato del caso 2. Pertanto, considerato che da questa ottimizzazione si è ottenuto come beneficio, unicamente, una riduzione del volume dei supporti, converrebbe mantenere l'orientamento iniziale del caso 1.

4.2 Simulazione di AS-ATK-CODA-POST

Esattamente come fatto per il precedente componente, anche per questo secondo pezzo, si sono esaminati i due casi caratteristici, senza e con l'ottimizzazione dell'orientamento.

4.2.1 Caso 1: 0:NO_ORIENTATION

A seguito dell'inserimento del caricamento del file STL, della selezione della macchina e della selezione del materiale, eseguita esattamente allo stesso modo del caso precedente, si sono definiti i parametri di simulazione, esplicitati nella tabella 4.15.

Tabella 4.15: Parametri di simulazione, caso 1 di AS-ATK-CODA-POST

	Parametro	Valore	Unità di misura	
	OHANG	70	[°]	
	TOPSIDE	0.300	[mm]	
Supports	BOTSIDE	0.800	[mm]	
	THKS	0.050	[mm]	
	FILLS	0.900		
	GAP	3.000	[mm]	
Plate	PLENGTH	160.000	[mm]	
	PWIDTH	247.500	[mm]	
	PHEIGHT	10.000	[mm]	
	NLAS	1		
	TYPPOW	320000.000	[mW]	
Slicing	RECOAT	25.000	[s]	
	LAYTHK	0.030	[mm]	
	HATCHDIST	0.050	[mm]	
	\mathbf{JVEL}	1300.000	[mm/s]	
	MAT_NAME	AlSi10Mg		
	MAT_MODEL	LINEAR		
	RELEAS	3600.000	[s]	
	PTEMP	100.000	$[{}^{\circ}C]$	
	BTEMP	900.000	$[^{\circ}C]$	
Proc. Simulation	ETEMP	24.000	$[^{\circ}C]$	
	EMISS	0.000	$[mW/mm^2]$	
	AFILM	0.010	$[mW/mm^2]$	
	BFILM	1.000	$[mW/mm \cdot ^{\circ}C]$	
	GRAV	9800.000	$[mm/s^2]$	
	CONSTRZ	0.000	[mN]	
	CONSTRXY	10.000	[mN]	
	DIASCALE	10.000		
	LAYTHKSCALE	15.000		
	MEMORY	1800		
Continua alla pagina seguente				

Tabella 4.15 – Parametri di simulazione, caso 1 di AS-ATK-CODA-POST

	Parametro	\mathbf{Valore}	Unità di misura
	NCPU	8	
Advanced	NINC	1	
	\mathbf{SUPMAT}	0.500	
	TEMPTOL	-1.000	
	ANGTOL	0.100	
	LINTOL	0.001	

Si procede dunque, con la creazione dei nuovi supporti, ottenendo i risultati di seguito riportati, fig.4.58, fig.4.59.

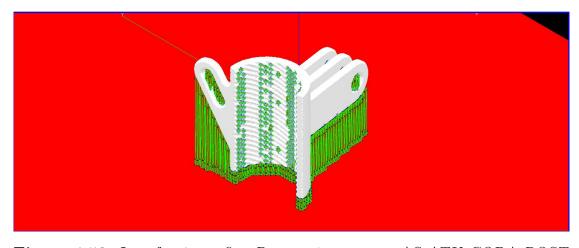


Figura 4.58: Interfaccia grafica $Part_orient_supp_AS\text{-}ATK\text{-}CODA\text{-}POST,$ vista 1

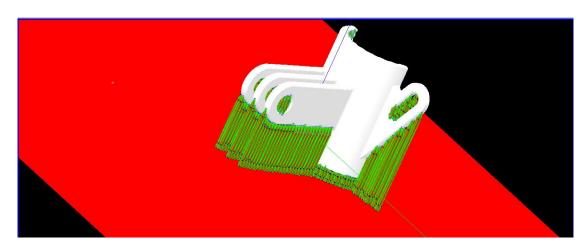


Figura 4.59: Interfaccia grafica $Part_orient_supp_AS-ATK-CODA-POST,$ vista 2

Salvando i supporti appena creati, si creano i file di input necessari per la simulazione, fig.4.60, da cui è possibile visionare in dettaglio i dati di output, fig.4.61.

N	NOME_MESH	VOL_SUPP	VOL_RATIO	MANUF_TIME	NB_LAYERS	INPUT	OUTP
1 9	supp5	569.553	0.164	26932.088	1000	Edit	Edit

 $\bf Figura~4.60:~Dati di input dell'analisi e configurazione supporti, caso 1 di AS-ATK-CODA-POST$

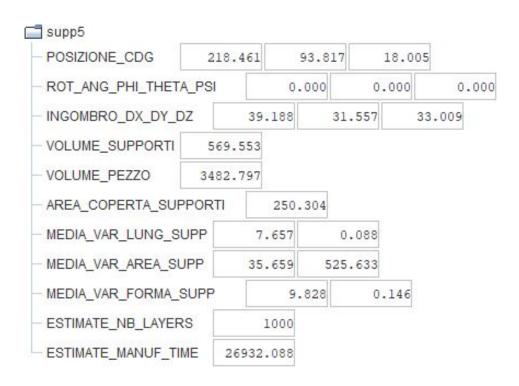


Figura 4.61: Dati output, caso 1 di AS-ATK-CODA-POST

Procedendo con l'analisi di *pre-processing*, si ottiene la configurazione della geometria sotto forma di voxel, fig.4.62.

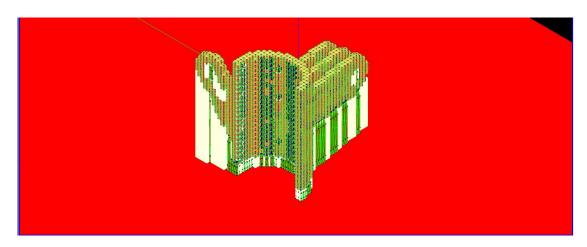


Figura 4.62: Interfaccia grafica $Supp_voxel$ di AS-ATK-CODA-POST, caso 1

Infine, si fa partire l'analisi selezionando il *run*. Si noti dal file *par.inp* che in questo specifico caso, il numero totale dei layer risulta essere 73, fig.4.63.

```
** par.inp created by AMPRO Version Beta
** tottime 0.310315625E+04
** time
               0.207483521E+04
** bdiam
               0.100000001E+00
** bvel
               0.130000000E+04
** hatch
               0.500000007E-01
** rectime
               0.250000000E+02
** tlay
               0.299999993E-01
** cgzmx
                0.326261139E+02
** nclayel
** nplayel
                             55
                          21042
** ntlayel
** nplay
                             73
** ntlay
                             73
** fplot
                              1
** diascale 0.10000000E+02
** laythkscale 0.150000000E+02
** temptol
              -0.100000000E+01
** nonlin
** eldx
               0.000000000E+00
** eldy
                0.000000000E+00
** eldz
                0.000000000E+00
**
```

Figura 4.63: File par.inp di AS-ATK-CODA-POST, caso 1

Al termine dell'analisi, è possibile visualizzare gli history results in termini di temperatura, stress residui e damage. Procedendo poi, con il piece cut, si potranno, invece, visualizzare i risultati relativi alle distorsioni in direzioni x, y e z del singolo pezzo senza piastra e supporti. Di seguito sono riportati tutti i risultati, fig.4.64, fig.4.65, fig.4.66, fig.4.67, fig.4.68, fig.4.69, fig.4.70, fig.4.71, fig.4.72, fig.4.73, fig.4.74, fig.4.75, fig.4.76, fig.4.77, fig.4.78, fig.4.79, fig.4.80, fig.4.81, fig.4.82, fig.4.83 esplicitati anche nelle tabelle 4.16 e 4.17.

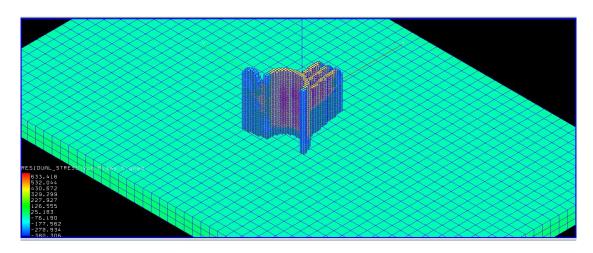


Figura 4.64: Residual stress layer 73, vista 1

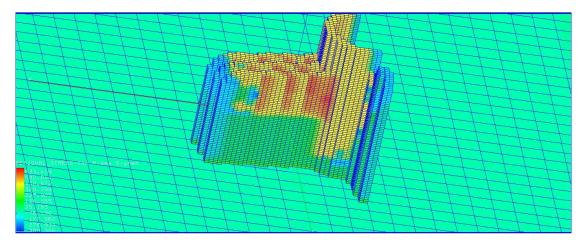


Figura 4.65: Residual stress layer 73, vista 2

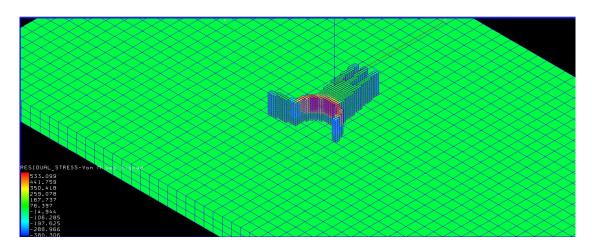


Figura 4.66: Residual stress layer 23

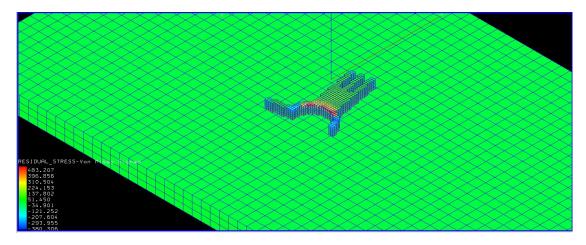


Figura 4.67: Residual stress layer 10

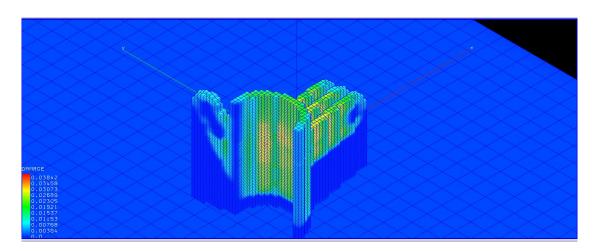


Figura 4.68: Damage layer 73, vista 1

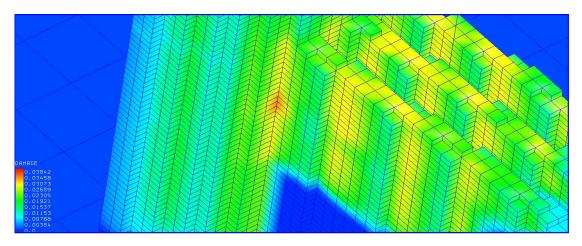


Figura 4.69: Damage layer 73, vista 2

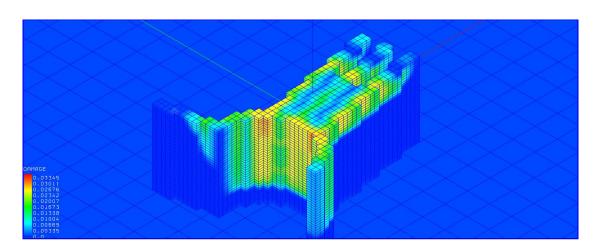


Figura 4.70: Damage layer 37

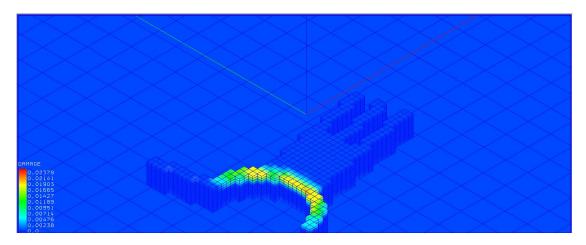


Figura 4.71: Damage layer 10

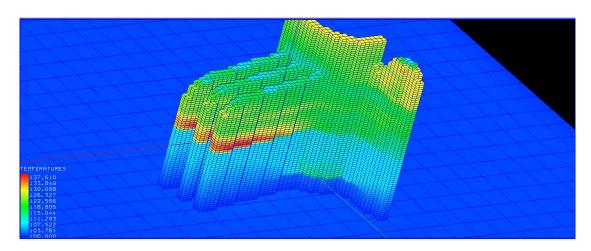


Figura 4.72: Temperatura layer 73, vista 1

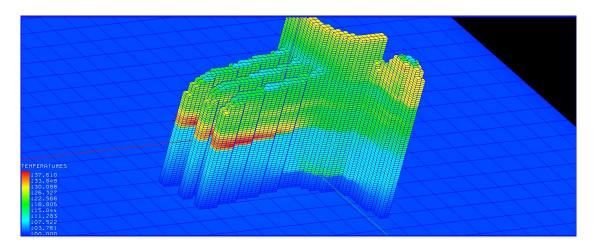


Figura 4.73: Temperatura layer 73, vista 2

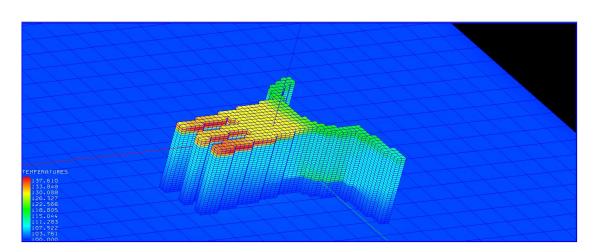


Figura 4.74: Temperatura layer 31

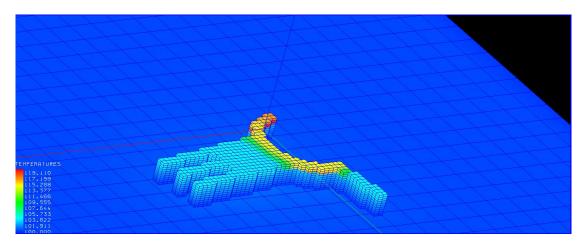


Figura 4.75: Temperatura layer 10

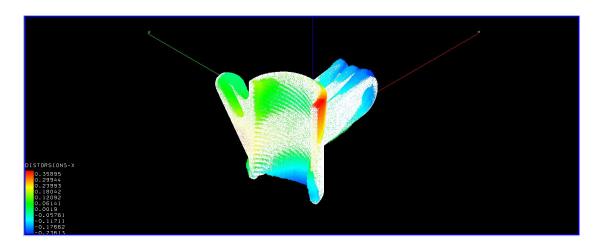


Figura 4.76: Distorsioni in direzione x, vista 1

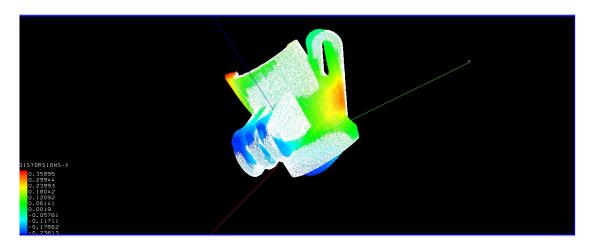


Figura 4.77: Distorsioni in direzione x, vista 2

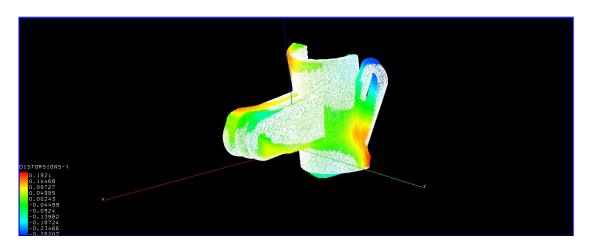


Figura 4.78: Distorsioni in direzione y, vista 1

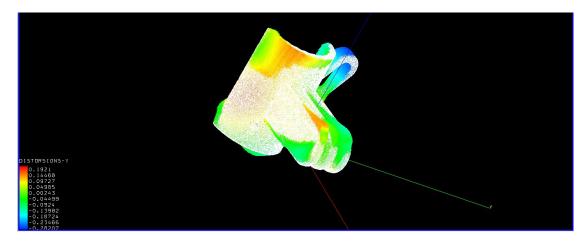


Figura 4.79: Distorsioni in direzione y, vista 2

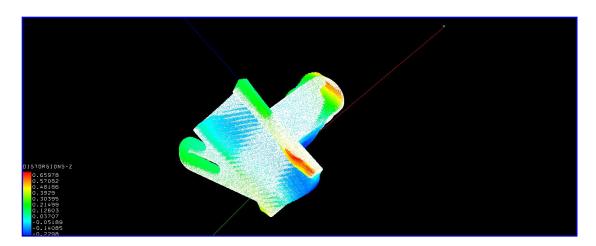


Figura 4.80: Distorsioni in direzione z, vista 1

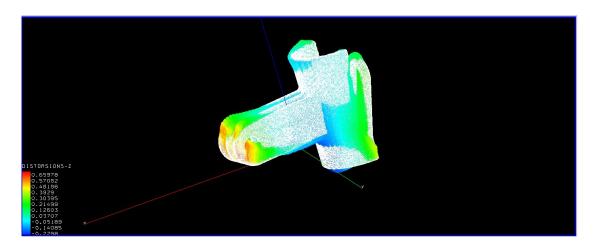


Figura 4.81: Distorsioni in direzione z, vista 2

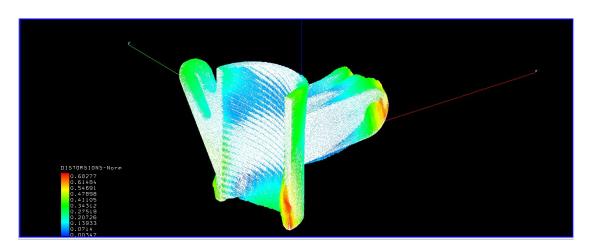


Figura 4.82: Distorsioni in norma, vista 1

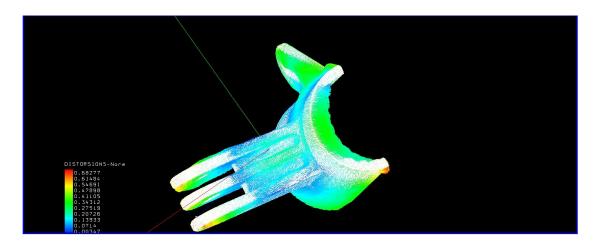


Figura 4.83: Distorsioni in norma, vista 2

Layer	Stress [MPa]	Damage	Temperatura $[{}^{\circ}C]$
73	633.416	0.03842	137.610
37		0.03345	
31			137.610
23	533.099		
10	483.207	0.02379	119.110

Tabella 4.16: Risultati caso 1 di AS-ATK-CODA-POST

Direzione	Distorsione $[mm]$
x	0.35895
y	0.1921
z	0.65978
norma	0.68277

Tabella 4.17: Distorsioni caso 1 di AS-ATK-CODA-POST

In questi risultati, si nota che il danneggiamento è sempre circa di 0.03 rispetto al file STL nominale. Inoltre, si nota, come era prevedibile, che gli stress e le temperature maggiori sono concentrate nei punti di attacco con i supporti, per cui risulta necessario il trattamento di *Stress Relief* e nelle zone di cavità e angolari.

4.2.2 Caso 2: 1:ORIENTATION

In questo secondo caso, si è voluto valutare come si modificano i risultati imponendo un'ottimizzazione sull'orientamento del pezzo, in modo tale da minimizzare il volume dei supporti.

I parametri di simulazione definiti in questo caso, sono espressi nella tabella 4.18.

Tabella 4.18: Parametri di simulazione, caso 2 di AS-ATK-CODA-POST

	Parametro	Valore	Unità di misura	
	OHANG	70	[°]	
	TOPSIDE	0.300	[mm]	
Supports	BOTSIDE	0.800	[mm]	
	THKS	0.050	[mm]	
	FILLS	0.900		
	GAP	3.000	[mm]	
Plate	PLENGTH	160.000	[mm]	
	PWIDTH	247.500	[mm]	
	PHEIGHT	10.000	[mm]	
	NLAS	1		
	TYPPOW	320000.000	[mW]	
Slicing	RECOAT	25.000	[s]	
Continua alla pagina seguente				

Tabella 4.18 – Parametri di simulazione, caso 2 di AS-ATK-CODA-POST

	Parametro	Valore	Unità di misura
	LAYTHK	0.030	[mm]
	HATCHDIST	0.050	[mm]
	JVEL	1300.000	[mm/s]
	MAT_NAME	AlSi10Mg	
	MAT_MODEL	LINEAR	
	RELEAS	3600.000	[s]
	PTEMP	100.000	$[^{\circ}C]$
	BTEMP	900.000	$[^{\circ}C]$
Proc. Simulation	ETEMP	24.000	$[^{\circ}C]$
	EMISS	0.000	$[mW/mm^2]$
	AFILM	0.010	$[mW/mm^2]$
	BFILM	1.000	$[mW/mm \cdot ^{\circ} C]$
	GRAV	9800.000	$[mm/s^2]$
	CONSTRZ	0.000	[mN]
	CONSTRXY	10.000	[mN]
	DIASCALE	10.000	
	LAYTHKSCALE	15.000	
	MEMORY	1800	
	NCPU	8	
Advanced	NINC	1	
	\mathbf{SUPMAT}	0.500	
	TEMPTOL	-1.000	
	ANGTOL	0.100	
	LINTOL	0.001	

Procedendo con la creazione dei nuovi supporti, si è ottenuto un nuovo orientamento del pezzo rispetto a quello nominale, rappresentato dal componente in blu, in fig.4.84, fig.4.85, fig.4.86.

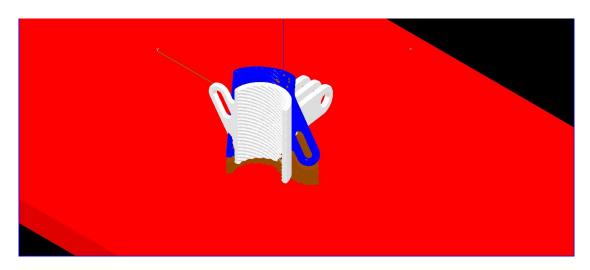


Figura 4.84: Interfaccia grafica $Part_orient_supp_AS-ATK-CODA-POST$ orientamento ottimizzato, vista 1



Figura 4.85: Interfaccia grafica $Part_orient_supp_AS-ATK-CODA-POST$ orientamento ottimizzato, vista 2

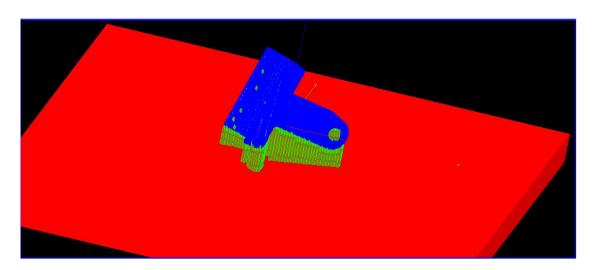


Figura 4.86: Interfaccia grafica *Part_orient_supp_AS-ATK-CODA-POST* orientamento ottimizzato, vista 3

Salvando i supporti appena creati, si creano i file di input necessari per la simulazione, fig.4.87, da cui è possibile visionare in dettaglio i dati di output, fig.4.88.

N	NOME_MESH	VOL_SUPP	VOL_RATIO	NB_LAYERS	MANUF_TIME	INPUT	OUTP
1	supp12	434.599	0.125	1059	28372.486	Edit	Edit

 $\bf Figura~4.87:~$ Dati di input dell'analisi e configurazione supporti, caso 2 di AS-ATK-CODA-POST

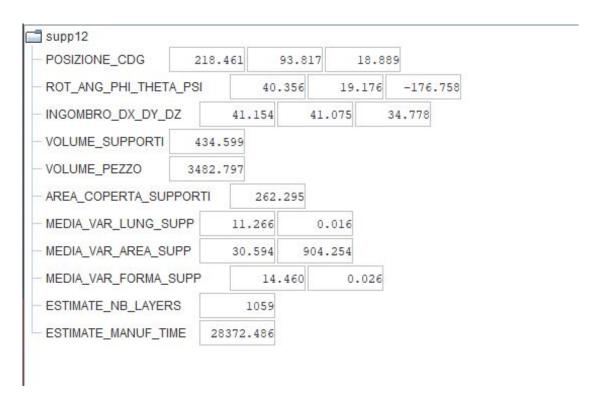


Figura 4.88: Dati output, caso 2 di AS-ATK-CODA-POST

Procedendo con l'analisi di *pre-processing*, si ottiene la configurazione della geometria sotto forma di voxel, fig.4.89, fig.4.90.

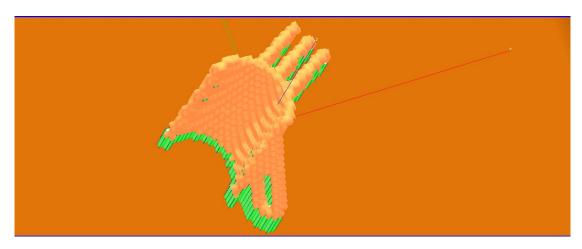


Figura 4.89: Interfaccia grafica $Supp_voxel$ di AS-ATK-CODA-POST, caso 2, vista 1

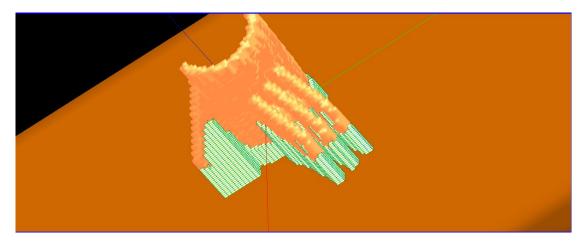


Figura 4.90: Interfaccia grafica $Supp_voxel$ di AS-ATK-CODA-POST, caso 2, vista 2

Infine, si procede con l'avvio dell'analisi, selezionando il run. Si noti dal file par.inp che in questo specifico caso, il numero totale dei layer risulta essere 77, fig.4.91.

**	bvel	0.130000000E+04
k je	hatch	0.500000007E-01
*	rectime	0.250000000E+02
k #	tlay	0.29999993E-01
k or	cgzmx	0.339758568E+02
k #	nclayel	21
**	nplayel	8
**	ntlayel	25358
**	nplay	76
**	ntlay	77
**	fplot	1
**	diascale	0.100000000E+02
k #	laythkscale	0.150000000E+02
**	temptol	-0.100000000E+01
**	nonlin	0
**	eldx	0.00000000E+00
88	eldy	0.00000000E+00
**	eldz	0.00000000E+00
**		

Figura 4.91: File par.inp di AS-ATK-CODA-POST, caso 2

Al termine dell'analisi, è possibile visualizzare gli history results in termini di temperatura, stress residui e damage. Procedendo poi, con il piece cut, si potranno visualizzare i risultati relativi alle distorsioni in direzioni $x,\,y,\,z$ e in norma, del singolo pezzo senza piastra e supporti. Di seguito sono riportati tutti i risultati, fig.4.92, fig.4.93, fig.4.94, fig.4.95, fig.4.96, fig.4.97, fig.4.98, fig.4.99, fig.4.100, fig.4.101, fig.4.102, fig.4.103, fig.4.104, fig.4.105 esplicitati anche nelle tabelle 4.19 e 4.20.

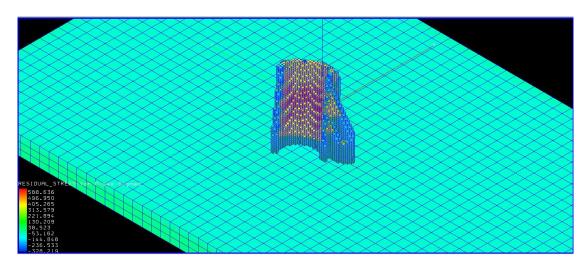


Figura 4.92: Residual stress, vista 1

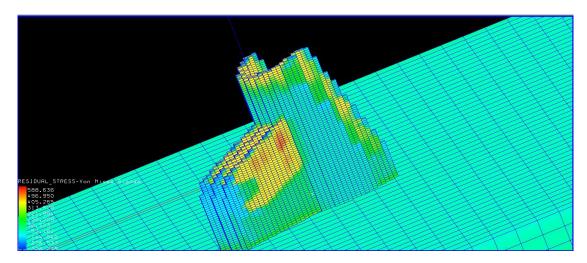


Figura 4.93: Residual stress, vista 2

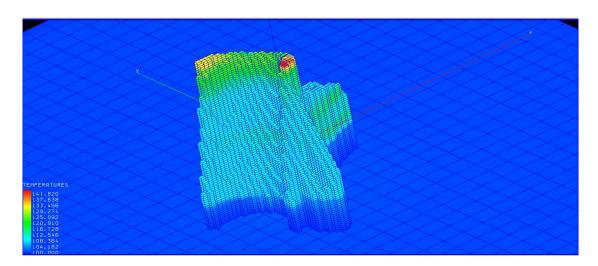


Figura 4.94: Temperatura, vista 1

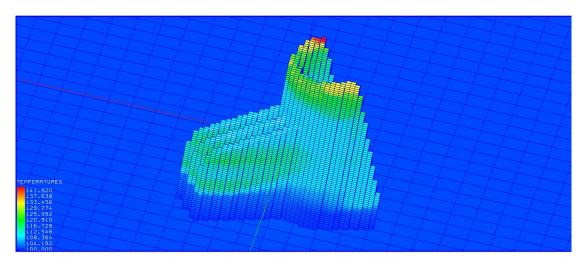


Figura 4.95: Temperatura, vista 2

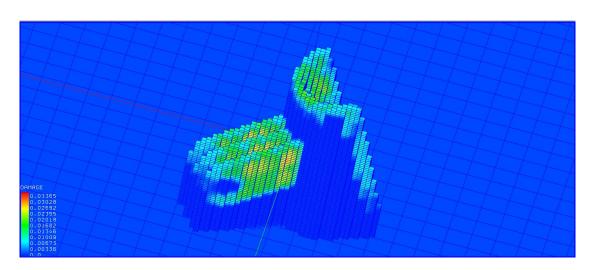


Figura 4.96: Damage, vista 1

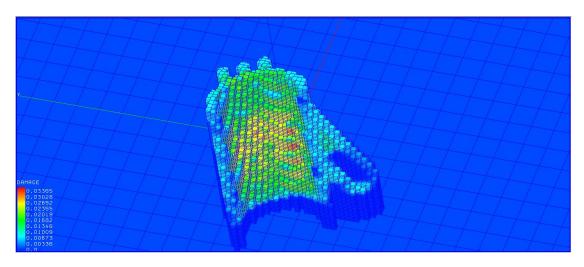


Figura 4.97: Damage, vista 2

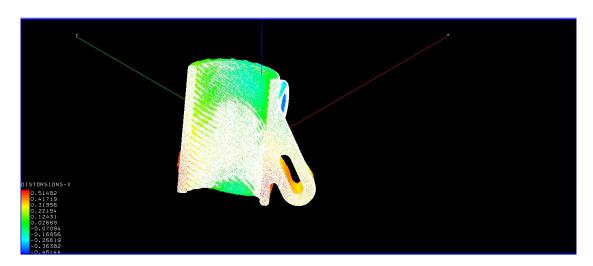


Figura 4.98: Distorsioni in direzione x, vista 1

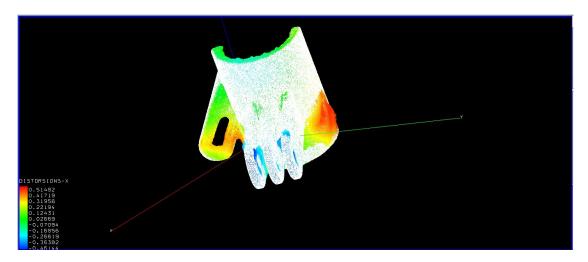


Figura 4.99: Distorsioni in direzione x, vista 2

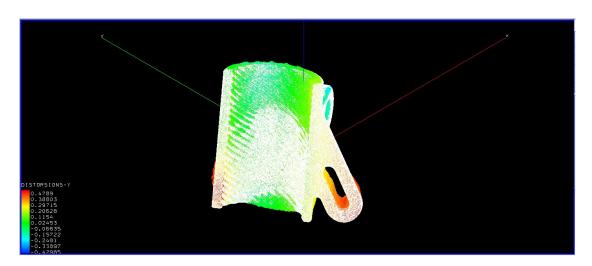


Figura 4.100: Distorsioni in direzione y, vista 1

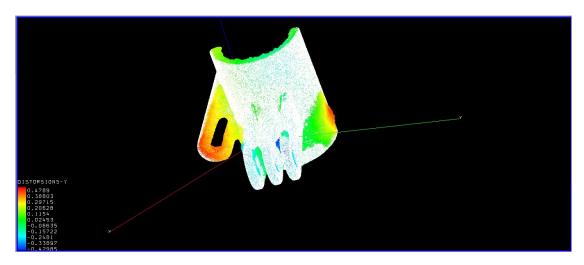


Figura 4.101: Distorsioni in direzione y, vista 2

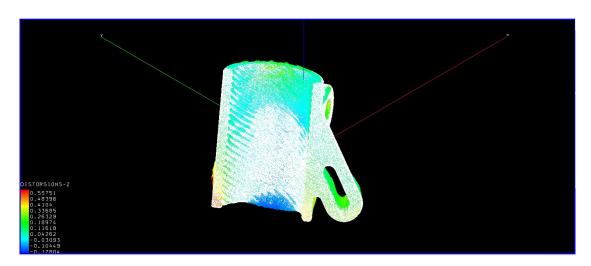


Figura 4.102: Distorsioni in direzione z, vista 1

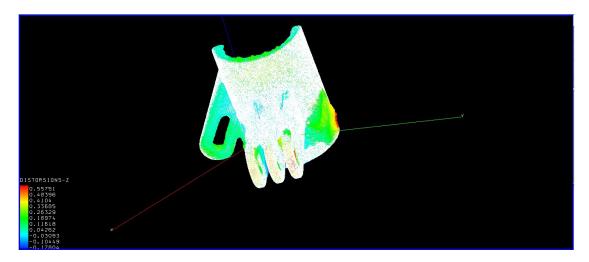


Figura 4.103: Distorsioni in direzione z, vista 2

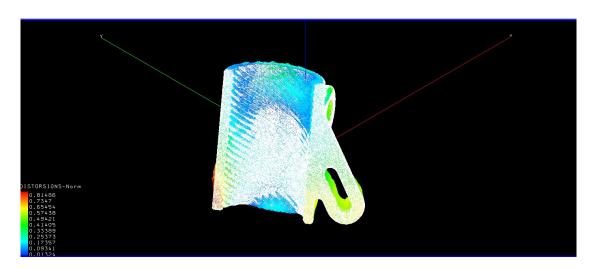


Figura 4.104: Distorsioni in norma, vista $1\,$

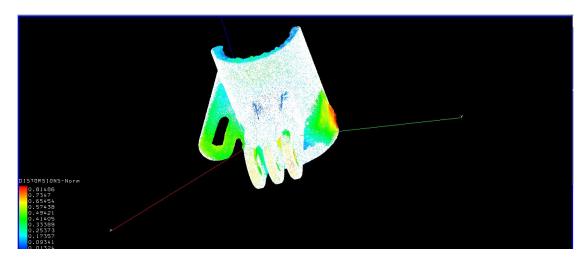


Figura 4.105: Distorsioni in norma, vista 2

Layer	Stress [MPa]	Damage	Temperatura $[{}^{\circ}C]$
77	588.636	0.03365	141.820

Tabella 4.19: Risultati caso 2 di AS-ATK-CODA-POST

Direzione	Distorsione $[mm]$
x	0.51482
y	0.4789
z	0.55751
norma	0.81486

Tabella 4.20: Distorsioni caso 2 di AS-ATK-CODA-POST

4.2.3 Confronto tra caso 1 e caso 2

É possibile confrontare quindi, i risultati ottenuti nei due casi. In particolare si possono prima di tutto, confrontare i dati di input dell'analisi e la configurazione dei supporti, come espresso in tabella 4.21.

	1	2
VOL_SUPP $[mm^3]$	569.553	434.599
VOL_RATIO	0.164	0.125
NB_LAYERS	1000	1059
MANUF_TIME [s]	26932.088	28372.486

Tabella 4.21: Confronto dati di input analisi caso 1 e caso 2 di AS-ATK-CODA-POST

Nel caso 2 rispetto al caso 1, si nota, effettivamente, una riduzione del volume dei supporti e quindi anche del rapporto tra volume supporti e volume pezzo complessivo, a discapito di un aumento del numero di layers e del tempo di produzione.

Inoltre, è possibile confrontare i risultati ottenuti in termini di stress, damage, temperatura e distorsioni (in norma), in modo da verificare se un'ottimizzazione di questo tipo può essere conveniente. In particolare, si faccia riferimento alla tabella 4.22.

	1	2
Stress $[MPa]$	633.416	588.636
Damage	0.03842	0.03365
Temperatura $[{}^{\circ}C]$	137.610	141.280
Distorsioni [mm]	0.68277	0.81486

Tabella 4.22: Confronto risultati caso 1 e caso 2 di AS-ATK-CODA-POST

Si noti, dalle immagini dei risultati dei paragrafi dedicati al caso 1 e caso 2, che i valori massimi di stress, damage, temperatura e distorsioni sono localizzati circa nelle stesse posizioni. Ciò che varia in maniera evidente, sono le distorsioni che risultano minori nel componente con orientamento non ottimizzato del caso 1. Pertanto, considerato che da questa ottimizzazione si è ottenuto come beneficio, unicamente, una riduzione del volume dei supporti, converrebbe mantenere l'orientamento iniziale del caso 1.

Capitolo 5

Tomografia Computerizzata

Il presente capitolo ha lo scopo di illustrare l'attività di tomografia svolta presso Labormet Due S.r.l. [47], azienda di Torino, specializzata in servizi di controllo qualità. Si vogliono riportare inoltre, i risultati ottenuti da questa attività, riguardo la presenza di difettosità all'interno del componente scansionato rispetto al componente nominale.

5.1 Set-up sperimentale

Storicamente la Tomografia computerizzata si è sviluppata alla fine degli anni '90 in campo medico come metodo di indagine radiodiagnostica (TAC). Negli ultimi anni l'aumento dei requisiti nei settori tecnologici ha permesso una sua evoluzione nel settore aerospaziale, automobilistico e biomedicale. Nella pratica la Tomografia industriale computerizzata a raggi X, prevede un esame radiografico a 360° dal quale si ottiene una ricostruzione tridimensionale analizzabile, come suggerisce appunto il termine, al computer. Infatti grazie ad appositi supporti l'oggetto viene fatto ruotare sul proprio asse in modo da acquisirne una digitalizzazione completa.

La Tomografia industriale computerizzata prevede un'analisi totale del componente, sia interna che esterna, senza recare ad esso il minimo danno e, per questo motivo, il controllo è definito non distruttivo.

Tra le principali applicazioni della tomografia industriale computerizzata si ricorda:

- l'analisi dimensionale e geometrica del componente, non solo esterna ma persino interna, senza la necessità di scomporlo fisicamente oppure, per esempio, la misurazione di spessori;
- l'indagine funzionale a scopo preventivo permette di verificare la struttura interna del componente, trovare danneggiamenti, deformazioni, disallineamenti non visibili senza la necessità di smontaggio del pezzo;
- la ricerca difettologica finalizzata all'identificazione della forma, dimensione e posizione all'interno del componente dei diversi difetti quali cricche, porosità, inclusioni.

Presso Labormet Due, per l'attività sperimentale in questione, si è utilizzato il sistema di tomografia X-ray CT PHOENIX V|TOME|X M, fig.5.1, di cui si riportano le principali caratteristiche.

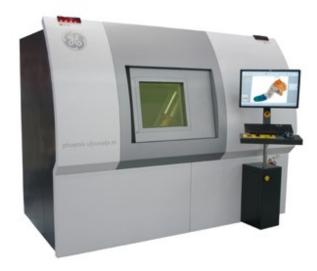


Figura 5.1: Sistema di tomografia PHOENIX V|TOME|X M, [48]

- Primo sistema CT compatto a 300kV microfuoco (focal spot $4 \pm m$), ottimo per uso metrologico;
- Leader nel settore per l'ingrandimento a potenza di 300kV per campioni ad alto assorbimento;
- Unica configurazione a doppio tubo in grado di gestire alte energie, μCT , e elevata risoluzione, nCT;

- La v|tome|x m è l'unico sistema μCT al mondo disponibile con l'innovativa tecnologia scatter|correct. Questo sistema esclusivo di GE consente la rimozione automatica degli artefatti dai volumi CT, permettendo di avere risultati e immagini nettamente migliori rispetto ai classici sistemi di tomografia;
- Il sistema GE high-flux|target consente scansioni μCT molto più efficienti grazie alla velocità raddoppiata o ad una scansione a doppia risoluzione a parità di tempo;
- Sistema ottimizzato e semplice da usare grazie al software phoenix datos|x CT con la funzionalità automatica click & measure|CT;
- Sistema CT ottimizzato per le acquisizioni e le metrologia 3D con tubo raggi-X stabilizzato in temperatura;
- Sistema Metrologico 3D con specifiche di accuratezza $3.8 + L/100\mu m$, in conformità alle linee guida VDI 2630;
- Grandezze massime campione analizzabile: Ø $300mm \times H 500mm 50kg$;

Le applicazioni principali di questo sistema X-ray CT sono:

- Analisi interna dei difetti / Analisi 3D quantitativa della porosità;
- Controllo dell'assemblaggio;
- Analisi della struttura dei materiali;
- Confronto CAD nominale-reale;
- Misura delle dimensioni / Analisi dello spessore delle pareti;
- Reverse engineering / Strumenti di compensazione;

5.2 Procedura di scansione

Gli elementi essenziali di un sistema tomografico sono rappresentati da una sorgente di raggi X, un meccanismo di movimentazione dell'oggetto da investigare, un rivelatore e uno o più computer, fig.5.2. Generalmente un computer si occupa della movimentazione del campione e dell'acquisizione

delle radiografie, un altro del processo di ricostruzione tomografica. Durante la scansione l'oggetto viene fatto ruotare su 360°, acquisendo una radiografia ad ogni angolo di rotazione, in modo tale da ottenere un set di immagini, ciascuna relativa ad una diversa posizione dell'oggetto. Da queste immagini, tramite un particolare software, si ricostruiscono le diverse sezioni tomografiche, ottenendo infine il modello 3D del campione analizzato.

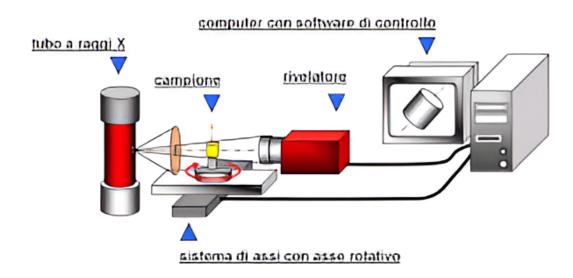


Figura 5.2: Schema generale di un sistema tomografico [49]

In particolare, nel caso specifico di questa analisi, il processo si di scansione si è svolto nel seguente modo.

All'interno della camera della macchina vi è una zona di rotazione costituita da un mandrino e un sistema rotante, che permette di avere una rotazione a 360° , fig.5.3.

Il componente viene posto su un supporto, che abbia una densità molto minore rispetto a quella del materiale del componente da scansionare, in questo caso si è scelto di utilizzare un supporto in polistirolo, come in fig.5.4.

Dopo aver centrato il pezzo e scelto i parametri in base al materiale, si prepara lo sfondo del detector e si fanno delle acquisizioni solo dello sfondo con i parametri scelti e quindi si setta così il detector in base ai parametri scelti. Una volta fatto questo, si riporta l'oggetto in posizione e si controlla che stia dentro l'immagine quadrangolare di acquisizione e si fa partire la scansione, in cui il componente realizzerà una rotazione a 360° e ogni 0.60°

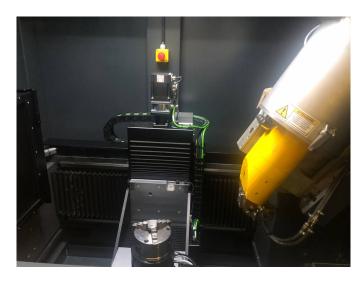


Figura 5.3: Sistema rotante del tomografo



Figura 5.4: Sistema rotante del tomografo con componente posizionato

l'acquisitore scatterà un'immagine, per un totale di 3000 immagini. Queste immagini in formato .tif vengono trasferite direttamente su di un pc, dove un software, in questo caso Volume Graphics® di Hexagon [50], ri-assembla

le 3000 immagini e ricostruisce l'oggetto 3D.

Il tempo di durata della scansione dipende dalla densità del materiale, più la densità è elevata, maggiore sarà il tempo di esposizione in macchina necessario. In questo caso il tempo di scansione di aggira intorno ai 10min.

I parametri sono riassunti in fig.5.5.

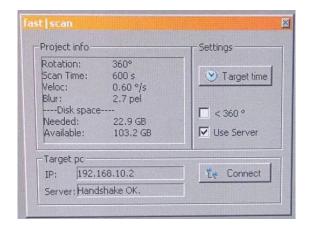


Figura 5.5: Parametri di scansione

La ricostruzione 3D dell'oggetto scansionato è riportata in fig.5.6 e fig.5.7, dove già in un primo controllo visivo e qualitativo è possibile notare alcune difettosità superficiali.

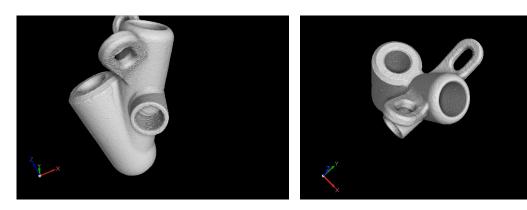


Figura 5.6: Ricostruzione 3D dell'oggetto scansionato, vista 1 l'oggetto scansionato, vista 2

Le difettosità superficiali, sono ancora più evidenti in fig.5.8 dove vi è un ingrandimento di dettaglio di una particolare zona del componente.

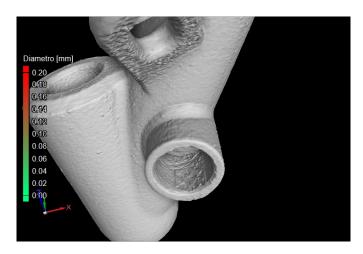


Figura 5.8: Dettaglio difettosità oggetto 3D scansionato

5.3 Risultati e commenti

5.3.1 Analisi dei difetti interni

L'identificazione dei difetti interni con le rispettive caratteristiche è stata effettuata grazie al modulo $Porosity\ Analysis$ del software gratuito di analisi tomografica myVGL, facente parte della suite Volume Graphics® [50]. In fig.5.9 si riporta il 3D del componente scansionato dove sono evidenziate secondo una scala colori, in riferimento al diametro, le differenti porosità presenti all'interno del materiale. Si nota immediatamente che le dimensioni massime delle porosità si aggirano intorno a 0.20mm.

Nelle fig.5.10 e fig.5.11, si riporta un ingrandimento di dettaglio per meglio visualizzare le zone con maggiore presenza di porosità interne.

In sezione, fig.5.12, le porosità sono identificabili dai puntini di differente colore, a seconda della misura del diametro, i quali rappresentano effettivamente dei vuoti all'interno del materiale stesso.



Figura 5.9: Identificazione porosità nel componente 3D scansionato

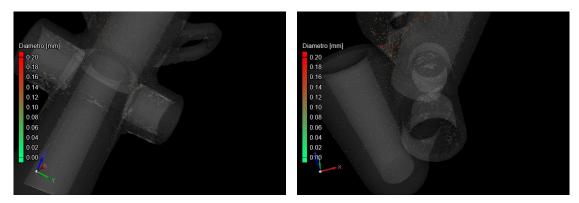


Figura 5.10: Dettaglio identificazio- Figura 5.11: Dettaglio identificazione porosità, vista 1

ne porosità, vista 2

In fig.5.13 sono riassunti i principali dati estrapolati da questa analisi. Si riporta infatti, che il numero totale di difetti individuato è 2963, corrispondente a un volume di vuoti pari a $0.53mm^3$, su un volume totale del componente pari a $3873.77mm^3$, quindi:

$$Porosity(\%) = 100 \frac{Volume\,vuoti}{Volume\,totale\,materiale} = 0.01\%$$

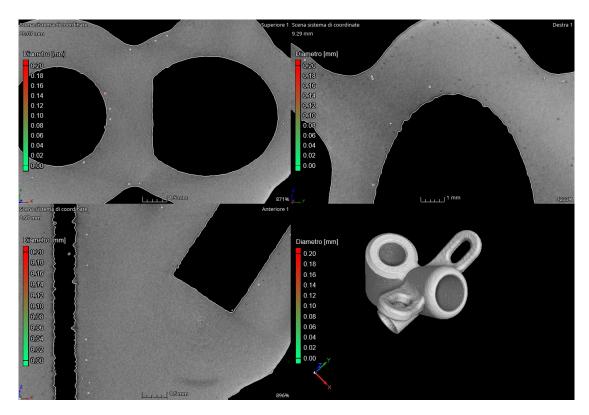


Figura 5.12: Identificazione porosità nel componente 3D scansionato e nelle viste in sezione

La quale risulta essere una percentuale evidentemente molto bassa, e quindi si può ritenere ottimale il componente realizzato.



Figura 5.13: Dati sulle porosità

Dal file *excel* di raccolta dati riguardo le porosità, in termini di diametro, raggio, posizione, volume, superficie, ecc.), è possibile estrapolare un interessante grafico, fig.5.14, il quale diagramma il conteggio dei difetti individuati in base alla misura del loro diametro. É evidente come, per la maggior parte

dei difetti individuati la dimensione del diametro si aggira intorno ai 0.07mm, solo una piccolissima parte, quasi trascurabile, supera invece la dimensione di 0.15mm.

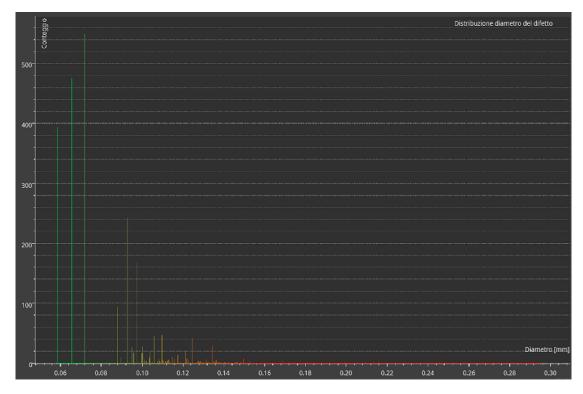


Figura 5.14: Conteggio porosità su dimensione diametro

In particolare, è possibile individuare 3 zone di distribuzione:

- 85.22% delle difetti ha $0.06mm \le d \le 0.11mm$, fig.5.15;
- 29.16% delle difetti ha $0.09mm \le d \le 0.14mm$, fig.5.16;
- 0.54% delle difetti ha $0.18mm \le d \le 0.23mm$, fig.5.17;

5.3.2 Analisi confronto con nominale

Si è ritenuto interessante, inoltre, approfondire un'ulteriore opportunità di analisi, che prevede il confronto, del 3D del componente scansionato (e quindi del componente effettivamente prodotto) con il CAD nominale del componente. Tale confronto si ottiene mediante sovrapposizione dei due 3D

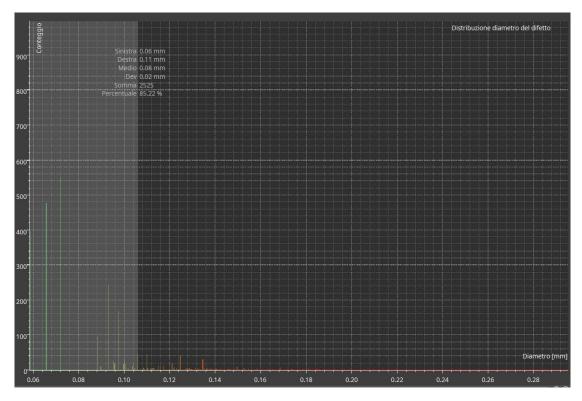


Figura 5.15: Conteggio porosità su dimensione diametro, dettaglio % zona 1

e studiando la deviazione, ovvero di quanto il 3D scansionato differisce dal CAD nominale, utilizzando lo stesso software usato già per le analisi delle porosità.

In un prima fase, si identificano già particolari zone dove è evidente la deviazione rispetto al nominale, tramite un semplice controllo visivo. In particolare, si notino gli scostamenti del materiale (grigio) rispetto al contorno del CAD nominale (arancione), nelle fig.5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29.

Guardando i risultati numerici, nelle fig.5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35, 5.36, si nota, dalla scala colori, come le dimensioni di deviazione rispetto al nominale siano di $\pm 0.10mm$, a seconda che la deviazione sia verso l'esterno o verso l'interno rispetto al alla superficie nominale del componente, e sono evidenti anche le zone in cui le deviazioni sono maggiormente diffuse, le

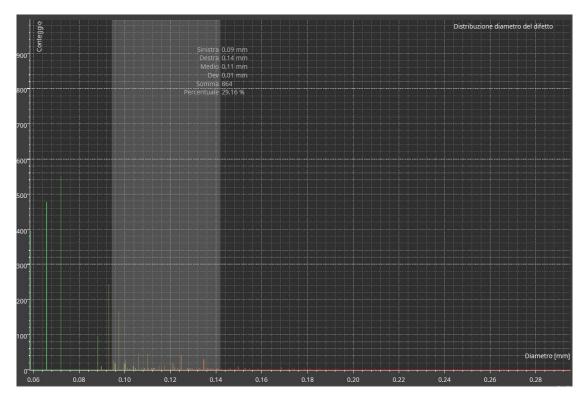


Figura 5.16: Conteggio porosità su dimensione diametro, dettaglio %zona 2

stesse zone in cui vi era anche una maggiore presenza di porosità.

Si riportano infine, alcune immagini di dettaglio delle viste in sezione, dove è particolarmente evidente la deviazione rispetto al nominale, fig.5.37, 5.38, 5.39, 5.40, 5.41, 5.42, 5.43, 5.44.

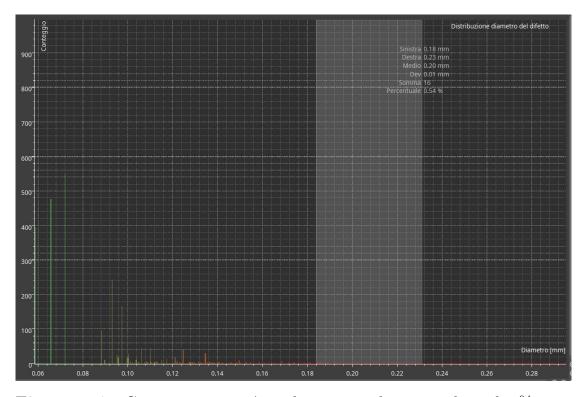


Figura 5.17: Conteggio porosità su dimensione diametro, dettaglio %zona 3

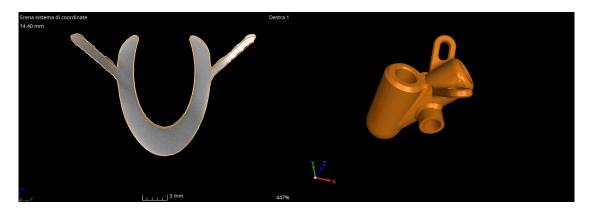


Figura 5.18: Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 1

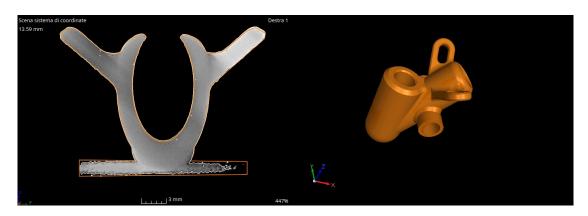


Figura 5.19: Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 2

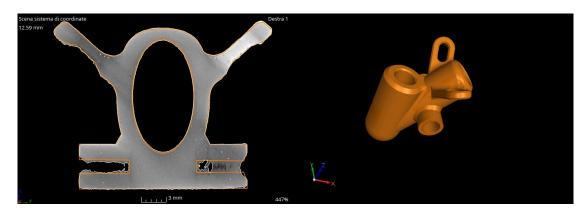


Figura 5.20: Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 3

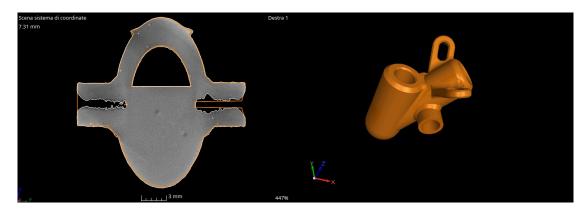


Figura 5.21: Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio $4\,$

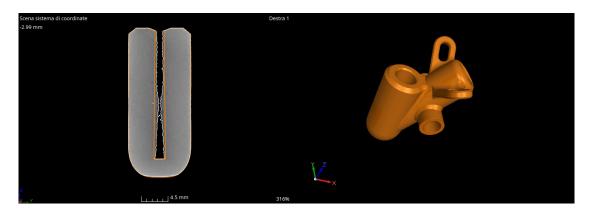


Figura 5.22: Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 5

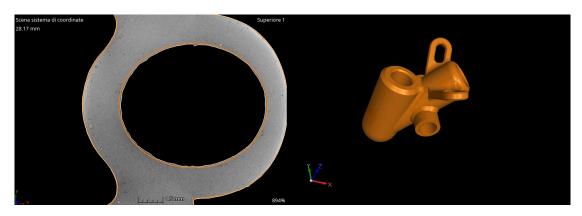


Figura 5.23: Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 6

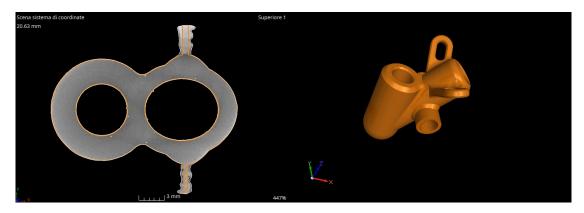


Figura 5.24: Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 7

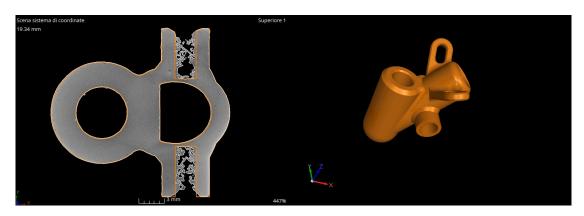


Figura 5.25: Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 8

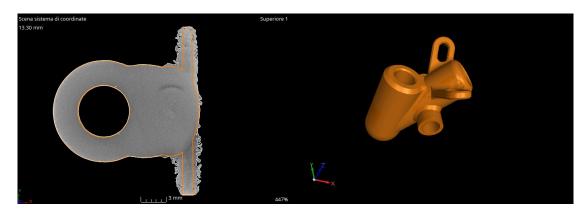


Figura 5.26: Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio $9\,$

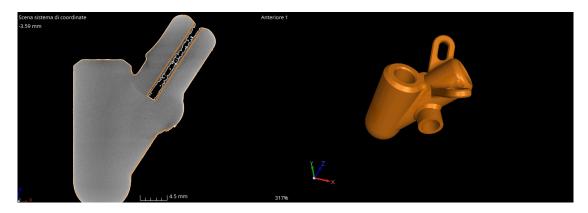


Figura 5.27: Deviazione in sezione, vista anteriore, dettaglio 10

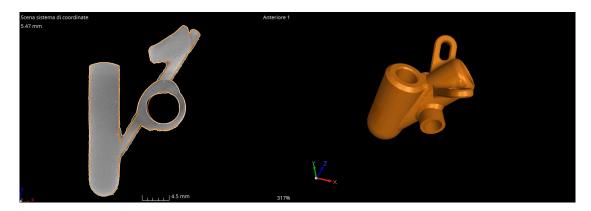


Figura 5.28: Deviazione in sezione, vista anteriore, dettaglio 11

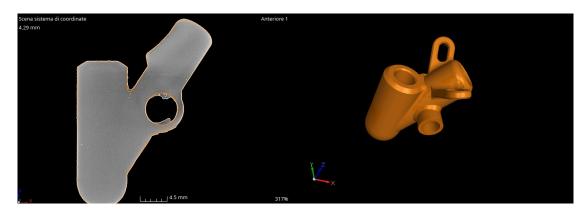


Figura 5.29: Deviazione in sezione, vista anteriore, dettaglio 12

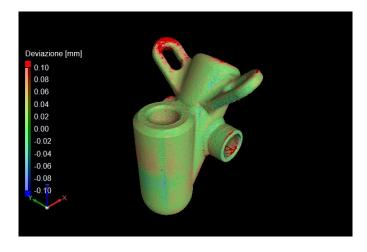


Figura 5.30: Deviazione in vista assonometrica 3D

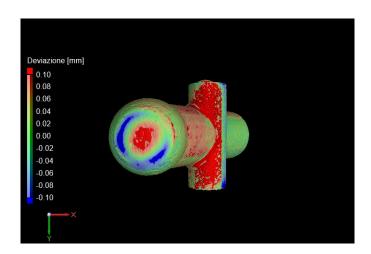


Figura 5.31: Deviazione in vista 3D inferiore

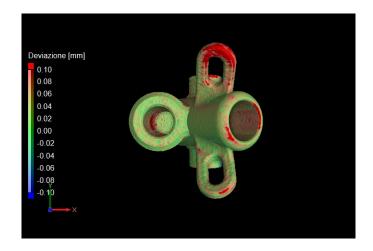


Figura 5.32: Deviazione in vista 3D superiore

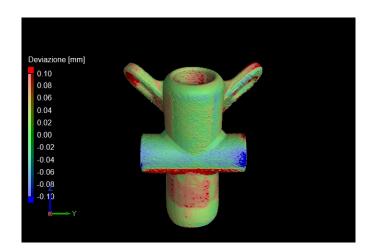


Figura 5.33: Deviazione in vista 3D destra

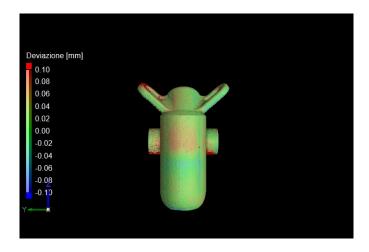


Figura 5.34: Deviazione in vista 3D sinistra

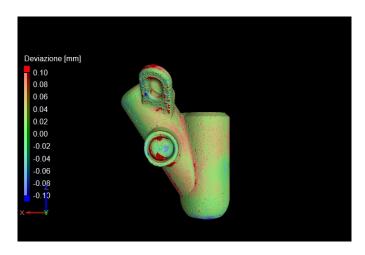


Figura 5.35: Deviazione in vista 3D anteriore

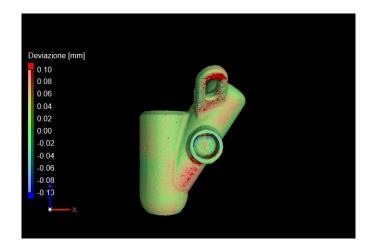


Figura 5.36: Deviazione in vista 3D posteriore

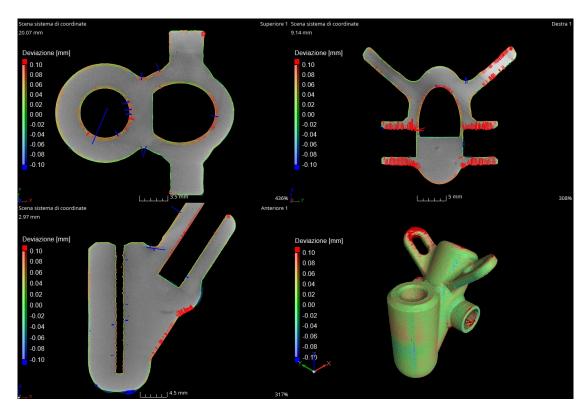


Figura 5.37: Deviazione nel componente 3D e nelle differenti viste in sezione

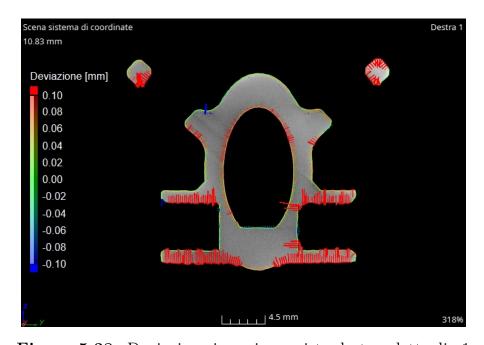


Figura 5.38: Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 1

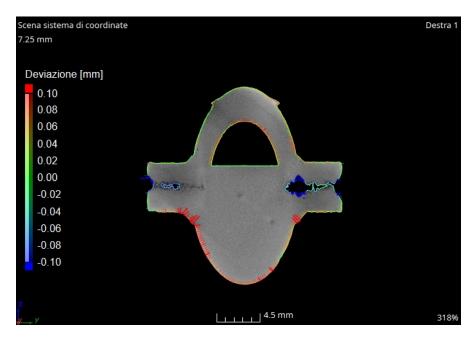


Figura 5.39: Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 2

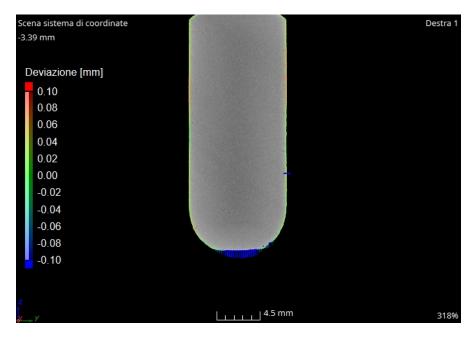


Figura 5.40: Deviazione in sezione, vista destra, dettaglio 3

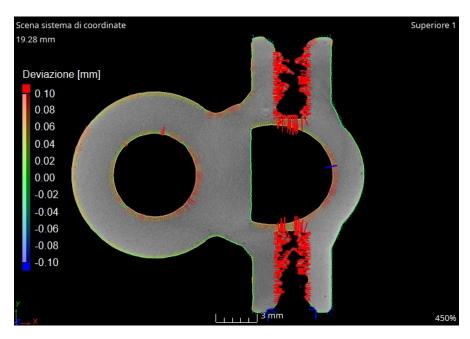


Figura 5.41: Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 4

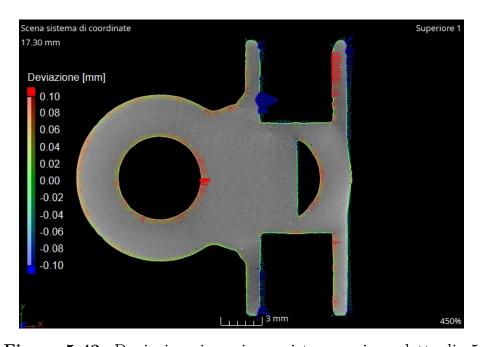


Figura 5.42: Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 5

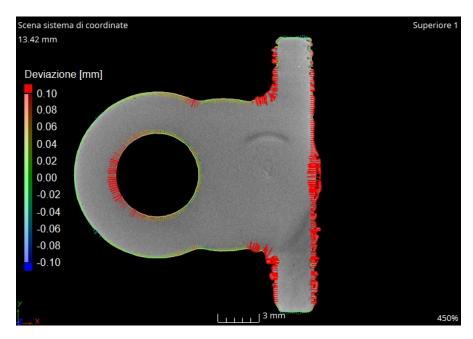


Figura 5.43: Deviazione in sezione, vista superiore, dettaglio 6

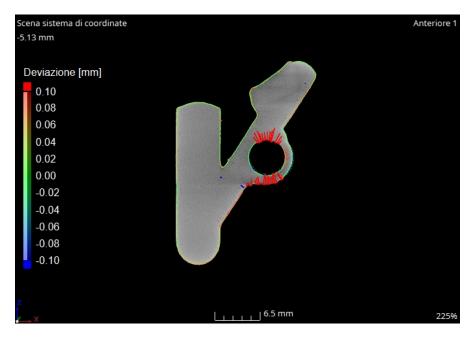
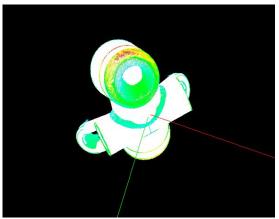


Figura 5.44: Deviazione in sezione, vista anteriore, dettaglio 7

Confronto numerico-sperimentale 5.4

Risulta interessante, confrontare quindi, i risultati ottenuti dalla tomografia computerizzata, riguardo la deviazione rispetto al STL nominale, con i risultati ottenuti dal processo di simulazione riguardo le distorsioni del componente C-SUP-P1, nel caso 1, senza ottimizzazione dell'orientamento. Guardando i risultati in termini di soli valori numerici, è evidente notare che nella tomografia computerizzata si ottengono risultati di circa 0.1mm, nel caso del processo di simulazione con AMTOP® si ottengono risultati di circa 0.6mm, che seppur dello stesso ordine, risultano leggermente differenti. Questa differenza può essere dovuta a diversi fattori, tra cui l'effetto dei parametri di processo come la temperatura della piastra, il tempo di recoating, il gap tra parte e base, la quantità di materiale asportato durante l'operazione di piece cut e le dimensioni dei supporti, ma anche, in misura minore, fattori di approssimazione numerica (LAYTHKSCALE e DIASCALE) inseriti del processo di simulazione. Tali informazioni sono state infatti, supposte nella maniera più realistica possibile, non avendo a disposizione tutti i parametri inseriti nel processo di stampa, da parte dell'azienda SPEM.

La cosa interessante è che in ogni caso, le distorsioni o deviazioni maggiori sono localizzate, rispettivamente, negli stessi identici punti, garantendo quindi una certa convergenza tra il processo reale e il processo simulato. Di seguito sono riportate alcune immagini per meglio chiarire questo concetto.



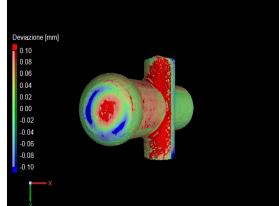
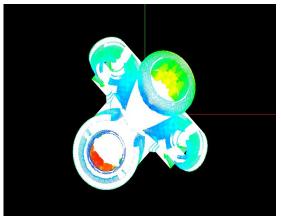


Figura 5.45: Vista inferiore risultati Figura 5.46: Vista inferiore risultati processo simulato

processo reale

In fig.5.45 si nota che nella parte inferiore del componente sono concentrate maggiormente le distorsioni e in questa zona assumono un valore di circa 0.3mm, mentre in fig.5.46 si nota che nella stessa zona si ha un massimo di deviazione con un valore di circa 0.1mm.

Anche nella vista superiore, nel confronto tra fig.5.47 e fig.5.48 si nota che in entrambi i casi, le maggiori distorsioni sono concentrate nelle cavità interne del componente, assumendo valori più o meno simili tra loro.



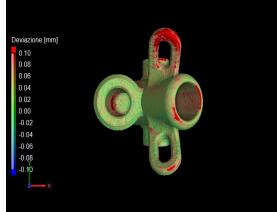


Figura 5.47: Vista superiore risulta- Figura 5.48: Vista superiore risultati processo simulato

ti processo reale

Capitolo 6

Conclusioni

Le simulazioni di processo LPBF rappresentano un elemento cruciale nella comprensione e nell'ottimizzazione dei processi di produzione additiva, specialmente nel settore aerospaziale, dove i requisiti di prestazioni, sicurezza e affidabilità sono estremamente elevati. Attraverso questo elaborato, si è esaminata l'applicazione di simulazioni di processo LPBF e prove sperimentali su casi studio nel settore aerospaziale, con l'obiettivo di migliorare la comprensione e l'efficacia di questo processo.

Uno degli aspetti chiave che emergono dall'analisi è la validità delle simulazioni di processo LPBF nel predire il comportamento del materiale durante la produzione additiva. Le prove sperimentali, come la tomografia computerizzata, hanno confermato l'accuratezza delle simulazioni. Questo risultato è fondamentale per garantire la qualità e l'affidabilità dei componenti aerospaziali prodotti mediante LPBF. Si noti che per quel che riguarda le simulazioni, si è utilizzato il software AMTOP® V.2.0, ovvero una versione ancora in fase di sviluppo, pertanto durante il lavoro di tesi si sono sicuramente comprese le potenzialità che il software offre, nonostante le limitazioni ancora presenti. Per sviluppi futuri, potrebbe essere interessante risolvere queste limitazioni, portando quindi a compimento le potenzialità del software e introducendo una funzione che permetta un confronto con l'STL nominale del componente, non solo in termini di distorsioni, ma anche in termini di porosità interne. Per fare ciò sarebbe necessario anche introdurre informazioni riguardo le polveri metalliche e la loro produzione, utilizzate nella costruzione del componente, quindi si dovrebbe implementare la possibilità di svolgere anche un'analisi microscopica, oltre che macroscopica a livello di processo additivo.

Inoltre, si è osservato che l'integrazione di prove sperimentali con simulazioni di processo LPBF consente di affinare e validare i modelli utilizzati, aumentando ulteriormente la precisione delle previsioni. L'approccio combinato consente un'ottimizzazione più mirata dei parametri di processo per soddisfare requisiti specifici di prestazioni e affidabilità.

Ringraziamenti

Vorrei dedicare lo spazio finale di questo elaborato per ringraziare tutti coloro che in questi anni hanno scelto di essermi accanto, accompagnandomi nel percorso di vita che passo dopo passo mi ha condotto oggi qui, in questo giorno e in questo luogo.

Nelle ultime settimane, mentre cercavo le parole giuste per rendere questo discorso di ringraziamenti, degno di questo giorno, mi sono resa conto di quanto fosse grande il bagaglio di questi anni, che porto con me. Un bagaglio così ricco di esperienze e momenti che mi hanno, in qualche modo, resa una persona migliore, ma soprattutto un bagaglio ricco di esseri umani speciali, che il destino ha deciso farmi incontrare. Vorrei poterli ringraziare tutti oggi, quindi mettetevi comodi, perché credo ci vorrà un po'.

Per primi vorrei ringraziare le due persone che non solo mi hanno dato la vita, ma mi hanno anche permesso di viverla perseguendo i miei sogni. Mi ritengo una persona fortunata per aver avuto due genitori esemplari come voi, che mi hanno trasmesso la perseveranza e mi hanno insegnato il sacrificio. Quel sacrificio economico che mi ha permesso, oggi, di essere qui, e quel sacrificio emotivo che con l'amaro in bocca, ha fatto sì che percorressi la mia strada nella direzione che desideravo. Purtroppo però, non è stato semplice gestire la distanza che ci ha divisi in questi anni. Sono andata via che avevo appena 19 anni, una vita fa ormai, e inconsapevole di ciò a cui andavo incontro ero piena di energia ed entusiasmo per tutte le novità che stavano entrando a far parte della mia vita. E ora? Mamma, lo vedi quanto è cambiata la mia vita? Papà, lo vedi quanto sono cresciuta? Ho addirittura conseguito due lauree, incredibile! Eppure, sono sicura di essere ancora la vostra bambina, quella bambina così buona e tranquilla, ma con tanti sogni nel cassetto, che ora finalmente cominciano a prendere vita. Ma quanti pianti da sola in quei treni, partenza Trani - arrivo Torino Porta Susa, quanti pianti mi è costato questo sogno, in quei viaggi mi chiedevo costantemente se stessi facendo la

cosa giusta o se avessi preso solo un abbaglio. Mbe, oggi posso dire di non aver sbagliato, oggi prendo atto del fatto che questo sacrificio non è stato invano. Grazie Mamma, per essere stata così forte per me, nonostante il tuo cuore si spezzasse ogni volta sempre di più. Grazie papà, per avermi dato il coraggio di cui avevo bisogno e per avermi sempre sostenuta anche quando il mio percorso non è stato così roseo. Grazie a entrambi per aver fatto in modo che oggi fosse realtà. Questo risultato è mio quanto vostro, questo giorno lo dedico a voi, al vostro costante sostegno, silenzioso ma tenace, ai vostri insegnamenti, senza i quali oggi non sarei ciò che sono, a voi che siete stati la mia ancora e il mio faro in un mare spesso in tempesta, grazie per aver sempre creduto in me, spero di riuscire a rendervi felici, come oggi, sempre.

A mio fratello, il mio opposto, a volte possiamo sembrare estranei tanto siamo diversi, eppure io so esattamente chi sei, sei un ragazzo che non si prende troppo sul serio e a cui non piace essere troppo affettuoso, ma chi ti sta accanto sa che la tua generosità è il tuo modo per esprimere i sentimenti. Quindi grazie per tutti quei gesti spontanei d'amore che in maniera timida mi hai regalato a ogni mio rientro, e grazie per aver condiviso i tuoi spazi con Giorgio, anche quando ancora non lo conoscevi, è stato più importante di un abbraccio.

A Giorgio, la mia metà, il mio futuro. Tu più di tutti, sai come sono stata in tutti questi anni. I mie sbalzi d'umore, i miei periodi no e i periodi in cui niente avrebbe potuto fermarmi, i momenti in cui avrei voluto mollare e i momenti in cui ho pianto, ma anche i momenti di balletti improvvisati dalla gioia dell'esame passato. Tutto. Tu hai vissuto ogni singolo momento di questo percorso con me, e non avrei potuto scegliere compagno migliore. Con te, sono stata sempre me stessa, senza aver mai paura di essere giudicata e questo penso sia uno dei regali più belli che si possa fare a chi ti sta accanto. Noi ci siamo incontrati per caso ma abbiamo scelto, consapevolmente, di essere parte della vita l'uno dell'altro. Grazie per essere stato la prima persona a cui ho raccontato tutto, grazie per continuare ad essere il ragazzo che ogni giorno mi rispetta e mi fa sentire amata. Grazie per essere sempre al mio fianco nel bene, nel male e nelle mie follie. Grazie perché tu sei parte della mia vita, senza essere un limite per me, ma al contrario sei colui che più di tutti mi stimola a fare meglio e a fare sempre di più. Grazie perché sei speciale. Presto toccherà anche a te, ci credi? Ci devi credere, perché le cose belle accadono a chi fa in modo che possano accadere. Quindi non

avere paura, io sarò al tuo fianco sempre e farò in modo che tu possa trovare in me tutto il sostegno di cui avrai bisogno, senza aver necessità di chiederlo.

A Marika, la mia sorella del cuore. Un giorno incontri una persona e poi quella persona diventa parte di te e della tua esistenza. Per noi è stato così, incredibilmente casuale, eppure quel caso è stato così fortunato. Da quel giorno ormai, è passato così tanto tempo, ma a me sembra ieri, due ragazzine ancora un po' perse, e invece oggi siamo qui (a dir la verità io sono qui, tu sei in Turchia, ma non importa, i nostri cuori sono vicini), siamo cresciute e cambiate, più mature e più consapevoli, ma una cosa resta sempre immutabile, l'amicizia che ci lega, più forte del tempo e più forte della distanza. Sei un'anima pura e bella, sei la mia confidente preferita, quella persona che incontri una volta nella vita e sai che ci sarà per sempre, l'unica con cui passerei tranquillamente una Pasqua a rischio Covid, pur di non lasciarla da sola. Grazie per essere stata la mia persona in questo percorso un po' tortuoso che finalmente anche per me è giunto al termine, grazie per avermi inconsapevolmente ispirata nei miei periodi più bui e per avermi consigliata quando ero in preda alla confusione. Grazie per esserci, costantemente.

Grazie a tutta la mia famiglia, i miei zii e i miei cugini, per avermi sostenuta in questo percorso e per aver festeggiato i miei traguardi con me. In particolare, grazie a mia zia Roberta, e mio zio Vincenzo, che oggi con la piccola Mariantonietta sono qui presenti, e io sono sempre stata certa che ci sareste stati, me lo avevate promesso sin dall'inizio, dimostrando di credere in me, prima ancora che io mi rendessi conto di potercela davvero fare. Grazie perché la vostra presenza, qui, significa davvero tanto per me ed è stato il più bel regalo che potevate farmi.

Vorrei dedicare anche un pensiero a chi è rimasto a casa, in particolare a mia nonna, caposaldo di questa famiglia. Grazie per essere stata un modello di comportamento e saggezza per me, grazie per aver condiviso con me i tuoi infiniti racconti, la tua incredibile esperienza di vita, grazie per i preziosi insegnamenti e consigli che, sin da quando da bambina facevo i compiti nella tua cucina, mi hai offerto. So quanto ci tenevi ad esserci oggi, ma purtroppo non è stato possibile, nonostante la distanza però, riesco a sentire tutto il tuo orgoglio e questo mi rende profondamente felice. Nonna, ora puoi dirlo a gran voce, tua nipote è Dottoressa!

Un pensiero vorrei dedicarlo anche a mia zia Adele e a mio zio Francesco,

che sono stati per me, l'esempio più lampante di coraggio e resilienza, non arrendendosi dinanzi alle sfide che la vita a volte ci presenta e insegnandomi che è sempre possibile trovare la forza per lottare, nonostante le difficoltà. Grazie per avermi offerto saggi consigli e per aver espresso la vostra enorme gioia per questo giorno.

Una gioia condivisa anche da mia Zia Enza e da mia cugina Clelia, con la loro famiglia, che ringrazio per aver costantemente creduto in me, senza mai dubitare delle mie capacità e per essere stati presenti fisicamente e emotivamente, nel supportarmi in tutto il mio percorso.

Grazie a mio zio Luigi, colui che ha sempre dato colore alla mia vita, sostenendomi e accompagnandomi in questo percorso e in tutte le tappe più importanti.

Ad Antonella e Giancarlo, che sono stati davvero i primi ad avermi accompagnata al Politecnico, letteralmente parlando. Eravate presenti il giorno in cui con una valigia in mano sono arrivata a Torino e in preda a tante emozioni ho sostenuto quel test di ingresso che mi avrebbe cambiato la vita. Ci siete stati poi, quando nel primo anno del mio trasferimento, in un città totalmente nuova per me, mi sentivo spesso disorientata e confusa. Continuate ad esserci oggi, in maniera costante e con totale disponibilità. Siete stati dei punti di riferimento per me in questi anni, e questo non sempre è così scontato. Grazie per tutto ciò che avete concretamente fatto per me. E' difficile da spiegare, ma quando ti trovi, all'inizio in un posto nuovo, dove non conosci nessuno, sapere di poter contare, davvero, su qualcuno, ti fa affrontare la vita con più leggerezza. Grazie per essere stati la mia piccole dose di tranquillità giornaliera, che sono sicura, ha tranquillizzato anche i miei genitori.

Grazie a Mariella, Maria e Arcangela, che ormai da più di 20 anni sono parte della mia vita. Si potrebbe dire che mi avete vista crescere, da quando piccina giravo nel corridoio della vostra scuola e giocavo nella piscina con le palline colorate dell'aula giochi. Ricordo che ero felicissima ogni volta che mamma mi portava a scuola con sè, passavo da una sezione all'altra salutando tutte le insegnanti e voi mi regalavate sempre un grande abbraccio, lo stesso abbraccio che oggi regalate a mia mamma, ad ogni mia partenza, per aiutarla a sopportare questa mancanza a cui non ci si abitua mai. Grazie per aver sostenuto continuamente e costantemente me e la mia mamma in questo percorso e grazie perché so che continuerete a farlo sempre.

Grazie a Simona, Franco, Consuelo e Nunziatina, è così bello essere entrata a far parte di una famiglia così accogliente e calorosa. Mi avete accolta sempre con grandi sorrisi e grande gioia e io ormai mi sento un po' parte di questa bella famiglia. Grazie per la gentilezza, la generosità e la semplicità che mi avete regalato in ogni mio viaggio in Sicilia, dove ormai lascio un pezzo di cuore. Grazie per avermi donato il vostro amore e il vostro supporto, esattamente come si fa con una figlia o con una nipote. Siete delle persone meravigliose e mi ritengo fortunata ad avervi nella mia vita.

A Ivana, Michela, Matteo Bonina, Matteo Spata e Marika, grazie per quell'amicizia così semplice e reale che ci lega. Una cena insieme, una serata gyoza accompagnata probabilmente da qualche contest musicale, probabilmente X-Factor o Sanremo, in altre parola la semplicità, così difficile da trovare ormai. Siete il mio luogo sicuro e protetto, dove poter essere tranquillamente me stessa, dove poter esprimere le proprie paure, dove confrontarsi sui propri dubbi, ma soprattutto un luogo dove ci si vuole tanto bene. Grazie amici, per essere delle persone così vere e per assecondarmi in tutte le occasioni in cui decido di avventurarmi nell'organizzazione di qualche serata a tema, grazie per la vostra totale fiducia nel concedermi ogni volta carta bianca, riuscite a rendermi sempre più felice in queste occasioni. Grazie per essere stati inoltre dei consiglieri perfetti in questa fase della mia vita.

A Riccardo e Simone, che dirvi, voi lo sapete quanto siete speciali per me. Grazie, in primis per tutto ciò che avete fatto oggi, facendovi carico di tutta l'organizzazione del rinfresco e poi, per la vostra continua disponibilità, nonostante i mille impegni. Siete un punto di riferimento in ogni occasione, lo siete stati per il Team e continuate ad esserlo per me. Una nota di merito per Riccardo che seppur possa sembrare una persona poco paziente, riesce in realtà, con molta pazienza, probabilmente bestemmiando nel mentre, ad ascoltare tutti i miei infiniti e numerosi audio in cui, in realtà poi, come dici tu " bastava che sintetizzassi il tutto con una frase", ma sai, si perderebbe tutto il contesto. Con Simone questo problema ovviamente non si pone, quando sono fortunata risponde alle mie telefonate, tra una riunione con Squadra e una call per la tesi, i messaggi non sa neanche che cosa sono. In entrambi i casi, a modo vostro, riuscite sempre ad esserci, ed è proprio questo che vi rende così speciali, il fatto che sebbene gli impegni e i vari problemi del caso, se poteste, spostereste il mondo, pur di far felice qualcuno a cui volete bene. In tante occasioni, il vostro aiuto offerto con grande attenzione

anche ai dettagli, mi ha reso molto felice, per cui io vi ringrazio per aver condiviso la parte migliore di voi, con me. Siete una forza della natura e non avete idea di quanto mi siate mancati quando con Alessandro siete volati dall'altra parte del mondo. Grazie per esserci stati anche quando eravate così lontani. E grazie a te Ale, per avermi offerto dei preziosi consigli in diverse occasioni e per essere stato esempio di traguardi raggiunti e fonte di ispirazione per me. Ho un ricordo bellissimo della giornata a casa tua prima della tua partenza, una location meravigliosa in una giornata di sole, poche persone ma giuste per condividere insieme un momento importante che avrebbe segnato un grande cambiamento. Sono felice di essere stata partecipe di questa condivisione. Grazie per avermelo permesso.

A tutti i miei amici del Team S55, Federica, Tommaso, Igor, Gabriele, Rosy, Federico, Thomas e Sofia, alle esperienze condivise insieme all'interno del Team, all'amicizia che resta imperturbabile nel tempo, a voi che mi avete supportata durante gli anni nel Team e che avete rappresentato una parte fondamentale del mio percorso universitario. Grazie, per esserci stati in tutti i momenti più importanti.

Alle mie amiche di sempre, Mariangela e Rosanna, che sin dal primo anno di liceo mi sono state accanto, credendo sempre in me e nel mio pizzico di follia. Grazie per esserci state negli anni, nonostante le distanze e nonostante il tempo. Rappresentate quella parte di me ancora un po' immatura, che tra i corridoi del liceo sognava di vivere questo giorno. Grazie per avermi accompagnata sin qui e per essere le mie amiche di vita.

Un ringraziamento speciale va al prof. Enrico Cestino, relatore di questa tesi, non solo per avermi offerto la possibilità di svolgere tale studio, ma anche e soprattutto per l'infinita disponibilità, il continuo supporto e per essere stato un punto di riferimento per me, negli anni trascorsi alla guida del Team S55. Porto con me i suoi costanti insegnamenti, il senso della correttezza, il rispetto e l'affetto che ha sempre avuto per i suoi studenti.

Ringrazio anche l'ing. Federico Valente e l'ing. Guido Servetti, con cui ho potuto collaborare presso l'azienda ITACAe, portando a compimento il lavoro di tesi. Entrambi sono stati un supporto fondamentale in quest'ultimo periodo, la loro costante disponibilità e il loro celere riscontro nella risoluzione delle diverse criticità sono state essenziali per il raggiungimento di questo

risultato in termini di stesura dell'elaborato finale.

Un ringraziamento per l'ing. Riccardo Girelli di Labormet DUE per il supporto allo studio sperimentale di tomografia computerizzata, con la messa a disposizione degli strumenti necessari al lavoro.

Grazie anche a Cesare Patuelli per avermi guidata nel primo approccio con il software utilizzato in questo lavoro.

Vorrei inoltre ringraziare l'intero Team S55, per aver messo a disposizione le proprie informazioni riguardo i componenti oggetti di studio di questo elaborato, ma soprattutto per avermi regalato gli anni più faticosi e, allo stesso tempo, più belli, del mio percorso universitario. Avrete sempre un posto nel mio cuore, in cui conserverò gli anni passati con voi. Vi ringrazio per avermi concesso l'opportunità di vivere un'esperienza così significativa e spero che un numero sempre più elevato di studenti decida di avventurarsi all'interno dei team studenteschi. E' richiesto tempo, energia, pazienza e tanta voglia di mettersi in gioco, ma il vissuto è impagabile, per cui non fatevi scappare per nessun motivo quest'occasione di vita.

Un sentito ringraziamento vorrei farlo anche all'ing. Vito Sapienza, mentore per i ragazzi del Team S55, con cui ho avuto l'onore di collaborare durante il mio percorso. Grazie per la stima e il rispetto che mi ha sempre concesso e per i preziosi consigli e insegnamenti che mi ha sempre offerto.

Vorrei infine, dedicare questo traguardo agli inadeguati, a chi si sente costantemente sull'orlo del baratro.

A chi non si ama, a chi crede di non potercela fare, a chi pensa di non avere abbastanza forza e capacità.

Agli insoddisfatti, a chi non si da mai per vinto e a chi non si accontenta mai.

Non siamo un voto, un esame, un lavoro, non siamo indietro rispetto a nessuno, ognuno di noi ha la propria strada, il proprio tempo.

Voglio dedicare questo percorso alle anime fragili e buone, a quelle persone che hanno combattuto e combattono ogni giorno contro l'ansia, il mostro invisibile che invade i pensieri e la pace interiore, a chi non viene capito e a chi si sente solo.

Ricordate che i momenti no esistono, ma non sono per sempre.

Sarà difficile in alcuni momenti crederci davvero, vi sentirete come precipitare senza paracadute, ma nonostante ciò datevi fiducia.

Parafrasando John Kennedy "Non chiedetevi cosa può fare la società per voi, ma chiedetevi cosa potete fare voi per la società".

Prendetevi il vostro ruolo nel mondo con coraggio e consapevolezza.

Sappiate che riuscirete a volare, sarete abbastanza, ma per farlo abbiate cura di voi e della vostra anima.

Amate, ridete, perché la vita è bella.

Alla vita e alle sue cose belle,

alle sorprese, agli abbracci, alle risate,

a questa città, la Torino poetica e romantica di cui mi sono innamorata, alle opportunità che non potevi immaginare,

a ciò che è meglio di quanto potresti desiderare,

all'amore vero, all'amicizia autentica,

all'onestà, alla coerenza, alla lealtà,

a chi non c'è più ma vive eternamente nei nostri cuori,

alla consapevolezza che il cambiamento è tutto merito nostro,

alla me bambina, la quale abbraccio e le sorrido, dicendole "ce l'abbiamo fatta!" e ricordandole che il futuro, è di coloro che non hanno mai commesso l'errore di credere, che i sogni fossero troppo grandi per essere realizzati.

Ad maiora semper.

Bibliografia

- [1] Ian Campbell, Olaf Diegel, Joseph Kowen e Terry Wohlers. Wohlers report 2018: 3D printing and additive manufacturing state of the industry: annual worldwide progress report. 2018 (cit. a p. 1).
- [2] Sunpreet Singh, Seeram Ramakrishna e Rupinder Singh. «Material issues in additive manufacturing: A review». In: *Journal of Manufacturing Processes* 25 (2017), pp. 185–200 (cit. a p. 2).
- [3] Tuan D Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate TQ Nguyen e David Hui. «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges». In: *Composites Part B: Engineering* 143 (2018), pp. 172–196 (cit. a p. 2).
- [4] Alessandro Busachi, John Erkoyuncu, Paul Colegrove, Filomeno Martina, Chris Watts e Richard Drake. «A review of Additive Manufacturing technology and Cost Estimation techniques for the defence sector». In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 19 (2017), pp. 117–128 (cit. alle pp. 3, 4).
- [5] Bhaskar Dutta e FH Sam Froes. «The additive manufacturing (AM) of titanium alloys». In: *Metal powder report* 72.2 (2017), pp. 96–106 (cit. alle pp. 9, 11).
- [6] Zhigang Zak Fang, James D Paramore, Pei Sun, KS Ravi Chandran, Ying Zhang, Yang Xia, Fei Cao, Mark Koopman e Michael Free. «Powder metallurgy of titanium—past, present, and future». In: *International Materials Reviews* 63.7 (2018), pp. 407–459 (cit. a p. 13).
- [7] Alessandra Martucci, Alberta Aversa, Diego Manfredi, Federica Bondioli, Sara Biamino, Daniele Ugues, Mariangela Lombardi e Paolo Fino. «Low-Power Laser Powder Bed Fusion Processing of Scalmalloy®». In: *Materials* 15.9 (2022), p. 3123 (cit. a p. 13).

- [8] Yanhua Bian, Xiuli He, Gang Yu, Shaoxia Li, Chongxin Tian, Zhiyong Li, Yanmei Zhang e Junming Liu. «Powder-flow behavior and process mechanism in laser directed energy deposition based on determined restitution coefficient from inverse modeling». In: *Powder Technology* 402 (2022), p. 17355 (cit. a p. 13).
- [9] Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes. ASTM International. 2021 (cit. a p. 14).
- [10] T Spusta e RNDr KAREL. «Study of Transition from Open to Closed Porosity Stage During Sintering of Advanced Ceramic Materials». Tesi di dott. Brno University of Technology Brno, Czech Republic, 2015 (cit. a p. 15).
- [11] Erica Liverani, Adrian HA Lutey, Alessandro Ascari e Alessandro Fortunato. «The effects of hot isostatic pressing (HIP) and solubilization heat treatment on the density, mechanical properties, and microstructure of austenitic stainless steel parts produced by selective laser melting (SLM)». In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 107 (2020), pp. 109–122 (cit. a p. 16).
- [12] Ruqaya Abdulkadhim Abbas e MM Radhy. «Effect of Precipitation Hardening on Mechanical Properties of Dissimilar Friction Stir Welded AA2024-T3 to AA7075-T73 Aluminum Alloys». Tesi di dott. University of Technology, 2015 (cit. a p. 17).
- [13] William J Sames, FA List, Sreekanth Pannala, Ryan R Dehoff e Sudarsanam Suresh Babu. «The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing». In: *International materials reviews* 61.5 (2016), pp. 315–360 (cit. a p. 18).
- [14] Michael Cervenka. «The rolls-royce trent engine». In: Rolls-Royce Presentation PowerPoint (2000) (cit. a p. 19).
- [15] Wen Hao Kan, Louis Ngai Sam Chiu, Chao Voon Samuel Lim, Yuman Zhu, Yang Tian, Derui Jiang e Aijun Huang. «A critical review on the effects of process-induced porosity on the mechanical properties of alloys fabricated by laser powder bed fusion». In: *Journal of Materials Science* 57.21 (2022), pp. 9818–9865 (cit. a p. 22).
- [16] MC Karia, MA Popat e KB Sangani. «Selective laser melting of Inconel super alloy-a review». In: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1859. 1. AIP Publishing. 2017 (cit. a p. 23).

- [17] EOS. URL: https://www.eos.info/en-us (cit. a p. 24).
- [18] Concept Laser. URL: https://www.ge.com/additive/direct-metal-laser-melting (cit. a p. 24).
- [19] Renishaw. URL: https://www.renishaw.it/it/renishaw-pi%C3%B9-efficienza-per-i-professionisti-dell%E2%80%99industria-e-della-medicina--1030 (cit. a p. 24).
- [20] 3D Systems. URL: https://it.3dsystems.com (cit. a p. 25).
- [21] SLM Solutions. URL: https://nikon-slm-solutions.com (cit. a p. 25).
- [22] SISMA. URL: https://www.sisma.com (cit. a p. 25).
- [23] SPEM Additive. URL: https://spemadditive.com/it/index (cit. a p. 26).
- [24] Team S55, DIMEAS, Politecnico di Torino. URL: http://www.teams55.polito.it (cit. a p. 26).
- [25] L Di Ianni et al. «TEAM S55: 1: 8 SCALE "REPLICA" OF THE SIAI-MARCHETTI S55X». In: 32nd ICAS Congress. International Council of the Aeronautical Science. 2021 (cit. a p. 26).
- [26] Enrico Cestino, LUCA DI IANNI, Iavecchia Pasquale, Davide Celestini, Loiodice Lucia, Nicolosi Gabriele, AURELIO SAPONARO PIACEN-TE, Baldon Cesare, Giacomo Frulla et al. «Una storia moderna». In: PROGETTARE 425 (2019), pp. 42–44 (cit. a p. 26).
- [27] Replica 55. URL: http://replica55.it (cit. a p. 26).
- [28] E Cestino, G Frulla, V Sapienza, P Pinto, F Rizzi, F Zaramella e D Banfi. «Replica 55 Project: A wood seaplane in the era of composite materials». In: *Proc of 31st ICAS Congress. Belo Horizonte, Brazil.* 2018 (cit. a p. 26).
- [29] ANSA pre-processor. URL: https://www.beta-cae.com/ansa.htm (cit. a p. 27).
- [30] Federico Favalli, Martina Ferrara, Cesare Patuelli, Alessandro Polla, Stefano Scarso, Davide Tomasello et al. «Replica 55 project: aerodynamic and FEM analysis of a wooden seaplane». In: *Proc of 31st ICAS Congress, Belo Horizonte, Brazil.* 2018 (cit. a p. 27).

- [31] C Baldon, R Indelicato, N Bottino, M Sinisi, F Carrone, G Cantanna, E Cestino e V Sapienza. «S55 PROJECT-CFD ANALYSIS OF AN HISTORICAL SEAPLANE». In: 32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Science, Shanghai, China. 2021 (cit. a p. 27).
- [32] M Sinisi, G Cantanna, G Occhipinti, A Caramazza, G Dilonardo, E Cestino et al. «CFD take-off analysis of a seaplane hull through a dynamic multiphase model». In: *Proc. 33rd ICAS Congress.* ICAS. 2022 (cit. a p. 27).
- [33] STAR CCM+. URL: https://plm.sw.siemens.com/it-IT/simcente r/fluids-thermal-simulation/star-ccm/ (cit. a p. 27).
- [34] G Nicolosi, A Lunghitano, S Lombardi, T Talamucci, A Caivano, N Simone, E Cestino, V Sapienza et al. «Wing Static Structural Analysis And Experimental Testing of a composite 1: 8 S55-X». In: *Proc. 33rd ICAS Congress.* ICAS. 2022 (cit. a p. 27).
- [35] G Nicolosi, F Valpiani, G Grilli, A Saponaro Piacente, L Di Ianni, E Cestino, V Sapienza, A Polla, P Piana et al. «Design Of A Vertical Ditching Test». In: *Proc. 32nd ICAS Congress.* 2021, pp. 6–10 (cit. a p. 27).
- [36] D Guagliardo, E Cestino e G Nicolosi. «Numerical-analytical evaluation about the impact in water of an elastic wedge using the SPH method». In: *Materials Research Proceedings* 37 (2023) (cit. a p. 27).
- [37] E Cestino, G Frulla, A Polla e G Nicolosi. «Equivalent Material Identification in Composite Scaled Hulls Vertical Impact Tests». In: *International Symposium on Dynamic Response and Failure of Composite Materials*. Springer. 2022, pp. 43–50 (cit. a p. 27).
- [38] E Cestino, V Sapienza, S Sapienza, F Carena et al. «A Student Team Based Teaching Approach: The Team S55 Experience». In: *Proc. 33rd ICAS Congress.* ICAS. 2022 (cit. a p. 27).
- [39] L Loiodice, S Grendene, T Binetti, I Boni, F Lovero e R Piani. «Study of the cost efficiency and laminate quality using different mould-making technologies». In: *Proc. 33rd ICAS Congress.* ICAS. 2022 (cit. a p. 28).
- [40] P Iavecchia, G Campolo, G Maritano, M Coppola, E Cestino, G Frulla, V Sapienza e P Piana. «Application of Additive Manufacturing to the production of RPAV components». In: *Proc. 32nd ICAS Congress.* 2021, pp. 6–10 (cit. a p. 28).

- [41] ITACAe. URL: https://www.itacae.com (cit. a p. 46).
- [42] SimTech Simulation et Technologie. URL: http://www.simtech.fr (cit. a p. 46).
- [43] AMTOP®. URL: https://www.amtop.it (cit. a p. 46).
- [44] Cesare Patuelli, Enrico Cestino, Giacomo Frulla, Federico Valente, Guido Servetti, Fabio Esposito e Luca Barbero. «FEM Simulation of AlSi10Mg Artifact for Additive Manufacturing Process Calibration with Industrial-Computed Tomography Validation». In: *Materials* 16.13 (2023), p. 4754 (cit. a p. 46).
- [45] Autodesk Meshmixer. URL: https://meshmixer.com (cit. a p. 46).
- [46] Leone Corradi Dell'Acqua. *Meccanica delle strutture*. McGraw-Hill, 1992 (cit. a p. 63).
- [47] Labormet Due. URL: http://www.labormetdue.it (cit. a p. 115).
- [48] phoenix v/tome/x m Powerful versatile X-ray microfocus CT system for 3D metrology and analysis with up to 300 kV / 500 W. GE Measurement Control. 2016 (cit. a p. 116).
- [49] Maria Pia Morigi, Franco Casali, Matteo Bettuzzi e Rosa Brancaccio. «La Tomografia Computerizzata tridimensionale con raggi X: un nuovo strumento diagnostico per il patrimonio artistico e culturale». In: *Disegnarecon* (2010), pp. 27–42 (cit. a p. 118).
- [50] Volume Graphics part of Hexagon. URL: https://www.volumegraphics.com (cit. alle pp. 119, 121).