

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in

Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

*Progettazione tramite la Fabbricazione Additiva di uno
scambiatore di calore per il settore automotive*



Relatore

Prof. Giorgio Chiandussi

Tutor Aziendale

Dott.ssa Eva Butano

Candidato

Andrea Azzini

Anno Accademico 2018 – 2019

Sommario

Indice delle figure	5
Introduzione	11
1. Profilo Industriale del Centro Ricerche Fiat	13
1.1 Esperienza di tirocinio al CRF	15
2. Cenni storici della Fabbricazione Additiva	18
3. Il processo di Fabbricazione Additiva	24
3.1 Generazione file CAD e metodi di ottimizzazione topologica.....	24
3.2 Generazione del file STL	26
3.3 Orientazione in macchina e strutture di supporto	26
3.4 Esecuzione dello slicing	27
3.5 Setup della macchina e costruzione della parte.....	28
3.6 Rimozione della parte e operazioni di post-processing.....	28
4. Confronto con le tecniche di produzione sottrattive.....	31
5. Metallurgia delle polveri per la Fabbricazione Additiva	35
5.1 Atomizzazione ad acqua	36
5.2 Atomizzazione a gas	37
5.3 Atomizzazione al plasma.....	40
5.4 Atomizzazione centrifuga	41
5.5 Processo Armstrong	41
5.6 Processo Hydride-Dehydride	42
5.7 Operazioni di post-processing sulle polveri metalliche	43
6. Principali tecnologie per la Fabbricazione Additiva metallica	46
6.1 Laser – Powder Bed Fusion (L–PBF)	47
6.2 Vantaggi e svantaggi della L–PBF	50
6.3 Laser – Directed Energy Deposition (L–DED).....	54
6.4 Vantaggi e svantaggi della L–DED.....	58
6.5 Electron Beam – Powder Bed Fusion (EB – PBF)	60
6.6 Vantaggi e svantaggi dell’EB-PBF	62
6.7 Binder Jetting – Powder Bed	64
6.8 Electron Beam – Directed Energy Deposition	66
7. Materiali per la Fabbricazione Additiva.....	68

7.1 Leghe di alluminio	68
7.2 Leghe di ferro.....	72
7.3 Leghe di nickel.....	75
7.4 Leghe di titanio	78
7.5 Leghe di titanio-alluminio.....	84
7.6 Leghe di cromo-cobalto	86
8. Applicazioni industriali delle tecnologie additive	87
8.1 Settore medicale.....	89
8.2 Settore aerospaziale.....	90
8.3 Settore Automotive	91
8.4 Rigenerazione e riparazione.....	92
8.5 Stampi e utensili per applicazioni industriali	93
8.6 Reverse Engineering.....	94
8.7 Personalizzazione dei prodotti	94
8.8 Settore artistico	95
9. Caso studio: Progettazione di uno scambiatore di calore per settore automotive	97
9.1 Descrizione dello scambiatore e del sistema di recupero di calore	98
9.2 Generatore termoelettrico (TEG)	103
9.3 Effetto Seebeck.....	105
9.4 Applicazioni e benefici dei sistemi di recupero di calore mediante generatori termoelettrici	110
9.5 Realizzazione dello scambiatore di calore a gas ed aspetti critici.....	113
9.6 Criteri di riprogettazione dello scambiatore mediante Fabbricazione Additiva.....	115
9.7 Realizzazione delle nuove geometrie mediante software CAD NX	119
9.8 Preparazione del modello CAD per l'analisi termo-fluidodinamica (CFD).....	123
9.9 Analisi dei risultati e post-processing dei dati	139
9.10 Scelta della tecnologia e del materiale per la Fabbricazione Additiva.....	155
9.11 Prima Additive – Simulazione del pre-processing per la Fabbricazione Additiva.	158
9.12 Prima Additive – Analisi del prototipo.....	169
Conclusioni.....	172
Bibliografia	174

Indice delle figure

Figura 2-1 – Sistema laser (Fonte: Cmquadrietrici.it)	18
Figura 2-2 – Schematizzazione del sistema di Stereolitografia (SLA) (Fonte: Meccanismocomplesso.org)	19
Figura 2-3 – Schematizzazione dei sistemi di SLS e FDM (Fonte: Sculpteo.com e Researchgate.net – Alfred Sidambe)	20
Figura 3-1 – Processo di Fabbricazione Additiva.....	24
Figura 3-2 – Strutture di supporto (Fonte: Materialise.com).....	27
Figura 3-3 – Slicing costante e adattativo (Fonte: Introduzione all'Additive Manufacturing, Luca Iuliano)	28
Figura 5-1 – Schematizzazione del sistema di atomizzazione ad acqua (Fonte: Substech.com).....	36
Figura 5-2 – Sistema di atomizzazione a gas (Fonte: Ald-dynatech.com).....	38
Figura 5-3 – Crogioli del sistema di atomizzazione a gas VIGA, EIGA, PIGA (Fonte: Ald-dynatech.com).....	39
Figura 5-4 – Schematizzazione del sistema di atomizzazione al plasma (Fonte: Carpenteradditive.com)	40
Figura 5-5 – Schematizzazione del sistema di atomizzazione centrifuga PREP (Fonte: Efheattreat.com).....	41
Figura 5-6 – Sistema di setacciamento delle polveri metalliche.....	44
Figura 5-7 – V-Blender a flusso incrociato (Fonte: Unitedpharmatek.com)	45
Figura 6-1 – Diagramma ad albero delle principali tecnologie per la FA metallica	47
Figura 6-2 – Schematizzazione del sistema di L-PBF (Fonte: Empa.ch)	48
Figura 6-3 – Esempio di software per il pre-processing del processo di L-PBF.....	50
Figura 6-4 – Particolari prodotti mediante L-PBF (Fonte: Renishaw.com).....	52
Figura 6-5 – Sezione della testa di deposizione del sistema L-DED (Fonte: BeAM Machines).....	55
Figura 6-6 – Sistema di L-DED (Fonte: Trumpf.com)	57
Figura 6-7 – Schematizzazione del sistema di EB-PBF (Fonte: Arcam.com).....	60
Figura 6-8 – Ugello prodotto con sistema Arcam EB-PBF (Fonte: Arcam.com).....	63
Figura 6-9 – Schematizzazione del sistema di Binder Jetting (Fonte: 3deo.co)	64
Figura 6-10 – Schematizzazione della testa di deposizione del processo di EB-DED (Fonte: Sciacky.com).....	66
Figura 6-11 – Processo di EB-DED (Fonte: Sciacky.com)	67
Figura 7-1 – Effetto dei T.T. sulle leghe di alluminio (Fonte: Materiali per l'Additive, Leghe di Al – Paolo Fino).....	72
Figura 7-2 – Confronto leghe metalliche (Fonte: Materiali per l'additive, Leghe di Ni – Paolo Fino).....	76
Figura 7-3 – Prestazioni delle leghe di nickel (Fonte: Materiali per l'additive, Leghe di Ni – Paolo Fino).....	77
Figura 7-4 – Diagramma di stato titanio-alluminio (Fonte: Materiali per l'additive, Leghe di Ti – Paolo Fino)	80

Figura 7-5 – Proprietà meccaniche leghe di titanio per FA (Fonte: Materiali per l’additive, Leghe di Ti – Paolo Fino)	81
Figura 7-6 – Effetto dei T.T. sulle leghe di titanio (Fonte: Materiali per l’additive, Leghe di Ti – Paolo Fino)	82
Figura 7-7 – Curva di trazione per Ti-6Al-4V (Fonte: Materiali per l’additive, Leghe di Ti – Paolo Fino).....	82
Figura 7-8 – Analisi dei costi per le leghe di titanio con FA (Fonte: Materiali per l’additive, Leghe di Ti – Paolo Fino)	83
Figura 7-9 – Confronto leghe di nickel e Ti-Al (Fonte: Materiali per l’additive, Leghe di Ti-Al – Paolo Fino).....	84
Figura 7-10 – Andamento proprietà meccaniche Ni e Ti-Al (Fonte: Materiali per l’additive, Leghe di Ti-Al – Paolo Fino)	85
Figura 7-11 – Diagramma di stato Ti-Al (Fonte: Materiali per l’additive, Leghe di Ti-Al – Paolo Fino).....	85
Figura 8-1 – TRL della FA nei principali settori industriali, anno 2017 (Fonte: FCA.com, CRF.it)	89
Figura 8-2 – Produzione con la FA di protesi dentali e capsule	89
Figura 8-3 – Camera di combustione in rame di Aerojet Rocketdyne e ugello di GE Aero (Fonte: NASA.gov e Arcam.com)	90
Figura 8-4 – Pinza freni prodotta da Bugatti in L-PBF (Fonte: Tctmagazine.com)	92
Figura 8-5 – Riparazione con L-DED	93
Figura 8-6 – Progettazione di canali di raffreddamento conformali (Fonte: Forefront-am.com.sg e 3Dprint.com).....	93
Figura 8-7 – Telaio di biciletta prodotto da Renishaw e Empire Cycle con FA (Fonte: Renishaw.com)	94
Figura 8-8 – Opera d’arte realizzata in FA (Fonte: Tmrresearchblog.com).....	95
Figura 8-9 – Applicazione della FA per la gioielleria e sistema di L-PBF prodotto da Sisma Group (Fonte: 3DHubs.com e Sisma.com)	96
Figura 9-1 – Sezione frontale dello scambiatore di calore per gas di scarico	98
Figura 9-2 – Vista prospettica dello scambiatore di calore per gas di scarico.....	98
Figura 9-3 – Flusso energetico di un motore a combustione interna.....	99
Figura 9-4 – Posizionamento del sistema di recupero del calore dei gas	100
Figura 9-5 – Vista prospettica del sistema di recupero del calore dei gas	100
Figura 9-6 – Esploso del sistema di recupero del calore.....	101
Figura 9-7 – Vista interna del sistema di recupero del calore	101
Figura 9-8 – Schematizzazione parziale del sistema di recupero del calore.....	102
Figura 9-9 – Schematizzazione di un generatore termoelettrico (Fonte: Ne555.it)	103
Figura 9-10 – Termocoppia Cu-Fe (Fonte: Comprehensive Physics XII)	105
Figura 9-11 – Andamento del potenziale termoelettrico in funzione della temperatura (Fonte: Comprehensive Physics XII)	107
Figura 9-12 – Andamento della potenza termoelettrica (Fonte: Comprehensive Physics XII)	108
Figura 9-13 – Sonda Voyager 2 (Fonte: Centrometeoitaliano.it).....	110
Figura 9-14 – Struttura interna del catalizzatore trivalente	113

Figura 9-15 – Suddivisione dello scambiatore di calore in più sezioni e andamento temperatura dei gas di scarico e lato caldo del modulo TEG	117
Figura 9-16 – Raggio primitivo dei canali triangolari e passo delle lamine	117
Figura 9-17 – Vista prospettica dello scambiatore di calore fornito da Magneti Marelli...	119
Figura 9-18 – Esploso dello scambiatore di calore	119
Figura 9-19 – Sezione frontale architettura 1S T&LO, senza flange	120
Figura 9-20 – Sezione longitudinale di un’architettura a tre sezioni in ambiente CAD....	121
Figura 9-21 – Sezione del sistema di recupero del calore realizzato in ambiente CAD....	122
Figura 9-22 – Sezione longitudinale dei volumi fluidi	123
Figura 9-23 – Dettaglio estrusione fittizia dello scambiatore e visualizzazione volume fluido	124
Figura 9-24 – Pagina iniziale di AcuConsole	124
Figura 9-25 – Finestra di importazione della geometria su AcuConsole	125
Figura 9-26 – Suddivisione del modello in volumi distinti.....	126
Figura 9-27 – Finestra Basic Problem Parameters su AcuConsole	126
Figura 9-28 – Finestra della descrizione del problema su AcuConsole	127
Figura 9-29 – Finestra di Auto Solution Strategy su AcuConsole	128
Figura 9-30 – Material Model su AcuConsole	129
Figura 9-31 – Voci del menù Model su AcuConsole	130
Figura 9-32 – Volume Manager su AcuConsole	130
Figura 9-33 – Nomenclatura e rappresentazione dei volumi.....	131
Figura 9-34 – Rappresentazione superfici di tipo Wall.....	132
Figura 9-35 – Rappresentazione superfici di Inflow e Outflow	132
Figura 9-36 – Rappresentazione delle superfici di simmetria	133
Figura 9-37 – Condizioni iniziali delle superfici Inflow Air (gas caldi) e Inflow Water ...	133
Figura 9-38 – Menù Global Mesh Attributes	134
Figura 9-39 – Impostazioni del Global Mesh Attributes.....	135
Figura 9-40 – Vettore Absolut Anisotropic mesh size.....	135
Figura 9-41 – Andamenti del profilo di velocità nello strato limite.....	136
Figura 9-42 – Impostazioni del Boundary Layer per Water_Wall.....	136
Figura 9-43 – Impostazioni Boundary Layer per Air_Wall	137
Figura 9-44 – Vista frontale della mesh generata.....	137
Figura 9-45 – Dettaglio del Boundary Layer e mesh interna dei canali	138
Figura 9-46 – Andamento temperatura architetture T&LO	140
Figura 9-47 – Nodi selezionati per l’analisi dei dati	142
Figura 9-48 – Lato freddo del modulo TEG, 2S T&LO	142
Figura 9-49 – Lato caldo del modulo TEG, 2S T&LO	142
Figura 9-50 – Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 2S T&LO	143
Figura 9-51 – Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 2S T&LO.....	143
Figura 9-52 Andamento temperatura architetture 3S T&LV	144
Figura 9-53 Andamento temperature architetture T&LV	146
Figura 9-54 – Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 1S T&LV.....	147

Figura 9-55 – Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 1S T&LV	147
Figura 9-56 – Lato caldo del modulo TEG, 1S T&LV	147
Figura 9-57 – Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 2S T&LV	148
Figura 9-58 – Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 2S T&LV	148
Figura 9-59 – Lato caldo del modulo TEG, 2S T&LV	148
Figura 9-60 – Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 3S T&LV rp 3-1.8-1.6	149
Figura 9-61 – Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 3S T&LV rp 3-1.8-1.6	149
Figura 9-62 – Lato caldo del modulo TEG, 3S T&LV rp 3-1.8-1.6	149
Figura 9-63 – Andamento temperatura architetture LV	150
Figura 9-64 – Andamento temperatura architetture LV	150
Figura 9-65 - Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 1S LV.....	151
Figura 9-66 - Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 1S LV	151
Figura 9-67 – Lato caldo del modulo TEG, 1S LV	151
Figura 9-68 – Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 3S LV	152
Figura 9-69 – Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 3S LV	152
Figura 9-70 – Lato caldo del modulo TEG, 3S LV	152
Figura 9-71 – Confronto tra 3S LV e 3S LO	153
Figura 9-72 – Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 3S LO.....	153
Figura 9-73 – Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 3S LO	154
Figura 9-74 – Lato caldo del modulo TEG, 3S LO	154
Figura 9-75 – Prima Industrie Print Sharp 250 (Fonte: PrimaAdditive.com)	158
Figura 9-76 – Generazione del modello in formato STL	159
Figura 9-77 – Dati orientazioni Netfabb.....	160
Figura 9-78 – Orientazione #1	160
Figura 9-79 – Orientazione #2	161
Figura 9-80 – Orientazione #3 e #4.....	161
Figura 9-81 – Orientazione #5	162
Figura 9-82 – Orientazione #6	162
Figura 9-83 – Orientazione #7 e #8.....	163
Figura 9-84 – Orientazione #9	164
Figura 9-85 – Orientazione #10.....	164
Figura 9-86 – Dettaglio sul supporto del lembo	165
Figura 9-87 – Modifica della forma del lembo delle flange	166
Figura 9-88 – Realizzazione delle strutture di supporto.....	166
Figura 9-89 – Simulazione posizionamento parti con flangia sulla piattaforma	167
Figura 9-90 – Creazione di supporti ad asola per la flangia superiore.....	168
Figura 9-91 – Simulazione posizionamento parti senza flangia sulla piattaforma	168

Figura 9-92 – Viste del prototipo realizzato prodotto da Prima Additive.....	169
Figura 9-93 – Visualizzazione strutture a ponte (in grigio) e struttura prima sezione (in bianco).....	170

Introduzione

Nell'ultimo decennio il settore manifatturiero ha visto una rapida diffusione delle tecnologie additive che già svolgevano un ruolo cruciale nella prototipazione industriale e che recentemente hanno cominciato ad espandersi all'interno degli stabilimenti come veri e propri mezzi destinati alla produzione. Il loro avvento ha permesso, per esempio, di apportare miglioramenti laddove la personalizzazione del prodotto era un aspetto cruciale e in cui le economie di scala non giustificavano l'avvio alla produzione. In altri casi, la complessità e il basso rendimento del processo erano tali da rendere i manufatti troppo onerosi.

Le tecniche di produzione additiva sono diventate più popolari negli ultimi tempi grazie alla capacità di abilitare oggetti a basso costo, portando a un notevole risparmio di tempo, manodopera e materiale. L'avvento di tali sistemi su larga scala ha ulteriormente portato allo sviluppo di tecnologie più avanzate come la produzione di componenti di grandi dimensioni. Ingegneri, tecnici specializzati ed operatori si sono dovuti così confrontare con una nuova realtà che, se da un lato ha portato alcuni benefici in termini tecnici ed economici, snellendo soprattutto le fasi a monte della produzione, dall'altro ha ridefinito i canoni della progettazione, introducendo una nuova concezione nell'ideazione di un prodotto finito. L'assenza di attrezzature e dispositivi di bloccaggio, così come la possibilità di realizzare sottosquadri senza particolari accorgimenti, hanno aperto la strada verso un terreno fino ad ora inesplorato. Con le tecniche definite "tradizionali" vi è una crescita esponenziale dei costi con l'aumentare della complessità della parte da realizzare. Ciò non si verifica con le tecnologie additive. In molti casi è infatti possibile immaginare il prodotto svincolandosi dal processo produttivo, progettandolo secondo la sua specifica funzionalità.

Lo scopo di questo studio è quindi di sperimentare alcuni strumenti di progettazione orientati verso le tecnologie additive presentando attraverso la loro applicazione un esempio concreto. Le motivazioni che mi hanno spinto ad approfondire queste tematiche sono giustificate dal mio grande interesse verso queste tecnologie oltre che a rappresentare la naturale prosecuzione del percorso di studi.

La tesi è articolata in nove capitoli: nel primo capitolo viene fornita una rapida presentazione dell'esperienza di tirocinio svolto presso il Centro Ricerche FIAT, all'interno del dipartimento *WCM R&D – Process Technologies*. Nel secondo capitolo ci si è concentrati sullo

sviluppo delle tecnologie additive, con particolare riguardo alle applicazioni tramite materiali metallici. In seguito, dal capitolo 3 al capitolo 8 vengono presentati i passaggi necessari alla progettazione e produzione con tecnologia additiva. Seguendo questa prospettiva, vengono analizzate le tecnologie per la produzione delle polveri, i processi additivi per la fabbricazione tramite materiali metallici, le famiglie di materiali in polvere attualmente disponibili sul mercato. Successivamente, vengono esplorati tutti i settori interessati dall'avvento di queste tecnologie, presentando per ognuno di essi i principali casi di successo.

L'ultimo capitolo rappresenta l'applicazione del percorso logico approfondito nei capitoli precedenti. L'oggetto di studio ha riguardato un componente impiegato da Magneti Marelli in un sistema di recupero del calore dei gas di scarico per la sua successiva conversione in energia elettrica. L'obiettivo perseguito è dimostrarne la fattibilità tecnico-economica con le tecnologie additive oltre che a selezionare la più opportuna modalità di riprogettazione per permettere il miglioramento delle prestazioni del componente.

1. Profilo Industriale del Centro Ricerche Fiat

Il CRF (Centro Ricerche FIAT) è stato fondato nel 1978. Come punto di riferimento per le attività di ricerca di FCA (*Fiat Chrysler Automobiles*) la missione del CRF ha tre obiettivi principali:

- sviluppare motopropulsori, sistemi veicolo, materiali, metodologie e processi innovativi per migliorare la competitività dei prodotti di FCA;
- rappresentare FCA negli ambiti della ricerca collaborativa a livello europeo e nazionale, partecipando a progetti di ricerca precompetitiva e promuovendo lo sviluppo di una rete di contatti e partenariati a livello internazionale;
- supportare FCA nella valorizzazione del proprio capitale intangibile.

La sede principale del CRF è situata a Orbassano (TO). Sedi più piccole, dedicate ad attività e temi specifici sono dislocate: a Torino, all'interno dello stabilimento di Mirafiori, a Pomigliano d'Arco (NA), a Valenzano (BA), a Melfi (PZ) e a Trento.

La struttura operativa è organizzata in quattro aree tecniche:

- *Powertrain Research & Technology;*
- *Vehicle Research & Innovation;*
- *Group Materials Labs;*
- *World Class Manufacturing Research & Innovation.*

In partenariato con tutti i portatori d'interesse pubblici e privati nel campo della mobilità e della manifattura sostenibili e attraverso una rete di relazioni con partner accademici e industriali, il CRF partecipa a iniziative di ricerca collaborativa a livello nazionale e internazionale con la finalità di favorire l'applicazione industriale dei risultati della ricerca. A partire dal 1986, il CRF ha partecipato a più di 900 progetti di ricerca collaborativa.

Il CRF indirizza le proprie attività di ricerca e sviluppo su tre aree: la *sostenibilità ambientale*, attraverso progetti finalizzati all'aumento dell'efficienza energetica e alla riduzione dell'impatto ambientale su tutto il ciclo di vita del veicolo; la *sostenibilità sociale*, sviluppando sistemi di sicurezza attiva, passiva, preventiva e cooperativa dei sistemi di trasporto e studiando misure per garantire l'accesso alla mobilità a tutte le persone indipendentemente dalle loro specificità; la *competitività economicamente sostenibile*, con programmi di

miglioramento di prestazioni e funzionalità del veicolo, orientati anche alla riduzione dei tempi di introduzione sul mercato dei risultati della ricerca.

Le principali competenze del CRF sono concentrate nei seguenti temi:

- Motopropulsori e trasmissioni a elevata efficienza e tecnologie avanzate per la riduzione delle emissioni, comprese le motorizzazioni a combustibili alternativi, ibride ed elettriche;
- Soluzioni strutturali per la sicurezza, l'alleggerimento e l'efficienza energetica del veicolo; tecnologie per veicoli autonomi e per la connettività;
- Materiali e tecnologie di processo per l'alleggerimento, il miglioramento delle prestazioni e della qualità, la riduzione dell'impatto ambientale durante il ciclo di vita del veicolo;
- Sviluppo e convalida iniziale di tecnologie, dispositivi e metodi di produzione per aumentare la competitività e la sostenibilità del prodotto negli stabilimenti, in sinergia con la metodologia di *World Class Manufacturing*.

In aggiunta al *know-how* tipico del settore automobilistico, il CRF ha sviluppato competenze strategiche anche nel manufacturing, nello studio dei materiali funzionali, nell'ICT e nell'elettronica. Il CRF dispone di diversi laboratori tecnologicamente all'avanguardia, come le sale sperimentazione motore e veicolo, la camera di compatibilità elettromagnetica, il simulatore dinamico di guida, i laboratori di robotica collaborativa e di additive manufacturing e la sala di realtà virtuale immersiva.

Il CRF partecipa alle *Public Private Partnership* “*European Green Vehicle Initiative*” e “*Factories of the Future*”, istituite dalla Commissione Europea per focalizzare la ricerca industriale pubblica e privata su temi di significativa rilevanza per la competitività industriale e l'occupazione. Inoltre, supporta i programmi avviati dalle istituzioni comunitarie attraverso le Piattaforme Tecnologiche Europee, ERTRAC (trasporti su strada), EPOSS (sistemi intelligenti), ESTEP (tecnologia dell'acciaio), EUMAT (materiali), MANUFU-TURE (manufacturing), NANOfutures (nanotecnologie) e le *Joint Technology Initiative*, come ECSEL (*Electronic Components and Systems for European Leadership*).

A livello nazionale il CRF partecipa al *Cluster Trasporti Italia 2020*, associazione di imprese, università, enti di ricerca e altri soggetti che persegue l'aumento della competitività dell'Italia nel settore dei mezzi e sistemi per la mobilità di superficie terrestre e marina.

La proprietà intellettuale oggetto di privativa sviluppata da CRF ammonta a 496 invenzioni, protette da 2.346 brevetti e domande di brevetto. Nel corso degli ultimi anni, la funzione svolta dal CRF ha portato all'industrializzazione di prodotti distintivi per i marchi di FCA, tra cui si segnalano per i motopropulsori: il sistema *Diesel Common Rail* (UNIJET and MultiJet); il sistema MULTIAIR® e il nuovo motore *TwinAir*, la tecnologia DDCT (*Dual Dry Clutch Transmission*) e i sistemi di alimentazione per veicoli a metano. Per i componenti veicolo: i sistemi di condizionamento *energy saving*, la connettività veicolo basata su Blue&Me™, i sistemi di ausilio alla guida (*Driving Advisor e Magic Parking*) e di eco-navigation (ECODrive™) (1).

1.1 Esperienza di tirocinio al CRF

Durante il periodo trascorso presso il CRF, nell'area tecnica del *World Class Manufacturing – Research & Innovation*, è stato possibile partecipare ad alcuni progetti inclusi nel *Programma Quadro Europeo Horizon 2020* riguardanti lo sviluppo delle tecnologie additive.

Questi programmi hanno durata settennale e sono il mezzo mediante il quale l'Unione Europea cerca di conservare la sua competitività all'interno del panorama mondiale. Il programma *Horizon 2020* è iniziato nel 2014 e vedrà la sua conclusione nel 2020, mentre il suo precursore (Programma Quadro 7 - *Framework Program 7*) è durato dal 2007 al 2013.

Horizon 2020 è il programma di ricerca e innovazione promosso dall'Unione Europea più grande di sempre, con quasi 80 miliardi di euro di finanziamenti messi a disposizione, con l'obiettivo di guidare la crescita economica e creare nuovi posti di lavoro.

Le materie e le aree tecniche per le quali i finanziamenti sono resi disponibili sono definiti dall'EFFRA (*European Factories of the Future Research Association*). L'EFFRA mira alla massimizzazione dei benefici ottenibili utilizzando risorse pubbliche e private, allocandole sulle più promettenti tecnologie produttive. Per definire lo sviluppo di una specifica area, in un determinato periodo temporale, vengono realizzate le cosiddette *Road Maps*. Al loro interno vengono stabiliti dei percorsi previsionali da seguire per raggiungere tutti gli obiettivi prefissati, rispettando le tempistiche imposte dal Programma Quadro.

In questo contesto, il CRF prende parte a due progetti europei riguardanti la Fabbricazione Additiva, svolgendo il ruolo di utente finale.

Il primo progetto, denominato *EnCompass*, mira allo sviluppo di un applicativo *software* in grado di ottimizzare l'intero processo di produzione mediante tecnologia a letto di polvere (L-PBF). Il secondo, denominato *OpenHybrid*, mira alla realizzazione di un'innovativa piattaforma ibrida, basata sull'utilizzo combinato di tecnologie tradizionali sottrattive e di *Directed Energy Deposition* (L-DED) come tecnologia additiva.

Nel periodo iniziale trascorso al CRF è stato studiato il linguaggio tecnico utilizzato tra i *partners* partecipanti ai progetti, nonché sono stati appresi i requisiti di partenza e gli obiettivi finali. Questo studio ha favorito un'efficace comprensione delle attività svolte durante il tirocinio. È stato possibile prendere parte ad alcune attività necessarie per l'avanzamento dei lavori, nell'ottica di soddisfare le richieste promosse dai *partners* stessi. Ad esempio, all'interno del progetto *EnCompass* sono state implementate nuove geometrie riguardanti un componente meccanico per il settore automotive, utilizzando un software CAD ed eseguite analisi fluidodinamiche, per convergere (iterativamente) verso una soluzione finale. Una delle attività successive ha riguardato la produzione della documentazione contenente i risultati ottenuti, con il fine della loro divulgazione ai *partners*, evidenziando eventuali problematiche riscontrate che sarebbero state discusse all'interno delle riunioni previste. Per rinforzare la comprensione di un ambiente lavorativo dinamico, quale è il CRF, ho avuto la possibilità di partecipare a numerosi eventi e corsi, quali:

- Fiera *Bi-Mu 31*, la più importante fiera italiana dedicata all'utensileria, robotica, automazione e manifattura digitale. Tenutasi in Milano-Rho Fiera, 10/10/2018;
- Meeting semestrale di due giorni tra i *partners* partecipanti al progetto *OpenHybrid*. Tenutosi in Orbassano presso il CRF, 24-25/10/2018;
- Corso di tre giorni su *HyperWorks pre-post processing for Finite Element Analysis – Modulo 1*. Tenutosi presso Altair Engineering S.p.A. in Torino, 5-7/09/2018;
- Corso di tre giorni su *HyperWorks & AcuSolve pre-post processing for CFD analysis*. Tenutosi presso Altair Engineering S.p.A. in Torino, 16-18/10/2018;
- Corso di un giorno su *Inspire Structures*. Tenutosi presso Altair Engineering S.p.A. in Torino, 26/11/2018;
- Corso di tre giorni su *Optistruct for Optimization*. Tenutosi presso Altair Engineering S.p.A. in Torino, 12-14/12/2018;

- Seminario di un giorno su *Materials and microstructures for Additive Manufacturing*. Tenutosi presso Università degli Studi di Torino, 14/02/18;
- Corso di tre giorni su *Electric Architectures for Pure Electric and Hybrid Vehicles*. Tenutosi presso il Centro Ricerche Fiat in Orbassano.

La presenza alla Fiera Bi-Mu 31 è stata fondamentale per incontrare i principali attori nel settore della Fabbricazione Additiva e per conoscere le ultime innovazioni in termini di macchinari e materiali.

Il *meeting* semestrale del progetto *OpenHybrid* è stato utile per comprendere come si struttura l'organizzazione di un progetto volto a realizzare un sistema innovativo per la Fabbricazione Additiva. Durante tali giornate sono stati esposti tutti i passaggi necessari per poter completare il progetto, dalla definizione dei requisiti e dei casi studio fino alla disposizione delle indicazioni sulle modalità di divulgazione scientifica e commercializzazione, passando attraverso l'analisi dei risultati ottenuti nello sviluppo delle parti *hardware*, *software* e dei parametri di processo.

2. Cenni storici della Fabbricazione Additiva

Il concetto di Fabbricazione Additiva (FA) trae le sue origini da alcune tecnologie precursori sviluppate durante gli anni '80, la cui industrializzazione fu essenziale per soddisfare le continue richieste del mercato; la necessità era di ridurre il *time to market* e rendere più flessibile l'intero processo produttivo, in modo che potesse rispondere ad improvvise ed inaspettate variazioni della domanda. Oggigiorno, tali tecnologie sono ampiamente applicate all'interno del sistema produttivo e da allora si sono evolute con la nascita di nuove applicazioni (sia all'interno che all'esterno delle tecnologie per la Fabbricazione Additiva). Per tale motivo, può essere istruttivo prendere in considerazione il loro sviluppo tecnologico.

Una delle pietre miliari che ha consentito lo sviluppo di queste tecnologie sono i sistemi laser, inventati oltre un secolo fa. L'acronimo LASER (*Light Amplification Stimulated Emission Radiation*) è ormai entrato nell'uso comune. Il fascio laser prodotto da diversi tipi di sorgenti (CO₂, diodi, ecc.) è una radiazione che ha la proprietà di essere monocromatica, coerente e collimata. È costituita da fotoni generati dall'eccitazione di un mezzo che può essere sotto forma di gas (come la CO₂), liquido o a stato solido, 'pompati' da una sorgente ottica che genera il fascio stesso.



Figura 2-1 – Sistema laser (Fonte: Cmquadrietrici.it)

I sistemi moderni basati su laser in fibra hanno consentito un significativo miglioramento in termini di potenza, riduzione dei costi, riduzione della complessità del sistema, minore ingombro, maggiore robustezza e migliorata qualità del fascio laser. Per tali motivazioni, i laser sono diventati più economici, più potenti e di più facile utilizzo. Questi benefici,

assieme ad una crescente integrazione con altri sistemi di produzione (come i sistemi CNC), i sistemi di controllo e la sensoristica hanno consentito ai laser di fare un significativo passo avanti rispetto ai tradizionali metodi di produzione per la prototipazione industriale.

Originariamente, le tecnologie additive rientravano nella categoria denominata *Prototipazione Rapida* ed avevano sostituito quelle utilizzate in precedenza, grazie alla possibilità di ridurre i tempi di produzione e prova dei prototipi. Difatti, la precedente produzione di prototipi era lenta e costosa, veniva tipicamente realizzata manualmente attraverso l'impiego di attrezzature specifiche e di materiali facilmente lavorabili come il legno. Richiedeva numerose iterazioni per ottenere una parte funzionale che soddisfacesse i requisiti minimi sotto le condizioni di servizio, coinvolgendo l'attività di numerosi addetti. L'avvento della 'stampa 3D' nel settore dei materiali polimerici guidò lo sviluppo di questi processi, oggi ancora ampiamente utilizzati e che continuano a fungere da tecnologie precursori anche per lo sviluppo della Fabbricazione Additiva metallica.

In questo contesto, la Stereolitografia (SLA) fu inventata da Charles W. Hall nel 1984 e commercializzata da *3D Systems* nel 1989. La Stereolitografia si basa sull'utilizzo di una sorgente UV che solidifica un polimero fotosensibile (tipicamente una resina) generando oggetti tridimensionali. Tale tecnica è spesso citata come l'origine della Fabbricazione Additiva.

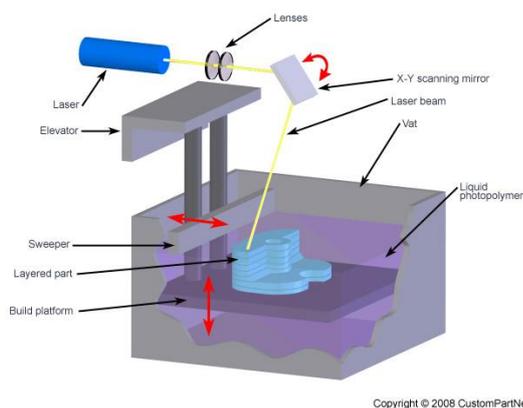


Figura 2-2 – Schematizzazione del sistema di Stereolitografia (SLA) (Fonte: *Meccanismocomplesso.org*)

La *Selective Laser Sintering* (SLS) fu sviluppata da Carl Deckand e Joseph Beaman presso l'Università del Texas ad Austin a metà degli anni '80 con commercializzazione da parte di *DTM* e successiva acquisizione di *3D Systems*. La tecnologia usa un fascio laser per fondere della polvere distribuita su una piattaforma tramite una lama e creare degli oggetti

tridimensionali. La *Fused Deposition Modelling* (FDM) fu sviluppata a fine anni '80 da S. Scott Crump e commercializzata nel 1990 da *Stratasys*. Tramite l'FDM un polimero termoplastico viene estruso attraverso un ugello riscaldato e depositato strato per strato, formando il componente.

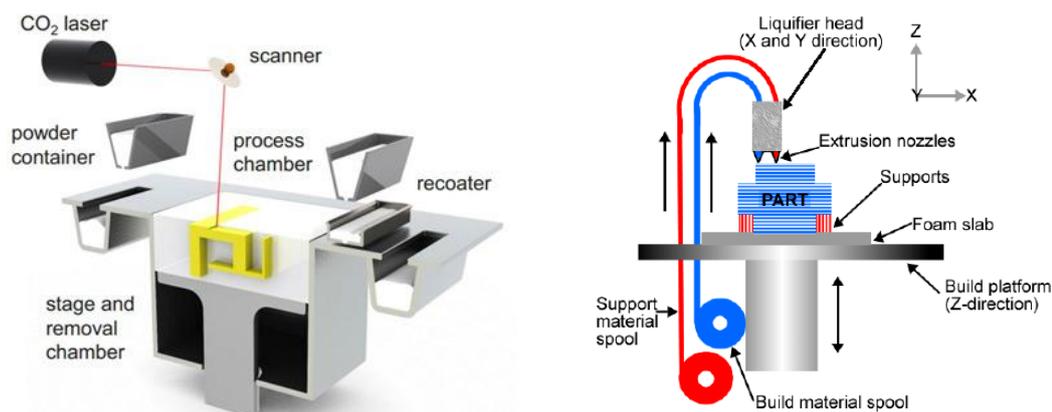


Figura 2-3 – Schematizzazione dei sistemi di SLS e FDM (Fonte: *Sculpteo.com* e *Researchgate.net* – Alfred Sidambe)

Inizialmente, i modelli ottenuti venivano solamente impiegati come elementi di prova o di stile in vista della produzione in serie, oltre alla pubblicizzazione di nuovi prodotti. Tuttavia, il crescente sviluppo di queste tecnologie ha consentito di realizzare parti che riuscissero a rispettare i requisiti tecnici di una produzione in serie.

Le varianti di questa tecnologia furono le prime ad utilizzare il laser per fondere o sinterizzare polveri polimeriche ed ottenere una parte massiva. Polveri metalliche, ricoperte da un legante, venivano fuse realizzando una parte metallica porosa che sarebbe stata poi infiltrata con l'utilizzo di un secondo metallo basso-fondente per densificarla.

La prototipazione con materiali polimerici si suddivide attualmente in tre macro-aree:

- Fusione del letto di polvere tramite una sorgente laser;
- Solidificazione della resina fotosensibile tramite una sorgente ultravioletta o laser;
- Deposizione per estrusione attraverso un ugello o testina di stampa (stampa 3D domestica).

Lo sviluppo della Fabbricazione Additiva con materiali polimerici ha fatto da guida per lo sviluppo dei materiali metallici.

Il *Cladding*, ovvero la deposizione di un materiale metallico per ricoprire una parte usurata o danneggiata, è una tecnica nota sin dai primi sviluppi delle tecnologie di saldatura.

Storicamente veniva eseguita attraverso un processo manuale utilizzando una fiamma o una torcia ad arco, che permetteva di depositare un materiale di apporto in modo da realizzare, riparare, rigenerare o migliorare un componente. La riparazione o la rigenerazione offrono l'opportunità di utilizzare una lega di apporto differente, con migliori proprietà meccaniche, consentendo il miglioramento della qualità della parte riparata e l'aumento delle proprietà e prestazioni durante il servizio.

Inoltre, una riparazione eseguita in loco permette il riutilizzo della parte in maniera quasi immediata, eliminando il tempo associato all'invio del pezzo presso aziende esterne. Il *Cladding* può anche essere impiegato nella realizzazione di un rivestimento più resistente alla corrosione e all'usura.

Questo processo permette di partire da un pezzo esistente che necessita di migliorare alcune proprietà in maniera localizzata o di essere riparato superficialmente. Le limitazioni all'utilizzo di una sorgente di calore ad arco riguardano il 'bagno fuso' (solitamente limitato a posizioni di deposizione piane), il grande calore di apporto (con conseguente accumulo), potenziali distorsioni e generazione di tensioni residue interne. Per tali motivi, l'applicazione del *Cladding* era spesso limitata a parti di grande dimensione su cui era possibile realizzare una deposizione in piano e in grado di sopportare stress termici o meccanici e distorsioni indotte. In seguito alla deposizione del rivestimento veniva eseguita un'operazione di finitura, necessaria per raggiungere la rugosità superficiale e la tolleranza dimensionale richieste.

L'introduzione di soluzioni automatizzate tramite sistemi CNC con controllo dei movimenti ha sostituito l'intervento dell'operatore. Potendo utilizzare come materiale di apporto un filo o una polvere metallica era possibile ottenere ratei di deposizione superiori.

I sistemi laser hanno fatto notevoli progressi nei processi di *Cladding* dal momento in cui è risultata più semplice la loro integrazione nell'ambiente di produzione e da quando sono risultati maggiormente redditizi e industrialmente più robusti, anche in difficili condizioni di lavoro. Un materiale depositato tramite sistema laser può, in alcuni casi, essere più veloce e più accurato di un sistema ad arco ed offrire benefici sulla microstruttura e qualità della parte depositata.

Un deposito più accurato consente di utilizzare meno materiale di riempimento e facilitarne la rimozione durante la finitura mediante rettifica o fresatura. La focalizzazione della sorgente di calore riduce il calore ceduto alla parte, consentendo una microstruttura più fine

e riducendo distorsioni termiche e stress residui. Un rigoroso controllo della penetrazione del laser permette di monitorare la quantità del materiale depositato e quindi evitare di modificare la composizione chimica e le proprietà metallurgiche del pezzo. Per tali motivi, i costituenti del materiale d'apporto e il processo in sé devono essere attentamente controllati per garantire le proprietà desiderate a seconda del materiale di base.

Le sorgenti laser hanno sostituito in molti casi quelle ad arco e al plasma, dacché il laser disperde meno calore e consente minori distorsioni e ritiri volumetrici. Tuttavia, risultano essere più costosi e complicati di un sistema ad arco.

L'evoluzione del processo di *Cladding* nel processo di *Directed Energy Deposition* per Fabbricazione Additiva è dovuta all'implementazione al computer di modelli tridimensionali dei percorsi di deposizione, all'utilizzo di sistemi di controllo multi-assiali e all'evoluzione delle teste laser con diversi materiali di apporto (in polvere o in filo). I moderni sistemi ibridi per la Fabbricazione Additiva combinano le peculiarità di un sistema sottrattivo e quelle di un sistema additivo in modo da poter realizzare una parte nella stessa postazione di lavoro.

Per quanto riguarda i sistemi a letto di polvere, in passato le parti metalliche venivano formate per compattazione, utilizzando sistemi di pressatura e forni per la sinterizzazione. Rispetto alle tecniche di fusione e colata, è possibile pressare anche materiali chimicamente incompatibili se fusi e formare una *green part*¹ auto-supportante. La parte deve essere riscaldata e sinterizzata in una fornace con atmosfera inerte in modo da formare l'oggetto finale.

Il processo era redditizio nella produzione di grandi quantità di particolari metallici, in quanto vengono ridotte le operazioni di finitura, realizzando risparmi di energia e di tempo. L'utilizzazione di materiale può arrivare fino al 95% rispetto al totale impiegato, rendendo il processo attrattivo per determinate applicazioni in cui si utilizzano materiali costosi, come il carburo di tungsteno.

Possono essere formati materiali compositi unendo polveri metalliche a polveri non metalliche (come la grafite), per formare contatti di motori elettrici e spazzole.

¹ Green part: parte ottenuta in seguito alla compattazione di polveri, non ancora sottoposta a trattamento di densificazione in forno.

Le parti sinterizzate in metallo presentano una discreta resistenza meccanica ma basso allungamento a causa dei vuoti e dei difetti presenti all'interno del materiale.

Sono stati ottenuti significativi sviluppi tecnologici nella produzione delle polveri metalliche, nella caratterizzazione delle polveri e dei materiali metallici sinterizzati. I miglioramenti ottenuti possono essere applicati direttamente o indirettamente ai processi di sinterizzazione o di fusione per la Fabbricazione Additiva e ciò permette di creare nuovi standard a livello industriale. Le limitazioni alla pressatura delle polveri sono state causate dall'alto costo degli stampi e l'alto costo di investimento delle attrezzature (presse idrauliche, presse isostatiche e fornaci).

Questi costi necessitano di essere ammortizzati sull'intero ciclo di vita di un prodotto e tipicamente richiedono la produzione di decine di migliaia di parti per ricoprire l'investimento iniziale. Inoltre, le ridotte dimensioni riproducibili a causa del costo delle attrezzature di pressatura ne hanno limitato l'applicabilità.

Altre limitazioni alla progettazione hanno riguardato le dimensioni massime raggiungibili e la riproduzione di dettagli come spigoli, smussi e angoli appuntiti. La forma delle polveri utilizzate nei processi di metallurgia è spesso irregolare e spigolosa e influisce sulla densità di impacchettamento e sulla resistenza alla pressatura della *green part*, in opposizione a quelle sferiche usate per i processi di Fabbricazione Additiva (2).

3. Il processo di Fabbricazione Additiva

Il processo di Fabbricazione Additiva è caratterizzato da una serie di procedimenti fondamentali per il passaggio del modello dall'ambiente CAD all'ambiente macchina. Sebbene molti lo considerino un processo rapido che consente di eliminare alcune fasi tradizionalmente presenti nei processi sottrattivi, è utile fare un approfondimento sulle operazioni che lo costituiscono che in alcuni casi, possono incidere notevolmente sul tempo complessivo. In figura 3.1 è presentato il diagramma di flusso che riassume i vari *step* che lo costituiscono.



Figura 3-1 – Processo di Fabbricazione Additiva

3.1 Generazione file CAD e metodi di ottimizzazione topologica

Ogni oggetto prodotto con la Fabbricazione Additiva prende vita da un modello realizzato con l'ausilio di un *software* CAD (come *NX*, *Solidworks*, *Catia*, *Inventor*, ecc), sia esso solido o superficiale, che permette la descrizione esterna della geometria. Oltre a questi, anche i sistemi di *Reverse Engineering* (sistema laser e scanner ottico) rappresentano una valida alternativa in grado di produrre un modello virtuale tridimensionale.

Potendo partire dal vuoto per ottenere qualsiasi tipo di forma, negli ultimi anni sono state ricercate soluzioni che permettessero la realizzazione di strutture alleggerite. L'applicazione di metodi basati sull'ottimizzazione di forma, di dimensione e topologica sono un esempio che ha trovato crescente riconoscimento e impiego. Su quest'ultima ci si soffermerà nel seguito in modo da presentarne le potenzialità (3).

Seppur il concetto di ottimizzazione topologica sia stato introdotto nel lontano 1901, non ha ricevuto sufficiente considerazione fino alla metà degli anni '80 (4). Si tratta di uno strumento matematico mediante il quale è possibile ottimizzare la distribuzione di materiale all'interno di un determinato spazio di progettazione, con l'obiettivo di massimizzare o minimizzare determinate proprietà fisiche quali il peso, la rigidezza (o la *compliance*) e la conducibilità.

L'implementazione di questi algoritmi è spesso basata sull'utilizzo di metodi agli elementi finiti che prevedono la discretizzazione dello spazio di progettazione.

L'ottimizzazione topologica è un procedimento iterativo all'interno del quale sono definite una (o più) funzione obiettivo e delle funzioni di vincolo. Il processo procede iterativamente fintantoché non si raggiunge un risultato soddisfacente o se le nuove soluzioni presentano una piccola variabilità rispetto la precedente.

Esistono differenti algoritmi di ottimizzazione topologica applicati per la progettazione di strutture con la FA, ad esempio:

- Metodo SIMP (*Solid Isotropic Microstructure with Penalization*);
- Metodo BESO (*Bidirectional Evolutionary Structural Optimization*);
- Metodo PTO (*Proportional Topology Optimization*).

Nel seguente paragrafo ci si concentrerà solamente sul primo di questi, basato sulla penalizzazione di un parametro fisico. Nella gran parte delle applicazioni, tale ottimizzazione è ottenuta facendo rendendo variabile la densità della struttura, nell'intervallo [0,1]. Le proprietà meccaniche ad essa associate sono predefinite da leggi lineari o di altro tipo.

In passato, l'interpretazione fisica di una densità variabile è sempre risultata piuttosto difficile in quanto non poteva essere realizzata con la maggior parte dei processi produttivi. Anche con le tecnologie additive, i sistemi che potrebbero realizzare strutture a densità variabile sono limitati.

Tuttavia, poiché gran parte delle applicazioni metalliche riguardano i sistemi a letto di polvere, è possibile realizzare strutture a densità variabile tramite l'introduzione di porosità nel modello. Questo può essere ottenuto variando i parametri di processo.

Attualmente esiste un discreto numero di *softwares* che consente di eseguire ottimizzazioni topologiche, come *Altair Optistruct*, *Altair SolidThinking*, *ANSYS Genesis* e *Autodesk Shape Generator*.

Gli obiettivi di ottimizzazione più comuni sono la minimizzazione della massa di una struttura soggetta a vincoli come il minimo fattore di sicurezza e la rigidità o la massimizzazione della rigidità, vincolando la massa totale. Un ulteriore problema legato alle soluzioni suggerite, riguarda la riproducibilità delle forme stesse. Sebbene alcuni di questi *software* integrino delle funzioni che considerano la modalità di produzione, sono ancora presenti delle difficoltà realizzative. Ad esempio, nel caso di sistemi a letto di polvere, può essere critica la produzione di dettagli molto sottili o con drastici cambiamenti di sezione.

Per concludere, gran parte di questi programmi non è ancora in grado di gestire materiali anisotropi e materiali con proprietà dipendenti dalla geometria (4).

3.2 Generazione del file STL

La comunicazione tra il *software* di modellazione e la macchina di FA è permessa tramite la conversione del CAD in formato STL (*Standard Triangulation Language*). Come sott'intende l'acronimo, il CAD viene semplificato, approssimando con triangoli di dimensione variabile la superficie. In seguito a questa conversione si perdono alcune informazioni riguardanti il volume contenuto dalla superficie esterna del solido, poiché solo quest'ultima viene suddivisa in triangoli, generando una *Shell*. Tuttavia, tale operazione è necessaria perché permette la suddivisione dell'oggetto in strati (*slicing*).

Nonostante stiano emergendo nuovi formati di conversione, questo risulta essere ancora il più diffuso.

La conversione in formato STL costituisce un primo grado di approssimazione del modello virtuale e conseguentemente produce una minore accuratezza della geometria.

3.3 Orientazione in macchina e strutture di supporto

In questa fase di *pre-processing* per la Fabbricazione Additiva il modello viene virtualmente posto sulla piattaforma di costruzione della macchina. Lo studio dell'orientazione consente, secondo uno o più obiettivi, di: stabilire il tempo di produzione, determinare il numero di oggetti producibili nello stesso job, valutare le tensioni e le distorsioni generate durante la costruzione, fare considerazioni sulla finitura superficiale o stabilire lungo quale direzione conferire le migliori proprietà meccaniche (considerata l'anisotropia del processo) (3).

In seguito a questa fase, alcuni sistemi (specialmente nel caso di applicazioni metalliche) prevedono la generazione di strutture di supporto. Tali strutture adempiono nel corso della costruzione del pezzo a diverse funzioni quali:

- Ancorare il modello all'area di lavoro, ma permettendo la successiva rimozione;
- Proteggere le pareti laterali da azioni che ne possono compromettere la costruzione;
- Supportare le parti a sbalzo e le strutture orizzontali (5);
- Assicurare un'omogenea dispersione del calore accumulato;
- Ridurre la generazione di stress e distorsioni residue.

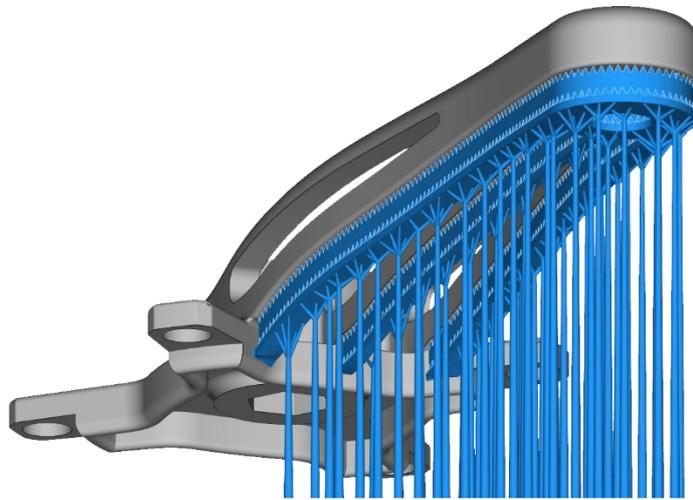


Figura 3-2 – Strutture di supporto (Fonte: Materialise.com)

La generazione delle strutture di supporto è funzione dell'orientazione conferita alla parte da realizzare. Per tale motivo, in alcuni casi essa viene studiata cercando di minimizzarle, poiché al termine del ciclo di fabbricazione sarà necessario rimuoverle producendo dunque uno scarto. Generalmente le strutture di supporto sono realizzate con lo stesso materiale impiegato per costruire la parte, ma in alcuni casi può essere impiegato un materiale differente per favorirne la rimozione. Nel caso di applicazioni metalliche, si fa esclusivamente riferimento a supporti del primo tipo.

3.4 Esecuzione dello slicing

Lo *slicing* consiste nella suddivisione del modello in strati paralleli aventi la normale orientata lungo l'asse Z di costruzione. Tale fase introduce la seconda approssimazione sulla geometria da realizzare, denominato *effetto scalino* (5). L'orientazione da conferire in macchina viene valutata anche in funzione di questo effetto poiché, specialmente nel caso di elementi snelli, risulterebbe evidente secondo certe angolazioni, conferendo una minore finitura superficiale. Lo spessore degli strati in cui viene suddivisa la parte dipende dalla tipologia di sistema in esame. Lo *slicing* può essere di due tipi (figura 3.2):

- *Costante*. Lo spessore degli strati lungo la direzione di costruzione non varia;
- *Adattativo*. In funzione della morfologia della superficie in esame viene fatto variare lo spessore degli strati assicurando una migliore approssimazione del modello (5).

Generalmente i sistemi additivi metallici prevedono la realizzazione di uno *slicing* costante.

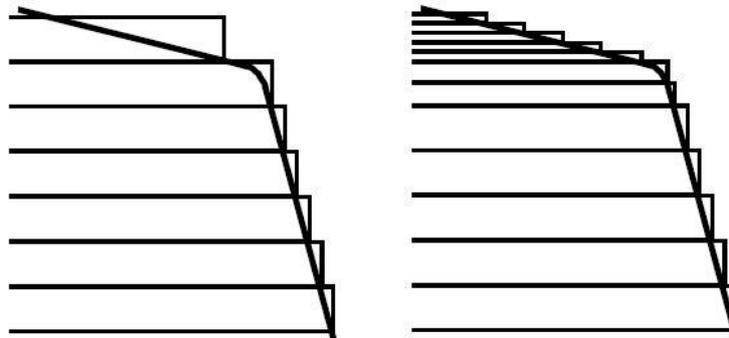


Figura 3-3 – Slicing costante e adattativo (Fonte: Introduzione all'Additive Manufacturing, Luca Iuliano)

3.5 Setup della macchina e costruzione della parte

L'ultima operazione prima dell'avvio del processo additivo riguarda la preparazione della macchina per la produzione. Questa fase, riferendosi ai sistemi metallici più diffusi, prevede il controllo della quantità di polvere presente nei contenitori e della quantità di gas inerte. Inoltre, è necessaria l'impostazione a bordo macchina dei parametri di processo quali: potenza laser, spessore dello strato, velocità di scansione, portata di gas inerte, *hatching distance*², ecc. Una volta avviato il processo di costruzione, il sistema valuta autonomamente l'avanzamento del lavoro e nella maggior parte dei casi non è richiesto l'intervento dell'operatore. Un sistema di telecamere o sensori monitora costantemente la qualità superficiale della parte e il mantenimento (entro un *range* prestabilito) dei parametri di processo. Nel caso di rilevamento di errori o difetti, il processo viene interrotto.

3.6 Rimozione della parte e operazioni di post-processing

Completato il processo di costruzione, la parte deve essere rimossa. Questa fase è l'unica in cui l'operatore viene a contatto con i sistemi al suo interno e la polvere. Per tale motivo è richiesto un livello di sicurezza superiore per limitare rischi e contaminazioni.

Prima di prelevare l'intera piattaforma è necessaria la rimozione della polvere non fusa, tramite dei sistemi di aspirazione di cui la macchina è dotata. Molti produttori di sistemi a letto di polvere hanno iniziato a sviluppare sistemi automatizzati in grado di rimuovere la polvere in eccesso in modo semi-automatico. L'operatore può quindi accedere alla camera ed estrarre manualmente la piattaforma con la parte ancorata. Per evitare la generazione di

² Hatching distance: distanza misurata tra il centro di una *single scan* e il successivo.

deformazioni durante la rimozione dei supporti viene spesso eseguito un trattamento termico di *stress relieving*, il quale permette l'eliminazione delle tensioni residue. Successivamente è possibile procedere con la rimozione delle strutture di supporto.

Nel caso in cui la parte si trovi invece a contatto diretto con la piattaforma può essere necessaria la separazione tramite elettroerosione a filo o, se le condizioni lo permettono, mediante l'utilizzo di una sega.

L'orientazione della parte influenza notevolmente la generazione di supporti e la conseguente rimozione. Se una parete sottile è disposta orizzontalmente rispetto alla piattaforma, la quantità di materiale di supporto utilizzata aumenta notevolmente. L'orientazione conferita ha anche effetto sulla finitura superficiale poiché, in seguito alla rimozione dei supporti, saranno presenti dei segni dove prima risultavano attaccati. Nei sistemi laser, i supporti sono generalmente troppo resistenti per essere rimossi a mano ed è quindi necessario prevedere l'impiego di sistemi meccanici. I pezzi prodotti con EB-PBF presentano invece minori supporti viste le più alte temperature raggiunte durante il processo di costruzione. Ciò consente di ridurre la generazione di tensioni residue.

Le parti realizzate con la Fabbricazione Additiva presentano una bassa finitura che può essere migliorata per motivi estetici o prestazionali. Gli effetti indesiderati generalmente presenti sono: effetto scalino, adesione della polvere non fusa, segni di deposizione del sistema DED e segni delle strutture di supporto.

L'effetto scalino è un problema fondamentale per queste tecnologie, sebbene sia possibile minimizzare lo spessore del singolo strato in modo da ridurre l'errore generato. La polvere adesa è un problema condiviso da tutte le tecnologie che impiegano polvere come materiale di apporto e può essere controllato cambiando l'orientazione della parte, la morfologia della polvere e modificando il percorso di scansione.

La quantità di operazioni di *post-processing* dipende dalla finitura superficiale desiderata. Alcuni processi per la FA sono in grado di raggiungere tolleranze sub-micrometriche, mentre altri permettono precisioni attorno a 1 mm. Generalmente, maggiori sono il volume di costruzione e la velocità di costruzione, peggiore è la precisione.

Se è richiesta una superficie opaca, è sufficiente operare una semplice pallinatura, in modo da rimuovere eventuali bave e la polvere adesa, conferendo un aspetto opaco uniforme. Se è

richiesta una superficie liscia o levigata, si esegue una levigatura a umido (o a secco) e una lucidatura a mano.

È possibile applicare diverse tecniche automatizzate per migliorare la finitura della superficie. Due delle più utilizzate sono la burattatura³ per le parti esterne e l'impiego di paste abrasive per parti interne.

Dopo la costruzione in macchina, molte parti vengono trattate termicamente per migliorarne le proprietà. Nel caso delle tecniche DED e PBF metalliche, i trattamenti termici servono ad ottenere particolari microstrutture o per ridurre tensioni residue. In questi casi, vengono spesso applicati una serie di trattamenti sviluppati per una specifica lega metallica che consentono di mantenere una microstruttura a grana fine all'interno della parte, pur assicurando un miglioramento dell'allungamento e della duttilità.

Prima dell'avvento delle tecniche di DED e PBF in grado di fondere direttamente materiali metallici, erano state sviluppate tecniche che creavano una *green part* in metallo. Questa veniva poi post-processata per ottenere parti metalliche dense e utilizzabili. Le fasi successive consistevano nella movimentazione manuale della parte dalla macchina alla fornace in cui veniva riscaldata per eliminare il legante e per infiltrarla con un metallo differente (3).

³ Burattatura: lavorazione meccanica di finitura superficiale. Avviene per rotolamento e urto dei pezzi in un barile (il *buratto*) ed eventualmente di materiale abrasivo (Fonte: Wikipedia.org)

4. Confronto con le tecniche di produzione sottrattive

Nel seguente capitolo verranno valutate le caratteristiche che distinguono le tecnologie per asportazione di truciolo da quelle additive, in modo da evidenziare quali fattori costituiscano un punto di forza e quali (per ora) un elemento di debolezza. Ciò che caratterizza principalmente le tecnologie sottrattive è la partenza da un materiale sotto forma di blocco, la cui dimensione iniziale deve essere almeno pari alla dimensione del prodotto finale. Le tecnologie additive prevedono invece la costruzione dal vuoto della parte da fabbricare. I fattori secondo i quali verrà eseguito il confronto sono:

- Materiali lavorabili;
- Velocità di produzione;
- Complessità della parte da realizzare;
- Accuratezza;
- Elaborazione del modello CAD;
- Impostazione dei parametri di processo.

Considerando la tipologia di materiali lavorabili, le tecnologie additive sono state inizialmente sviluppate per la gestione di materiali polimerici, cere e laminati di carta. Successivamente è stato introdotto l'uso di materiali compositi, metallici e infine ceramici. Le tecnologie ad asportazione di truciolo sono invece particolarmente adatte per la lavorazione di materiali più duri (in confronto ad alcuni precedenti) e relativamente fragili, come acciai o altre leghe metalliche, per ottenere pezzi con una certa accuratezza e con proprietà omogenee. La qualità del prodotto finito è, in questo caso, definibile a priori.

Contrariamente, una volta processati, i materiali per le tecnologie additive possono presentare porosità al loro interno e proprietà anisotrope in funzione dell'orientazione conferita, dei parametri di processo e della tipologia di oggetto (3).

Tuttavia, partendo dal vuoto, è possibile impiegare una minore quantità di materiale. Ciò consente di ridurre gli sprechi ed essendo possibile il riciclo, salvaguardare l'ambiente (6).

Riferendosi alle tempistiche associate alla produzione, i sistemi a controllo numerico possono rimuovere il materiale in eccesso, partendo da un grezzo, in modo molto più rapido rispetto alla stessa quantità di materiale additivata. Nonostante ciò, le tecnologie additive

permettono di ottenere la parte finale in un unico passaggio o riducendo notevolmente le fasi necessarie per farlo.

Ciò che in alcuni casi limita l'applicazione delle tecniche sottrattive è il tempo legato al *setup* della macchina e alla pianificazione del processo, ancor più se la parte da realizzare è particolarmente complessa. Dunque, la rapidità del processo deve essere valutata per la sua interezza, non limitandosi ai soli istanti in cui avviene l'effettiva interazione tra parte da lavorare e macchinario. I processi per asportazione di truciolo devono piuttosto essere considerati come un processo multistadio, il quale prevede più volte il ricollocamento della parte all'interno della stessa macchina o tra più macchinari.

La produzione tramite Fabbricazione Additiva richiede, per contro, diverse ore di processamento, anche se è possibile produrre più parti durante lo stesso *job*. La fase di finitura può durare diversi giorni se è necessario conferire un'elevata qualità, incidendo notevolmente sul costo finale.

Come accennato più volte, uno dei vantaggi della FA è legato alla complessità della parte da realizzare, in quanto il suo aumento non comporta un proporzionale aumento dei costi. La produzione di una parte con le tecniche sottrattive all'interno dello stesso sistema CNC potrebbe non essere sempre possibile per la presenza di alcune caratteristiche non direttamente riproducibili. Infatti, gli utensili utilizzati per la lavorazione vengono installati sul porta-utensile, collocato nella testa della macchina. I vincoli di natura geometrica del sistema CNC potrebbero limitare l'accesso dell'utensile in alcuni punti, sia per limiti di forma, sia per evitare collisioni e conseguenti danneggiamenti del sistema.

Le tecnologie additive non presentano questa problematica, non essendo presente un utensile fisico, né tutta l'architettura che lo sostiene. Risulta perciò favorita la riproduzione di dettagli molto piccoli o interni al modello, senza dover pianificare accuratamente il percorso utensile. La fabbricazione di parti integrate, ovvero costituite da una moltitudine di componenti direttamente assemblati, è una prerogativa delle tecnologie additive che non è possibile applicare a quelle per asportazione di truciolo. In questo secondo caso è difatti richiesta la suddivisione del prodotto in tutti i suoi costituenti. Per ogni parte è necessario prevedere il posizionamento in macchina, determinare la tipologia di utensili e infine pianificarne la traiettoria.

Sebbene possano verificarsi casi di geometrie non riproducibili secondo la FA, la probabilità che questo accada è molto bassa. Inoltre, è possibile pianificare delle strategie che permettano di superare alcune di queste barriere senza troppa difficoltà.

Un sistema di FA opera generalmente con una risoluzione pari a qualche decina di micrometri e spesso presenta risoluzioni differenti secondo gli assi ortogonali. Tipicamente, lungo la direzione di costruzione la risoluzione è pari allo spessore del singolo strato e tale valore è certamente superiore rispetto a quella presente nel piano di lavoro.

Per i sistemi più economici, l'accuratezza in tale piano è determinata dal posizionamento del sistema di deposizione, costituito da ingranaggi e motori elettrici. Questo permette di stabilire in alcuni casi la dimensione minima riproducibile.

Nei sistemi che impiegano la tecnologia laser, un galvanometro orienta il sistema di specchi per l'orientazione del fascio. La sua risoluzione determina le dimensioni massime della parte mentre il diametro del fascio laser lo spessore minimo della parete.

D'altro lato, l'accuratezza delle macchine a controllo numerico (sottrattive) è similmente determinata dalla risoluzione di posizionamento lungo i tre assi ortogonali e dal diametro dell'utensile rotante. La riproduzione di alcuni particolari è definita dalla geometria dell'utensile, come il raggio minimo o l'angolo interno, mentre fattori quali lo spessore minimo della parete possono essere ben minori del diametro dell'utensile, vista la natura sottrattiva del processo. In entrambi i casi, la riproduzione di piccoli particolari dipende dalla geometria da realizzare e del materiale da lavorare.

La gestione del file CAD differisce in base alla scelta della tecnologia. Se additiva, il sistema richiede l'approssimazione del modello 3D mediante una serie di triangoli che di fatto rendono la geometria una superficie chiusa, la cui continuità è determinata da quanto vicini questi elementi siano gli uni con gli altri. Se sottrattiva, questo procedimento non è applicato e la lavorazione delle superfici deve essere generata nello spazio tridimensionale.

Con geometrie elementari quali cilindri, cubi o coni risulta relativamente semplice pianificare la traiettoria dell'utensile ma per la realizzazione di superfici a mano libera questa si complica, potendo essere presenti numerosi cambiamenti dell'orientazione. Geometrie particolarmente complesse risultano di difficile riproduzione con sistemi CNC, anche se dei più sofisticati. Sottosquadri, inclusioni e spigoli interni sono alcune delle forme che potrebbero non essere riprodotte in specifiche condizioni.

La programmazione della produzione con questi sistemi avviene considerando i limiti e i vincoli del sistema, a discapito della forma che si vorrebbe conferire all'oggetto finale. Utilizzando i sistemi additivi invece, il componente si progetta secondo la funzionalità, essendo esenti da molti vincoli presenti tradizionalmente.

Le sequenze di programmazione per una macchina a controllo numerico includono molti aspetti come la selezione dell'utensile, l'impostazione della velocità di taglio e di avanzamento, il posizionamento dell'utensile, l'angolo di ingresso sulla parte da lavorare, la portata di lubrificante, ecc. Anche molte macchine per la FA richiedono l'impostazione di una grande quantità di parametri, ma l'intervallo selezionabile, la complessità e tutte le implicazioni derivanti dalla loro scelta sono in confronto minime.

Per un sistema additivo, lo scenario peggiore conseguente alla scorretta impostazione dei parametri di processo è rappresentato dalla produzione di una parte deformata o incompleta. Nel caso dei sistemi a controllo numerico questo può provocare un danneggiamento della macchina e in alcuni casi un rischio per l'operatore a bordo macchina (3).

5. Metallurgia delle polveri per la Fabbricazione Additiva

Da quando le tecnologie per la Fabbricazione Additiva di materiali metallici hanno iniziato a diffondersi, le polveri metalliche hanno rappresentato il punto di partenza di gran parte dei processi esistenti.

Attualmente, la loro produzione incide sulla qualità dell'intera catena produttiva, dalla progettazione fino ai processi di finitura. Per tale motivo, sono stati fatti numerosi studi su tali processi produttivi con l'intento di renderli maggiormente stabili e ripetibili, in modo da assicurare proprietà (morfologiche, dimensionali, chimiche e meccaniche) omogenee all'interno di uno stesso lotto. Le difficoltà incontrate nella gestione del processo, abbinate ad una scarsa presenza di produttori di polveri all'interno del panorama mondiale, fa sì che il loro costo di acquisto risulti essere piuttosto elevato, se comparato con il costo delle materie prime impiegate nei processi tradizionali. Dunque, una delle principali sfide riguarda lo sviluppo di maggiori competenze, in modo da favorire la crescita e la concorrenza tra i produttori, con l'obiettivo di ridurre i costi di produzione, migliorare la qualità e rendere tale tecnologia più accessibile (7).

I costi legati all'acquisto delle materie prime rappresentano una barriera ad una maggiore diffusione, specialmente nel caso di produzioni in grande serie.

Così come è successo per le tecnologie additive, anche la produzione delle polveri per FA ha sfruttato alcune conoscenze pregresse. Con l'obiettivo di migliorare qualità delle polveri e ridurre il costo, sono state sviluppate numerose soluzioni produttive:

- Atomizzazione ad acqua;
- Atomizzazione a gas;
- Atomizzazione al plasma;
- Atomizzazione centrifuga;
- Processo *Armstrong*;
- Processo *Hydride-Dehydride*.

5.1 Atomizzazione ad acqua

La più semplice ed economica modalità di produzione delle polveri è l'atomizzazione ad acqua. La materia prima viene inizialmente fusa in una fornace per poi essere trasferita nel crogiolo (posto sopra la camera di atomizzazione), che permette di regolare la portata di metallo. Il fuso viene introdotto nella camera tramite l'azione combinata di un ugello, che lo accelera, e della spinta di un gas pressurizzato presente sopra il crogiolo. Entrato nella camera di atomizzazione viene raffreddato da getti di acqua posizionati circolarmente attorno al flusso di metallo (pressurizzati mediante un sistema di pompaggio), generando piccole goccioline. In seguito alla loro solidificazione si forma la polvere metallica che viene raccolta sul fondo della camera, in un apposito contenitore.

Impiegando acqua come mezzo di raffreddamento del metallo, possono verificarsi processi ossidativi. L'elevato gradiente di raffreddamento e l'alta velocità di uscita della lega fusa dall'ugello causano la produzione di particelle metalliche dalla forma non sferica. Questo tipo di processo può essere applicato a tutte le leghe non reattive ai processi ossidativi come acciai inossidabili, leghe di nickel, leghe di rame e leghe di cobalto. Le polveri ottenute mediante atomizzazione ad acqua sono principalmente impiegate per produrre parti con processi di pressatura e sinterizzazione anziché quelli di Fabbricazione Additiva. L'elevata produttività di questo processo consente di abbassare il costo delle polveri (8).

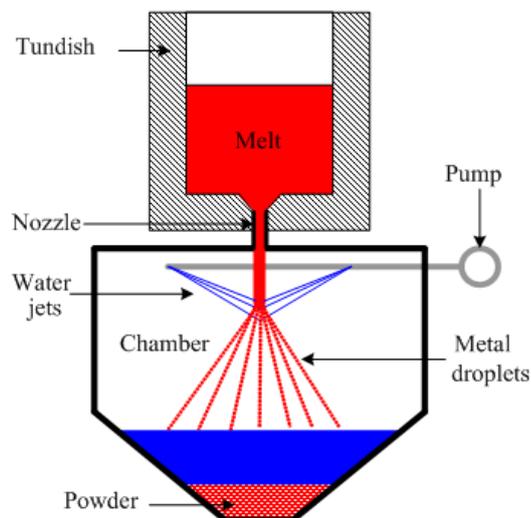


Figura 5-1 – Schematizzazione del sistema di atomizzazione ad acqua (Fonte: Substech.com)

5.2 Atomizzazione a gas

Il processo più comunemente utilizzato per la produzione di polveri sferiche è l'atomizzazione a gas, inventata nel 1872 e brevettata per la prima volta da Marriot di Huddersfield (4). L'atomizzazione a gas può essere classificata in diversi sotto-processi suddivisi in base alle modalità di fusione del materiale grezzo:

- Atomizzazione con gas inerte sottovuoto (VIGA – *Vacuum Inert Gas Atomization*);
- Atomizzazione a induzione tramite elettrodo (EIGA – *Electrode Induction Melting Gas Atomization*);
- Atomizzazione a induzione tramite plasma (PIGA – *Plasma-melting Induction-guiding Gas Atomization*).

Il processo è molto simile all'atomizzazione ad acqua per quanto riguarda la fusione della materia prima. Generalmente, sopra la camera di atomizzazione viene installato un crogiolo, mentre per applicazioni in campo aerospaziale viene impiegata una fornace a induzione sottovuoto (VIM – *Vacuum Induction Melting*). Il metallo fuso entra all'interno della camera dove viene investito da un getto di gas inerte (azoto, argon o elio) ad alta velocità. Ciò che differenzia questo processo dal precedente è l'utilizzo di un gas come mezzo di raffreddamento. Grazie al minore gradiente di raffreddamento dato dalla minore capacità termica del gas (rispetto quella dell'acqua), è possibile eseguire un migliore controllo della forma e dimensione delle particelle. Anche l'aria potrebbe essere utilizzata come mezzo di atomizzazione, ma generalmente viene preferito l'impiego di un gas inerte per ridurre il rischio di ossidazione e contaminazione del metallo. È possibile atomizzare materiali come: leghe di rame, leghe di alluminio, magnesio, zinco, leghe di titanio, leghe di nickel, leghe di cobalto, metalli preziosi, ecc.

L'utilizzo di un gas inerte è preferibile quando è necessario atomizzare metalli reattivi come il titanio e il nickel per evitare l'ossidazione delle polveri. La regolazione della velocità e della densità del gas consente di produrre particelle con dimensioni nell'intervallo di 40-60 μm .

I crogioli per i sistemi ad induzione sono generalmente realizzati in materiale ceramico come la zirconia o l'allumina, i quali garantiscono elevata stabilità chimica, evitando reazioni indesiderate della materia prima. Un grande vantaggio dell'atomizzazione a gas è la possibilità di alligare differenti metalli all'interno del crogiolo e ottenere delle leghe non riproducibili con altri sistemi di produzione delle polveri.

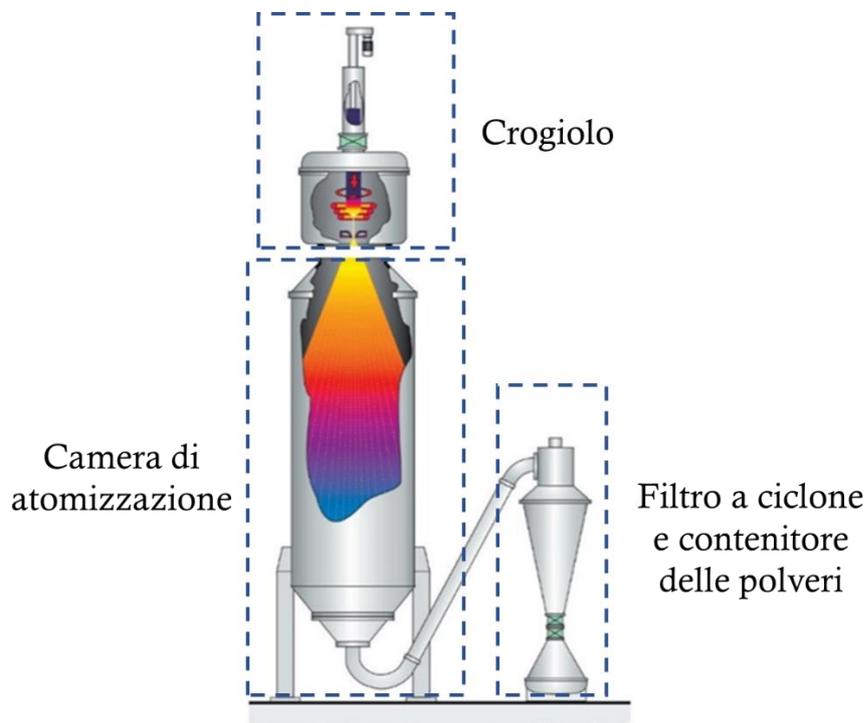


Figura 5-2 – Sistema di atomizzazione a gas (Fonte: Ald-dynatech.com)

Nei sistemi VIGA (figura 5.3a) la lega metallica viene fusa in una fornace VIM tramite un sistema ad induzione coassiale con il crogiolo. Una volta fuso, il metallo viene spinto attraverso l'ugello dalla pressione statica applicata sopra il crogiolo e dalla pressione idrostatica del metallo, in modo da formare piccole particelle metalliche. La miscela di polvere e gas viene poi trasportata all'interno di un filtro a ciclone all'interno del quale la frazione di polvere viene separata dal gas atomizzatore. La polvere metallica viene infine raccolta in contenitori sigillati collocati sotto i filtri a ciclone.

Il sistema EIGA (figura 5.3b) è utilizzato quando devono essere fusi metalli altamente reattivi o è necessario produrre leghe con elevata purezza superficiale, come nel caso di applicazioni medicali o aerospaziali. In tutti questi casi, è indispensabile evitare qualsiasi tipo di contatto tra il metallo e il crogiolo.

A causa dell'assenza fisica del crogiolo, i metalli vengono pre-alligati in barre (ottenuti tramite colata, ri-fusione o sinterizzazione) utilizzate sia come elettrodo che come materiale di apporto. Vengono gradualmente introdotte all'interno di una bobina conica a induzione, dove è presente un campo magnetico, in cui vengono fuse. Il metallo fuso fluisce

direttamente nell'ugello per essere atomizzato grazie all'elevata energia cinetica posseduta dal getto di gas inerte.

Nei sistemi PIGA (figura 5.3c) una sorgente al plasma fornisce il calore al crogiolo in rame raffreddato ad acqua. Tale raffreddamento è realizzato in modo da aumentare lo scambio termico. Il fondo del crogiolo del sistema è costituito da un ugello riscaldato induttivamente, anch'esso realizzato in rame. Il processo prevede il riscaldamento e la fusione delle particelle del materiale di apporto, seguito dall'atomizzazione e solidificazione sotto condizioni controllate. Questo sistema viene utilizzato quando è necessario migliorare le caratteristiche della polvere come scorrevolezza, densità apparente, purezza e per ridurre le porosità. Il processo di fusione può anche essere impiegato per migliorare la purezza della polvere attraverso vaporizzazione delle impurità incrementando la temperatura di fusione (8), (9), (10).

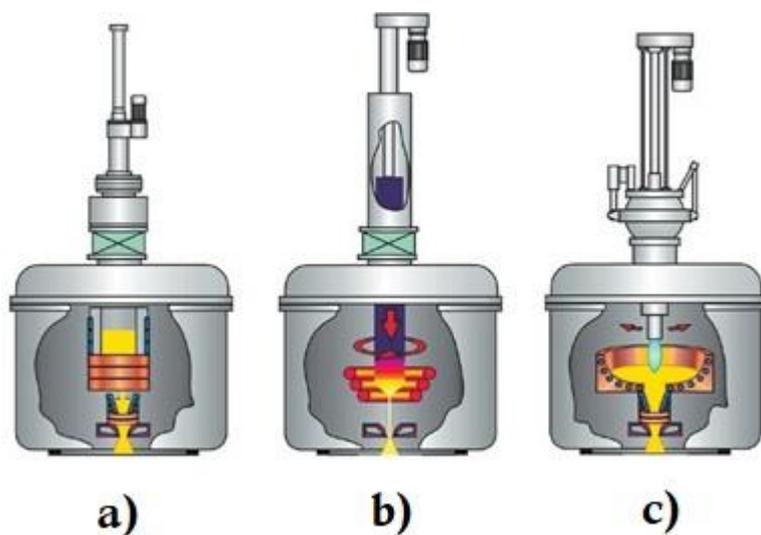


Figura 5-3 – Crogioli del sistema di atomizzazione a gas VIGA, EIGA, PIGA (Fonte: Ald-dynatech.com)

5.3 Atomizzazione al plasma

Il sistema di atomizzazione al plasma è basato sull'impiego di un gas ionizzato per l'atomizzazione di polveri con elevata forma sferica ed elevata purezza. Il materiale di apporto viene pre-alligato formando fili che alimentano la camera di atomizzazione nella quale torce al plasma, disposte coassialmente all'ugello, e getti di gas forniscono il calore e l'energia meccanica necessari a fondere e atomizzare il metallo. È possibile atomizzare numerosi metalli producendo finissime goccioline. In base alla dimensione e alla densità apparente della polvere, viene controllato il tempo di volo delle particelle in modo da fornire sufficiente tempo alle goccioline fuse per completare la solidificazione, prima di raggiungere il fondo della camera dove vengono raccolte. L'utilizzo di un gas atomizzante caldo (anziché freddo) evita un rapido raffreddamento delle particelle e la formazione di agglomerati irregolari. Poiché il metallo di apporto e il materiale fuso non entrano in contatto con superfici fredde è più semplice controllare la solidificazione delle particelle.

Ciò che si ottiene alla fine del processo è un prodotto con elevata forma sferica, elevata purezza e bassa rugosità. La produttività è particolarmente bassa a causa dell'utilizzo del filo metallico come materiale di apporto (9), (10).

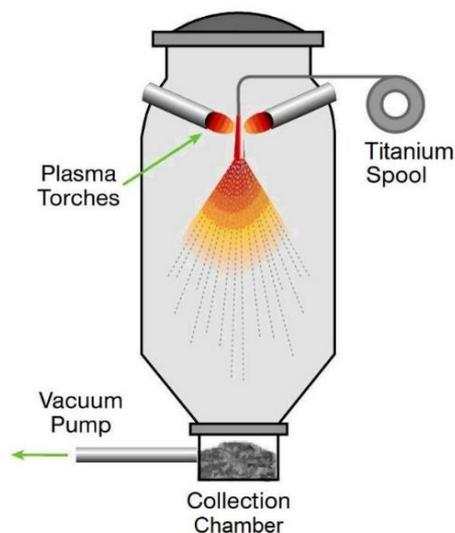


Figura 5-4 – Schematizzazione del sistema di atomizzazione al plasma (Fonte: Carpenteradditive.com)

5.4 Atomizzazione centrifuga

Il sistema di atomizzazione centrifuga utilizza la forza centrifuga per fornire l'energia meccanica necessaria per l'atomizzazione delle particelle. Esistono differenti declinazioni di questa tecnologia, le più diffuse e impiegate sono:

- Processo con elettrodo rotante (REP – *Rotating Electrode Process*);
- Processo con elettrodo rotante al plasma (PREP – *Plasma rotating Electrode Process*).

Nel sistema REP un elettrodo metallico viene posto in rotazione ad alta velocità e l'estremità libera viene fusa mediante un arco elettrico formato dall'elettrodo in metallo e un elettrodo in tungsteno. Nel sistema PREP (figura 5.5) una barra di materiale di apporto viene posta in rotazione. Appena la barra rotante entra nella camera di atomizzazione, delle torce al plasma fondono l'estremità, producendo le particelle. Il flusso di metallo fuso cade dentro un disco rotante o cono, che disperde le goccioline sotto la forza centrifuga (10).

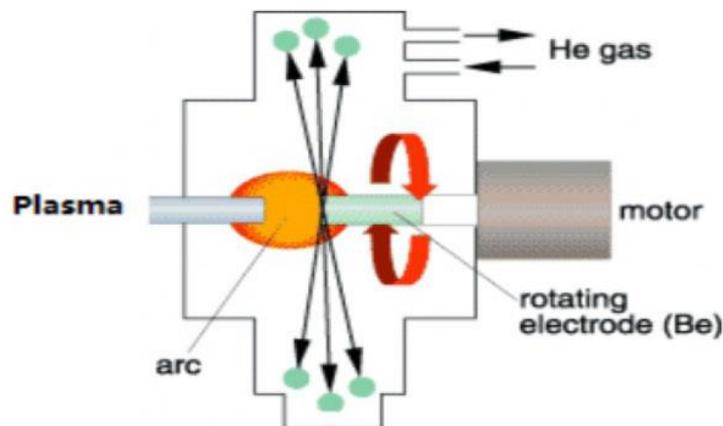


Figura 5-5 – Schematizzazione del sistema di atomizzazione centrifuga PREP (Fonte: Effeattreat.com)

5.5 Processo Armstrong

Il processo Armstrong consente di ottenere polveri metalliche ad elevata purezza con un costo contenuto. È un processo particolarmente indicato per il titanio. Il principale aspetto di questo processo è l'eliminazione della morfologia a spugna ottenuta utilizzando il processo Kroll⁴. Il processo Armstrong produce polvere da consolidare in maniera

⁴ Processo Kroll: è il più importante processo industriale per la produzione di titanio (Fonte: Wikipedia.org).

successiva e perciò il costo di produzione viene ridotto minimizzando le fasi di lavorazione. Può essere impiegato per un'ampia varietà di leghe metalliche e materiali ceramici. Alcuni dei benefici consentiti da questo processo sono l'elevata purezza, il controllo del contenuto di ossigeno, la struttura uniforme dei grani e la riduzione del costo di produzione (4).

5.6 Processo Hydride-Dehydride

Il processo Hydride-Dehydride (HDH) viene impiegato per la produzione di polveri di titanio, zirconio, vanadio e tantalio. Nel caso del titanio consiste in una reazione reversibile di idratazione ad elevate temperature (circa 650 °C) per lunghi periodi di tempo, in modo da favorire la frantumazione della fase fragile del titanio e una seguente fresatura, per ottenere una polvere fine. La polvere, una volta macinata, viene riscaldata sottovuoto a circa 350 °C per rimuovere l'idrogeno. Il risultato è una polvere dalla forma arrotondata (non sferica) che può essere utilizzata per la fabbricazione in processi tradizionali. I processi che utilizzano le polveri prodotte mediante il processo HDH sono: pressatura con sinterizzazione, iniezione a caldo in stampi e pressatura isostatica (a freddo e a caldo) (4).

Processo Produttivo	Dimensione delle particelle [µm]	Vantaggi	Svantaggi	Applicazioni
Atomizzazione ad acqua	0-500	Alto rendimento, basso costo di produzione	Morfologia particelle irregolare, difficoltà a produrre particelle tra 20-150 µm, necessità di rimuovere acqua	Metalli non reattivi
Atomizzazione a gas	0-500	Adatto per molte leghe, alto rendimento, particelle sferiche	Difficoltà a produrre polveri tra 20-150 µm	Ni, Co, Ti, Fe, Al
Atomizzazione al plasma	0-200	Particelle estremamente sferiche	Costo di produzione elevato, materiale d'apporto in filo	Ti, Ni, Zr, Mo, Nb, W, Ta

Tabella 1 – Caratteristiche dei processi di produzione delle polveri metalliche (Parte 1)

Processo Produttivo	Dimensione delle particelle [μm]	Vantaggi	Svantaggi	Applicazioni
Atomizzazione centrifuga	0-600	Produzione di particelle di varie dimensioni	Difficile realizzare particelle molto fini a bassi regimi di rotazione, bassa produttività	Ti, acciai, zinco
Processo Armstrong	0-200	Elevata purezza delle polveri, basso costo di produzione, adatto per molte leghe	Morfologia dendritica, post-processing necessario	Ti (Ti6-4) e CPTi
Processo Hydride - Dehydride	45-500	Soluzione a basso costo	Morfologia particelle irregolare, alto contenuto el. Interstiziali (H, O)	Ti6-4, limitata a metalli che formano un idruro fragile

Tabella 2 – Caratteristiche dei processi di produzione delle polveri metalliche (Parte 2)

5.7 Operazioni di post-processing sulle polveri metalliche

Le polveri metalliche ottenute con i sistemi appena analizzati non presentano una perfetta distribuzione dimensionale, né un'omogenea qualità superficiale. Una delle maggiori difficoltà legate allo sviluppo delle tecnologie per Fabbricazione Additiva è il controllo di questi processi. Per queste ragioni, il processo produttivo è generalmente seguito da ulteriori lavorazioni che consentono di ottenere un prodotto soddisfacente i requisiti prestabiliti. La qualità della polvere è determinata valutando diversi aspetti come: composizione chimica, morfologia, dimensione e distribuzione delle particelle, porosità, scorrevolezza e densità apparente. Considerando la dimensione delle particelle, è possibile classificare il loro utilizzo in funzione dei processi di FA:

Tecnologia di FA	Dimensione della Polvere
EB – PBF	Grossolana (45-100 μm)
L – DED	Fine (25-45 μm)
L – PBF	Da fine a molto fine (15-45 μm)

Tabella 3 – Dimensione media delle polveri metalliche in funzione della tecnica di FA

La formazione di agglomerati può verificarsi durante il processo di atomizzazione mentre le particelle vengono raccolte nei contenitori posti sul fondo della camera. La loro presenza nella piattaforma di costruzione (della macchina di FA) potrebbe peggiorare la distribuzione della polvere e provocare la generazione di difetti. In modo da favorire il loro distacco, è possibile ricorrere alla pallinatura a ultrasuoni, che produce la separazione degli agglomerati nei singoli costituenti. Dopo questo primo stadio di post-processamento, i lotti ottenuti con l'atomizzazione contengono particelle che presentano ancora variabilità dimensionale e rugosità superficiale. Per garantire un prodotto con proprietà omogenee, la polvere viene setacciata utilizzando un sistema a piatti forati (realizzati in acciaio inossidabile), posizionati uno sull'altro e messi in vibrazione attraverso un sistema ad ultrasuoni. La setacciatura è realizzata in un ambiente controllato per eliminare ogni rischio di contaminazione tra polveri e con gli operatori.

Su ogni piatto viene realizzata una griglia (figura 5.6), dove il numero di divisioni corrisponde alla dimensione della *mesh*. Andando dall'estremità superiore a quella inferiore del sistema, la dimensione della *mesh* del singolo piatto aumenta. Diminuisce perciò la dimensione massima delle particelle che possono passare attraverso.

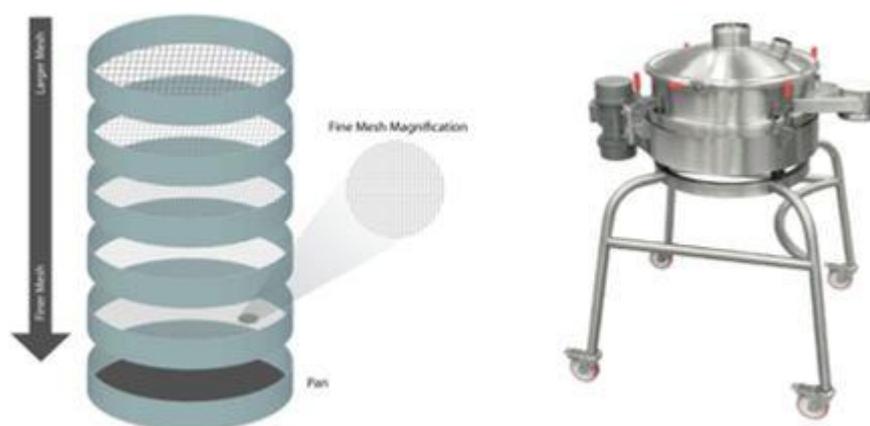


Figura 5-6 – Sistema di setacciamento delle polveri metalliche

In questo modo è possibile filtrare la polvere in base alla dimensione dei grani, ottenendo dei lotti che possono essere destinati alle rispettive tecnologie di FA.

I piatti dei sistemi di setacciamento meccanici presentano le seguenti dimensioni:

US Numero delle Mesh	Dimensione Mesh [µm]
60	250
100	150
120	125
140	105
200	75
270	53
325	45
550	25

Tabella 4 – Dimensioni della griglia dei setacci

Per assicurare una distribuzione omogenea delle particelle (in termini di dimensioni e composizione chimica) all'interno di uno specifico lotto, molti lotti di produzione possono essere miscelati utilizzando un *V-Blender a flusso incrociato* (figura 5.7). I lotti di polvere vengono inseriti all'interno di questo sistema attraverso una (o entrambe) sommità dell'elemento a V. Quando il sistema viene posto in rotazione, il materiale si divide e si ricombina continuamente in modo randomico, garantendo la miscelazione delle polveri (8).



Figura 5-7 – *V-Blender a flusso incrociato* (Fonte: Unitedpharmatek.com)

6. Principali tecnologie per la Fabbricazione Additiva metallica

Esistono numerosi casi applicativi a livello industriale delle tecnologie per Fabbricazione Additiva basati sull'utilizzo di materiali metallici. Lo sviluppo di queste tecnologie è già iniziato diverse decine di anni fa e attualmente mostra una tendenza di continua crescita. Grazie ai numerosi vantaggi posseduti come la produzione di forme innovative, la spiccata vocazione alla personalizzazione del prodotto e la capacità di poter realizzare strutture alleggerite, è stato possibile superare molti dei vincoli imposti dalle tradizionali tecniche produttive basate sulla sottrazione di materiale. Per rispondere alle necessità in termini di materiali, massimo ingombro dei componenti e tempo di realizzazione, sono state sviluppate diverse tecnologie attualmente applicate in diversi ambiti operazionali. Nel seguente capitolo verranno analizzate in profondità le soluzioni riguardanti la Fabbricazione Additiva metallica, tentando di spiegare in modo esauriente il perché della loro dirompenza rispetto alle tecniche sottrattive ed evidenziando al contempo i limiti che fino ad ora ne hanno limitato una più ampia diffusione.

Una classificazione basata sulla tipologia della materia prima divide tali tecniche in due classi:

- Applicazioni basate sulla polvere;
- Applicazioni basate su filo.

In particolare, per la prima di queste due classi è possibile suddividere ulteriormente le tecnologie esistenti in funzione delle modalità di unione delle polveri e delle dimensioni del volume di costruzione della camera (terminologia in accordo con la normativa ASTM):

- *Laser – Powder Bed Fusion* (L – PBF), anche nota come SLM o DMLS;
- *Laser – Directed Energy Deposition* (L – DED) anche nota come LMD, DLD o DMD;
- *Electron Beam – Powder Bed Fusion* (EB – PBF) anche nota come EBM;
- *Binder Jetting – Powder Bed* anche nota come *Three-Dimensional Printing* (3DP).

In riferimento alle prime tre, la sorgente di calore che fonde la polvere e permette la formazione della parte massiva è basata su laser o fascio di elettroni. La quarta variante non prevede la fusione immediata della polvere ma la compattazione per mezzo di un legante chimico.

Nella seconda categoria di tecnologie basate sull'impiego di un filo metallico rientra la tecnica:

- *Electron Beam – Directed Energy Deposition* (EB – DED) anche nota come EBAM.

Nel diagramma viene messo in evidenza quanto esposto fino ad ora:

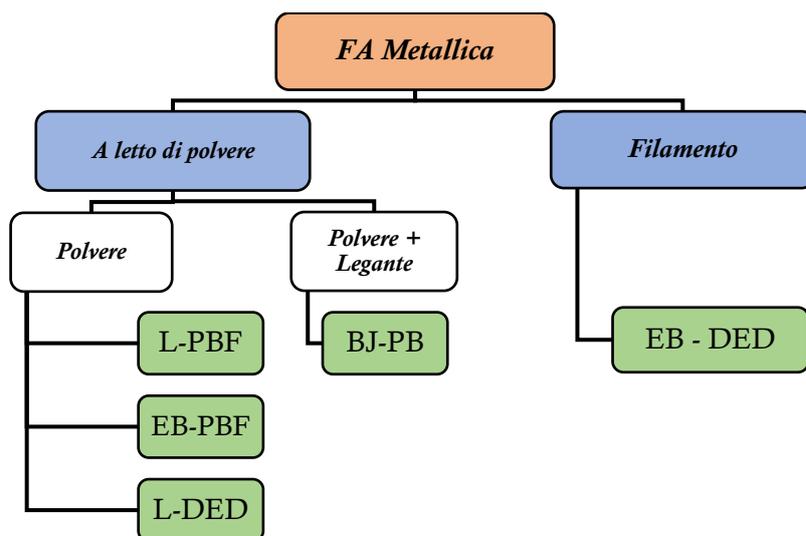


Figura 6-1 – Diagramma ad albero delle principali tecnologie per la FA metallica

Di seguito verranno analizzate nel dettaglio le tecniche introdotte in precedenza, eseguendo un focus sulla *Laser-Powder Bed Fusion* in quanto di maggiore interesse per lo svolgimento del seguente lavoro di tesi.

6.1 Laser – Powder Bed Fusion (L–PBF)

Questa tecnologia è comunemente conosciuta con la denominazione di *Selective Laser Melting* (SLM) o di *Direct Metal Laser Sintering*, a seconda delle aziende produttrici di questi sistemi. Si basa sulla fusione selettiva delle polveri, distribuite sulla piattaforma di costruzione da una lama (o da un *roller*, a sezione circolare), tramite un fascio laser.

Originariamente questo processo prendeva il nome di *Selective Laser Sintering* (SLS), poiché i sistemi laser non erano in grado di fondere completamente le polveri, a causa della potenza insufficiente. L'inconveniente legato alla scarsa maturità della tecnologia era quella di produrre parti porose. Per compensare questo limite, le particelle metalliche iniziarono ad essere ricoperte da un polimero. La *green part*, ottenuta dalla fusione del polimero,

necessitava di essere sinterizzata all'interno di una fornace, in modo da fare evaporare il polimero ed ottenere la *red part*⁵.

In seguito a primi miglioramenti apportati ai sistemi laser fu possibile utilizzare polveri composte da soli metalli costituite in parte variabile da particelle di metallo basso-fondente e particelle di metallo alto-fondente (il materiale con cui doveva essere realizzata la parte massiva). In questo caso il metallo basso-fondente sostituiva la funzione svolta dal polimero, venendo fuso dal sistema laser e consentendo l'agglomerazione delle polveri non ancora fuse. Infine, inserendo il pezzo in una fornace si realizzava la fusione del materiale alto-fondente ottenendo la parte massiva. I successivi sviluppi dei sistemi laser hanno portato al raggiungimento della tecnologia oggi conosciuta come L-PBF.

Le parti principali caratterizzanti un attuale sistema di L-PBF sono: il sistema di controllo, la piattaforma di costruzione dotata di movimento lungo l'asse Z, la lama (o il *roller*) dotata di movimento lungo il piano X-Y, la sorgente di calore (sistema laser), il sistema di specchi per direzionare il fascio laser sul piano, il contenitore di alimentazione della polvere (*powder feeder*) e il contenitore di raccolta della polvere in eccesso (*powder collector*), entrambi controllati da pistoni per la movimentazione lungo l'asse Z.

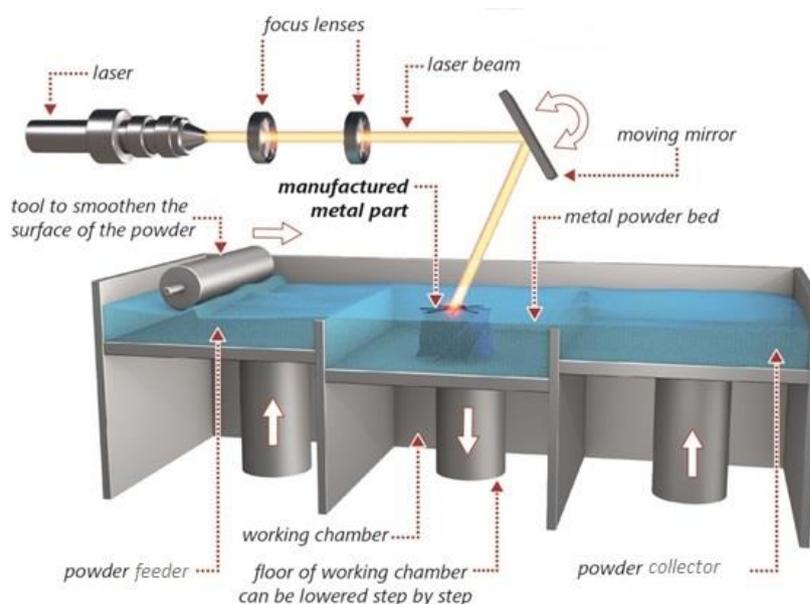


Figura 6-2 – Schematizzazione del sistema di L-PBF (Fonte: Empa.ch)

⁵ Red part: parte ottenuta dalla densificazione della green part in fornace (trattamento termico di sinterizzazione).

Il processo inizia dalla realizzazione di un modello CAD poi convertito in formato file STL. In questo modo la parte viene convertita e approssimata in triangoli. Le informazioni contenute nel modello CAD vengono tradotte in istruzioni necessarie al software della macchina (come lo *slicing* e la generazione del G-CODE), necessari per avviare la costruzione.

In principio il *powder feeder*, traslando verticalmente, rende disponibile alla lama una definita quantità di polvere, necessaria a coprire omogeneamente la piattaforma, generando così il primo *layer*. Dopo aver completato ogni deposizione, la lama compie un movimento all'indietro in modo da eliminare la polvere in eccesso che verrà raccolta nel *powder collector*. Il sistema laser esegue una scansione sulla piattaforma seguendo il percorso stabilito dal sistema di controllo, derivato dalla suddivisione della parte in strati. La profondità di penetrazione del laser è generalmente superiore allo spessore di un singolo strato di polvere e può essere pari a tre o più strati in modo da ottenere una parte completamente densa. Una volta che il laser completa il primo strato, la piattaforma di costruzione esegue un movimento lungo l'asse Z verso il basso e il processo esposto in precedenza si ripete nuovamente. La parte viene quindi costruita strato per strato finché non viene completata.

L'altezza di un singolo strato è un parametro importante ed è necessario calibrarlo attentamente. Un valore troppo basso allungherebbe eccessivamente il tempo di costruzione della parte, mentre un valore troppo grande non consentirebbe una completa fusione di tutte le particelle di polvere. Nei sistemi attuali questo valore varia tipicamente da alcune decine di micrometri fino a circa cento micrometri.

Gli attuali processi di fusione a letto di polvere impiegano laser con lunghezza d'onda ottimizzata nei confronti dell'assorbimento della polvere metallica. Vengono generalmente preferiti laser in fibra del tipo Nd-YAG, piuttosto che laser a CO₂, con potenze fino a 2 kW (generalmente 200-400 W). Grazie all'elevato gradiente di raffreddamento (fino a 10⁵ °C/s) presente e alla fusione degli strati (che avviene più volte durante il processo), la parte finale mostra proprietà meccaniche superiori rispetto a quelle ottenute con processi tradizionali. Nonostante questo, l'alto gradiente di raffreddamento e il successivo ritiro volumetrico inducono forti distorsioni che possono superare l'allungamento massimo in campo elastico. In aggiunta a questo, la deformazione plastica derivante, induce la generazione di stress residui che possono portare la parte a rottura.

Per questo insieme di ragioni, nel processo L-PBF la camera di lavoro e la piattaforma vengono riscaldate per prevenire o ridurre gli stress e le distorsioni che si genererebbero durante la costruzione. La temperatura di riscaldamento dipende dal materiale impiegato e può raggiungere valori fino a 170-200°C.

Per evitare effetti indesiderati come i processi ossidativi, l'ossigeno presente viene rimosso dalla camera. Inoltre, un gas inerte (tipicamente azoto o argon) viene insufflato per raffreddare la parte, rimuovere le particelle metalliche non fuse e ridurre la generazione di difetti. Questo tipo di accorgimenti è particolarmente utile nel caso di materiale altamente reattivi come le leghe di titanio.

I materiali attualmente disponibili per questo tipo di sistema produttivo sono: leghe di alluminio (AlSi10Mg), leghe di cobalto-cromo, acciai maraging, acciai inossidabili, leghe di titanio, leghe di nickel e metalli preziosi (2).

6.2 Vantaggi e svantaggi della L-PBF

Poiché il processo L-PBF è il più diffuso tra le tecnologie metalliche per le applicazioni industriali, molte società hanno sviluppato softwares per la simulazione della preparazione del processo di costruzione. Dopo aver convertito il modello CAD nel file STL è possibile importare la parte all'interno dei suddetti ambienti di lavoro e simulare l'orientazione che le verrà conferita sulla piattaforma o duplicare la parte per saturare la superficie disponibile. Gli errori generatisi durante la conversione in triangoli possono essere riparati tramite operazioni di modifica e riparazione. Lo studio dell'orientazione permette di valutare quale soluzione adottare in funzione delle strutture di supporto generate nelle varie configurazioni, nonché del riempimento più efficace dello spazio a disposizione.

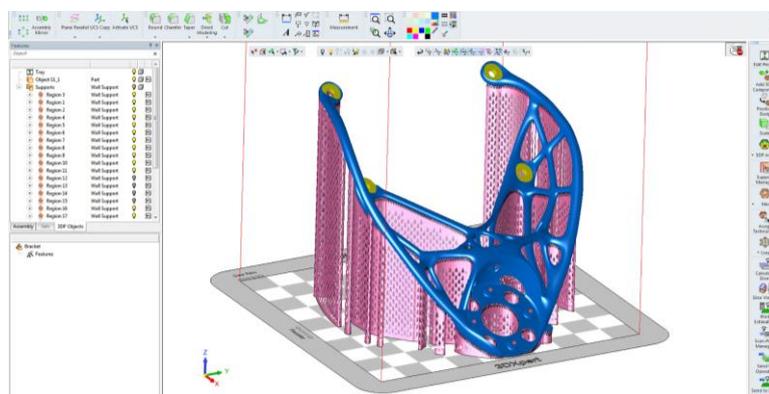


Figura 6-3 – Esempio di software per il pre-processing del processo di L-PBF

La visualizzazione delle strutture di supporto permette all'operatore di mettere in evidenza le parti più complesse e che richiedono maggiori attenzioni durante la progettazione o l'orientazione. La loro generazione basata su considerazioni geometriche, di orientazione delle superfici e di selezione del materiale può aiutare ad evitare la realizzazione di archi cedevoli o pareti orizzontali. È possibile selezionare differenti tipi di supporto in base alla specificità della superficie da sorreggere. Infine, i *softwares* più recenti permettono di simulare le distorsioni che si generano durante la costruzione della parte. I risultati ottenuti possono essere utilizzati per modificare la geometria e compensarla, per ottenere una parte priva di difetti.

Le ottiche per la scansione laser si basano su degli specchi controllati magneticamente tramite dei galvanometri. Questo metodo è impiegato perché consente rapidi movimenti del fascio senza la necessità di dover studiare attentamente la dinamica della testa laser.

Confrontando tale tecnica con la L-DED, è possibile ottenere maggiori accelerazioni e decelerazioni del fascio laser riducendo i ritardi di movimento. Infatti, il sistema laser impiegato nel sistema L-DED richiede una struttura rigida e massiva per garantire il mantenimento della accuratezza durante il movimento ad alta velocità. Perciò, i sistemi laser impiegati nella tecnologia a letto di polvere, dove solo gli specchi sono movimentati, sono sicuramente meno complicati da impostare.

L'introduzione del gas inerte per i metalli reattivi e il surriscaldamento della piattaforma hanno consentito una stabilità superiore nei processi critici, aumentando la velocità di produzione e riducendo la generazione di difetti. Il flusso di gas inerte viene anche impiegato per accelerare il raffreddamento della parte dopo aver completato la fase di costruzione.

Il più grande vantaggio del processo L-PBF, condiviso con tutte le tecniche di FA, è dato dalla libertà di progettazione e realizzazione di forme non producibili in precedenza a causa dei vincoli tecnologici presenti. Tuttavia, nonostante queste maggiori libertà, le complessità insite nel processo devono essere ridotte per sfruttare appieno il suo potenziale. I problemi principali riguardano le proprietà dei materiali, la ripetibilità del processo, la sua standardizzazione e certificazione quando utilizzato per applicazioni critiche. I processi di fusione a letto di polvere possono raggiungere densità prossime al 100% controllando parametri quali la dimensione del bagno fuso, lo spessore dello strato di polvere, la potenza laser, la velocità di scansione e l'*hatching distance*. Tuttavia, aumentare la velocità di deposizione della polvere su strati adiacenti può portare a risultati contrastanti con l'obiettivo

di raggiungere il 100% di densità, poiché conseguentemente si riduce l'intervallo di tempo necessario a riscaldare e fondere la polvere totalmente.

Quando la polvere fonde è necessario che il gradiente di solidificazione sia alto, in modo da ottenere un rapido raffreddamento e quindi la formazione di una microstruttura più fine rispetto a quelle ottenute per colata o stampaggio. Questo comporta proprietà meccaniche superiori ma minore deformazione plastica, inducendo un comportamento fragile. Inoltre, discretizzando la parte in *layers* lungo l'asse Z di costruzione, si ottiene un andamento anisotropo delle proprietà meccaniche, che risultano superiori lungo le direzioni X e Y.

Considerando l'applicazione finale del componente, possono essere richieste operazioni di *post-processing* come trattamenti termici, processi di HIP⁶ o semplice finitura per raggiungere le caratteristiche desiderate.

L'attuale diffusione in alcuni campi strategici potrebbe essere limitata dal massimo volume della camera. Sul mercato esistono soluzioni con volumi fino a 800x400x500 mm³ (*Concept Laser X Line 2000R*). Dimensioni superiori della camera richiedono un aumento della quantità di polvere e rendono il sistema più lento nel completamento di una lavorazione, a causa della maggiore superficie da ricoprire da parte del sistema laser e per la distribuzione del materiale.



Figura 6-4 – Particolari prodotti mediante L-PBF (Fonte: Renishaw.com)

⁶ HIP (*Hot Isostatic Pressure*): Pressatura isostatica a caldo. Processo di produzione utilizzato per ridurre la porosità dei metalli e migliorare le proprietà meccaniche e la lavorabilità del materiale.

Esistono sistemi che gestiscono il recupero e riciclo della polvere non fusa per aumentare l'efficienza di utilizzo della polvere, sebbene la quantità riutilizzabile vari tra il 20% e il 70% del totale disponibile.

Un altro problema legato al volume della camera è il peso della polvere. La capacità del contenitore della polvere deve essere in grado di contenere la quantità necessaria a riempire l'intero volume di costruzione. Ancor più, una grande quantità di polvere depositata non viene fusa. È richiesta un'attenta progettazione nella realizzazione della piattaforma e dei componenti che devono sopportare le sollecitazioni presenti e allo stesso tempo essere in grado di compiere spostamenti precisi. A titolo di esempio, prendendo in considerazione il volume della camera del modello citato in precedenza, supponendo di realizzare la parte in acciaio ($\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$), è necessario che il *powder feeder* e la piattaforma siano in grado di contenere e sopportare una massa pari a 1280 kg e assicurare spostamenti dell'ordine di grandezza di uno strato (50-100 μm).

Il monitoraggio del processo è implementato controllando i parametri macchina e ricercando la generazione di difetti mediante sensori e telecamere. La potenza del laser, l'aspetto del bagno-fuso, il livello di ossigeno e la portata del gas inerte vengono monitorati per valutarne la qualità. Nel caso in cui uno di questi valori non rientri all'interno di intervalli stabiliti, il processo di costruzione viene interrotto per ridurre lo spreco di materiale. Al momento non esistono soluzioni in grado di far variare i parametri di processo secondo un approccio *in-line*, anche se alcune soluzioni sono attualmente sotto studio. I sistemi a letto di polvere sono in grado di operare con un solo materiale per volta. Rispetto ad altre tecniche esistenti, non è possibile fondere due o più materiali alla volta, in modo da produrre oggetti i cui costituenti sono realizzati considerando la loro specificità e quindi utilizzando materiali più performanti dove necessario.

Quando si richiede un cambio del materiale di alimentazione, deve essere effettuata una profonda pulizia della camera di lavoro per evitare possibili contaminazioni tra polveri che potrebbero modificare le proprietà chimiche e la purezza della lega.

La manipolazione delle polveri deve essere fatta rispettando severe misure di sicurezza. Una gestione impropria può essere pericolosa per la salute dell'operatore e può portare a fenomeni di contaminazione tra leghe, rendendole di fatto inutilizzabili.

L'accuratezza dimensionale del processo si basa su differenti parametri come la potenza del laser, la dimensione del fascio laser, l'*hatching distance*, la velocità di scansione, il tempo di esposizione e l'orientazione della parte. Più è alta la potenza del laser e maggiore è la penetrazione all'interno degli strati, aumentandone la coesione. Tuttavia, una potenza del laser eccessiva rende complicato il controllo del ritiro volumetrico durante la fusione e può condurre ad evaporazione parziale degli elementi basso-fondenti. Aumentare lo *spot* del fascio laser consente di aumentare la velocità di costruzione ma riduce l'accuratezza. La produzione può essere accelerata utilizzando una polvere più grossolana, come quella impiegata in EB-PBF, ma la rugosità finale è ovviamente penalizzata. D'altro canto, utilizzare polveri troppo fini può indurre fenomeni di piroforicità, causando esplosioni all'interno e all'esterno della camera.

L'*hatching distance* deve essere correttamente impostata perché riducendola decresce la porosità, ma un aumento dell'*overlapping*⁷ produce *melt pools* troppo vicini tra loro. Agendo sulla velocità di scansione variano il tempo di completamento della parte e il tempo di esposizione. Riducendo troppo il tempo di esposizione, la polvere potrebbe non avere tempo a sufficienza per fondere completamente, riducendo la densità apparente⁸ (2).

6.3 Laser – Directed Energy Deposition (L-DED)

La tecnica di L-DED presenta alcuni aspetti condivisi dalla tecnica di L-PBF come la presenza di polvere metallica come materiale di alimentazione del processo e del sistema laser come sorgente di calore per la fusione. Al tempo stesso possiede differenze radicali sia nella struttura della macchina che nelle modalità di deposizione del materiale che ne declinano l'utilizzo verso applicazioni molto differenti.

La principale differenza risiede nell'assenza del letto di polvere che invece viene depositata sulla piattaforma di lavoro mediante un ugello. La testa laser (integrata con quella di deposizione) di questo sistema è molto più articolata rispetto alla tecnologia analizzata in precedenza, risultando più rigida e massiva. L'ugello, parte terminale della testa di

⁷ Overlapping: sovrapposizione di due single scan ('passate') consecutivi.

⁸ Densità apparente: prende in considerazione il volume totale occupato dal solido compresi quindi gli spazi vuoti (cavità chiuse e cavità aperte). Viene impiegata per materiali granulari come sabbie o polveri metalliche (Fonte:Wikipedia.org).

deposizione, presenta al centro il sistema laser per la fusione della polvere che viene depositata tramite dei condotti disposti coassialmente rispetto l'asse centrale (figura 6.5).

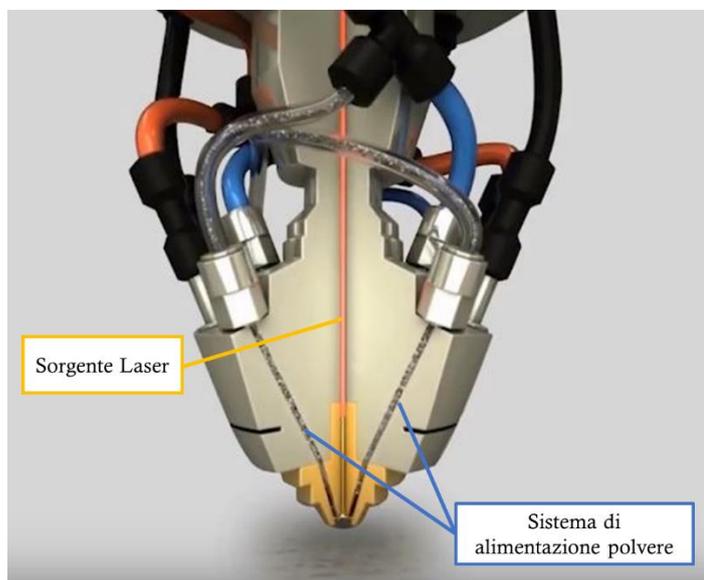


Figura 6-5 – Sezione della testa di deposizione del sistema L-DED (Fonte: BeAM Machines)

Confrontando la struttura della macchina di L-PBF basata sull'utilizzo di una piattaforma fissa confinata all'interno di una camera di lavoro sigillata, la macchina di L-DED presenta più similarità con i sistemi industriali di saldatura laser. Per tale motivo, esistono soluzioni che integrano tale tecnologia all'interno di un sistema CNC a 5 assi. Il software di gestione del processo risulta più complesso non dovendo limitarsi alla pianificazione dei percorsi di deposizione nel piano X-Y, ma realizzando traiettorie nello spazio. Il sistema di L-DED può depositare il materiale su superfici complesse ponendo simultaneamente in movimento sia la testa di deposizione che la piattaforma sulla quale è realizzata la parte. Alcune applicazioni prevedono la possibilità di depositare strati planari come se si trattasse di un sistema a 2 assi e mezzo (come per la L-PBF). A differenza della L-PBF non vengono realizzate strutture di supporto poiché il volume di lavoro è generalmente più grande e conseguentemente le parti prodotte. Si genererebbe un elevato volume di materiale di scarto. La mancanza di strutture di supporto limita la formazione di pezzi particolarmente complessi e che prevedono sottosquadri.

Infatti, la dimensione della camera di lavoro può superare 1 m³ di volume (900x1500x900 mm³, modello *LENS 850 R* di *Optomec*) permettendo la costruzione di pezzi di grandi dimensioni.

Per quanto fatto emergere fino ad ora, sono possibili differenti configurazioni del sistema che conferiscono una discreta flessibilità al processo. Attualmente in commercio vengono proposte le seguenti varianti:

- Sistema a 5 assi con sola testa di deposizione movimentabile lungo Z e tavola rotante;
- Sistema a 5 assi con sola testa di deposizione e piattaforma orientabili nello spazio;
- Sistema a 5 assi ibrido dotato di testa di deposizione e testa di sottrazione (tradizionale sistema CNC), previsto delle due configurazioni di movimento precedenti.

Attualmente sono in studio alcune soluzioni (di cui il CRF è partecipe) volte a realizzare un sistema di deposizione integrato al sistema di asportazione di truciolo, in modo tale da rendere la testa di deposizione un semplice utensile intercambiabile, alla pari degli utensili presenti in un classico sistema CNC.

La polvere metallica impiegata nella L-DED ha dimensioni superiori rispetto a quella impiegata nei sistemi a letto di polvere (tabella 3, cap. 5) e viene trasportata sulla piattaforma di deposizione mediante un flusso di gas inerte (azoto o argon), aggiunto e miscelato con essa in un punto a monte dell'ugello.

La presenza di un sistema continuo di alimentazione della polvere, in aggiunta al sistema laser (con potenze variabili tra 500 W e 4 kW), complica ulteriormente il processo, dovendo valutare molti più parametri variabili nel tempo come: il punto focale di iniezione della polvere, l'angolo di convergenza del flusso di polvere, la portata di polvere, la portata di gas, il diametro dell'ugello, l'angolo di *tilting*⁹, la velocità e il movimento relativo della testa e della piattaforma.

⁹ Tilting: inclinazione dell'utensile rispetto ad un asse perpendicolare l'utensile.

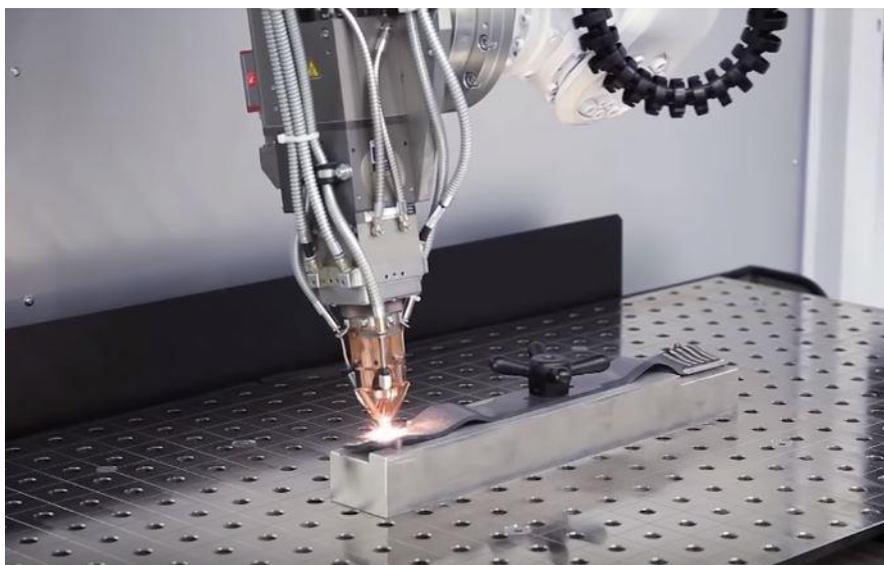


Figura 6-6 – Sistema di L-DED (Fonte: Trumpf.com)

Nel *Cladding* di parti semplici in cui sono richiesti movimenti lineari o rotazionali ed è possibile utilizzare grandi *spot* del laser, alte velocità di scansione e deposizione si ottengono grandi ratei di deposizione, superiori a quelli ottenibili con L-PBF. La posizione focale può essere corretta per migliorare la penetrazione e l'unione all'interfaccia tra il materiale di base e di apporto.

Nella macchina di L-DED possono essere installati più *powder feeder* in contrapposizione a quello singolo presente nella macchina di L-PBF. Questa peculiarità consente di utilizzare più materiali all'interno di uno stesso processo produttivo, selezionando quello più conveniente in funzione dell'esigenza corrente.

La semplicità di smontaggio della testa per la pulizia e la manutenzione riducono il rischio di contaminazione delle polveri. I materiali processabili sono essenzialmente gli stessi della tecnica L-PBF (ad eccezione dei metalli preziosi), ovvero: lega di alluminio, leghe di cobalto-cromo, acciai inossidabili, acciai per stampi, leghe di titanio e leghe di nickel (2).

6.4 Vantaggi e svantaggi della L-DED

La possibilità di impiegare più materiali consente una variazione della composizione durante il processo di deposizione, facilitando un rafforzamento selettivo del componente.

La deposizione dalla relativa testa, anziché la presenza del letto di polvere, favorisce l'apporto di materiale su una parte già esistente. Una delle principali applicazioni di questa tecnica è la riparazione di pezzi meccanici usurati (o danneggiati) o la realizzazione di un sottile rivestimento con particolari caratteristiche chimiche e meccaniche, come nel caso della realizzazione degli utensili da taglio. La dimensione maggiore della camera di lavoro riduce i limiti imposti dalle tecniche a letto di polvere, sebbene la deposizione debba rimanere confinata all'interno dell'atmosfera protettiva, assicurando elevata purezza e contenendo i rischi legati alla dispersione della polvere. L'atmosfera può essere controllata mantenendo il livello di ossigeno e umidità al di sotto di dieci ppm (parti per milione) tramite un sistema di purificazione del gas.

La capacità di disattivare l'alimentazione della polvere durante la fase di costruzione offre l'opportunità di usare meno polvere vergine e di forare o rifinire buchi e canali regolando la potenza, l'orientazione e la messa a fuoco del laser. Poiché la parte realizzata non è immersa in un letto di polvere, si possono eseguire misurazioni sulle parti di interesse anche durante la fase di costruzione, utilizzando sistemi a contatto o senza contatto. Ciò permette di modificare la costruzione della parte se si riscontrano divergenze con il modello di partenza. Il controllo di posizione del sistema CNC consente più gradi di libertà nella pianificazione e controllo del percorso di deposizione. Le distorsioni generate durante la deposizione possono essere compensate realizzando un'immagine speculare della parte depositata. La compensazione degli errori è in questo caso possibile sia nel piano di deposizione che lungo l'asse Z di costruzione.

I software di progettazione parametrica impiegati nei sistemi CNC possono essere adattati alla progettazione per FA, ampliando la lista di parametri inseribili, senza la necessità di creare dei *tools* ad-hoc.

I sistemi ibridi che incorporano la testa di deposizione e gli utensili per asportazione di truciolo (per fresatura o tornitura), permettono di ridurre il tempo richiesto per il completamento della parte e quello necessario all'attrezzaggio della macchina, aumentando la produttività.

Tale tecnica risulta di complessa gestione per l'elevato numero di gradi di libertà e del numero dei parametri di controllo. Il movimento del sistema laser per strati planari (presente nella L-PBF) è intrinsecamente meno complesso rispetto a un movimento simultaneo su 5 assi, sebbene lo spargimento della polvere e la sua alimentazione siano comunque due aspetti critici. I sistemi ibridi che incorporano torrette porta-utensili, sistemi di alimentazione delle polveri e parti robotizzate risultano significativamente più complesse. La pianificazione dei percorsi per realizzare parti complesse rende sicuramente più svantaggioso l'impiego della L-DED rispetto alla L-PBF e potrebbe essere un motivo per cui industrialmente risulti più diffusa quest'ultima.

La morfologia della polvere impiegata nel sistema L-DED richiede caratteristiche meno stringenti rispetto a quella impiegata nei sistemi a letto di polvere ma le proprietà di purezza e scorrevolezza sono ugualmente importanti. I problemi associati al recupero della polvere sono simili a quelli riscontrati in precedenza, seppure l'utilizzo di camere di lavoro con grandi volumi di produzione renda inevitabilmente più complesse le fasi di riciclo e pulizia. La movimentazione di componenti massivi come la piattaforma di lavoro o la testa di deposizione richiede sistemi di controllo più grandi e più rigidi, limitando la velocità massima e le accelerazioni e decelerazioni raggiungibili.

Problemi associati all'impiego della L-DED sono l'ambiente di lavoro, la sicurezza e la salute dell'operatore, specialmente nelle zone dove l'accesso è permesso. I rischi legati alle polveri e ai laser, il gas inerte e il movimento delle parti meccaniche richiedono un'intensa ingegnerizzazione e gestione dei controlli per operare in massima sicurezza.

L'accumulo di calore nella parte e nell'ambiente di costruzione potrebbe essere problematico, in quanto il tempo totale di costruzione può raggiungere diverse ore e potrebbe complicare lo smaltimento. Il surriscaldamento dei sistemi può portare a effetti indesiderati come crescita del grano, segregazione delle impurità metalliche, formazione di fasi indesiderate, generazione di difetti e distorsioni della parte (2).

6.5 Electron Beam – Powder Bed Fusion (EB – PBF)

I processi a fascio di elettroni si distinguono dai processi laser per la maggiore densità di energia, l'elevata potenza del fascio e la realizzazione del vuoto all'interno della camera, limitando la presenza dell'ossigeno ad alcune parti per miliardo. Nonostante queste differenze, il processo di EB-PBF condivide anche molti aspetti presenti nel processo di L-PBF come la generazione del file CAD (convertito successivamente in formato STL) e la deposizione dello strato di polvere metallica sulla piattaforma di costruzione. Il processo di generazione di una parte è essenzialmente lo stesso: la lama deposita lo strato di polvere, la sorgente di calore permette la sua fusione ed infine il sistema esegue la movimentazione lungo Z decrescenti della piattaforma. Il componente viene realizzato strato per strato fino al suo completamento.

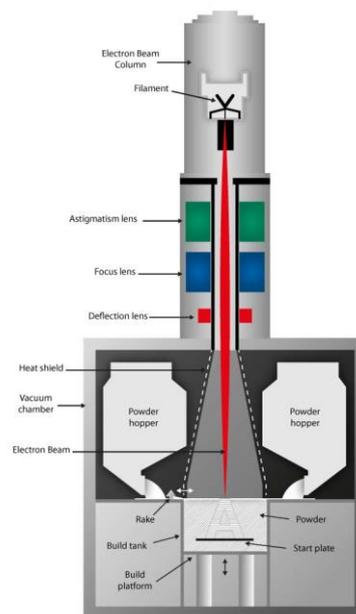


Figura 6-7 – Schematizzazione del sistema di EB-PBF (Fonte: Arcam.com)

La sorgente di calore viene fornita da un cannone elettromagnetico che genera il fascio di elettroni, anziché da un laser. La presenza di questo componente complica notevolmente l'architettura del sistema, poiché richiede maggiori accortezze tecnologiche per poter ottenere una fusione controllata del letto di polvere.

La generazione del fascio di elettroni è tipicamente molto più efficiente della generazione del fascio laser. Un filamento in tungsteno viene riscaldato a temperature superiori a 2500 °C e

permette l'emissione di elettroni tramite l'applicazione di una differenza di potenziale pari a 60 kV. Questo consente di convertire gran parte dell'energia elettrica nel fascio elettronico (con potenza del fascio superiore a 1 kW) che viene poi accelerato dalla differenza di potenziale stessa. Un sistema di lenti elettromagnetiche, costituito da bobine, focalizza o defocalizza il fascio elettronico sulla piattaforma di costruzione. La prima lente permette la focalizzazione del fascio al diametro desiderato, mentre la seconda lo devia sulla piattaforma di costruzione nel punto selezionato dal sistema di controllo. Il cannone elettronico è in questo caso fisso e non sono quindi presenti parti meccaniche in movimento (5).

Le polveri metalliche utilizzate in questo processo vengono preriscaldate a temperature maggiori (~ 700 °C) rispetto alla L-PBF. Il preriscaldamento varia in base al materiale impiegato, ad esempio è pari a 300 °C per l'alluminio ed arriva a 1100 °C per l'alluminuro di titanio.

La maggiore energia del fascio elettronico scalda la polvere ad una temperatura superiore rispetto al sistema laser. Affinché essa sia mantenuta uniforme durante tutta la costruzione, il fascio elettronico riscalda la piattaforma prima di depositare il letto di polvere. Defocalizzando il fascio elettronico ed eseguendo una scansione molto rapida lungo tutta la superficie dello strato di polvere, il letto viene preriscaldato rapidamente ed uniformemente. Mantenendo la polvere a temperature superiori, la microstruttura differisce molto da quella del processo di L-PBF, somigliando più a quella ottenuta con un processo di colata, sebbene la parte finale presenti minori porosità.

Una seconda funzione del preriscaldamento è la minimizzazione degli stress residui e delle distorsioni che si generano durante il raffreddamento degli strati. Tuttavia, il raffreddamento della camera di lavoro può richiedere decine di ore. Infine, consente un migliore compattamento delle particelle che subiscono una leggera sinterizzazione. Di conseguenza, la necessità di realizzare strutture di supporto per sorreggere le parti non-autoportanti viene meno.

Poiché gli elettroni sono delle particelle dotate di carica negativa e di massa, all'interno della camera viene realizzato il vuoto (con pressione pari a 5×10^{-5} mbar) in modo da evitare che le molecole d'aria deflettano il fascio. Per evitare fenomeni ossidativi, ridurre la carica elettrostatica delle polveri, garantire la purezza della polvere e poter raffreddare la parte al termine della realizzazione, viene insufflato elio con pressione relativa pari a 4×10^{-3} mbar.

La fusione della polvere avviene per mezzo dell'impatto con il fascio di elettroni dotato di elevata energia cinetica. Durante la collisione con il letto di polvere metallica, tale energia viene convertita in calore, permettendo quindi la fusione.

L'unico produttore mondiale di questi sistemi è l'azienda svedese *Arcam*, recentemente acquisita da *GE*. Il volume di costruzione massimo di questi sistemi è pari a $\varnothing 250 \text{ mm} * 430 \text{ mm}$ (modello *Spectra H*).

I materiali processabili sono i seguenti: leghe di titanio, leghe di nickel, leghe di cromo-cobalto e alluminuro di titanio (Ti-Al) (2).

6.6 Vantaggi e svantaggi dell'EB-PBF

Il preriscaldamento della camera consente alcuni effetti positivi sulle polveri impiegate. Riducendo il gradiente di raffreddamento si ottengono microstrutture con grani più grossi rispetto ad un componente prodotto mediante L-PBF e ciò consente una riduzione del comportamento fragile. La riduzione degli stress e delle distorsioni generati sul pezzo, consente una semplificazione delle operazioni di post-processing sulla parte realizzata.

La necessità di impiegare minori strutture di supporto, in seguito alla superiore funzione auto-supportante delle polveri, favorisce il *nesting*¹⁰. Saturando il volume della camera di lavoro aumenta quindi la produttività del processo. L'impiego di particelle di diametro maggiore (tabella 3, cap.5) consente una deposizione superiore delle polveri, a vantaggio della produttività.

Le principali differenze con il processo di L-PBF derivano dalla natura stessa del fascio energetico, che in questo caso è elettronico anziché fotonico. A causa della massa di cui sono dotati gli elettroni, avviene una repulsione con le polveri, in base al principio di azione e reazione. Ad accentuare questo fenomeno repulsivo contribuisce la natura elettrostatica delle particelle: sia i grani di polvere che gli elettroni sono caricati negativamente ed entrando in contatto generano una forza di Coulomb. Il risultato finale di questi due effetti combinati causa un'improvvisa diffusione delle polveri, che viene descritto come l'esplosione del letto di polvere.

¹⁰ Nesting: disposizione di più parti all'interno del volume di costruzione con il fine di favorirne la saturazione.

Questa condizione è indesiderata sia perché viene modificata la distribuzione delle polveri sulla piattaforma, generando zone con minore densità di impaccettamento, sia perché le polveri volatilizzate vengono trasportate al di fuori della camera di lavoro tramite il flusso di elio. Per ridurre i fenomeni diffusivi, vengono adottate differenti soluzioni.



Figura 6-8 – Ugello prodotto con sistema Arcam EB-PBF (Fonte: Arcam.com)

Il preriscaldamento della camera di lavoro consente una discreta compattazione delle polveri, assimilabile ad una sinterizzazione. Ciò consente di ridurre il fenomeno diffusivo. La seconda soluzione adottata consiste nell'impiegare particelle con diametro maggiore rispetto a quelle utilizzate nel processo di L-PBF. In tal modo è possibile far prevalere le forze di coesione rispetto quelle elettrostatiche e ridurre la conseguente repulsione.

Particelle più grossolane comportano al tempo stesso una riduzione della precisione ottenibile ed un aumento della rugosità superficiale. Nelle zone di accoppiamento è quindi necessario prevedere un sovrametallo superiore, generalmente assunto nell'intervallo di 1-2 mm.

I materiali impiegati per EB-PBF devono essere conduttivi a causa della presenza di elettroni. Dunque, solamente materiali metallici possono essere processati, mentre nel caso di L-PBF l'impiego di fotoni non limita la sua applicazione a materiali polimerici o ceramici (2).

6.7 Binder Jetting – Powder Bed

La tecnologia di *Binder Jetting*, originariamente conosciuta come *Three-Dimensional Printing*, fu inventata dal MIT per poi essere commercializzata da diverse società.

I processi di *Binder Jetting* prevedono la formazione di un letto di polvere metallica, come in alcuni processi visti precedentemente, e lo spargimento di un legante mediante una testa di deposizione. Generalmente il legante si trova in forma liquida e viene distribuito in fini goccioline del diametro di 80 μm . I leganti utilizzati nelle applicazioni per metallo sono polimerici. Una volta che il legante è entrato in contatto con la polvere nei punti stabiliti dal *software*, la piattaforma di lavoro si abbassa e un nuovo strato di polvere viene depositato. Questo processo viene eseguito in ripetizione finché la parte viene completata.

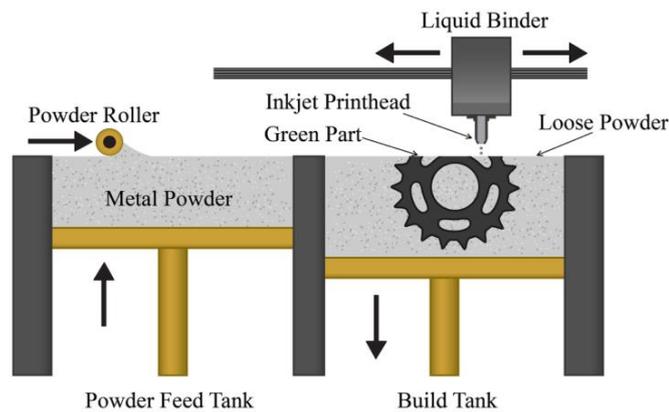


Figura 6-9 – Schematizzazione del sistema di Binder Jetting (Fonte: 3deo.co)

La testa di deposizione del legante è costituita da numerosi ugelli e la complessità del sistema può essere modificata agendo sul numero presente. Ad una distribuzione più fitta corrisponde una maggiore complessità di controllo della deposizione. Data la maggiore semplicità del sistema rispetto alle tecniche precedenti, è possibile raggiungere alte velocità di deposizione ad un costo contenuto, grazie alla mancanza di una sofisticata sorgente energetica (11). Questo permette di aumentare la produttività in quanto non è presente la fase di raffreddamento al termine della costruzione del pezzo.

Tuttavia, una volta terminata la costruzione della parte, viene lasciata all'interno del letto di polvere in modo da fare agire completamente il legante e conferire maggior resistenza. Le operazioni durante il *post-processing* riguardano: la rimozione della parte realizzata dal letto di polvere, la rimozione della polvere che non si è legata (con sistemi ad aria pressurizzata),

un'infiltrazione con metalli basso-fondenti per renderla più resistente e migliorare altre proprietà meccaniche. Il processo di *Binder Jetting* condivide gli stessi vantaggi delle tecnologie a letto di polvere. Tuttavia, le parti sono auto-supportanti (vista l'assenza del processo fusorio) e non è richiesta la generazione di strutture di supporto. In comune con altre tecnologie, possono essere impilate più parti per aumentare il numero di oggetti realizzabili in un unico *job*. Infine, assieme e giunti cinematici possono essere fabbricati più semplicemente, in quanto la polvere a perdere può essere rimossa con facilità. Le applicazioni riguardanti le polveri metalliche riguardano la produzione di prototipi funzionali o di prodotti finiti, a condizione che le parti siano specificatamente progettate. Per ottenere la *red part*, la *green part* viene rimossa dalla macchina e sottoposta a cicli di riscaldamento in forno. Il primo ciclo a bassa temperatura dura diverse ore per rimuovere il legante polimerico. Il secondo ad alta temperatura permette una leggera sinterizzazione delle particelle metalliche, in modo da conferire alla parte una certa resistenza. Se questo ciclo diventa troppo lungo si porta la parte a completa fusione, causando una perdita di accuratezza dimensionale e di forma. Dopo questo ciclo intermedio la densità del componente è circa pari al 60%. Il ciclo finale prevede l'infiltrazione con un lingotto di bronzo che viene posto all'interno del forno in contatto con la parte da densificare, in modo che si infiltri all'interno dei pori, permettendo una densificazione pari al 90-95%. I materiali metallici processabili con questa tecnologia sono: acciai inossidabili infiltrati con bronzo, leghe di nickel e tungsteno infiltrato con bronzo (2).

6.8 Electron Beam – Directed Energy Deposition

Il sistema di EB-DED integra all'interno di un grande ambiente di lavoro (in cui viene realizzato il vuoto), un cannone elettronico, un sistema CNC e l'alimentazione del materiale metallico tramite filo. I pezzi realizzati con questa tecnologia presentano una bassa precisione e generalmente è possibile distinguere a vista le passate effettuate per la fusione del materiale d'apporto, tuttavia consentendo elevati ratei di deposizione.

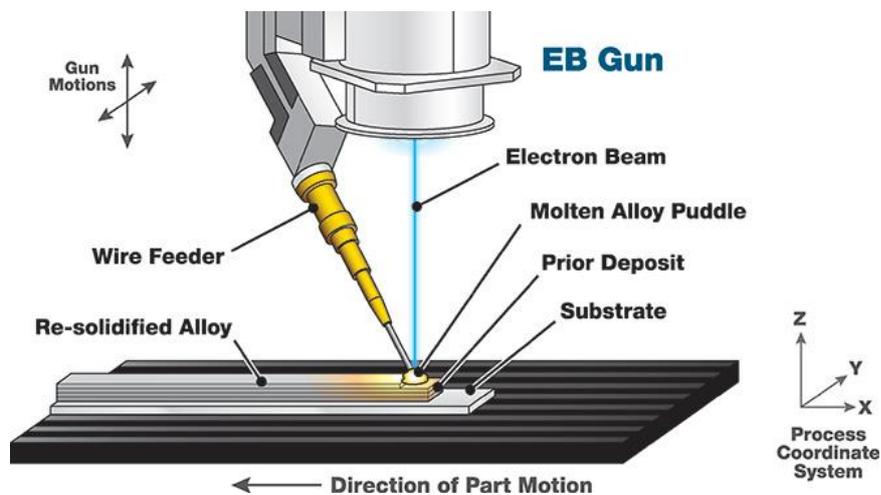


Figura 6-10 – Schematizzazione della testa di deposizione del processo di EB-DED (Fonte: Sciacky.com)

Per questo motivo, sono sempre necessarie lavorazioni di finitura alle macchine utensili. I materiali disponibili sono limitati dalla diffusione di fornitori di materiali metallici in filo.

Un grande svantaggio della tecnologia, in comune con il processo di EB-PBF, riguarda il lento gradiente di raffreddamento della parte realizzata all'interno della camera sottovuoto e i potenziali effetti sulla crescita di una microstruttura a grani grandi. Poiché è possibile realizzare componenti di grandi dimensioni, si possono generare grandi distorsioni e stress residui che richiedono al termine l'applicazione di trattamenti termici.

La tecnologia è particolarmente interessante poiché possono essere processati materiali costosi, reattivi o ad alto punto di fusione, grazie all'elevata potenza del fascio elettronico e all'elevata purezza raggiungibile con la creazione del vuoto. Numerose parti e dimostratori sono stati realizzati in titanio, alluminio, tantalio e nickel.

Questa tecnologia permette di combinare due sistemi di alimentazione a filo (controllabili separatamente) e quindi la creazione di una deposizione stratificata multi-materiale. Possono

essere raggiunti ratei di deposizione fino a 6,8-18 kg/h. Alcuni dei vantaggi presenti nella L-DED e legati alla presenza del sistema CNC sono anche in questo caso condivisibili. Il produttore di questi sistemi (l'azienda statunitense *Sciaky*) dichiara volumi di costruzione fino a 5.79 m x 1.22 m x 1.22 m (12).



Figura 6-11 – Processo di EB-DED (Fonte: Sciaky.com)

Gli svantaggi di questa tecnologia sono legati alla difficoltà di controllo del *melt-pool* come nei tradizionali processi di saldatura, che limitano la sua applicazione a percorsi di deposizione planari. Questo potrebbe influire sulla risoluzione di piccoli dettagli, limitando la creazione di pareti sottili o la realizzazione di sottosquadri. Il sistema di alimentazione a filo richiede l'installazione di bobine di grandi dimensioni per la realizzazione di parti estese, con l'aggiunta della complessità legata al meccanismo di alimentazione del filo. Variazioni nell'avvolgimento del filo e del diametro possono influire sull'accuratezza dell'alimentazione stessa. La tipica microstruttura ottenuta risulta avere grani di grandi dimensioni a causa dell'elevata energia ceduta dalla sorgente di calore e dei bassi gradienti di raffreddamento (2).

7. Materiali per la Fabbricazione Additiva

In questo capitolo verrà eseguita un'analisi sulle più importanti leghe metalliche sviluppate per le tecnologie additive. Ne verranno presentate le caratteristiche e le proprietà meccaniche che, per certi aspetti, le rendono innovative rispetto a quelle tradizionali. Visto il recente sviluppo di queste tecnologie, risalenti a solo qualche decennio fa, la scelta del materiale è uno dei problemi più ricorrenti. A causa della limitata disponibilità, non è sempre possibile trovare la stessa famiglia di leghe impiegate nei processi sottrattivi, poiché molte di esse non sono ancora state sviluppate.

Le tipologie fornite dai principali produttori di polveri e sistemi sono:

- Leghe di alluminio;
- Leghe di ferro;
- Leghe di nickel;
- Leghe di titanio;
- Leghe di titanio-alluminio (alluminuro di titanio);
- Leghe di cromo-cobalto;
- Metalli preziosi.

7.1 Leghe di alluminio

Le polveri maggiormente impiegate nei processi di Fabbricazione Additiva sono senz'altro le leghe di alluminio. L'alluminio è un materiale stabile ma che in alcuni casi può presentare problematiche come la piroforicità. Le polveri prodotte per la FA presentano infatti un rapporto superficie-volume elevato. Per tale ragione sono in grado di assorbire un grande quantitativo di calore e a causa della massa contenuta, riuscire a diffonderlo molto rapidamente. Questa proprietà le rende particolarmente reattive e sensibili al calore, favorendo fenomeni di combustione ed esplosione. Per questi motivi durante il loro stoccaggio si cerca di evitare il contatto con l'acqua, in quanto si instaurerebbero fenomeni ossidativi legati alla presenza dell'ossigeno che produrrebbero reazioni esotermiche. Infine, la presenza dell'idrogeno liberato potrebbe causare esplosioni.

L'impiego di alluminio puro in questi ambiti è piuttosto raro. Ad esso vengono spesso preferite leghe realizzate con l'aggiunta di elementi che consentono di migliorarne le proprietà meccaniche e anticorrosive. Le proprietà che si cerca di migliorare sono: resistenza

a snervamento, resistenza a rottura, tenacità a frattura e lavorabilità. I principali elementi di lega sono:

- Rame. Consente un aumento della tensione di rottura e della durezza grazie a indurimento per soluzione solida. Si possono effettuare dei trattamenti termici per avere un indurimento del materiale per precipitazione, abbattendo però le proprietà conduttive e anticorrosive. La distorsione del reticolo prodotta dall'indurimento per soluzione solida comporta una diminuzione della deformazione plastica e un aumento della rigidità.
- Magnesio. Questo elemento forma con l'alluminio una lega per soluzione solida interstiziale che tuttavia non comporta una diminuzione di duttilità marcata. Il magnesio è fondamentale per l'applicazione dei trattamenti termici e, se combinato con lo zinco, può portare a rafforzamento per precipitazione.
- Silicio. È un elemento fondamentale per le leghe da colata poiché aumenta la fluidità del materiale e riduce il coefficiente di dilatazione termica in fase di solidificazione. Durante il raffreddamento l'alluminio tende a contrarsi mentre il silicio ad espandersi, abbassando quindi la densità. Questo produce una riduzione del ritiro termico da solidificazione e dunque minori tensioni residue durante la costruzione strato per strato del componente. La presenza di silicio aumenta la resistenza meccanica e all'usura.
- Manganese. Consente un aumento della durezza e della resistenza a trazione mediante soluzione solida interstiziale.
- Zinco. Forma dei precipitati con magnesio o magnesio-rame consentendo un aumento della resistenza a trazione.

Le leghe di alluminio si dividono in:

- Leghe da colata;
- Leghe per deformazione plastica.

Nel caso delle leghe per FA, per via della presenza di processi fusori la processabilità è migliore utilizzando leghe da colata. Tuttavia, aggiungendo elementi che ne migliorano la fluidità è possibile utilizzare anche quelle per deformazione plastica.

Le principali leghe di alluminio impiegate nei processi additivi sono:

- AlSi10Mg;
- AlSi12;
- Al 6061;
- A357;
- Al 7075;
- Scalmalloy.

La lega AlSi10Mg (9-11% di silicio) è la lega principalmente impiegata nei processi additivi ed è stata progettata appositamente. Non presenta particolari problematiche nella messa a punto dei parametri di processo, consentendo una buona finitura superficiale ed elevata fluidità (per la presenza di silicio). Generalmente nei processi a letto di polvere si impiega una taglia delle polveri media (20-25 μ m), che consente un'ottima scorrevolezza. Per evitare la segregazione degli strati e dunque migliorare le proprietà, si effettuano dei trattamenti termici atti a omogeneizzare la struttura lungo le tre direzioni di costruzione.

I processi additivi generano microstrutture a grani fini determinando componenti molto fragili anche se con elevata resistenza meccanica. Per incrementare la duttilità si possono eseguire dei trattamenti termici che, nel caso della lega AlSi10Mg, non portano alla formazione di precipitati evitando un ulteriore incremento di fragilità.

La lega AlSi12 presenta un minore quantitativo di magnesio ma aumenta la quantità di silicio (12%). La dimensioni delle polveri varia in questo caso tra 45 e 75 μ m. Le microstrutture ottenute sono analoghe a quelle viste per la lega AlSi10Mg. La resistenza a trazione e snervamento risultano essere quattro volte superiori rispetto ai valori ottenibili con le leghe prodotte con fusione in sabbia e doppie rispetto a quelle con pressofusione. Tali incrementi sono attribuibili alla più fine microstruttura raggiunta grazie agli elevati gradienti di temperatura.

La lega Al 6061 non presenta silicio come elemento in lega, che consente di ridurre il ritiro volumetrico e la formazione di tensioni residue. Sebbene sia la lega più economica e più versatile per l'applicazione dei trattamenti termici, presenta una scarsa lavorabilità a causa della formazione di tensioni residue che produce cricche. Inoltre, le proprietà meccaniche ottenute sono fortemente anisotrope. Per ridurre la formazione di cricche è possibile eseguire preriscaldamenti con il laser o aumentare la temperatura della piattaforma in modo da controllare i ritiri volumetrici. Tuttavia, sono necessarie ulteriori operazioni di *post-processing*.

La lega A357 viene impiegata nella Fabbricazione Additiva per le ottime proprietà meccaniche che si riescono ad ottenere in macchina. È costituita da 7% di silicio e 0,55% di magnesio. Grazie alla presenza di magnesio è possibile applicare trattamenti termici quali ricottura e T6 (solubilizzazione, tempra e invecchiamento) in base alla microstruttura desiderata.

La lega Scalmalloy® è la lega di alluminio-magnesio-scandio (AlMgSc) di seconda generazione prodotta dal gruppo *Airbus*. È stata sviluppata per estrusioni ad altissima resistenza, offrendo altissima resistenza a fatica e resistenza alla corrosione. È resistente alla corrosione e combina il peso ridotto dell'alluminio con la resistenza specifica del titanio. In confronto, la polvere AlSi10Mg, ampiamente utilizzata per la FA, presenta la metà della resistenza. Può essere paragonata agli acciai per via delle proprietà meccaniche ottenibili (snervamento superiore a 100 MPa) consentendo la realizzazione di strutture dal peso ridotto. Tuttavia, è una lega di difficile approvvigionamento essendo molto ricercata e costosa.

Le leghe di alluminio possono essere trattate termicamente per modificare la struttura e le proprietà meccaniche.

Una volta terminato il *job*, il pezzo risulta ancorato alla piattaforma mediante i supporti. Generalmente viene eseguito un trattamento di *stress relieving* (per 3h a 100°C oppure per 2h a 300°C) che elimina le tensioni residue che potrebbero deformare il pezzo plasticamente rimuovendo i supporti.

Terminato tale trattamento è possibile eseguire i tre seguenti trattamenti termici:

- Ricottura (a 500°C per tempi superiori a 3h) che produce una coalescenza dei grani. La struttura è più omogenea ed aumenta la duttilità al componente;
- Trattamento T4 (solubilizzazione + invecchiamento naturale);
- Trattamento T6 (solubilizzazione + invecchiamento artificiale).

I trattamenti termici di invecchiamento consentono la formazione di precipitati i quali incrementano durezza e resistenza del componente. Il trattamento T6 è quello più diffuso, perché consente di ottenere proprietà meccaniche simili al T4 ma in tempi più brevi.

Tuttavia, il componente appena uscito dal sistema di FA presenta un buon compromesso tra tensione massima e deformazione massima, per tale motivo non sempre vengono eseguiti

trattamenti secondari. Il trattamento T6 infatti riduce sia la resistenza che la deformazione, mentre il T4 consente una deformazione superiore rispetto al T6 (Fig. 7.1) (13).

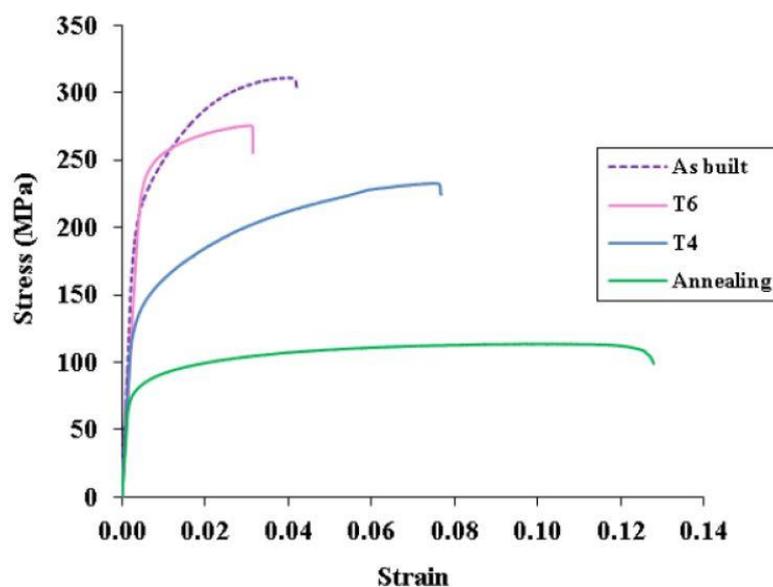


Figura 7-1 – Effetto dei T.T. sulle leghe di alluminio (Fonte: *Materiali per l'Additive, Leghe di Al* – Paolo Fino)

7.2 Leghe di ferro

Nei processi di Fabbricazione Additiva le leghe di ferro sono di recente applicazione e alcune di queste sono state testate solo in ambito sperimentale. In molti processi produttivi in cui è richiesto l'uso di acciai, è preferibile conferire una percentuale di carbonio inferiore allo 0,8% per evitare la formazione di carburi che possano infragilire il materiale, abbassando la tenacità e la deformabilità. Per assicurare buone proprietà meccaniche vengono aggiunte elevate quantità di leganti come nickel, cromo e molibdeno.

Il costo, elevato, è dovuto alla presenza di alte percentuali di cromo, utilizzato per conferire all'acciaio proprietà anticorrosive e impedendone l'ossidazione.

La scelta degli elementi di lega deve essere eseguita in base alla microstruttura che si desidera ottenere, in quanto alcuni favoriscono la formazione di fase γ (elementi gammogeni), altri di fase α (elementi alfogeni). L'impiego di un eccessivo quantitativo di elementi gammogeni potrebbe causare la formazione di austenite a temperatura ambiente, con conseguente diminuzione della resistenza a trazione e aumento della deformabilità. Gli acciai (leghe di ferro) adottati nei processi di FA sono suddivisibili nelle seguenti famiglie:

- Inossidabili;

- Maraging;
- Per utensili.

Gli acciai alto-resistenziali basso-legati potrebbero non trovare grande applicazione in questo settore, in quanto il loro impiego è destinato alla produzione di parti poco complesse (tubazioni, dischi, ecc). Per tale motivo è importante andare a selezionare quali siano più adatti per la FA, tenendo conto di vantaggi e svantaggi correlati.

Ad esempio, acciai con proprietà ferromagnetiche non possono essere utilizzati in processi che prevedono la fusione con fascio elettronico. Le polveri interagirebbero sia con il fascio stesso, deviandolo, sia con le lenti elettromagnetiche, venendo attratte dai campi generati. Il 'cannone elettronico' verrebbe contaminato e ciò provocherebbe l'arresto del processo. Altre caratteristiche fondamentali per gli acciai per la FA sono:

- Saldabilità. Grazie al basso contenuto di carbonio la polvere presenta una buona 'bagnabilità', ciò favorisce una migliore fusione delle particelle. Questa caratteristica risulta più importante per le tecniche laser piuttosto che quelle a fascio elettronico. Deve essere una caratteristica comune a tutti gli acciai per poter formare il bagno fuso.
- Alta conducibilità elettrica. Richiesta per processi con fascio elettronico, in modo da facilitare il passaggio del fascio e garantire la fusione. Gli acciai alto-legati sono quindi sconsigliati poiché a una maggiore percentuale di leganti corrisponde una diminuzione di questa proprietà.
- Lavorabilità. Questo parametro migliora all'aumentare della resistenza agli shock termici, in quanto con essa diminuisce la formazione di cricche.

La resistenza agli shock termici è determinata da quattro parametri, due meccanici e due termici:

- Tensione di rottura;
- Modulo di Young;
- Conducibilità termica;
- Coefficiente di espansione volumetrica

L'acciaio ideale deve avere elevata tensione di rottura, basso modulo di Young, bassa conducibilità termica e basso coefficiente di espansione volumetrica.

Gli acciai inossidabili essendo alto-legati presentano un elevato costo di produzione. Per tale motivo è fondamentale riuscire a riciclare il maggiore quantitativo di polveri. È quindi necessario aggiungere una percentuale di cromo superiore all'11% che prevenga la formazione di ossidi. Inoltre, ciò permette la produzione di polveri con atomizzazione ad acqua senza gas inerte e quindi una limitazione del costo.

Possono essere suddivisi in: acciai martensitici, PH¹¹, *Duplex*, austenitici e ferritici.

L'acciaio inossidabile 17-4 PH viene utilizzato sia in campo aeronautico che automotive. È un acciaio ad alto contenuto di cromo (15-17,5%), nickel (3-5%) e rame (3-5%). Presenta basso contenuto di carbonio (0,07%) per prevenire la formazione di carburi. È un acciaio destinato ad applicazioni in cui sono richieste resistenza alla corrosione e resistenza meccanica (UTS¹² di 900 MPa e R_s¹³ di 500 MPa). Può essere sottoposto a trattamenti termici come ricottura o invecchiamento per acquisire elevata durezza e altre proprietà meccaniche desiderate.

L'acciaio inossidabile 15-5 PH1 presenta un'elevata percentuale di cromo (14-15,5%), nickel (3,5-5,5%) e rame (2,5-4,5%). È caratterizzato da una buona resistenza alla corrosione ed eccellenti proprietà meccaniche (UTS di 1200 MPa e R_s di 1000 MPa, allungamento maggiore del 10%), specialmente se indurito per precipitazione (UTS di 1350 MPa). Trova largo impiego nella realizzazione di prototipi, produzione di piccole serie, parti di ricambio e prodotti personalizzati. Le particelle utilizzate sono grossolane (> 63 μm), più grandi di quelle per le leghe di alluminio, a tutto vantaggio del costo.

L'acciaio AISI 316 L viene molto utilizzato in campo automotive. Rispetto agli acciai inossidabili da colata presenta una maggiore micro-durezza. È un acciaio facilmente processabile con L-PBF e L-DED ma non con EB-PBF in quanto si riduce la qualità superficiale.

Gli acciai Maraging (*Martensite Aging*) presentano una microstruttura costituita da martensite dolce (contenuto di carbonio ≤ 0,03%) su cui viene applicato un T.T. di invecchiamento. A causa del basso contenuto di carbonio viene aggiunta un'elevata percentuale di leganti. Questa tipologia di acciai viene impiegata nei processi di FA per via dell'elevato snervamento (circa 1050 MPa) e dell'alto allungamento (10-13%). Si tratta di acciai

¹¹ PH: *Precipitation Hardening*.

¹² UTS: *Ultimate Tensile Strength*.

¹³ R_s: Resistenza allo snervamento.

austenitici con un'elevata percentuale di nickel (17-19%). Altri elementi di lega sono: cobalto (8,6-9,6%), molibdeno (4,6-6,2%), titanio (0,6-0,8%) e alluminio (0,06-0,16%). L'aggiunta di cobalto e molibdeno consente di mantenere le proprietà meccaniche anche ad elevata temperatura mentre l'alluminio e il titanio permettono la formazione di precipitati e affinamento del grano.

Trovano impiego nella costruzione di stampi con canali di raffreddamento conformali per lo stampaggio di materie plastiche. Questi stampi presentano un costo superiore che però può essere ammortizzato con l'aumento della produttività consentito e con la riduzione dell'energia consumata.

Tra gli acciai per utensili trova grande impiego l'AISI 4340. Presenta un medio tenore di carbonio e leganti come nickel, cromo, manganese e molibdeno. Possiede una buona resistenza meccanica e può essere trattato termicamente. Siccome si tratta di un acciaio ferromagnetico non è processabile nelle macchine di EB-PBF. Per tale motivo viene piuttosto impiegato in sistemi DED per applicazioni di riparazione (14).

7.3 Leghe di nickel

Le leghe di nickel trovano largo impiego nelle applicazioni ad alta temperatura. Grazie all'elevata resistenza ai carichi statici e dinamici e all'elevato scorrimento viscoso (*creep*), sono adatte per usi oltre gli 800°C, potendo operare fino a 1000°C. Valori per il quale un acciaio non sarebbe mai utilizzabile.

Le leghe di titanio invece, impiegate nei casi in cui è importante la riduzione della massa, possono operare fino a 700 °C. Oltre tale valore, il titanio reagirebbe con l'ossigeno producendo ossidi che ne indebolirebbero la struttura. Si verificherebbe un'esfoliazione degli strati di materiale con distacco finale.

Nelle leghe di nickel l'alto contenuto di alluminio permette la formazione di allumina (Al_2O_3), una volta superati i 700 °C. Tale composto si contrappone ai fenomeni di assorbimento dell'ossigeno nel materiale, evitando l'instaurazione di fenomeni ossidativi.

Nonostante anche nelle leghe di alluminio la passivazione avvenga grazie alla formazione di allumina, le proprietà meccaniche decadano rapidamente a causa della bassa temperatura di fusione (circa 600 °C).

Il grafico in figura 7.2 mostra l'andamento (indicativo) della resistenza specifica in funzione della temperatura di queste leghe.

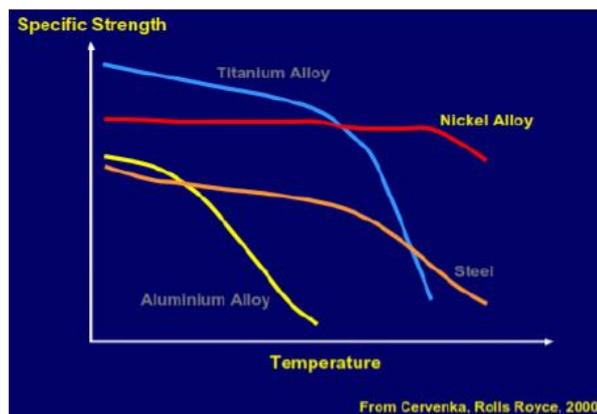


Figura 7-2 – Confronto leghe metalliche (Fonte: *Materiali per l'additive, Leghe di Ni* – Paolo Fino)

Le fasi che caratterizzano la microstruttura delle leghe di nickel sono:

- Fase γ (Ni-Al), con struttura cubica a facce centrate. Costituisce la matrice delle leghe di nickel;
- Fase γ' (Ni_3Al), che precipita internamente ai grani della fase γ . È ricca di elementi come alluminio, titanio e tantalio e con struttura simile alla precedente;
- Fase γ'' (Ni_3Nb), rappresenta il principale precipitato per l'Inconel 718;
- Carburi e boruri;
- Altre fasi indesiderate.

Si possono quindi dividere in due grandi famiglie:

- Costituite da una microstruttura con matrice di fase γ , al cui interno precipita la fase γ' con struttura simil-cristallina. Quest'ultima permette di aumentare le proprietà meccaniche specifiche (come UTS e rigidità) all'aumentare della temperatura. Per tale motivo queste leghe sono utilizzate ad alta temperatura.
- Costituite da seconde fasi che non precipitano all'interno dei grani, ma si accumulano sui vertici dei grani. In questo caso la lega è meno performante poiché cala la duttilità ma risulta più resistente, perché vengono impediti l'ingrossamento dei grani e la coalescenza. Sono impiegate per applicazioni statiche e non dinamiche a causa della minore resistenza a fatica.

In riferimento alla prima famiglia, la struttura dei precipitati permette un aumento della resistenza specifica a temperature più alte. I precipitati formati e la matrice hanno una struttura cristallina simile ma con differente coefficiente di dilatazione termica. In un

determinato intervallo di temperatura il precipitato ferma le dislocazioni e non permette la deformazione dei grani.

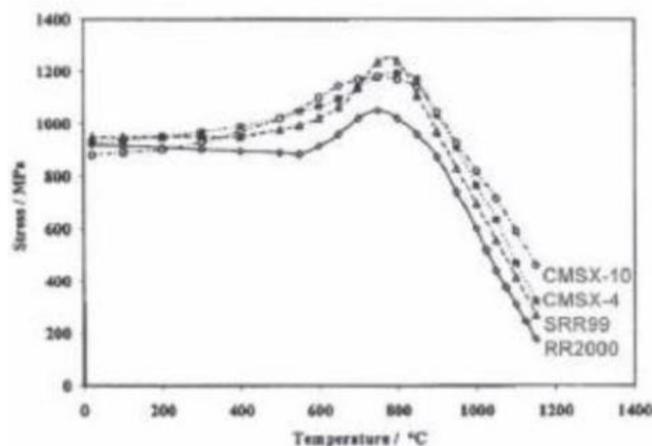


Figura 7-3 – Prestazioni delle leghe di nickel (Fonte: *Materiali per l'additive, Leghe di Ni – Paolo Fino*)

Un tema importante per le leghe impiegate nei processi di FA è la saldabilità. Le leghe di nickel presentano un comportamento rigido e sono poco lavorabili. In questo contesto è fondamentale valutare la formazione di tensioni residue. Se a causa di una bassa saldabilità, il *melt pool* formato durante la fusione non ‘bagna’ sufficientemente gli strati presenti al di sotto, la formazione di tensioni residue può provocare cricche. Per tale ragione risulta più complicata la lavorazione con sistemi laser piuttosto che con fascio elettronico. Infatti, grazie alle maggiori temperature nei processi di EB-PBF si verifica una riduzione di tali tensioni. Le polveri per applicazioni additive sono ottenute tramite atomizzazione ad acqua. Il prodotto di partenza è un lingotto pre-alligato di nickel e alluminio, fuso a 1600 °C. Per la FA vengono utilizzate diverse leghe:

- *Inconel 625 e 718*;
- *Hastelloy-x*. Per applicazioni ad alte temperature, come produzione delle camere di combustione;
- *CM 247, 263 e 27*. Leghe ottenute per precipitazione con proprietà specifiche basse, per medie temperature.

L’Inconel 718 viene impiegato per la realizzazione di parti statiche, agganci e in applicazioni che non prevedono temperature troppo elevate o particolari sollecitazioni meccaniche.

Chimicamente è costituito da cromo (17-21%), niobio (4,75-5,50%), molibdeno (2,8-3,3%), cobalto (<1%) e alluminio (0,2-0,8%).

Il *post-processing* di una parte in nickel prevede spesso l'esecuzione di un trattamento termico. Le tipologie di trattamento termico più impiegate sono la solubilizzazione e l'invecchiamento. La loro applicazione mira a tre obiettivi:

- Modificare la dimensione dei grani cristallini;
- Migliorare le proprietà meccaniche;
- Omogeneizzare la microstruttura.

Se come parametro di progettazione viene stabilita la resistenza allo snervamento, sarà necessario rendere più piccoli i grani. Se invece si volesse rendere il materiale idoneo per applicazioni ad alta temperatura, è richiesta una microstruttura omogenea, con precipitati piccoli e distribuiti uniformemente.

Il trattamento termico di invecchiamento consente di controllare dimensione, forma e frequenza dei precipitati a bordo grano. Cambiando la temperatura durante il trattamento, viene modificata la cinetica del processo. Diminuendola, si riduce la velocità di accrescimento di alcuni precipitati, ottenendo precipitati più piccoli. Oltre alla temperatura, anche il tempo di mantenimento del processo ne influenza la forma.

Nelle leghe di nickel è desiderato avere precipitati con tre dimensioni diverse, poiché in base ad analisi effettuate su diversi campioni, si è dimostrato che ciò consente un aumento della resistenza al *creep*. Più i precipitati risultano piccoli e distribuiti nella matrice, più viene interrotto il movimento delle dislocazioni (15).

7.4 Leghe di titanio

Le leghe di titanio trovano larga diffusione in ambito industriale, grazie alle ottime proprietà meccaniche e all'elevata resistenza alla corrosione, oltre all'elevata biocompatibilità che le rendono adatte all'uso per molte applicazioni medicali. La principale ragione per cui non sono impiegate in quantità massicce è l'elevato costo di produzione, di molto superiore ad acciai e leghe di alluminio. Per tale ragione, la possibilità di ridurre al minimo lo scarto di materiale favorisce l'applicazione di queste tecnologie.

Il titanio si trova in natura sotto forma di ossido TiO_2 di due tipi (Rutilio e Anatasio). Tali ossidi sono molto stabili e il processo per ricavare il titanio puro risulta molto complicato ed

energivoro. Tale processo non prevede una riduzione diretta dell'ossido, ma comprende una fase intermedia di clorurazione con acido cloridrico in concentrazioni elevate. In un termoreattore ad alta temperatura si ottiene il tetracloruro di titanio (TiCl_4). Successivamente, attraverso una declorurazione catalitica dei cloruri si ottiene titanio in forma di spugna. Attraverso ulteriori processi è possibile ottenere il titanio puro.

È quindi possibile procedere con la produzione della polvere attraverso gas atomizzazione.

La caratteristica di biocompatibilità è favorita dalla formazione di ossidi molto stabili, i quali prevengono reazioni indesiderate con i tessuti corporei. La buona elasticità permette inoltre la produzione di protesi che non gravino sulla struttura ossea, infragilendola. Applicazioni tipiche sono placche e impianti per le anche.

Il problema della osteo-integrazione è stato fin da sempre presente nella produzione di protesi. La realizzazione di componenti porosi o con una certa rugosità permette di aumentare il grip, favorendo la crescita dell'osso.

La principale limitazione all'uso delle leghe di titanio con le tecnologie additive è dovuta alla loro alta reattività in presenza di un'atmosfera ossidativa. Essendo più facile creare un'atmosfera protettiva nei sistemi a letto di polvere grazie al volume circoscritto, la loro processabilità è avvenuta per prima in questi sistemi per poi essere estesa anche a quelli di deposizione diretta.

Un'ulteriore applicazione riguarda infatti i processi di riparazione tramite la deposizione diretta. Possono essere ricostruite parti rotanti di compressori, in cui è richiesta una buona resistenza ma dove le temperature non superano i 600-700 °C. In tal modo non avvengono processi di ossidazione.

Nel 90% dei casi la lega di titanio più impiegata è la Ti-6Al-4V. Per tale lega le forme cristalline maggiormente utilizzate sono due: la forma α e la forma β .

In figura 7.4 viene riportato il diagramma di stato titanio-alluminio in cui è evidenziata la composizione per la Ti-6Al-4V.

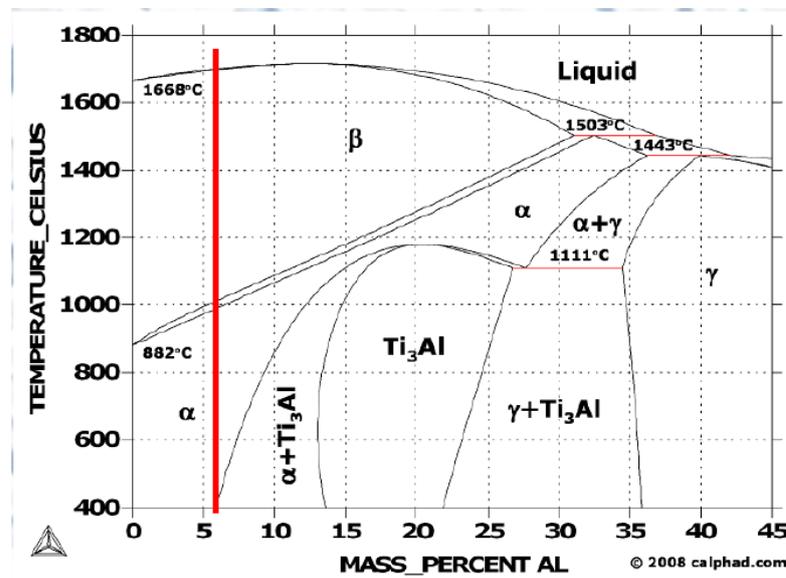


Figura 7-4 – Diagramma di stato titanio-alluminio (Fonte: *Materiali per l'additive, Leghe di Ti* – Paolo Fino)

Le due fasi possiedono struttura cristallina differente. La fase α è esagonale mentre la fase β è cubica a corpo centrato. Ad esse corrispondono proprietà differenti: la prima presenta molti piani di scorrimento ed è estremamente deformabile, specialmente ad alta temperatura. La seconda è meno deformabile ma contribuisce all'aumento della resistenza meccanica. Gli elementi in lega utilizzabili sono numerosi e si suddividono in:

- Alfa stabilizzanti (alluminio, ossigeno e azoto);
- Beta stabilizzanti (molibdeno, vanadio, tungsteno, niobio, tantalio, ferro, cromo, rame, nickel, cobalto, manganese);
- Neutrali.

Anche le leghe di titanio sono soggette a modifiche delle proprietà meccaniche in funzione delle trasformazioni che si possono avere nel diagramma di stato. Applicando diversi trattamenti termici (ricottura, tempra, ecc) si possono ottenere varie microstrutture, agendo non solo sulla dimensione dei grani cristallini, ma anche sulla forma e orientazione delle fasi.

È possibile effettuare alcuni confronti sui risultati ottenuti con le tecniche di L-PBF, EB-PBF e L-DED. Mentre le considerazioni generali riguardanti finitura superficiale, accuratezza e velocità di deposizione sono sempre valide, la processabilità con le tecniche a fascio elettronico è minore rispetto a quelle che impiegano sorgente laser. La creazione del vuoto e le maggiori temperature della camera portano infatti ad una evaporazione di parte

dell'alluminio presente nella lega, modificando la composizione chimica. La riutilizzabilità delle polveri viene quindi ridotta. Nei sistemi laser la riciclabilità può essere limitata dalla parziale ossidazione delle polveri. Risulta fondamentale il controllo dell'atmosfera protettiva.

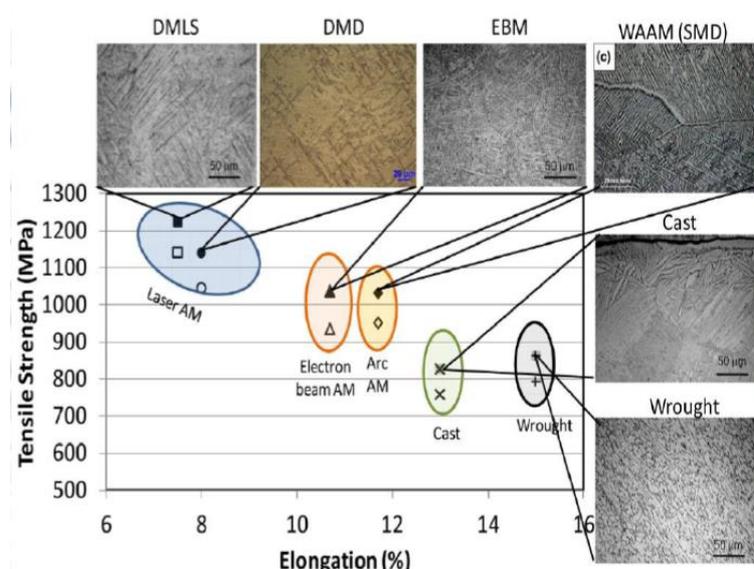


Figura 7-5 – Proprietà meccaniche leghe di titanio per FA (Fonte: *Materiali per l'additive, Leghe di Ti* – Paolo Fino)

Dal confronto di figura 7.5 si può dedurre che:

- Con i sistemi laser si ottengono valori più alti di resistenza poiché i grani sono piccoli e allungati. Tuttavia, il ridotto movimento delle dislocazioni causa un basso allungamento a rottura.
- Con i sistemi a fascio elettronico si ha minore resistenza meccanica ma aumenta l'allungamento a rottura grazie alle temperature più elevate.

Le proprietà meccaniche ottenute con i processi additivi sono superiori ai processi tradizionali, che tuttavia conferiscono una duttilità superiore.

Confrontando diverse parti che hanno subito trattamenti termici (figura 7.6) si osserva che mentre per le tecnologie laser l'allungamento a rottura aumenta notevolmente (grazie alla crescita dei grani), in quelle a fascio elettronico non si ottiene lo stesso risultato. Questo fatto è probabilmente dovuto alla temperatura maggiore della camera nei processi a fascio elettronico che favorisce una crescita parziale dei grani e quindi un aumento della duttilità del materiale.

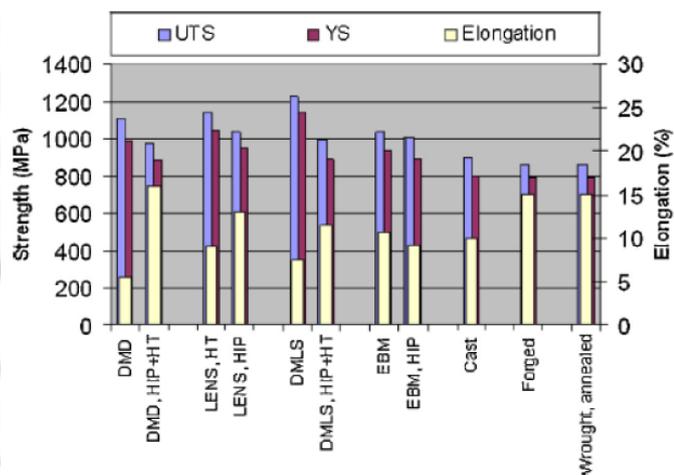


Figura 7-6 – Effetto dei T.T. sulle leghe di titanio (Fonte: Materiali per l'additive, Leghe di Ti – Paolo Fino)

Nel grafico di figura 7.7 viene invece confrontato il comportamento a trazione per la lega Ti-6Al-4V ottenuta con diversi processi (L-PBF e forgiatura) lungo le due direzioni principali. È possibile constatare che con la con tecnologia di L-PBF il comportamento trasversale differisce da quello longitudinale.

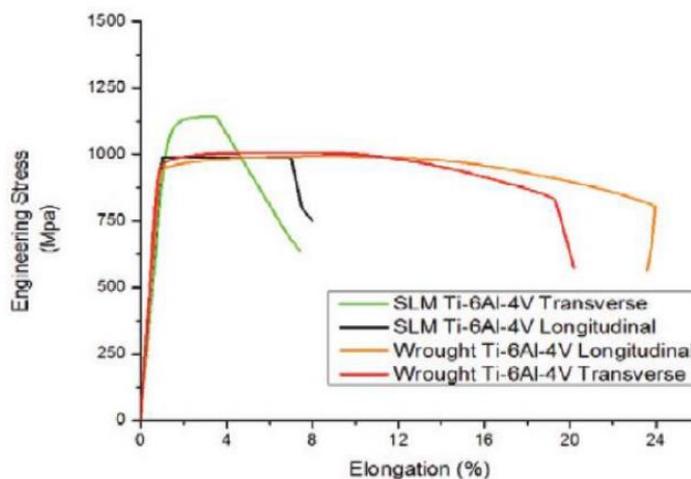


Figura 7-7 – Curva di trazione per Ti-6Al-4V (Fonte: Materiali per l'additive, Leghe di Ti – Paolo Fino)

Dall'analisi dei costi derivanti dalla produzione di un componente in lega di titanio con le tecnologie additive (figura 7.8), si ricava che il costo del processo influisce per il 42%, mentre le operazioni di *post-processing* per il 20%. Il costo del materiale incide attualmente per il 10%, anche se diminuirà percentualmente nel tempo. Infine, altre voci quali il personale altamente specializzato e ispezioni secondarie incidono per il 28% (18% e 10% rispettivamente) (16).

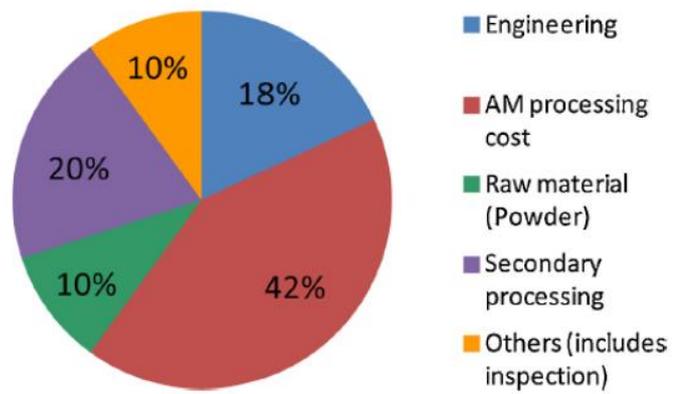


Figura 7-8 – Analisi dei costi per le leghe di titanio con FA (Fonte: Materiali per l'additive, Leghe di Ti – Paolo Fino)

7.5 Leghe di titanio-alluminio

Durante la seconda metà degli anni '90 è iniziato lo studio di materiali alternativi alle leghe di nickel per la realizzazione degli ultimi stadi di turbina per velivoli, in cui le sollecitazioni termiche non sono così elevate da giustificarne l'uso. Da questi studi è stata brevettata una particolare lega con la seguente composizione: 48% di titanio e 48% di alluminio. Tale lega prende il nome di titanio-alluminio o alluminuro di titanio. Si tratta di un composto con struttura quasi intermetallica, fragile, poco tenace e molto sensibile alla presenza di difetti. Inizialmente veniva impiegata nei processi di colata per la realizzazione di palette di turbina ma, a causa delle proprietà intrinseche del materiale, esse risultavano spesso difettose. In questo caso l'impiego delle tecnologie additive si è mostrato più promettente, consentendo una riduzione del numero di palette difettate.

L'interesse nello sviluppo di questo materiale è legato anche alla minore densità (3,7-3,9 g/cm³) rispetto a leghe di nickel (7,9-9,1 g/cm³) e altre leghe di titanio (4,1-4,7 g/cm³), che consente la produzione di componenti alleggeriti. Altri vantaggi derivanti dal suo impiego sono la buona resistenza a corrosione fino a 700 °C e la resistenza specifica pari a quella delle leghe di nickel (figura 7.10).

Nel corso degli anni sono stati eseguiti numerosi test con i sistemi additivi che hanno mostrato una buona lavorabilità con le tecniche a fascio elettronico ma non altrettanto con quelli laser. Infatti, questi ultimi prevedono temperature della camera troppo basse. A causa degli elevati gradienti di raffreddamento emerge la fragilità del materiale che, in seguito alle tensioni generate, provoca la formazione di cricche. In figura 7.9 è riportato un confronto tra alcune leghe.

Proprietà	Ti ₃ Al	TiAl	Superlega
Densità (g/cm ³)	4,1-4,7	3,7-3,9	7,9-9,1
E a 20°C (GPa)	100-145	160-180	195-220
σ _e a 20°C (MPa)	700-990	400-650	250-1310
σ _f a 30°C (MPa)	800-1140	450-800	620-1620
Limite di T per creep (°C)	760	1000	1090
Limite di T per ossidazione (°C)	650	900	1090
ε _r (%) a 20°C	2-26	1-4	3-50
ε _r (%) ad alta T	10-20	10-60	8-125
K _{IC} a 20°C (MPa m ^{1/2})	13-42	10-20	25

Figura 7-9 – Confronto leghe di nickel e Ti-Al (Fonte: Materiali per l'additive, Leghe di Ti-Al – Paolo Fino)

In figura 7.10 è riportato l'andamento della resistenza a rottura in funzione della temperatura. Confrontando il Ti-Al con le leghe di nickel e supponendo che abbiano la stessa densità, si osserva che le prime presenterebbero una resistenza superiore.

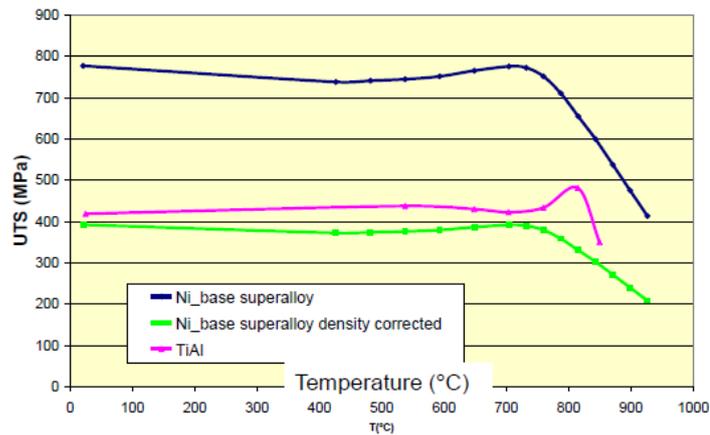


Figura 7-10 – Andamento proprietà meccaniche Ni e Ti-Al (Fonte: Materiali per l'additive, Leghe di Ti-Al – Paolo Fino)

Analizzando il diagramma di stato di figura 7.11 si osserva che per la composizione considerata si è posizionati tra due fasi (γ e α_2) che presentano proprietà meccaniche differenti. Pertanto, è necessario stabilire i parametri di processo in modo accurato affinché i trattamenti termici non ne modifichino la composizione. Infatti, una piccola evaporazione dell'alluminio porterebbe ad effetti molto diversi tra loro.

Pertanto, è necessario monitorare costantemente la composizione chimica del prodotto finale per non modificare l'effetto del trattamento termico.

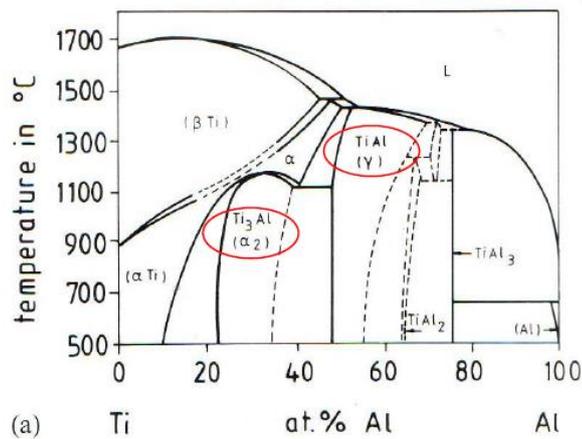


Figura 7-11 – Diagramma di stato Ti-Al (Fonte: Materiali per l'additive, Leghe di Ti-Al – Paolo Fino)

Lo studio di questa lega non è stato immediato ed ha richiesto numerose modifiche della composizione chimica per ottenere un materiale applicabile anche ad alta temperatura. Partendo dalle leghe di prima generazione, si è passati a quelle di seconda generazione, in cui sono stati aggiunti elementi come cromo (aumenta la duttilità), niobio e tantalio (aumentano la resistenza all'ossidazione). Tra le leghe di seconda generazione figura la Ti-48Al-2Cr-2Nb sviluppata da *GE*.

Infine, si è passati alle leghe di terza generazione, che hanno consentito l'uso a temperature più elevate mediante l'impiego di maggiori quantitativi di niobio (5-10%) e molibdeno (1-3%).

Gli effetti degli elementi di lega sono:

- Alluminio (46-48%). Aumenta la duttilità a temperatura ambiente;
- Cromo (1,2-2%). Aumenta la resistenza a corrosione e al *creep*;
- Niobio (6-8%). Aumenta la resistenza a ossidazione e al *creep*;
- Silicio (0,3-0,4%). Aumenta le proprietà meccaniche ad alta temperatura;
- Boro (0,5-1%). Influisce sulla dimensione dei grani poiché posizionandosi a bordo grano ne impedisce l'accrescimento;
- Molibdeno (0,4-0,8%). Aumenta la resistenza all'ossidazione e al *creep*;
- Carbonio (0,05-0,12%). Aumenta la resistenza all'ossidazione e al *creep* (17).

7.6 Leghe di cromo-cobalto

Le leghe di cromo-cobalto sono state tra le prime sviluppate per processi di FA. Presentano un'elevata stabilità e sono utilizzabili in applicazioni ad alta temperatura. Tuttavia, presentano lo svantaggio di avere un'elevata densità e quindi una bassa resistenza specifica. Per tale motivo vengono impiegate in applicazioni statiche come gli ugelli dei combustori nelle turbine e le valvole ma il loro utilizzo è sempre più circoscritto.

8. Applicazioni industriali delle tecnologie additive

Nel seguente capitolo verrà presentato lo stato recente delle applicazioni delle tecnologie additive in differenti settori industriali, per fornire un'ulteriore chiave di lettura delle motivazioni che spingono verso lo sviluppo di tali tecniche e materiali.

Ogni giorno emergono nuove possibilità di sfruttamento di queste tecnologie, alcune delle quali promettenti e destinate ad ottenere successo, altre utili come rampa di lancio per invenzioni future. Un esempio molto ricorrente riguarda la produzione dell'ugello per carburante prodotto da *GE Aero* (figura 8.3), ottenuto dalla combinazione di una lega di cromo-cobalto e altri materiali. Ciò che l'introduzione della Fabbricazione Additiva ha consentito di ottenere è l'integrazione di 18 componenti in un'unica parte costituita da complessi canali ed elementi innovativi, assicurando più alte durabilità ed efficienza.

Seguendo l'obiettivo di produrre 100000 parti entro il 2020, *GE* ha investito 3,5 miliardi di dollari nella realizzazione di nuovi stabilimenti dedicati alla produzione di questi ugelli che, attualmente, risultano essere già impiegati in test di volo.

Un altro esempio da parte di *GE* è consistito nello sviluppo del sistema di trazione dei nuovi velivoli *Cessna Denali*. Il motore è infatti prodotto per il 35% utilizzando le tecnologie additive: ciò ha consentito di ridurre del 5% il peso del velivolo e dell'1% il consumo specifico di carburante. Nonostante gli esempi fin qui esposti lascino intuire come tali tecnologie trovino larga applicazione in campo aeronautico, il loro utilizzo è ormai sempre più diffuso anche in altri settori quali:

- Medica;
- Aerospaziale;
- Automotive;
- Rigenerazione e riparazione;
- Produzione di stampi e utensili;
- Reverse Engineering;
- Personalizzazione del prodotto;
- Artistico (2).

L'indice TRL (ovvero *Technology Readiness Level*) impiegato per la valutazione della maturità di una tecnologia trova applicazione anche nel campo della Fabbricazione Additiva.

Sviluppato originariamente dalla NASA nel 1974 viene attualmente utilizzato da vari enti, quali il Dipartimento della Difesa americano, la NASA, l'Agenzia Spaziale Europea, la Commissione europea ed altri. È basato su una scala di valori variabili da 1 a 9 (dove 1 rappresenta in valore più basso e 9 quello più alto). Nella tabella 5 viene riportata la correlazione tra i livelli e la maturità della tecnologia:

Livello di TRL	Descrizione
1	Osservati i principi fondamentali
2	Formulato il concetto della tecnologia
3	Prova di concetto sperimentale
4	Tecnologia convalidata in laboratorio
5	Tecnologia convalidata in ambiente industriale rilevante
6	Tecnologia dimostrata in ambiente industriale rilevante
7	Dimostrazione di un prototipo di sistema in un ambiente operativo
8	Sistema completo e qualificato
9	Sistema reale provato in ambiente operativo

Tabella 5 – Technology Readiness Level

Il passaggio tra TRL 4 e TRL 6 è di fondamentale importanza, poiché consente la transizione dallo studio in laboratorio a quello in ambito industriale, che comprova l'effettiva applicabilità della tecnologia (18).

Le tecnologie additive trovano ampio spazio laddove sono presenti bassi volumi produttivi e ampie possibilità di personalizzazione del prodotto. In questa direzione rientrano i settori quali l'aerospaziale e il medicale, mentre in direzione opposta sono collocati settori quale l'automotive. Secondo questi parametri di valutazione, è possibile determinare in quali campi sia stato possibile applicare più efficacemente le tecnologie per la FA. In figura 8.1 è riportato l'indice TRL per i settori sopracitati. In seguito, verranno analizzate le applicazioni esistenti per ogni settore di interesse.

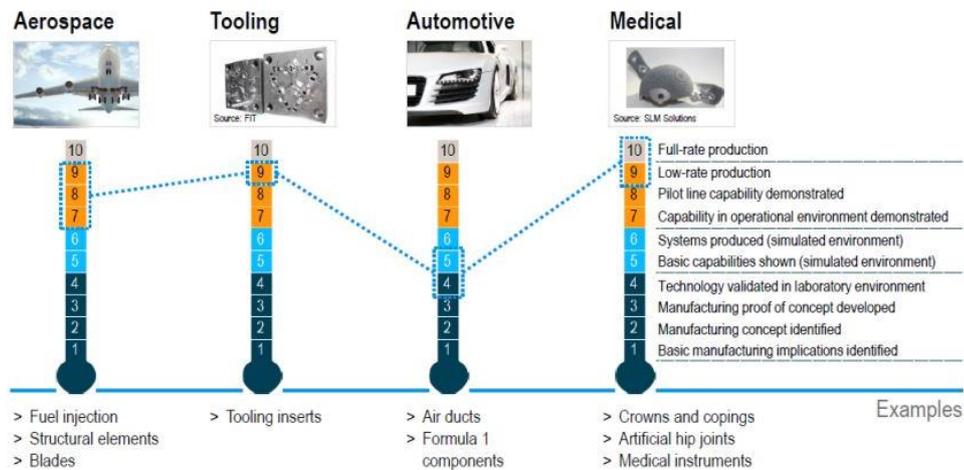


Figura 8-1 – TRL della FA nei principali settori industriali, anno 2017 (Fonte: FCA.com, CRF.it)

8.1 Settore medicale

Nel settore medicale sempre più applicazioni stanno cominciando ad emergere. Queste soluzioni stanno avendo un impatto dirompente nella produzione di dispositivi ortodontici, dove è richiesta la personalizzazione di corone e impianti dentali dove sono presenti particolari di piccole dimensioni. Il loro impiego è infatti giustificato per serie di piccole dimensioni, elevate precisioni e prodotti ad alto valore aggiunto.

Dall'introduzione di queste tecnologie sono stati installati oltre 50000 dispositivi medici prodotti interamente con l'EB-PBF. I benefici assicurati dalla FA sono la rapidità nella produzione di pezzi su misura destinati all'uso diretto, come nel caso delle protesi, o per usi secondari come le guide di perforazione e i dispositivi di fissaggio che utilizzano le radiografie del paziente per creare dispositivi compatibili anatomicamente.



Figura 8-2 – Produzione con la FA di protesi dentali e capsule

L'accuratezza consentita è in questi casi sufficiente, mentre la finitura superficiale e la porosità delle strutture realizzate facilitano l'osteo-integrazione. Materiali quali le leghe di titanio e leghe cromo-cobalto garantiscono una sufficiente resistenza e biocompatibilità. Metalli speciali come il tantalio potrebbero avere un impiego più ampio nella produzione di dispositivi prodotti con la FA e nella realizzazione di strati protettivi. Tali applicazioni prevedono un costo elevato di realizzazione e perciò sono adatti alla produzione entro piccoli volumi di costruzione quali alcuni sistemi a letto di polvere (2).

8.2 Settore aerospaziale

Nel settore aerospaziale la *Lockheed Martin* e la *Sciacky* hanno dimostrato l'efficacia dell'utilizzo della FA per la creazione di alcuni serbatoi per la propulsione utilizzando l'EB-DED. In questo caso, il processo di FA viene impiegato per realizzare una forma grezza poi lavorata alle macchine utensili a controllo numerico, per ottenere una forma che sarebbe altrimenti necessario produrre tramite stampaggio. L'utilizzo del sistema di stampaggio richiederebbe la presenza di punzone, matrice e di una pressa idraulica per ogni forma da realizzare (in questo caso assenti), comportando un evidente aumento dei costi. Un'altra applicazione riguarda la *Aerojet Rocketdyne* (figura 8.3), che ha prodotto e testato la camera di combustione di un motore a reazione realizzata depositando una lega di rame.



Figura 8-3 – Camera di combustione in rame di Aerojet Rocketdyne e ugello di GE Aero (Fonte: NASA.gov e Arcam.com)

La potenziale riduzione del tempo di produzione e dei costi associati all'intero ciclo produttivo ha costituito una forte motivazione verso l'impiego di queste tecnologie. Inoltre, l'industria spaziale e aerospaziale richiedono stringenti procedure per la certificazione dei

processi e dei prodotti. La possibilità di integrare più componenti in un unico pezzo o ridurre il numero totale di parti realizzate consentono grandi risparmi di tempo.

La riduzione di peso può essere un ulteriore fattore di valutazione a favore di queste tecnologie, come nel caso della realizzazione di vettori spaziali per cui deve essere facilitata la fase di fuga dal campo gravitazionale terrestre o per ridurre lo spreco di carburante durante i voli commerciali. Questi benefici si traducono a loro volta in un aumento dell'efficienza del sistema, favorendo la salvaguardia dell'ambiente, grazie alla riduzione delle sorgenti acustiche e delle emissioni nocive. Infine, è possibile ridurre lo spreco di materiale nel caso di leghe speciali come le leghe base nickel o le leghe base titanio.

Uno studio condotto da *EOS* e *Airbus* ha valutato i benefici legati alla riduzione di massa di una staffa in acciaio (tradizionalmente ottenuta con processi di fusione) impiegata su alcuni velivoli e progettata tramite la FA. Il risultato riscontrato è stato una riduzione delle emissioni di CO₂, grazie al minor consumo di combustibile, pari a circa il 40% sull'intero ciclo di vita, dopo essere stata ottimizzata topologicamente e realizzata in titanio con tecnologia laser a letto di polvere. In aggiunta a questo sono stati ottenuti una riduzione del 25% dello scarto riguardante la lavorazione del titanio e un risparmio di massa di 10 kg per velivolo (2).

8.3 Settore Automotive

Nella progettazione dei veicoli per Formula 1, le squadre di costruttori stanno beneficiando della libertà durante la progettazione e della rapidità nella realizzazione di prototipi, grazie alla snellezza del ciclo di fabbricazione, acquisendo competitività al di fuori del circuito. In questi casi, il costo è un fattore secondario rispetto ai vantaggi conseguibili, di primaria importanza. Questo tipo di applicazioni fornisce un campo di prova per le tecnologie additive, sebbene i risultati ottenuti e le metodologie sperimentate rimangano informazioni strettamente confidenziali in seno alla compagnia stessa.

Mentre la grande attrazione esercitata dalle tecnologie additive metalliche nei confronti della produzione di parti per veicoli di serie rimane confinata alla realizzazione di prototipi funzionali, la produzione di pezzi speciali o difficili da reperire, come quelli utilizzati per il restauro di auto d'epoca, è in continua crescita. Sebbene la produzione di massa per il settore automotive sia fuori dalla portata con gli attuali processi esistenti, la possibilità di partire da un modello CAD e ottenere un prodotto finito equivalente ad uno prodotto con modelli in

sabbia o in plastica, sta acquisendo una sempre più ampia accettazione. La fusione di componenti complessi e di grandi dimensioni può essere realizzata producendo lo stampo con la FA e poi effettuando la colata di metallo, riducendo i tempi associati al suo sviluppo e consentendo continue modifiche durante il ciclo di prototipazione.



Figura 8-4 – Pinza freni prodotta da Bugatti in L-PBF (Fonte: Tctmagazine.com)

ExOne ha fornito un caso studio in cui veniva valutato il costo di produzione di un lotto costituito da 5 getti. Utilizzando i modelli e gli strumenti convenzionali con metodi di fusione a schiuma persa, il costo del lotto intero ammontava a 15000 € - 20000 €. Il costo di un singolo pezzo prodotto utilizzando la Fabbricazione Additiva ammontava invece a 1500 €. Questo caso dimostra che le tecnologie additive possono essere vantaggiose nella realizzazione di lotti di dimensioni limitate (2).

8.4 Rigenerazione e riparazione

Le applicazioni riguardanti la riparazione e la manutenzione degli utensili possono sfruttare le tecnologie di *Directed Energy Deposition* per l'applicazione di rivestimenti sulle parti originali o per il loro ripristino. Ad esempio, per resistere agli stress termici e all'usura presenti durante il processo di forgiatura, possono essere realizzati utensili impieganti un acciaio economico come metallo di base e nella zona sottoposta alla maggiore sollecitazione termica applicare un rivestimento in lega di cobalto resistente alle alte temperature. Rispetto al processo di unione meccanica ottenuto tramite i processi di CVD (*Chemical Vapor Deposition*) e PVD (*Physical Vapor Deposition*), il materiale depositato tramite DED viene legato al metallo di base ed è in grado di sopportare maggiormente i carichi termici e affaticanti del processo di forgiatura senza che si verifichino danneggiamenti del rivestimento. Lo strato realizzato con la DED permette di sopportare pressioni di forgiatura

elevate e numerosi cicli di lavorazione. Gli utensili realizzati con questa tecnica presentano una durata quattro volte superiore rispetto agli utensili tradizionali e permettono una notevole riduzione dei costi (2).

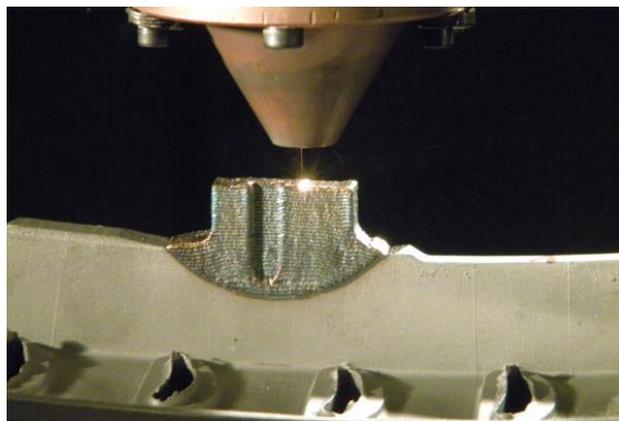


Figura 8-5 – Riparazione con L-DED

8.5 Stampi e utensili per applicazioni industriali

Gli inserti degli stampi possono trarre beneficio dalla realizzazione di canali di raffreddamento conformali, velocizzando il processo di stampaggio e migliorando la qualità della parte. Applicazioni come queste possono fare un ulteriore affidamento sull'ingegnerizzazione assistita dal calcolatore che permette di ottimizzare i benefici consentiti dalla tecnologia. In aggiunta a questo, i processi additivi metallici possono essere impiegati nella riparazione o modifica di utensili in modo da estendere il loro ciclo di vita o aumentare le prestazioni (2).

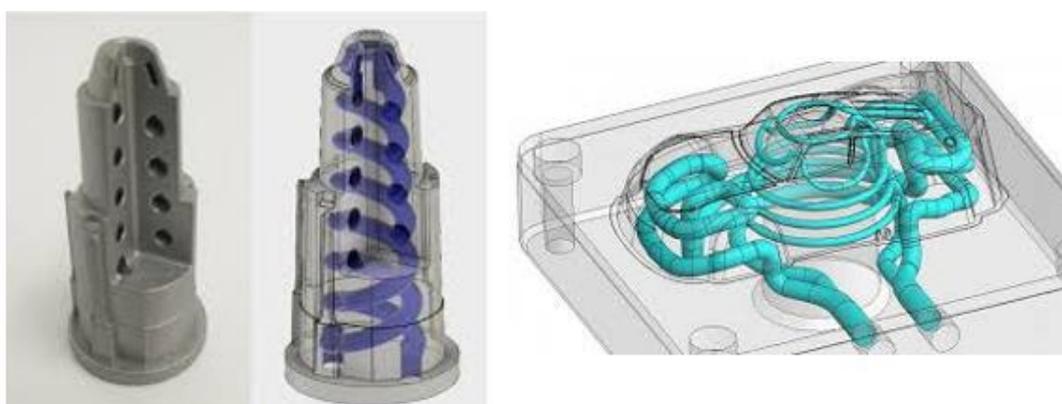


Figura 8-6 – Progettazione di canali di raffreddamento conformali (Fonte: Forefront-am.com.sg e 3Dprint.com)

8.6 Reverse Engineering

Le tecnologie di *Reverse Engineering* possono impiegare sistemi laser o telecamere per catturare la forma di un oggetto e tramite dei software appositi ricreare il modello CAD. A sua volta, questo può essere utilizzato per produrre stampi in plastica, in sabbia o parti di motore di motociclette. Il software può inoltre interfacciarsi con un sistema CAD professionale come *Catia*, *Solidworks*, ecc (2).

8.7 Personalizzazione dei prodotti

Da una collaborazione tra *Renishaw* e la *Empire Cycle* è scaturito il primo progetto di una bicicletta in titanio (figura 8.7) realizzata tramite la FA. Dimostratori come questo mettono in evidenza l'elevata capacità di personalizzazione che permette di fabbricare oggetti dai *design* articolati e dalla struttura alleggerita grazie all'impiego di materiali leggeri. La combinazione tra l'aspetto artistico e l'ingegnerizzazione del prodotto permettono di creare strutture complesse alleggerite internamente ma dotate di elevata resistenza e forme organiche sinuose, consentendo la valorizzazione di un fattore importante quale l'unicità.



Figura 8-7 – Telaio di bicicletta prodotto da *Renishaw* e *Empire Cycle* con FA (Fonte: *Renishaw.com*)

I metodi di scansione e stampa 3D sono comunemente usati nella produzione di dispositivi acustici personalizzati o di altri dispositivi personali. Sebbene i prodotti odierni siano realizzati con polimeri, questi esempi mostrano le potenzialità della scansione e delle stampa 3D, in grado di stravolgere il mercato e cambiare radicalmente la logica di produzione. Generalmente i prodotti di massa hanno l'*appealing* di essere economici ma in alcuni casi a prevalere è l'aspetto di poter produrre un oggetto individuale. Poiché i sistemi di scansione

e di digitalizzazione del corpo diventano sempre più diffusi, ogni interfaccia uomo-macchina risulta potenzialmente oggetto di personalizzazione.

Nonostante il costo cresca proporzionalmente con il grado di personalizzazione, questi oggetti (come la testa delle mazze da golf) soddisfano spesso i gusti personali e la passione per lo sport. Qualsiasi oggetto con un mercato di fascia alta può essere riprogettato secondo uno stile innovativo e unico, reso possibile dall'uso della Fabbricazione Additiva metallica (2).

8.8 Settore artistico

L'applicazione della Fabbricazione Additiva metallica nel campo dell'arte sta aprendo la strada verso l'esplorazione di nuove possibilità riguardanti stili, forme e processi. Alcune di queste sono in grado di catturare l'essenza della libertà e dell'emozionalità associata ad un oggetto di *design*.

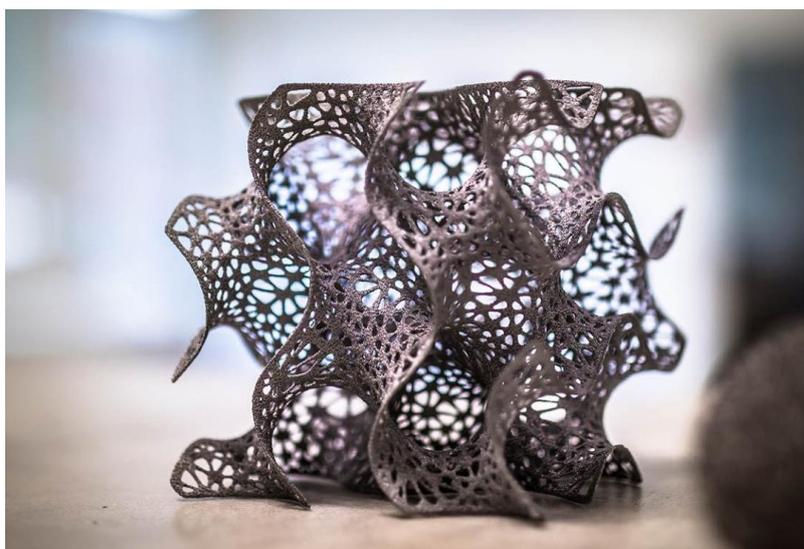


Figura 8-8 – Opera d'arte realizzata in FA (Fonte: Tmrresearchblog.com)

Man mano che ci si avvia verso la riduzione dei costi dei *softwares* e dei materiali, viene favorita la loro adozione da parte di artisti per la realizzazione di solidi a forma libera che consentiranno un'ulteriore espansione nel mondo del *design* emozionale. Così come la musica, i colori, i video e altre forme artistiche uditive o visive possono evocare una risposta emotiva o ispiratrice, così possono fare i sistemi di realtà virtuale. In futuro sarà possibile

catturare gli istanti vissuti con la realtà virtuale e portarli nel mondo reale grazie alle tecnologie additive.

Un settore in cui queste tecnologie hanno sempre più piede è quello della gioielleria. Sono state realizzate macchine di stampa 3D dedicate alla lavorazione di metalli preziosi sviluppate appositamente per la produzione di gioielli e orologi.



Figura 8-9 – Applicazione della FA per la gioielleria e sistema di L-PBF prodotto da Sisma Group (Fonte: 3DHubs.com e Sisma.com)

Tali sistemi possono essere più piccoli e relativamente meno costosi dei sistemi utilizzati per la stampa di componenti per i settori aerospaziale e automotive. Inoltre, le opere d'arte e i gioielli non richiedono lo stesso livello di certificazioni e controlli richiesti, rendendo questa tipologia di produzione un terreno fertile per i processi additivi. È possibile realizzare progetti artistici in metallo che non possono essere prodotti con nessun altro metodo, consentendo contemporaneamente l'utilizzo di una ridotta quantità di materiale e razionalizzando la produzione in base alle richieste (2).



9. Caso studio: Progettazione di uno scambiatore di calore per settore automotive

Le attività di ricerca svolte nell'area tecnica del *WCM – Research & Innovation* del CRF permettono il conseguimento di un duplice obiettivo per FCA: dal lato *marketing* rafforzano l'immagine che il *brand* vuole dare all'esterno. Dal lato tecnico l'analisi dei processi e dei prodotti consente di ottimizzare le risorse riducendo le inefficienze presenti.

La continua attenzione dedicata allo sviluppo di tecnologie e materiali ha condotto il *WCM* allo studio delle tecnologie additive in campo metallico. Lo scopo primario è la valutazione delle soluzioni esistenti, in modo da effettuare un *benchmark* tra produttori di sistemi e produttori di polveri, nonché stabilire l'applicabilità di tali tecniche all'interno di un processo produttivo. Queste attività, oltre alle funzioni già descritte in precedenza, permettono di comprendere sia la maturità della tecnologia, sia la capacità di adattamento in circostanze eterogenee.

In quest'ottica, il seguente studio di tesi riguarda l'applicazione delle tecnologie additive nella riprogettazione e realizzazione di uno scambiatore di calore impiegato nel settore automotive. Tale componente fornito da Magneti Marelli, viene impiegato all'interno di un sistema di recupero del calore dei gas prodotti dalla combustione per la successiva conversione in energia elettrica.

9.1 Descrizione dello scambiatore e del sistema di recupero di calore

Lo scambiatore di calore del sistema di recupero dei gas di scarico è un oggetto costituito da più parti: una struttura reticolare formata da sottili fogli di acciaio (di forma piana e ondulata) disposti alternativamente che rappresenta la canalizzazione interna, un guscio di contenimento della struttura e due flange laterali per la protezione dei componenti del sistema dal flusso di gas.

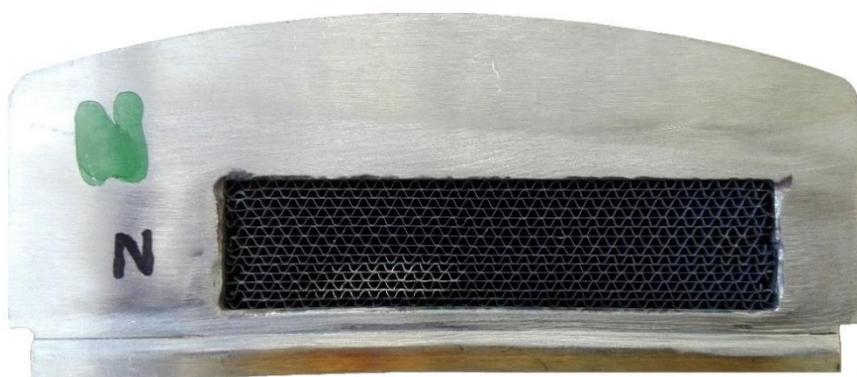


Figura 9-1 – Sezione frontale dello scambiatore di calore per gas di scarico



Figura 9-2 – Vista prospettica dello scambiatore di calore per gas di scarico

L'ingombro della sezione frontale del guscio esterno (escluse le flange) risulta essere pari a 95 mm x 25 mm con spessore di parete della lamiera pari a 1,5 mm e profondità di 154 mm.

Le flange hanno un'estensione frontale massima di 141,5 mm x 59,9 mm e spessore pari a 1,5 mm. Il blocco che forma la struttura reticolare interna ha profondità pari alla lunghezza del guscio di contenimento e una sezione frontale pari a 92 mm x 22 mm. Il materiale in cui sono realizzate le parti dello scambiatore è l'acciaio inossidabile austenitico AISI 304. Lo scambiatore di calore di figura 9.2 rappresenta il cosiddetto 'lato caldo' del sistema di recupero di calore, al cui interno scorrono i gas di scarico.

Analizzando il flusso energetico di un sistema ICE (figura 9.3) e supposta una potenza disponibile di 100 kW, si osserva che, a causa dell'energia dissipata sotto forma di attriti e calore nei sistemi di raffreddamento e scarico, il rendimento dell'intero sistema è pari a circa il 20%. Per tale ragione, sono sempre più oggetto di studio i sistemi atti a recuperare parte di queste dispersioni. Nonostante la quota di calore dispersa nel sistema di raffreddamento sia maggiore rispetto a quella dissipata nel sistema di scarico, è necessario specificare che quest'ultima sia più pregiata, ovvero presenti un'exergia¹⁴ maggiore. Il calore dei sistemi di scarico è generalmente a temperature maggiori (circa 700 °C) rispetto a quello del sistema di raffreddamento (80°C).

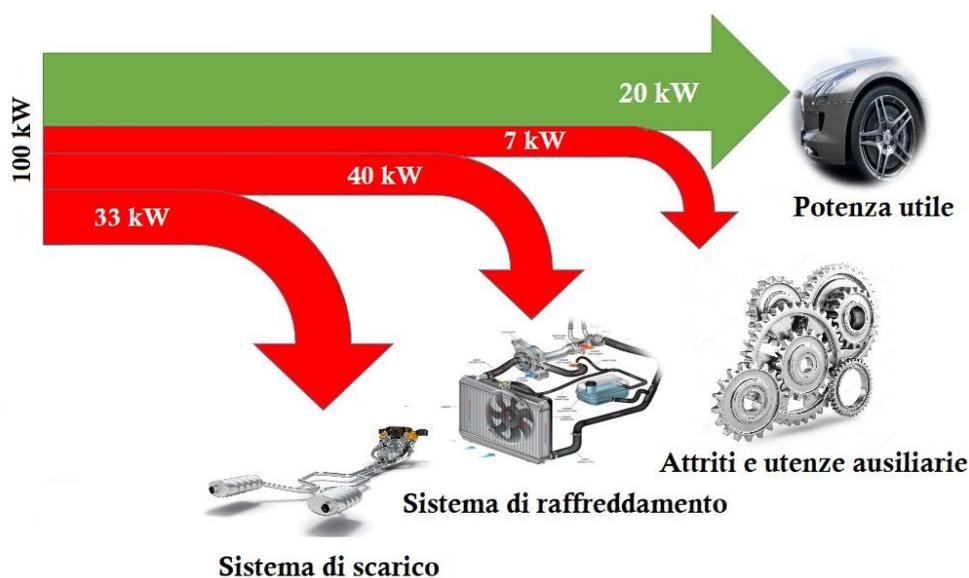


Figura 9-3 – Flusso energetico di un motore a combustione interna

¹⁴ Exergia: massima frazione di energia di prima specie (meccanica, potenziale, cinetica...) che può essere convertita in lavoro meccanico mediante una macchina reversibile. È impiegata in ambito della termo-economia per valutare il valore economico di un flusso energetico (fonte: Wikipedia.org).

La collocazione del sistema di recupero del calore avverrebbe a valle del sistema di trattamento dei gas di scarico e a monte del silenziatore terminale (figura 9.4). Questa scelta consegue alla necessità di assicurare temperature elevate nel catalizzatore e consentire l'innesco delle reazioni di catalisi.



Figura 9-4 – Posizionamento del sistema di recupero del calore dei gas

Se il sistema fosse posto a monte del catalizzatore trivalente, da un lato aumenterebbe il calore estratto dal sistema di recupero (e quindi la corrente prodotta dal modulo termoelettrico), dall'altro non verrebbe garantita la conversione degli inquinanti della combustione.

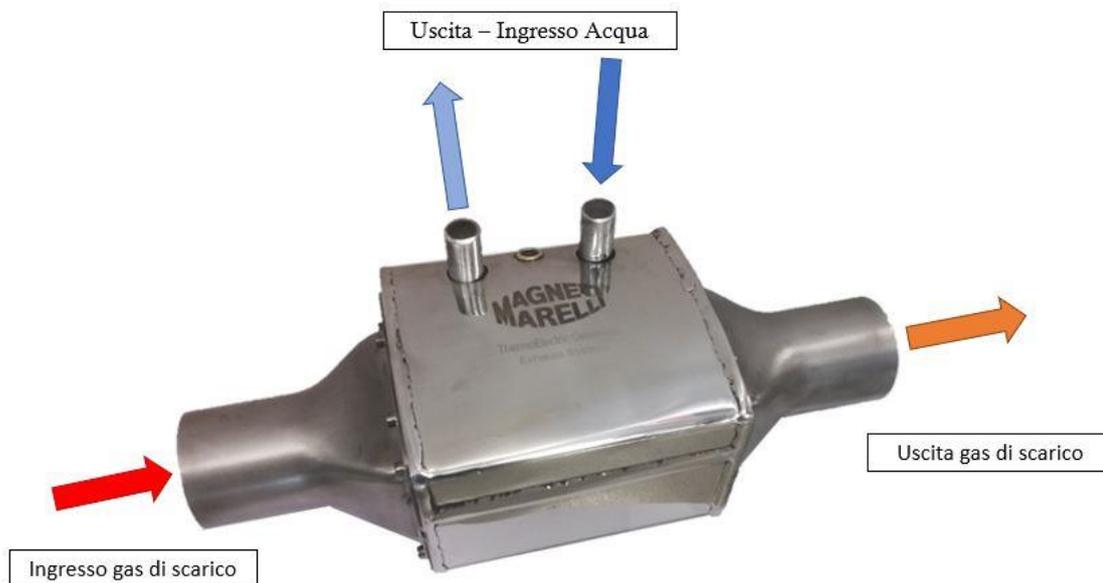


Figura 9-5 – Vista prospettica del sistema di recupero del calore dei gas

In figura 9.5 è riportato il sistema di recupero impiegato da Magneti Marelli. Come è possibile osservare dall'esplosione della geometria è internamente costituito da un doppio

scambiatore in cui fluiscono i gas combusti (figura 9.6 e 9.7). Tra questi due componenti sono interposti altri componenti necessari per il completamento del sistema.

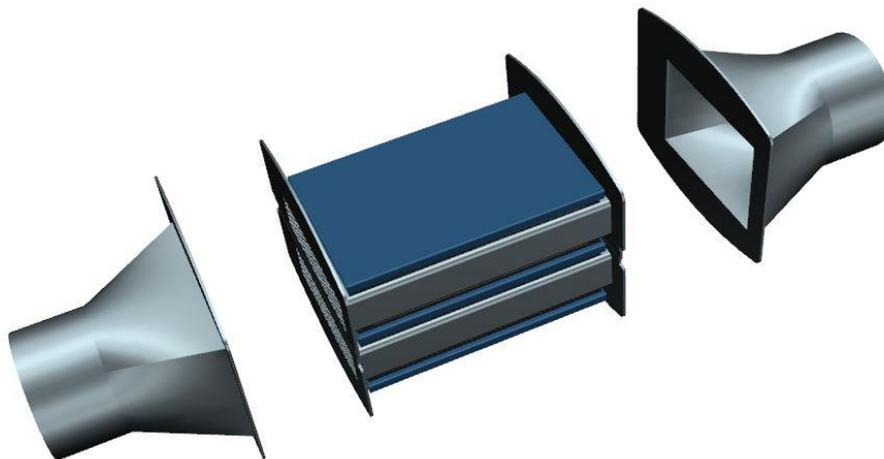


Figura 9-6 – Esploso del sistema di recupero del calore

Durante il lavoro di tesi è stato preso in esame solamente metà sistema di recupero del calore. Considerando come riferimento uno dei due scambiatori a gas, la disposizione dei componenti è simmetrica rispetto allo scambiatore stesso (figura 9.8).



Figura 9-7 – Vista interna del sistema di recupero del calore

Pertanto, la sua architettura può essere descritta seguendo una delle due direzioni. Partendo dalla superficie superiore del 'lato caldo', vengono in ordine posti (figura 9.8):

- Un primo foglio in grafite dello spessore di 0,2 mm (rappresentato in nero);
- Un modulo termoelettrico (*TEG Module*) di altezza pari a 4 mm e superficie orizzontale di scambio termico pari a 85x125 mm², posto centralmente rispetto allo scambiatore lato caldo (rappresentato in bianco);
- Un secondo foglio in grafite dello spessore di 0,2 mm (rappresentato in nero);
- Uno scambiatore di calore in alluminio (rappresentato in blu) al cui interno fluisce acqua a 80 °C (lato freddo), di altezza pari a 6 mm e superficie di scambio termico longitudinale pari a 95x144 mm², posto centralmente rispetto allo scambiatore lato caldo. Lo spessore della parete dello scambiatore è pari a 1,5 mm. Al suo interno è suddiviso lungo tutto la sua lunghezza da 8 setti di spessore pari a 0,5 mm.

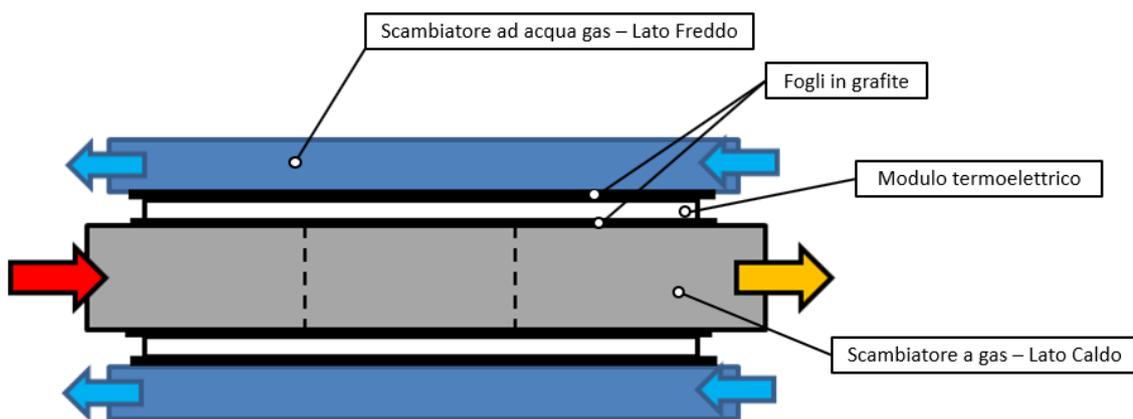


Figura 9-8 – Schematizzazione parziale del sistema di recupero del calore

I fogli in grafite fungono da interfacciamento termico tra scambiatore ad acqua e modulo termoelettrico e tra scambiatore a gas e modulo. La grafite essendo un materiale deformabile, permette di assorbire eventuali irregolarità superficiali degli scambiatori. In tal modo aumentano i punti di contatto tra le superfici e migliora lo scambio termico.

Il modulo termoelettrico, detto anche generatore termoelettrico, è il componente che permette la conversione del calore in energia elettrica, rappresentando il nucleo del sistema.

9.2 Generatore termoelettrico (TEG)

Il principio di funzionamento di un generatore termoelettrico si basa sull'*effetto Seebeck*, che verrà analizzato dettagliatamente nel paragrafo successivo. Internamente è costituito da blocchetti di materiale semiconduttore con differente drogaggio (figura 9.4), ovvero del tipo P (drogaggio con atomi accettori) e del tipo N (drogaggio con atomi donori). Ogni coppia di semiconduttori P-N forma una *termocoppia*. I moduli termoelettrici sono costituiti da un grande numero di termocoppie con connessione in serie, se si desidera avere una tensione elevata in uscita, o con connessione in parallelo, se si intende avere elevata corrente in uscita (19).

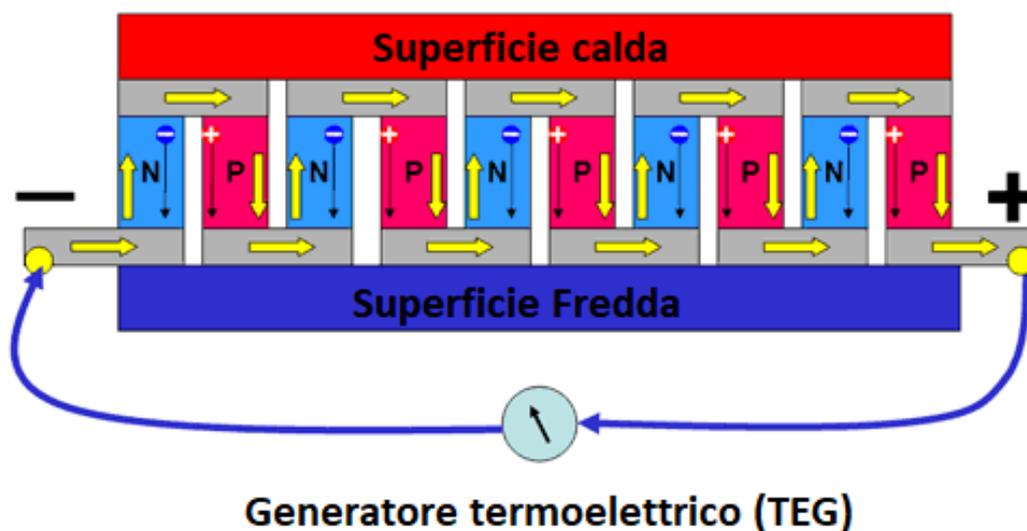


Figura 9-9 – Schematizzazione di un generatore termoelettrico (Fonte: Ne555.it)

I materiali impiegati devono possedere un'elevata conducibilità elettrica e una bassa conducibilità termica, poiché il lato freddo deve essere ben isolato dal lato caldo. Sebbene siano disponibili molti tipi di leghe, la coppia tellurio-bismuto è quella più comune oggi, ed è quella di cui sono costituite le termocoppie del suddetto sistema di recupero di calore. Gran parte dei produttori di generatori termoelettrici inglobano le termocoppie all'interno di un involucro realizzato con materiali non conduttivi elettricamente ma in grado di garantire un buono scambio termico. Per tali motivi l'involucro è spesso realizzato in materiale ceramico (20).

Secondo lo studio di K. T. Zorbas, E. Hatzikraniotis e K.M. Paraskevopoulos dell'Università di Tessalonica su un modulo termoelettrico impiegato per il settore automotive, è possibile ottenere efficienze di conversione del 5,4% (potenza estratta pari a 2,6 W con temperatura del lato caldo pari a 220 °C) (21) .

Mauro Brignone, *Innovation Responsible* di Magneti Marelli, suggerisce che, per il caso studio preso in considerazione, l'efficienza dell'intero sistema di recupero si attesti tra il 4 e il 5%. Per concludere asserisce che "la potenza estratta da questi sistemi è dell'ordine di 200-300 W."

9.3 Effetto Seebeck

Nel 1821 il fisico tedesco Thomas Seebeck scoprì che quando due fili metallici di materiali differenti (nel caso della scoperta furono impiegati rame e bismuto) vengono uniti alle loro estremità per formare un circuito chiuso, si genera una differenza di potenziale se le due giunzioni sono mantenute a temperatura diversa. Per tale motivo si genera una *termocoppia* (22).

Per comprendere meglio tale effetto, si consideri un circuito chiuso costituito da due metalli differenti, come rame e ferro (figura 9.5). Nel circuito viene inserito un galvanometro. Quando una delle giunzioni viene mantenuta calda e l'altra fredda, una corrente comincia a fluire dal rame verso il ferro nella giunzione calda e dal ferro verso il rame nella giunzione fredda. La corrente generata prende il nome di *corrente termoelettrica*. L'esistenza della corrente implica l'esistenza di una forza elettromotrice nel circuito, che prende il nome di *forza elettromotrice termoelettrica* (in inglese *thermoelectric emf*).

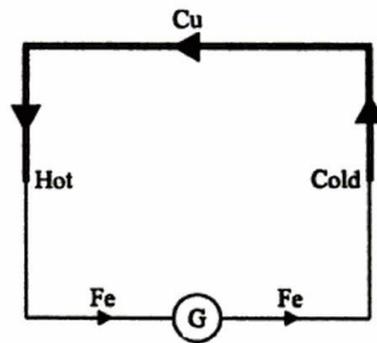


Figura 9-10 – Termocoppia Cu-Fe (Fonte: Comprehensive Physics XII)

Tale fenomeno termoelettrico è perfettamente reversibile: se la giunzione calda e quella fredda vengono invertite, la forza elettromotrice cambia segno e la direzione della corrente si inverte. Supponendo di aprire il circuito, la differenza di potenziale misurata tra la giunzione fredda a temperatura T_c e la giunzione calda a temperatura $T_h (> T_c)$ è pari a:

$$\Delta V = V_A - V_B$$

Dove con A e B sono indicati i materiali costituenti la termocoppia.

La forza elettromotrice di una termocoppia è data dalla seguente semplice relazione:

$$V = \alpha T + \frac{1}{2} \beta T^2$$

In cui α e β rappresentano le *costanti termoelettriche* e T rappresenta la differenza di temperatura tra giunzione calda e fredda. Tuttavia, la relazione precedente è approssimata ed è ragionevolmente valida per un intervallo limitato di temperature. Poiché l'equazione precedente è quella di una parabola, l'andamento della tensione in funzione della temperatura sarà parabolico. La tabella 6 fornisce i valori delle costanti termoelettriche nell'intervallo di temperatura tra 200 K e 400 K per diversi materiali (il piombo è preso convenzionalmente come riferimento di uno dei due materiali metallici poiché presenta una bassa *potenza termoelettrica*).

Elemento	α [$\mu\text{V/K}$]	β [$\mu\text{V/K}$]
Alluminio	-0,76	+0,0039
Bismuto	-43,7	-0,465
Rame	+1,34	+0,0094
60% Rame – 40% Nickel	-38,1	-0,089
Oro	+2,80	+0,010
Ferro	+17,2	-0,048
Palladio	-7,4	-0,039
Platino	-3,04	-0,033

Tabella 6 – Coefficienti α e β dei principali materiali metallici

L'intensità e la direzione della forza elettromotrice non dipendono solamente dalla differenza di temperatura tra la giunzione calda e quella fredda, ma anche dalla natura dei metalli costituenti la termocoppia. Seebeck studiò il comportamento di molte coppie di metalli e realizzò una serie conosciuta come *Serie di Seebeck*:

Sb	As	Fe	Cd	Zn	Ag	Au	Mo	Sn	Pb	Hg	Mn	Cu	Pt	Co	Ni	Bi
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tabella 7 – Serie di Seebeck

La corrente termoelettrica fluisce da un metallo che si trova prima nella serie verso un metallo che si trova dopo nella serie, quando attraversa la giunzione fredda. Mentre, fluisce da un metallo che si trova in fondo alla serie verso un metallo che si trova all'inizio della serie quando attraversa la giunzione calda. L'intensità della forza elettromotrice dipende anche da quanto sono distanti i metalli nella serie. Per esempio, la termocoppia Bi-Sb è quella più efficiente e permette di generare la massima forza elettromotrice.

Si riprenda in considerazione la termocoppia rame-ferro introdotta in precedenza e si supponga di immergere una giunzione in una sorgente di calore e l'altra mantenerla a contatto con del ghiaccio. Il galvanometro inserito nel circuito misura una forza elettromotrice. Osservando il suo andamento al variare della temperatura della sorgente calda si ottiene la curva di figura 9.11 (la temperatura della sorgente fredda viene posta come origine del grafico):

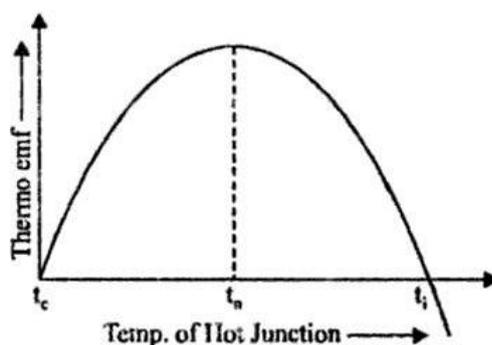


Figura 9-11 – Andamento del potenziale termoelettrico in funzione della temperatura (Fonte: Comprehensive Physics XII)

È possibile osservare che la forza elettromotrice aumenta all'aumentare della temperatura della giunzione calda fino a raggiungere un massimo, in corrispondenza della cosiddetta *temperatura neutrale* T_n , per poi tornare a diminuire. Tale valore dipende solamente dalla natura dei metalli costituenti la termocoppia e non dalla temperatura della giunzione fredda. Ad esempio, per la termocoppia rame-ferro il valore della temperatura neutrale è pari a 548 K. Il valore per il quale la forza elettromotrice si annulla nuovamente e cambia direzione, prende il nome di *temperatura di inversione*. È possibile ricavare la temperatura neutrale dalla seguente relazione:

$$T_n = \frac{T_c + T_i}{2}$$

Il gradiente della forza elettromotrice (rispetto alla temperatura) è detto *potenza termoelettrica*, anche conosciuto come *coefficiente di Seebeck*, ed è espresso in [V/K] (figura 9.12). In formule:

$$\frac{dV}{dT} = \frac{d}{dT} \left(\alpha T + \frac{1}{2} \beta T^2 \right) = \alpha + \beta T = S$$

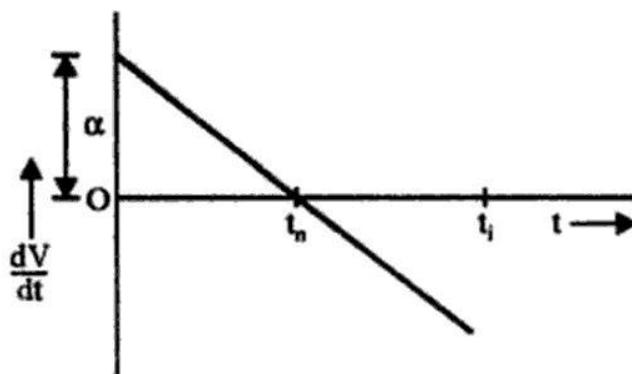


Figura 9-12 – Andamento della potenza termoelettrica (Fonte: *Comprehensive Physics XII*)

Quando la temperatura della sorgente calda è nulla si ha che $T = 0$ e quindi $\frac{dV}{dT} = \alpha$; mentre quando la temperatura coincide con il valore della temperatura neutrale la derivata è nulla. Si può ricavare dalla precedente relazione:

$$\alpha + \beta T_n = 0 \rightarrow T_n = -\frac{\alpha}{\beta}$$

Infine, se $T = T_i$, si ha:

$$T_i \left(\alpha + \frac{1}{2} \beta T_i \right) = 0$$

Scartando la soluzione banale $T_i = 0$, si ottiene: $T_i = -\frac{2\alpha}{\beta}$.

Le prestazioni di una termocoppia dipendono dal coefficiente di Seebeck della coppia di metalli. Poiché è impossibile effettuare un confronto tra tutte le coppie di metalli possibili, il coefficiente di Seebeck di un metallo viene convenzionalmente confrontato con il Platino, il cui coefficiente è pari a zero (23).

In tabella 8 sono riportati i valori dei coefficienti di Seebeck di alcuni metalli valutati a 273 K (0 °C):

Materiale	Coeff. di Seebeck [$\mu\text{V/K}$]	Materiale	Coeff. di Seebeck [$\mu\text{V/K}$]
Selenio	900	Rodio	6
Tellurio	500	Tantalio	4,5
Silicio	440	Piombo	4
Germanio	300	Alluminio	3,5
Antimonio	47	Carbonio	3
Nickelcromo	25	Mercurio	0,6
Ferro	19	Platino	0
Cadmio	7,5	Sodio	-2
Tungsteno	7,5	Potassio	-9
Rame	6,5	Nickel	-15
Oro	6,5	Constantana	-35
Argento	6,5	Bismuto	-72

Tabella 8 – Coefficienti di Seebeck (Fonte: EfunDa.com)

9.4 Applicazioni e benefici dei sistemi di recupero di calore mediante generatori termoelettrici

I sistemi di recupero del calore che utilizzano generatori termoelettrici per la conversione dell'energia termica in energia elettrica tramite l'effetto Seebeck sono una soluzione attualmente in fase di sviluppo nel campo automotive ma già conosciuta in altri settori. L'utilizzo in campo aerospaziale ha permesso di mettere in evidenza i benefici consentiti con l'impiego di questi sistemi, favorendo la promozione per ulteriori applicazioni. Un esempio ha riguardato il progetto della sonda *Voyager 2* (figura 9.13) lanciata nel 1977, la quale sfrutta una sorgente a radioisotopi¹⁵. È attualmente ancora in funzione.



Figura 9-13 – Sonda Voyager 2 (Fonte: Centrometeoitaliano.it)

Il principale vantaggio di questi sistemi deriva dalla mancanza di organi con parti in movimento, a differenza di quanto avviene in una turbina. Questo consente una riduzione della complessità realizzativa e ne semplifica la manutenzione. Non sono infatti richiesti interventi sostitutivi di parti usurate, né di parti logorate per invecchiamento.

Nel settore automotive, la generazione di energia elettrica sfruttando il calore dei gas combusti può essere realizzata tramite i moduli TEG o installando un generatore di vapore basato su ciclo *Rankine*.

¹⁵ Modulo TEG a radioisotopi: è composto da una fonte di calore e un sistema per la conversione del calore in elettricità. La fonte di calore, il modulo *General Purpose Heat Source* (GPFS), contiene un radioisotopo, il plutonio 238, che si riscalda a causa del proprio decadimento radioattivo. Il calore è trasformato in elettricità da un convertitore termoelettrico che sfrutta l'effetto Seebeck (fonte: Wikipedia.org).

Entrambe le soluzioni sono state valutate in campo di ricerca evidenziando relativi vantaggi e svantaggi. La prima tipologia di sistema presenta efficienze di conversione piuttosto basse (del 4-5%) ma consente di ridurre gli ingombri a fronte di una media complessità costruttiva. I sistemi basati su ciclo *Rankine* da un lato consentono efficienze di conversione molto più elevate (40-50%), ma il loro ingombro è tale da non poter renderne possibile l'installazione negli autoveicoli odierni. Le uniche categorie di veicoli su cui questa soluzione risulta applicabile sono quelle dei *Light Duty* ed *Heavy Duty*. Inoltre, nei sistemi ICE la gestione del surplus di energia elettrica prodotta rappresenta un problema non facilmente risolvibile. I benefici ottenibili introducendo i sistemi TEG nel settore automotive sono numerosi. Questi sistemi sono molto versatili in quanto applicabili sia ai motori a combustione interna (gasolio e benzina), sia ai veicoli di più recente concezione ibrida (nelle varie configurazioni *Micro*, *Mild* e *Plug-In*).

Per quanto riguarda l'applicazione ai motori a combustione interna è possibile:

- Ridurre la produzione di CO₂ grazie ai ridotti carichi di lavoro dell'alternatore;
- Ridurre la produzione di CO₂ grazie alla riduzione del tempo di riscaldamento del motore;
- Eseguire un *downsizing* dell'alternatore;
- Aumentare il comfort interno all'abitacolo grazie al riscaldamento più rapido.

Grazie alla quota di energia elettrica ottenuta recuperando parte del calore dei gas combusti, il carico di lavoro a cui è soggetto l'alternatore risulta minore, riducendone l'intervento. Per tale motivo il motore termico è favorito nel consumare una minore quantità di combustibile e quindi emettere meno CO₂. Inoltre, specialmente ai bassi regimi di funzionamento, il calore asportato dai gas consente di riscaldare più velocemente l'acqua del sistema di raffreddamento e quindi ridurre il relativo transitorio. Questo riduce ulteriormente le emissioni di CO₂ nell'ambiente.

Infine, la riduzione dell'intervento dell'alternatore consente l'utilizzo di un modello più piccolo, favorendo una riduzione dei costi.

L'applicazione del sistema di recupero del calore nei veicoli ibridi consente invece:

- Risparmio e ottimizzazione dell'energia elettrica grazie alla ricarica diretta della batteria da 12 V;
- Possibilità di ricarica della batteria da 48 V (presente nei veicoli *Mild-Hybrid*);

- Condizioni di funzionamento ottimali del modulo TEG in caso di veicolo ibrido serie del tipo *Range Extender*¹⁶;
- Riscaldamento più rapido del sistema di trazione (motore termico, batterie, ecc.);
- Aumento del comfort interno all'abitacolo grazie ad un più rapido riscaldamento.

Nel caso di veicoli ibridi serie, il motore termico lavora a punto fisso a massima efficienza. Questa condizione, estremamente desiderata, assicura una portata costante di gas al sistema di scarico e dunque permette il mantenimento delle prestazioni del modulo TEG al punto di funzionamento ottimale.

Poiché le batterie presentano un ristretto intervallo di temperatura alla quale si ha la massima efficienza (circa 10°C), la possibilità di portare più velocemente la loro temperatura al punto di funzionamento ottimale consente prestazioni superiori (o perlomeno costanti) del motore elettrico, favorendo un aumento dell'autonomia.

¹⁶ Range Extender: Architettura ibrida di tipo serie. Il motore termico è completamente disaccoppiato dalle ruote e può girare a qualsiasi velocità (generando energia elettrica per ricaricare la batteria). Il motore elettrico è dimensionato per fornire la massima potenza alle ruote e viene alimentato dalla batteria.

9.5 Realizzazione dello scambiatore di calore a gas ed aspetti critici

La struttura interna dello scambiatore di calore originale è stata ricavata utilizzando la struttura reticolare di un catalizzatore trivalente metallico (figura 9.14) impiegato nei sistemi di trattamento dei gas di scarico.



Figura 9-14 – Struttura interna del catalizzatore trivalente

Queste vengono realizzate con lamine di acciaio molto sottili, aventi forma differente, unite tra loro. La fitta struttura di lamine consente di ottenere un'ampia superficie di scambio e, grazie al sottile spessore, ridurre il peso della parte. A differenza del catalizzatore trivalente, all'interno dello scambiatore non avvengono le reazioni di catalisi e per tale motivo non è necessario applicare i metalli preziosi (palladio, platino e rodio) sulla superficie dei canali. La sua funzione è solamente quella di favorire lo scambio termico con il generatore termoelettrico.

Uno degli aspetti critici del processo produttivo 'tradizionale' dello scambiatore di calore (che ha favorito la riprogettazione mediante Fabbricazione Additiva), è la modalità di unione tra la struttura interna e il guscio di contenimento. Infatti, la parte interna dello scambiatore veniva brasata al guscio esterno (condotto rettangolare formato da 2 semi-gusci a U, brasati l'uno con l'altro).

La brasatura è un processo di unione di due materiali aventi differenti temperature di fusione. Il materiale basso fondente prende il nome di *materiale d'apporto*, mentre quello a più alto punto di fusione è detto *materiale base*. Il processo si realizza riscaldando la parte su cui deve essere eseguita la giunzione ad una temperatura inferiore alla temperatura di fusione del metallo base, ma superiore a quella del metallo d'apporto, in modo da ottenere un forte legame metallurgico. Generalmente si usa distinguere i processi di brasatura in:

- Brasatura *dolce*;
- Brasatura *forte*.

Uno dei vantaggi posseduti dal processo di brasatura (rispetto alla saldatura) è la mancanza della fase di preparazione dei lembi, detta *cianfrinatura*. Tale operazione consiste nella preparazione delle parti da unire, in modo da conferire una forma (tipicamente ottenuta smussando le superfici) che faciliti l'unione tra metallo di base e metallo d'apporto.

La brasatura è detta dolce se la temperatura di fusione del materiale di apporto è inferiore a 450°C. L'aggettivo dolce fa anche riferimento alle caratteristiche meccaniche possedute dalla giunzione, che generalmente sono inferiori a quelle ottenute con il processo di brasatura forte. I materiali di apporto più utilizzati sono le leghe stagno-piombo, mentre se si vuole ottenere un giunto più resistente vengono impiegate leghe stagno-zinco, piombo-argento o cadmio-argento.

La brasatura è invece detta forte quando la temperatura di fusione del materiale di apporto è superiore a 450°C. Come già introdotto in precedenza, tale processo si contraddistingue per una maggiore resistenza meccanica posseduta dal giunto realizzato. Il vantaggio di impiegare il processo di brasatura rispetto al processo di saldatura risiede nella minore temperatura raggiunta, che non prevede la fusione del metallo base. Questo implica minori problemi legati alla generazione di zone termicamente alterate e quindi minore generazione di tensioni e distorsioni residue (24). In relazione al metallo base, vengono impiegati differenti metalli d'apporto. Ad esempio, nel caso di leghe ferrose e non ferrose si impiegano leghe a base di rame-argento o rame-fosforo. Nel caso di acciai inossidabili si impiegano leghe di nickel-argento (temperatura di brasatura pari a 925-1200 °C).

Considerando il tipo di applicazione a cui è destinato lo scambiatore di calore e il materiale con cui è realizzato, è presumibile concludere che venga impiegato un processo di brasatura forte.

Le difficoltà riscontrate nell'unione tra la struttura a lamine e il guscio di contenimento produceva in alcuni punti una mancanza di contatto e un conseguente distacco (parziale o totale) delle parti. La scarsa qualità del collegamento dei due componenti si traduceva in una riduzione dell'efficienza dello scambio termico.

9.6 Criteri di riprogettazione dello scambiatore mediante Fabbricazione Additiva

I problemi riscontrati nella realizzazione dello scambiatore di calore (a gas) hanno condotto alla riprogettazione secondo le tecniche di Fabbricazione Additiva. Le motivazioni sono molteplici e vengono di seguito elencate:

- Miglioramento della qualità costruttiva della parte;
- Integrazione di più parti in unico pezzo all'interno dello stesso processo;
- Valutazione di architetture innovative non ottenibili con le tecniche tradizionali;
- Aumento dell'efficienza e delle prestazioni del modulo TEG.

Le tecnologie per la Fabbricazione Additiva metallica permettono, salvo alcune eccezioni, la fusione completa del materiale (sia esso in polvere o in filo) garantendo una maggiore regolarità della struttura e riducendo o addirittura annullando i problemi legati alla mancanza di contatto tra il guscio di contenimento e la struttura reticolare interna. Infatti, uno dei tanti vantaggi consentiti da queste tecnologie è la realizzazione di una parte assemblata all'interno di un unico processo. I risultati che ne conseguono sono la riduzione del numero di operazioni legate alla produzione e assemblaggio delle singole parti e l'eliminazione dei tempi morti presenti tra le fasi. Infine, è possibile eliminare eventuali criticità presenti nelle singole fasi che conferiscono una scarsa qualità al prodotto finito (ad esempio lo scollamento dei fogli in acciaio).

Come già ampiamente discusso nei capitoli 6 e 8, le tecnologie per la Fabbricazione Additiva consentono evidenti vantaggi nella progettazione e realizzazione di geometrie innovative, grazie alla mancanza di molti dei vincoli costruttivi presenti con le tecnologie produttive basate sull'asportazione di truciolo. Specialmente in attività di ricerca come la suddetta, in cui è importante valutare gli effetti delle modifiche apportate ai modelli CAD, la possibilità di realizzare geometrie differenti all'interno dello stesso *job* rende queste tecnologie particolarmente adatte all'impiego.

L'obiettivo principale della riprogettazione dello scambiatore a gas è la riduzione della variazione di temperatura sulla superficie calda del modulo termoelettrico.

Per poter spiegare quanto detto è utile riprendere alcuni concetti introdotti sull'Effetto Seebeck. Il modulo TEG è costituito da una serie di termocoppie P-N ognuna delle quali misura una differenza di temperatura locale in seguito alla temperatura della giunzione calda (scambiatore a gas) e della giunzione fredda (scambiatore ad acqua). Mentre sul lato freddo del modulo la variazione della temperatura è quasi nulla (grazie all'elevata capacità termica dell'acqua), tale considerazione non risulta essere valida per il lato caldo.

In base al gradiente di temperatura rilevato tra giunzione calda e fredda, ogni termocoppia genera una corrente termoelettrica corrispondente. Poiché ogni termocoppia svolge il ruolo di generatore di corrente, si intuisce che la generazione di correnti con differenti intensità conduce a una riduzione dell'efficienza globale del modulo TEG. Come nel caso di un generatore fotovoltaico, in cui la presenza di celle a bassa efficienza limita indirettamente l'efficienza delle celle a più alta efficienza, le termocoppie che generano una corrente inferiore limitano il funzionamento delle termocoppie che generano una corrente superiore, essendo connesse in serie. Ne risulta un decadimento globale delle prestazioni del modulo. Per tale motivo, si andrà a valutare differenti soluzioni costruttive dello scambiatore di calore a gas in modo da ridurre la variazione di temperatura sulla superficie calda del modulo.

Facendo riferimento allo schema fornito da Magneti Marelli (figura 9.15), è stato possibile stabilire un primo parametro di riprogettazione dello scambiatore, ovvero la suddivisione in sezioni (o blocchi). L'immagine mostra che la suddivisione in più sezioni interne (mantenendo costante la lunghezza dello scambiatore), consente una riduzione del gradiente di temperatura sulla superficie calda del modulo. La struttura di ogni sezione deve essere tale da presentare una superficie di scambio termico incrementale (e quindi un maggiore numero di canali) rispetto alla sezione di ingresso.

Nel caso di scambiatore con due sezioni, il gas che fluisce all'interno, vedendo una variazione positiva di superficie di scambio, cede più calore in prossimità della zona di interfacciamento tra le sezioni.

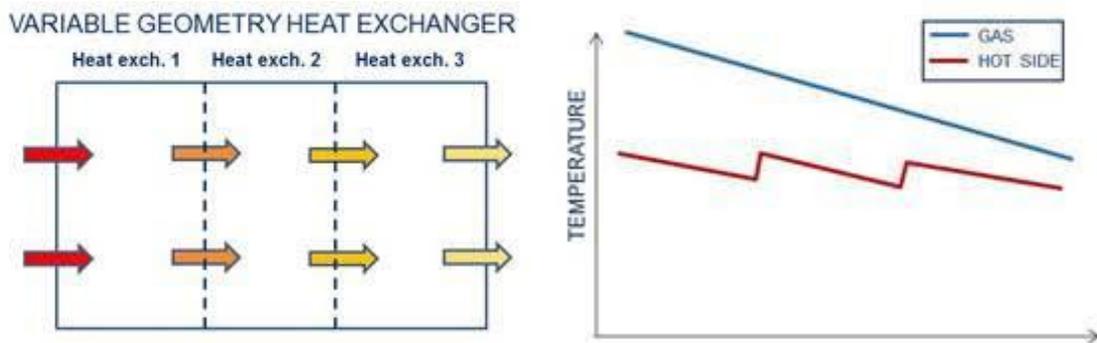


Figura 9-15 – Suddivisione dello scambiatore di calore in più sezioni e andamento temperatura dei gas di scarico e lato caldo del modulo TEG

Il risultato è un aumento della temperatura sulla superficie esterna dello scambiatore. Viene in tal modo ridotta la variazione della temperatura sulla superficie del modulo. L'andamento a gradino del cosiddetto *hot side* rappresenta quanto detto fino ad ora.

La riprogettazione dello scambiatore è stata impostata analizzando quali potessero essere ulteriori caratteristiche o variabili che influissero sulla distribuzione della temperatura. In seguito a questa fase si è deciso di valutare la realizzazione della nuova geometria secondo i seguenti parametri:

- Numero di sezioni dello scambiatore (da 1 a 3);
- Realizzazione di canali triangolari (Sì o No);
- Orientazione delle pareti del reticolo (Verticale o Orizzontale);
- Dimensione del raggio primitivo del canale triangolare e relativo passo (figura 9.16).

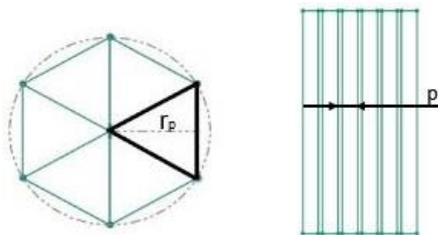


Figura 9-16 – Raggio primitivo dei canali triangolari e passo delle lamine

Per ottenere una rappresentazione più chiara delle architetture da valutare è stato impostato un *Design Of Experiments* (DOE). La tabella 9 mette in evidenza il numero totale di prove da eseguire. Tuttavia, tra le soluzioni disponibili sono state testate solo quelle ritenute più indicative (evidenziate in verde).

Numero di Esperimenti	Numero Sezioni	Canali Triangolari	Passo / Raggio primitivo	Disposizione Lamine
1	1	No	0,79	V
2	2	No	0,79-0,71	V
3	3	No	0,79-0,71-0,63	V
4	1	No	0,79	O
5	2	No	0,79-0,71	O
6	3	No	0,79-0,71-0,63	O
7	1	Si	2,2	V
8	2	Si	2,2-2	V
9	3	Si	2,2-2-1,8	V
10	1	Si	2	V
11	2	Si	2-1,8	V
12	3	Si	2-1,8-1,6	V
13	3	Si	3-2,4-1,6	V
14	3	Si	3-1,8-1,6	V
15	1	Si	2,2	O
16	2	Si	2,2-2*	O
17	3	Si	2,2-2-1,8	O
18	1	Si	2	O
19	2	Si	2-1,8	O
20	3	Si	2-1,8-1,6	O
21	3	Si	3-2,4-1,8	O
22	3	Si	3-1,8-1,6	O

Tabella 9 – Design of Experiments delle architetture analizzate

9.7 Realizzazione delle nuove geometrie mediante software CAD NX

Una delle principali attività svolte all'interno del lavoro di tesi è stata la realizzazione delle geometrie elencate nel DOE, mediante l'ausilio del software CAD NX. Il punto di partenza dal quale è stato possibile ricavare alcune quote indicative per ricostruire le nuove geometrie, è stato il file in formato STEP fornito da Magneti Marelli (MM) (figura 9.17). Tale file conteneva al suo interno la geometria dello scambiatore a gas, già modificata rispetto al caso originale (architettura dello scambiatore suddivisa in due sezioni e costituita da canali a sezione triangolare e lamine orizzontali¹⁷).

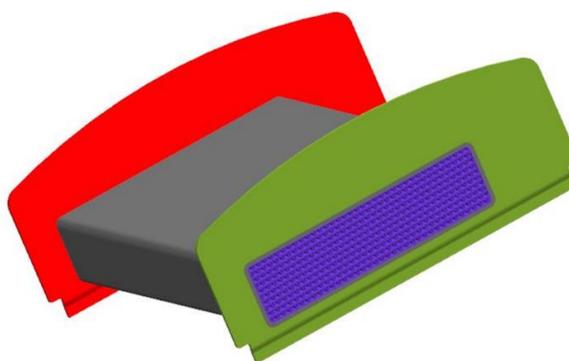


Figura 9-17 – Vista prospettica dello scambiatore di calore fornito da Magneti Marelli

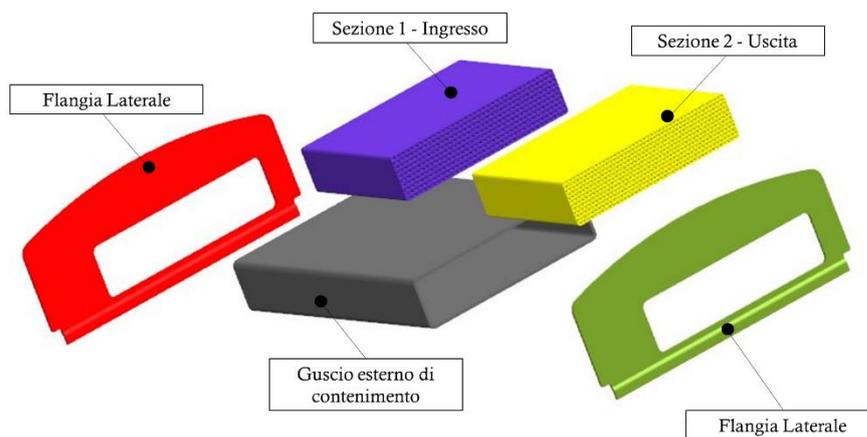


Figura 9-18 – Esploso dello scambiatore di calore

Poiché l'obiettivo di questo lavoro è stato stabilire quale incidenza avessero le varie geometrie dei canali sulle prestazioni dello scambiatore, ne è stata semplificata la geometria,

¹⁷ Lamine orizzontali: con questa terminologia si vuole intendere l'orientazione data ai fogli piani che costituiscono la struttura reticolare.

considerando il solo corpo centrale ed escludendo quindi le flange laterali. Così facendo è stato possibile semplificare il modello in vista delle successive analisi CFD.

In assenza di analisi di riferimento riguardo le prestazioni dello scambiatore di calore originale (architettura a una sezione costituita da lamine orizzontali e canali a sezione triangolare) che permettessero un confronto con le soluzioni valutate successivamente, è stato necessario riprodurre anche tale geometria, ricostruendo il suo profilo dalla prima sezione presente nella geometria fornita da MM (figura 9.18). Una delle prime difficoltà riscontrate nell'utilizzo di tale file è stata la mancanza della *Lista delle Feature*. Infatti, dopo aver importato il CAD su NX, non è stato possibile visualizzare l'elenco delle *Feature* (operazioni eseguite) e quindi modificarlo direttamente. Questo ha richiesto la generazione 'da zero' di tutte le geometrie analizzate successivamente, usando il file STEP solo come riferimento per le quote di interesse. In figura 9.19 viene riportata la sezione frontale dello scambiatore originale ricostruito, in cui si può osservare la mancanza delle flange laterali. Tale sezione una volta realizzata è stata estrusa per una lunghezza pari alla lunghezza totale dello scambiatore di calore (154 mm).

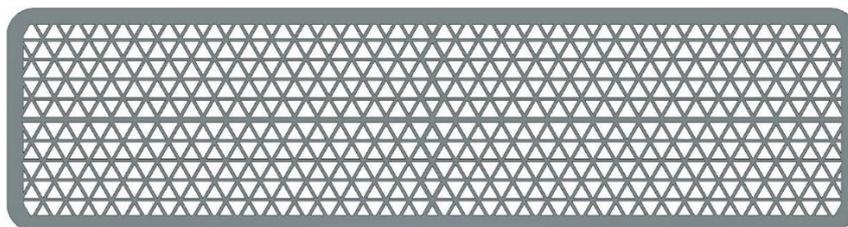


Figura 9-19 – Sezione frontale architettura 1S T&LO, senza flange

Come anticipato all'interno del DOE, l'analisi dello scambiatore si è concentrata sulla realizzazione di geometrie aventi due o più sezioni. Inoltre, è stata presa in maggiore considerazione la realizzazione di sezioni con canali a sezione triangolare e lamine verticali. Questo perché, secondo aspettative, la disposizione verticale delle lamine dovrebbe indirizzare maggiormente il calore verso le superfici di scambio con il modulo TEG, riducendo al contempo le dispersioni lungo le superfici laterali. Tale orientazione data alle lamine rende ancor più adatta l'applicazione delle tecnologie additive, poiché la loro produzione tramite il processo tradizionale richiederebbe tempi e complessità realizzative superiori.

Per importare la geometria CAD all'interno dell'ambiente di simulazione CFD, è stato necessario realizzare lo scambiatore di calore come un corpo unico. Per tale motivo in figura 9.19 non è distinguibile il guscio esterno (di contenimento) dalla struttura interna. Come si può osservare nell'immagine 9.18 invece, la geometria ricevuta da MM era costituita da più parti assemblate. L'importazione di un modello siffatto all'interno nell'ambiente di simulazione sarebbe più complessa: ogni solido dovrebbe essere suddiviso nelle superfici (interne ed esterne) che lo costituiscono. Vista la complessità della struttura interna, costituita da molti canali, aumentare il numero di componenti aumenterebbe il tempo di elaborazione del *software* e quindi l'importazione della geometria. Un ulteriore problema associato alla realizzazione della geometria CAD multi-sezione è stata la creazione della zona di interfacciamento tra le sezioni. Durante la generazione delle sezioni successive alla prima, il *software* produce alcuni codici di errore quando due lati di due triangoli distinti (facenti parte rispettivamente il primo della sezione precedente e il secondo di quella successiva) sono paralleli tra loro o hanno in comune un vertice del lato del triangolo. Questo errore è dovuto all'incapacità del *software* nello stabilire se tale lato (o punto) faccia parte del volume pieno o di quello vuoto durante la fase di estrusione sottrattiva. Per evitare la generazione di tali errori è stata disegnata in 2D la griglia dei canali che costituiscono la sezione e si è in seguito agito manualmente sui triangoli che potessero generare tali errori, modificandone localmente la forma. Una volta risolto questo tipo di problema è stato possibile procedere con l'estrusione sottrattiva della sezione e ottenere il corpo centrale 'scavato'.

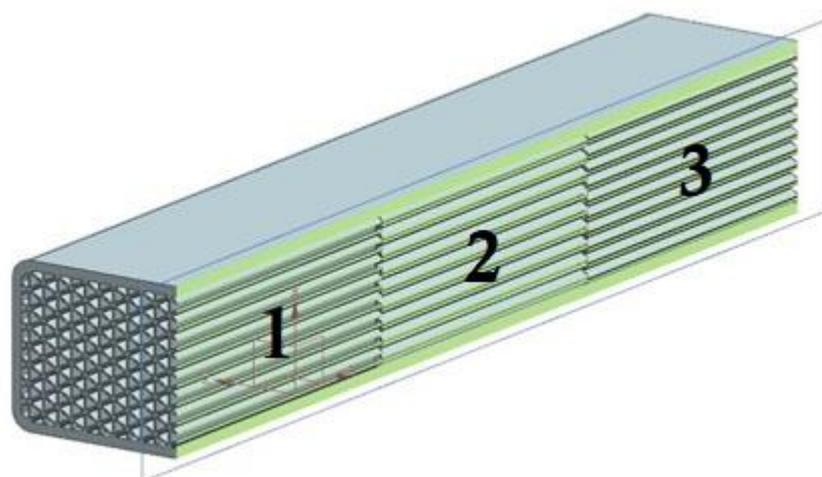


Figura 9-20 – Sezione longitudinale di un'architettura a tre sezioni in ambiente CAD

L'immagine 9.20 mostra la sezione longitudinale del corpo dello scambiatore di calore, in cui si possono distinguere le tre sezioni interne e il *pattern* di canali a sezione triangolare e le lamine verticali sulla sezione frontale.

Una volta prodotta la geometria dello scambiatore (la più complessa in termini di tempo), si è proceduto con la realizzazione dei componenti adiacenti, per poter simulare in ambiente CFD gli scambi termici tra le parti. La struttura analizzata nel seguente lavoro è quella introdotta in precedenza, costituita da: uno scambiatore di calore per i gas caldi (lato caldo), due scambiatori ad acqua (lato freddo), due moduli TEG e quattro fogli di grafite. Indipendentemente dalla struttura interna dello scambiatore a gas è stato necessario riprodurre il modello di figura 9.21 per ogni configurazione analizzata.

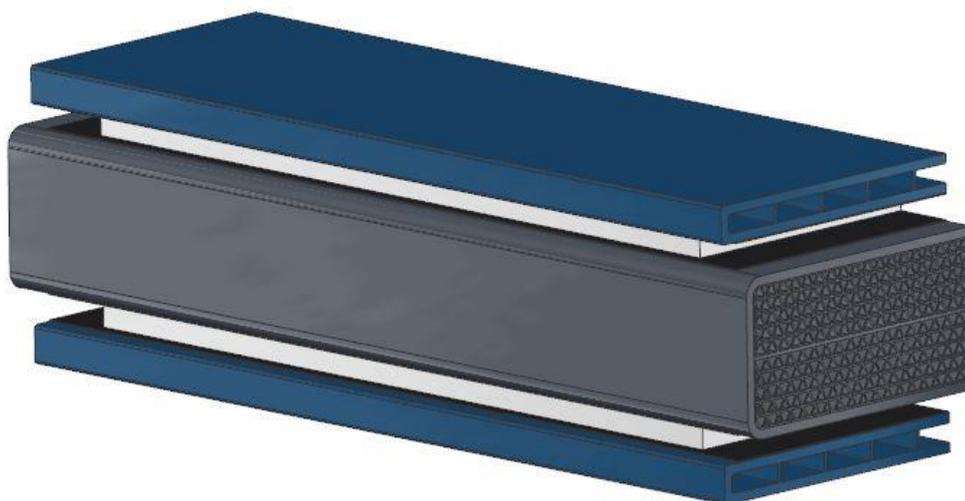


Figura 9-21 – Sezione del sistema di recupero del calore realizzato in ambiente CAD

9.8 Preparazione del modello CAD per l'analisi termo-fluidodinamica (CFD)

L'analisi computazionale termo-fluidodinamica è stata eseguita mediante l'impiego del pacchetto *AcuConsole* di *HyperWorks* che, tra le varie funzioni, consente di eseguire analisi CFD interne su scambiatori di calore, collettori di aspirazione, tubazioni e parti che non presentino oggetti in movimento relativo.

Prima di procedere con l'analisi del sistema di recupero del calore è stato necessario realizzare tramite CAD il volume occupato dal fluido (figura 9.22), sia per lo scambiatore a gas che per gli scambiatori ad acqua. Questa operazione è fondamentale poiché la sua realizzazione permette di descrivere lo scambio termico che si instaura (a differenza del solo caso fluidodinamico) nel mezzo solido e in quello fluido.

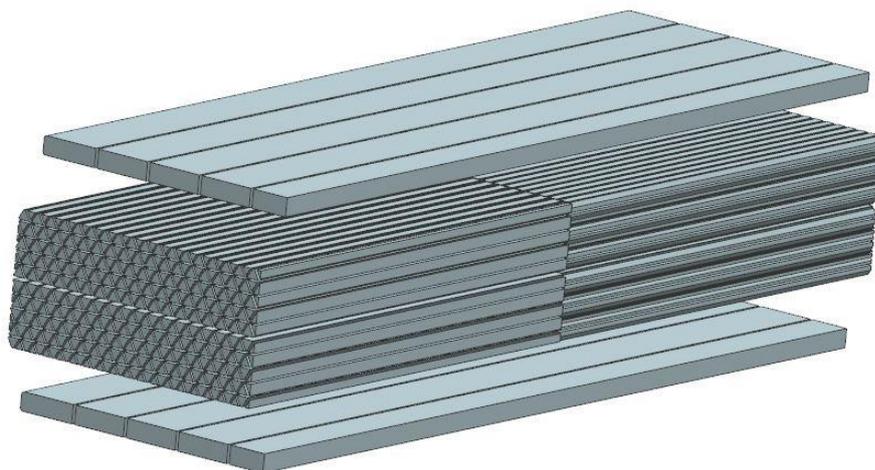


Figura 9-22 – Sezione longitudinale dei volumi fluidi

La generazione di tale volume ha richiesto un'accortezza durante la fase di realizzazione. Ogni volta in cui il fluido passa nei canali dello scambiatore si genera un volume a sé stante, confinato dalle pareti che separano i canali stessi. Poiché una delle operazioni da eseguire in questa fase è la definizione di tutte le superfici che costituiscono la parte (che verranno descritte nel seguito, con un esempio), vengono automaticamente create tante superfici di ingresso (e di uscita) quanti sono i canali che lo costituiscono. Per tale geometria, eseguire un'operazione simile richiederebbe molto tempo e la generazione di un elevato numero di superfici (dette di *Inflow* e *Outflow*) che rallenterebbero l'elaborazione da parte del calcolatore. Per eliminare questo inconveniente, è stata generata in ambiente CAD un'estrusione fittizia

(di profondità pari a 2 mm) in prossimità delle sezioni di ingresso e uscita degli scambiatori (gas e acqua), in modo da ottenere un unico ingresso e uscita per ognuno di essi e dunque una sola superficie di *Inflow* e *Outflow* a cui associare le condizioni iniziali (figura 9.23). Questa operazione ha anche permesso di eliminare l'approssimazione della portata tra i canali che sarebbe stata necessario eseguire.

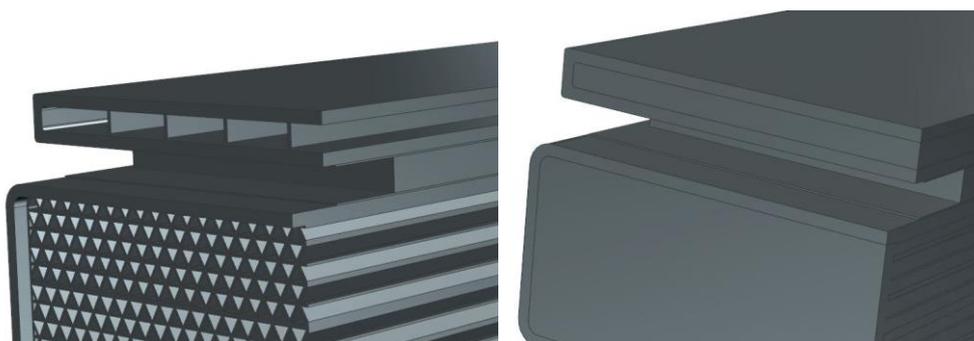


Figura 9-23 – Dettaglio estrusione fittizia dello scambiatore e visualizzazione volume fluido

In seguito, si è proceduto con la conversione del formato del file nativo di NX in uno leggibile da *AcuConsole*. Il formato scelto per l'importazione della geometria CAD è il Parasolid. Dopo aver eseguito l'accesso in *AcuConsole* e creato un *database*, la prima operazione ha riguardato l'importazione della geometria.

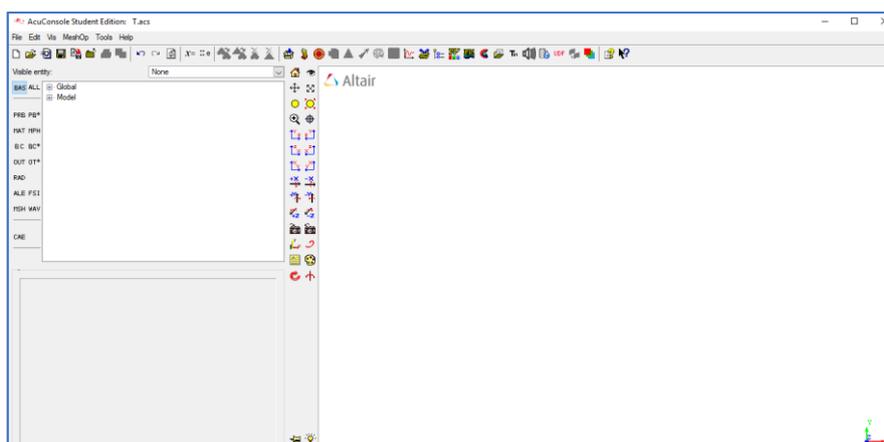


Figura 9-24 – Pagina iniziale di AcuConsole

La finestra visualizzata durante tale fase è riportata figura 9.25:

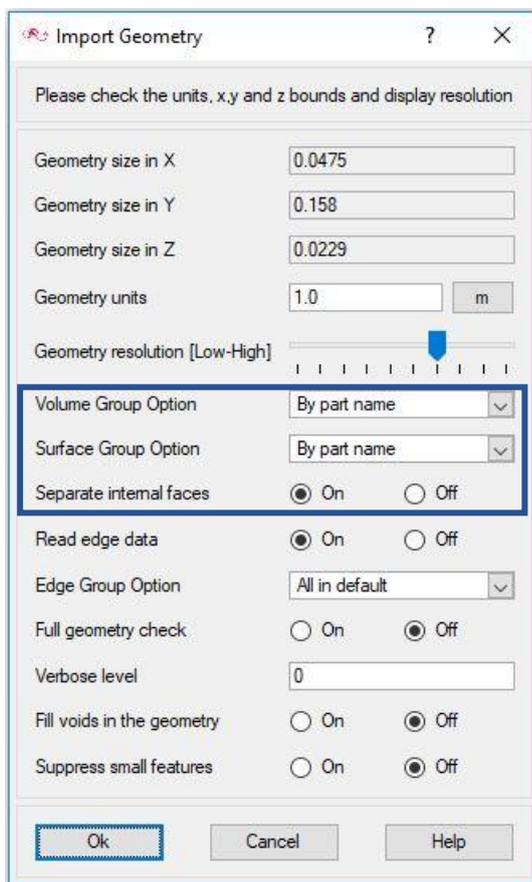


Figura 9-25 – Finestra di importazione della geometria su AcuConsole

Affinché siano importati tutti i solidi che costituiscono la parte da analizzare e in modo che vengano mantenuti separati tra loro, per le voci *Volume Group Option* e *Surface Group Option* è stata impostata l'opzione *By Part Name*. Inoltre, per duplicare le superfici di interfacciamento tra volume solido e fluido (in modo da generare correttamente la superficie esterna dei volumi presenti) è stata selezionata la voce *On* nell'opzione *Separate Internal Faces*.

Data la simmetria del modello secondo due piani ortogonali, per ogni caso studio è stato analizzato solamente un quarto della geometria (riportata in figura 9.26). Ciò ha consentito di ridurre i tempi richiesti per il *setting* e l'analisi.

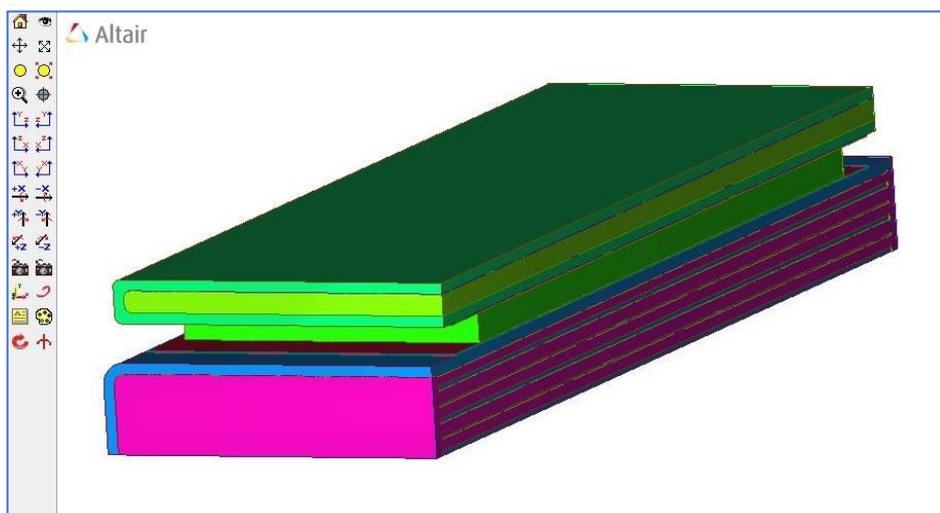


Figura 9-26 – Suddivisione del modello in volumi distinti

Importata la geometria, inizia la fase di *pre-processing* su AcuConsole. Accedendo al menù *Basic Problem Parameters* vengono definite le proprietà globali (voce *Global*) e relative al modello da analizzare (voce *Model*).

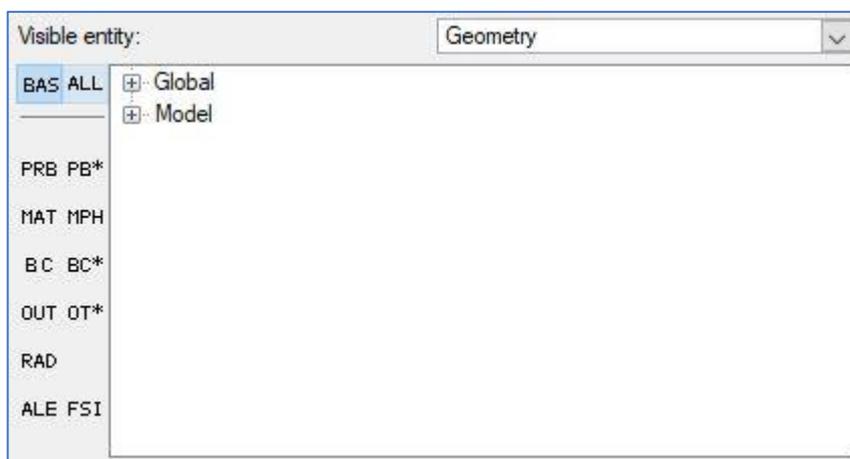


Figura 9-27 – Finestra Basic Problem Parameters su AcuConsole

Nelle impostazioni globali viene descritto il problema fisico, selezionando le equazioni che lo caratterizzano alla voce *Problem Description* (figura 9.28):

Problem Description	
Title	AcuSolve Problem
Sub title	AcuSolve Problem
Analysis type	Steady State
Flow equation	Navier Stokes
Abs. pressure offset	0.0 N/m ²
Viscoelastic equation	None
Temperature equation	Advective Diffusive
Abs. temperature offset	0.0 K
Radiation equation	None
Species equation	None
Turbulence equation	Spalart Allmaras
Turbulence transition model	None
Mesh type	Fixed
Multiphase equation	None
External code	<input type="radio"/> On <input checked="" type="radio"/> Off
Particle trace	<input type="radio"/> On <input checked="" type="radio"/> Off
Running average	<input type="radio"/> On <input checked="" type="radio"/> Off

Figura 9-28 – Finestra della descrizione del problema su AcuConsole

Le voci selezionate per l'analisi sono:

- *Analysis Type.* È possibile selezionare un'analisi di tipo *Transient* (transitoria) o *Steady State* (stazionaria). Poiché in questo caso è di interesse valutare il comportamento dello scambiatore a regime, è stata selezionata l'analisi di tipo *Steady State*.
- *Flow Equation.* Tale equazione permette di descrivere il comportamento fluidodinamico dell'oggetto studiato. Per il caso di interesse è stata scelta l'equazione di Navier-Stokes.
- *Temperature Equation.* È stata attivata tale equazione essendo interessati a conoscere anche il comportamento termico della geometria. Il modello di scambio termico convettivo-diffusivo è denominato *Advective/Diffusive*.
- *Turbulence Equation.* *AcuConsole* permette di selezionare diversi tipi di modelli che descrivono il comportamento laminare o turbolento di un flusso. Supponendo che il comportamento sia turbolento, è possibile scegliere tra diversi modelli (*Spalart Allmaras*, *Standard K-Epsilon*, *RNG K-Epsilon*, *Realizable K-Epsilon*, *Standard K-Ω*).

Per tutte le analisi svolte è stato scelto come modello lo *Spalart Allmaras*.

- *Mesh Type*. Permette di impostare la tipologia di movimento della mesh (se presente). Poiché non è presente un dominio che si sposta nel tempo e nello spazio, è stata selezionata la voce *Fixed*.

Stabiliti i modelli fisici che descrivono il problema si è proceduto con la definizione della strategia risolutiva secondo l'*Auto Solution Strategy*. In questo caso viene automaticamente creata una strategia risolutiva basata sul minor numero possibile di parametri.

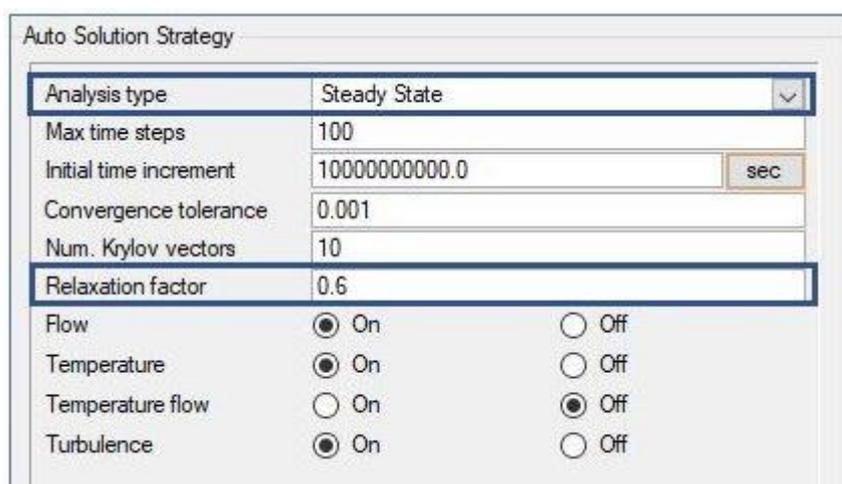


Figura 9-29 – Finestra di Auto Solution Strategy su AcuConsole

È stato necessario specificare anche in questo caso il tipo di analisi che, come in precedenza, è del tipo *Steady State*. Il secondo parametro impostato è il *Relaxation Factor*. Tale valore, impostabile solamente per le analisi stazionarie (altrimenti deve essere nullo), consente di rendere più *smooth* la convergenza della soluzione e ridurre la variabilità dei valori residui (errore commesso dal solutore sull'approssimazione della soluzione del sistema di equazioni), a discapito del numero di iterazioni che tende ad aumentare. Infine, è stata richiesta la definizione dei materiali che costituiscono il modello, impostabili nel menù *Material Model*. I materiali e le variabili ad esso associati sono:

- Aria (Gas caldi)

1. Densità (a 650 °C) $\rho = 0,377 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$;

2. Calore specifico (a 650 °C) $c = 1100 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$;

3. Viscosità (a 650 °C) $\mu = 3,85 * 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m s}};$
 4. Conducibilità (a 650 °C) $\lambda = 0,06 \frac{\text{W}}{\text{m K}};$
- **Acqua**
 1. Densità (a 80°C) $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3};$
 2. Calore specifico (a 80 °C) $c = 4183 \frac{\text{J}}{\text{kg K}};$
 3. Viscosità (a 80 °C) $\mu = 0,001 \frac{\text{kg}}{\text{m s}};$
 4. Conducibilità (a 80 °C) $\lambda = 0,598 \frac{\text{W}}{\text{m K}};$
 - **Alluminio (Scambiatore ad acqua)**
 1. Densità $\rho = 2702 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3};$
 2. Conducibilità $\lambda = 237,0 \frac{\text{W}}{\text{m K}};$
 - **Acciaio inossidabile (Scambiatore gas caldi)**
 1. Densità $\rho = 8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3};$
 2. Conducibilità $\lambda = 16,2 \frac{\text{W}}{\text{m K}};$
 - **Grafite (Fogli di grafite)**
 1. Densità $\rho = 2260 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3};$
 2. Conducibilità $\lambda = 5,0 \frac{\text{W}}{\text{m K}};$
 - **Modulo TEG (Costituito da materiale ceramico e semiconduttori in bismuto-tellurio, valori medi)**
 1. Densità $\rho = 2353 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3};$
 2. Conducibilità $\lambda = 3,7647 \frac{\text{W}}{\text{m K}};$



Figura 9-30 – Material Model su AcuConsole

Terminata l'assegnazione delle proprietà globali si è proceduto con quelle relative al modello.

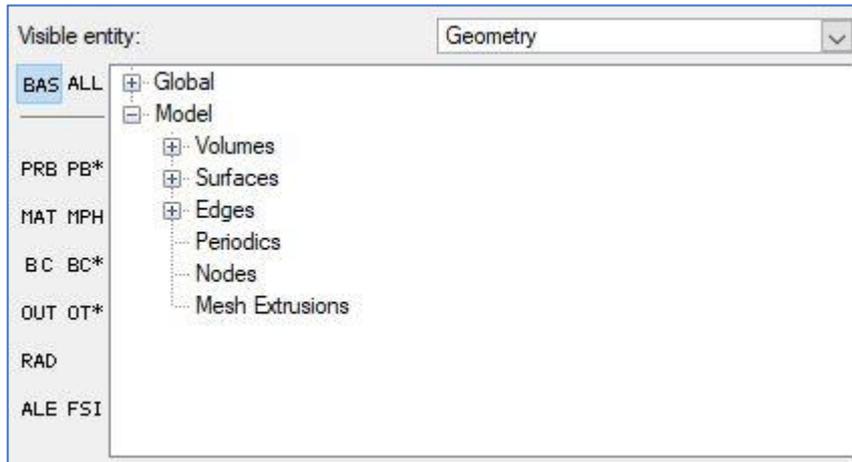


Figura 9-31 – Voci del menù Model su AcuConsole

Avendo attivato durante l'importazione del modello la voce *Separate Internal Faces*, i solidi che compongono l'intera geometria sono suddivisi secondo il volume degli oggetti e secondo le superfici. Definiti i materiali globali, è stato possibile associare ad ogni parte il proprio materiale. L'assegnazione dei volumi viene svolta nel menù *Volumes* tramite il *Volume Manager*:

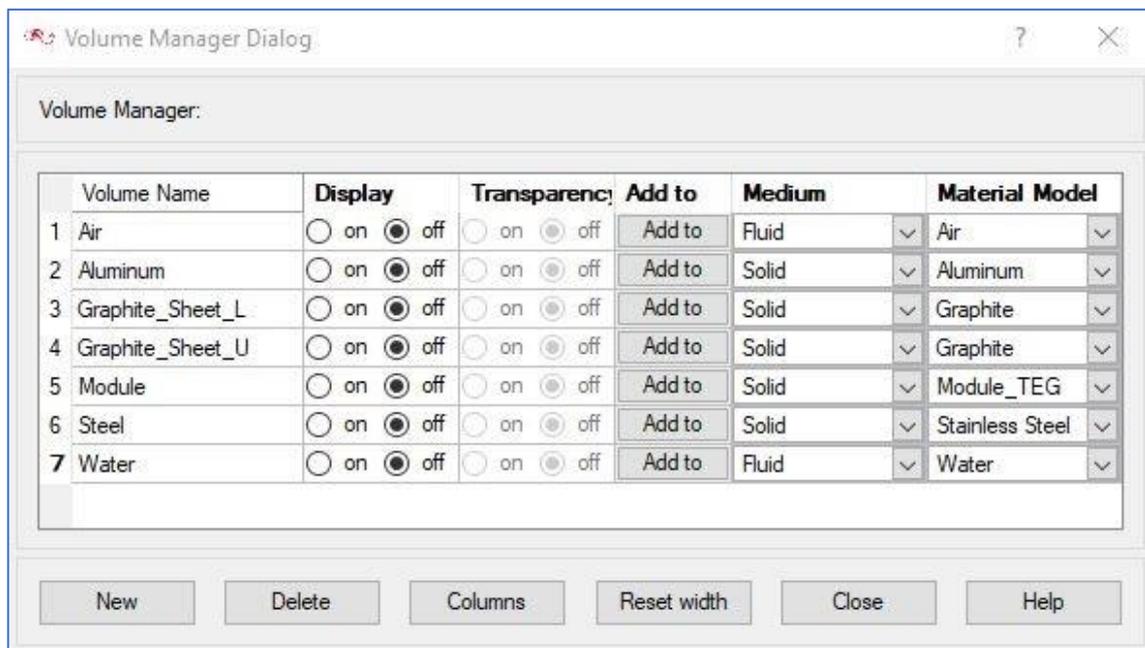


Figura 9-32 – Volume Manager su AcuConsole

In questo modo i volumi presenti vengono rinominati e distinti in base al mezzo (*medium*) di cui sono costituiti (fluido o solido).

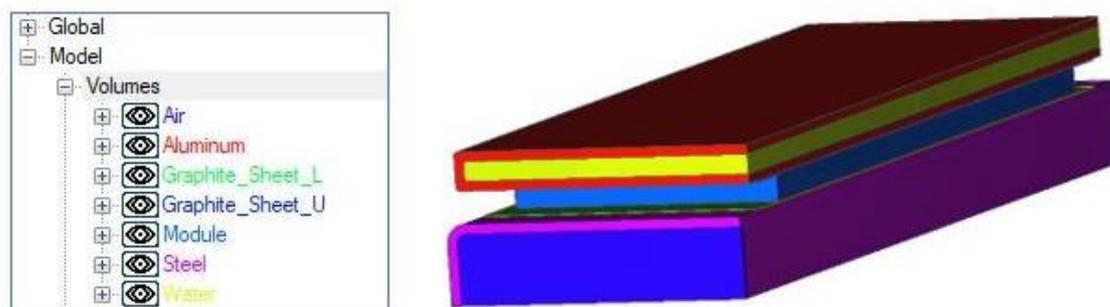


Figura 9-33 – Nomenclatura e rappresentazione dei volumi

Analogamente è stata eseguita un'operazione simile per le superfici che compongono i volumi. *AcuConsole* permette di associare ad ogni superficie una delle seguenti *Boundary Conditions*:

- *Wall* (in corrispondenza di pareti);
- *Inflow* (per ogni ingresso);
- *Outflow* (per ogni uscita);
- *Symmetry* (per superfici di simmetria);
- *Slip* (per pareti senza attrito);
- *Far Field*;
- *Free Surface* (per superfici libere in cui non avviene passaggio di massa).

Ad eccezione delle ultime tre tipologie di BC, il modello considerato ha richiesto l'assegnazione delle superfici *Wall*, *Inflow*, *Outflow* e *Symmetry*. Al tipo *Wall* vengono assegnate tutte le superfici che costituiscono le pareti dei fluidi e dei solidi, sia interne che esterne. Ad esempio (tra parentesi viene specificato il nome dato su *AcuConsole* alle superfici):

- Superficie esterna laterale dello scambiatore ad acqua (*Aluminum_Outer_Surf*);
- Superficie interna laterale dello scambiatore ad acqua (*Aluminum_Inner_Surf*);
- Superficie esterna laterale del volume fluido acqua (*Water_Wall*);
- Superficie esterna laterale dello scambiatore a gas (*Steel_Outer_Surf*);
- Superficie interna laterale dello scambiatore a gas (*Steel_Inner_Surf*);

- Superficie esterna laterale del volume fluido gas (*Air_Wall*).

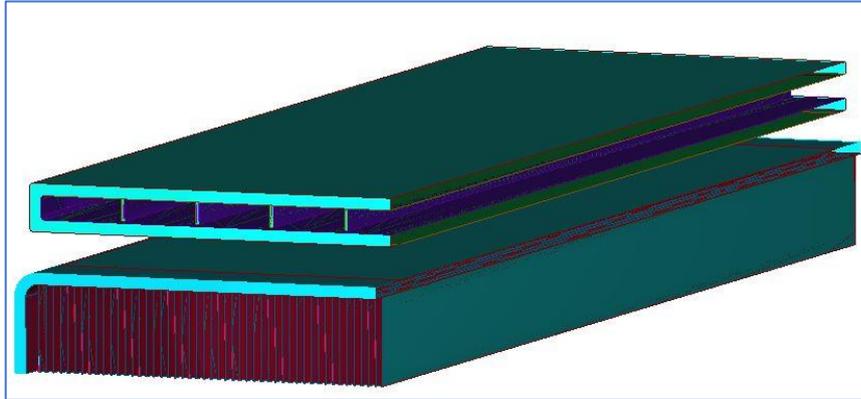


Figura 9-34 – Rappresentazione superfici di tipo Wall

Ai tipi *Inflow* e *Outflow* vengono assegnate le superfici che costituiscono un'uscita o un ingresso per i fluidi, rappresentate in figura 9.35:

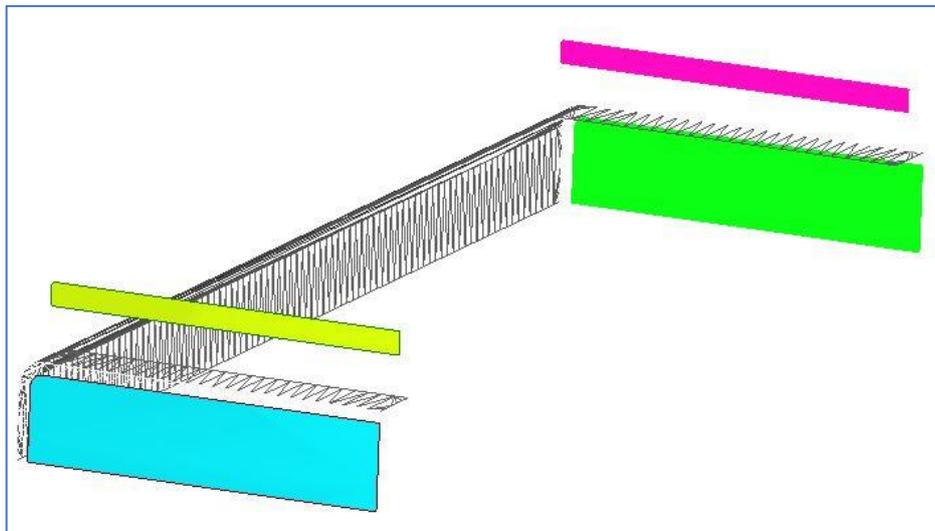


Figura 9-35 – Rappresentazione superfici di Inflow e Outflow

Infine, l'assegnazione delle superfici che costituiscono la simmetria del modello:

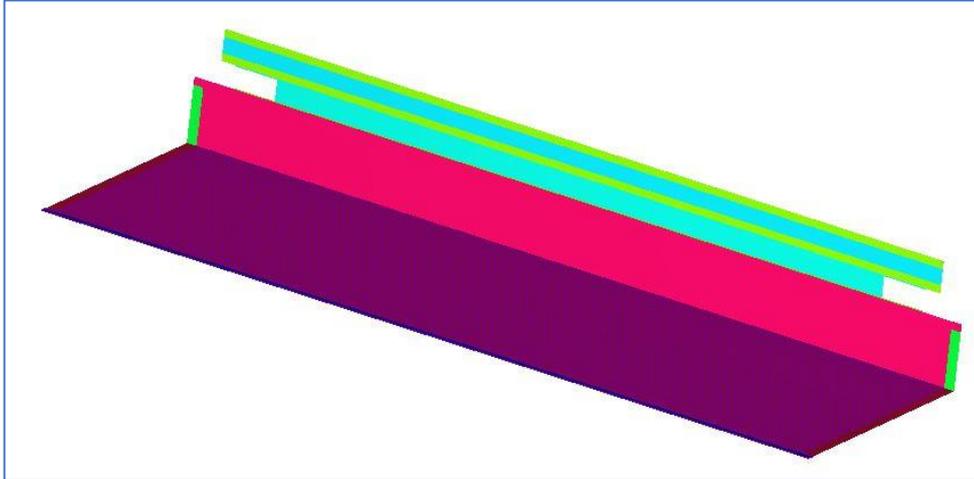


Figura 9-36 – Rappresentazione delle superfici di simmetria

Definite le *Boundary Conditions* di tutte le superfici si è proceduto con l'impostazione delle condizioni iniziali per le superfici di tipo *Inflow*.

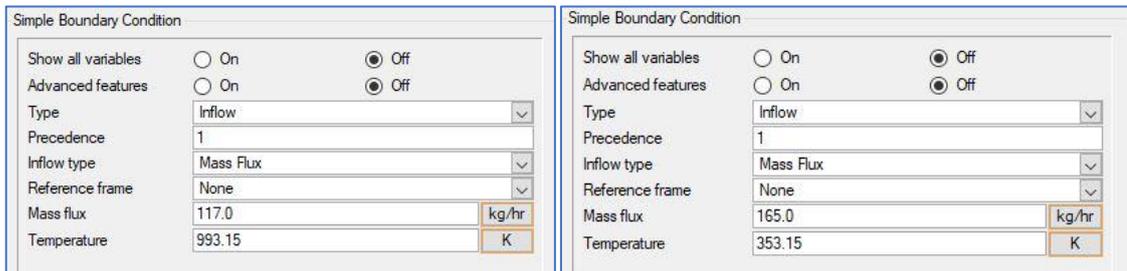


Figura 9-37 – Condizioni iniziali delle superfici *Inflow Air* (gas caldi) e *Inflow Water*

Le condizioni di prova con cui sono state eseguite le analisi sono:

- Portata massica gas caldi $\dot{m} = 90 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$;
- Temperatura gas caldi in ingresso $T = 923,15 \text{ K}$ ($650 \text{ }^\circ\text{C}$);
- Portata massica acqua $\dot{m} = 330 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$;
- Temperatura gas caldi in ingresso $T = 353,15 \text{ K}$ ($80 \text{ }^\circ\text{C}$).

Poiché si considera solo un quarto della geometria intera, il valore di portata è stato scalato in base alla porzione di componente analizzato. Il set di parametri presenta un valore di portata massica dei gas di scarico 'corretto' (da Magneti Marelli) in base alla superficie di scambio termico dell'architettura analizzata. I confronti ottenuti in seguito saranno realizzati basandosi principalmente su questo set di parametri.

Le condizioni al contorno del sistema di recupero del calore (impostate su tutte le superfici a contatto con l'ambiente esterno) sono:

- Coefficiente di scambio termico convettivo $h = 20 \frac{W}{m^2 K}$;
- Temperatura ambiente esterno $T_{Amb} = 353,15 K (80^{\circ}C)$.

In mancanza di informazioni reali riguardo il coefficiente di scambio termico convettivo, tale valore è stato ipotizzato, considerando la tipologia di fluido che lambisce le superfici (aria) e la modalità di scambio termico con l'ambiente (convezione naturale). Tale valore è pertanto un'assunzione che potrebbe sottostimare lo scambio termico reale.

Per le superfici di tipo *Outflow*, sono state mantenute le impostazioni di *default*, assumendo una pressione all'uscita dei condotti pari a quella assoluta dell'ambiente. La pressione all'ingresso dello scambiatore è data dalla somma della pressione ambiente con le perdite di pressione dovute al passaggio nello scambiatore. Per semplificare l'analisi tale valore è stato supposto pari alla pressione ambiente, considerando trascurabili le perdite.

Terminata la parte relativa al *Basic Problem Parameters* si è proceduto con la fase conclusiva del *pre-processing*, ovvero la definizione dei parametri relativi alla generazione della mesh, tramite il menù *Mesh Generation Parameters*. *AcuConsole* consente tre livelli di controllo della mesh:

- *Global* – Controlli applicati al modello intero;
- *Zone* – Controlli applicati a una regione definita del modello ma non associati a nessun particolare componente geometrico;
- *Geometric* – Controlli applicati a specifici componenti geometrici come gruppo di volumi, gruppo di superfici o gruppo di bordi.

Partendo dalle impostazioni globali, si farà riferimento solamente alla voce *Global Mesh Attributes*, lasciando di *default* le altre impostazioni.

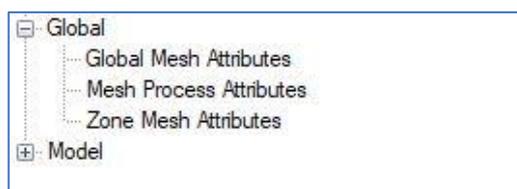


Figura 9-38 – Menù *Global Mesh Attributes*

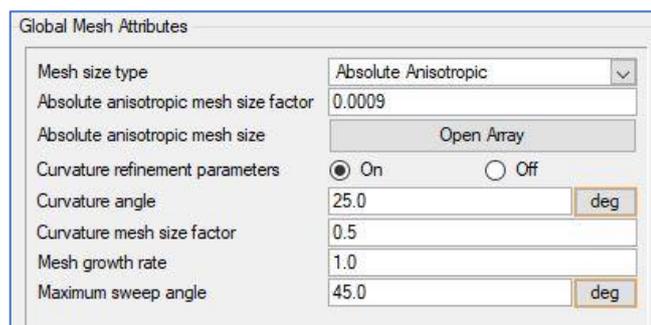


Figura 9-39 – Impostazioni del Global Mesh Attributes

Poiché il modello in esame presenta dimensioni molto piccole (spessore delle pareti e perimetro dei canali) nella sezione frontale ma non in quella longitudinale, non è necessaria una mesh molto rifinita lungo la direzione di sviluppo. Per tale motivo è stato scelto come *Mesh size type* l'*Anisotropic Absolute*. Questo tipo permette di definire due dimensioni della mesh, una per il piano frontale (fitta) e l'altra lungo la direzione di sviluppo (meno fitta), ottenendo una mesh anisotropa. Tramite l'*Absolut anisotropic mesh size factor* viene definito il valore di riferimento della mesh (0,0009 m). Accedendo al vettore *Absolut anisotropic mesh size* (figura 9.40) viene definita la direzione lungo la quale rendere la mesh meno fitta. Poiché per questo modello l'asse Y rappresenta la direzione di sviluppo, è stato posto un fattore moltiplicativo pari a 2.0 lungo tale asse (valore massimo consentito 5.0). L'unità di misura di *AcuConsole* è in metri.

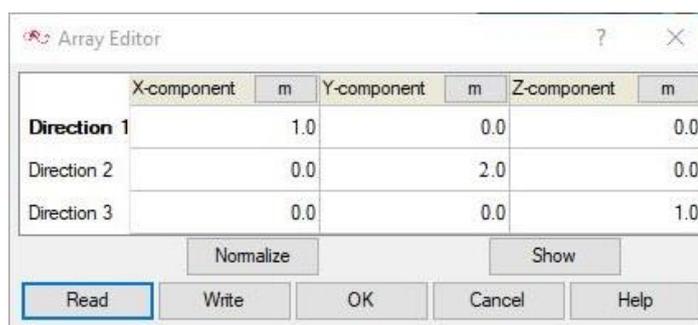


Figura 9-40 – Vettore Absolut Anisotropic mesh size

Nel piano X-Z la mesh avrà quindi dimensione massima pari a 0,0009 m (0,9 mm) mentre lungo Y avrà dimensione massima pari a $0,0009 \times 2$ m, ovvero 1,8 mm. Ciò consente di utilizzare meno elementi per l'approssimazione della superficie del modello e rendere quindi il calcolo computazionale più rapido.

Definita la dimensione globale della mesh è necessario generare sulle superfici di tipo *Wall* dei volumi fluidi il *Boundary Layer*. La creazione del *Boundary Layer* non è altro che un affinamento della mesh in prossimità dello strato limite, ovvero quella limitata porzione di fluido immediatamente a contatto con le pareti. Lo strato limite è la regione di fluido in cui si assiste alla più consistente variazione di velocità del fluido che, da nulla in prossimità della superficie, raggiunge un valore pari al 99% della velocità indisturbata del fluido. La regione di velocità indisturbata del fluido è la zona in cui il fluido non risente degli effetti di bordo.

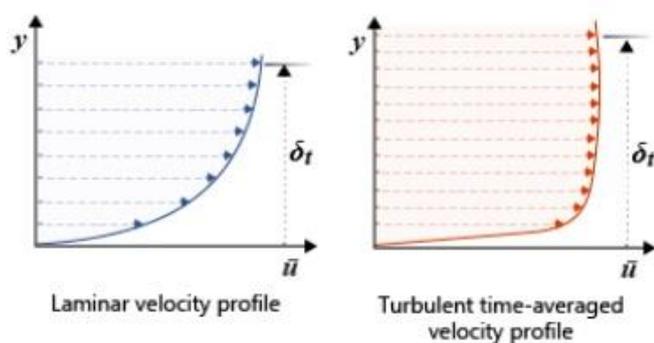


Figura 9-41 – Andamenti del profilo di velocità nello strato limite

Per la superficie *Wall* del volume fluido 'Water' è stato creato il BL di figura 9.42:

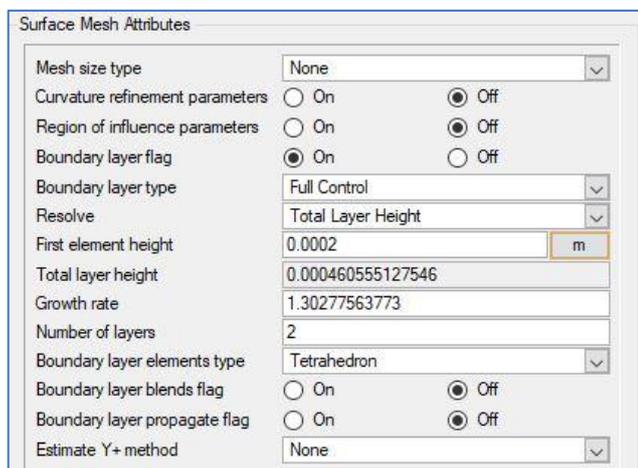


Figura 9-42 – Impostazioni del Boundary Layer per Water_Wall

È stata selezionata la risoluzione secondo il *Total Layer Height* (rimane costante l'altezza totale del BL) e impostata l'altezza del primo strato pari a 0,0002 m. Sono stati impostati il *Growth Rate* (crescita degli strati successivi al primo - il secondo *layer* è, ad esempio, il 30,2%

più alto del primo) e il numero di strati che costituiscono il BL. Infine, i parametri per il BL del volume fluido 'Air' sono stati riportati in figura 9.43:

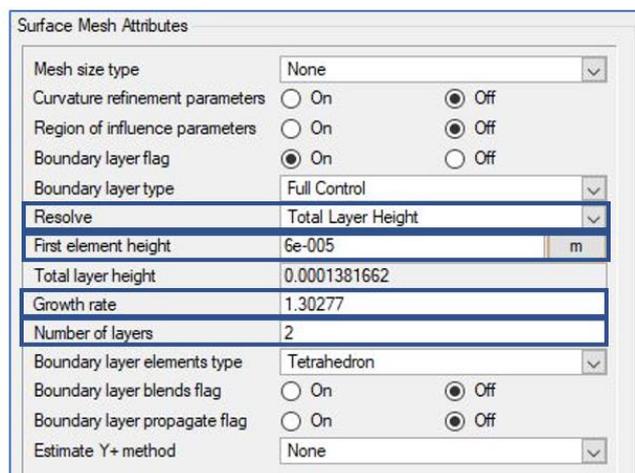


Figura 9-43 – Impostazioni Boundary Layer per Air_Wall

Come si può osservare nell'immagine 9.43 è stato necessario impostare il primo strato del BL con altezza pari a 6×10^{-5} m di molto inferiore rispetto a quella del volume fluido 'Water'. Questa scelta è dovuta alla ridotta dimensione dei canali che costituiscono lo scambiatore a gas e che richiedono un affinamento della mesh. La determinazione dei valori dei parametri appena elencati è avvenuta in maniera iterativa. Conclusa tale fase è stato possibile procedere con la generazione della mesh (figure 9.44 e 9.45).

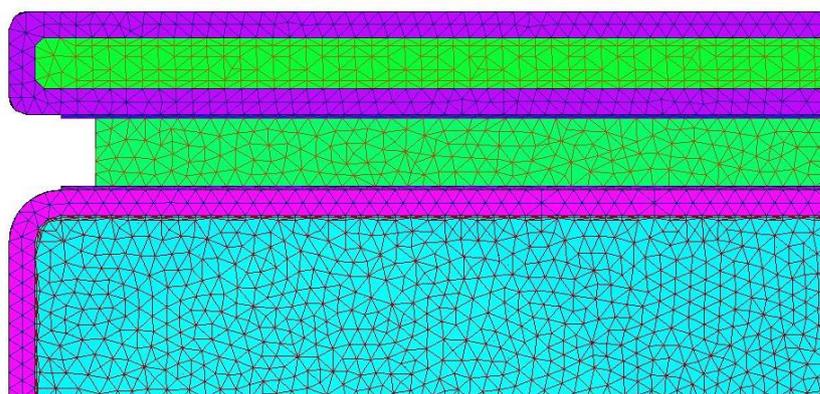


Figura 9-44 – Vista frontale della mesh generata

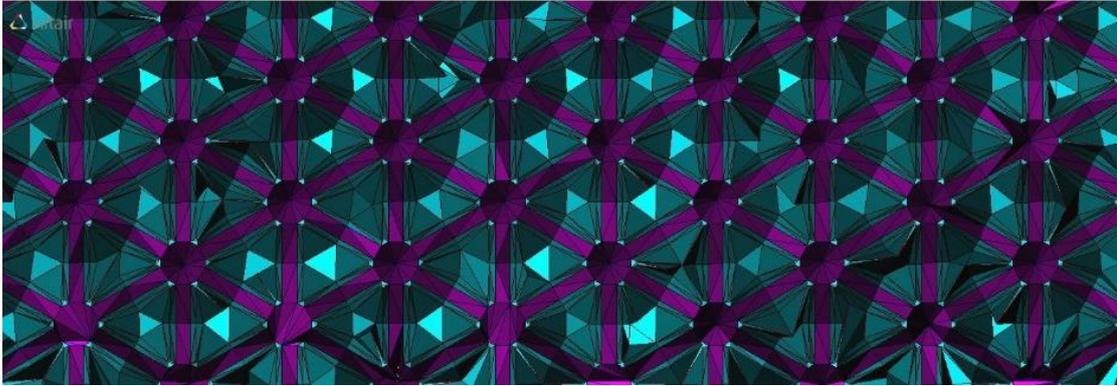


Figura 9-45 – Dettaglio del Boundary Layer e mesh interna dei canali

9.9 Analisi dei risultati e post-processing dei dati

Conclusa la generazione della mesh si è proceduto con l'analisi del modello. *AcuConsole* impiega *AcuSolve* come solutore per le simulazioni, basato su metodo agli elementi finiti (FEM). I vantaggi presentati da questo tipo di solutore sono:

- Robustezza. Le simulazioni sono stabili e i risultati forniti accurati, indipendentemente dalla topologia e qualità della mesh. Sebbene sia conveniente impiegare elementi di tipo hexa, *AcuSolve* permette l'utilizzo di elementi tetra (di più semplice gestione) senza inficiare eccessivamente la qualità dei risultati.
- Velocità.
- Accuratezza.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi eseguite sulle architetture presentate alla fine del paragrafo 9.6. Il primo obiettivo riguardante l'analisi è confermare l'andamento a *gradino* della temperatura sul lato caldo del modulo TEG per le architetture aventi due o più sezioni interne (in riferimento allo scambiatore di calore a gas). In secondo luogo, si desidera misurare gli effetti che le varie architetture generano. Per fare ciò sono state calcolate la temperatura media e lo scarto quadratico medio sul lato caldo del modulo. La formula per calcolare la temperatura media è:

$$\bar{T} = \frac{(\sum_{i=1}^n T_i)}{n}$$

Avendo indicato con T_i il valore della temperatura misurata al nodo i -esimo della mesh, mentre con n il numero totale di nodi presenti sulla superficie. Lo scarto quadratico medio permette di valutare la dispersione media di una popolazione di dati (in questo caso i nodi sulla superficie della mesh) rispetto ad un dato di riferimento. Come valore di riferimento viene assunto il valor medio. La formula a cui si è fatto riferimento è:

$$\sigma(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n}}$$

I cui termini presentano lo stesso significato di quelli introdotti in precedenza. Per semplificare la nomenclatura delle architetture analizzate sono state introdotte le seguenti forme contratte:

- #S T&LO – I primi due caratteri indicano il numero di suddivisioni dell'architettura, dove S sta per Sezione/i. Inoltre, T sta per Triangoli e LO sta per Lamine Orizzontali. Tale architettura presenta quindi canali triangolari e lamine orizzontali.
- #S T&LV – I primi due caratteri indicano il numero di suddivisioni dell'architettura, dove S sta per Sezione/i. Inoltre, T sta per Triangoli e LV sta per Lamine Verticali. Tale architettura presenta quindi canali triangolari e lamine verticali.
- #S LV – I primi due caratteri indicano il numero di suddivisioni dell'architettura, dove S sta per Sezione/i. Inoltre, LV sta per Lamine Verticali. Tale architettura è costituita da sole lamine verticali.
- #S LO – I primi due caratteri indicano il numero di suddivisioni dell'architettura, dove S sta per Sezione/i. Inoltre, LO sta per Lamine Orizzontali. Tale architettura è costituita da sole lamine orizzontali.

Architettura con canali a sezione triangolare e lamine orizzontali (Andamento misurato lungo l'asse di simmetria longitudinale del lato caldo del modulo TEG)

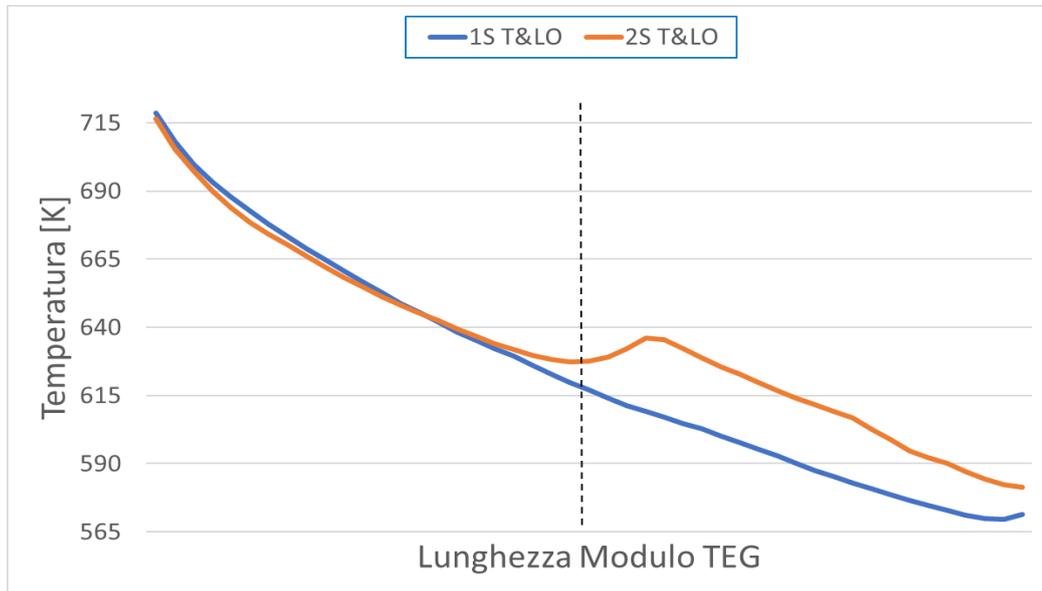


Figura 9-46 – Andamento temperatura architetture T&LO

Il set di parametri con cui è stato ottenuto il seguente andamento di temperature è riportato per maggior chiarezza:

- Portata massica gas caldi $\dot{m}_g = 90 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$;

- Temperatura gas caldi in ingresso $T = 923,15 \text{ K}$ ($650 \text{ }^\circ\text{C}$);
- Portata massica acqua $\dot{m}_a = 330 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$;
- Temperatura gas caldi in ingresso $T = 353,15 \text{ K}$ ($80 \text{ }^\circ\text{C}$);

Analizzando l'immagine 9.46 si può notare come la suddivisione in due sezioni (con superficie di scambio incrementale) consenta un aumento della temperatura in prossimità dell'interfaccia tra le due sezioni. Questo permette di confermare parzialmente l'andamento di temperature previsto. Considerato che la condizione desiderata sarebbe quella rappresentata da una linea orizzontale, ovvero di non variabilità della temperatura sul lato caldo del modulo, la condizione rappresentata dall'architettura 2S T&LO è sicuramente preferibile. Per confermare quanto previsto dall'analisi degli andamenti è utile riportare i dati sui valori medi, sullo scarto quadratico medio (deviazione standard) e altre informazioni relative alla geometria.

	Area Tot [m ²]	ΔA_{Tot} [%]	A1 [m ²]	A2 [m ²]	$\Delta(A1/A2)$ [%]	T Media [K]	Dev. Std. [K]
Originale 1S T&LO	0,6622	0,0	0,6622	NA	NA	625,3	41,2
2S T&LO	0,7161	+8,1	0,3311	0,3850	16,3	632,4	32,0

Tabella 10 – Confronto dati T&LO

Considerando le ultime due colonne della tabella 10 si può confermare quanto detto in precedenza. Il valore dello scarto quadratico medio è inferiore per la seconda geometria (nella condizione ideale sarebbe nullo), con una riduzione percentuale del 28,8%. Inoltre, il valore della temperatura media è superiore, grazie all'aumento della superficie di scambio interna dei canali. Tale condizione è sicuramente desiderata in quanto implica una maggiore estrazione di calore.

Nelle figure 9.47, 9.48 e 9.49 vengono riportate alcune immagini relative ai risultati ottenuti mediante simulazione CFD:

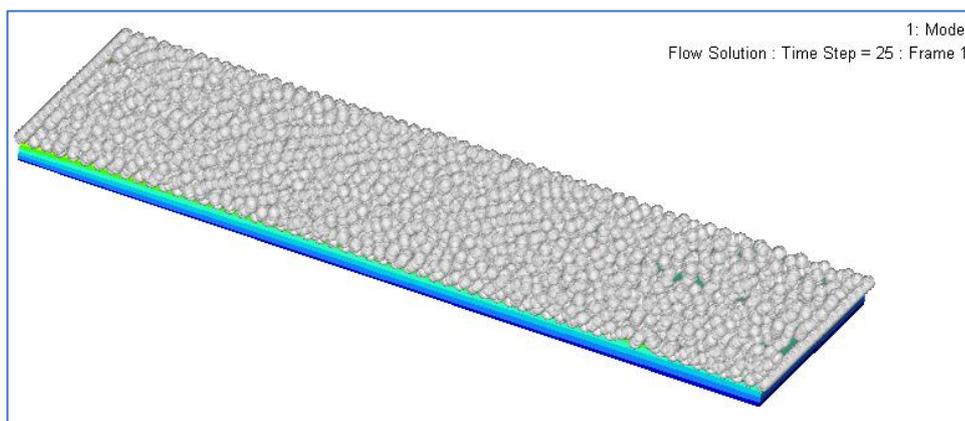


Figura 9-47 – Nodi selezionati per l'analisi dei dati

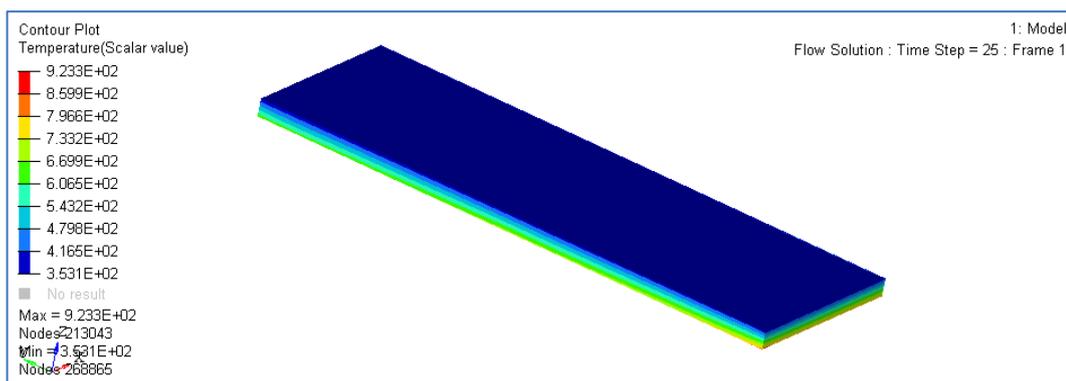


Figura 9-48 – Lato freddo del modulo TEG, 2S T&LO

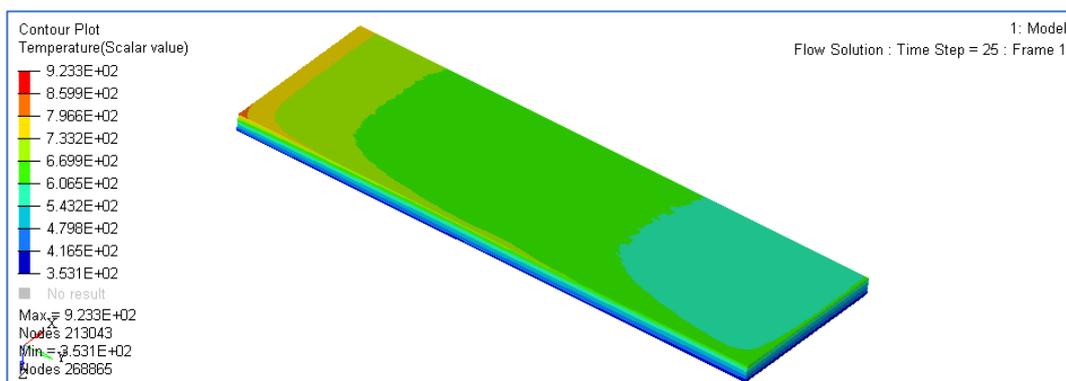


Figura 9-49 – Lato caldo del modulo TEG, 2S T&LO

Facendo un confronto tra l'immagine 9.48 e l'immagine 9.49 si può constatare che mentre la variabilità della temperatura sul lato freddo del modulo è praticamente nulla, ciò non si verifica sul lato caldo. L'analisi CFD consente di confermare quanto anticipato in precedenza.

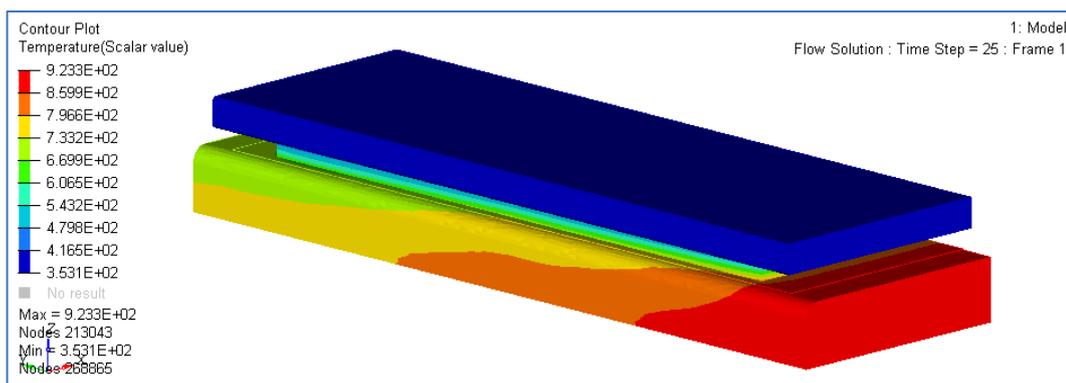


Figura 9-50 – Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 2S T&LO

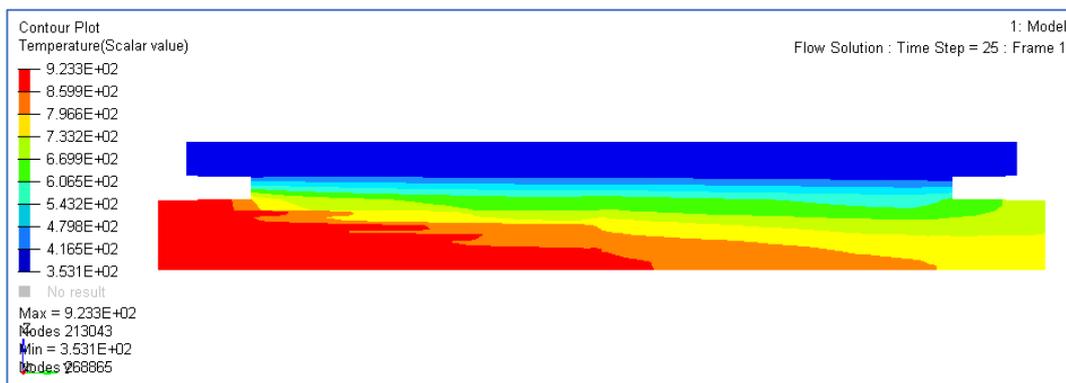


Figura 9-51 – Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 2S T&LO

Architettura con canali a sezione triangolare e lamine verticali (Andamento misurato lungo l'asse di simmetria longitudinale del lato caldo del modulo TEG)

In questo caso sono state valutate più architetture a tre sezioni in quanto, oltre a confermare l'esigenza di realizzare uno scambiatore multi-sezione, si è cercato di determinare quali parametri geometrici consentissero un miglioramento delle prestazioni.

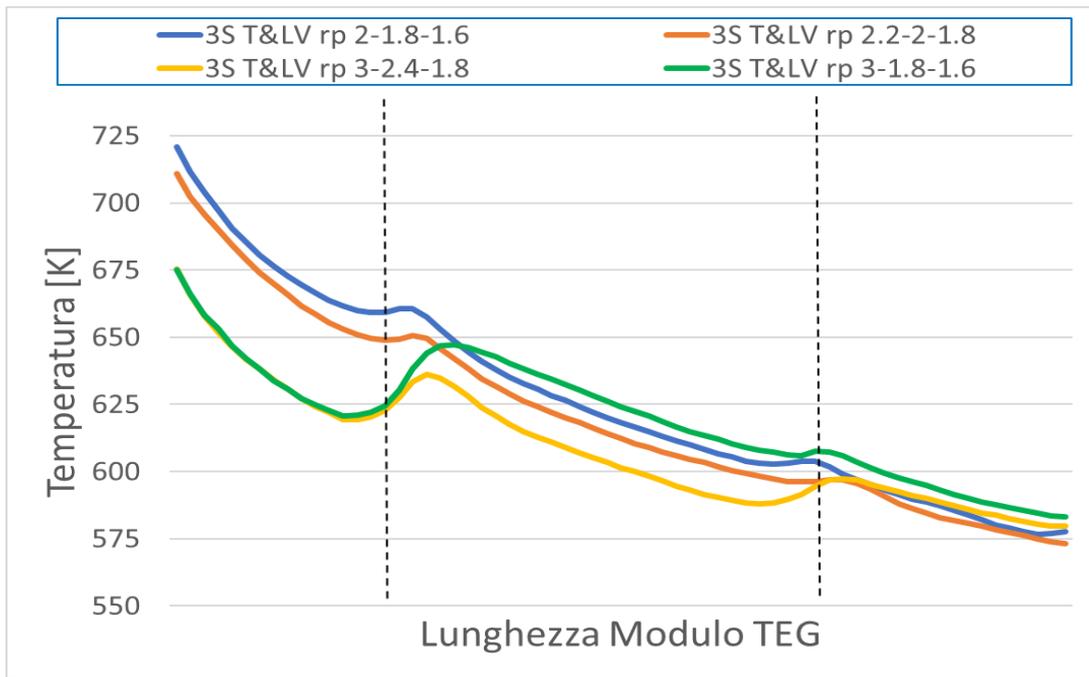


Figura 9-52 Andamento temperatura architetture 3S T&LV

Osservando gli andamenti di temperatura appena riportati, si può distinguere chiaramente l'andamento a *gradino* auspicato in precedenza.

	Area Tot [m2]	ΔA_{Tot} [%]	A1 [m2]	A2 [m2]	A3 [m2]	$\Delta(A1/A2)$ [%]	$\Delta(A2/A3)$ [%]	T Media [K]	Dev. Std. [K]
3S T&LV rp 2.2-2-1.8	0,6187	-7,9	0,1938	0,2053	0,2196	+5,6	+7,0	625,4	32,7
3S T&LV – rp 2-1.8-1.6	0,7054	+6,5	0,2163	0,2299	0,2592	+6,3	+12,7	636,2	36,2
3S T&LV – rp 3-2.4-1.8	0,5896	-11,0	0,1615	0,1880	0,2401	+16,4	+27,7	627,5	26,8
3S T&LV – rp 3-1.8-1.6	0,6594	-0,4	0,1692	0,2357	0,2545	+39,3	+8	627,6	24,3

Tabella 11 – Confronto dati 3S T&LV

Analizzando i dati dalla tabella 11 è possibile notare che, nonostante la superficie di scambio totale sia (in alcuni casi) inferiore all'originale, il valore della temperatura media risulti essere uguale o superiore. Questo è stato possibile suddividendo in tre sezioni lo scambiatore e disponendo verticalmente le lamine piane. Dal confronto con le architetture a tre sezioni in tabella 11, emerge che un parametro influente sulla riduzione dello scarto quadratico medio è la variazione percentuale della superficie di scambio tra due sezioni consecutive. In particolare, più tale transizione è netta, più è evidente l'andamento a *gradino* della temperatura. Analizzando i dati relativi a valore medio e scarto quadratico medio, si osserva come l'architettura *3S T&LV rp 3-1.8-1.6* sia quella di maggiore interesse. La riduzione della deviazione standard (confrontata con il caso originale) è infatti pari al 39,1%. Si è preferito mettere in risalto le soluzioni che consentono una riduzione dello scarto quadratico medio, piuttosto che un aumento della temperatura media. Questo perché, nonostante a livello teorico un aumento della temperatura media implichi una maggiore estrazione di calore e quindi (a parità di temperatura media del lato freddo del modulo) una maggiore corrente prodotta, l'efficienza del modulo dipende da un funzionamento omogeneo delle termocoppie che lo costituiscono. In quest'ottica, la riduzione della variabilità della temperatura sulla superficie (rispetto al valore medio) è la condizione desiderata. Per completare l'analisi di questa tipologia di architetture, è utile valutare l'influenza del numero di sezioni sull'andamento di temperatura. Il set di parametri con cui sono stati ottenuti gli andamenti per le architetture riportate in questa sezione è:

- Portata massica gas caldi $\dot{m}_g = 90 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$;
- Temperatura gas caldi in ingresso $T = 923,15 \text{ K}$ (650 °C);
- Portata massica acqua $\dot{m}_a = 330 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$;
- Temperatura gas caldi in ingresso $T = 353,15 \text{ K}$ (80 °C);

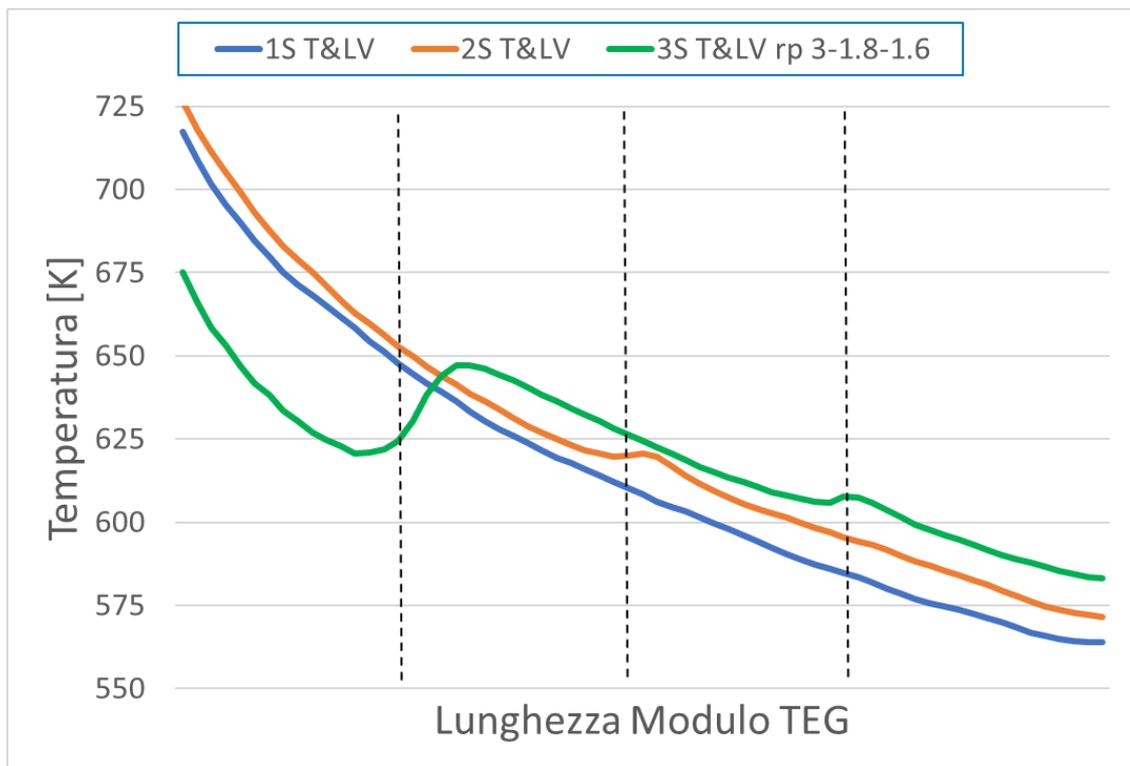


Figura 9-53 Andamento temperature architetture T&LV

	Area Tot [m ²]	ΔA_{Tot} [%]	A1 [m ²]	A2 [m ²]	A3 [m ²]	$\Delta(A1/A2)$ [%]	$\Delta(A2/A3)$ [%]	T Media [K]	Dev. Std. [K]
1S T&LV	0,6716	0,0	0,6716	0,0000	0,0000	-	-	608,8	39,9
2S T&LV	0,6947	+3,4	0,3349	0,3598	0,0000	+7,4	-	627,5	34,3
3S T&LV – rp 3-1.8-1.6	0,6594	-1,8	0,1692	0,2357	0,2545	+39,3	+8	627,6	24,3

Tabella 12 – Confronto dati T&LV

Anche in questo caso si può osservare come la suddivisione in sezioni consenta un beneficio in termini di riduzione dello scarto quadratico e quindi un presumibile miglioramento dell'efficienza del modulo TEG.

In figura 9.54, 9.55 e 9.56 sono stati riportati i risultati dell'analisi CFD riguardanti l'andamento della temperatura per l'architettura 1S T&LV:

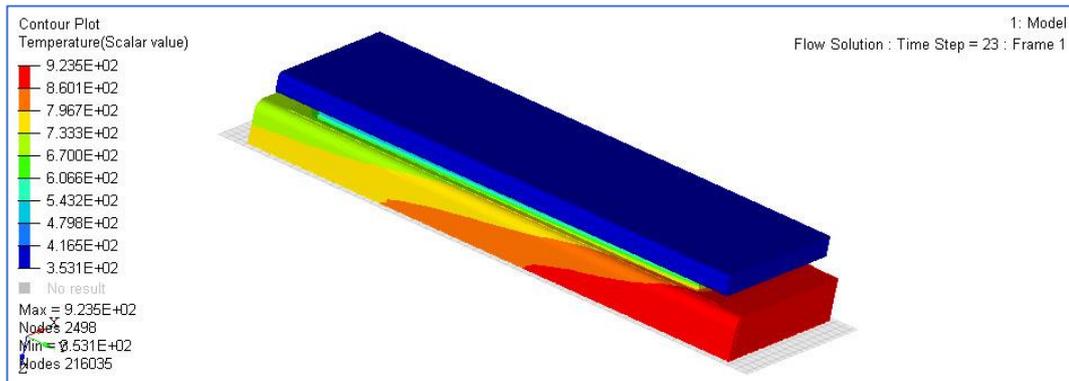


Figura 9-54 – Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 1S T&LV

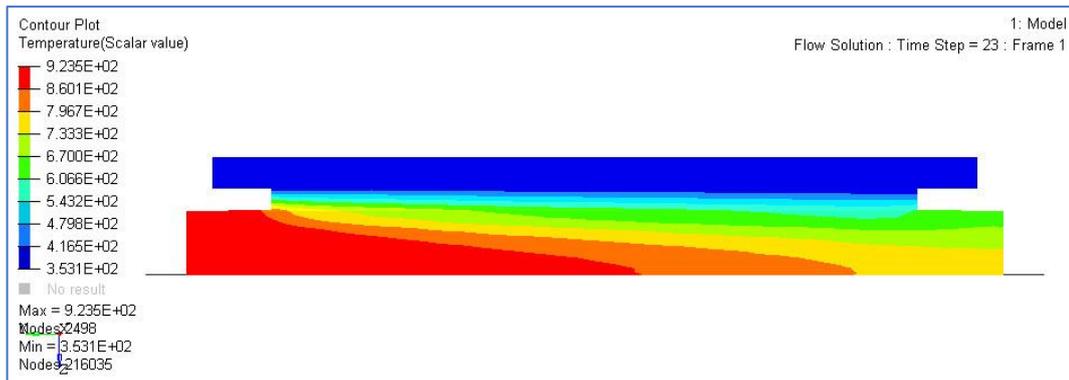


Figura 9-55 – Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 1S T&LV

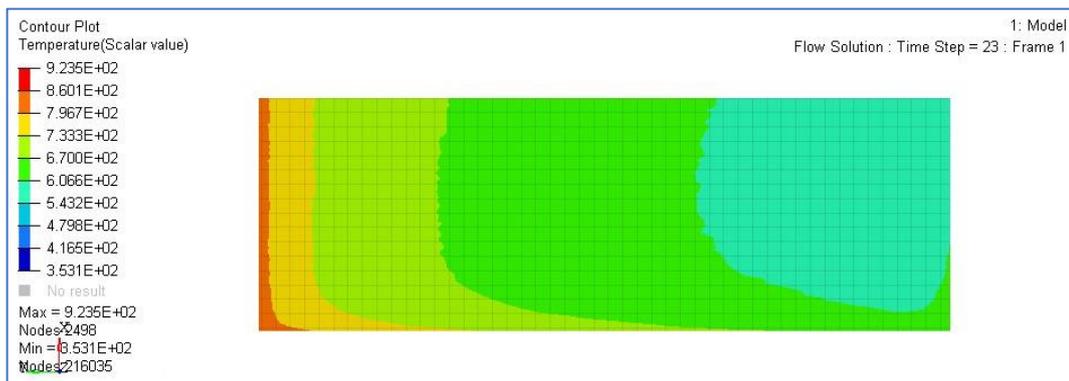


Figura 9-56 – Lato caldo del modulo TEG, 1S T&LV

In figura 9.57, 9.58 e 9.59 sono stati riportati i risultati dell'analisi CFD riguardanti l'andamento della temperatura per l'architettura 2S T&LV:

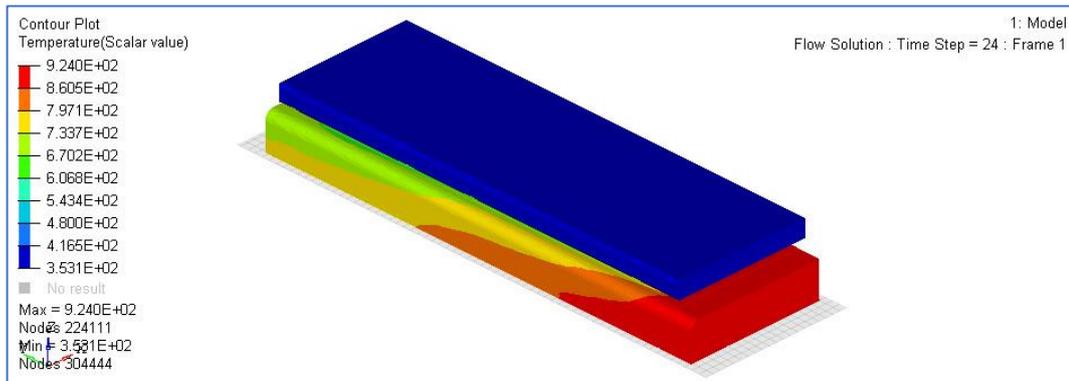


Figura 9-57 – Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 2S T&LV

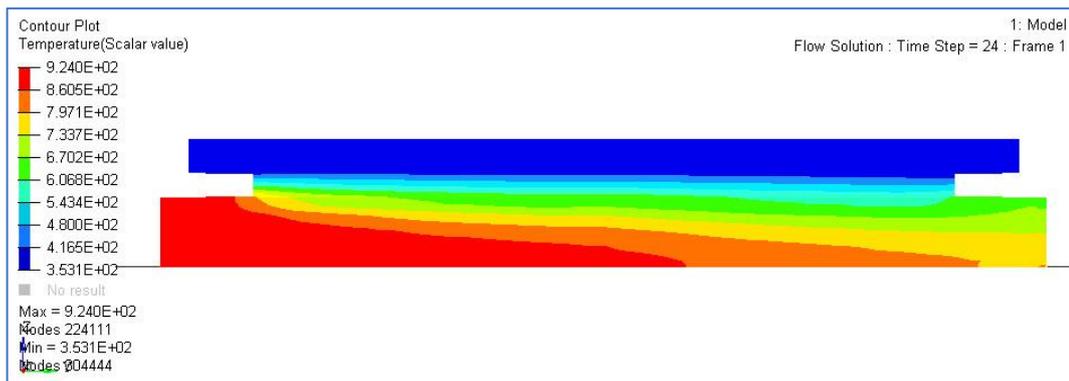


Figura 9-58 – Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 2S T&LV

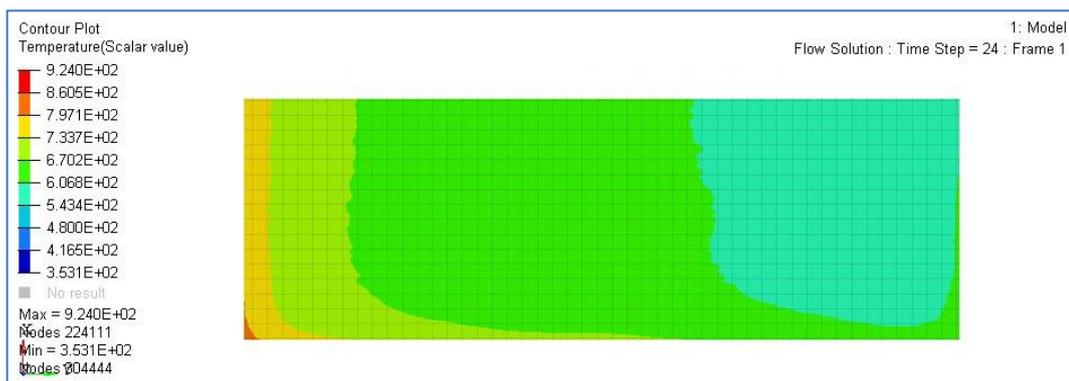


Figura 9-59 – Lato caldo del modulo TEG, 2S T&LV

Infine, nelle figure 9.60, 9.61 e 9.62 sono stati riportati i risultati dell'analisi CFD riguardanti l'andamento della temperatura per l'architettura 3S T&LV rp 3-1.8-1.6:

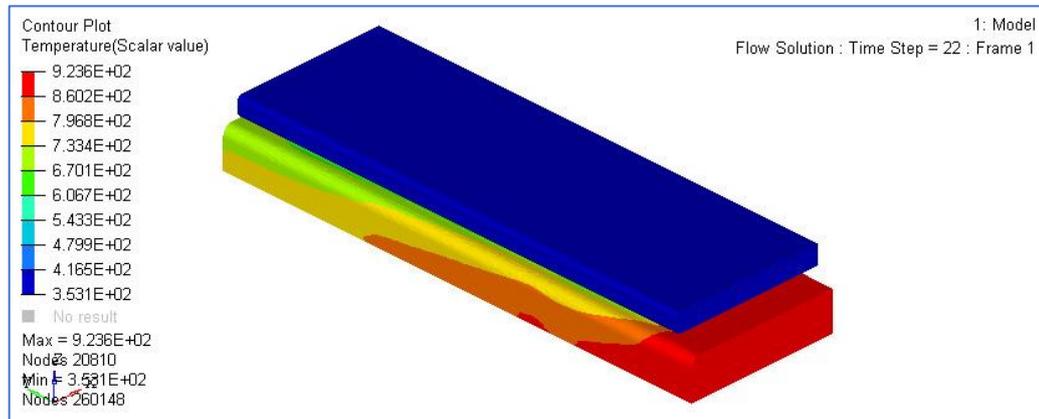


Figura 9-60 – Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 3S T&LV rp 3-1.8-1.6

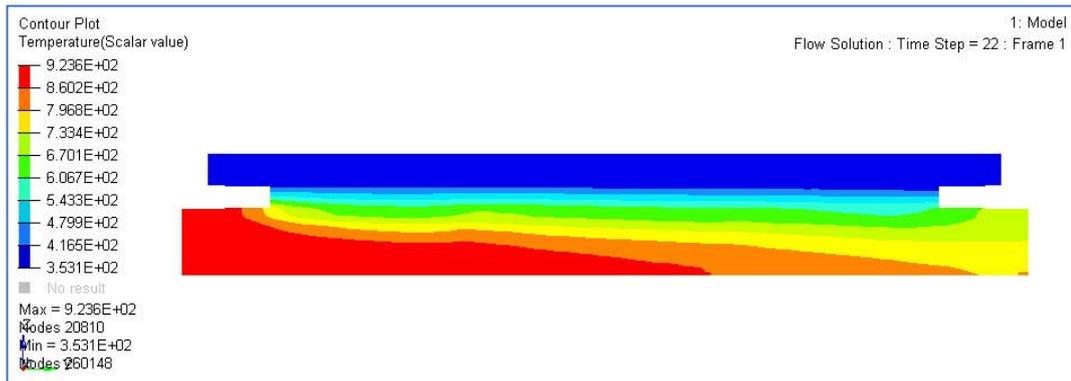


Figura 9-61 – Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 3S T&LV rp 3-1.8-1.6

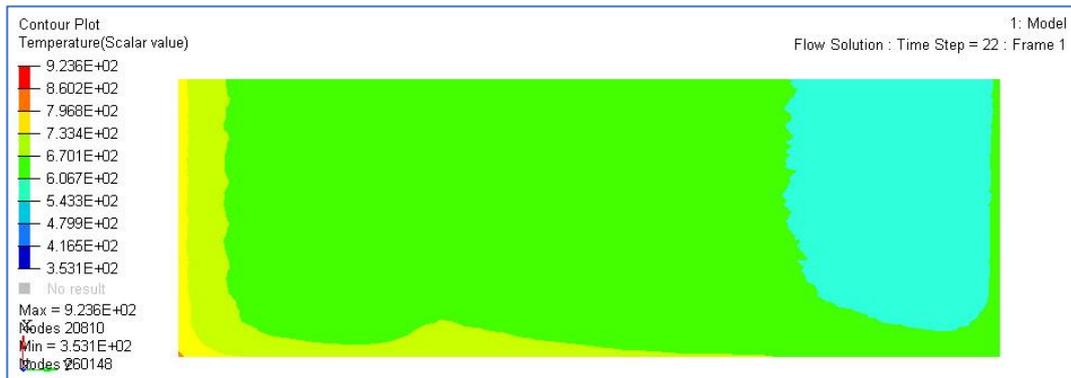


Figura 9-62 – Lato caldo del modulo TEG, 3S T&LV rp 3-1.8-1.6

Architettura con canali a sezione rettangolare e lamine verticali (Andamento misurato lungo l'asse di simmetria longitudinale del lato caldo del modulo TEG)

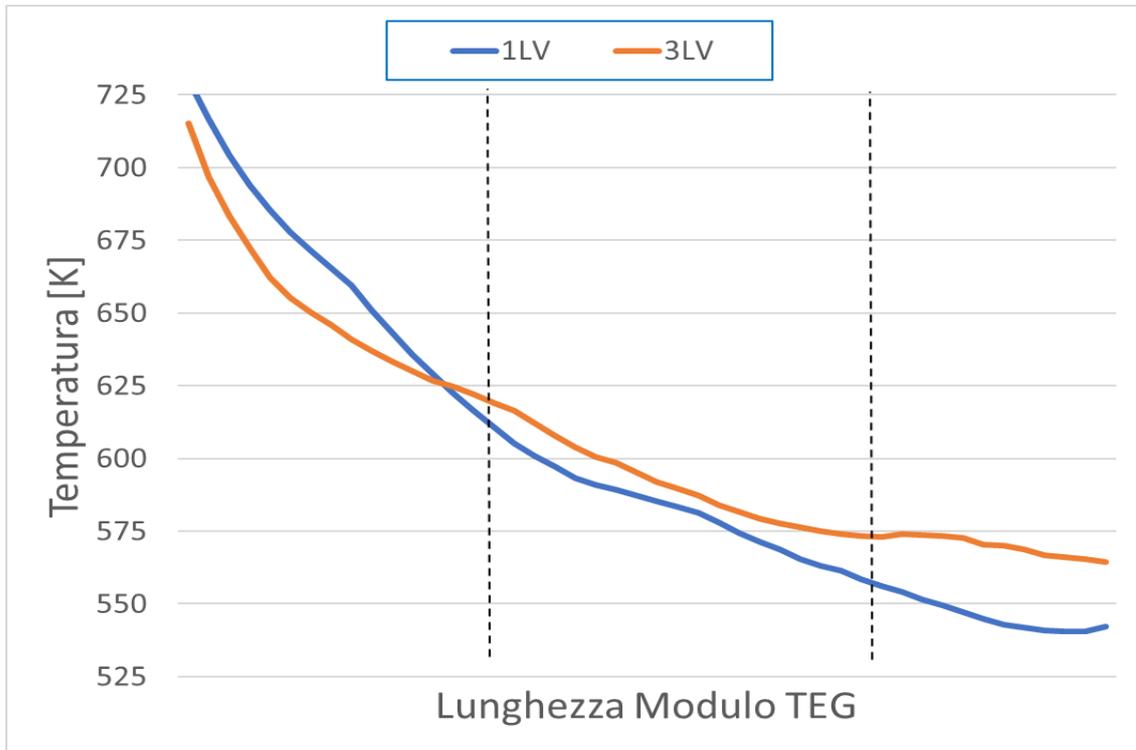


Figura 9-63 – Andamento temperatura architetture LV

Il set di parametri con cui sono stati ottenuti gli andamenti per le architetture riportate in questa sezione è:

- Portata massica gas caldi $\dot{m}_g = 90 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$;
- Temperatura gas caldi in ingresso $T = 923,15 \text{ K}$ ($650 \text{ }^\circ\text{C}$);
- Portata massica acqua $\dot{m}_a = 330 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$;
- Temperatura gas caldi in ingresso $T = 353,15 \text{ K}$ ($80 \text{ }^\circ\text{C}$).

	Area Tot [m ²]	ΔA_{Tot} [%]	A1 [m ²]	A2 [m ²]	A3 [m ²]	$\Delta(A1/A2)$ [%]	$\Delta(A2/A3)$ [%]	T Media [K]	Dev. Std. [K]
1S LV	0,7662	0,0	0,7662	0,0000	0,0000	-	-	596,4	51,1
3S LV	0,9057	+18,2	0,2676	0,2968	0,3413	+10,9	+15,0	601,5	34,5

Figura 9-64 – Andamento temperatura architetture LV

Nelle figure 9.65, 9.66 e 9.67 sono stati riportati i risultati dell'analisi CFD riguardanti l'andamento della temperatura per l'architettura 1S LV:

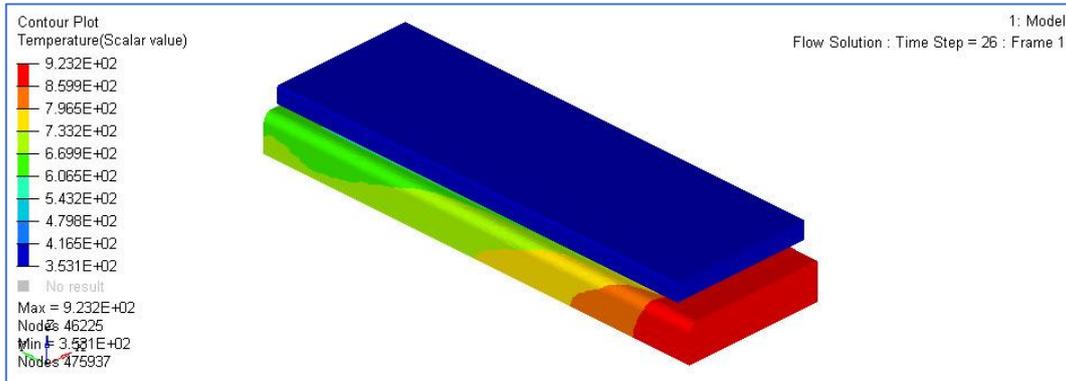


Figura 9-65 - Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 1S LV

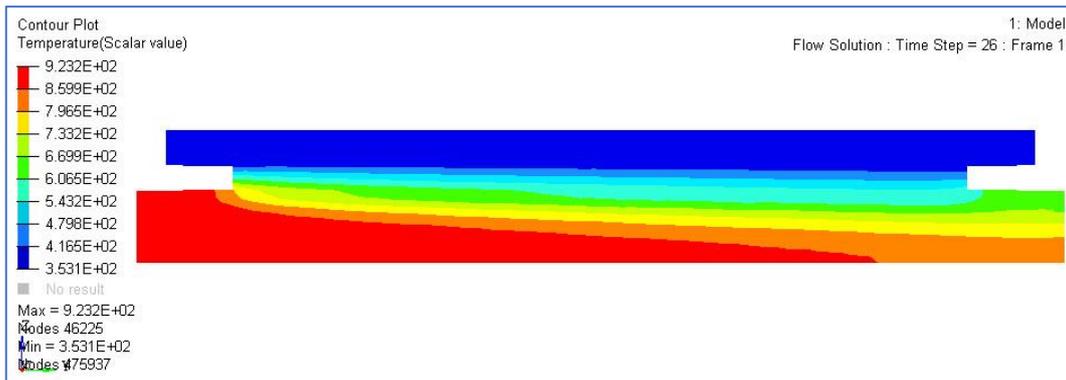


Figura 9-66 - Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 1S LV

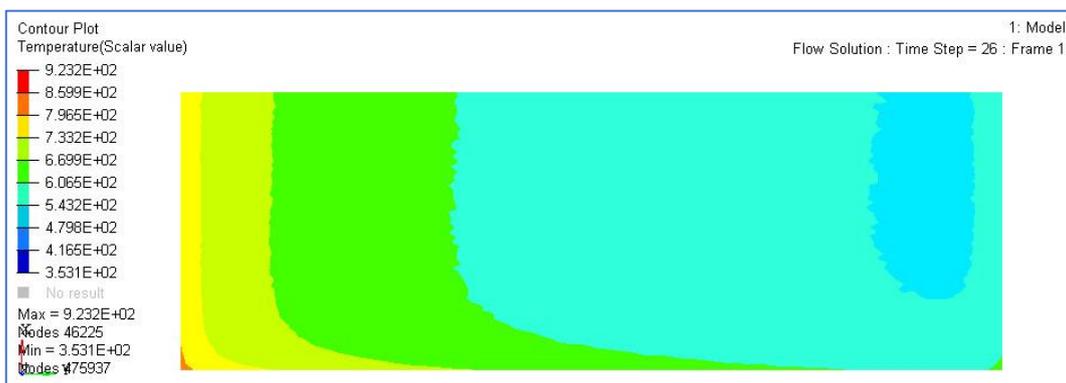


Figura 9-67 - Lato caldo del modulo TEG, 1S LV

Nelle figure 9.68, 9.69 e 9.70 sono stati riportati i risultati dell'analisi CFD riguardanti l'andamento della temperatura per l'architettura 3S LV:

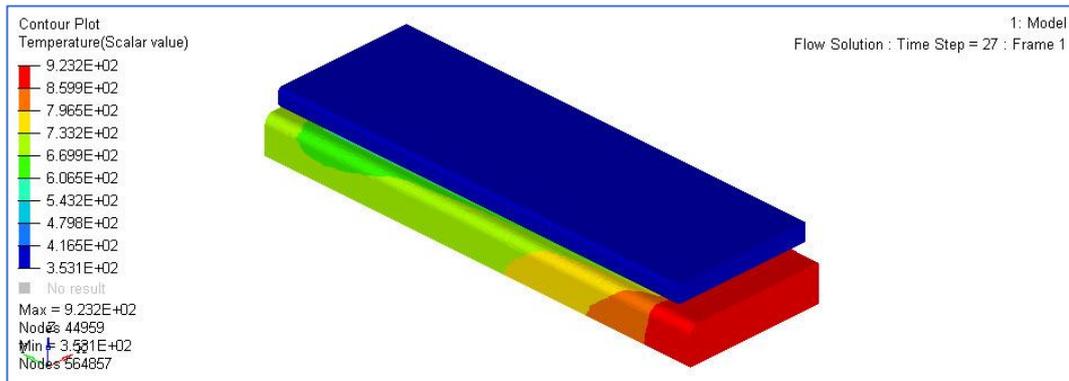


Figura 9-68 – Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 3S LV

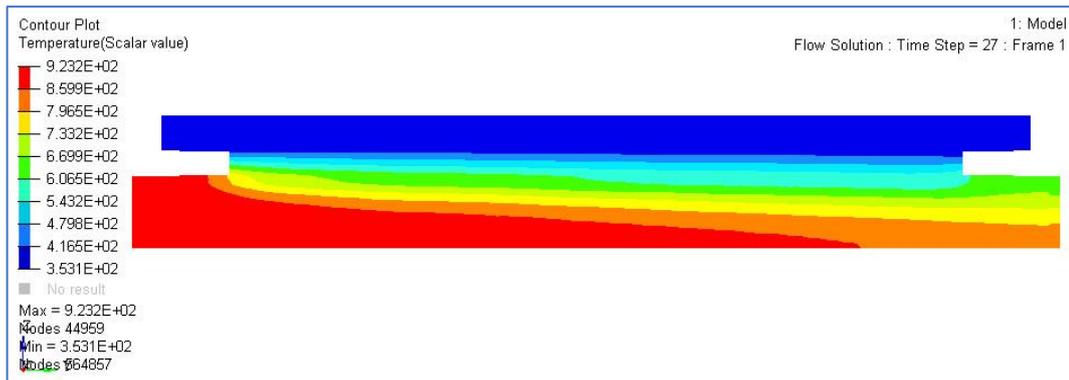


Figura 9-69 – Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 3S LV

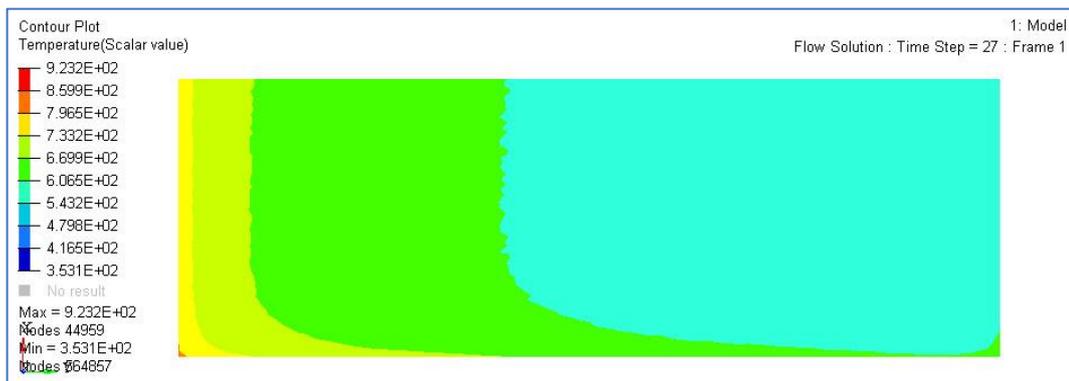


Figura 9-70 – Lato caldo del modulo TEG, 3S LV

Dall'andamento delle curve si può stabilire che il componente a tre sezioni presenta una maggiore temperatura media e una deviazione standard inferiore, rispetto alla geometria mono-sezione. Infine, può essere interessante riportare il confronto tra la geometria a lamine orizzontali a tre sezioni e a lamine verticali e tre sezioni:

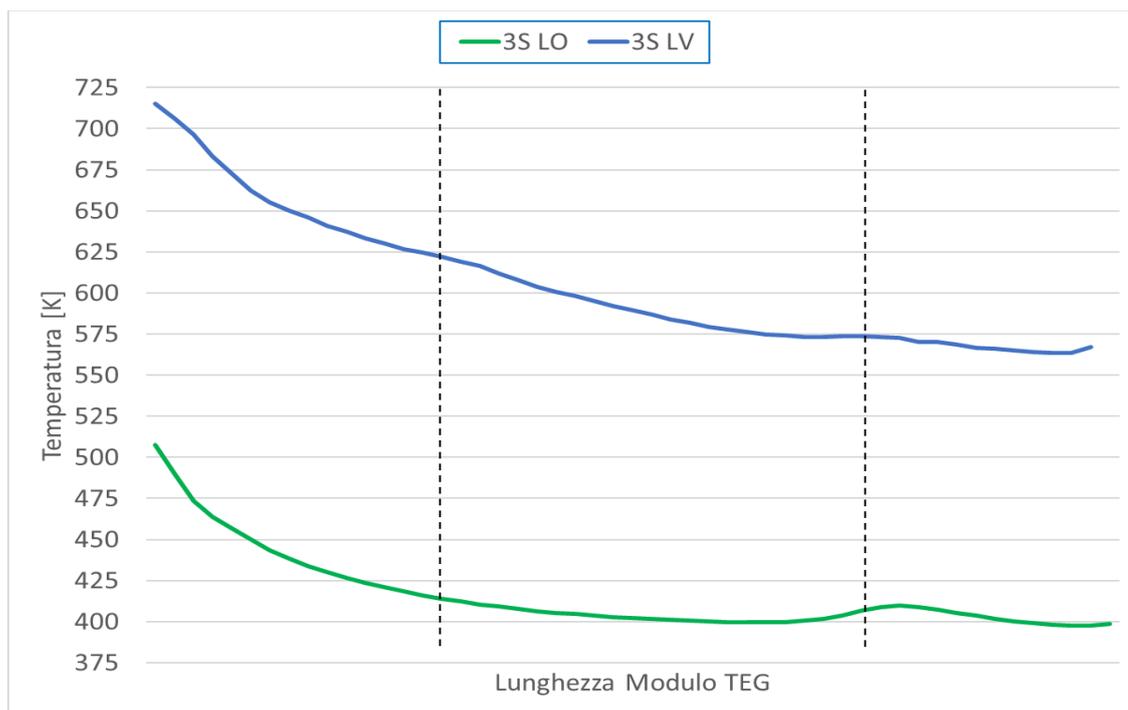


Figura 9-71 – Confronto tra 3S LV e 3S LO

Nelle figure 9.72, 9.73 e 9.74 sono stati riportati i risultati dell'analisi CFD riguardanti l'andamento della temperatura per l'architettura 3S LO:

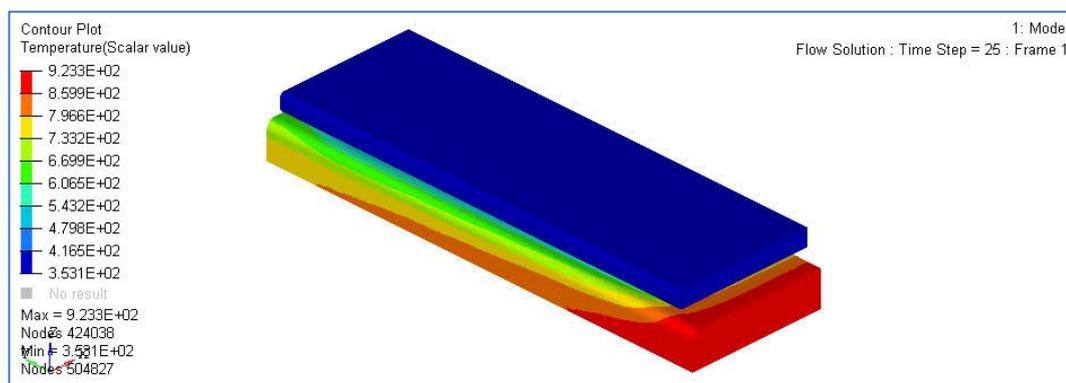


Figura 9-72 – Andamento temperature nel sistema di recupero calore, 3S LO

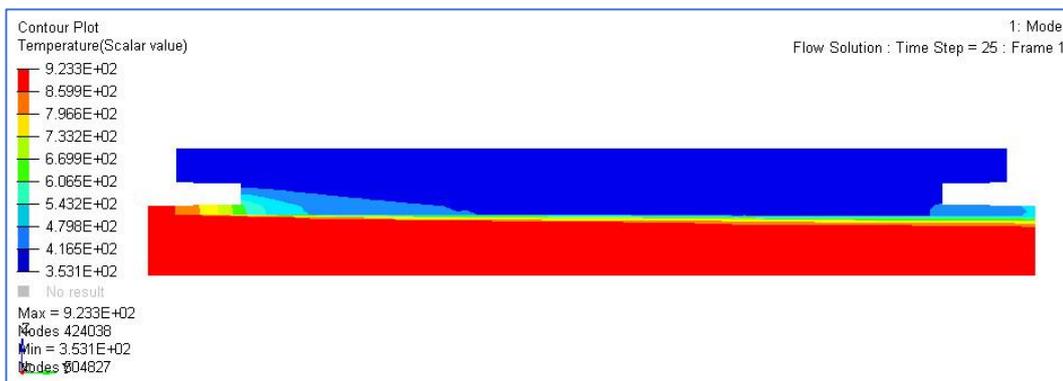


Figura 9-73 – Vista laterale andamento temperatura nel sistema di recupero calore, 3S LO

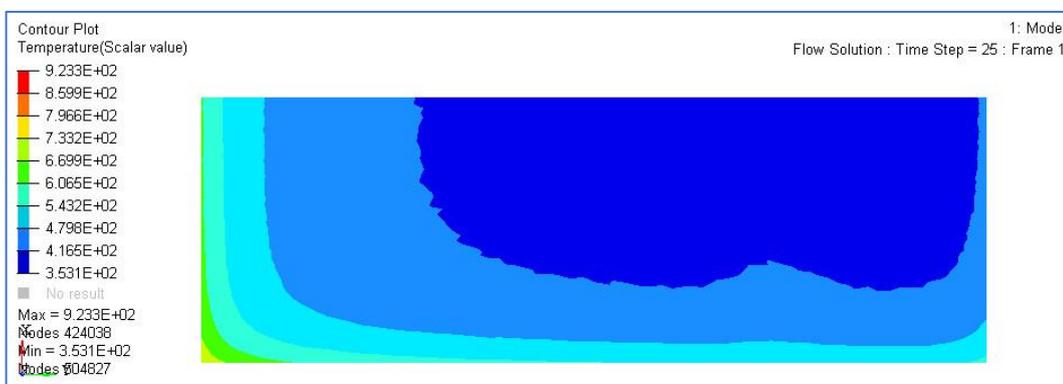


Figura 9-74 – Lato caldo del modulo TEG, 3S LO

Rispetto al caso con lamine verticali, è possibile osservare che l'architettura a lamine orizzontali permette di estrarre meno calore dai gas di scarico. In figura 9.73 emerge come il gas mantenga, nella sezione di simmetria, una temperatura più o meno costante (evidenziato dalla zona rossa). Osservando la figura 9.74 si nota invece che la superficie calda del modulo sia mediamente più fredda rispetto al caso a lamine verticali.

Questi risultati sono dovuti alla riduzione di superficie di scambio termico dell'architettura a lamine orizzontali. Disponendole orizzontalmente è infatti possibile suddividere lo scambiatore in un minore numero di canali. Infine, l'orientazione stessa produce una maggiore dispersione del calore sulle superfici laterali anziché su quelle superiore e inferiore (tabella 13).

T media Sup. Lat. 3S LV (Set 1) [K]	T media Sup. Lat. 3S LO (Set 1) [K]
743,0	807,8

Tabella 13 – Confronto temperatura media superficie laterale di scambio dello scambiatore a gas

9.10 Scelta della tecnologia e del materiale per la Fabbricazione Additiva

Tramite le analisi CFD è stato possibile determinare quale tipologia di scambiatore di calore garantirebbe le migliori prestazioni del modulo termoelettrico. Considerando quanto esposto nel capitolo 6, si deve decidere quale tra tali tecnologie risulti essere la più adatta per la produzione del pezzo. Esaminando le dimensioni e le caratteristiche geometriche della parte da realizzare, è possibile stabilire quali di queste due potrebbero rappresentare una criticità durante la produzione con le varie tecnologie.

Seguendo le prime valutazioni riguardanti le dimensioni del componente e la modalità di unione delle polveri, non sono state ritenute idonee per l'applicazione la EB – DED e il *Binder Jetting*. Quest'ultima, seppur consenta una precisione simile a quella ottenibile con la L – PBF, non permette di realizzare (salvo particolari eccezioni) prodotti finiti. Gli oggetti realizzati sono infatti costituiti da una matrice metallica infiltrata con un metallo basso-fondente, il quale potrebbe conferire proprietà meccaniche e termiche non conformi alle aspettative. La sua applicazione è ritenuta più idonea alla produzione di prototipi funzionali o tecnici. Nel seguente paragrafo si fa invece riferimento alla realizzazione di un prodotto finito o, al limite, di una parte pre-serie.

L'EB – DED non consente il raggiungimento delle precisioni richieste, essendo destinata alla realizzazione di parti massive di grandi dimensioni (ad esempio stampi). Le tre soluzioni rimanenti sono dunque:

- *Laser – Directed Energy Deposition*;
- *Electron Beam – Powder Bed Fusion*;
- *Laser – Powder Bed Fusion*.

Analizzando le prestazioni della L-DED, tale tecnologia è quella che presenta la peggiore finitura superficiale, con una rugosità R_a ¹⁸ di 20-50 μm e rugosità R_z ¹⁹ pari a 150-300 μm . Contemporaneamente, è la tecnica che consente la più alta produttività grazie all'elevato rateo di deposizione (fino a 0,5 kg/hr, fonte: *Optomec*). Note le problematiche relative all'elevato costo di produzione con le tecnologie additive, questo fattore risulta essere di estrema importanza. Tuttavia, considerato il limitato spessore delle pareti della struttura

¹⁸ R_a : rugosità assoluta. Valore ottenuto calcolando la media delle aree comprese tra il profilo reale e la linea media.

¹⁹ R_z : rugosità ottenuta considerando l'altezza massima del profilo dal valore medio.

reticolare (pari a 0,3 mm), è preferibile porre l'attenzione sulle tecnologie che permettono di riprodurre più facilmente tali dettagli, senza rischiare di incorrere in arresti della produzione a causa della generazione di difetti. Come conferma di quanto detto, il diametro del fascio laser per questa tecnologia può variare da 2 a 4 mm, rendendola totalmente inapplicabile al caso considerato.

Rimane da eseguire un ultimo confronto tra l'EB – PBF e L-PBF. Queste due tecnologie presentano aspetti molto simili tra loro, specialmente per le modalità di produzione della parte. Al contempo, possono trovare applicazioni piuttosto diversificate. L'EB – PBF, grazie al riscaldamento a più alte temperature della camera di lavoro, induce minor generazione di tensioni residue durante la solidificazione e il raffreddamento del metallo. Questo aspetto è sicuramente rilevante ed è necessario tenerlo presente, poiché consente di porre meno attenzione sulla scelta dell'orientazione della parte e sulla generazione dei supporti.

La L-PBF è, tra le tecnologie analizzate, quella che consente di ottenere la migliore finitura e accuratezza, con rugosità R_a fino a 9-12 μm (rispetto i 25-35 μm dell'EB – PBF) e rugosità R_z fino a 35-40 μm . Inoltre, il diametro del fascio elettronico dell'EB – PBF è variabile tra 0,2-1 mm. Anche assumendo di lavorare nella condizione migliore, sarebbe complessa la realizzazione di uno spessore di parete pari a 0,3 mm (non multiplo di 0,2 mm). Sotto questo punto di vista la L – PBF è la tecnica che riduce al minimo le difficoltà realizzative, in quanto possono essere impiegati laser con diametro del fascio fino a 0,1 mm. In conclusione, sembra appropriato riferirsi nel seguito a tale tecnologia per la produzione dello scambiatore. Restano presenti i problemi relativi alla velocità di realizzazione del pezzo e della maggiore generazione di tensioni residue interne, che dovranno essere opportunamente ridotte studiando l'orientazione del pezzo e la creazione delle strutture di supporto.

La fase successiva prevede la scelta del materiale con cui produrre il pezzo tramite FA. Nota la tecnologia, è possibile ricercare tra i produttori di polveri disponibili commercialmente, quale tra questi soddisfa i requisiti. Il materiale selezionato dovrà presentare caratteristiche meccaniche e chimiche compatibili, se non superiori, al materiale originale. Questo tipo di ragionamento è richiesto perché attualmente non tutte le leghe metalliche disponibili per le lavorazioni meccaniche tradizionali sono presenti anche per la produzione additiva. Il materiale con cui è stato originariamente realizzato lo scambiatore di calore è un acciaio inossidabile austenitico diamagnetico della serie 3. Entrando più nel dettaglio, si tratta

dell'AISI 304. L'AISI 304, anche commercialmente noto come Inox 18-8, è chimicamente composto da 18% di Cromo e 8% di Nichel. Si tratta dell'acciaio inossidabile più comune, viene infatti utilizzato per le produzioni più disparate, dalla produzione di pentole, piani cottura e serramenti fino alla produzione di serbatoi per gas liquefatti, scambiatori di calore e autoclavi industriali (25).

In seguito alla ricerca dei produttori di polveri, ma soprattutto dei produttori di sistemi di L – PBF, la scelta del materiale per FA è ricaduta sull'acciaio inossidabile austenitico AISI 316 L. Questo materiale condivide molte caratteristiche del materiale originale, essendo della stessa serie. In più, rispetto all'AISI 304, presenta l'aggiunta di piccole quantità di Molibdeno che rende questa tipologia di acciai particolarmente resistenti alla corrosione (fenomeni di *pitting*²⁰) anche in ambienti salini. Queste caratteristiche lo rendono idoneo per la produzione di attrezzature nell'industria cartaria e chimica (25).

Valutando i produttori di sistemi per la Fabbricazione Additiva presenti nell'hinterland torinese che potessero soddisfare le esigenze in termini di tecnologia e materiale, la scelta del partner per la produzione del pezzo in FA è ricaduta su *Prima Industrie*, gruppo industriale che a fine 2018 è entrato nel mercato della produzione di sistemi per la Fabbricazione Additiva.

²⁰ Pitting: Fenomeno di corrosione localizzata, detto anche vaiolatura. Tipologia di corrosione che si innesca quando lo strato passivante di ossidi sulla superficie dei metalli viene rotto localmente determinando l'attivazione del processo di corrosione (Fonte: Wikipedia.org).

9.11 Prima Additive – Simulazione del pre-processing per la Fabbricazione Additiva

Prima Additive è una divisione del gruppo *Prima Industrie*, azienda leader nella realizzazione di processi, sistemi e soluzioni per la Fabbricazione Additiva con una presenza a livello globale. All'interno di una completa gamma di servizi e tecnologie laser per la FA sono presenti: sistemi per *Laser - Powder Bed Fusion* e sistemi per *Laser – Directed Energy Deposition*, così come un pieno supporto all'applicazione e una rete di assistenza in tutto il mondo. Il sistema di L – PBF attualmente sul mercato è denominato *Print Sharp 250*. Presenta un volume medio di costruzione della camera di lavoro, offrendo una grande flessibilità in ogni applicazione in termini di dimensioni, materiali e complessità delle parti che possono essere stampate. Grazie all'affidabilità e semplicità di utilizzo, *Print Sharp 250* permette la calibrazione della macchina e l'impostazione dei parametri di processo in base al tipo di applicazione. Le caratteristiche del sistema sono le seguenti elencate:

- Volume di costruzione: 250x250x300 mm³;
- Velocità di costruzione: 12-30 cm³/h (in base al materiale e alla parte da produrre);
- Spessore del *layer*: 0,02 – 0,1 mm;
- *Hatching distance* (larghezza singola traccia): 0,1 mm;
- Potenza Laser: 200 W / 500 W (26).



Figura 9-75 – Prima Industrie Print Sharp 250 (Fonte: PrimaAdditive.com)

La simulazione riguardante l'orientazione del componente sulla piattaforma di costruzione e la generazione dei supporti viene eseguita utilizzando il software *Netfabb* nella versione *Premium*. Tale versione presenta delle limitazioni sulle funzioni utilizzabili, pertanto per concludere questo tipo di analisi sarà necessario un supporto ulteriore. Per importare il modello CAD nell'ambiente di lavoro è richiesta la conversione in formato STL. Tale conversione comporta un'approssimazione delle superfici che compongono la geometria in seguito alla suddivisione in triangoli.

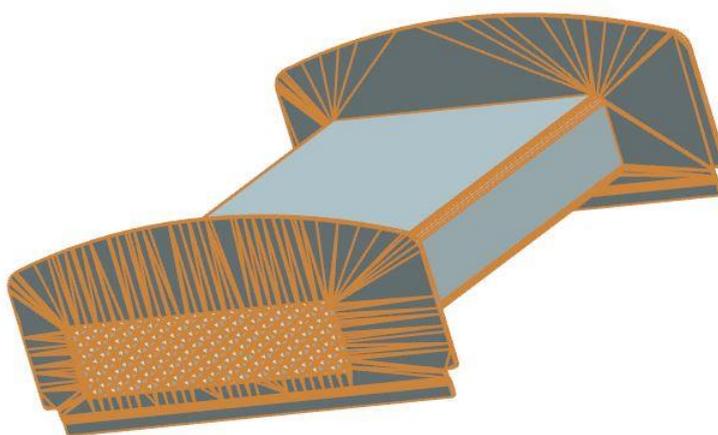


Figura 9-76 – Generazione del modello in formato STL

Poiché non è richiesto lo stesso livello di dettaglio nell'approssimazione delle superfici di una simulazione FEM, i triangoli generati risultano essere più grossolani e di dimensione molto variabile.

Dopo aver inserito i parametri base come l'angolo critico (45°) e la distanza lungo l'asse Z del componente dalla piattaforma (assunta pari a 0 mm), è possibile lanciare la simulazione che ricerca l'orientazione ottimale del pezzo. L'algoritmo di *Netfabb* suggerisce diverse angolazioni della parte, principalmente differenti tra loro per l'altezza totale del pezzo e per il volume dei supporti da realizzare. Le orientazioni suggerite e il volume dei supporti sono il risultato di considerazioni di carattere prettamente geometrico. La versione del software utilizzata nel lavoro di tesi trascura alcuni elementi necessari alla simulazione quali: la generazione di distorsioni e stress residui, lo smaltimento del calore accumulato e la tipologia di materiale che possono influire sulla scelta di orientazione e supporti generati. I dati forniti dall'analisi sono quindi indicativi e non permettono di stabilire in via definitiva come

orientare o supportare la parte. In figura 9.77 vengono riportati i dati relativi alle orientazioni suggerite dal software:

Rank ^Δ	Supported area (cm ²)	Support volume (cm ³)	Outbox volume (cm ³)	Height (mm)	Center of gravity height (mm)
1	1137.481	135.094	1329.742	141.5	60.9
2	1137.480	206.741	1329.742	141.5	80.5
3	2390.438	309.663	1329.742	60.7	22.1
4	2390.438	309.663	1329.742	60.7	22.1
5	2394.438	551.533	1329.743	60.7	38.6
6	127.805	874.760	1329.742	154.8	72.0
7	76.244	897.757	1329.742	154.8	82.7
8	76.244	897.757	1329.742	154.8	82.7
9	132.897	414.330	3261.664	151.5	73.7
10	9.234	33.811	3791.655	160.7	78.4

Figura 9-77 – Dati orientazioni Netfabb

Orientazione #1

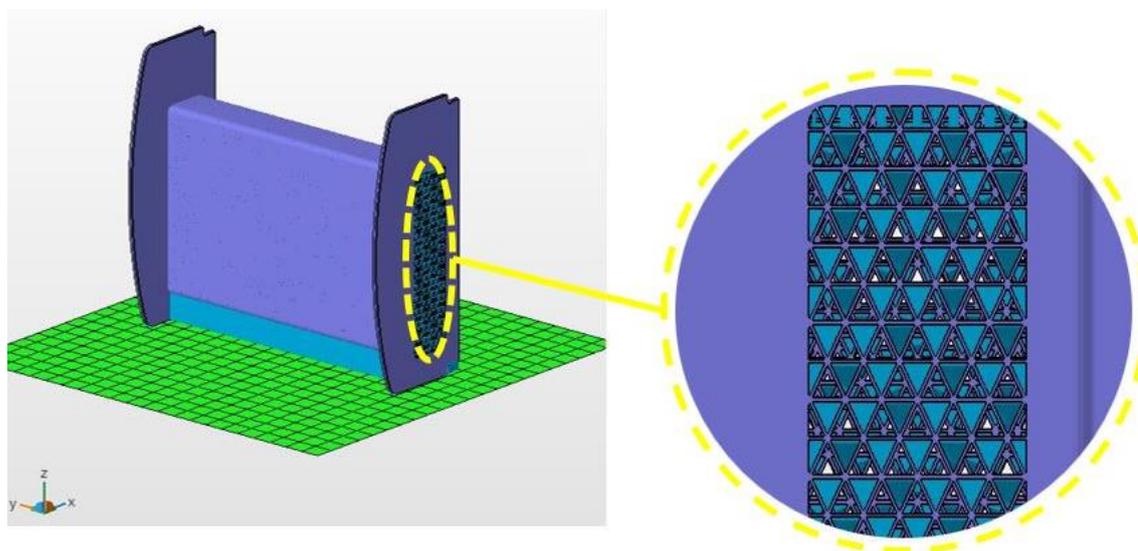


Figura 9-78 – Orientazione #1

Questa orientazione permette l'utilizzo di un basso volume di supporti. Tuttavia, la generazione interna ai canali richiederebbe un notevole prolungamento delle operazioni di

post-processing per la rimozione, con la possibilità di danneggiamento delle pareti dei canali. Per tali motivazioni, la scelta di questa orientazione è sconsigliata.

Orientazione #2

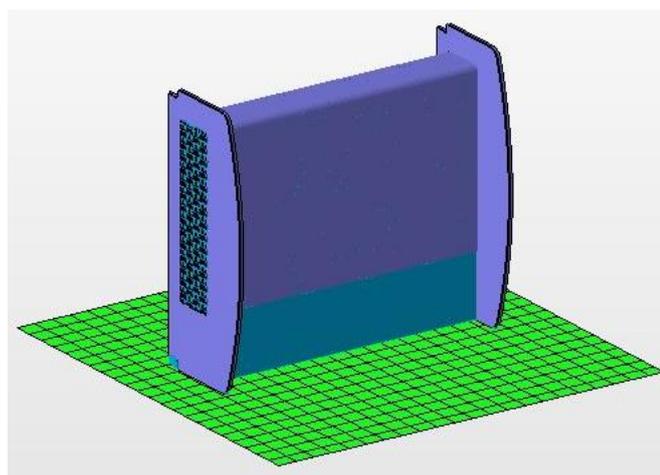


Figura 9-79 – Orientazione #2

L'orientazione #2 ricalca quanto detto per la precedente. Differisce dalla prima per una rotazione di 180° rispetto al suo asse longitudinale.

Orientazione #3 - #4

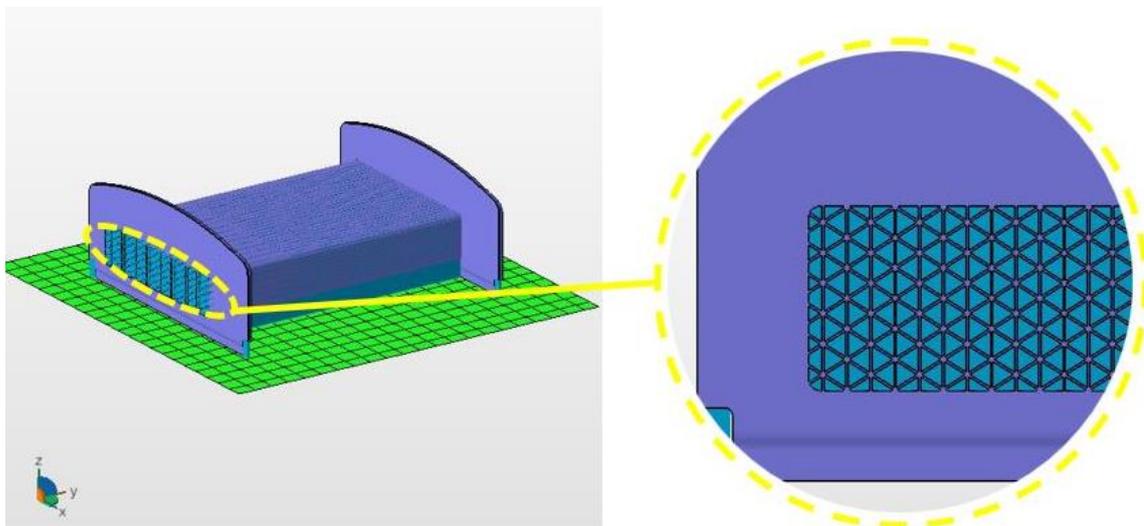


Figura 9-80 – Orientazione #3 e #4

La scelta di questa orientazione permetterebbe di ridurre al minimo il tempo di produzione della parte, essendo la soluzione che presenta il minore ingombro verticale. Tuttavia, anche

in questo caso vengono generati supporti internamente ai canali. Per le stesse motivazioni esposte al caso #1 questa soluzione è da escludere.

Orientazione #5

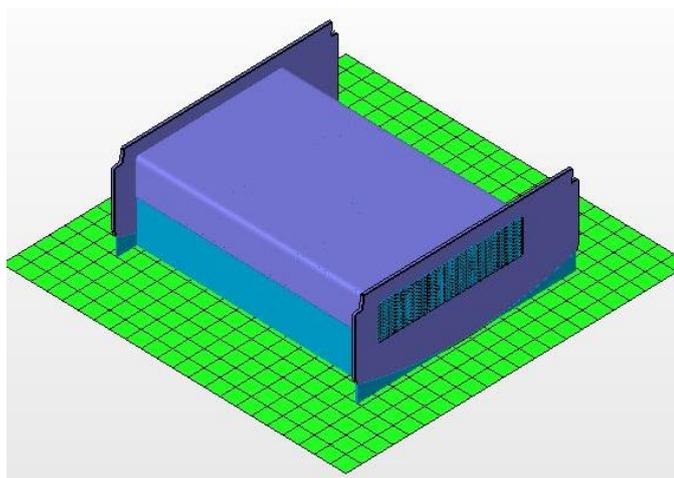


Figura 9-81 – Orientazione #5

L'orientazione #5 differisce dalla #3 e #4 per una rotazione di 180° del modello. Il volume dei supporti risulta maggiore e permangono i problemi in precedenza analizzati.

Orientazione #6

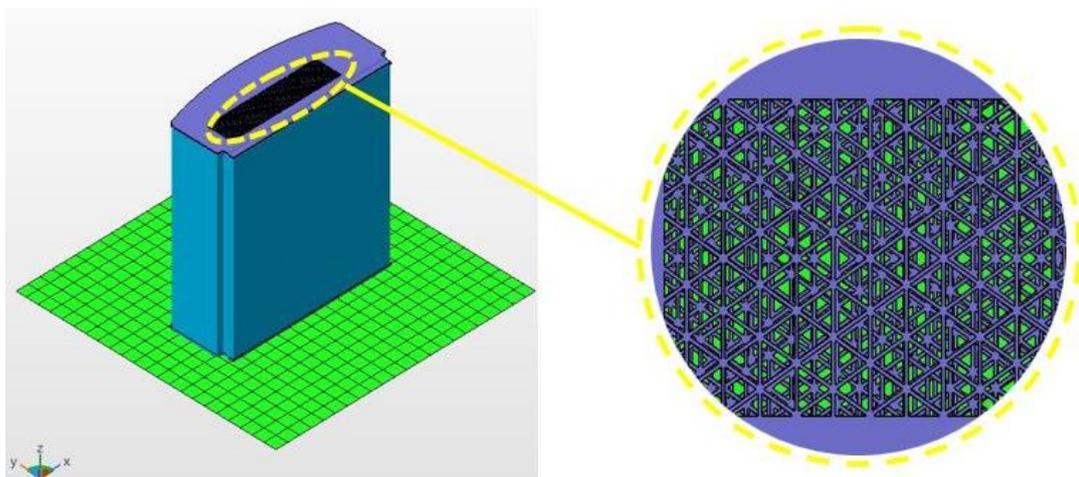


Figura 9-82 – Orientazione #6

L'orientazione #6 presenta il più alto volume di supporti realizzati essendo necessario il sostegno della flangia superiore. Inoltre, risulta massimizzato l'ingombro verticale della parte, inficiando notevolmente sul tempo di produzione. Tuttavia, risulta minimizzato

l'ingombro sul piano di costruzione. Viene in questo modo favorito il posizionamento di più pezzi affiancati. Infine, la scelta di questa orientazione consentirebbe di evitare la formazione di supporti trasversalmente ai canali. Questo aspetto è di grande importanza, in quanto le pareti che separano i canali costituiscono la parte meno resistente dell'intero modello e richiedono pertanto la massima attenzione. Secondo questa orientazione la sezione 'meno fitta' risulta orientata verso l'alto, mentre quella 'più fitta' poggia a contatto con la piattaforma.

Orientazione #7 - #8

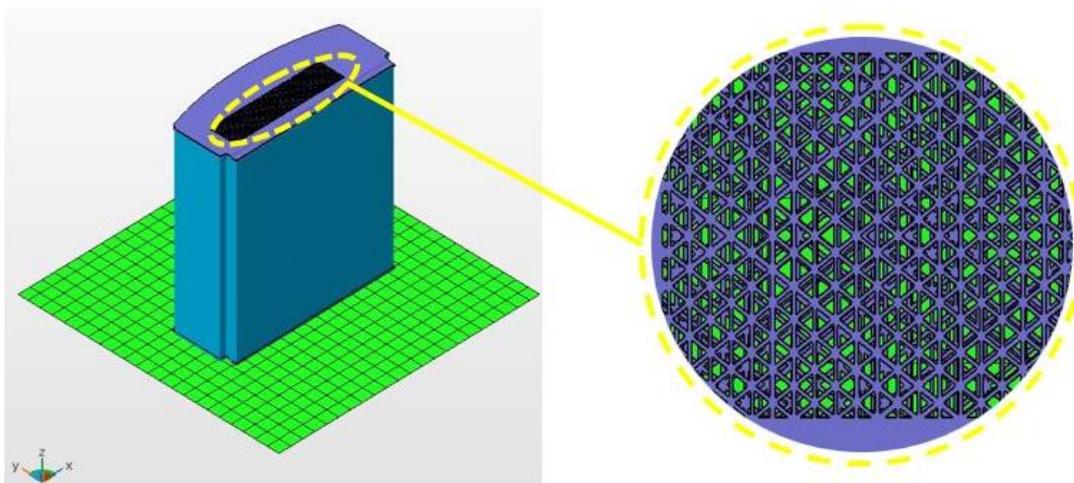


Figura 9-83 – Orientazione #7 e #8

L'orientazione #7 consiste in una rotazione di 180° rispetto al caso precedente. I vantaggi e gli svantaggi associati rimangono validi. In questo caso la sezione 'meno fitta' si trova attaccata alla piattaforma mentre quella 'più fitta' è orientata verso l'alto.

Orientazione #9

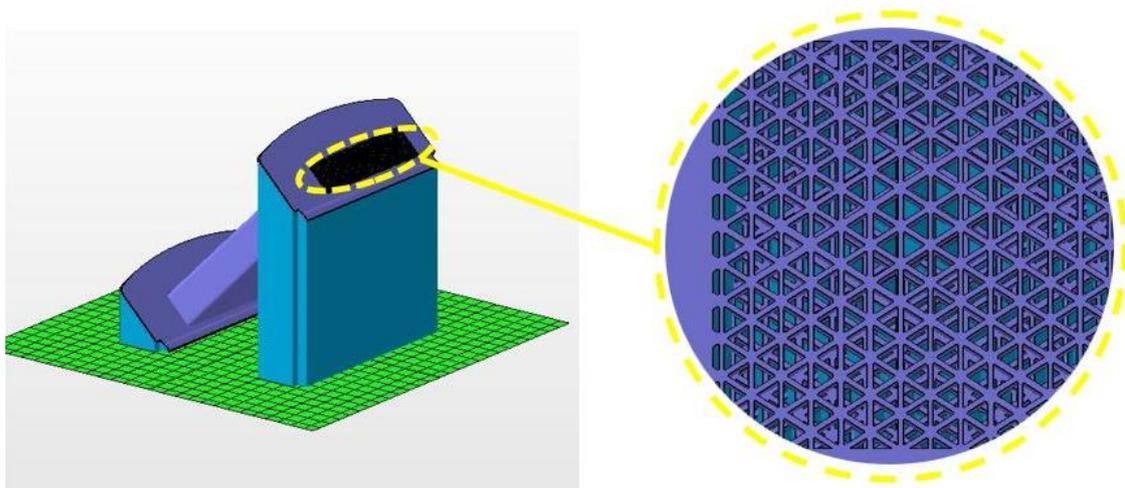


Figura 9-84 – Orientazione #9

L'orientazione #9 presenta un'inclinazione del modello a 45° rispetto al piano di costruzione. La scelta di questa soluzione permette, almeno a livello teorico, di non realizzare supporti internamente ai canali, ma non consente di posizionare più componenti affiancati tra di loro. In questo modo sarebbe possibile dimezzare il volume dei supporti generati rispetto ai casi #6, #7 (e #8).

Orientazione #10

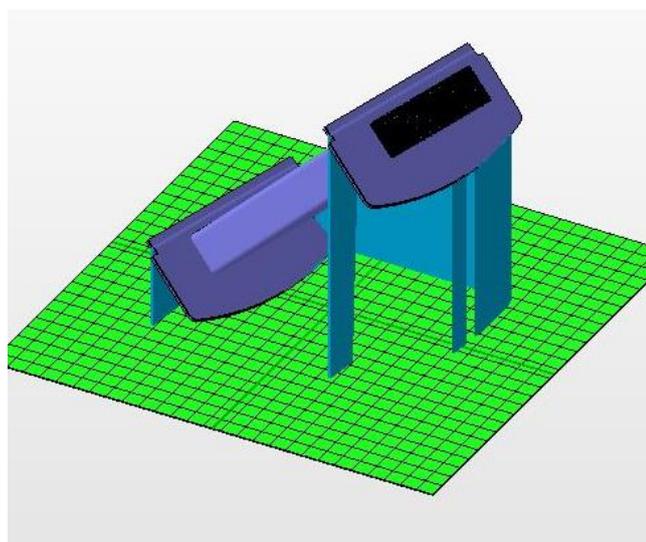


Figura 9-85 – Orientazione #10

La soluzione #10 è quella che presenta (a livello teorico) il volume di supporti minore. Tuttavia, poiché le soluzioni suggerite dal software non valutano la totalità dei parametri che influenzano la scelta dell'orientazione e il volume dei supporti, si è preferito trascurare questa orientazione.

Esaminando i vantaggi e gli svantaggi associati ad ognuna di esse, si è scelto di orientare la parte secondo una tra le soluzioni #6 e #7. Data la struttura interna dello scambiatore, scegliendo l'orientazione #7 si avrebbe un aumento della superficie da processare passando da uno strato verso quello successivo (nel passaggio da sezione meno fitta a più fitta) seguendo la direzione di costruzione dello scambiatore. Nella Fabbricazione Additiva questo si traduce in un aumento dell'effetto di contrazione che porta a un distacco degli strati (*shrink effect*) durante il raffreddamento, motivo per cui è consigliabile produrre lo scambiatore partendo dalla sezione più ristretta e con maggiore superficie di materiale da processare. È pertanto preferibile l'orientazione #6.

La realizzazione della flangia superiore rappresenta un ulteriore punto a sfavore per la fabbricazione dello scambiatore, in quanto ad essa sono collegate alcune criticità. Relativamente alla flangia superiore, nonostante vengano generati i supporti, la transizione che si verifica nel passaggio tra la loro fusione e la fusione della flangia (superficie molto più ampia con spessore sottile) potrebbe non rendere sufficientemente resistenti i supporti e in grado di evitare una deformazione della flangia. Si creerebbero elevate forze di contrazione che a loro volta comporterebbero una deformazione.

Relativamente alla flangia inferiore, poiché per la fabbricazione del componente è necessario ancorare alla piattaforma tutta la superficie della flangia, non è possibile dare la forma al lembo presente su entrambe le flange (figura 9.86).



Figura 9-86 – Dettaglio sul supporto del lembo

Per ridurre le distorsioni generate durante la costruzione delle flange potrebbe essere necessario modificare la forma, realizzando un *pattern* di fori (figura 9.87). Secondo le simulazioni eseguite da *Prima Additive*, questo accorgimento consentirebbe di ridurre la superficie da fondere sullo stesso *layer* e quindi la generazione di tensioni.

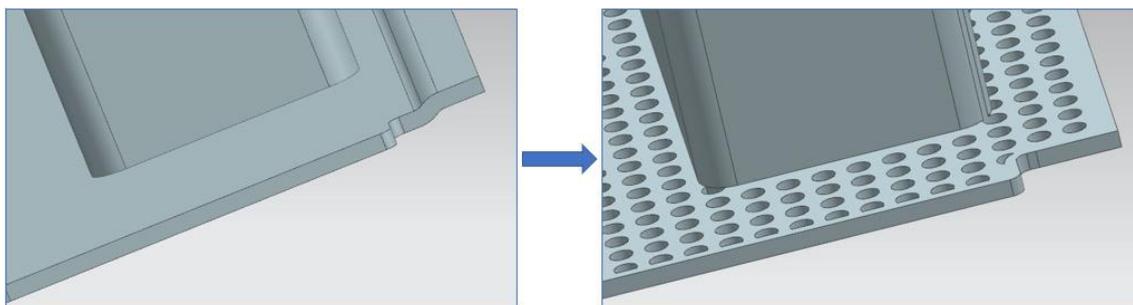


Figura 9-87 – Modifica della forma del lembo delle flange

Permetterebbe l'utilizzo di un elevato volume di supporti da rimuovere, aumentando significativamente il costo del componente.

Il nuovo *design* delle flange consentirebbe di ridurre alcuni problemi legati alla loro realizzazione ma, poiché rappresentano una sporgenza a 90°, sarà ugualmente necessario supportare quella superiore. L'estensione massima per una sporgenza a 90° (per l'acciaio inossidabile), affinché sia auto-supportante, è infatti di soli 0,5 mm.

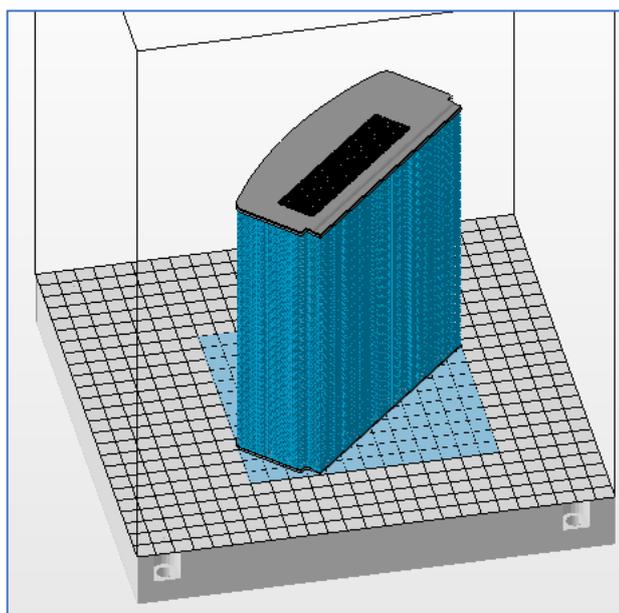


Figura 9-88 – Realizzazione delle strutture di supporto

Secondo l'orientazione scelta, è possibile simulare la disposizione sulla piattaforma di più componenti (in ottica di una produzione in serie). Considerando di dover produrre il componente con le flange (figura 9.89), il numero massimo di parti posizionabile sulla piattaforma si riduce a 4, con un tempo complessivo di stampa di 112 ore (per la stampa completa dei pezzi). Il tempo per realizzare una singola parte sarebbe pari a circa 28 ore.

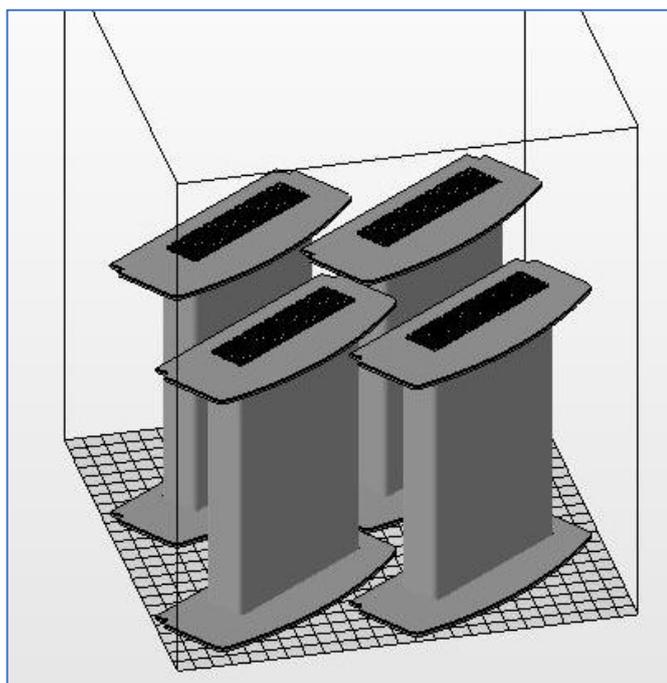


Figura 9-89 – Simulazione posizionamento parti con flangia sulla piattaforma

Per ridurre la quantità di supporti impiegata durante la costruzione, è stata proposta da *Prima Additive* una soluzione che prevedesse la creazione di nervature/strutture di supporto inclinate a 45° in corrispondenza della flangia superiore. Ciò consentirebbe di ridurre il materiale impiegato e quindi il tempo di costruzione. Inoltre, grazie all'aumento graduale della superficie da processare, si genererebbero minori distorsioni durante la costruzione della flangia. In figura 9.90 viene riportato quanto detto:

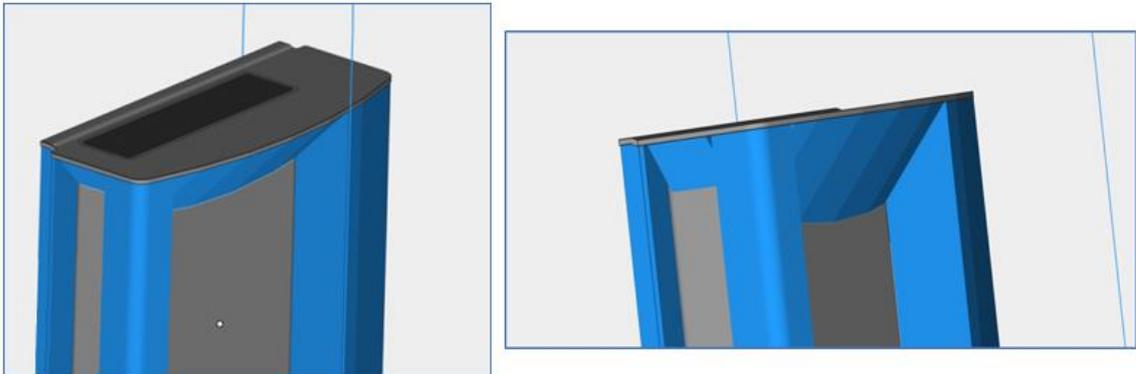


Figura 9-90 – Creazione di supporti ad asola per la flangia superiore

Nel caso in cui il componente dovesse essere stampato senza flangia, è possibile disporre 12 parti sulla piattaforma, con un tempo complessivo di 230 ore di lavorazione, circa 18-20 ore per ognuna (figura 9.91).

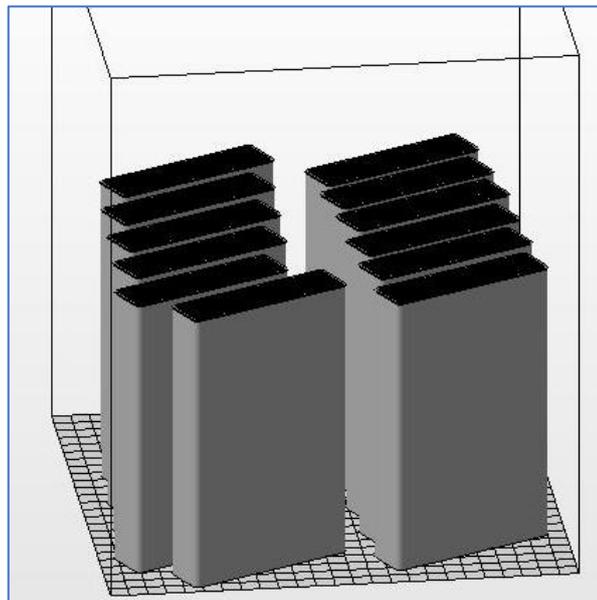


Figura 9-91 – Simulazione posizionamento parti senza flangia sulla piattaforma

In entrambe le soluzioni proposte in figura 9.90 e 9.91, le parti sono state disposte in modo tale che il corpo centrale dello scambiatore non presenti i lati paralleli (rispetto alla sezione vista dall'alto) alla piastra di costruzione. Questa soluzione è stata adottata per rendere più graduale l'ingresso della lama sulla zona da processare, quindi ridurre la pressione esercitata sulla parte, ed evitare la generazione di distorsioni.

9.12 Prima Additive – Analisi del prototipo

L'analisi visiva del prototipo permette di osservare la struttura dei canali e la transizione nelle zone di interfacciamento tra una sezione e la successiva. Il pezzo è stato costruito interamente senza mostrare deformazioni evidenti, è quindi possibile produrre parti massive con pareti molto sottili (0,3 mm) utilizzando la FA, senza incorrere in interruzioni della produzione.

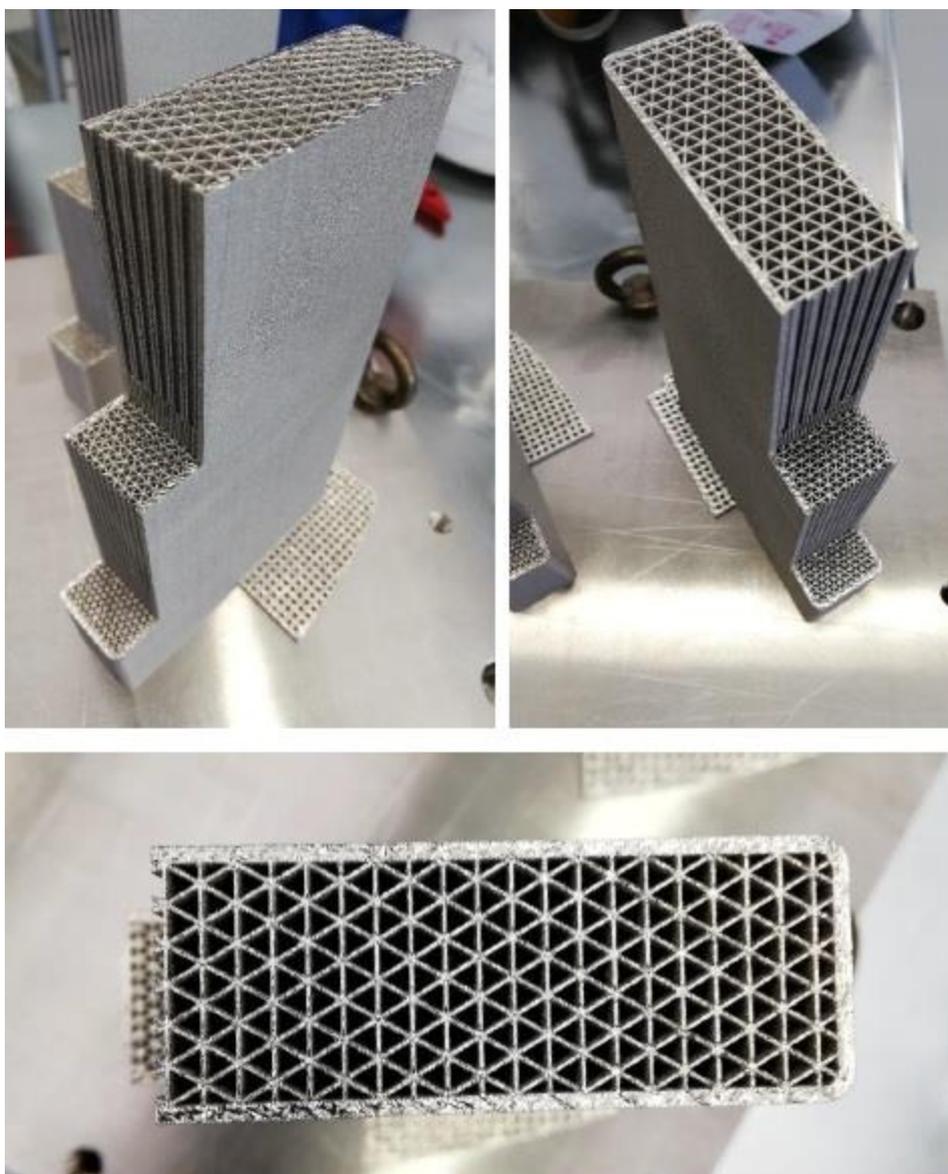


Figura 9-92 – Viste del prototipo realizzato prodotto da Prima Additive

Il componente al termine della fase produttiva non presenta supporti da rimuovere. Sebbene siano presenti tratti di parete dei canali (nelle sezioni successive alla prima) che non poggiano fisicamente sulla piattaforma e che non presentano alcun tipo di sostegno, si tratta di 'strutture a ponte', vincolate ad entrambi gli estremi. È possibile processarle senza realizzare supporti e senza incorrere in deformazioni o cedimenti localizzati.

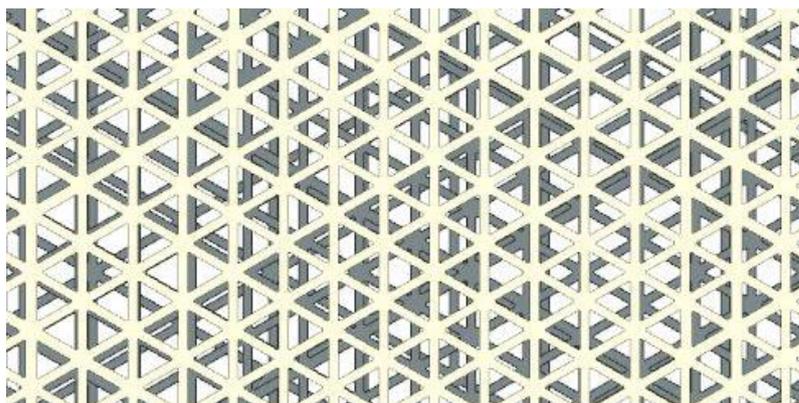


Figura 9-93 – Visualizzazione strutture a ponte (in grigio) e struttura prima sezione (in bianco)

Questo aspetto rappresenta un punto a favore della produzione con le tecnologie additive. La presenza di supporti avrebbe notevolmente complicato la fase di finitura della parte, andando ad incidere sia sul tempo totale di produzione che sul costo.

Il gas inerte impiegato durante la costruzione della parte è l'azoto. La sua adozione è conveniente per la costruzione di parti costituite in leghe di ferro, leghe di nickel e per materiali non reattivi. L'utilizzo di argon sarebbe invece conveniente nel caso di materiali reattivi con l'azoto come le leghe di titanio o di alluminio.

Al termine della produzione non sono stati eseguiti trattamenti termici. L'esecuzione di un trattamento di distensione (prima della rimozione della parte dalla piastra), seppur non necessario, avrebbe una durata di 3 ore circa ed inciderebbe per circa 100 euro sul costo finale di ogni singola parte (fonte: *Prima Additive*).

Rimane da definire la modalità di produzione delle flange. Le possibilità sono due. La prima prevede la realizzazione completa dello scambiatore, integrando le flange al corpo centrale e producendo la parte nel sistema di FA. Questa soluzione risulta essere sicuramente più complicata in quanto con essa sono associate le problematiche introdotte precedentemente. Secondo questa soluzione aumenterebbe notevolmente il tempo di costruzione del componente (+28-35%) e si ridurrebbe il numero di parti posizionabili sulla piastra (-67%), a discapito della produttività.

La seconda soluzione, più semplice e a vantaggio della produttività, prevede la realizzazione delle flange con i processi tradizionali e la successiva unione con processo di saldatura al corpo centrale (realizzato con il sistema di FA). Realizzandole mediante taglio laser, è possibile realizzare un set da 6 in 1' (circa 15-20 s per ognuna). Questo permetterebbe una maggiore saturazione del volume di costruzione e, considerati i tempi relativi alla produzione del corpo centrale, non rappresenterebbe un *collo di bottiglia* per la produzione.

Considerando infine una simulazione di costo semplificata che non tiene conto di piani di investimento, ammortamenti, interessi, eventuali incentivi, costo del personale ecc. e considerando una produzione annua di 4000 ore macchina (ipotesi cautelativa), il costo per componente è:

Voce di costo	Importo [€/pz] – [%]
Macchina (Print Sharp 250)	400 – 80
Materiale	50 – 10
Utenze e post-processing	50 – 10
Totale	500 – 100

Tabella 14 – Simulazione di costo per singolo pezzo con FA

Prendendo in esame tale simulazione, è possibile affermare che la diffusione di queste tecnologie sia ancora oggi limitata dal maggiore costo di produzione, non sufficientemente concorrenziale nell'ottica di alti volumi di produzione. La voce che incide maggiormente sul costo totale del componente è il costo macchina. Infatti, seppur la maggioranza dei sistemi esistenti assorba solamente qualche kW di potenza, se comparato con i sistemi di stampaggio o centri di lavoro, ciò che pesa è l'elevato tempo di produzione.

Nonostante il costo delle materie prime sia superiore, questa voce incide solamente per il 10% sul costo totale. Secondo le aspettative, i miglioramenti apportati alle tecnologie esistenti nella produzione di polveri e l'aumento della concorrenzialità tra produttori permetteranno di ridurre la loro incidenza percentuale.

Conclusioni

Questo lavoro di tesi mi ha permesso di attraversare e approfondire l'articolato processo della Fabbricazione Additiva in ambito automotive a partire dalle considerazioni relative ai materiali e alla loro produzione, alla scelta di un componente convenzionale da ripensare in ottica additiva, alla riprogettazione del pezzo usando diversi sistemi di simulazione e, infine, alla rilevazione dei benefici e degli eventuali svantaggi rispetto a quanto è realizzato con le tecnologie attualmente impiegate.

L'esperienza in CRF mi ha dato l'opportunità di contattare fornitori di macchine per fabbricazione additiva in materiale metallico che occupano un posto di rilievo nel mercato attuale; sono stato testimone di parte del lavoro necessario per la progettazione di sistemi innovativi e alcuni ancora allo stato prototipale, legati a tavoli di ricerca accademica e industriale del panorama internazionale.

Percorsi di formazione approfondita mi hanno permesso di sfruttare in modo autonomo software di simulazione e progettazione orientati all'approccio additivo.

Ripensare il componente scelto in ottica additiva mi ha costretto ad investigare molteplici possibilità, scartando le meno plausibili e inquadrando quelle che potevano rivelarsi promettenti. Per fare questo è stato necessario interpretare e analizzare i requisiti del componente e le caratteristiche principali funzionali per l'utilizzatore.

La principale sfida rappresentata da questo lavoro è stata dimostrare l'applicabilità delle tecnologie additive tramite materiale metallico al settore automotive. Infatti, mentre nel campo biomedicale ed aerospaziale le tecnologie additive hanno cominciato a diffondersi molto rapidamente, trovando riscontro in numerosi casi applicativi, nell'industria dell'automobile il loro sviluppo risulta essere ancora in fase primordiale.

Con questo studio è stato possibile dare un'ulteriore conferma della grande potenzialità mostrata da queste tecnologie, in grado di generare geometrie estremamente complesse e innovative. È stato possibile dimostrare quanto può essere accresciuta la complessità di un componente realizzato in *additive* rispetto ai processi di fabbricazione convenzionale. Questo consente la progettazione del pezzo secondo la sua specifica funzionalità.

È stato inoltre dimostrato che la maggiore complessità del prodotto non ha inciso particolarmente sul costo finale.

Infine, l'integrazione di più parti in un unico componente, associata alla possibilità di realizzare nuove architetture, ha permesso di migliorare le prestazioni della parte in esame e quindi del sistema di recupero del calore.

Restano tuttavia da chiarire alcuni dubbi che tutt'ora permangono. Mentre nell'industria aerospaziale e biomedicale la voce di costo non sempre rappresenta un fattore di primaria importanza, nel caso dell'industria dell'autoveicolo questo è un aspetto da tenere sempre in considerazione.

Infatti, l'industria dell'autoveicolo è caratterizzata da un livello di competizione sui costi superiore ad altri settori di mercato; questo rappresenta un fattore di rischio per la ricerca delle migliori soluzioni tecnologiche che in questa fase di sviluppo costringe ad una analisi dettagliata di ogni proposta di sostituzione di un processo di produzione standard.

In generale, la semplice sostituzione del processo di fabbricazione si può considerare, se non accompagnata da una revisione completa del componente, come una strada non percorribile.

Nei prossimi anni l'ulteriore sviluppo di queste tecnologie in termini di robustezza dei materiali, rapidità del processo e riduzione dei costi favoriranno l'assunzione della tecnologia da parte di altri settori industriali, fornendo un nuovo valido strumento con il quale realizzare prodotti ad alto valore aggiunto.

Bibliografia

1. *Centro Ricerche Fiat*. [Online] <https://www.crf.it/IT>.
2. Milewski, John O. *Additive Manufacturing of Metals. From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry*. s.l. : Springer, 2017.
3. Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker. *Additive Manufacturing Technologies*. s.l. : Springer, 2015.
4. Li Yang, Keng Hsu, Brian Baughman, Donald Godfrey, Francisco Medina, Mamballaykalathil Menon, Soeren Wiener. *Additive Manufacturing of Metals: The technology, Materials, Design and Production*. s.l. : Springer, 2017.
5. Iuliano, Luca. *Introduzione all'AM per il corso Politecnico*. Torino : Dipartimento di Ingegneria Gestionale e di Produzione.
6. *Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020. REPORT FROM THE EC WORKSHOP ON ADDITIVE*. COMMISSION, EUROPEAN. 2014.
7. Jason Dawes, Robert Bowerman, Ross Trepleton. *Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain*. s.l. : Johnson Matthey, 2015.
8. Fino, Paolo. *Metal powders for AM processes*. Torino : s.n., 2017.
9. Ald Vacuum Technologies India. *Ceramic-Free Metal Powder Production for Reactive and Refractory Metals*. [Online] <http://www.ald-dynatech.com/>.
10. Vadim Sufiarov, Anatoliy Popovich. *Metal Powder Additive Manufacturing*. 2016.
11. ExOne. [Online] <https://www.exone.com>.
12. Sciaky Inc. [Online] <http://www.sciaky.com/>.
13. Fino, Paolo. *Materiali per la Produzione Additiva, Materiali per additive Leghe di Al*. Torino : s.n., 2017.
14. —. *Materiali per la Produzione Additiva, Materiali per additive Leghe di Fe*. Torino : s.n., 2017.
15. —. *Materiali per la Produzione Additiva, Materiali per additive Leghe di Ni*. Torino : s.n., 2017.
16. —. *Materiali per la Produzione Additiva, Materiali per additive Leghe di Ti*. Torino : s.n., 2017.
17. —. *Materiali per la Produzione Additiva, Materiali per additive Leghe Ti-Al*. Torino : s.n., 2017.
18. Wikipedia. *Technology Readiness Level*. [Online] https://it.wikipedia.org/wiki/Technology_Readiness_Level.

19. Sault, Brooke. *TEGmart*. [Online] 2018. <http://www.tegmart.com/info/guide-to-understanding-and-using-teg-power-and-products/>.
20. NE555. *NE555, Il Sito dedicato all'Elettronica*. [Online] 10 Aprile 2018. <https://www.ne555.it/generatori-termoelettrici/>.
21. K.T. Zorbas, E. Hatzikraniotis, K.M. Paraskevopoulos. *Power and Efficiency Calculation in Commercial TEG and Application in Wasted Heat Recovery in Automobile*. Thessaloniki, Greece : s.n., 2007.
22. Pooja Sharma. *Module 4 : THERMOELECTRICITY Lecture 21 : Seebeck Effect*. [Online] https://www.academia.edu/28372653/Module_4_THERMOELECTRICITY_Lecture_21_Seebeck_Effect.
23. Kumar, Narinder. *Comprehensive Physics XII*. s.l. : Laxmi Publications, 2004.
24. Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid. *Tecnologia Meccanica*. s.l. : Pearson.
25. *SiderMariotti*. [Online] [<http://www.sidermariotti.it/acciaio-inox/austenitici/304.html>].
26. Prima Additive. [Online] <https://www.primaadditive.com/it/>.