

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Corso di Laurea Magistrale in
INGEGNERIA MECCANICA

**ADDITIVE MANUFACTURING E OTTIMIZZAZIONE
TOPOLOGICA: MASSIMIZZARE LE PRESTAZIONI
DI UNA PINZA FRENO PER APPLICAZIONI
MOTORSPORT**

Tesi di Laurea Magistrale in
COSTRUZIONE DI MACCHINE

RELATORE:
Prof. Ing. Croccolo Dario

PRESENTATA DA:
Terenzi Marco

CORRELATORE:
Dott. Ing. Carlo Cavallini
Dott. Ing. Massimiliano De Agostinis
Ing. Stefano Fini

Anno accademico 2018-2019

Sommario

Sommario	1
Lista delle figure.....	4
Lista delle tabelle.....	8
Abstract	9
1. Introduzione	11
1.1. Introduzione al componente pinza freno	11
1.2. Carichi meccanici e termici sul corpo pinza.....	12
1.3. Influenza della pinza freno sulla dinamica del veicolo	14
1.4. Pinza freno di riferimento.....	17
2. Additive Manufacturing	21
2.1. Introduzione all'additive manufacturing	21
2.2. Tecnologie additive manufacturing	22
2.2.1. Vat Photopolymerization	23
2.2.2. Material extrusion	27
2.2.3. Material Jetting	31
2.2.4. Binder Jetting	33
2.2.5 Sheet Lamination	35
2.2.6. Direct Energy Deposition	36
2.2.7. Powder Bed Fusion	38
2.3. Ciclo generico componente	41
2.3.1. Generazione del modello CAD.....	42
2.3.2. Conversione del modello CAD in formato accettabile dal sistema di produzione.....	43
2.3.3. Preparazione del modello CAD	44
2.3.4. Set-up macchina.....	46

2.3.5. Costruzione della parte	48
2.3.6. Rimozione della parte	49
2.3.7. Post-processo	49
2.4. Laser Powder Bed Fusion.....	50
2.4.1. Processo	50
2.4.2. Macchina.....	52
2.4.3. Parametri.....	56
2.4.4. Materiali.....	61
2.4.5. Potenziali difetti.....	64
3. Design for Additive Manufacturing	67
3.1. Design for manufacturing e design for assembly	69
3.2. Design for additive manufacturing	70
3.2.1. Geometrie complesse	71
3.2.2. Geometrie personalizzate.....	71
3.2.3. Assiemi integrati	72
3.2.4. Eliminazione vincoli DFM	73
3.3. Materiali	73
3.4. Considerazioni generali sul Design For Additive Manufacturing.....	79
3.5. Design di strutture leggere.....	86
3.5.1. Ottimizzazione topologica	88
3.5.2. Strutture cellulari	98
3.6. Linee guida generali per geometrie di processi L-PBF	103
3.7. Progettazione delle strutture di supporto	108
3.8. Re-Design for Additive Manufacturing.....	110
4. Caso studio.....	111
4.1. Work-flow	111
4.2. Carichi	112
4.3. Scelta dei materiali	113
4.4. Ottimizzazione topologica.....	117

4.4.1. Modellazione design space	117
4.4.2. Definizione delle aree funzionali	120
4.4.3. Definizione dei carichi e dei vincoli	121
4.4.4. Discretizzazione del design space e analisi fem strutturale	123
4.4.5. Set-up parametri e definizione target.....	126
4.4.6. Calcolo geometria ottimizzata ed estrazione dei risultati semplificati	128
4.4.7. Confronto Altair OptiStruct	132
4.5. Modellazione CAD.....	134
4.6. Analisi statica	138
4.7. Modellazione seconda versione.....	141
4.8. Analisi statica seconda versione	143
4.9. Modellazione terza versione	146
4.10. Analisi statica terza versione	148
4.11. Risultati modellazione	151
4.12. Modellazione grezzo di stampa e ingegnerizzazione	152
4.13 Cambio materiale pistoncini	156
4.14. Trattamenti superficiali parti striscianti.....	158
4.15. Carico termico e codice Matlab.....	161
5. Conclusioni	163
Riferimenti bibliografici e sitografia.....	166
Appendice	171
Appendice A.....	172
Appendice B	173
Appendice C	174

Lista delle figure

Figura 1. Impianto frenante con pinza flottante a un pistoncino	11
Figura 2. Strutture principali di un corpo pinza freno monoblocco	12
Figura 3. Principali deformazioni di una pinza freno	13
Figura 4. Modello quarter-car	16
Figura 5. Modulo dell'autovettore di spostamento della massa sospesa.....	16
Figura 6. ISR 22-048.....	17
Figura 7. ISR 22-048.....	18
Figura 8. Circuito idraulico ISR 22-048	18
Figura 9. Vista in sezione ISR 22-048.....	19
Figura 10. Metodo di costruzione tecnologia SLA.....	24
Figura 11. SLA top-down	25
Figura 12. SLA bottom-up.....	26
Figura 13. Struttura sistema DLP	27
Figura 14. Differenza sezioni realizzabili SLA e DLP.....	27
Figura 15. Struttura sistema FDM	28
Figura 16. Metodo di costruzione tecnologia FDM	28
Figura 17. Effetto superfici laterali FDM	30
Figura 18. Metodo di costruzione MJ.....	32
Figura 19. Struttura sistema Binder Jetting	34
Figura 20. Struttura sistema DED	37
Figura 21. Struttura sistema PBF	39
Figura 22. Rappresentazione interazione laser polvere metallica	51
Figura 23. Schema interno camera di costruzione.....	53
Figura 24. Specchi attuati da galvanometri	55
Figura 25. Lente f-theta.....	56
Figura 26. Strategie di scansione	57

Figura 27. Strategia di scansione intra-layer	58
Figura 28. Hatch distance	59
Figura 29. Potenza del laser in funzione della velocità di scansione e della densità relativa.....	59
Figura 30. Tensioni indotte da carichi termici.....	65
Figura 31. Esempi di benchmark	81
Figura 32. Iterazioni ottimizzazione topologica	89
Figura 33. Differenza rapporti moduli elastico con fattori di penalizzazione diversi ..	91
Figura 34. Esempio trave flessa incastrata.....	92
Figura 35. Risultati algoritmo SIMP.....	93
Figura 36. Risultati algoritmo BESO.....	96
Figura 37. Processo ottimizzazione topologica	97
Figura 38. Strutture reticolari di supporto	99
Figura 39. Strutture reticolari a superficie minima periodica.....	100
Figura 40. Strutture reticolari sheel	101
Figura 41. Vincolo spessore di parete.....	103
Figura 42. Vincolo dimensione dei dettagli.....	104
Figura 43. Vincolo inclinazione superfici in sottosquadro	104
Figura 44. Vincolo zone concentrazione stress termici	105
Figura 45. Vincolo accuratezza dimensionale	105
Figura 46. Vincolo rimozione delle polveri.....	106
Figura 47. Vincolo dimensioni dei fori.....	106
Figura 48. Vincolo dimensione dei bordi non supportati	107
Figura 49. Vincolo rapporti dimensionali.....	107
Figura 50. Esempio strutture di supporto.....	109
Figura 51. Work-flow	112

Figura 52. Andamento modulo di Young in funzione della temperatura lega 7075-t6	114
Figura 53. Resistenza specifica in funzione della temperatura.....	114
Figura 54. Andamento modulo di Young in funzione della temperatura lega Ti6Al4V	115
Figura 55. Corpo pinza freno originale.....	118
Figura 56. Vista frontale design space.....	118
Figura 57. Vista in sezione design space	119
Figura 58. Vista frontale non design space.....	120
Figura 59. Vista superiore non design space	120
Figura 60. Vincoli design space.....	121
Figura 61. Carico tangenziale design space.....	122
Figura 62. Pressione design space	122
Figura 63. Carico tappi design space.....	123
Figura 64. Deformazioni pinza freno originale	124
Figura 65. Deformazioni design space vista posteriore.....	125
Figura 66. Deformazioni design space vista inferiore	125
Figura 67. Tensioni equivalenti design space vista frontale.....	126
Figura 68. Tensioni equivalenti design space vista inferiore	126
Figura 69. Ottimizzazione topologica simmetrica vista frontale.....	128
Figura 70. Ottimizzazione topologica simmetrica vista posteriore	129
Figura 71. Ottimizzazione topologica vista frontale.....	129
Figura 72. Ottimizzazione topologica vista posteriore	130
Figura 73. Geometria simmetrica vista frontale	131
Figura 74. Geometria simmetrica vista posterire.....	131
Figura 75. Geometria asimmetrica vista frontale.....	132
Figura 76. Geometria simmetrica vista superiore.....	132

Figura 77. Risultato OptiStruct vista frontale.....	133
Figura 78. Risultato OptiStruct vista posteriore	133
Figura 79. Risultato OptiStruct vista posteriore laterale	133
Figura 80. Risultato OptiStruct vista frontale laterale	134
Figura 81. Superficie free-shape vista frontale.....	135
Figura 82. Superficie free-shape vista posteriore	135
Figura 83. Superfici parametriche	136
Figura 84. Pinza freno versione uno vista frontale	137
Figura 85. Pinza freno versione uno vista posteriore	137
Figura 86. Tensioni equivalenti pinza prima versione vista posteriore	139
Figura 87. Tensioni equivalenti pinza prima versione vista inferiore	139
Figura 88. Cut-off tensioni equivalenti pinza prima versione	140
Figura 89. Deformazioni pinza prima versione	141
Figura 90. Pinza freno versione due vista frontale	142
Figura 91. Pinza freno versione due vista posteriore.....	142
Figura 92. Dettaglio condotti olio pinza freno versione due	143
Figura 93. Tensioni equivalenti pinza seconda versione vista posteriore	144
Figura 94. Tensioni equivalenti pinza seconda versione vista inferiore.....	144
Figura 95. Cut-off tensioni equivalenti pinza seconda versione.....	145
Figura 96. Deformazioni pinza seconda versione.....	145
Figura 97. Pinza freno versione tre vista frontale	147
Figura 98. Pinza freno versione tre vista posteriore	147
Figura 99. Dettaglio condotti olio pinza freno versione tre.....	148
Figura 100. Tensioni equivalenti pinza terza versione vista posteriore.....	149
Figura 101. Tensioni equivalenti pinza terza versione vista inferiore.....	149
Figura 102. Cut-off tensioni equivalenti pinza terza versione.....	150
Figura 103. Deformazioni pinza terza versione.....	150

Figura 104. Vista posteriore grezzo di stampa	153
Figura 105. Vista in sezione grezzo di stampa	154
Figura 106. Vista posteriore supporti	154
Figura 107. Vista anteriore supporti	155
Figura 108. Vista in sezione supporti	155
Figura 109. Dettaglio sovreametallo sedi pastiglie.....	156
Figura 110. Pompante	157
Figura 111. Tensioni equivalenti pompante	158
Figura 112. Deformazioni pompante	158
Figura 113. Superfici di contatto tribologico corpo pinza	160
Figura 114. Superfici di contatto tribologico pompante	161
Figura 115. Andamento temperatura in funzione del tempo copo pinza alluminio e titanio	162
Figura 116. Pinza freno completa	163

Lista delle tabelle

Tabella 1. Materiali Metallici	74
Tabella 2. Materiali polimerici	76
Tabella 3. Comparativa materiali per pinza freno	116

Abstract

I veicoli ad alte prestazioni sono soggetti ad elevati carichi per piccoli intervalli di tempo. Questo comporta diverse criticità sulle componenti che costituiscono la vettura: una di queste è la pinza freno. Al fine di renderla performante è necessario il possesso di due proprietà.

In primo luogo, la pinza freno deve essere il più leggera possibile: la sua massa, sommata a quella delle altre componenti della sospensione e del gruppo ruota, va a costituire la *massa non sospesa* del veicolo che, dal punto di vista della performance, è deleteria. Infatti, essa conferisce un'inerzia nella risposta della sospensione del veicolo, procurando il distacco dello pneumatico dal suolo e causando perdita di aderenza.

In secondo luogo, è necessario contenere le deformazioni della pinza freno garantendo un determinato feeling per il pilota: una deformazione oltre misura di questa costringe il pilota ad effettuare un'extra corsa sul pedale o leva del pompante freno.

Il compito del progettista è ottimizzare questi due parametri che hanno effetti antitetici. Infatti, per ottenere maggiore rigidità serve una quantità di massa superiore. Questa difficoltà porta il progettista a creare design molto complessi per raggiungere l'ottimale e non sempre le geometrie ottenute sono realizzabili con tecnologie convenzionali.

Questo studio riguarda il miglioramento prestazionale di una pinza freno con attacco radiale e quattro pistoncini contrapposti costruita con una lega di alluminio 7075-T6 e lavorato dal pieno. Gli obiettivi sono quello di produrre il nuovo corpo in titanio TI6Al4V, dal momento che le temperature di esercizio portano a grandi decadute di caratteristiche meccaniche dell'alluminio, contenere il più possibile la massa a fronte dell'aumento di densità di materiale e ovviamente limitare le deformazioni.

Al fine di ottenere gli obiettivi prefissati sono utilizzati metodi agli elementi finiti in diverse fasi della progettazione: in un primo momento per acquisire una geometria di

partenza (ottimizzazione topologica) e in un secondo luogo per la validazione delle geometrie ottenute.

Le geometrie ricavate tramite l'ottimizzazione topologica devono essere ricostruite tramite software CAD affinché possano essere ingegnerizzate. Durante la modellazione è necessario valutare quale tecnologia è più vantaggiosa per produrre il componente. In questo caso studio si utilizza un processo di addizione di materiale, più specificatamente una tecnica Selective Laser Melting (SLM).

La tecnologia SLM è basata sulla fusione di polvere metallica tramite un fascio laser e genera il componente tramite la sovrapposizione di diversi strati fusi. Questo processo rende possibile la realizzazione di parti complesse imponendo pochissimi vincoli di forma al progettista.

In aggiunta è considerato il cambio di materiale dei pistoncini. Questi infatti sono costruiti in acciaio e il passaggio a titanio, con obbligatorio rivestimento per migliorare l'aspetto tribologico, porterebbe grossi vantaggi a livello di riduzione di massa.

Completata la definizione del design, tolleranze, materiali e trattamenti si passa alla fase di ingegnerizzazione, con l'esecuzione di disegni tecnici per lavorazioni di asportazione di truciolo.

Nella prima parte dello scritto sono approfonditi i concetti fondamentali dell'Additive Manufacturing, delle più note tecnologie additive e più in particolare del SLM. In seguito, è trattata la teoria del design for additive e degli strumenti per mettere in pratica questa teoria.

1. Introduzione

1.1. Introduzione al componente pinza freno

L'impianto di frenata è il più importante apparato in un'autovettura ai fini della sicurezza ed ha un grandissimo interesse per le prestazioni nel mondo del Motor sport. La sua funzione è quella di decelerare il veicolo. La quasi totalità dei sistemi di frenata utilizzati nell'ambito Motorsport sono basati sulla frizione e il loro principio di funzionamento permette di trasformare energia cinetica in energia termica che verrà successivamente dissipata tramite il raffreddamento con aria.

Questi tipi di impianti sono composti da 3 elementi principali: il disco, le pastiglie e la pinza freno. Il disco e le pastiglie sono quei componenti soggetti a usura dove viene creata la forza di attrito. Invece la pinza freno è la parte dedita a creare la forza assiale che fa in modo che le pastiglie premano contro il disco. Caratteristica molto importante di questi impianti è la linearità di funzionamento, ossia assumendo un coefficiente di attrito costante otterremo una forza frenante linearmente proporzionale alla forza impressa sull'azionamento del freno.

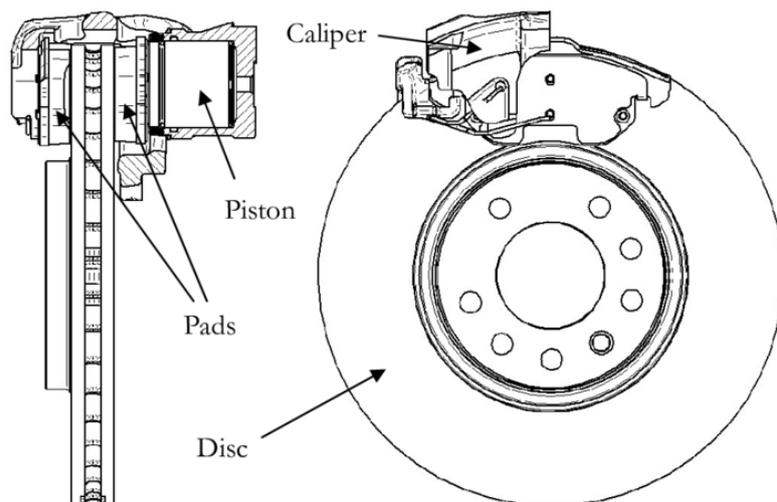


Figura 1. Impianto frenante con pinza flottante a un pistoncino

Il corpo pinza è il componente del sistema più complesso. Questa alloggia uno o più pistoncini che scorrono al suo interno in apposite sedi. Proprio questi ultimi elementi

vanno a premere le pastiglie contro il disco con una forza che viene generata per mezzo di una pressione idraulica. All'interno del corpo pinza sono quindi alloggiati tutti i circuiti dell'olio per mettere in pressione i pistoncini e ovviamente tutte le sedi per le tenute dell'olio. Inoltre, il corpo pinza può essere costruito come un monoblocco, più leggero e rigido ma molto più costoso, o in varie parti che poi vengono assemblate. I pistoncini possono essere montati in varie configurazioni: contrapposti o solo su un lato (in questo caso si parla di pinza flottante perché non rimane fissa nella stessa posizione come la versione con i pistoncini contrapposti ma scorre su una guida in modo che tutte le pastiglie si avvicinino al disco, applicazione molto comune nelle vetture stradali a basse prestazioni). Un'ulteriore distinzione sulle tipologie di pinza viene fatta anche per la disposizione dei bulloni che la bloccano al mozzo ruota: può essere montata con attacchi radiali, assiali o meno comunemente tangenziali.

I materiali più comuni nella realizzazione di questa componente sono leghe di alluminio e acciai o in applicazioni molto spinte si utilizzano leghe alluminio-litio o leghe di titanio.

1.2. Carichi meccanici e termici sul corpo pinza

Nella figura sottostante è riportata un'immagine prospettica di una pinza monoblocco semplificata a quattro pistoncini contrapposti ad attacco radiale.

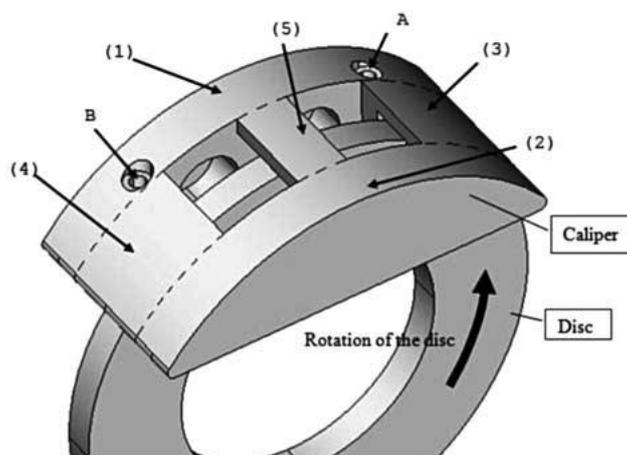


Figura 2. Strutture principali di un corpo pinza freno monoblocco

La pinza è vincolata tramite due bulloni nella posizione A e B posizionati radialmente rispetto al disco che andranno a serrarsi sul mozzo in modo da garantire la non rotazione. Possiamo pensare di dividere il componente in 5 aree. La prima area (1) è la metà del volume interna della pinza, ovvero la parte che si affaccia sul mozzo. L'area (2) è la parte esterna che sta totalmente a sbalzo. Queste due aree sono interconnesse tra loro tramite tre ponti (3-4-5).

Nella trattazione considereremo come rotazione “normale” quella indicata dalla freccia in figura 2, ovvero quella che si verificherebbe nel caso di moto “in avanti” del veicolo.

Le pastiglie bloccando il disco verranno trascinate e andranno a premere lungo le proprie sedi nel corpo pinza. Questa sollecitazione andrà a deformare il corpo pinza come mostrato in figura 3b.

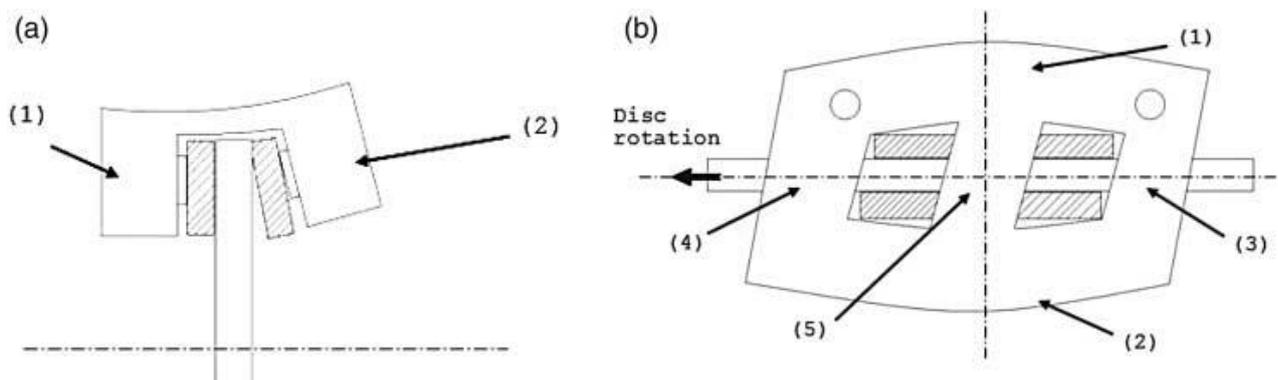


Figura 3. Principali deformazioni di una pinza freno

Per attuare la forza di attrito tra pastiglie e disco viene azionato il circuito oleodinamico in modo che la pressione esercitata sui pistoncini crei una forza risultante in direzione normale rispetto al disco. Queste forze tra olio, pistoncini, pastiglie e disco generano delle forze di reazione che fanno sì che la pinza si deformi come mostrato in figura 3a. Quest'ultima deformazioni solitamente è la più evidente e dipende molto dalla configurazione dei pistoncini, delle dimensioni di questi e dalla pressione dell'olio dell'impianto.

Viste le deformazioni a cui è soggetto il corpo pinza si deduce che il miglior modo per ottimizzare il rapporto peso rigidità sia quello di ottimizzare le strutture 3,4 e 5. Un grave errore nell'ottimizzare questi “ponti” sarebbe quello di sovradimensionare il ponte centrale in rapporto a quelli laterale. In questo caso la deformazione dovuta al

trascinamento delle pastiglie porterebbe a ruotare la parte esterna della pinza intorno alla struttura 5 vanificando l'aumento di massa. Infatti, questa sollecitazione è asimmetrica rispetto alla pinza e porterà il progettista a ottenere un design finale anch'esso asimmetrico.

Un altro carico molto importante per un progettista che sollecita l'impianto frenante è il carico termico. Questo interessa maggiormente le parti striscianti dell'impianto, disco e pastiglie, ma i contatti meccanici tra pastiglie, pistoncini e corpo pinza fa sì che anche la pinza e l'olio assorbano calore. La maggior parte dei materiali usati nelle costruzioni delle pinze freno risentono di questa variazione di temperatura rendendo non trascurabile anche questo fattore.

1.3. Influenza della pinza freno sulla dinamica del veicolo

L'autovettura è un assieme complesso di moltissimi sottogruppi, ciascuno avente un proprio scopo preciso e dotati di una determinata massa. La somma delle masse di tutti questi gruppi di componenti contribuirà alla massa totale del veicolo. Uno di questi sottosistemi è quello della sospensione.

La sua funzione è quella di mantenere il contatto ruota-manto stradale nel miglior modo possibile. Nei veicoli non da competizione viene ricercato il maggior confort per i conducenti e passeggeri o per le merci trasportate. In questo caso al presentarsi di asperità sul piano stradale la sospensione cerca di assorbire questi difetti e di trasmettere meno accelerazioni possibili agli occupanti dell'abitacolo. Per raggiungere questo fine la sospensione è costituita di elementi elastici e componenti ammortizzanti. Analogamente, la sospensione di un veicolo da corsa è costituita degli stessi elementi ma il suo scopo principale è quello di massimizzare maneggevolezza e handling.

Nello studio del comportamento del sistema di sospensione è importante dividere le masse di questo gruppo di componenti in due parti: le masse non sospese e le masse sospese. Vengono definite masse sospese tutte quelle che si trovano al sopra dell'elemento elastico, in inglese "sprung weight", mentre quelle al di sotto, tra cui il sistema frenante, vengono definite come masse non sospese o "unsprung weight". Alcune componenti come ad esempio i braccetti della sospensione non sono definibili

come masse sospese o non, quindi al fine di un'analisi con modelli semplificati le masse di queste parti vengono equamente divise tra le due tipologie.

Un'ulteriore distinzione va fatta tra le masse non rotanti e quelle rotanti. Inoltre, le masse rotanti vanno divise in lentamente rotanti, ossia tutte quelle con una velocità angolare prossima a quella delle ruote, e masse velocemente rotanti, con velocità di rotazione vicine a quelle del motore.

In base a questa distinzione possiamo capire che la massa di ogni componente avrà un impatto diverso sulle prestazioni del veicolo e sarà sempre associata alla sua inerzia. Ad esempio, la massa totale avrà effetti dinamici sulle accelerazioni laterali e longitudinali del veicolo e il suo impatto sarà sempre costante a differenza di una massa rotante che la sua inerzia varia con la velocità di rotazione e può avere effetti più o meno importanti.

Tornando alle masse non sospese queste vanno a modificare come la sospensione si comporta rispetto alle alterazioni del manto stradale. Esiste un indice fondamentale per la progettazione delle sospensioni della vettura e varia in base alle esigenze del veicolo, prestazione, confort e alla natura di questo. Questo indice può essere ricavato facendo il rapporto tra la somma delle masse sospese e quelle non sospese. Più questo valore sarà alto più la vettura sarà confortevole e prestante. Nelle applicazioni più spinte, come nel settore del Motorsport si cerca di ridurre al minimo le masse non sospese, addirittura integrando l'elemento ammortizzante ed elastico all'interno della vettura con particolari geometrie della sospensione. La ragione di questa ricerca sta tutta nel fenomeno fisico di trasmissione di forze da un corpo a massa minore ad uno a massa maggiore.

Per condurre una analisi tecnica della sospensione i progettisti sono soliti utilizzare il modello quarter-car, un modello semplificato che ricostruisce solo una delle quattro sospensioni della vettura al fine di analizzare al meglio il contatto ruota-suolo. Esistono anche altri modelli semplificativi come il full-car e i due modelli half-car, uno che analizza il rollio e uno il beccheggio. Questi ultimi modelli introducono gradi di libertà che non rendono fattibile l'analisi dell'adesione della ruota al piano stradale, effetto palesato dal modello quarter-car.

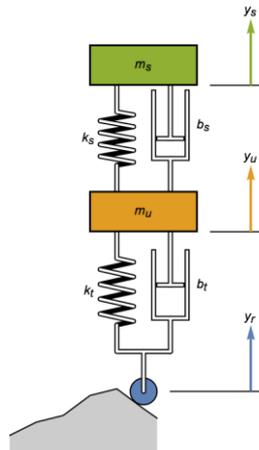


Figura 4. Modello quarter-car

Nella figura 4 sono state indicate con m_s le masse sospese e con m_u quelle non sospese. Per quanto riguarda gli elementi elastici e smorzati sono indicati con il pedice s quelli appartenenti alla sospensione e con pedice t quelli relativi allo pneumatico, perché la sua capacità di assorbire le asperità non è trascurabile.

Modellando matematicamente i modi di vibrare della sospensione eccitata da una sollecitazione armonica otterremo il seguente grafico:

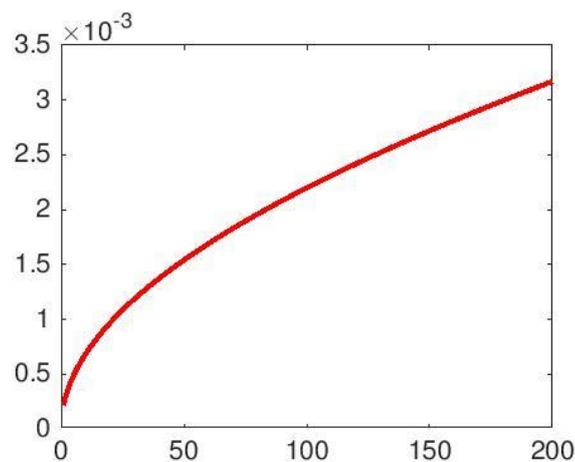


Figura 5. Modulo dell'autovettore di spostamento della massa sospesa

Il grafico presenta in ascissa i kg della massa non sospesa e in ordinata il valore di ampiezza dell'oscillazione della massa sospesa.

Il grafico è stato ottenuto imponendo una massa sospesa fissa (400Kg) e facendo variare la massa non sospesa, risolvendo il problema di meccanica delle vibrazioni trovando gli autovalori, che corrispondono alle ampiezze delle frequenze di vibrazione proprie del sistema e autovettori, che messi in combinazione con gli autovalori

restituiscono i modi di vibrare del sistema. Si può notare come all'aumentare della massa non sospesa aumenti anche l'ampiezza dell'oscillazione della massa sospesa e insieme a questa le forze trasmesse a quest'ultima.

1.4. Pinza freno di riferimento

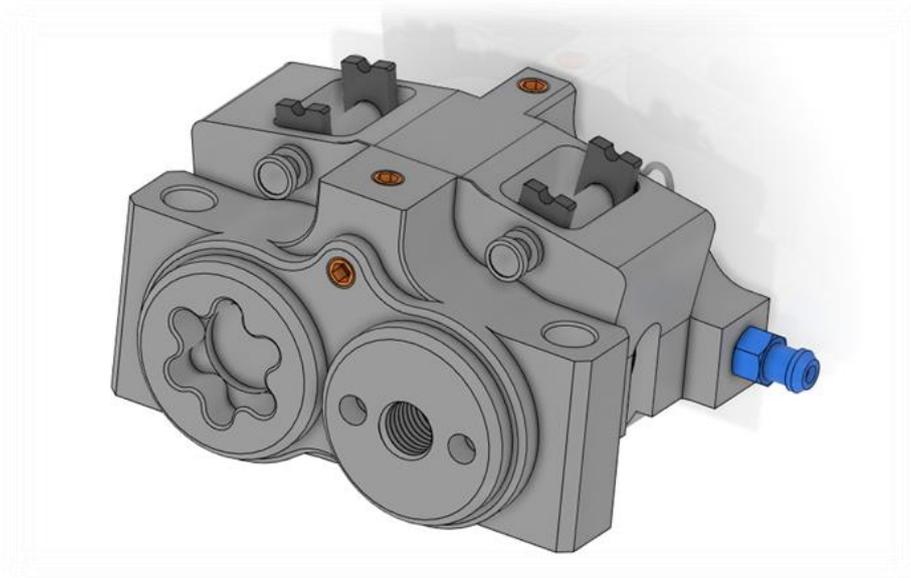


Figura 6. ISR 22-048

La pinza freno in questione è prodotta dalla casa svedese ISR. ISR produce sistemi frenanti universali per le più disparate applicazioni. Il modello in questione è codificato come 22-048.

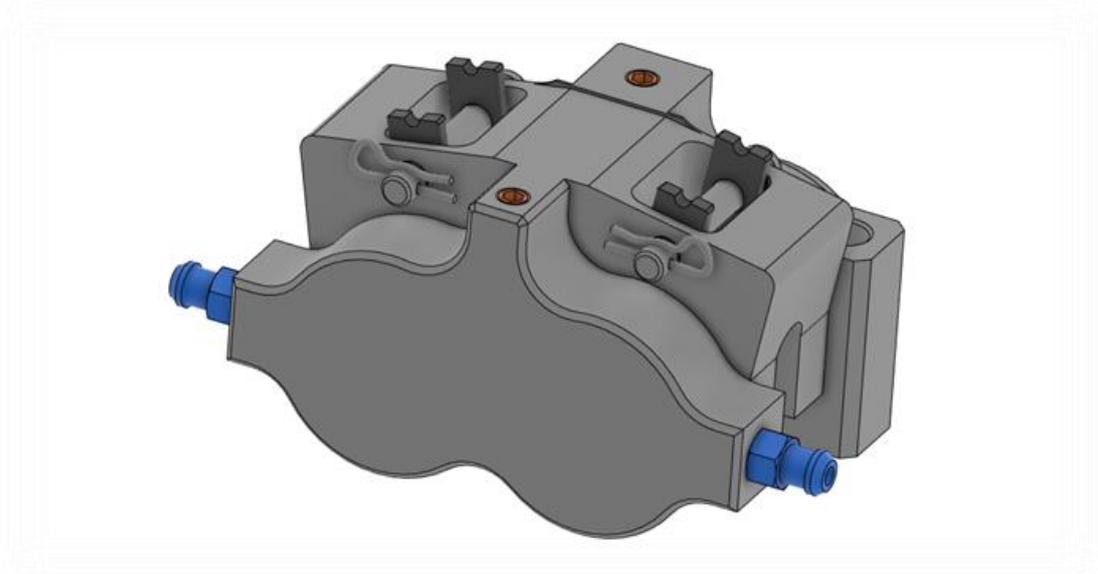


Figura 7. ISR 22-048

Trattasi di una pinza monoblocco costituita in alluminio 7075-T6 e ad attacco radiale. Presenta 4 pistoncini contrapposti in acciaio diametro 25mm che premono su 4 pastiglie. Il corpo pinza viene interamente lavorato dal pieno, quindi anche i canali che convogliano l'olio in pressione ai pistoncini vengono ricavati tramite foratura e sono necessarie diverse componenti per rendere il circuito stagno. Le componenti accessorie per il circuito oleodinamico sono evidenziate in arancione e azzurro in figura 6,7 e 8.

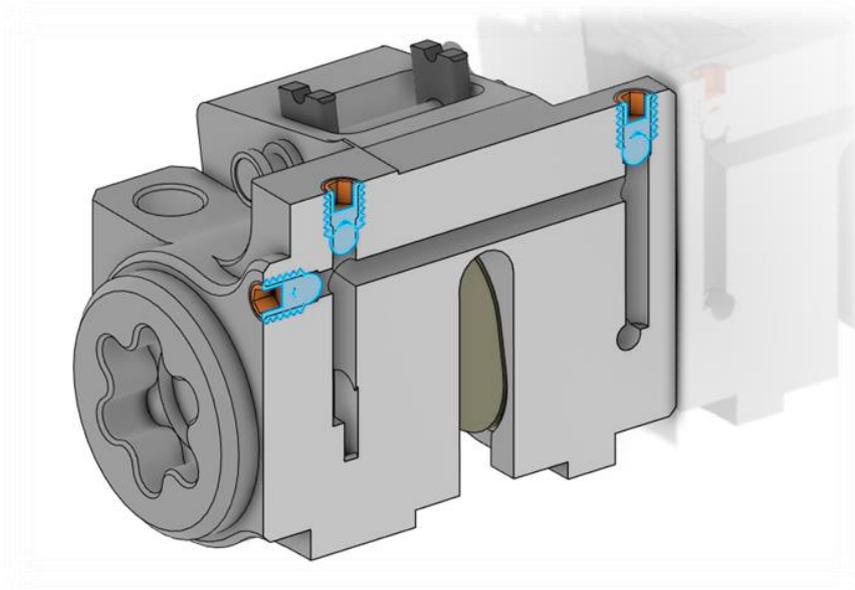


Figura 8. Circuito idraulico ISR 22-048

Inoltre, il corpo pinza, essendo studiato per essere utilizzato su vari tipi di veicolo e quindi essere posizionato in vari orientamenti, è dotato di due valvole di spurgo. Queste valvole sono evidenziate in blu nelle figure 6 e 7.

Internamente la pinza possiede vari componenti:

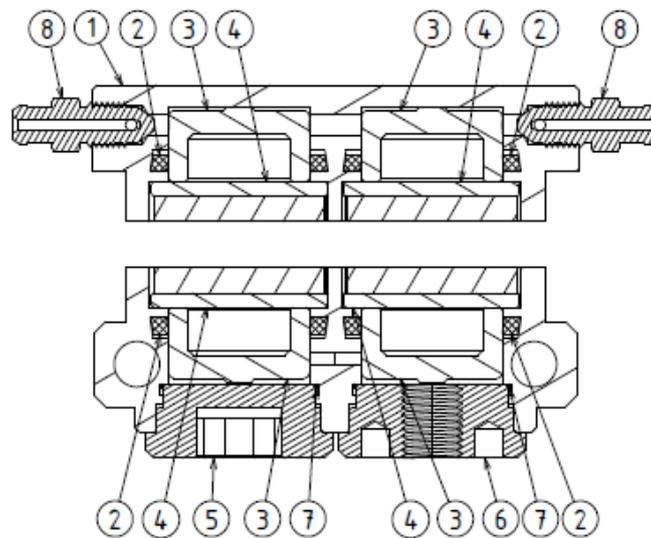


Figura 9. Vista in sezione ISR 22-048

- 1) Corpo pinza.
- 2) Guarnizioni pistoncini.
- 3) Pistoncini.
- 4) Pastiglie.
- 5) Tappo chiuso.
- 6) Tappo aperto.
- 7) O-ring.
- 8) Valvole di spurgo.

Le 4 guarnizioni pistoncini sono necessarie affinché l'olio in pressione non trapeli dai fianchi dei pistoncini verso l'esterno. Per mantenere il circuito oleodinamico sigillato sono presenti due ulteriori o-ring in prossimità dei due tappi, questi ultimi indispensabili per l'assemblaggio dei pistoncini all'interno del corpo pinza. I tappi hanno geometrie diverse tra loro; uno dei due presenta un foro che mette in

comunicazione l'ambiente che andrà in pressione all'interno della pinza con l'esterno. Tramite quest'ultima lavorazione si realizza il collegamento con il condotto, solitamente un tubo in treccia metallica, che andrà a collegarsi con la pompa freno. A completare il circuito oleodinamico troviamo le valvole di spurgo necessarie per eliminare le inclusioni di aria all'interno dell'olio. È indispensabile eliminare queste inclusioni, essendo l'aria un fluido comprimibile andrebbe a diminuire la pressione all'interno del circuito diminuendo di conseguenza anche la potenza della frenata. Il peso del gruppo pinza è di 248 grammi che sommati alla massa dei pistoncini e della minuteria arriva a 405g.

2. Additive Manufacturing

2.1. Introduzione all'additive manufacturing

Il termine “Rapid Prototyping” (RP) o prototipazione rapida è utilizzato in vari settori per indicare un processo per creare una rappresentazione quasi sempre non funzionale di un prodotto. L'enfasi della terminologia è sulla rapidità con cui avviene la realizzazione e sulla natura dei prodotti creati con queste tecniche, i quali sono dei prototipi non commercializzabili.

RP è utilizzato, ad esempio, anche in ambiti informatici per descrivere un processo di sviluppo di software in modo parziale che consente ai clienti di testare idee e di fornire feedback durante lo sviluppo del codice.

In un contesto di sviluppo del prodotto, il termine RP è ampiamente utilizzato per descrivere tecnologie che creano oggetti o componenti direttamente da dati digitali.

Con il passare degli anni queste tecniche si sono evolute e l'avvento di nuove tecnologie e materiali hanno reso inadeguato questo termine visto che non descrive più efficientemente le recenti applicazioni.

I miglioramenti nella qualità e caratteristiche dell'output delle macchine di prototipazione rapida ha comportato un legame molto più stretto con il prodotto finale. L'evoluzione di questa tecnologia ha portato a classificare i prodotti con la nomenclatura “3Fs”, ossia le 3 F, dove le lettere F stanno per Form, Fit e Function.

Infatti, i modelli iniziali, quelli appartenenti alla categoria Form, erano utilizzati solo per apprezzare le geometrie, essendo la tecnologia capace di realizzare le geometrie del componente. Con il progredire della tecnologia si è arrivati a realizzare geometrie con un'accuratezza superiore che permetteva anche l'accoppiamento con altre parti, raggiungendo anche la caratteristica Fit. L'ultima fase del processo di evoluzione della tecnologia ha portato all'utilizzo di nuovi materiali rendendo disponibile anche la funzionalità della parte, ossia la caratteristica Function.

Allo stato dell'arte si riescono a realizzare diversi componenti direttamente da questi tipi di macchinari; non è più possibile quindi definire queste parti come prototipi.

Inoltre, il termine RP non definisce a priori una categoria di processi che adottano un approccio additivo per la fabbricazione di oggetti.

Per questi motivi l'American Society for Testing and Materials International (ASTM International) ha convenuto l'adozione di una nuova terminologia.

Dalla traduzione letterale della designazione ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, si ottiene la definizione di AM come: “un processo di unione di materiale per la fabbricazione oggetti a partire da modello virtuale 3D, solitamente tramite la sovrapposizione di strati, al contrario delle metodologie di produzione sottrattive”.

In breve, viene denominata Produzione Additiva o Additive Manufacturing (AM) l'insieme di tecnologie che hanno come principio di base la realizzazione di parti o componenti a partire da dati virtuali creati utilizzando sistemi tridimensionali di progettazione assistita da computer (CAD 3D) tramite la diretta addizione di materiale senza la necessita di pianificare il processo.

Sebbene ciò non sia in realtà così semplice come sembra e come viene pubblicizzato nella cultura di massa, le tecnologie AM semplificano sicuramente in modo significativo il processo di produzione di oggetti 3D complessi direttamente da dati CAD.

In questo capitolo ci occuperemo di descrivere le principali tecnologie di produzione additiva, con un particolare focus sulla tecnologia Powder Bed Fusion, del ciclo generico di produzione di un componente e dei principali vantaggi e svantaggi.

2.2. Tecnologie additive manufacturing

Un ruolo chiave nella produzione additiva è giocato dalla scelta dei materiali da costruzione, poiché proprio l'avvento di nuovi materiali ha permesso di produrre componenti funzionali.

In base al materiale che si vuole utilizzare per costituire la parte esistono varie tecnologie di produzione additiva idonee allo scopo.

La selezione del processo di produzione additiva più adatto a una particolare applicazione può risultare difficile. Oggigiorno, infatti, la vasta gamma di tecnologie disponibili sul mercato rende attuabili diverse tecniche per raggiungere la soluzione desiderata, ma ognuna di esse offre diverse accuratezze dimensionali, finiture superficiali e necessita di diversi trattamenti o lavorazioni post-produzione.

Classificare tutti i processi di produzione additiva è pressoché impossibile, in quanto nascono continuamente nuove tecniche e ne vengono sviluppate di nuove ad hoc per le più disparate applicazioni.

Qui di seguito elencherò le principali e più diffuse tecniche additive manufacturing raggruppate secondo il principio fisico alla base del processo.

2.2.1. Vat Photopolymerization

Il fenomeno fisico alla base di queste tecniche è la fotopolimerizzazione. La fotopolimerizzazione si verifica quando una resina fotopolimerica viene esposta alla luce di una lunghezza d'onda specifica e subisce una reazione chimica diventando solida. Numerose tecnologie additive utilizzano questo fenomeno per costruire una parte solida uno strato alla volta. Il termine identifica inoltre che la resina, in forma liquida, utilizzata per la costruzione del componente viene stoccata in una vasca.

2.2.1.1 SLA-Stereolitografia

La stereolitografia è, tra i processi di fotopolimerizzazione, il più utilizzato ed anche uno dei primi i processi additivi ad essere stato brevettato. Nel processo SLA la piattaforma è immersa in un serbatoio riempito con resina fotopolimerica liquida. Il laser, grazie all'ausilio di uno specchio attuato da un galvanometro, scansiona ciascuna sezione del componente e solidifica il materiale. Dopo che uno strato viene solidificato, la piattaforma si solleva e libera un nuovo strato di resina che sarà a sua

volta scansionato in modo selettivo dal laser; queste fasi vengono ripetute fino a produrre l'intero componente. I componenti fabbricati tramite SLA sono isotropici perché gli strati si legano chimicamente tra loro durante la stampa, dando luogo a proprietà fisiche quasi identiche nelle direzioni x, y e z. Quindi se la parte viene stampata parallelamente o perpendicolarmente alla piattaforma, le proprietà del materiale finale della parte non ne saranno influenzate in modo rilevante. Infine, le parti completate possono essere trattate con cure a luce UV per migliorarne le proprietà meccaniche. Per quanto riguarda il processo di costruzione del pezzo, questa tecnologia necessita di supporti per il pezzo e l'altezza dello strato è regolabile tra i 25 e 100 μm al fine di avere maggior risoluzione oppure un processo di stampa il più veloce possibile per l'economicità del pezzo.

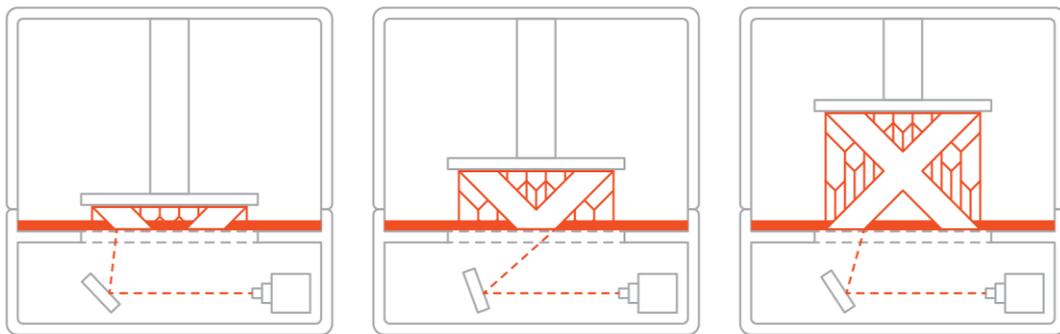


Figura 10. Metodo di costruzione tecnologia SLA

Esistono due principali tipi di macchine SLA: top-down e bottom-up.

Nelle macchine top-down la sorgente laser è posizionata sopra al serbatoio e i componenti vengono costruiti rivolti verso l'alto. La stampa inizia nella parte superiore della vasca della resina e la piattaforma si sposta verso il basso dopo ciascun layer. Nelle stampanti SLA top-down, i requisiti di supporto sono simili alle tecnologie FDM e queste strutture sono necessarie per stampare con precisione sporgenze e superfici con inclinazioni troppo spinte rispetto al piano di stampa. Per risolvere criticità nei sottosquadri e ridurre al minimo i supporti è necessario un corretto orientamento della parte in macchina.

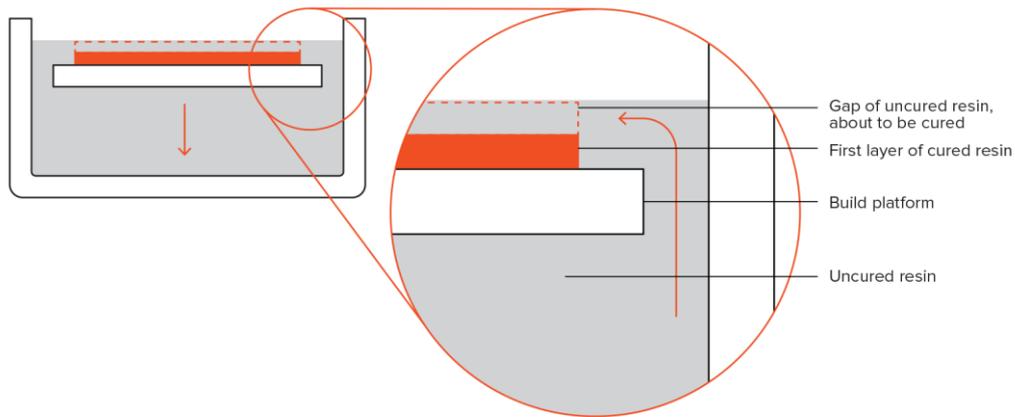


Figura 11. SLA top-down

Per quanto riguarda le soluzioni bottom-up invece la sorgente laser è situata sotto il serbatoio di resina e il componente vengono costruiti capovolti. La vasca di resina ha un fondo trasparente con un rivestimento in silicone che consente il passaggio della luce del laser, ma impedisce alla resina indurita di attaccarsi ad esso. Dopo ogni strato, la resina indurita viene staccata dal fondo del serbatoio e la piattaforma di costruzione si sposta verso l'alto. Nelle stampanti SLA bottom-up l'orientamento in macchina del pezzo e i supporti diventano un problema più complicato. Sbalzi e ponti devono ancora essere supportati, ma ridurre al minimo l'area della sezione trasversale di ogni strato è il criterio più cruciale: le forze applicate alla parte durante la fase di distacco possono causare il distacco dalla piattaforma di costruzione. Queste forze sono proporzionali all'area della sezione trasversale di ogni strato. Per questo motivo, le parti sono orientate per minimizzare la sezione trasversale e supportare i sottosquadri diventa di secondaria importanza.

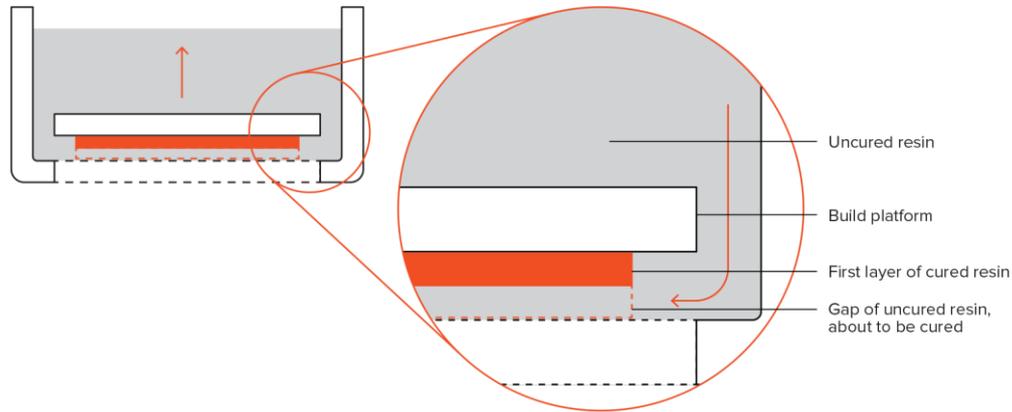


Figura 12. SLA bottom-up

Le soluzioni bottom-up sono molto più economiche rispetto alle top-down, ma hanno volumi di stampa molto inferiori e precisioni ridotte. Inoltre, l'ingegnerizzazione del componente è molto più complicata.

2.2.1.2. DLP/CDLP- Direct Light Processing/Continuous Direct Light Processing

La tecnica DLP segue un metodo quasi identico alla tecnologia SLA. La differenza principale è che DLP utilizza degli schermi LED o LCD per foto polimerizzare l'intero strato. Poiché il proiettore è uno schermo digitale, l'immagine di ogni livello è composta da pixel quadrati, risultando in uno strato che presenta bordi formati da piccoli quadrati. La tecnologia riduce i tempi di stampa rispetto alla SLA, poiché ogni strato è interamente esposto, piuttosto che tracciare l'area della sezione trasversale con un laser.

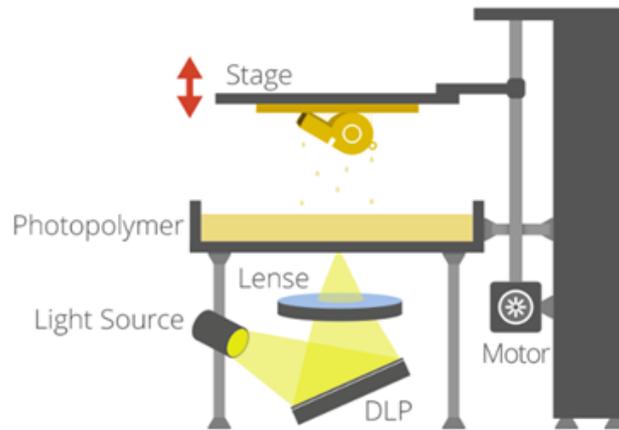


Figura 13. Struttura sistema DLP

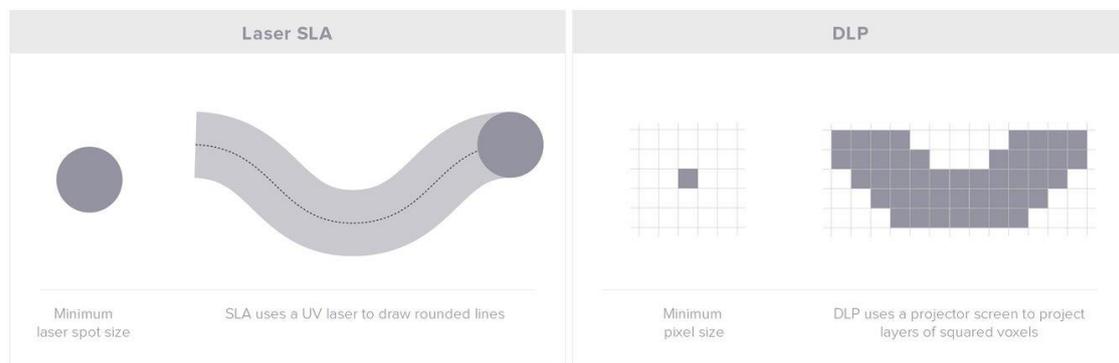


Figura 14. Differenza sezioni realizzabili SLA e DLP

Come per SLA esistono macchine bottom-up e top-down con le medesime necessità a livello di orientamento della parte e supporti.

Un'importante variante del DLP è il Continuous DLP. La differenza tra la versione standard e quella continua è che in quest'ultima i layer non sono eseguiti come step, ma il movimento verticale della piattaforma è continuo. In questa maniera si aumenta la produttività della macchina abbattendo i costi di stampa e le tempistiche di realizzazione del componente.

2.2.2. Material extrusion

2.2.2.1. FDM/FFF- Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication

FDM o FFF è la tecnologia di stampa 3D più utilizzata e solitamente è la tecnica a cui le persone sono più esposte sia a livello professionale che dilettantistico. FDM

costruisce le parti depositando “cordoni” di materiale termoplastico solido, che si presenta in forma grezza come filamento o pellet per le macchine che presentano una vite polimerizzatrice. La macchina è composta da sistemi di attuazione che muovono un ugello riscaldato e un piano di stampa. Il filamento viene spinto attraverso l’ugello riscaldato dove viene fuso.

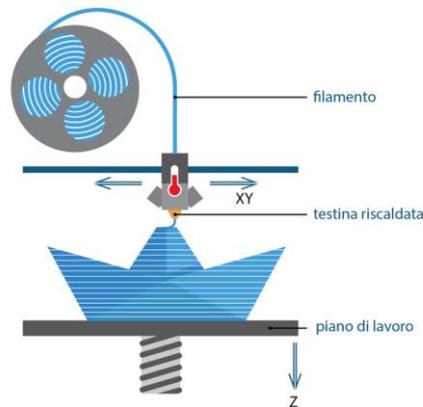


Figura 15. Struttura sistema FDM

La macchina sarà poi programmata per muovere l’ugello laddove vi sia necessità di materiale. Una volta costituito uno strato, il piano di stampa si abbasserà oppure l’ugello si alzerà in modo da iniziare lo strato successivo.

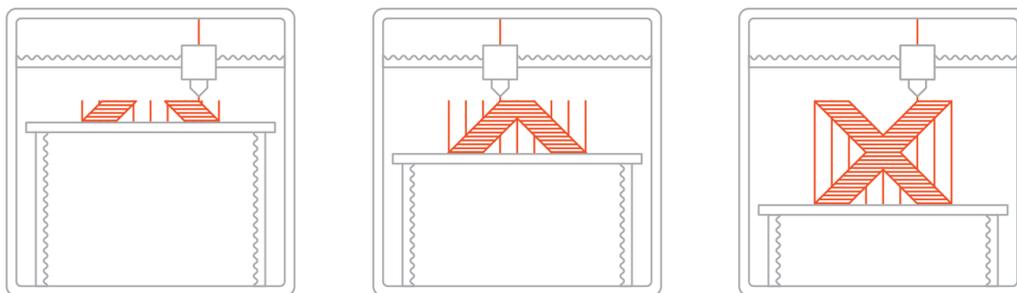


Figura 16. Metodo di costruzione tecnologia FDM

La maggior parte dei sistemi FDM consente la regolazione di numerosi parametri di processo, tra cui la temperatura dell'ugello e della piattaforma di costruzione, la velocità di costruzione e l'altezza dello strato. Questi sono generalmente impostati dall'operatore, quindi dovrebbero essere di scarsa preoccupazione per il progettista.

Ciò che è importante dal punto di vista del progettista è la dimensione massima del componente che possa essere realizzata e l'altezza dello strato. La dimensione di

costruzione disponibile di una stampante 3D desktop è generalmente di 200 x 200 x 200 mm, mentre per le macchine industriali può arrivare a 1000 x 1000 x 1000 mm.

L'altezza tipica dello strato utilizzato in FDM varia tra 50 e 400 μm e può essere determinata al momento del lancio del processo, indipendentemente dalle geometrie del componente. Un'altezza dello strato più piccola produce parti più lisce e cattura le geometrie curve in modo più preciso, mentre un'altezza maggiore produce parti più velocemente e ad un costo inferiore.

Durante i processi di produzione con tecniche FDM è essenziale ottenere una buona adesione tra i vari layer. Quando il materiale viene fuso ed estruso attraverso l'ugello, viene premuto contro lo strato precedente. L'alta temperatura e la pressione fondono nuovamente la superficie dello strato precedente e consentono l'incollaggio del nuovo strato con la parte precedentemente stampata.

La forza di legame tra i diversi strati è sempre inferiore alla forza di base del materiale. Ciò significa che le parti FDM sono intrinsecamente molto anisotrope: il legame del materiale nella direzione di stampa, solitamente indicato come asse Z, è sempre inferiore alla forza di legame nel piano XY. Per questo motivo, è importante tenere presente l'orientamento delle parti durante la progettazione di parti per FDM.

È stato determinato che la tensione in direzione X o Y di un materiale è di circa 4 volte superiore alla tensione che possiamo ottenere lungo Z.

Inoltre, poiché il materiale fuso viene premuto contro lo strato precedente, la forma del cordone viene deformata e passa da una forma circolare a una sezione ovale. Ciò significa che le parti FDM avranno sempre una superficie ondulata, anche per un'altezza di livello ridotta, e che dopo la stampa potrebbe essere necessario eseguire delle lavorazioni post processo in zone di interesse.

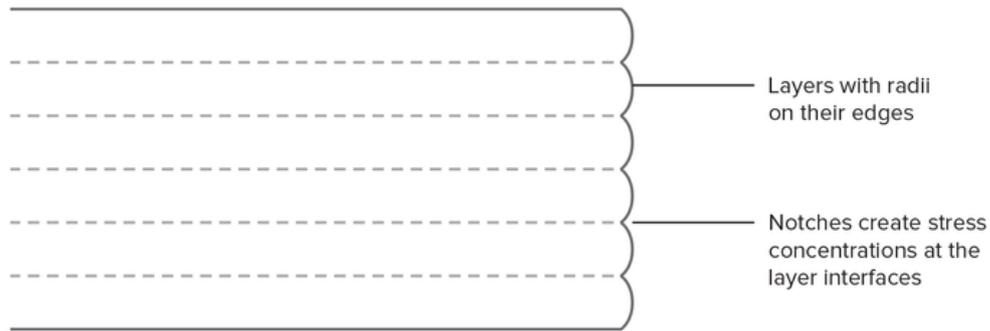


Figura 17. Effetto superfici laterali FDM

Le strutture di supporto sono essenziali per la creazione di geometrie con sporgenze in questa tecnologia per il semplice fatto che il materiale fuso non può essere depositato in aria senza un substrato.

Le superfici stampate su supporto saranno di qualità superficiale inferiore rispetto al resto della parte. Per questo motivo, è consigliato progettare la parte in modo tale da ridurre al minimo la necessità di supporti.

Il supporto viene solitamente stampato nello stesso materiale della parte. Esistono anche materiali di supporto che si dissolvono in liquidi, ma sono utilizzati principalmente in sistemi desktop di alta fascia o industriali. La stampa su supporti dissolvibili migliora in modo significativo la qualità della superficie del pezzo, ma aumenta il costo complessivo della parte, poiché sono necessarie macchine speciali, con doppio estrusore, e poiché il costo del materiale dissolvibile è relativamente elevato.

Per rendere più economiche le parti stampate e rendere più economico il processo, le componenti prodotte con questa tecnologia sono solitamente cave o con una percentuale di riempimento.

Lo spessore del riempimento e del guscio influisce notevolmente sulla resistenza di una parte.

Uno dei punti di forza chiave di FDM è l'ampia gamma di materiali disponibili. Questi possono variare da materiali termoplastici semplici, come PLA e ABS, a materiali tecnici, come PA, TPU e PETG, e materiali termoplastici ad alte prestazioni, come PEEK e PEI. Negli ultimi anni sono stati sviluppati nuovi materiali compositi per ampliare la gamma di materiali disponibili con questa tecnologia al fine di migliorare

le caratteristiche meccaniche di questi ultimi, come i polimeri caricati con carbonio, per aggiungere particolari proprietà ai materiali di stampa, come plastiche caricate al rame e argento per poter realizzare circuiti elettrici, oppure per ottenere determinate qualità estetiche, combinazioni di vari polimeri con i più svariati materiali come legno, vetro, metalli e altri ancora.

2.2.3. Material Jetting

Le tecniche Material Jetting funzionano con lo stesso principio di fotopolimerizzazione delle tecnologie VAT Photopolymerization. La differenza è che in questo caso non abbiamo una vasca piena di fotopolimero, ma questo viene rilasciato tramite un array di ugelli su un piano o su del materiale precedentemente stampato. Inoltre, questo processo non richiede dei trattamenti post-processo di indurimento del pezzo. Il processo di stesura del fotopolimero è del tutto simile alla stampa comune a di getto di inchiostro 2D. Possono essere usati fotopolimeri, metalli o cera che polimerizzano o induriscono se esposti alla luce UV o a temperature elevate. La natura di questo processo consente la stampa di più materiali simultaneamente anche di natura diversa, utilizzando più schiere di array di ugelli. Questa capacità viene spesso utilizzata per stampare supporti di materiale diverso durante la fase di costruzione.

2.2.3.1. MJ- Material Jetting

Come detto la tecnica Material Jetting eroga un fotopolimero da centinaia di minuscoli ugelli in una testina di stampa per costruire una parte strato per strato. Ciò consente tecnologie a getto di materiale di depositare il materiale di costruzione in modo rapido e intelligente rispetto ad altre tecnologie additive di deposizione puntuale che seguono un percorso per completare l'area della sezione trasversale di uno strato. La possibilità di avere diverse testine permette di distribuire materiali diversi, quindi è possibile la stampa multi-materiale, la stampa a colori e l'erogazione di strutture di supporto

dissolvibili. Le strutture di supporto sono sempre necessarie in questa tecnica e devono essere rimosse successivamente.

Man mano che le goccioline vengono depositate sulla piattaforma di costruzione, vengono polimerizzate e solidificate mediante luce UV o lampade a infrarossi disposta direttamente dietro la testa di stampa se si considera la direzione di deposizione del materiale.

Una volta completato lo strato, la piattaforma di costruzione si sposta verso il basso di un'altezza pari allo spessore del layer e il processo si ripete fino al completamento dell'intera parte.

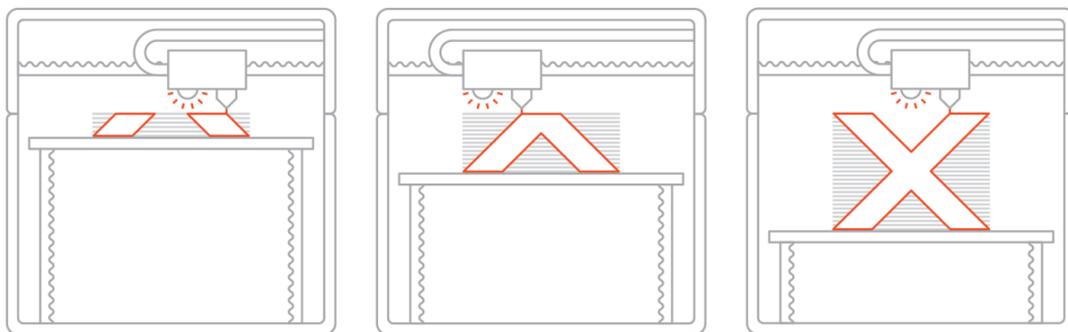


Figura 18. Metodo di costruzione MJ

In Material Jetting, quasi tutti i parametri di processo sono preimpostati dal produttore della macchina. Anche l'altezza dello strato è collegata a ciascun materiale specifico, a causa della complessa fisica della formazione delle goccioline. L'altezza tipica dello strato utilizzata con questa tecnologia è di 16 - 32 μm .

Material Jetting è considerata tra le più accurate tecnologie additive. Si possono verificare deformazioni, ma non è così comune come in altre tecnologie, come FDM o PBF, perché la stampa avviene a temperatura ambiente. Per questo motivo è possibile stampare parti molto grandi con grande precisione. La dimensione tipica di costruzione per sistemi desktop è di circa 380 x 250 x 200 mm, mentre i grandi sistemi industriali possono arrivare a 1000 x 800 x 500 mm.

Le parti costruite con tecnica Material Jetting possono avere superfici molto lisce, con poco o nessun segno della passata presenza di supporti.

L'orientamento delle parti è più flessibile rispetto ad altre tecniche di produzione additiva, ma è comunque importante, poiché l'uso esteso di materiale di supporto aumenta anche il costo complessivo della parte.

Material Jetting utilizza resine fotopolimeriche termoindurenti simili a quelle utilizzate in SLA in termini di proprietà e limitazioni.

2.2.3.2. Nano Particle Jetting-NPJ

Il nano Particle Jetting è del tutto simile al Material Jetting. La differenza sta nell'utilizzo di un particolare liquido. Questo liquido contiene nanoparticelle di metallo o nanoparticelle di supporto. Questo viene caricato in macchina e depositato tramite un array di ugelli sul substrato e successivamente le alte temperature all'interno della camera di costruzione provocano l'evaporazione del liquido lasciando come risultato una parte costruita solo con le particelle metalliche che non evaporano.

2.2.3.3 Drop-On-Demand-DOD

Le stampanti a getto di materiale DOD hanno 2 ugelli di stampa: uno per depositare i materiali di costruzione (in genere un liquido simile alla cera) e un altro per materiale di supporto dissolvibile. Analogamente alle tecniche tradizionali AM, le stampanti DOD seguono un percorso predeterminato e depositano il materiale in modo puntuale per costruire l'area della sezione trasversale di un componente. Queste macchine impiegano anche meccanismo chiamato fly-cutter che sfiora l'area di costruzione dopo ogni strato per garantire una superficie perfettamente piana prima di stampare lo strato successivo. La tecnologia DOD viene in genere utilizzata per produrre modelli in cera che verranno poi utilizzati in processi di fusione a cera persa, microfusione e fabbricazione di stampi.

2.2.4. Binder Jetting

La tecnica di stampa 3D Binder Jetting consiste nella deposizione di un agente adesivo legante su sottili strati di materiale in polvere. I materiali in polvere sono a base

ceramica, come ad esempio vetro e gesso, o metalli, come ad esempio acciaio inossidabile e alluminio.

Durante il processo di produzione, la testina di stampa, costituito di un array di ugelli simile alla testina di una stampante a getto di inchiostro, si sposta sulla piattaforma di costruzione depositando goccioline di legante. Quando uno strato è completo, il letto di polvere si sposta verso il basso e un nuovo strato di polvere viene distribuito nell'area di costruzione. Il processo viene ripetuto strato per strato fino al completamento della parte.

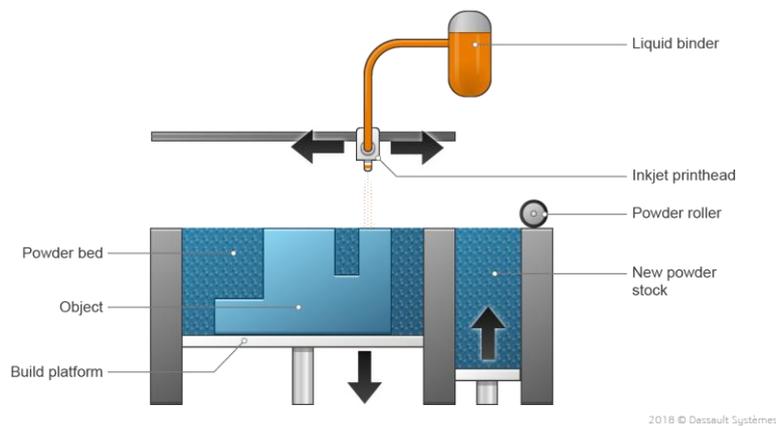


Figura 19. Struttura sistema Binder Jetting

Dopo la stampa, le parti si trovano in uno stato incompleto e richiedono un'ulteriore elaborazione successiva prima che siano messe in esercizio. Spesso viene aggiunta una sostanza infiltrante per migliorare le proprietà meccaniche delle parti. La sostanza infiltrante è di solito un adesivo ciano acrilato, nel caso della ceramica, o bronzo, nel caso dei metalli. Un'altra strategia è quella di mettere il pezzo, nel suo stato incompleto, all'interno di un forno per ottenere una sinterizzazione dei grani di cui è costituito.

Il processo di Binder Jetting può lavorare varie tipologie di materiali tra cui metalli, sabbie silicee e ceramiche. Alcuni materiali, come la sabbia, non richiedono lavorazioni aggiuntive.

Questa tecnologia è ottima per applicazioni che richiedono una buona estetica e forma, come modelli architettonici, imballaggi e riproduzioni per modellismo in scala. In genere non è adatto per applicazioni funzionali a causa della natura fragile delle parti.

Rispetto alle tecniche Powder Bed Fusion, il metodo di getto del legante presenta il vantaggio di non impiegare calore durante il processo di costruzione, il che impedisce la creazione di stress residui nelle parti dovuti a zone termicamente alterate.

Le parti costituite con questo processo a base metallica hanno proprietà meccaniche relativamente buone grazie al processo di infiltrazione. Queste parti possono essere utilizzati come componenti funzionali e hanno proprietà meccaniche relativamente buone. Sono anche più convenienti delle parti metalliche realizzate con tecnologia Selective Laser Melting, ma hanno proprietà meccaniche più scarse perché i grani dei materiali non si fondono completamente.

2.2.5 Sheet Lamination

2.2.5.1. LOM- Laminated Object Manufacturing

La tecnica di produzione additiva Laminated Object Manufacturing nota anche come LOM consiste nel sovrapporre diversi strati di materiale composti da un foglio o laminati per fabbricare un oggetto. Ogni foglio viene tagliato secondo una forma ben precisa tramite un particolare coltello o per mezzo di un laser per ricalcare la sezione trasversale dell'oggetto.

Inizialmente, le macchine additive che si basavano sulla tecnologia LOM producevano parti realizzate con strati di PVC uniti tra loro con un particolare adesivo. Le parti realizzate con questo procedimento erano robuste ed economiche. Successivamente, si sono sviluppate tecniche di laminazione di fogli basate sulla carta. Gli ultimi sviluppi della tecnica LOM hanno reso possibile l'uso di fogli di fibra di carbonio e vari compositi. Queste tecniche sono ancora da affinare dai loro produttori e non sono ancora ampiamente diffuse.

Nella produzione di oggetti laminati su supporto cartaceo, il materiale cartaceo utilizzato è della normale carta per copie. Innanzitutto, la carta passa attraverso una stampante 2D a getto d'inchiostro standard per essere colorata. Tutte le pagine colorate necessarie per costruire la parte finale vengono quindi impilate nella stampante 3D. Dopo di che la macchina distende un particolare adesivo, colloca il foglio che

rappresenta lo strato e lo taglia della geometria desiderata, per poi riiniziare il ciclo fino al completamento della parte.

La carta rimanente può essere rimossa a mano. I modelli di carta possono essere completamente colorati, avere caratteristiche simili al legno e possono essere lavorati con macchine utensili e rifiniti di conseguenza. La precisione del risultato dipende principalmente dallo spessore del materiale utilizzato, come ad esempio un foglio di carta. Un foglio di carta standard ha uno spessore che varia tra 50 e 100 μm .

Le applicazioni per le parti di produzione di oggetti laminati 3D con carta includono studi ergonomici, visualizzazioni topografiche e modelli di architettura. Con materiali termoplastici e fibre di carbonio è possibile produrre direttamente componenti tecnici leggeri e funzionali per l'industria aerospaziale e automobilistica a costi molto competitivi.

2.2.6. Direct Energy Deposition

La tecnica di produzione additiva Direct Energy Deposition, crea parti fondendo direttamente i materiali e depositandoli sul pezzo in lavorazione, strato per strato. Questa tecnologia viene utilizzata principalmente con polveri metalliche o materiali sotto forma di filamento. Oltre alla capacità di costruire parti finite accoppiando sullo stesso macchinario utensili per le lavorazioni ad asportazione di truciolo, DED è anche in grado di riparare parti danneggiate complesse, come pale di turbine o eliche.

La maggior parte dei macchinari che utilizzano queste tecniche sono sistemi industriali con ingombri molto grandi che richiedono un ambiente chiuso e controllato per funzionare. Pertanto, la tipica deposizione ad energia diretta è costituita da un ugello montato su un braccio antropomorfo all'interno di una camera chiusa, che deposita il materiale fuso sulla superficie del pezzo, dove si solidifica. Il processo è simile in linea di principio alla tecnica di stampa 3D per estrusione di materiale, ma con questa tecnologia l'ugello può muoversi in più direzioni, fino a cinque assi diversi rispetto ai soli due per la maggior parte delle macchine FDM/FFF.

La tecnologia DED raggruppa diverse tecnologie che si distinguono tra loro per il modo in cui il materiale viene fuso, ogni tecnica è adatta a scopi diversi e specifici.

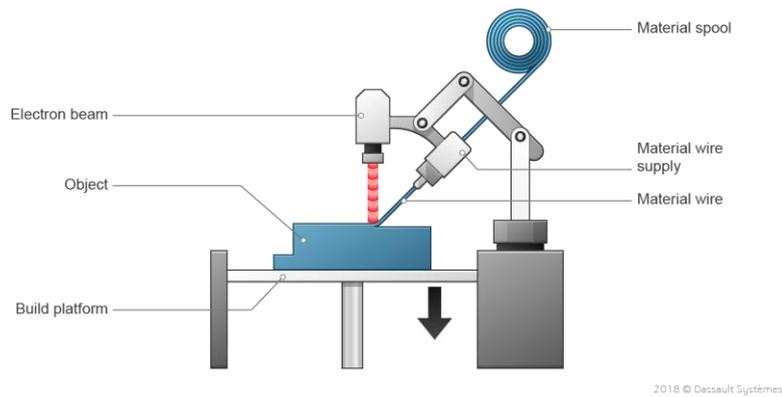


Figura 20. Struttura sistema DED

2.2.6.1. LENS

I sistemi di produzione LENS utilizzano laser per costruire oggetti strato per strato direttamente da polveri metalliche, ceramiche o compositi. Il processo LENS deve avvenire in una camera ermeticamente sigillata riempita di gas inerte, come ad esempio l'argon, in modo che i livelli di ossigeno e umidità rimangano molto bassi. Ciò mantiene la parte pulita e previene l'ossidazione. Il materiale metallico in polvere viene consegnato direttamente alla testa di deposizione del materiale. Una volta depositato un singolo strato, la testa di deposizione del materiale passa allo strato successivo. Costruendo strati successivi, viene costruita l'intera parte. Al termine, il componente viene rimosso e può essere trattato termicamente, lavorato o rifinito in qualsiasi modo richiesto.

2.2.6.2. Electron Beam Additive Manufacturing-EBAM

L'Electron Beam Additive Manufacturing è una tecnologia di produzione additiva che produce strutture metalliche su larga scala. La testa deposita il metallo, originariamente sotto forma di polvere o filamento, strato per strato, fondendolo grazie ad un fascio di elettroni, fino al raggiungimento della forma finale. Le velocità di deposizione del materiale variano da 3 a 9 kg di metallo all'ora. I metalli compatibili includono titanio e nichel. Questa tecnica DED può essere utilizzata anche per riparare parti danneggiate.

2.2.6.3. Laser Deposition Welding-LDW

Il processo di produzione additiva Laser Deposition Welding utilizza la deposizione metallica mediante un ugello che emette un flusso di polvere metallica e un fascio laser. La polvere viene fusa dal laser e a differenza delle tecniche LENS non c'è bisogno di una camera stagna perché la parte fusa viene protetta da un flusso di gas inerte coassiale con il laser e il flusso di polvere metallica. Questa tecnologia additiva può essere fino a 10 volte più veloce della tecnologia Powder Bed Fusion. Inoltre, è possibile integrare nello stesso macchinario anche utensili per asportazione di truciolo. Questa innovativa soluzione ibrida combina la flessibilità del processo di deposizione di metalli laser con la precisione del processo di taglio e consente quindi una produzione additiva di altissima qualità e precisione.

2.2.7. Powder Bed Fusion

I processi PBF utilizzano energia termica focalizzata per consolidare selettivamente le regioni di uno strato di polvere. A seconda della particolare tecnologia, la fonte di calore potrebbe essere diversa: Selective Laser Sintering (SLS) e Selective Laser Melting (SLM) utilizzano laser, Multi Jet Fusion (MJF) utilizza energia a infrarossi ad alta potenza ed Electron Beam Melting (EBM) adotta fasci di elettroni. L'energia erogata al letto di polvere deve essere calibrata in base al materiale di costruzione: i processi che impiegano polimeri avranno bisogno di molta meno energia per fondere le particelle rispetto a quelli che utilizzano polveri metalliche.

Questi processi consentono di ricavare parti a scopo sia rappresentativo che funzionale con un'ottima precisione dimensionale.

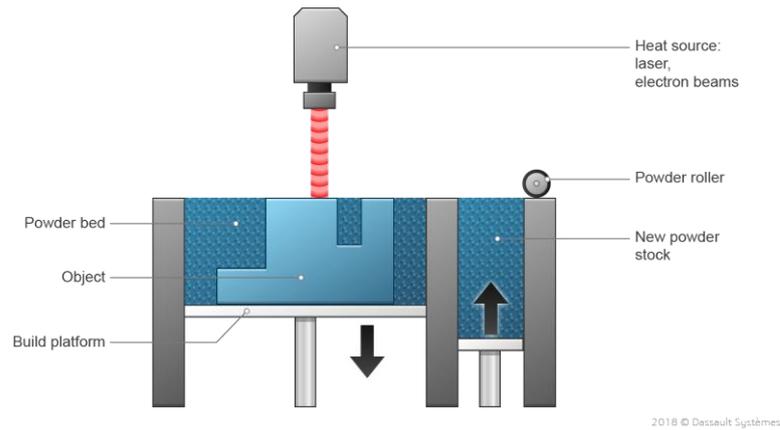


Figura 21. Struttura sistema PBF

2.2.7.1. Selective Laser Sintering - SLS

La tecnologia SLS produce parti tramite la sinterizzazione selettiva di un sottile strato di polvere di materiale. Il processo inizia con la preparazione di un sottile strato di polvere plastica ad appannaggio di un componente chiamato recoater, che può essere sia un rullo che una lama in gomma, spostando la polvere lungo la piastra di supporto. Una volta avvenuta la preparazione del layer, una sorgente laser, con l'ausilio di specchi mossi da galvanometri, sinterizza la sezione del componente. Completata questa fase la piattaforma si abbassa dell'altezza di un layer per la stesura di un nuovo strato di polvere. Il processo verrà ripetuto fino al completamento del pezzo. Il risultato del processo sarà un componente sinterizzato completamente inglobato in un volume di polvere del medesimo materiale. La fase finale del processo sarà quindi liberare il componente o i componenti dalla polvere.

I principali materiali processabili con questa tecnologia sono di natura plastica come il Nylon o materiali elastici simili alla gomma. Nella progettazione di questi componenti il progettista dovrà prevedere ed eliminare la presenza di macro-inclusioni interne di aria e fenomeni di warping. Inoltre, dovrà prevedere nella geometria del componente fori e passaggi per lo scarico della polvere. Un vantaggio di questa tecnologia è la mancanza di necessità dei supporti.

2.2.7.2 Multi jet fusion-MJF

La tecnologia Multi Jet Fusion è molto simile alla sinterizzazione selettiva del laser (SLS). In entrambi i processi i componenti sono costruiti mediante la sinterizzazione termica strato per strato di particelle di polimeri in polvere. I materiali utilizzati con MJF, come con SLS, sono polimeri termoplastici. La principale differenza tra MJF e SLS è la fonte di calore. SLS utilizza un laser per scansionare e sinterizzare ogni strato, mentre in MJF viene distribuita una resina fondente sulla polvere che promuove l'assorbimento della luce a infrarossi. Una fonte di energia a infrarossi passa quindi sulla sezione e fonde le aree dove è presente l'agente di fusione.

Questo particolare inchiostro viene distribuito sulla sezione del componente con un array di ugelli come avviene su una normale stampante a getto di inchiostro.

Inoltre, viene distribuito anche un altro tipo di liquido che ha l'effetto totalmente opposto, ovvero penalizza l'assorbimento di energia. Questo inchiostro viene distribuito sui bordi della sezione del componente in modo da aumentare la qualità e il grado di dettaglio.

Come per la tecnologia SLS completata una sezione la piattaforma si abbassa e un nuovo strato di polvere viene steso per il prossimo layer.

Una qualità importante di questo processo è la non necessità di supporti e la non dipendenza tra volume del componente e tempo di produzione. Infatti, il tempo del processo dipende solo dall'altezza della parte o delle parti. Per questi due motivi per abbattere i costi di produzione è possibile riempire interamente la camera di produzione sia nelle direzioni X e Y, ma anche Z.

Alla fine del processo le parti stampate sono racchiuse dentro la polvere non fusa e devono essere raffreddate prima di poter essere rimosse. Una volta rimossa la polvere in eccesso questa può essere trattata per essere riutilizzata.

2.2.7.3. Electron Beam Melting-EBM

La tecnologia EBM funziona analogamente alla tecnologia SLS, ma la fonte energetica in questo caso non è più un laser ma un fascio di elettroni.

Inoltre, con questo tipo di sorgente non si ha più solo la sinterizzazione della polvere ma la completa fusione.

Il vantaggio di questa tecnologia è che il fascio elettronico utilizza meno energia e ciò porta ad avere meno distorsioni della parte processata e meno stress residui indotti da zone termicamente alterate. Questo implica anche l'utilizzo di supporti meno massicci e in minor numero. La camera dove avviene la lavorazione vista la natura del fascio deve essere sottovuoto.

Purtroppo, però questa tecnologia rispetto alla tecnologia SLM ha dettagli, dimensioni di feature, spessori di strato e finiture superficiali tipicamente di qualità inferiore. Inoltre, si possono processare solo materiali con una buona conduttività elettrica.

2.2.7.4. Selective Laser Melting -SLM

Le macchine che sfruttano la tecnologia SLM sono del tutto simili alle macchine SLS. Anche in questo caso un laser scansiona la sezione del pezzo, ma ora non si ha la sola sinterizzazione della sezione ma la completa fusione. La totale fusione della polvere permette di realizzare strutture leggere e resistenti.

Un'altra differenza con la tecnologia SLS è nei supporti. Nelle tecniche SLM, infatti, i supporti sono più massicci per mantenere le deformazioni contenute ed asportare quanto più calore possibile. I processi SLM sono tra i più diffusi nell'ambito metal AM.

Nel progetto trattato in questa tesi il componente è stato progettato per essere prodotto con questo tipo di tecnologia, per questa ragione si troverà a seguire un capitolo di approfondimento su questa tecnica.

2.3. Ciclo generico componente

Per passare da un concetto di un componente ad una parte completa e funzionale intercorrono una serie di passaggi. A seconda della tecnologia e, della macchina utilizzata e dei materiali, la catena di processo è composta generalmente di sette fasi:

1. Generazione del modello CAD del progetto;

2. Conversione del modello CAD in formato accettabile dal sistema di produzione;
3. Preparazione del modello CAD;
4. Set-up macchina;
5. Costruzione della parte;
6. Rimozione della parte;
7. Post-produzione;

Questi passaggi possono essere raggruppati o suddivisi e possono apparire diversi da caso a caso, ma nel complesso la catena di processo di una tecnologia rimane simile a quella di una tecnologia diversa. Anche la catena di processo è in continua evoluzione e può cambiare con lo sviluppo delle tecnologie esistenti e con la comparsa di nuove tecnologie. In questo elaborato, l'attenzione sarà focalizzata sulla tecnologia SLM.

2.3.1. Generazione del modello CAD

In qualsiasi processo di progettazione del prodotto il primo passo è immaginare e concettualizzare la funzione e l'aspetto del prodotto. Questo può assumere la forma di descrizioni testuali, schizzi, a modelli virtuali tridimensionali. In termini di catena di processo, il primo step è rappresentato dai modelli CAD virtuali in cui il prodotto concettualizzato esiste in uno spazio digitale e i valori della sua geometria, materiale e proprietà sono memorizzati e sono facilmente recuperabili. In generale, le catene di processi AM iniziano con la modellazione CAD 3D. Il processo di produzione di un modello CAD 3D da un'idea nella mente del progettista può assumere molte forme. Esistono numerosi programmi CAD con diversi principi, capacità, accessibilità e costi di modellazione.

Una volta prodotto un modello CAD 3D, possono essere eseguiti i passaggi seguenti della catena di processo. Sebbene questa progredisca tipicamente in una direzione che inizia con la modellazione CAD e termina con una parte o un prototipo finiti, è spesso un processo iterativo in cui vengono apportate modifiche al modello CAD per rispecchiare le esigenze di ogni fase della catena di processo. In riferimento alla tecnologia a letto di polvere metallica, il feedback critico può derivare dalla geometria

e dall'anisotropia delle proprietà meccaniche delle parti a causa dell'orientamento della costruzione, distorsioni della parte o delle caratteristiche a causa della traccia termica della costruzione, problemi nella generazione e rimozione delle strutture di supporto e altri. Questi problemi potrebbero nel susseguirsi delle fasi e potrebbero richiedere modifiche e revisioni del progetto. Simile al tema del design per la producibilità, il design per la produzione additiva è fondamentale e si sta sviluppando parallelamente alle tecnologie stesse. Il capitolo 5 è dedicato alla discussione del design per additive manufacturing.

2.3.2. Conversione del modello CAD in formato accettabile dal sistema di produzione

Quasi tutta la tecnologia AM disponibile oggi utilizza il formato di file STereoLithography. Il formato STL di un modello CAD 3D cattura tutte le superfici del modello 3D mediante la discretizzazione in triangoli di varie dimensioni sulle sue superfici. Al suo interno un file formato STL contiene le 3 coordinate spaziali di ogni nodo e un vettore normale alla superficie del triangolo con direzione verso l'esterno della geometria. Le posizioni spaziali dei vertici di ciascun triangolo e dei vettori normali per ciascun triangolo, quando combinate, consentono ai programmi di pre-elaborazione AM di determinare le posizioni spaziali delle superfici della parte e su quale lato della superficie è l'interno della parte. Sebbene il formato STL sia stato considerato di fatto lo standard, presenta dei limiti intrinseci, infatti, in questi file sono memorizzate solo le informazioni sulla geometria mentre tutte le altre informazioni che un modello CAD può contenere sono eliminate. Informazioni come unità, matematiche, colore, materiale e altre possono svolgere un ruolo cruciale nella funzionalità della parte costruita vanno perse durante il processo di traduzione dei file. Pertanto, pone delle limitazioni alla funzionalità delle parti finite. Il formato "AMF" è stato sviluppato appositamente per affrontare questi problemi e limitazioni ed è ora il formato standard ASTM / ISO. Oltre alle informazioni sulla geometria, contiene anche indicazioni su colore, materiale e ulteriori informazioni sono memorizzabili con questo formato file. Sebbene attualmente il formato predominante del file utilizzato dai

sistemi AM e supportato dai programmi di modellazione CAD sia ancora il formato STL, un numero crescente di società di programmi CAD, ha incluso il supporto dei formati di file AMF. Attualmente, l'uso effettivo delle informazioni archiviate nel file AMF è ancora limitato a causa delle capacità degli attuali sistemi additivi e dallo stato attuale di sviluppo tecnologico. Un altro tipo di file, sviluppato direttamente dall'industria per Additive Manufacturing, è 3MF, 3D Manufacturing Format. A differenza dei file STL, 3MF, basato su XML, potrà contenere al suo interno oltre la geometria, anche tutte quelle indicazioni riguardo materiale, orientamento, colori e texture superficiali.

2.3.3. Preparazione del modello CAD

Quando è disponibile un file STL, è necessaria una serie di passaggi per generare le informazioni necessarie al sistema di pre-processo per avviare il processo di compilazione del file macchina. Le informazioni necessarie variano a seconda della tecnologia, ma in generale questi passaggi iniziano con l'elaborazione del file STL.

Una volta importati i modelli dal file STL, le dimensioni di questi possono essere modificate se necessario. Quando il modello è delle dimensioni desiderate, vengono eseguiti una serie di passaggi per correggere i possibili errori del modello STL. Questi errori possono includere triangoli mancanti, triangoli invertiti dove il vettore normale della superficie è invertito quindi il "lato sbagliato" di una sfaccettatura è identificato come l'interno della parte, triangoli doppi, triangoli trasversali, bordi e contorni aperti. Ogni tipo di errore può causare problemi nel processo di costruzione o determinare geometrie errate. Mentre alcuni errori come gusci e triangoli doppi non sono critici e talvolta possono essere tollerati, errori come triangoli invertiti e contorni aperti possono causare problemi critici nel processo di costruzione e devono essere risolti durante l'elaborazione del file STL.

Una volta che gli errori sono stati risolti, viene quindi deciso un corretto orientamento del modello 3D rispetto alla piattaforma e alla direzione di stampa. Seguendo l'orientamento e la geometria vengono progettate le strutture di supporto. Per i processi PBF, la funzione principale della struttura di supporto è quella di estrarre calore dal

modello e fornire superfici e caratteristiche di ancoraggio alla piastra di costruzione per evitare deformazioni dovute a sollecitazioni termiche durante e dopo la costruzione. Non supporta la parte contro la gravità che impedisce la costruzione di elementi sporgenti o angolati. La generazione di strutture di supporto nei processi Powder Bed Fusion può essere realizzata in diversi modi. Applicato anche a qualsiasi altro processo additivo, il primo modo è generare le strutture di supporto durante la modellazione CAD e progettare il supporto come caratteristica della geometria del pezzo. In alternativa, le strutture di supporto possono essere generate nel programma software di pre-elaborazione. Questo secondo approccio offre molta più flessibilità in termini di capacità di adattare le strutture in base alle esigenze dettagliate. Poiché la struttura di supporto viene utilizzata solo durante il processo di costruzione e viene rimossa a fabbricazione completata, è necessario ridurre al minimo la quantità di materiale di questa. Tuttavia, la funzione principale del supporto è quella di condurre il calore e fornire un ancoraggio meccanico alla piastra, è necessaria una quantità minima di area della sezione trasversale del supporto per renderlo funzionale. L'ottimizzazione del volume, della geometria, della posizione e della geometria dell'interfaccia di supporto è molto importante e dipende dalla forma della parte. Pertanto, la progettazione attenta della struttura di supporto svolge un ruolo fondamentale nel successo di un processo additivo.

Sviluppati e preparati i modelli nel programma software pre-processo con supporti e strutture accessorie si passa allo slicing, ossia dividere il modello in tante sezioni di spessore determinato. Per i tipici sistemi a letto di polvere metallica lo spessore dello strato può variare da 25 μm a 100 μm . Gli spessori tipici utilizzati sono 25 μm per build ad alta risoluzione e 50–75 μm o superiore per processi più rapidi. Lo spessore dello strato è anche correlato alla distribuzione dimensionale della polvere. Idealmente, lo spessore dello strato sarebbe leggermente più grande della dimensione media delle particelle di polvere per ottenere un buon assorbimento del laser, riscaldamento, fusione e ri-fusione dello strato precedente.

All'interno di ogni slice, il software determina anche il percorso del raggio di energia per fondere completamente l'intero strato. Il modo in cui una meltpool creata da un

fascio laser può spostarsi in un'area chiusa per garantire che ogni parte di esso sia coperta è analogo al modo in cui un utensile di fresatura si muove su una superficie per eseguire un'operazione di fresatura. In questa fase vengono impostati tutti i parametri della traiettoria del fascio laser, nonché la potenza di questo.

L'ottimizzazione delle direzioni di scansione e la compensazione delle linee di scansione da uno strato all'altro consente una diminuzione dell'anisotropia delle proprietà meccaniche della parte e delle tensioni residue dovute a stress termici.

Una volta generate, tutte queste informazioni vengono trasferite nel software a bordo macchina tramite rete locale o tramite pendrive. Questo software funge da interfaccia tra le informazioni della build e i controlli della macchina che eseguono il processo fisico della fabbricazione.

2.3.4. Set-up macchina

Seguendo le fasi di preparazione del software nella catena di processo AM, la preparazione della macchina è il passaggio successivo prima che una stampa possa iniziare. Il set-up macchina può essere approssimativamente diviso in due gruppi di attività: la preparazione dell'hardware della macchina e il controllo del processo. La messa a punto dell'hardware comporta la pulizia della camera di costruzione dalla build precedente, il caricamento del materiale in polvere, l'inertizzazione della camera di costruzione e il controllo di routine di tutte le impostazioni critiche. Una volta completata la preparazione dell'hardware della macchina, il sistema è pronto per accettare il file macchina e avviare il processo. Le attività del gruppo di controllo macchina consentono al sistema di elaborare il file, avviare ed effettuare la costruzione della parte e preparare la macchina per l'estrazione del pezzo finito e del materiale di scarico.

Il sistema di controllo tiene monitorate diversi gruppi di parametri per mantenere le condizioni predefinite.

Durante il set-up della macchina è possibile variare alcuni parametri che possono essere liberamente modificati tra una stampa e l'altra. Questi parametri possono essere

divisi in parametri del processo di costruzione, parametri del materiale, parametri della parte.

I parametri di processo controllano i relativi parametri a livello di macchina per l'intera build. Esempi di questi parametri includono regolazione di iniezione di gas, gestione del recoater e regolazione della ventilazione e altri. Questi parametri definiscono il funzionamento di base della macchina per consentire un ambiente di costruzione idoneo. I parametri dei materiali in genere controllano i comportamenti di dosaggio della polvere e il controllo dell'ambiente della camera attraverso l'iniezione di gas inerte. Un parametro critico è ad esempio il fattore di dose che determina la quantità di polvere caricata nella camera di costruzione rispetto al volume necessario per completare uno strato. Un fattore 100% indica che la quantità di materiale immessa è la stessa di quella richiesta per coprire la piastra. All'inizio del processo si utilizzano valori tipicamente più alti, come 150-200, per garantire la piena copertura. Questo fattore deve avere valori superiori al 100% perché la polvere viene fusa e risolidifica e il volume occupato dal materiale solido è inferiore a quello in forma di polvere, a causa dell'eliminazione degli spazi vuoti tra le particelle di polvere. Man mano che la porzione della superficie del letto di polvere occupata dalla sezione della parte di costruzione aumenta, crescerà anche il fattore di dosaggio. Questo fattore è in genere regolabile in qualsiasi momento durante un processo per fornire regolazioni secondo necessità. I gas inerti come azoto o argon sono tipicamente utilizzati nel sistema AM per controllare l'ambiente della camera di costruzione e mantenere una bassa concentrazione di ossigeno. La concentrazione di ossigeno all'interno della camera di costruzione è di fondamentale importanza non solo per la qualità di costruzione, ma anche per il successo del processo di costruzione. In genere la concentrazione di ossigeno viene mantenuta al di sotto dell'1-2%. I limiti superiore e inferiore delle concentrazioni sono spesso impostati per consentire al sistema di regolazione del gas e di ventilazione di mantenere sotto controllo il contenuto di ossigeno. Nei materiali reattivi come alluminio e titanio, il controllo del contenuto di ossigeno è particolarmente importante per motivi di sicurezza e l'iniezione di gas inerte in genere rimane attiva anche dopo la fine del processo di costruzione.

I parametri della sono assegnati a ciascuna parte da costruire. Più insiemi di parametri di parti possono essere utilizzati nella stessa stampa su componenti diversi. Questi parametri vengono presi in considerazione nella fase precedente di preparazione del modello CAD. Una volta impostati tutti i parametri delle parti, il processo di costruzione inizia e viene controllato e monitorato dal sistema stesso. Sono possibili alcuni sistemi di feedback e monitoraggio in-process. La maggior parte dei sistemi attuali sono dotati di strumenti diagnostici in-process di base come il monitoraggio del pool di fusione, in cui un fascio diagnostico coassiale al fascio di processo monitora l'intensità dell'emissione della radiazione termica dal pool di fusione ed esegue l'analisi di base delle dimensioni del pool di fusione e distribuzione spaziale dell'intensità di radiazione. Un indice di qualità può essere estratto dai risultati del monitoraggio per fornire un'indicazione della qualità della parte. Un altro tipo di strumento di feedback in-process disponibile per alcuni dei sistemi attuali è legato al controllo della ricopertura della polvere. Lo strumento in genere acquisisce un'immagine ottica di ogni singolo strato e utilizza le informazioni di riflessività all'interno dell'immagine ottica per determinare dove si ottiene un rivestimento completo. In alcuni casi, questo valore viene utilizzato per mettere in pausa il processo per prevenire guasti nelle parti in costruzione a causa dell'insufficiente ricoprimento di polvere e del surriscaldamento.

2.3.5. Costruzione della parte

Le prime fasi della catena di processo per la generazione di una parte con tecnologie additive sono attività semiautomatiche che possono richiedere un notevole controllo manuale, interazione e processo decisionale. Una volta completati questi passaggi, il processo passa alla fase di costruzione controllata da computer. È qui che avviene la produzione basata su livelli precedentemente menzionata. Alcune macchine combineranno contemporaneamente la deposizione del materiale e la formazione dello strato, mentre altre li separeranno. In entrambi i casi, la macchina avviserà l'operatore della fine del processo.

2.3.6. Rimozione della parte

Il tempo di costruzione dei processi AM dipende da numerosi fattori. Di questi, l'altezza dell'intera stampa ha l'effetto maggiore sul tempo totale. Può richiedere da pochi minuti a giorni. Tuttavia, una volta completata la costruzione, le tecnologie laser a letto di polvere metallica consente lo scarico dopo che la piastra di costruzione e la parte si sono raffreddate poiché il processo mantiene la piattaforma di costruzione a temperature. Il processo di scarico comporta in genere il sollevamento della piattaforma nella camera di costruzione e la rimozione della polvere libera allo stesso tempo. La polvere non fusa di un processo può essere riutilizzata e deve essere trattata attraverso una serie di passaggi di setacciatura per rimuovere contaminanti e particelle indesiderate prima del nuovo utilizzo.

Una volta rimossa la polvere non processata dalla parte finita, la build è pronta per il post-processo. Le parti finite a questo punto sono saldate sulla piastra di costruzione tramite strutture di supporto. La rimozione della parte finita dalla piastra di costruzione comporta in genere l'uso di utensili da taglio come seghe a nastro o elettroerosione a filo per una maggiore precisione e flessibilità.

2.3.7. Post-processo

A seconda della tecnologia AM utilizzata per creare la parte, lo scopo e i requisiti della parte finita, i processi di post-fabbricazione possono variare in una vasta gamma. Può essere richiesta qualsiasi cosa, da nessun processo a diverse fasi di elaborazione aggiuntive per modificare la superficie, le dimensioni e le proprietà del materiale della parte costruita.

Nei sistemi laser Powder Bed Fusion, l'elaborazione minima richiesta è la rimozione della parte costruita dalla piastra di costruzione e la rimozione delle strutture di supporto dalla parte costruita. La rimozione delle strutture di supporto può essere semplice come rompere manualmente i supporti dalla superficie del pezzo, ma può anche essere un processo che utilizza macchine utensili CNC non solo per rimuovere il supporto, ma anche per ottenere la finitura superficiale desiderata e le tolleranze dimensionali richieste. Inoltre, i sistemi AM a letto di polvere metallica possono

introdurre grandi quantità di stress termici nella parte costruita. In queste condizioni, la struttura di supporto funge da "vincolo" meccanico per mantenere in posizione la parte costruita e mantenerla nella sua geometria prevista. Se i supporti vengono rimossi dalla parte, si verificherà una deformazione. È possibile utilizzare un processo termico di ricottura o distensione per diminuire le sollecitazioni termiche nella parte prima che venga rimossa dalla piastra di costruzione, per evitare la deformazione della parte al momento della rimozione.

La pressatura isostatica a caldo, HIP, è un processo in cui un componente viene sottoposto a temperatura elevata e ad una grande pressione. A una temperatura superiore al 50% del punto di fusione di materiali e pressioni superiori a 100 MPa, i vuoti e la porosità che si trovano all'interno di un pezzo costruito con tecnologia Powder Bed Fusion possono essere notevolmente ridotti. Una volta che la parte viene trattata con HIP, la densità apparente finale può raggiungere oltre il 95% della densità del materiale pieno. In queste condizioni estreme di pressione e temperatura, il materiale in un componente da trattare non solo subisce una deformazione plastica localizzata, ma è sottoposto a fenomeni di scorrimento. Ciò consente il trasporto di massa intorno ai difetti interni aumentando la densità apparente del componente.

2.4. Laser Powder Bed Fusion

2.4.1. Processo

I processi L-PBF sono stati sviluppati con l'obiettivo di creare parti metalliche a piena densità con elevate proprietà meccaniche, senza necessità di post trattamenti come la sinterizzazione. Sfruttando un processo simile a SLS, la parte viene costruita strato per strato: una lama o un rullo ricopre la base con un sottile strato di polvere una piastra metallica dopodiché una sorgente laser ad alta potenza consolida in modo selettivo le regioni del letto di polvere. Dopo che il laser ha terminato la scansione dell'intero percorso, la piattaforma di costruzione si abbassa dell'altezza dello spessore dello strato e un nuovo layer di polvere viene steso sul letto. Il processo è ora pronto per

essere ripetuto fino al completamento della parte. Per proteggere dai rischi di ossidazione, il processo avviene all'interno di una camera di costruzione sigillata con un'atmosfera di gas inerti come Argon o Azoto. Una volta che la macchina ha fuso l'ultimo strato, la polvere in eccesso può essere recuperata e la parte estratta dalla macchina insieme alla piattaforma di costruzione.

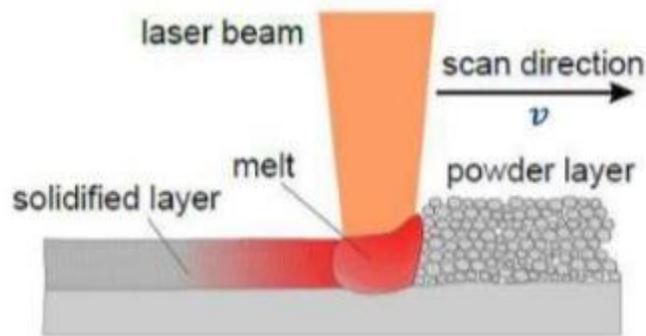


Figura 22. Rappresentazione interazione laser polvere metallica

È quasi sempre necessario eseguire un trattamento di ricottura per ridurre le tensioni residue dovuti agli stress termici indotti da elevate velocità di riscaldamento e raffreddamento, prima di rimuovere la parte dalla piastra di costruzione mediante macchine a elettroerosione a filo o macchine utensili. Infine, vengono eseguite altre operazioni di post-elaborazione: le strutture di supporto vengono rimosse, vengono eseguiti ulteriori trattamenti termici e le aree funzionali vengono lucidate o lavorate.

Legami chimicamente indotti, sinterizzazione allo stato solido, sinterizzazione in fase liquida e fusione completa delle polveri sono i principali meccanismi fisici di consolidamento in questa tecnica.

I legami chimici sono dovuti a reazioni tra due tipologie distinte di particelle o tra la polvere e il gas, che portano alla formazione di sottoprodotti in grado di unire tra loro le polveri.

La sinterizzazione in fase solida è un fenomeno di unione di particelle di polvere senza fusione.

La sinterizzazione in fase liquida si riferisce alla fusione di una percentuale di polvere le cui particelle sono costituite da un elemento con temperatura di fusione più bassa e che fungono da legante per gli altri elementi alto fondenti, che rimangono allo stato solido.

Infine, è possibile ottenere la completa fusione delle particelle se l'energia specifica fornita è tale da riscaldare tutti gli elementi al di sopra della temperatura di fusione. In caso di SLM la fusione è il meccanismo primario.

Mentre la fusione completa della polvere di metallo avviene al centro della meltpool dove l'energia termica è più alta, il fenomeno di sinterizzazione diventa prevalente nella periferia del punto laser. Di conseguenza, la polvere fusa può sinterizzare il pezzo in costruzione con effetti dannosi sulla rugosità superficiale del prodotto finale. I laser moderni sono in grado di creare pool di fusione di circa 100-150 μm di diametro, migliorando notevolmente la precisione delle parti. L'energia termica fornita al letto di polvere deve essere sufficientemente elevata da consentire alla meltpool di penetrare gli strati precedentemente consolidati e rifondere parzialmente il materiale per consentire l'adesione tra gli strati e la costruzione a piena densità. Anche le scansioni laser adiacenti nel piano XY devono essere parzialmente sovrapposte, per avere una completa giunzione della parte.

La meccanica dei fluidi della parte fusa gioca un ruolo importante nel processo L-PBF. A causa dell'alta temperatura all'interfaccia del letto di polvere e del raggio laser, all'interno della melt-pool si sviluppa un flusso convettivo. Ciò favorisce il trasferimento di calore allo strato sottostante, garantendo una penetrazione sufficiente. Inoltre, consente di rimuovere le inclusioni di gas intrappolati all'interno della polvere metallica: il flusso convettivo trasporta le bolle di gas sulla superficie del bagno di fusione dove fuoriescono generando zampilli. Un flusso di gas laminare viene utilizzato per rimuovere i prodotti di questo fenomeno e i vapori di metallo prevenendo la formazione di porosità all'interno della parte. Per ridurre la quantità di energia che il laser deve fornire alla polvere, è possibile riscaldare la piattaforma di costruzione e la camera. Ciò riduce anche la velocità di raffreddamento del componente, consentendo la crescita del granulo di cristallo.

2.4.2. Macchina

Anche se ogni soluzione commerciale presenta alcune differenze, gli elementi principali che costituiscono il sistema sono: una camera di costruzione con un circuito

di gas inerte, una piattaforma che si muove lungo la direzione Z, un serbatoio di polvere che alimenta una ricopertura e un sistema laser. Per consentire a ciascuna parte del sistema di funzionare perfettamente insieme, viene utilizzato un sistema di controllo digitale.

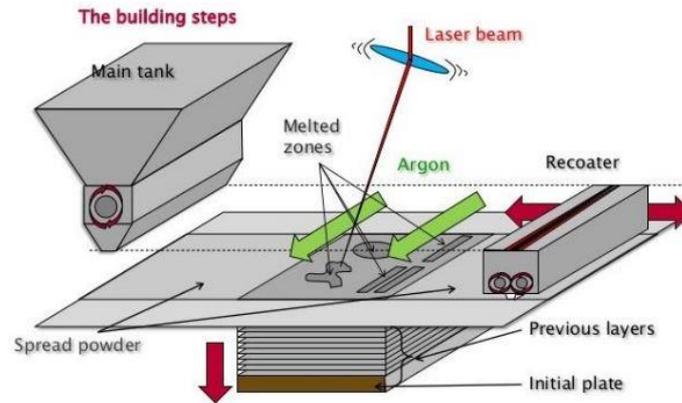


Figura 23. Schema interno camera di costruzione

Nelle moderne macchine L-PBF, la costruzione additiva delle parti viene eseguita in atmosfera controllata all'interno di una camera di costruzione in cui un circuito di gas integrato è responsabile dell'erogazione di un flusso laminare ininterrotto di gas inerte sul letto di polvere. L'argon o l'azoto sono comunemente usati come gas inerti. Questi hanno due scopi principali: da un lato evitano l'ossidazione della polvere, dall'altro prevengono il rischio di esplosioni di polvere rimuovendo l'agente ossidante. Ciò diventa ancora più importante durante la lavorazione di materiali reattivi come il titanio. Le macchine L-PBF sono effettivamente a rischio per tale problema, data la presenza di polvere dispersa in uno spazio limitato. Il contenitore della macchina deve quindi isolare la camera di costruzione dall'ambiente circostante, controllando la pressione al suo interno per evitare rischi per la sicurezza. Un altro importante compito della camera di costruzione è di preriscaldare il materiale, intrappolando l'energia termica all'interno del letto di polvere, riducendo così la distorsione della parte. A tale scopo sono disponibili diversi sistemi, inclusi i riscaldatori resistivi e a infrarossi posti sotto la piattaforma di costruzione e attorno alla camera di costruzione. Questi sono anche in grado di preriscaldare la polvere prima di depositarla per creare un nuovo strato.

Nelle macchine L-PBF la piattaforma di costruzione viene generalmente riscaldata a circa 100-150 ° C.

Il circuito del gas inerte è responsabile del mantenimento dell'atmosfera inerte e della rimozione di zampilli e vapori creati sull'interfaccia laser-polvere. Le particelle di metallo e i vapori devono essere rimossi dal letto di polvere per evitare la diffrazione del laser e la contaminazione della polvere. I filtri purificano il flusso di gas prima che possa rientrare nella camera di costruzione. Il flusso è generalmente perpendicolare alla direzione di ricopertura, con una velocità inferiore alla transizione turbolenta.

Per controllare la crescita nella direzione Z del pezzo, viene utilizzata una piattaforma mobile. Il primo strato deve essere creato su una piastra di base: questo serve sia come ancoraggio per stabilizzare la parte durante la costruzione, sia come dissipatore di calore. Diversi materiali in polvere richiedono materiali diversi per la piastra di base: entrambi devono avere coefficienti di espansione termica comparabili per prevenire la formazione di stress termici.

Per ogni strato, una quantità adeguata di polvere di metallo deve essere consegnata e distribuita uniformemente sul letto. A seconda dell'architettura della macchina, queste tre funzioni, dosaggio, consegna e diffusione, possono essere eseguite in diversi modi. Nelle macchine con serbatoi di polvere montati in alto, non è necessario un sistema di erogazione della polvere, poiché la gravità consente di incanalare la polvere nel recoater. In questo tipo di macchine questo dispositivo non solo diffonde la polvere, ma è anche responsabile del suo dosaggio. Al contrario, le macchine con serbatoio di polvere montato in basso utilizzano un elevatore per erogare e dosare la giusta quantità di polvere nella camera di costruzione. Il recoater provvede quindi alla stesura della polvere. A seconda dell'architettura della macchina e del produttore, il sistema di ricopertura può essere un rullo o una lama. Un'ulteriore distinzione può essere fatta tra il materiale del recoater duro e morbido. Il primo, utilizza lame in acciaio ad alta velocità o ceramiche per ottenere l'usura e la contaminazione minime, a scapito di maggiori spese e rischio di fallimento del lavoro dovuto all'interferenza per la deformazione delle parti. Gli ultimi invece usano lame di gomma o silicone, tollerando

un livello più elevato di distorsione del pezzo durante il lavoro di costruzione a costo di un livello inferiore di uniformità del letto.

La tecnologia laser svolge un ruolo fondamentale nel metal AM. I suoi miglioramenti in termini di potenza, efficienza e qualità del fascio hanno permesso a L-PBF di diventare la tecnologia più diffusa per la produzione di componenti metallici di livello industriale.

Mentre le macchine SLS utilizzano ancora laser a biossido di carbonio meno potenti a causa della migliore capacità di assorbimento da parte dei polimeri, le macchine metalliche si sono continuamente evolute per trovare nuove e più potenti sorgenti laser. I laser Nd: YAG con pompaggio a diodi erano lo standard dagli anni '90 agli anni 2000, ma oggi sono stati sostituiti da laser in fibra drogata con itterbio più efficienti, affidabili e semplici, in grado di produrre fino a 1KW di potenza. Questo cambiamento nella tecnologia laser ha anche permesso una significativa riduzione della dimensione del punto laser da 200-300 μm fino a 80 μm . Un'ultima distinzione va fatta sul tipo di emissione del laser che può essere sia pulsata che continua. Per consentire una costruzione efficace della parte, il laser deve essere generato e inviato al letto di polvere. Dalla sorgente laser, il raggio viene incanalato attraverso un cavo in fibra ottica verso un collimatore e un espansore di raggio. Successivamente, per posizionare dinamicamente il punto sul letto di polvere, le macchine moderne utilizzano galvanometri per controllare numericamente gli specchi di deflessione. Usando due rotazioni perpendicolari, ogni posizione sul piano di costruzione può essere raggiunta dal punto laser.

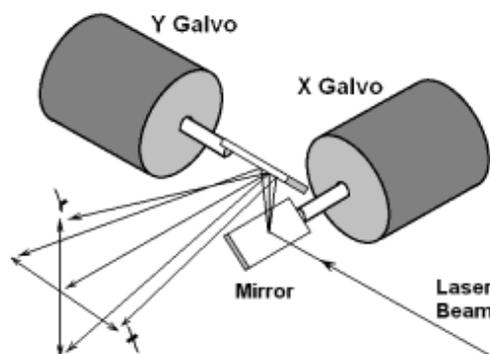


Figura 24. Specchi attuati da galvanometri

Gli obiettivi o lenti F-theta vengono utilizzati per focalizzare il raggio in un punto abbastanza piccolo da creare dettagli complessi, migliorando l'accuratezza della parte.

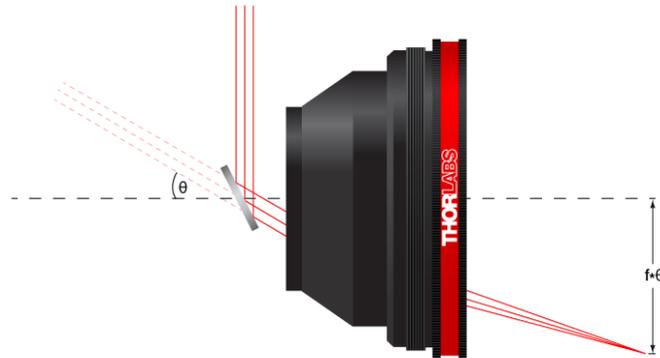


Figura 25. Lente f-theta

Per consentire il movimento coordinato degli specchi e dell'obiettivo di messa a fuoco, sono necessari potenti sistemi di controllo digitale. Ciò diventa ancora più importante nelle macchine multi-laser, dove diventa indispensabile un'attenta calibrazione del sistema.

2.4.3. Parametri

Numerosi parametri influenzano il processo L-PBF. Questi possono essere suddivisi in parametri del laser, come potenza e dimensione dello spot, e parametri di scansione, come hatch distance e strategia di scansione.

Tutti questi parametri possono essere impostati separatamente per regioni specifiche di ciascun layer. Queste regioni sono suddivise in:

- Core
- Down-skin
- Up-skin
- Boundary
- Supporti

I parametri relativi alla polvere includono dimensione, forma e densità delle particelle. L'ultimo gruppo è costituito da altre variabili come temperatura di preriscaldamento della piastra o dell'alimentatore della polvere e controlli dell'atmosfera della camera di costruzione. Verranno ora presentati i parametri di processo più rilevanti.

2.4.3.1. Strategia di scansione

I percorsi di scansione laser intra-layer possono essere determinati utilizzando diverse strategie. Mentre la mancanza di standardizzazione ha portato all'adozione di una moltitudine di nomi, è possibile identificare cinque principali strategie di scansione. Questi sono:

- a) Scansione monodirezionale
- b) Scansione bidirezionale con percorso continuo
- c) Scansione bidirezionale
- d) Scansione a spirale
- e) Scansione a scacchiera

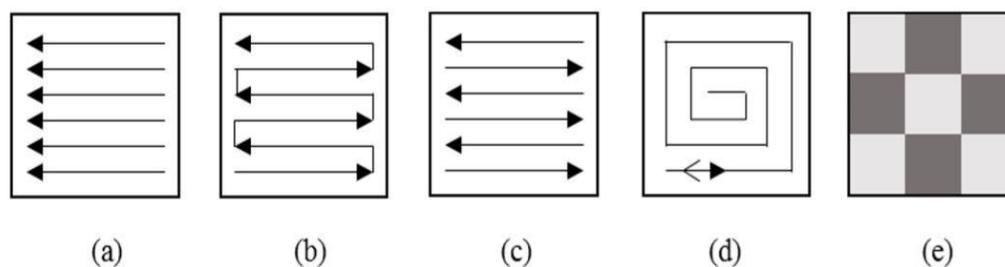


Figura 26. Strategie di scansione

Le strategie monodirezionali, bidirezionali e a spirale vengono utilizzate raramente poiché le prime comportano una contrazione altamente disomogenea di energia a causa dei lunghi vettori di scansione, mentre la seconda è difficile da implementare per geometrie complesse. La scansione a scacchiera, chiamata anche scansione a isole, crea aree rettangolari, scansionate con linee orizzontali o verticali. I rettangoli adiacenti vengono scansionati con linee perpendicolari. Questa ultima strategia è la più utilizzata in quanto assicura vettori di scansione più brevi, evitando un eccessivo accumulo termico ed è facilmente implementabile nella geometria.

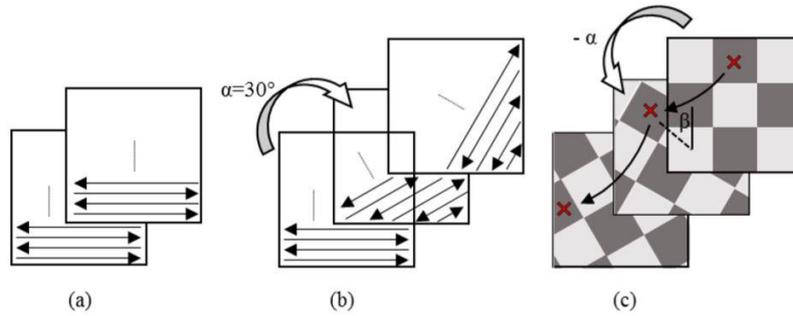


Figura 27. Strategia di scansione intra-layer

Le strategie inter-layer devono essere applicate per ridurre ulteriormente l'anisotropia direzionale. Da uno strato all'altro, la direzione dei vettori o delle linee della scacchiera deve essere variata per modificare la direzione del consolidamento della polvere. I migliori risultati si ottengono con una rotazione di 67° tra ogni layer: utilizzando un numero primo, non divisore di 360° , viene assicurata una rotazione continua con il minor numero di ripetizioni della direzione di scansione.

2.4.3.2. Focus offset

Questo parametro misura la distanza del punto di fuoco del laser dal letto di polvere nella direzione Z. Se impostato su zero, il raggio laser viene focalizzato direttamente sul letto di polvere e il pool di fusione risultante è più piccolo e più profondo. Ciò provoca un picco di energia termica al centro del pool di fusione che può causare fenomeni di ebollizione. Una mancanza di offset della messa a fuoco in concomitanza di un hatch distance non adeguato può provocare aree di polvere non fusa tra due linee di scansione adiacenti. Al contrario, alti livelli di defocus assicurano una distribuzione di energia migliore con una conseguente fusione più ampia. È necessario evitare assolutamente una mancata fusione tra linee di scansione. Inoltre, la potenza del laser deve essere abbastanza elevata da fondere la polvere lungo tutto lo spessore dello strato. L'aumento delle dimensioni del pool di fusione deve essere preso in considerazione quando si determinano i percorsi di scansione, poiché la sovra penetrazione della meltpool può portare a un inspessimento della parte in aree di down-skin.

2.4.3.3. Hatch distance

È la distanza tra due linee di scansione parallele adiacenti. Questo valore deve essere regolato per garantire la sovrapposizione dei pool di fusione, quindi deve essere inferiore al diametro del pool di fusione.

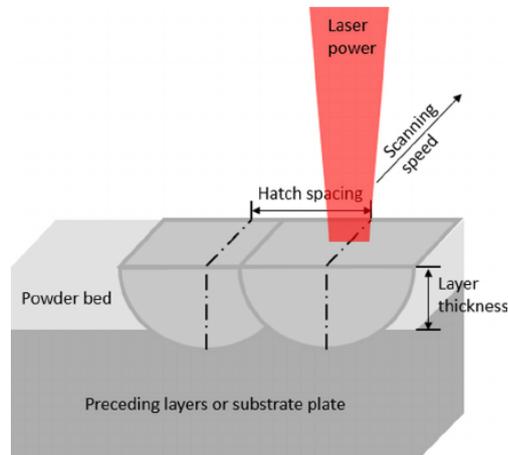


Figura 28. Hatch distance

2.4.3.4. Potenza del laser

La potenza emessa dal laser è l'energia erogata lungo il percorso di scansione. Un eccesso di potenza può causare l'ebollizione del materiale fuso con conseguente inclusione di porosità nella parte, mentre valori più bassi possono provocare la mancata fusione intrappolando polvere all'interno della parte.

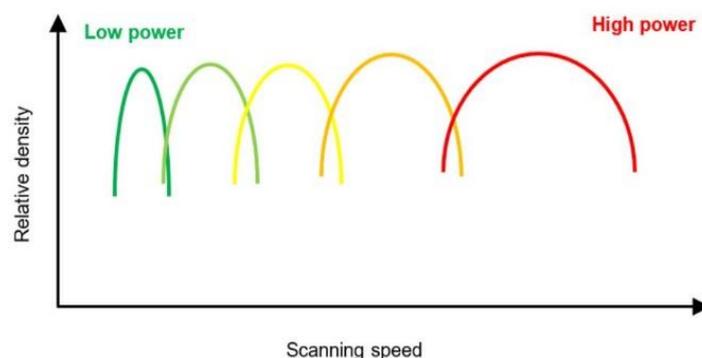


Figura 29. Potenza del laser in funzione della velocità di scansione e della densità relativa

Questo valore differisce dalla potenza erogata al letto di polvere poiché le inefficienze nella trasmissione e nell'assorbimento di energia causano una riduzione della potenza effettiva.

2.4.3.5. Velocità di scansione

Questo parametro misura la velocità del laser, mentre segue il percorso di scansione durante la costruzione. Sebbene sia facilmente impostabile in sistemi laser continui, deve essere calcolato per macchine laser a impulsi:

$$v = \frac{PD}{ET} \left[\frac{m}{s} \right]$$

dove PD è la distanza tra due punti adiacenti nel percorso di scansione ed ET è la durata dell'erogazione della potenza del laser.

2.4.3.6. Spessore dello strato

Il valore dello spessore dello strato influenza notevolmente la precisione geometrica della parte finale. In particolare, gli effetti della discretizzazione diventano più rilevanti all'aumentare di questo valore. In base all'aumento dello spessore dello strato, gli altri parametri devono essere riadattati per garantire la completa fusione della polvere. Un altro aspetto fondamentale da considerare è la riduzione del tempo di costruzione derivante dal minor numero di livelli da costruire. Lo spessore dello strato dipende anche dalla granulometria della polvere. I valori tipici dello spessore dello strato nei processi L-PBF vanno da 30 a 100 μm .

2.4.3.7. Densità di energia

È possibile calcolare tre diversi valori di densità di energia: LED linear energy density, SED superficial energy density e VED volumetric energy density. Questi sono espressi come:

$$LED = \frac{P}{v} \left[\frac{J}{mm} \right]$$

$$SED = \frac{P}{v * h} \left[\frac{J}{mm^2} \right]$$

$$VED = \frac{P}{v * h * t} \left[\frac{J}{mm^3} \right]$$

L'ultimo valore rappresenta la quantità totale di energia per unità di volume assorbita dal letto di polvere. È fondamentale determinare la dimensione della melt-pool e la densità della parte prevista, pertanto viene comunemente utilizzato per confrontare diverse combinazioni di potenza, velocità, hatch distance e spessore dello strato.

2.4.3.8. Temperatura di preriscaldamento

L'effetto sulla densità di energia volumetrica del preriscaldamento della polvere metallica può essere stimato dall'espressione:

$$VED = \rho * [Cp * (Tm - T0) + Lf]$$

dove ρ è la densità del materiale del letto di polvere [Kg / mm³], Cp il calore specifico [J/Kg*K], Tm è la temperatura di fusione [K], $T0$ è la temperatura di preriscaldamento [K] e Lf il calore latente di fusione [J/Kg]. All'aumentare della temperatura iniziale del letto di polvere, diminuisce la potenza richiesta dal laser per fondere un volume unitario del materiale. Un altro effetto è la riduzione dei gradienti di temperatura all'interno della parte, con conseguente riduzione dello stress termico e dei ritiri. Per mantenere la camera di costruzione alla temperatura desiderata, riscaldatori a infrarossi o riscaldatori resistivi vengono posizionati sotto la piastra di costruzione. Alcune macchine preriscaldano anche la polvere prima che questa entri nella camera di combustione.

2.4.4. Materiali

Insieme allo sviluppo di processi e macchine metal AM, sono stati fatti enormi progressi anche con lo studio e utilizzo dei materiali. Oltre a un aumento dei materiali disponibili, negli ultimi anni si è assistito a un aumento della qualità delle polveri: la dimensione delle particelle e la morfologia hanno un'influenza primaria sul risultato del processo e il loro miglioramento ha permesso alle tecnologie L-PBF di diventare sempre più accurate e affidabili. Questi due fattori influenzano davvero la capacità di scorrimento della polvere, facilitando la distribuzione uniforme nell'area di costruzione. Ciò significa che gli strati saranno più uniformi, diminuendo la probabilità di zone di rifusione che possono indebolire la parte. Una migliore capacità

di scorrimento significa anche una maggiore densità dello strato, risultante in una parte finale più densa. Un aumento della densità delle parti e dell'isotropia può anche essere ottenuto riducendo la dimensione delle particelle e usando granulometrie differenti della polvere. Le particelle più piccole consentono anche la creazione di strati ancora più sottili.

Nel corso degli anni, sono state sviluppate nuove tecnologie per la produzione di polvere il cui obiettivo principale è ridurre la dimensione delle particelle e migliorare la sfericità. I processi convenzionali includono l'atomizzazione con acqua e l'atomizzazione con gas. Questi sono in grado di creare polvere con una gamma di dimensioni di circa 0-500 μm di diametro ma non riescono a fornire una morfologia coerente, presentando irregolarità e satelliti. L'atomizzazione dell'acqua richiede anche la post-elaborazione per rimuovere l'umidità dalla polvere. L'atomizzazione con gas oggi è la tecnica più diffusa per la produzione di polvere, utilizzata per la lavorazione di leghe reattive. Tecnologie successive come l'atomizzazione al plasma e la sferoidizzazione creano una granulometria più fine da 0 a 200 μm , migliorando notevolmente la sfericità della polvere. Mentre questi processi migliorano la qualità dei prodotti finali riducendo le impurità, la loro adozione è frenata da maggiori costi, minore produttività e nuovi materiali disponibili.

Le polveri possono essere acquistate da sviluppatori di macchine, fornitori di terze parti certificati o produttori di polveri in generale. Mentre i produttori di macchine vendono il materiale grezzo insieme a parametri di processo precedentemente testati sulle loro macchine, garantendo il miglior livello di risultati e facilità d'uso, l'acquisto di polvere da altri fornitori può rivelarsi più economico. Inoltre, è disponibile una gamma più ampia di materiali, che consente di sperimentare diverse composizioni chimiche. D'altro canto, la mancanza di supporto, certificazione e tracciabilità può rivelarsi dannosa.

La composizione del materiale è un altro fattore chiave per i processi L-PBF. In linea di massima, ogni materiale che presenta proprietà favorevoli di saldatura può essere utilizzato, tuttavia la disponibilità di polvere può rappresentare un problema. Oggi, i materiali commerciali più comuni sono leghe di alluminio, acciai, leghe di titanio,

cromo-cobalto e superleghe a base di nichel. Per ogni famiglia di materiali sono disponibili diverse varianti di diversi produttori di polveri. Inoltre, possono essere lavorati metalli preziosi come argento e oro.

Alcune delle proprietà più importanti sono:

- **Morfologia delle particelle:** è molto importante la forma delle particelle. La morfologia ottimale è quella sferica, in modo che queste si dispongano in maniera compatta, determinando una maggiore densità apparente. Per questo motivo, è preferita la polvere altamente sferica ottenuta dall'atomizzazione con gas o al plasma. La valutazione del livello di sfericità di un lotto di polvere è verificabile utilizzando un microscopio elettronico a scansione (SEM) o un microscopio ottico.
- **Dimensione delle particelle:** la dimensione delle particelle e la distribuzione delle dimensioni della polvere influiscono sulla sua fluidità e densità apparente. Infatti, l'ottimale si ottiene quando si hanno particelle di grosse dimensioni che migliorano la fluidità della polvere accompagnata da particelle piccole che vanno a riempire gli interstizi tra quelle grandi.
- **Densità tapped:** misura il rapporto tra il volume di un campione di polvere compattato secondo determinate specifiche e il suo peso. Pertanto, rispetto alla densità apparente evita misurazioni erronee dovuti alle inclusioni di aria tra le particelle ed emula la condizione della polvere distribuita dal recoater.
- **Fluidità:** in conformità con le ASTM B-213-17 e ASTM B964-16 questa proprietà può essere valutata rispettivamente mediante gli imbuti Hall e Carney. Utilizzando entrambe le tecniche, la fluidità della polvere viene misurata come la portata [g/s] della polvere che fuoriesce dall'imbutto.

Dato l'alto costo del materiale utilizzato, il riciclaggio di polvere usata è indispensabile per abbattere i costi. Sebbene questa operazione sia possibile, la qualità della polvere diminuisce ad ogni riutilizzo: polvere riciclata può avere proprietà molto diverse dalla polvere vergine da cui proviene. Prima di tutto, durante la costruzione di parti, particelle di materiale non fuso possono sinterizzare insieme per formare conglomerati che possono far variare le dimensioni, la morfologia e la fluidità della polvere. La setacciatura della polvere prima di ogni riutilizzo con una dimensione di maglia

adeguata impedirà la reintroduzione di particelle più grandi nel sistema. In secondo luogo, la polvere può essere esposta all'ossidazione durante la rimozione della parte dalla macchina. La composizione del materiale deve essere analizzata regolarmente e testata per evitare contaminanti. Se le impurità superano i limiti, la polvere deve essere avviata allo smaltimento. Miscelare di nuova con della sata può essere fatto per migliorarne la qualità.

2.4.5. Potenziali difetti

Diversi difetti possono presentarsi in componenti prodotti da processi powder bed fusion. Solo la giusta combinazione di materiali e parametri di processo può ridurre al minimo il rischio che insorgano questi problemi. Alcuni dei difetti più comuni sono:

- Porosità: la presenza di pori all'interno del materiale fuso può ridurre gravemente le proprietà meccaniche del componente finale, compromettendone la durata a fatica fungendo da punti di innesco di cricche. Grandi pori irregolari possono essere trovati a causa della mancanza di fusione quando la densità di energia volumetrica non è sufficiente, mentre i pori sferici più piccoli possono formarsi a causa di gas intrappolati.
- Balling: Questo fenomeno comporta un'instabilità all'interno della meltpool, che porta alla creazione di un deposito irregolare costituito da piccole gocce di metallo, che oltre a deteriorare l'uniformità della superficie può anche influenzare negativamente la deposizione del layer successivo, causando delle disomogeneità all'interno del componente. Nell'intorno della meltpool viene a crearsi un gradiente di tensioni superficiali che generano un flusso di materiale (effetto Marangoni) che va dalla zona di bassa tensione superficiale verso quella ad alta tensione superficiale, quindi dalla periferia del bagno di fusione verso il centro, e questo provoca il suddetto fenomeno raccogliendo il materiale sotto forma di sfere.
- Distorsione dovute alle tensioni residue: L-PBF induce una grande quantità di sollecitazioni residue nelle parti a causa dei grandi gradienti termici, intrinseci al processo. La rapida solidificazione del materiale, successiva a un velocissimo

riscaldamento, provoca un rapido restringimento della zona fusa che colpisce lo strato sottostante, causando sollecitazioni indotte di trazione.

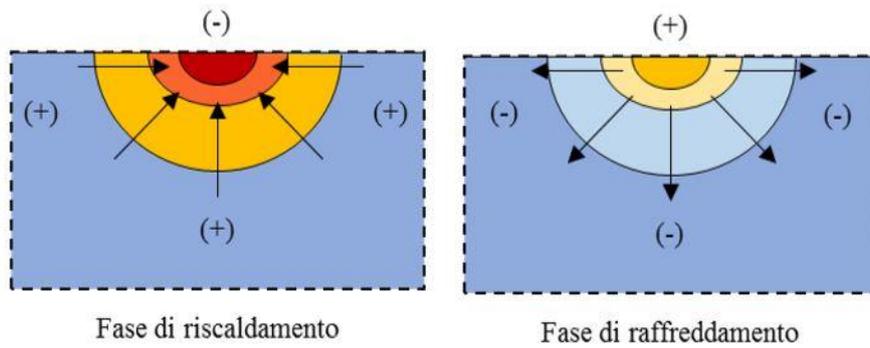


Figura 30. Tensioni indotte da carichi termici

Con trattamenti termici post processo possono mitigare parzialmente il problema alleviando le tensioni accumulate durante la costruzione del pezzo. Pertanto, questi trattamenti devono essere eseguiti prima della rimozione del pezzo dalla piastra di base e delle operazioni di rimozione del supporto. Il preriscaldamento del substrato in polvere e la riduzione dei vettori di scansione possono aiutare a ridurre le sollecitazioni termiche.

- **Delaminazione:** questo fenomeno può verificarsi anche in L-PBF a causa di stress residui. Quando il raggio laser non ha energia sufficiente per fondere parzialmente gli strati precedenti, le sollecitazioni termiche possono far deformare le parti dello strato in costruzione e separarle da quelle sottostanti già completate.
- **Cracking:** le cricche possono essere generate a causa di gradienti di temperatura tra il pool di fusione, le regioni solide e la polvere non trattata. Possono verificarsi sia cricche a caldo che di solidificazione. Questo fenomeno può essere intensificato da segregazioni e impurità presenti nel materiale di costruzione.

3. Design for Additive Manufacturing

Con la progressiva diffusione delle conoscenze sulle tecnologie additive manufacturing, le industrie hanno iniziato a considerare l'AM come una delle tecnologie che trasformeranno il paradigma odierno della produzione. Nelle industrie aerospaziali, dove le numerosità dei lotti è ridotta, le aziende si sono convertite alla produzione additiva nella convinzione che diventerà fondamentale per la loro competitività. Nel settore biomedico, invece, l'AM è considerata la tecnologia più promettente per ottenere protesi e dispositivi medicali personalizzati e con caratteristiche uniche.

Inoltre, con lo scambio di informazioni digitalizzate e la gestione dei processi, AM lo è considerato anche parte integrante della cosiddetta rivoluzione "Industria 4.0".

Il corretto utilizzo delle tecniche additive però richiede non solo una comprensione approfondita dei principi di processo e caratteristiche della macchina, ma anche conoscenza di come questi processi possono essere efficacemente utilizzati per realizzare progetti e funzionalità. È ampiamente riconosciuto che le tecniche additive superano vari limiti di realizzazione delle geometrie rispetto ai metodi di produzione tradizionali. Design complessi come protesi d'anca specifiche del paziente e staffe e supporti ottimizzati topologicamente, difficili da realizzare attraverso le tecniche tradizionali, possono essere facilmente fabbricati tramite AM. D'altra parte, si dovrebbe tener conto che anche le tecnologie AM sono soggette a vari limiti che vedremo in seguito.

Nonostante gli svantaggi, va riconosciuto che la disponibilità di una maggiore flessibilità, rende più facile per i progettisti concentrarsi sulla massimizzazione della funzionalità applicando le regole di progettazione funzionale (DFF). Le capacità uniche delle tecnologie AM offrono nuove opportunità di personalizzazione, miglioramenti molto significativi in termini di prestazioni del prodotto,

multifunzionalità, costi di produzione complessivi inferiori per i piccoli lotti e lead time molto ridotti.

Tuttavia, tradizionalmente la maggior parte della ricerca e gli sforzi di sviluppo sull'additive manufacturing si sono concentrati su nuovi materiali e processi. Questo sviluppo, e gran parte della conoscenza esistente è costruito su base empirica, principi e osservazioni sperimentali. Di conseguenza, molti design AM sono altamente specifici per la macchina o per il materiale, e le linee guida spesso non sono in grado di fornire informazioni complete per impostare correttamente la produzione. Inoltre, per molti di questi processi esistono vari parametri di input che non sono ancora adeguatamente controllati o addirittura specificati. L'esempio più palese è la "spalmabilità" della polvere dei processi powder bed fusion, che è strettamente correlata alla fluidità, specifica metallurgica tradizionale della polvere, ma diversa. Infatti, sebbene una buona fluidità corrisponda generalmente a una buona spalmabilità, la considerazione inversa non può essere fatta. Il campo di ricerca sulla reologia delle polveri metalliche è vastissimo e ancora in gran parte inesplorato. La mancanza di generalità con la maggior parte delle attuali linee guida di progettazione AM rendono difficile l'adozione di nuovi processi, nuovi materiali o nuovi design di prodotti. Questa situazione è diventata a sua volta uno dei maggiori ostacoli alla diffusione dell'applicazione dell'AM nelle industrie di tutti i settori.

Per ovviare a questi problemi e rendere il processo più prevedibile e studiabile sono state condotte ricerche approfondite che utilizzano il calcolo numerico. Tuttavia, finora questo approccio ha avuto un successo limitato con processi metal additive, visti i costi computazionali inibitori richiesti per simulazioni complete delle parti. Inoltre, a causa della rapida fusione e solidificazione su piccola scala la risoluzione di discretizzazione richiesta per rappresentare adeguatamente i processi è spesso elevata. Di conseguenza, la simulazione del processo su una ampia gamma di componenti diventa spesso eccessivamente onerosa dal punto di vista computazionale.

Per molte industrie tradizionali di produzione meccanica le proprietà fisiche dei materiali lavorati sono normalmente standardizzate. Inoltre, durante i processi di produzione queste proprietà rimangono in gran parte costanti. D'altra parte, per molti

processi AM e in particolare processi che producono metalli, le proprietà dei materiali dipendono spesso dalla geometria e dai disegni delle strutture. Pertanto, il disegno geometrico è parte integrante della progettazione.

In effetti, il focus dello sviluppo DFAM (Design For Additive Manufacturing) si è gradualmente spostato dalle linee guida incentrate sul processo a linee guida di progettazione integrata di geometria e processo.

Al contrario della teoria del design tradizionale per la produzione (DFM), la DFAM è guidata dalla funzionalità di progettazione, che a sua volta guida dalla selezione del materiale e del processo così come dalle geometrie della parte. Attualmente, la maggior parte delle teorie esistenti con focus su DFAM riguardano l'ottimizzazione del materiale e processo o l'ottimizzazione strutturale e limitate letterature integrano entrambe le parti. D'altra parte, molte linee guida qualitative possono comunque fornire preziose informazioni sulla progettazione delle parti AM nonostante la mancanza di precisione, che è particolarmente preziosa durante le prime fasi di progettazione. Inoltre, tale conoscenza potrebbe anche aiutare le aziende a prendere decisioni in merito l'adozione di AM per scopi specifici.

3.1. Design for manufacturing e design for assembly

Design for manufacturing (DFM) e design for assembly (DFA) possono essere definite come le teorie di progettazione atte a ridurre e minimizzare le difficoltà di realizzazione e assemblaggio di un prodotto e conseguenza i costi di fabbricazione e assemblaggio. Tuttavia, queste pratiche richiedono una vasta conoscenza di tutti i processi di produzione e di assemblaggio.

Per diversi anni sono state impiegate risorse nell'approfondire il DFM e DFA, questo sta a indicare le grosse problematiche relative a queste teorie. In effetti, DFM riguarda il progettista che deve comprendere i vincoli imposti dai processi produttivi, quindi progettare prodotti per ridurre al minimo la violazione di questi vincoli. Per facilitare la progettazione per uno specifico processo produttivo vengono creati appositi team di sviluppo integrato del prodotto dove progettisti e ingegneri di processo lavorano fianco a fianco progettando simultaneamente la parte sia dal punto di vista della funzionalità

che della produzione. Regole, metodi e strumenti che aiutano i progettisti a prendere buone decisioni sulla producibilità del prodotto hanno un ruolo significativo.

Nella progettazione per il montaggio, vengono spesso offerte due considerazioni principali per ridurre tempi, costi e difficoltà di assemblaggio: ridurre al minimo il numero di parti ed eliminare la minuteria. Entrambe le considerazioni si traducono direttamente in un minor numero di operazioni di assemblaggio, la voce principale di costi di assemblaggio. Per ridurre al minimo parti e elementi di fissaggio, questi andranno integrati nella parte che in genere diventeranno molto più complesse e difficili da produrre. Quindi, solitamente la DFM e la DFA andranno ripetute in successione finché non si troverà l'ottimale per la riduzione dei costi.

3.2. Design for additive manufacturing

Contrariamente a DFM e DFA, gli obiettivi del design for additive manufacturing (DFAM) sono:

Massimizza le prestazioni del prodotto attraverso la sintesi di forme, dimensioni, gerarchiche delle strutture e composizione dei materiali. Per realizzare questo obiettivo, i progettisti devono tenere a mente diverse linee guida specifiche per queste tecniche:

- Utilizzare geometrie complesse per raggiungere obiettivi di progettazione senza incorrere in penalità di tempo o di costo rispetto a geometrie più semplici;
- Utilizzare geometrie e parti personalizzate mediante produzione diretta da dati 3D;
- Possibilità di consolidare le parti, integrando le funzionalità in più parti complesse ed evitando problemi e costi di assemblaggio;
- Ignorare tutti i vincoli imposti dai tradizionali processi di produzione (sebbene potrebbero essere imposti vincoli specifici per AM);

3.2.1. Geometrie complesse

Come discusso in precedenza, i processi AM sono in grado di fabbricare parti con complessità geometriche non raggiungibili dagli altri processi di produzione. L'approccio di fabbricazione strato per strato le sezioni trasversali della parte possono essere arbitrariamente complesse.

Ad esempio, i processi SLM e SLS possono fabbricare con un livello di dettaglio piccolo quanto il diametro dello spot del laser. Invece, nei processi multi jet, le caratteristiche del livello possono avere le dimensioni delle goccioline emesse dagli ugelli. Nella direzione Z (direzione di costruzione), la questione diventa più complicata. In linea di principio, le features possono essere sottili al limite come lo spessore di uno strato; tuttavia, solitamente, questi dettagli geometrici sono costruiti su più layer.

Gli stress durante la costruzione possono limitare il grado di dettagli lungo la direzione di costruzione. Nei processi laser PBF, per esempio, il laser potrebbe andare a liquefare o sinterizzare uno spessore più alto dello strato impostato. Inoltre, la necessità di poter rimuovere le strutture di supporto da determinate aree limita la complessità geometrica.

Ogni processo AM ha le sue peculiarità e criticità, ma in generale la complessità geometrica ottenibile tramite processi di produzione additiva superano di gran lunga quelli dei processi di produzione convenzionali.

3.2.2. Geometrie personalizzate

Coerentemente con la capacità di generare geometrie complesse, i processi AM possono fabbricare geometrie personalizzate. Molte di queste applicazioni possono essere trovate in campo biomedicale dove per ogni paziente occorre una protesi su misura. Ad esempio, per gusci degli apparecchi acustici dove ogni shell deve essere personalizzata per la particolare geometria del condotto uditivo di un individuo. Nelle macchine L-PBF, centinaia o migliaia di conchiglie, ognuna di diversa geometria, possono essere costruite contemporaneamente su una sola macchina. La personalizzazione di massa, anziché la produzione di massa, può essere realizzata

abbastanza prontamente. La mancanza di strumenti software generici per la personalizzazione di massa, piuttosto che limitazioni dell'hardware, è il principale vincolo quando si considera AM sotto questi termini.

3.2.3. Assiemi integrati

La capacità di generare geometrie complesse consente altre pratiche. Una molto comune in questa teoria è quella di collassare diverse parti in una singola, più complessa. Anche quando due o più componenti devono essere in grado di muoversi l'una rispetto all'altra, come in un giunto sferico, con le tecnologie di additive manufacturing è possibile costruirle. Questa pratica consente l'integrazione delle funzionalità di più parti, con possibile miglioramento delle prestazioni. Inoltre, una riduzione nel numero di operazioni di assemblaggio, come già detto, può avere un impatto enorme sui costi e difficoltà di produzione.

Come risulta dalle pratiche DFA convenzionali, progettare modifiche per facilitare o eliminare le operazioni di assemblaggio può portare a riduzioni molto maggiori dei costi che progettare modifiche per facilitare la fabbricazione di parti. Questo è vero, almeno in parte, vista eliminazione di eventuali strumenti di assemblaggio speciali che potrebbero essere richiesti. Sebbene le linee guida DFM convenzionali per la produzione di parti non sono rilevanti per AM, le linee guida DFA per la progettazione per l'assemblaggio rimangono pertinenti e forse anche più importanti.

Esistono altri vantaggi per il consolidamento delle parti. Ad esempio, una riduzione del numero delle parti riduce la complessità del prodotto dal punto di vista della gestione e della produzione.

È necessario tenere traccia, reperire, ispezionare un numero inferiore di parti. La necessità di pezzi di ricambio e delle parti di ricambio diminuisce. Inoltre, viene eliminata la necessità di tenere a magazzino costosi utensili per fabbricare questi componenti. In sintesi, il consolidamento delle parti può portare a risparmi significativi in tutte le aree aziendali.

3.2.4. Eliminazione vincoli DFM

Una notevole quantità di tempo e fondi sono stati dedicati all'apprendimento della capacità e vincoli imposti per seguire la teoria del DFM e per creare team integrati di sviluppo del prodotto.

I processi AM hanno il potenziale per ridurre le complessità all'interno di questi team dove viene speso molto tempo per risolvere conflitti decisionali tra funzionalità ed economicità di produzione. Con DFAM, i designer devono imparare molti meno vincoli di produzione. L'abbraccio di DFM ha portato a cultura del design in cui lo spazio di progettazione è limitato dal primo concetto del progetto ed esclude a priori quei modelli che non sono realizzabili usando tecniche convenzionali. Con AM, questi vincoli di progettazione non sono più validi e il progettista può avere molto maggiore libertà progettuale. Pertanto, la sfida in DFAM non è tanto la comprensione degli effetti dei vincoli di fabbricazione. Piuttosto è la difficoltà nell'esplorazione di nuovi spazi di design, nell'innovazione di nuove strutture di prodotto e nel pensare ai prodotti in modi non convenzionali. Queste non devono essere difficoltà, dal momento che sono grosse opportunità. Tuttavia, la comunità ingegneristica deve essere aperta alle possibilità e imparare ad esercitare la creatività collettiva.

3.3. Materiali

Nel complesso, la selezione dei materiali per AM è ancora relativamente limitata. Anche se questo è in parte causato da ragioni non tecniche come la domanda e i costi del mercato, spesso comporta ulteriori difficoltà di progettazione in quanto i materiali disponibili potrebbero non essere perfettamente abbinabili ai requisiti dell'applicazione. D'altra parte, la selezione limitata di materiale e tecnologia non semplifica il processo decisionale poiché le proprietà del materiale dipendono dal processo e dalla geometria. Le specifiche del materiale fornite dai produttori di sistemi dispongono solo di riferimenti di base e spesso richiedono un controllo aggiuntivo durante le applicazioni. Attualmente i materiali processabili AM variano in tutte le categorie di materiali di base compresi metalli, polimeri, ceramiche e compositi. La

Tabella 1 elenca alcuni dei materiali metallici comunemente disponibili per le tecniche powder bed fusion e loro specifiche.

<i>Material</i>	<i>Modulo di Young [Gpa]</i>	<i>Tensione di rottura [Mpa]</i>	<i>Elongazione [%]</i>
<i>Ti6Al4V</i>	110-120	930-1020	10-14
<i>AlSi10Mg</i>	60-78	240-361	5-20
<i>Stainless Steel 316L</i>	184-185	633-640	40
<i>IN625</i>	170-182	827-961	35
<i>IN718</i>	166-170	994-1241	18
<i>Co-Cr-Mo</i>	191-200	240-361	20

Tabella 1. Materiali Metallici

In linea di principio dovrebbe esserci una differenza minima nella compatibilità dei materiali tra i diversi sistemi AM di fusione a letto di polvere. La polvere di metallo utilizzata dai sistemi metal additive manufacturing è simile alla polvere utilizzata in alcuni processi di produzione tradizionali come la metallurgia delle polveri e stampaggio ad iniezione di metalli. Tuttavia, esistono anche differenze significative, specialmente quando si verifica la completa fusione e solidificazione della polvere durante il processo. Inoltre è possibile regolare le caratteristiche con trattamenti termici.

Oltre alle specifiche tradizionali come la distribuzione delle dimensioni delle particelle di polvere, la dimensione media delle particelle e fluidità, fattori aggiuntivi come modalità di distribuzione della polvere, la spalmabilità e la chimica delle polveri devono essere presi in considerazione. Attualmente il metal AM costituisce solo una piccola parte del mercato totale della vendita delle polveri metalliche, questo influisce negativamente sia sul costo che sullo sviluppo di nuovi materiali da parte dei produttori di polveri che non vedono un mercato abbastanza ampio per intraprendere investimenti. Va inoltre notato che le proprietà specificate elencate nella Tabella 1

possono essere utilizzate solo come linea guida generali anziché come input di progettazione, poiché le specifiche sono state definite da campioni di test standard fabbricati mediante processi "standard" in condizioni specifiche per ciascun sistema. Come regola empirica, la maggior parte dei componenti con design tradizionali fabbricati tramite AM dovrebbero possedere proprietà statiche e quasi-statiche comparabili o leggermente migliori di quelle lavorate per esportazione di truciolo, visto che le tecniche laser powder bed fusion contribuiscano a creare una microstruttura più raffinata.

Anche se i valori delle proprietà reali possono essere difficili da prevedere, questa regola può esserlo utile nel fornire aspettative di base per lo sviluppo del processo. Dall'altro canto, alcune proprietà meccaniche per materiali metallici AM come resistenza alla fatica e creep che è fondamentale per molte applicazioni è molto inferiore, e la mancanza di riferimenti di base con queste proprietà spesso ostacola sviluppo efficiente del processo e selezione del design.

Alcuni processi AM come tecniche DED e Binder Jetting utilizzano una gamma molto più ampia di materiali metallici. Ad esempio, varie leghe di titanio sono state utilizzate con successo con la tecnica Laser Direct Energy Deposition e materiali esotici come tungsteno, niobio e molibdeno sono utilizzati in sistemi di deposizione di energia diretta a fascio di elettroni alimentati a filo.

In linea di principio la tecnica Binder Jetting è in grado di gestire quasi tutti i materiali in polvere fintanto che esistono sistemi di leganti compatibili, sembra quindi fornire a soluzione desiderabile per il problema di selezione del materiale spesso riscontrato con altri processi AM. Tuttavia, a causa della necessità di processi secondari per raggiungere proprietà meccaniche soddisfacenti, la tecnica Binder Jetting è soggetto a un design più vincolato rispetto a molti altri processi AM.

Inoltre, nonostante vari dimostrazioni delle capacità dei materiali, relativamente pochi materiali metallici sono stati adeguatamente sviluppati su piattaforme Binder Jetting ai fini dell'applicazione. Vari materiali polimerici sono stati utilizzati da processi AM come VAT, Material Jetting, FDM e SLS. Essendo uno dei tipi più versatili di materiali, i polimeri possono essere personalizzati per avere combinazioni desiderate

di proprietà, quindi possiedono grandi potenzialità nella progettazione di materiali e strutture avanzate. Rispetto alla tradizionale produzione di polimeri processi come stampaggio ad iniezione e termoformatura, i polimeri per AM i processi hanno generalmente un tasso di produzione significativamente inferiore (massa del materiale per unità tempo). Inoltre, la selezione relativamente limitata di polimeri per AM disponibile in commercio è un fattore limitante per i progetti orientati alle prestazioni. Di conseguenza, le applicazioni delle tecnologie di polimeri AM sono state relativamente limitate. Molti delle attuali applicazioni con polimeri AM hanno sfruttato vari tipi di proprietà fisiche dei materiali polimerici quali bassa densità, resistenza chimica, trasparenza e isolamento elettrico. Tuttavia, diversi materiali polimerici e compositi a matrice polimerica si stanno rapidamente sviluppando e potrebbero essere potenzialmente utilizzati per prodotti finali ad alte prestazioni, come i polimeri rinforzato con fibra di carbonio materiali e PEEK (Polietero etere chetone) ad alta resistenza. La Tabella 2 mostra alcuni dei polimeri AM più comunemente disponibili e loro specifiche.

<i>Materiale</i>	<i>Modulo di Young</i> [Mpa]	<i>Tensione di snervamento</i> [Mpa]	<i>Temperatura di scorrimento vetroso</i> [°C]
<i>Nylon</i>	1700	50	176
<i>PEEK</i>	4250	90	143
<i>ABS</i>	1920-2200	28-37	108
<i>PLA</i>	2020-3544	49-56	57
<i>ULTEM 9085</i>	2150-2270	42-69	186
<i>Fotopolimeri a base acrilica ed epossidica</i>	2690-3380	58-68	57

Tabella 2. Materiali polimerici

Anche in questo caso va indicato che la maggior parte di questi valori di proprietà deve essere utilizzata solo come riferimento piuttosto che input di progettazione,

poiché saranno anche altri fattori di progettazione e produzione a influenzare le proprietà finali delle strutture fabbricate. Ad esempio, anche se l'ABS mostra proprietà che potrebbero essere adeguate ad alcune applicazioni, durante i processi FDM/FFF, vista la grande anisotropia nella direzione di costruzione, le strutture finali esibiranno significative proprietà inferiori prestazioni lungo la direzione di sovrapposizione dei livelli (direzione Z). Inoltre, a causa della variabilità tipica della proprietà per la maggior parte dei materiali polimerici, è anche più difficile applicare i polimeri per AM ai progetti strutturali con requisiti prestazionali severi.

Esistono poi anche i materiali ceramici. Rispetto agli altri due tipi di materiali, i materiali ceramici sono molto meno usati in AM. Attualmente sul mercato vengono utilizzati solo pochi tipi di materiali ceramici specifici per AM.

I processi AM presentano le stesse complessità dei processi tradizionali per quanto riguarda i materiali ceramici. Da un lato, i materiali ceramici possiedono spesso la combinazione di alta temperatura di fusione, alto coefficiente di dilatazione termica e bassa tenacità a frattura, che li rende estremamente impegnativi per i cicli fusione-solidificazione caratteristici dei processi come fusione a letto di polvere. D'altra parte, quando viene adottato un approccio più tradizionale, il design sarà soggetto a limiti di producibilità simili a quelli di processi tradizionali come disomogeneità termica, sbavatura, distorsione di sinterizzazione, e porosità. La mancanza di riconoscimento di applicazioni idonee è un altro limite fattore per una più ampia adozione della ceramica AM. Attualmente la ceramica commerciale per sistemi AM, che utilizzano i processi di Binder Jetting e fotopolimerizzazione, adottano tutti il secondo approccio di fabbricazione e si concentrano sulla realizzazione di geometrie. A seconda delle applicazioni, processi di densificazione secondaria come la sinterizzazione o infiltrazioni sono spesso necessarie per raggiungere la caratteristica ideali delle strutture. Tuttavia, per le strutture ceramiche con geometrie complesse che è sono solo ad appannamento per le tecnologie AM, i post processi di densificazione rimangono poco compresi e rappresentano solo una delle varie lacune tra le capacità tecnologiche e i requisiti per l'uso finale. La maggior parte della le attuali tecnologie ceramiche AM hanno dimostrato che la densità della parte finale è di circa 95% dopo la

densificazione, che pone ancora sfide significative per il loro potenziale utilizzo nelle applicazioni strutturali a causa dell'alta sensibilità ai difetti dei materiali ceramici. Esistono anche applicazioni in cui le parti verdi o non trattate possono essere utilizzate direttamente. Per esempio, stampi e anime di sabbia per fonderia fabbricati tramite sistemi Binder Jetting trovano larga applicazione. Con processi di getti leganti, le sabbie da fonderia possono essere utilizzate direttamente fintanto che la spalmabilità della polvere rispetta il requisito della macchina di stampa. Utilizzando vari leganti per fonderia come leganti furanici, leganti fenolici e leganti silicati, la qualità degli stampi stampati e le anime possono essere paragonabili a quelli tradizionali, oltre a considerazioni sulle geometrie è necessario prendere in considerazione questioni quali la permeabilità e l'accuratezza dello stampo.

Per concludere, i materiali compositi sono in genere più impegnativi per le attuali tecnologie AM. Infatti, a causa del processo di sovrapposizione degli strati la discontinuità nella direzione di costruzione (direzione Z) non consente il continuo rinforzo in quella direzione. Invece, il rinforzo continuo può essere solo realizzato all'interno dei piani di costruzione (direzioni X e Y), che a volte è indesiderato in quanto ciò andrebbe ulteriormente ad aumentare l'anisotropia delle strutture. Attualmente, i compositi per AM esistono principalmente in la forma di strutture composite rinforzate con particelle mediante aggiunta di particolato fase di rinforzo nei materiali primari. Uno di questi esempi è la polvere di nylon caricate a vetro per processi di sinterizzazione a letto di polvere per aumentare la resistenza agli urti e rigidità. Esistono anche sistemi AM che fabbricano fibre continue rinforzate con strutture composite. In questi casi per molti progettisti è logico adottare approcci progettuali simili ai tradizionali design for manufacturing, poiché solo nella natura del materiale vengono imposti dei limiti.

Tuttavia, dovrebbe essere sottolineato ancora una volta che le proprietà dei materiali AM dipendono da vari fattori inclusi parametri di processo, orientamenti di costruzione e geometrie oltre a i fattori relativi alla materia prima. Inoltre, dal punto di vista della progettazione basata sulla funzionalità, le proprietà del materiale devono essere progettate contemporaneamente alle geometrie anziché essere definite

separatamente. Con la corrente teoria DFAM, è comunque difficile realizzare tali approcci progettuali, ma con il rapido sviluppo di questo settore unito alla sempre crescente adozione industriale delle tecnologie AM, ci si può aspettare che questo divario tra conoscenza e reale applicazione sarà presto colmato.

3.4. Considerazioni generali sul Design For Additive Manufacturing

Sebbene ogni processo AM presenti caratteristiche uniche, esistono problematiche che accomunano la maggior parte dei sistemi AM. A causa del processo di costruzione a strati, la qualità della geometria dei sistemi AM lungo la direzione di costruzione è influenzata dallo spessore del layer. Mentre alcuni sistemi AM metal powder bed fusion offrono strato spessore di soli 20 μm , altri sistemi come stereolitografia e Material Jetting possono facilmente ottenere uno spessore più sottile di circa 16 μm . Anche se avere un piccolo spessore dello strato indica generalmente una maggiore precisione geometrica e risoluzione, esistono altri fattori che svolgono ruoli importanti nel determinare le qualità geometriche di una parte. Per le funzioni geometriche lungo la direzione di costruzione, l'effetto di scala causato dal processo è minimo e la precisione geometrica nella direzione Z è determinata sia dallo spessore dello strato che dalle caratteristiche dei materiali durante il processo. D'altra parte, per le geometrie che si sviluppano con un determinato angolo di inclinazione rispetto alla direzione di stampa l'effetto scala è determinato dalla combinazione di spessore dello strato e angolo di inclinazione delle features. Un angolo di inclinazione più piccolo comporta non solo più significativo effetto scala ma anche minore lunghezza di legame tra gli strati, che a sua volta potrebbe influenzare le proprietà meccaniche delle strutture.

Per diversi processi, l'effetto scala presenta caratteristiche diverse. Per i processi ad estrusione di materiale, a causa dell'effetto modellante dell'ugello di estrusione e distorsioni indotte dalla gravità, le tracce di materiale depositato presentano estremità arrotondate e sezioni trasversali appiattite; Per i processi SLA, a causa degli effetti di adesione tra la superficie indurita e la resina non indurita, altra resina tende ad attaccarsi ai vari layer della parte e conseguentemente questo polimero in eccesso

viene polimerizzato durante i post-processi, che tuttavia aiuta a levigare la superficie laterale; Per i processi PBF, l'effetto di sinterizzazione provoca l'apporto di polvere aggiuntiva alla superficie delle parti, che diminuisce la qualità superficiali. Per questo tipo di processo, un altro fattore che contribuisce all'errore della geometria sono i ritiri di solidificazione, che sono elogiati dalla presenza di aria tra le particelle della polvere. La densità di "imballaggio" raggiungibile per la polvere è in gran parte determinata dalla morfologia della polvere, dalla distribuzione dimensionale e dalle caratteristiche superficiali della polvere come la presenza di satelliti o meno. Come una regola generale, le particelle di polvere con forme più regolari possono raggiungere livelli più alti di densità. Mentre la polvere molto irregolare può densità relative di circa 40%, la più alta densità teorica relativa per un letto di polvere è di circa il 65%. Anche se in teoria si può ottenere una densità relativa di circa 82% miscelando polvere con particelle di dimensioni diverse distribuzioni. L'aggiunta di particelle più piccole tende a diminuire gli interstizi di aria tra le particelle ma aumentando le superfici di contatto tra esse aumenta anche l'attrito e quindi si riduce la fluidità della polvere. Pertanto, per scopi pratici, il limite di densità relativa del letto di polvere è del 68–70%. Le porosità incluse nel letto di polvere comporteranno un restringimento volumetrico durante la solidificazione, che riducono la precisione geometrica in tutte le direzioni. Per il restringimento isotropico, tale restringimento volumetrico corrisponderebbe al 10% di restringimento lineare che è notevole ai fini della progettazione. Tuttavia, per la maggior parte Processi AM, il restringimento della solidificazione avviene anisotropicamente, con il restringimento nelle direzioni del piano di costruzione limitato dall'interazione tra livello corrente e substrato precedente costruito. Per questi processi l'errore in direzione Z non ha effetti cumulativi poiché per ogni ulteriore strato lo spessore di layer appena aggiunto sarà sempre riempito con polvere e quindi compenserà il restringimento. Tuttavia, la stessa conclusione non potrebbe essere fatta per gli altri processi Additive Manufacturing.

Ad esempio, per i processi FDM, i parametri di stampa al variare dell'altezza in direzione Z sono fissi, quindi la quantità di materiale depositata su ogni layer è fisso. Pertanto, errori geometrici potrebbero accumularsi su più livelli, il che potrebbe

potenzialmente causare una perdita significativa di accuratezza per le parti se non vengono valutate attentamente o addirittura un fallimento del processo di fabbricazione. Per molti processi AM, la risoluzione delle funzioni geometriche è strettamente associata alle geometrie della parte. In altre parole, per questi processi non esiste una risoluzione standard che può essere applicata a tutti i componenti realizzati. Questo può essere abbastanza frustrante durante la fase di progettazione, specialmente quando le geometrie dettagliate sono ancora soggette a modifiche. Per questo motivo si è cercato di stabilire parti standard di benchmark che contenessero un set di geometrie al fine di fornire stime sulle qualità geometriche di specifici sistemi AM, ma in generale il successo è stato limitato. Finora la quasi totalità delle parti di benchmark possono essere classificate in tre tipi:

- Benchmark geometrico: utilizzato per valutare la qualità geometrica generata da una determinata macchina, con determinati parametri e un determinato materiale.
- Benchmark meccanico: utilizzato per confrontare le proprietà meccaniche delle geometrie generate da una determinata macchina, con determinati parametri e un determinato materiale.
- Benchmark di processo: utilizzato per sviluppare i parametri di processo ottimali per predefinite geometrie generate da determinati sistemi di processo.

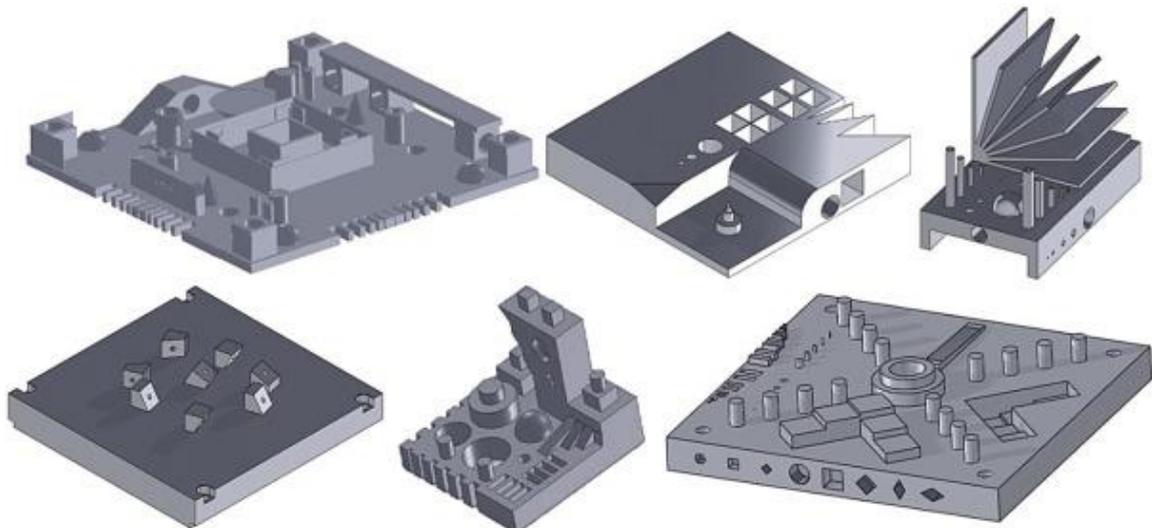


Figura 31. Esempi di benchmark

I tre tipi di parti di riferimento servono a diversi scopi di valutazione del progetto. Il benchmark geometrico valuta le caratteristiche geometriche di una determinata combinazione di parametri, materiale e processo tra cui accuratezza, precisione, finitura superficiale, e ripetibilità, che può essere qualitativa o quantitativa. Il benchmark geometrico incorpora molteplici caratteristiche geometriche rappresentate da forme tradizionali come blocchi, cilindri, cupole e prismi. Qualità geometriche e tolleranze saranno poi misurate per fornire valutazioni.

Finora la maggior parte delle parti di benchmark per AM rientrano in questa categoria. Questo tipo di benchmark può essere efficace nell'ottimizzazione della selezione e dei parametri di processo per una data geometria fissa. D'altra parte, le informazioni generate da queste parti geometriche di riferimento potrebbero non essere facilmente generalizzate, quindi prive della visione delle caratteristiche intrinseche del processo.

I benchmark meccanico si concentrano su valutare le proprietà meccaniche quantitative di una parte in determinate combinazioni di materiale e processo. Gli studi sui benchmark meccanici solitamente creano dati che non possono essere generalizzati. Senza linee guida di progettazione sistematiche, le proprietà meccaniche di parti realizzate con tecnologia AM non sono prevedibili con accuratezza. Le caratteristiche meccaniche di un job vengono per lo più valutate tramite provini standard di caratterizzazione dei materiali realizzati insieme al componente che si vuole valutare ed è probabilmente uno degli approcci più fuorvianti nella comprensione delle caratteristiche dell'Additive Manufacturing. Per la maggior parte dei processi AM, esiste una correlazione tra proprietà e dimensioni caratteristiche di una parte. Ad esempio, per molti processi di estrusione di materiale, esistono traiettorie di deposizione separate per i bordi e le aree interne di uno stesso layer. Dal momento che il bordo esterno e l'area interna sono realizzate separatamente si presenteranno proprietà diverse nelle due regioni, questa procedura crea essenzialmente strutture composite shell-core. Pertanto, quando le dimensioni della parte variano, la percentuale di bordo esterno rispetto all'area interna potrebbe potenzialmente cambiare, il che si traduce in un cambiamento di proprietà meccaniche. Alcuni sistemi di estrusione di materiale forniscono software che consente controllo

completo delle strategie di deposizione da parte degli utenti, mentre alcuni sistemi si concentra sulla fornitura di una soluzione "chiavi in mano" e quindi non apre tale libertà agli utenti. Un altro esempio viene dai processi SLS. Attualmente nei sistemi di sinterizzazione laser la deflessione del laser è realizzata tramite il controllo di due galvanometri che inclinano due specchi, uno per ogni direzione. L'operazione di scansione richiede frequenti accelerazioni e decelerazioni del movimento dello specchio di scansione, all'inizio e alla fine di ogni vettore di scansione il laser sperimenta spesso un fenomeno di rallentamento dell'inseguimento, che potrebbe potenzialmente surriscaldare le aree scansionate. Per i processi a fusione del letto di polvere, il problema della dipendenza dalle dimensioni delle aree di sezione è particolarmente significativo. Questo è dovuto al fatto che la solidificazione e la microstruttura dei materiali metallici sono molto sensibili alle condizioni termiche e ai processi di trasferimento del calore. In questi processi, la fonte di energia si muove lungo schemi specifici percorsi a alta velocità, che crea gradienti termici in rapido movimento. È ovvio che la scelta delle strategie di scansione influisce sulle caratteristiche del campo di temperatura.

Ad esempio, con una semplice scansione a zig-zag, il gradiente di temperatura nella parte tende ad aumentare con l'aumentare della lunghezza del vettore di scansione. Ciò è dovuto al fatto che lunghezze vettoriali di scansione più lunghe comportano un intervallo più lungo tra due riscaldamenti della medesima zona. Potrebbe verificarsi un aumento del gradiente di temperatura in raffreddamento e quindi generarsi una diversa microstruttura. Inoltre, poiché la conducibilità termica del letto di polvere è significativamente inferiore rispetto al materiale solido, durante i processi di fusione del letto di polvere il percorso di conduzione del calore primario scende verso il basso attraverso le precedenti strutture fabbricate, il che significa che anche il substrato solido è soggetto ad ulteriori cicli di riscaldamento-raffreddamento, che potenzialmente agiscono come trattamento termico che altera la microstruttura e le proprietà della parte. Vale la pena notare che anche il problema della distribuzione del gradiente termico influisce sulla precisione geometrica delle parti metal AM PBF. Gradiente termico più grande spesso si traduce in una maggiore sollecitazione termica

residua e quindi in eventuali distorsioni, il che influisce sulla precisione geometrica delle parti. Sebbene la maggior parte dei sistemi AM a letto di polvere metallica impiega sofisticate strategie di scansione al fine di ridurre lo stress termico residuo, è ancora difficile prevedere con precisione queste tensioni e di conseguenza progettare per ottimizzare processi. Per questa tecnologia, a volte è accettabile avere errori dimensionali che vanno a costituire del sovrametallo, poiché solitamente per rendere assemblabili queste parti si lavorano per asportazione di truciolo per avere una finitura superficiale migliore nelle zone di accoppiamento con altre parti.

I benchmark meccanici e geometrici spesso vengono eseguiti contemporaneamente, poiché molti obiettivi del processo di sviluppo mirano a ottimizzare sia le proprietà geometriche sia quelle meccaniche.

Quindi si può facilmente vedere che le parti di benchmark affrontano simili sfide e che i processi additive hanno una forte dipendenza tra proprietà geometriche e meccaniche. Nei casi in cui i parametri di input hanno effetti composti su proprietà dei materiali e caratteristiche geometriche, anche la valutazione qualitativa può diventare difficile. Un compromesso che potrebbe essere utile è quello di classificare le caratteristiche di interesse in gruppi rappresentativi e, di conseguenza, eseguire la sperimentazione di ciascun gruppo, in questo modo sarà più probabile trovare degli andamenti regolari che leghino la modifica dei parametri di input ai risultati.

A volte è ugualmente difficile definire efficacemente le categorie, ma ne esistono alcune variabili di input geometrico comunemente riconosciute che probabilmente devono essere studiate sperimentalmente. Prendendo un sottoinsieme di questi parametri, è possibile ottenere una conoscenza efficiente di un determinato tipo generico di geometrie e ottimizzare i processi.

Il National Institute of Standards and Technology ha recentemente proposto un benchmark standard che mira a fornire sia benchmark geometrici che di processo. La parte è composta da più geometrie e rappresentano un insieme relativamente completo di test su geometrie e tolleranze, e alcune funzioni geometriche considerano anche problemi unici dell'AM come sbalzi, spessori sottili ed estrusioni. D'altra parte, esso non include funzionalità per le valutazioni dell'inclinazione angolare delle geometrie

rispetto alla direzione di costruzione. Questo benchmark è stato progettato principalmente per i processi powder bed fusion, mentre altri test potrebbero essere potenzialmente più adatti agli altri processi AM.

Un altro problema di progettazione comune alla maggior parte delle tecnologie AM è la progettazione per risolvere problemi di qualità. Il controllo di qualità in AM è attualmente realizzato in due modi: misurazioni in processo e qualificazione della parte post processo. Per le tecniche di produzione tradizionale, sia il controllo di qualità in-process che la qualificazione delle parti post-process sono stati ampiamente impiegati e le parti possono essere progettate per massimizzare la qualità dei processi con facilità. Tuttavia, per processi additivi, il controllo di processo in retroazione non è generalmente disponibile tranne che per alcuni sistemi commercializzati. Per alcuni sistemi AM come i sistemi a fusione del letto di polvere, questo controllo non è disponibile a causa della difficoltà di impostare un sistema di rilevamento in-process efficace ma anche per la mancanza di comprensione delle relazioni tra le variabili di controllo dell'input e le variabili di output misurabili come temperature e distorsioni termiche.

Attualmente, la maggior parte dei sistemi di produzione AM funzionano senza un controllo ad anello chiuso. Il controllo di qualità per un sistema di produzione AM è lineare poiché la produzione spesso richiede la definizione completa di tutte le variabili di input.

Anche avendo tutte le misurazioni possibili, a causa delle variazioni casuali di qualità della materia prima e le potenziali variazioni di parametri di controllo del processo non specificati, la qualità delle parti finali potrebbe presentare notevoli variazioni. Si stanno eseguendo studi per correlare informazioni acquisite in tempo reale, come la cronologia della temperatura acquisita tramite rilevamento in-process, i risultati dell'ispezione post-process al fine di stabilire relazioni empiriche tra processo e qualità, e si stanno ottenendo ottimi risultati. D'altra parte, la misurazione post processo delle parti AM può diventare difficile soprattutto per le geometrie con forme libere e parti con strutture di supporto. Per questo motivo si stanno sviluppando controlli incrociati di tipo visivo, acustico e termico.

3.5. Design di strutture leggere

Uno degli obiettivi nella progettazione di strutture è ridurre al minimo la quantità di massa e massimizzare l'efficienza di utilizzo dei materiali. Pertanto, la progettazione di strutture leggere è sempre stata richiesta per quasi tutti i progetti a carattere ingegneristico. La leggerezza comporta vari vantaggi tecnici quali un elevato rapporto resistenza-peso, un elevato assorbimento di energia di deformazione per unità peso, una bassa conducibilità termica e un ampio rapporto tra superficie e peso. Questi attributi potrebbero a loro volta tradursi in vari vantaggi economici e ambientali come l'affidabilità del prodotto, l'efficienza energetica del sistema e la sostenibilità del prodotto. Tuttavia, poiché i progetti che prevedono lo studio di strutture leggere implicano spesso un elevato livello di complessità delle geometrie, la realizzazione di questi è stata da sempre un compito impegnativo con le tecnologie di produzione tradizionali. È stato ampiamente riconosciuto che le tecnologie additive manufacturing possiedono le capacità uniche nel realizzare questi design essendo poco penalizzate dalla complessità geometrica. Tuttavia, la progettazione di queste strutture leggere oltre gli scopi estetici non è generalmente ben compresa dalla maggior parte dei designer. La mancanza di conoscenza delle relazioni tra i vari requisiti di prestazione ingegneristica come ad esempio proprietà meccaniche, proprietà termiche, proprietà biologiche, di accoppiamento con altri componenti e la progettazione geometrica spesso impediscono lo studio proficuo di strutture leggere per scopi funzionali. Inoltre, esistono pochi manuali utili alla selezione di un processo ottimale nella fabbricazione di queste strutture che utilizzano tecnologie AM, così come esistono pochi manuali in grado di delineare con efficienza linee guida ed esempi dettagliati e generici sulla realizzazione di queste geometrie complesse.

La natura ha fornito innumerevoli esempi di strutture leggere con diversi fini. Le strutture come il fusto della pianta e i tessuti ossei non servono solo a sopportare carichi, ma fungono anche da condotti per i fluidi biologici. Inoltre, queste strutture presentano spesso un'ottimizzazione locale. Ad esempio, nei tipici tessuti ossei le porosità ossee verso la superficie esterna tendono ad essere più basse al fine di fornire una maggiore rigidità torsionale e flettente. Similmente, nelle strutture degli steli delle

piante le dimensioni dei pori al centro del fusto sono significativamente più grandi rispetto a quelle nella periferia del gambo, tutto questo corrisponde a una maggior resistenza meccanica alla flessione e un miglior flusso di nutrienti attraverso la pianta. Un altro esempio lo troviamo negli alveari, la topologia della struttura del nido d'ape offre anche molteplici funzionalità tra cui elevata rigidità e l'elevatissimo rapporto volume massa, che lo rende ideale sia come rifugio che come deposito per le colonie di api. La maggior parte delle strutture leggere artificiali ha design notevolmente semplificato. In molti di questi progetti, la funzionalità delle strutture è spesso semplificata per consentire l'utilizzo di geometrie leggere relativamente semplici. Ad esempio, nella progettazione degli scafi per imbarcazioni da regata in materiale composito spesso pannelli con struttura a nido d'ape vengono utilizzati come core visto il loro peso molto ridotto in combinazione con la grande rigidità uniaassiale che presentano. Una simile applicazione la possiamo trovare nelle carlinghe degli aeromobili.

Visto che questo tipo di struttura lavora solamente su tensioni in un'unica direzione, una volta determinato il materiale, la progettazione dei nuclei a nido d'ape potrebbe essere in gran parte semplificata, progettando con l'obiettivo singolo dello spessore delle pareti o della larghezza delle celle dell'unità a nido d'ape. Ciò consente un approccio progettuale puramente sperimentale che viene spesso adottato dai progettisti. Tuttavia, al fine di ottenere componenti ottimizzati per la multifunzionalità deve essere impiegata una teoria di progettazione più sofisticata. Uno degli obiettivi della progettazione di queste strutture leggere con tecniche additive è quello di realizzare il design funzionali, il che implica che il design dovrebbe essere guidato da specifiche ingegneristiche invece che da limiti di producibilità. Il prerequisito di base per tale approccio è che le relazioni tra le specifiche ingegneristiche e la geometria siano a monte dell'iter di progettazione ben definite e che a loro volta includono sia la progettazione della geometria sia la progettazione del processo in maniera integrata.

Sebbene esistano diversi approcci e strumenti per la progettazione e l'ottimizzazione della geometria che generalmente consentono la creazione di modelli di progettazione che consentano di realizzare geometrie con prestazioni superiori, nessuno di essi

affronta in modo adeguato la progettazione per il processo produttivo. La maggior parte degli strumenti di progettazione di strutture alleggerite tratta il materiale come un materiale isotropico ideale e si concentra solo sull'ottimizzazione della geometria, il che si traduce in una deviazione significativa dalla realtà. Come accennato in precedenza, una delle caratteristiche uniche di AM è che le proprietà del materiale sono spesso dipendenti dal processo e dalla geometria e molto spesso il materiale processato presenta caratteristiche anisotropiche. Tale effetto composto ha un impatto significativo nella progettazione, poiché queste strutture hanno spesso caratteristiche geometriche con scale di dimensioni variabili e quindi proprietà del materiale potenzialmente diverse. Inoltre, a causa delle intrinseche variazioni di qualità di cui sono affetti i processi additivi con geometrie di piccole dimensioni, la difficoltà di ottenere un design accurato acquista una importanza maggiore. La definizione del processo di progettazione di strutture alleggerite è ancora un'area di ricerca in corso nella produzione additiva.

Nella progettazione di questi tipi di strutture per additive manufacturing, attualmente vengono comunemente utilizzati due approcci di base, ovvero la progettazione basata sull'ottimizzazione topologica e la progettazione delle strutture cellulari. Ogni approccio possiede vantaggi e svantaggi rispetto all'altro.

3.5.1. Ottimizzazione topologica

Nonostante il concetto di ottimizzazione topologica sia stato introdotto sin dai primi anni del 900, questo metodo non ha visto applicazioni e significative attenzioni fino alla metà degli anni 80 dove l'avvento del calcolo computazionale ha reso possibile l'esecuzione di questo. In breve, l'ottimizzazione topologica è uno strumento matematico che si concentra sulla distribuzione efficace di materiale all'interno di un volume di controllo con l'obiettivo di massimizzare o minimizzare determinati criteri come il peso, la rigidità, conduttività termica e frequenza di risonanza.

L'implementazione di questo metodo è stata realizzata anche grazie all'utilizzo di tecniche agli elementi finiti in quanto entrambi sono basati sulla discretizzazione di volumi o aree.

A differenza di metodi come l'ottimizzazione dimensionale e l'ottimizzazione geometrica, l'ottimizzazione topologica ha le capacità di creare soluzioni geometriche non vincolate.

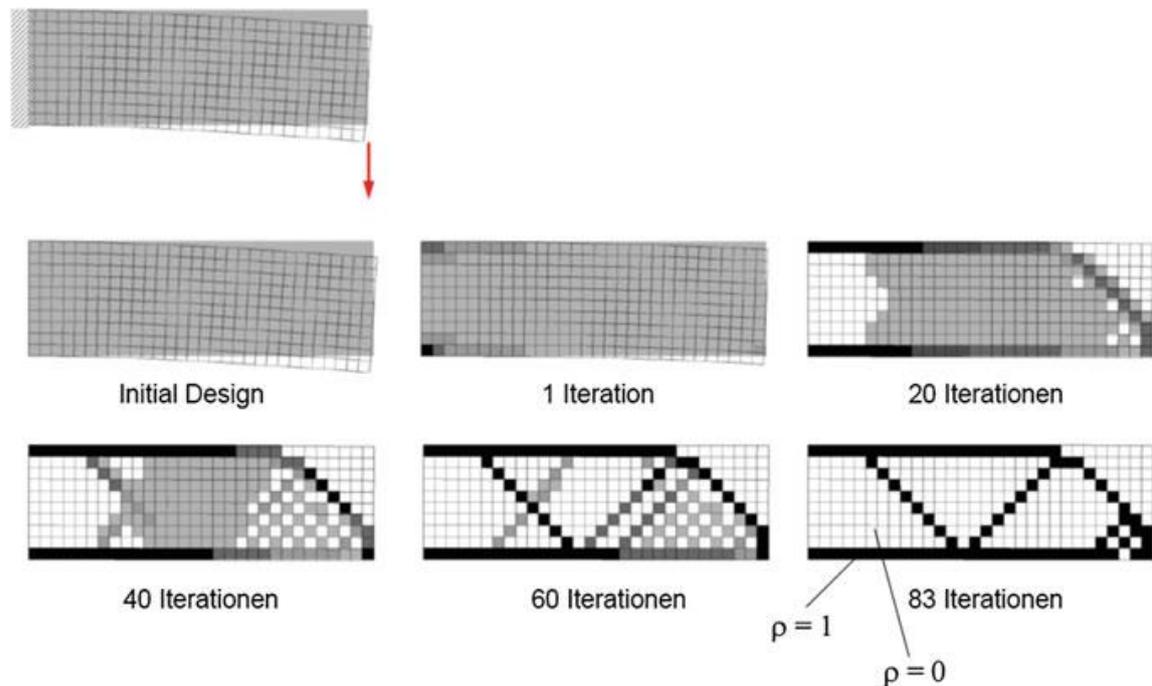


Figura 32. Iterazioni ottimizzazione topologica

L'esempio in figura mostra un processo di ottimizzazione topologica in varie iterazioni. Questo riporta una trave incastrata non sottile con carico in punta. L'algoritmo settato per massimizzare la rigidezza e minimizzare la deformazione durante ogni iterazione va ad eliminare selettivamente gli elementi e a verificare il comportamento della struttura ottenuta. Le iterazioni continuano fino al raggiungimento di un limite massimo imposto per abbattere i costi computazionali o quando vengono soddisfatti i target di ottimizzazione.

Negli anni sono stati utilizzati diversi tipi di algoritmi di ottimizzazione topologica per progettare strutture prodotte con tecniche additive manufacturing come i metodi SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalization) o BESO (Bidirectional Evolutionary Structural Optimization).

3.5.1.1. SIMP

Il metodo matematico più diffuso per l'ottimizzazione topologica è il metodo SIMP. Il metodo SIMP prevede una distribuzione ottimale del materiale all'interno di un determinato spazio di progettazione, per determinati casi di carico, condizioni al contorno, vincoli di produzione e requisiti di prestazione.

Secondo il matematico *Bendsoe*: "L'ottimizzazione della forma nella sua configurazione più generale deve consistere in una determinazione per ogni punto nello spazio, che ci sia o non ci sia del materiale in quel punto." L'approccio tradizionale all'ottimizzazione topologica è la discretizzazione di un dominio in una griglia di elementi finiti chiamata microstrutture solide isotropiche. Ogni elemento è riempito con del materiale nelle aree che richiedono il materiale, o svuotato del materiale nelle aree dove è possibile rimuovere il materiale (che rappresentano i vuoti). La distribuzione della densità del materiale all'interno di un dominio progettazione ρ per ciascun elemento è assegnata in un intervallo che va da $x_e = 1$ dove il materiale è richiesto e $x_e = 0$ dove il materiale è rimosso.

Per esempio, in un algoritmo dove si vuole massimizzare la rigidità il metodo cerca di minimizzare l'energia di deformazione del componente:

$$\min: SE = \sum_{e=1}^N (x_e)^p u_e^T k_e u_e$$

Dove SE è l'energia di deformazione, x_e la distribuzione di densità dell'elemento, p il fattore di penalizzazione, u_e il vettore spostamento dell'elemento e k_e la matrice di rigidità dell'elemento.

La densità dell'elemento x_e viene limitata inferiormente perché elementi con densità prossima allo zero sarebbero irrealizzabili e inutili dal punto di vista strutturale:

$$0 < \rho_{min} \leq x_e \leq 1$$

Molto importante nell'algoritmo SIMP è l'esistenza del fattore di penalizzazione. Questo fattore va direttamente ad agire sul modulo di Young di ogni elemento in modo che elementi con densità diversa da 0 e 1 vengano penalizzati facilitando l'algoritmo a scartare questi valori.

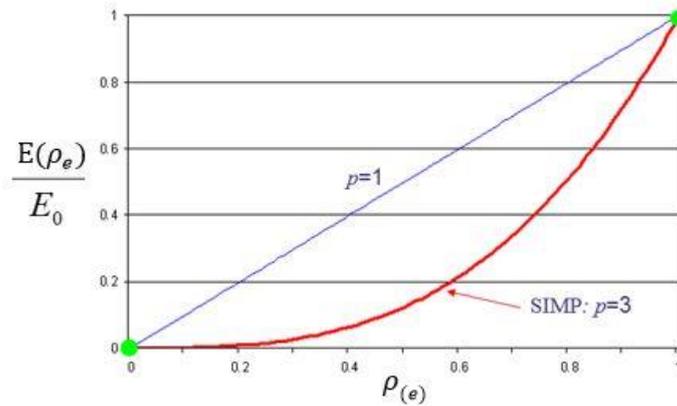


Figura 33. Differenza rapporti moduli elastico con fattori di penalizzazione diversi

Il modulo di elasticità per ogni elemento viene calcolato secondo la seguente formula:

$$E(x_e) = x_e^p E_0$$

Dove E_0 rappresenta il modulo di Young del materiale di costruzione che corrisponde al modulo degli elementi con rapporto di densità uguale a 1. Questo parametro è stato introdotto in quanto i processi di produzione tradizionale difficilmente riescono a creare componenti regolando la densità di massa in determinate aree del componente. Questo non è del tutto vero con processi additive manufacturing. In applicazioni funzionali si preferisce comunque utilizzare componenti con piena densità.

Tornando alla ottimizzazione SIMP per massimizzare la rigidità, per poter eseguire questo calcolo va anche impostato un vincolo di massa. Durante ogni iterazione di ottimizzazione, il vincolo di massa di destinazione, l'equilibrio forza-rigidità globale e i vincoli funzionali richiesti devono essere soddisfatti:

$$\sum_{e=1}^N v_e^T x_e \leq M_{Target}$$

Dove v_e è il volume dell'elemento e M_{Target} è la massa limite.

Inoltre, l'algoritmo cerca di eliminare gli effetti a scacchiera che si creerebbero a seguito della discretizzazione del volume e gli effetti "groviera" della geometria.

Per annullare questi effetti viene effettuata un'analisi di sensitività ad ogni iterazione. Matematicamente, l'analisi della sensitività è espressa come derivativa della funzione obiettivo rispetto alla densità del materiale:

$$\frac{dSE}{dx_e} = -p(x_e)^{p-1} u_e^T k_e u_e$$

Durante un'analisi della sensitività, gli elementi ponderati con fattori di densità del materiale ridotta alla fine perdono la propria importanza strutturale e sono eliminati in iterazioni successive.

Se si calcola la sensitività in modo indipendente per ogni elemento e non si prende in considerazione la connettività tra gli elementi, questo può portare a discontinuità nel materiale e ai volumi che diventando scollegati dalla geometria principale. Per ridurre l'effetto scacchiera, si applica uno schema di filtraggio a un raggio di influenza dell'elemento e si calcola la media della sensitività di ciascun elemento all'interno della zona di influenza. Il filtraggio include il controllo dei perimetri, un filtro “passa-alto” sulla densità degli elementi, smussatura delle patch, elaborazione delle immagini e controllo basato sulla lunghezza della scala monotona.

Le iterazioni di ottimizzazione continuano fino a quando le variazioni della funzione obiettivo convergono e le iterazioni raggiungono i propri criteri di convergenza.

Prendiamo come esempio una trave a sbalzo incastrata con carico in punta.

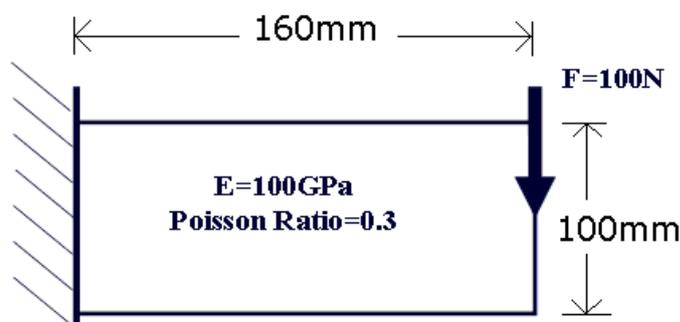


Figura 34. Esempio trave flessa incastrata

L'obiettivo è minimizzare l'energia di deformazione, ossia massimizzare la rigidità, e di ridurre la massa del 50%. Il lato sinistro della piastra è fisso mentre una forza di 100 N ed è imposta al centro del lato destro della piastra.

I risultati al variare dei parametri saranno i seguenti:

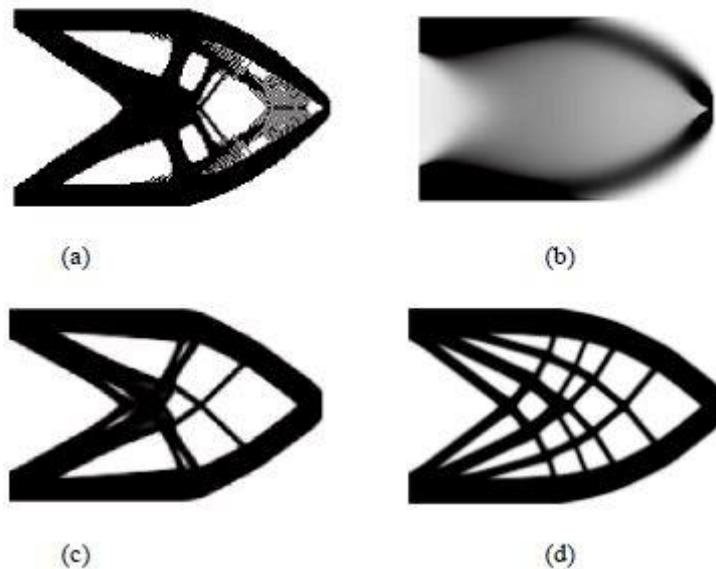


Figura 35. Risultati algoritmo SIMP

I parametri dei risultati sono:

- (a) $P=3$, $FR=1\text{mm}$, $SE=4.0\text{Nmm}$, densità di partenza=0.5 densità del materiale
- (b) $P=1$, $FR=1\text{mm}$, $SE=3.3\text{Nmm}$, densità di partenza=0.5 densità del materiale
- (c) $P=3$, $FR=1.5\text{mm}$, $SE=3.9\text{Nmm}$, densità di partenza=0.5 densità del materiale
- (d) $P=3$, $FR=1.5\text{mm}$, $SE=3.8\text{Nmm}$, densità di partenza casuale

Dove FR è il raggio di filtraggio per evitare effetti scacchiera e in tutti i casi è stato impostato il vincolo geometrico di simmetria.

La figura mostra le topologie SIMP per diversi input di partenza e parametri. Nel caso a si può notare che un valore di FR basso elimina del tutto l'effetto scacchiera. Se sia la FR che il fattore di penalizzazione sono mantenute bassi come nell'esempio b, le scacchiere scompaiono ma si presenta una grande area a densità intermedie.

Visto che la caratteristica principale dell'algoritmo SIMP è orientare l'ottimizzazione topologica verso topologie fattibili, quindi senza regioni grigie, potrebbe esistere un'interpretazione per densità intermedie per la produzione con tecnologie AM come questo caso.

Invece, nel caso c visti i valori più alti di P e FR le aree a densità intermedia scompaiono.

A differenza degli esempi a e c, l'ottimizzazione topologica d è stata eseguita con un punto di partenza casuale. Questa topologia è caratterizzata da un'energia di

deformazione minore rispetto al caso c ed a dove e all'inizio è stata imposta una distribuzione uniforme della densità degli elementi.

3.5.1.2. BESO

Gli algoritmi BESO sono insieme ai SIMP gli algoritmi di ottimizzazione topologica più diffusi. BESO nasce dalla combinazione di AESO (Additive Evolutionary Structural Optimization) e ESO (Evolutionary Structural Optimization). Come il metodo SIMP anche per il BESO si utilizzano tecniche agli elementi finiti. Infatti, il volume o le superfici vengono discretizzate e l'algoritmo tramite varie iterazioni rimuove e aggiunge materiale. Con questo metodo non è possibile avere valori di densità intermedi ma soltanto valori discreti come $\rho=1$ per aree con materiale e $\rho=0$ per aree vuote.

Solitamente l'algoritmo è finalizzato al massimizzare la rigidezza del componente richiede gli stessi input dell'ottimizzazione topologica SIMP a differenza che in questo caso non troveremo più un fattore di penalizzazione P ma un tasso di evoluzione ER. Il tasso di evoluzione è la percentuale di volume che l'algoritmo può cambiare ad ogni iterazione.

In ogni iterazione il dominio spaziale viene discretizzato e viene eseguita un'analisi agli elementi finiti. Il dominio iniziale può essere interamente o parzialmente pieno. Quando viene usato il dominio parzialmente pieno, il materiale viene concentrato in particolari regioni del dominio totale.

Dopo la fase di discretizzazione, viene eseguita un'analisi agli elementi finiti e successivamente un'analisi di sensitività. Lo studio della sensitività avviene in modo molto diverso rispetto all'algoritmo SIMP. In questo caso la sensitività di ogni elemento viene filtrata attraverso la distribuzione di questa sui nodi con cui l'elemento è connesso ad altri elementi tramite l'equazione:

$$\eta_b = \frac{\sum_{a=1}^s V_a \lambda_a}{\sum_{a=1}^s V_a}$$

La sensitività del nodo b, η_b , è calcolata utilizzando tutti gli elementi a connessi a questo nodo e facendo una media pesata di tutte le sensitività λ_a , dove V_a è il

volume del generico elemento a. Le sensitività degli elementi sono poi ricalcolate trovando i nodi la cui distanza dal centro di un l'elemento a, è minore o uguale al raggio di filtraggio. I valori di sensitività di questi nodi sono mediati per ottenere valori di sensitività degli elementi tramite l'equazione:

$$\lambda_a = \frac{\sum_{b=1}^s v(d_{ab}) \eta_b^c}{\sum_{b=1}^s v(d_{ab})}$$

Dove $v(d_{ab})$ equivale alla differenza tra raggio di filtraggio e d_{ab} , d_{ab} equivale alla distanza tra il centro dell'elemento a e il nodo b. Il problema di utilizzare tale metodo matematico per eliminare gli effetti a scacchiera del componente potrebbe portare una perdita di dettagli geometrici.

La frazione di volume del dominio di progettazione viene verificata rispetto alla frazione di volume target, se non fossero uguali, è un nuovo volume target viene ridefinito ad ogni ciclo tramite l'equazione:

$$V_{m+1} = V_m(1 + ER)$$

Dove V_m è il volume del m-esimo ciclo.

I valori di sensitività degli elementi possono quindi essere classificati. Elementi solidi che hanno valori di sensitività inferiori rispetto a un fissato valore vengono riclassificati come elementi senza proprietà. Gli elementi vuoti sono modellati moltiplicando la matrice di rigidità elementale dell'elemento per interessato per $1e-12$. Questo viene fatto per ridurre il loro contributo di rigidità prima che la loro matrice di rigidezza venga assemblata alla matrice di rigidezza globale. Riducendo la rigidità strutturale in questo modo ci si avvicina in modo "morbido" alla topologia ottimizzata. Il numero di elementi vuoti riclassificati come solidi porta l'attuale volume di solido dell'iterazione m al valore V_{m+1} . Il ciclo viene ripetuto fin quando la variazione di energia di deformazione scende al di sotto di uno specifico valore e il volume scende sotto la soglia preimpostata. La variazione di energia di deformazione può essere determinata tramite l'equazione:

$$\Delta SE = \frac{|\sum_{i=1}^T (SE_{m-i+1} - SE_{m-T-i+1})|}{\sum_{i=1}^T SE_{m-i+1}}$$

Va specificato che la discretizzazione del dominio rimane costante dall'inizio alla fine del calcolo di ottimizzazione topologica.

Valutiamo ora l'esempio fatto in precedenza con il metodo SIMP per la trave incastrata con carico in punta e studiamo le topologie ottenute con l'algoritmo BESO.

Le condizioni di input del processo saranno le medesime.

I risultati al variare dei parametri saranno i seguenti:

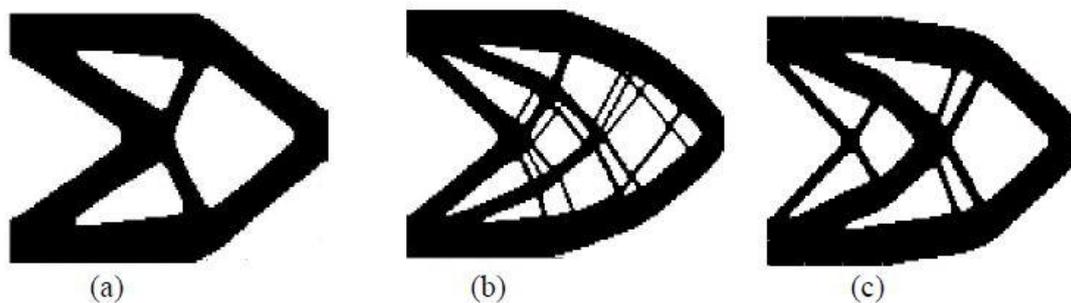


Figura 36. Risultati algoritmo BESO

I parametri dei risultati sono:

- (a) $FR=3\text{mm}$, $SE=1.87\text{Nmm}$, $ER=10\%$, dominio iniziale solido
- (b) $FR=1\text{mm}$, $SE=1.84\text{Nmm}$, $ER=0.5\%$, dominio iniziale solido
- (c) $FR=3\text{mm}$, $SE=1.82\text{Nmm}$, $ER=1\%$, dominio iniziale casuale

La figura mostra le topologie SIMP per diversi input di partenza e parametri. Riducendo i valori del tasso di evoluzione e del raggio di filtraggio, come accade partendo dal caso a fino a quello b, si nota che la quantità di strutture di piccola entità aumenta considerevolmente. Si può notare tramite il caso c che lasciando libero il dominio iniziale l'algoritmo riesce a raggiungere livelli di rigidità superiori. In questa tipologia ottimizzazione topologica è di fondamentale importanza il corretto settaggio dei parametri di input.

3.5.1.3. Sviluppi dell'ottimizzazione topologica

Un'altra sfida che si pone l'ottimizzazione topologica è la producibilità della geometria appena creata per un determinato processo produttivo. Anche se alcuni dei software forniscono funzioni specifiche per realizzare vincoli di producibilità come la sezione

trasversale costante per le funzioni di estrusione o il controllo dei sottosquadri per i processi di colata, per i sistemi di produzione additiva non esistono attualmente implementazioni. Per esempio, potrebbero essere create geometrie ottimizzate topologicamente che riescono a svolgere la loro funzione ma contiene dettagli con dimensioni molto ridotte che non sono realizzabili con processi metal powder bed fusion viste magari le sezioni trasversali drasticamente ridotte o sezioni con grande gradiente dimensionale che potenzialmente potrebbero causare concentrazione di stress termici durante il processo di fabbricazione. Anche se alcuni software offrono ulteriori vincoli sulla dimensione minima, i problemi di producibilità causati dalla mancanza di definizione della forma finale complessiva non possono essere trascurati. Inoltre, la maggior parte dei software di ottimizzazione topologica non prevedono ancora la gestione di materiali anisotropi e materiali con proprietà dipendenti dalla geometria. Ancora una volta tale problema potrebbe essere parzialmente superato introducendo il design cellulare nelle strutture già ottimizzate topologicamente, introducendo un certo livello di definizione geometrica che aiuta a prevedere la producibilità.

Attualmente i metodi di ottimizzazione della topologia sono più comunemente usati per fornire un riferimento per l'ottimizzazione strutturale. Come mostrato in figura, l'ottimizzazione parte da un dominio già definito in modo che vengano mantenuti i contatti per accoppiamento con altre parti chiamate aree funzionali.

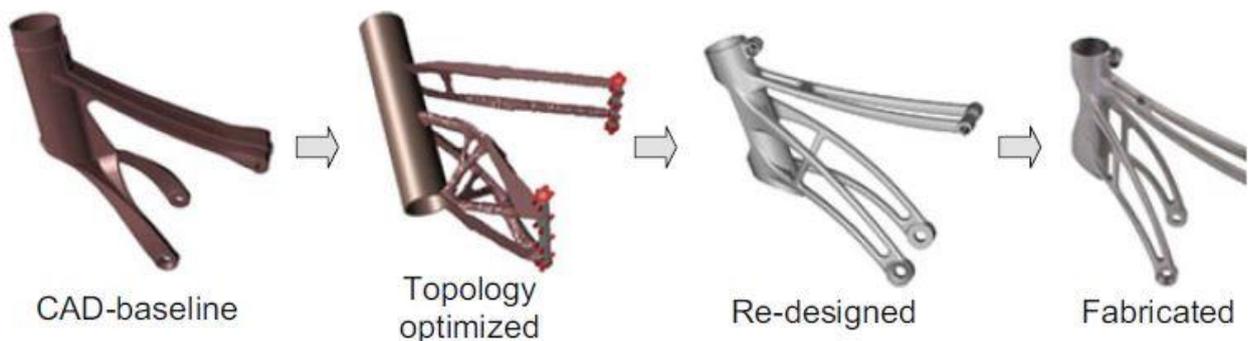


Figura 37. Processo ottimizzazione topologica

Dopo di che l'algoritmo crea un design ottimizzato topologicamente non producibile. I progettisti utilizzeranno poi queste geometrie per determinare un design che sia allo stesso tempo, leggero, funzionale e soprattutto producibile. Questo approccio è molto

utile ai progetti per migliorare le prestazioni di un componente, ma impone anche vincoli significativi poiché la riprogettazione utilizzando questi riferimenti è spesso una pratica complicata e onerosa dal punto di vista del tempo di realizzazione. Il lato positivo però, potrebbe essere, visto rapido sviluppo dei software, che tale pratica di “traduzione” manuale presto possa essere automatizzata in modo da facilitare il più possibile i progettisti lasciandogli comunque un buon grado di libertà nel loro operato.

3.5.2. Strutture cellulari

Le strutture cellulari sono un’opzione attrattiva per la progettazione di diverse applicazioni, in particolare strutture leggere visto la loro alta rigidità e resistenza specifica fornite dalla particolare conformazione porosa. Il comportamento che queste strutture presentano alla deformazione rendono queste idonee ad applicazioni di assorbimento di energia per deformazione.

Esistono vari tipi di strutture cellulari producibili e diversi metodi per fabbricarle.

Ad esempio, schiume metalliche utilizzate per applicazioni ad assorbimento di energia vengono realizzate iniettando gas o agenti schiumogeni in un bagno fuso. Mentre le schiume metalliche sono relativamente economiche da produrre e consistono in una distribuzione casuale di porosità piuttosto che una disposizione cellulare ben definita. Questa dispersione di cavità porta a proprietà meccaniche inconsistenti che sono indesiderate per componenti funzionali.

Le strutture reticolari sono un’altra evoluzione dei materiali cellulari e si differenziano dalle schiume per la ripetizione regolare di strutture contenute nelle celle elementari.

Queste celle elementari possono essere analizzate come normali strutture usando la meccanica classica, una struttura reticolare dovrebbe essere considerata come un materiale, quindi con le sue rispettive proprietà meccaniche, e quindi consentire un facile confronto con il materiale di cui è costituita pieno e altre strutture reticolari dello stesso materiale.

Le strutture reticolari possono avere una morfologia sviluppata in 2.5D, ossia una geometria creata su un piano ed estrusa, o 3D e possono essere fabbricate con una varietà di processi produttivi. Tuttavia, lo sviluppo delle tecniche produttive additive

ha focalizzato la sua attenzione anche sulla ricerca della fabbricazione di strutture reticolari per questa tecnologia. In particolare, ci si è concentrati sulla realizzazione di reticoli metallici prodotte con tecniche selective laser melting vista la capacità di produrre geometrie molto complesse e con un alto grado di dettaglio.

Esistono vari modi per classificare le strutture reticolari, possono generalmente essere classificate in base al loro comportamento sotto carichi come strutture resistenti a carichi assiali o quelle resistenti a momenti flettenti. Distinguiamo tre diverse categorie di tipologie di strutture reticolari: reticoli di supporto, reticoli a superficie minima periodica e reticoli shell.

I reticoli di supporto sono le topologie cellulari più comuni e presentano morfologie tipiche dei reticoli cristallini come il cubo corpo centrato (CCC) e il cubo facce centrate (CFC), o variazioni di questi. Esistono anche altre tipologie di strutture a base di montanti, come il traliccio, l'octet-truss e il diamante.

Queste tipologie di strutture sono spesso scelte per la loro semplicità di progettazione, ma questa geometria basata su montanti è stata generata tramite ottimizzazione topologica per massimizzare l'efficienza della distribuzione del materiale all'interno della struttura reticolare e abbracciare pienamente le opportunità presentate dai sistemi additivi. In figura alcuni esempi di strutture reticolari elementari.

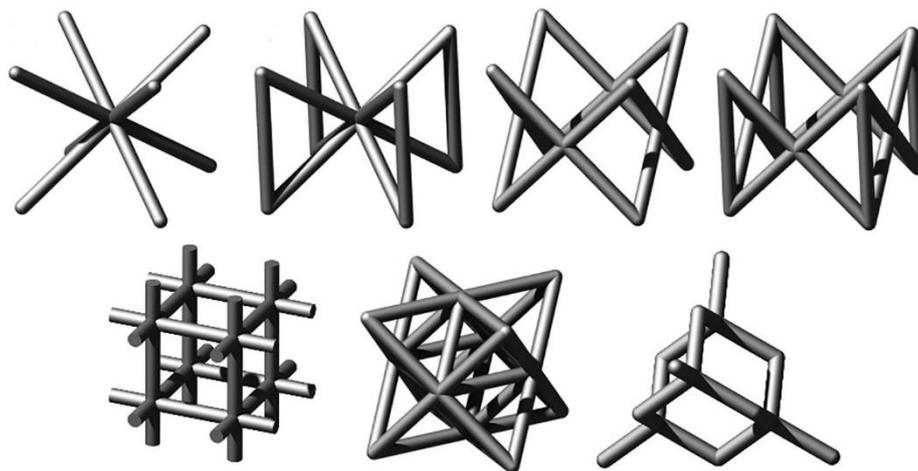


Figura 38. Strutture reticolari di supporto

I reticoli di supporto possono essere caratterizzati tramite un valore detto numero di Maxwell calcolabile secondo l'equazione:

$$M = s - 3n + 6$$

Dove s è il numero di aste e n è il numero di nodi che connettono due aste o un'asta con il bordo del reticolo.

Se M è minore di zero la struttura elementare avrà troppe aste che equilibreranno le forze esterne senza equilibrare i momenti indotti nei nodi causando momenti flettenti sulle travi e rendendo le sollecitazioni flettenti le più importanti al momento del dimensionamento. D'altra parte, se M è maggiore o uguale a zero le forze esterne saranno equilibrate da tensioni assiali senza incorrere in momenti flettenti in prossimità dei nodi. Visto questo fenomeno le strutture più utilizzate sono quelle che reagiscono a carichi assiali, inoltre le strutture a carattere flettente presentano una densità di materiale maggiore e deformazioni. D'altro canto, le strutture a carattere assiale avranno deformazioni meno coerenti.

Le strutture cellulari con celle basate su reticoli a superficie minima periodica come le superfici di Schöenflies (a), il diamante di Schwarz (b) e superfici di Neovius vengono generate usando formule matematiche che definiscono superfici per dividere aree con materiale da aree vuote: Queste superfici possono essere create cambiando i parametri nella formulazione matematica per far variare la densità relativa o modificare le proprietà meccaniche della cella elementare.

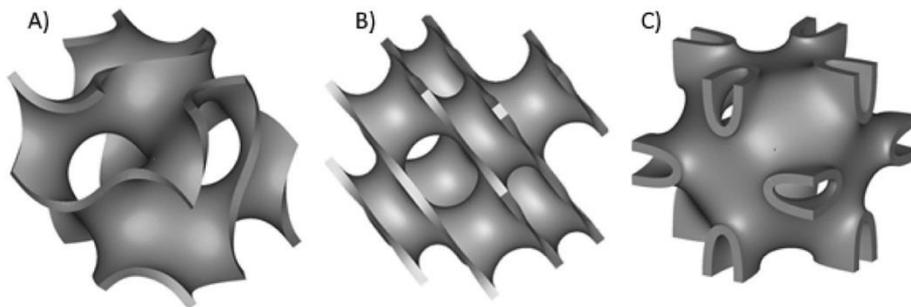


Figura 39. Strutture reticolari a superficie minima periodica

Queste tipologie di struttura hanno dei vantaggi rispetto ai reticoli di supporto in termini di producibilità. Ad esempio, le tecniche SLM sono vincolate per quanto riguarda gli angoli di inclinazione delle superfici. Con questa tipologia di reticolo si possono controllare tramite la generazione matematica le inclinazioni di superfici per rendere il processo di produzione più semplice. Inoltre, questo tipo di struttura riesce ad assorbire un'energia di deformazione tre volte superiore ai reticoli di supporto.

L'ultima tipologia di struttura sono i reticoli shell. Questa struttura è composta da superfici come le celle basate su reticoli a superficie minima periodica ma possono avere superfici a curvatura nulla.

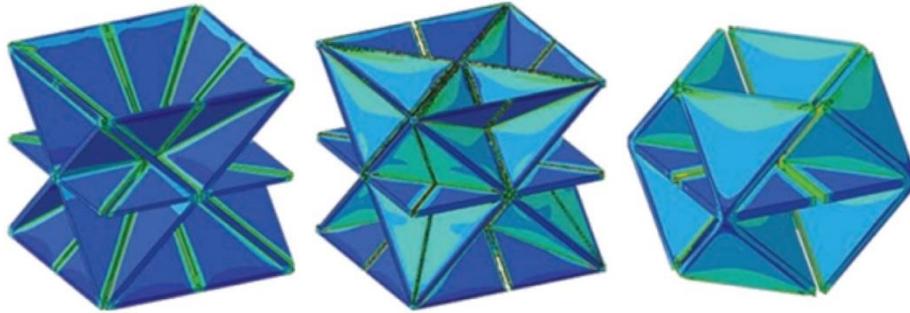


Figura 40. Strutture reticolari shell

Rispetto alle strutture con celle di supporto questi reticoli shell hanno dimostrato di avere proprietà elastiche superiori a parità di densità e caratteristiche meccaniche paragonabili. Purtroppo, questa geometria rimane un problema per i sistemi a fusione del letto di polvere in quanto inglobano polvere senza la possibilità di una facile rimozione. Nonostante questo, sono state progettati dei reticoli shell con delle aperture per lo scarico del materiale non processata che hanno dimostrato di avere ottime caratteristiche meccaniche anche con basse densità.

I processi additive come il processo selective laser melting sono sicuramente i più indicati per realizzare queste geometrie, ma presentano comunque dei limiti. La minima dimensione del dettaglio è limitata dalla dimensione del fuoco del laser, le microstrutture e i difetti indotti dal processo sono poco prevedibili e possono verificarsi distorsioni dovute al rapido raffreddamento visto l'alto rapporto superficie volume delle strutture reticolari. Un ulteriore limite, come già detto nei reticoli shell, è l'obbligo di avere vie di fughe per le polveri non processate nella geometria.

Rimane comunque il problema che non esiste una caratterizzazione ufficiale per queste strutture per materiali processabili dalla tecnologia SLM.

Nonostante ciò, i rapidi progressi hanno portato alla luce una interessante gamma di applicazioni per le strutture cellulari tra cui dispositivi di protezione individuale, attrezzature sportive e nell'ambito biomedico e aerospaziale.

In campo medico le strutture cellulari con celle basate su reticoli a superficie minima periodica sono utilizzate nelle protesi. Infatti, le matrici per la compatibilità biologica

che si fissano alla parte ossea del paziente sono favorite nell'accrescimento da strutture con ampie cavità interne.

Nell'industria aerospaziale invece queste strutture sono utilizzate come rimpiazzo per i volumi interni per abbattere il peso della parte e cercare di mantenere simili le caratteristiche meccaniche per quanto possibile. Altre applicazioni dell'aerospaziale vedono l'utilizzo di queste per migliorare le capacità di raffreddamento visto l'alto rapporto superficie volume o le capacità di isolamento.

Molto importanti sono quindi le proprietà meccaniche che un componente costruito con strutture reticolari riesce a raggiungere in confronto a un componente costruito con lo stesso materiale ma pieno.

Quando parliamo di proprietà meccaniche di una struttura reticolare non parliamo delle proprietà che presenta il materiale di cui è costituita ma delle proprietà che presenta la cella elementare. Grazie alla libertà geometrica, infatti, le strutture reticolari possono avere caratteristiche uniche come ad esempio avere coefficienti di Poisson negativi, coefficienti di espansione termica negativi e rigidzze elevatissime rispetto alla massa. Per questo motivo, i recenti sviluppi hanno permesso di unire l'ottimizzazione topologica con le strutture cellulari, in modo da avere aree a densità e caratteristiche meccaniche differenziate, come si possono trovare nei risultati di un algoritmo SIMP. Solitamente le proprietà dei reticoli vengono espresse come frazione della corrispettiva proprietà del materiale pieno e sono elaborate in funzione della densità della cella.

Inoltre, l'orientamento delle strutture della cella rispetto al corpo del componente è di fondamentale importanza per avere determinate caratteristiche.

Per semplicità i test sulle strutture cellulari prodotti con tecnologia SLM sono test di compressione perché con facilità si riescono a vincolare le celle elementari tra due piani.

Le prove di compressione vengono utilizzate anche per fare prove di rottura a fatica. Le strutture cellulari, in particolare quelle prodotte con tecnologie Selective Laser Melting, sono molto suscettibili alle rotture per fatica. Questo fenomeno è dovuto alla grande irregolarità geometrica delle celle elementari che portano a punti di

concentrazioni delle tensioni e alla rugosità delle superfici che portano a vari punti di innesco della cricca. La rottura per fatica di una cella elementare dipende da svariati parametri: parametri del processo di realizzazione, conformazione topologica, caratteristiche del materiale con cui sono costituite, densità relativa della cella e altre. Per questo motivo la caratterizzazione di queste strutture è tutt'oggi un campo aperto di ricerca. Comunque sia una struttura reticolare avrà un numero di cicli di rottura a fatica inferiore rispetto a qualsiasi altro componente costruito con materiale "pieno".

3.6. Linee guida generali per geometrie di processi L-PBF

Come già detto, le tecnologie additive offrono una libertà di progettazione ineguagliabile se confrontate con i tradizionali metodi produttivi. Nonostante ciò rimane un processo che per raggiungere risultati ottimali deve seguire determinate regole. Per questo il progettista in fase di realizzazione deve tener conto dei seguenti vincoli:

- Spessore della parete

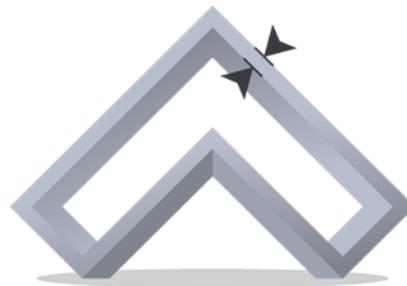


Figura 41. Vincolo spessore di parete

Nella produzione additiva, lo spessore della parete si riferisce alla distanza tra una superficie e la superficie opposta di un modello. In base ad ogni tipo di materiale le case produttrici di polveri e macchine consigliano una minima distanza. Lo spessore minimo utilizzabile per le pareti può variare in base ad altri fattori, come la geometria e le dimensioni della parte. Non esiste un limite massimo di spessore per la parete ma va tenuto conto che le aree con spessori maggiori presentano stress termici superiori.

- Dimensione dei dettagli



Figura 42. Vincolo dimensione dei dettagli

Dettagli molto piccoli sono realizzabili con processi powder bed fusion. Le dimensioni dei dettagli si riferiscono alla distanza tra la superficie del modello e la superficie del dettaglio come ad esempio scritte in rilievo o incise. Inoltre, dettagli geometrici definiti sul piano XY della macchina non devono avere dimensioni inferiori allo spot del laser.

- Inclinazione delle superfici in sottosquadro

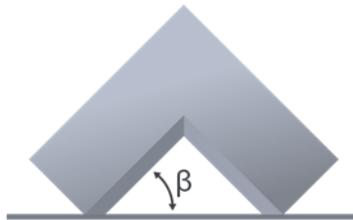


Figura 43. Vincolo inclinazione superfici in sottosquadro

La direzione di costruzione di una parte ha un grande impatto sulla qualità della superficie in quanto definisce l'orientamento delle superfici della parte rispetto al piano orizzontale o alla piastra di costruzione. Gli angoli (β) rispetto alla piattaforma di costruzione vanno tenuti sotto controllo in quanto al crescere di questi le qualità delle superfici interessate a peggiorare o addirittura necessiteranno di supporti. L'adesione dei supporti alla parte andrà a creare delle marcature sulla parte creando dei difetti che possono essere rimossi soltanto con lavorazioni in post-produzione andando ad aumentare il costo della parte.

- Zone di concentrazione degli stress termici



Figura 44. Vincolo zone concentrazione stress termici

Utilizzando tecniche selettive laser melting, la fusione della polvere a livello di strato e la sua ri-solidificazione portano a sollecitazioni residue indotte termicamente. Una geometria non accurata può portare a deformazioni nella parte, queste deformazioni potrebbero creare cricche nel componente finito o addirittura interrompere il processo di stampa. È quindi essenziale prevedere questi fenomeni in fase di progettazione. È sempre consigliato raccordare o smussare i bordi anche per evitare spigoli vivi per questioni di sicurezza. Inoltre, bisogna cercare di limitare zone con grandi quantità di materiale perché potrebbero creare problemi visto il grande accumulo di calore che si formerebbe per realizzarle durante il processo.

- Accuratezza dimensionale



Figura 45. Vincolo accuratezza dimensionale

Per componenti prodotti tramite additive manufacturing va previsto da progetto che le accuratezze dimensionali non possono essere rispettate come su tecnologie convenzionali.

Per questo è importante che il progettista prevedere delle lavorazioni post trattamento laddove la parte debba essere accoppiata con altri componenti e quindi se ce ne fosse la necessità anche dei sovrametalli. Importantissimo prevedere dei punti di staffeggio se la parte verrà lavorata in una macchina utensile.

- Rimozione delle polveri



Figura 46. Vincolo rimozione delle polveri

Quando si realizza un modello cavo, è importante prevedere opportuni fori nel disegno in modo da poter rimuovere la polvere non utilizzata intrappolata all'interno della cavità. Le cavità più grandi e complesse richiedono fori multipli con diametri maggiori. Vanno evitate anche particolari geometrie all'interno delle cavità per evitare che la polvere rimanga intrappolata all'interno anche con la presenza di fori per lo scarico.

- Dimensioni dei fori

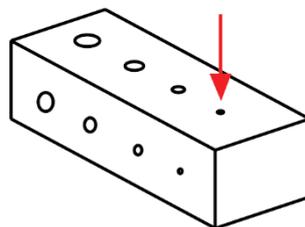


Figura 47. Vincolo dimensioni dei fori

Fori con determinati diametri, diametri inferiori a 10mm a differenza del tipo di metallo, possono essere creati senza la necessità di avere dei supporti. Invece, per quanto riguarda i fori con asse verticale, non possono essere fabbricati fori con

dimensioni troppo piccole, per le medesime considerazioni fatte sulle dimensioni dei dettagli.

- Dimensioni dei bordi non supportati

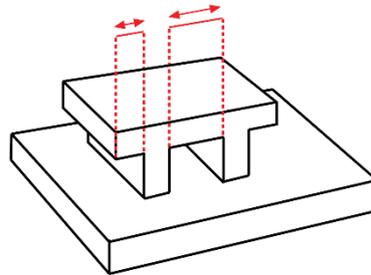


Figura 48. Vincolo dimensione dei bordi non supportati

Nonostante le superfici in sottosquadro e con angoli molto grandi rispetto alla piattaforma di stampa creino superfici di bassa qualità o con necessità di supporti è concessa la realizzazione di design che prevedano sbalzi inferiori al millimetro senza avere problemi sulla fattibilità di stampa. Superficie orizzontale sporgenti ma supportata su entrambe le estremità può essere più tollerate. Queste regole si applicheranno anche agli elementi in rilievo e incisi con superfici non supportate.

- Rapporti dimensionali

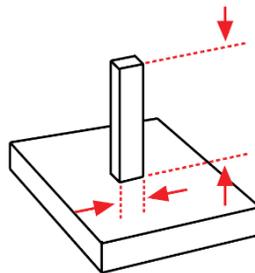


Figura 49. Vincolo rapporti dimensionali

È importante tenere sotto controllo il rapporto dimensione tra altezza (direzione Z) e la sezione in quanto geometrie troppo snelle andrebbero a deformarsi sia per gli stress termici, sia per il passaggio del recoater quando avviene la distribuzione di un ulteriore layer di polvere. Inoltre, geometrie molto sviluppate nella direzione di

stampa aumentano i costi del processo, il tempo di fabbricazione e il rischio di fallimento della costruzione.

3.7. Progettazione delle strutture di supporto

Le strutture di supporto sono parte integrante del ciclo di progettazione per additive manufacturing e il loro studio non è un compito banale. Da un lato, la struttura di supporto è necessaria per la realizzazione di molte parti e, dall'altro, la struttura di supporto è generalmente indesiderata. La fabbricazione della struttura di supporto causa perdite di tempo e di materiali e la rimozione delle strutture di supporto non richiede solo processi aggiuntivi, ma pone anche ulteriori vincoli di progettazione alle parti. In base al processo di produzione additiva i supporti assumono diverse funzioni. Per i processi Powder Bed Fusion, lo scopo principale della struttura di supporto è contrastare le sollecitazioni termiche residue generate durante i cicli di fusione e solidificazione e per lo smaltimento del calore.

Vari software di preparazione alla stampa per additive manufacturing supportano la generazione automatica di queste strutture. Questa generazione automatica si basa sulle geometrie della parte e nella quasi totalità dei casi vanno modificati parametri e posizionamento dei supporti. Gli algoritmi per la generazione della struttura di supporto automatica calcolano l'angolo di inclinazione delle superfici discrete di un file STL per capire se la zona necessita di supporto o meno. Per alcune geometrie speciali, anche se le superfici possiedono un ampio angolo di inclinazione e aree sporgenti lo sbalzo può essere adeguatamente auto supportato. Per questa ragione i software necessitano ancora di supervisione e di correzioni manuali. Vari tipi di geometrie di supporto sono disponibili in base alle più svariate esigenze. Inoltre, il contatto tra le strutture di supporto e le parti può avvenire tramite punti, linee o aree a seconda della forza contatto richiesta. Il contatto tramite punti fornisce la forza di attacco più debole, ma è anche la più facile da rimuovere in fasi post-processo ed è quella che lascia meno tracce di presenza del supporto. D'altra parte, se il materiale metallico fosse particolarmente suscettibile agli stress termici contatti molto ridotti potrebbero generare un distaccamento della parte dai supporti con consecutivo

fallimento del processo di produzione. La rimozione del supporto può essere facilitata applicando materiali diversi per strutture di supporto che possono essere facilmente rimosse attraverso mezzi meccanici, fisici o chimici come riscaldamento o dissoluzione. Per i processi che fabbricano parti e strutture di supporto utilizzando gli stessi materiali, come tutti i processi Powder Bed Fusion, questa soluzione non può essere utilizzata.

Allo stato dell'arte è disponibile un insieme di parametri limitato per la progettazione dettagliata di questi supporti, come la spaziatura del supporto e l'area di contatto, e i processi di progettazione sono ancora in gran parte basati sulle esperienze personali dei progettisti.

In molti casi, al fine di garantire il successo della fabbricazione, le strutture di supporto sono spesso sovra-progettate, il che spesso impone sfide significative per la rimozione del supporto e trasforma questo processo in un lavoro manuale per degli operatori, andando ad aumentare i costi e riducendo la produttività oraria.

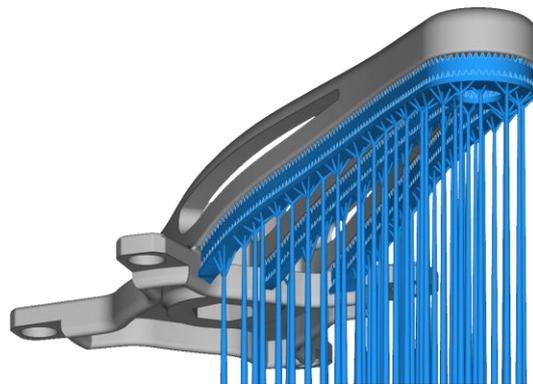


Figura 50. Esempio strutture di supporto

In base alla parte da costruire, è spesso possibile ridurre la quantità di supporti tramite la regolazione dell'orientamento. Tuttavia, gli orientamenti che comportano una quantità minima di supporto spesso comportano anche tempi di fabbricazione molto lunghi, poiché in questi casi le dimensioni maggiori delle parti sono più o meno allineate alla direzione di costruzione. Un altro fattore da considerare durante la determinazione dell'orientamento della parte è la facilità di rimozione del supporto. Poiché la rimozione del supporto spesso danneggia la superficie, le superfici critiche con requisiti di integrità e finitura superficiale dovrebbero evitare le strutture di

supporto. Inoltre, il supporto dovrebbe essere evitato per caratteristiche come superfici con gioco ridotto, canali interni non lavorabili e superfici visivamente ostruite.

Un'altra tendenza è quella di creare strutture di supporto simili ad alberi con l'obiettivo di ridurre al minimo l'uso del materiale e massimizzare la rimovibilità del supporto. Sebbene questa tecnica non tenga conto degli stress termici residui e quindi non sia ancora applicabile ai processi di Powder Bed Fusion, il concetto può essere ulteriormente sviluppato con algoritmi più sofisticati che tengano conto anche di questa problematica.

3.8. Re-Design for Additive Manufacturing

Con l'avvento delle nuove tecnologie additive per metallo molte componenti funzionali che erano state da prima progettate per essere prodotte tramite tecnologie tradizionali e quindi dovendo rispettare oltre ai vincoli di funzionalità, quelli del processo, sono state riprogettate per la sola funzionalità aumentandone esponenzialmente le prestazioni o l'economicità.

Possono esistere due classi di riprogettazione per additive manufacturing, la riprogettazione guidata dal processo o quella guidata dal design.

Queste riprogettazioni portano per il cliente un valore aggiunto al prodotto originale aumentandone le prestazioni. Con i metodi già citati, come l'ottimizzazione topologica, conoscendo carichi e vincoli di strutture si riesce ad efficientare la parte.

Di rado, i componenti possono essere anche economicizzati con la creazione di parti che integrano insieme oppure parti cave al loro interno con la presenza di reticoli.

Nonostante i vantaggi, i costi e i benefici di una nuova ingegnerizzazione vanno ben valutati in quanto i vantaggi di una parte non potrebbero coprire i costi ed inoltre le parti prodotte con tecnologie additive sono già in partenza molto costose.

4. Caso studio

Come spiegato nel primo capitolo, in questo elaborato si riporta il ciclo di riprogettazione di una pinza freno per applicazione Motorsport al fine di migliorarne le caratteristiche meccaniche alle temperature di esercizio vista la natura del materiale di cui è costituito e aumentare le prestazioni di questo componente dal punto di vista del peso. Inoltre, verranno valutate le potenzialità delle teorie di design for additive manufacturing e la capacità che hanno queste nel conseguire la realizzazione di un componente finale senza penalizzare la libertà geometrica del progettista. In questo lavoro si utilizzerà la suite 3D Experience che al suo interno offre sia una parte di calcolo per ottimizzazione topologica e modellazione flessibile CAD, che la parte più “tradizionale” di modellazione parametrica CAD e calcolo agli elementi finiti.

4.1. Work-flow

Molto importante è il ciclo di lavoro seguito. Nel grafico sottostante saranno riportati i flussi di informazioni. Il primo step prevede l’analisi del modello CAD e la redazione dei target del progetto. Successivamente viene modellato un design space molto semplificato che andrà a costituire il dominio di calcolo nell’ottimizzazione topologica. L’ottimizzazione della geometria richiederà la definizione di carichi e vincoli e ci saranno varie iterazioni per ottenere risultati geometrici accettabili.

Una volta raggiunte geometrie accettabili si passa alla modellazione CAD del componente. Ancora una volta ci sarà un susseguirsi di analisi statiche e modellazioni in modo da ottenere una geometria che rispetti i target e abbia tutte le funzionalità richieste. Ottenuta una geometria valida si eseguirà l’ingegnerizzazione del pezzo con la modellazione del grezzo di stampa e l’ingegnerizzazione AM.

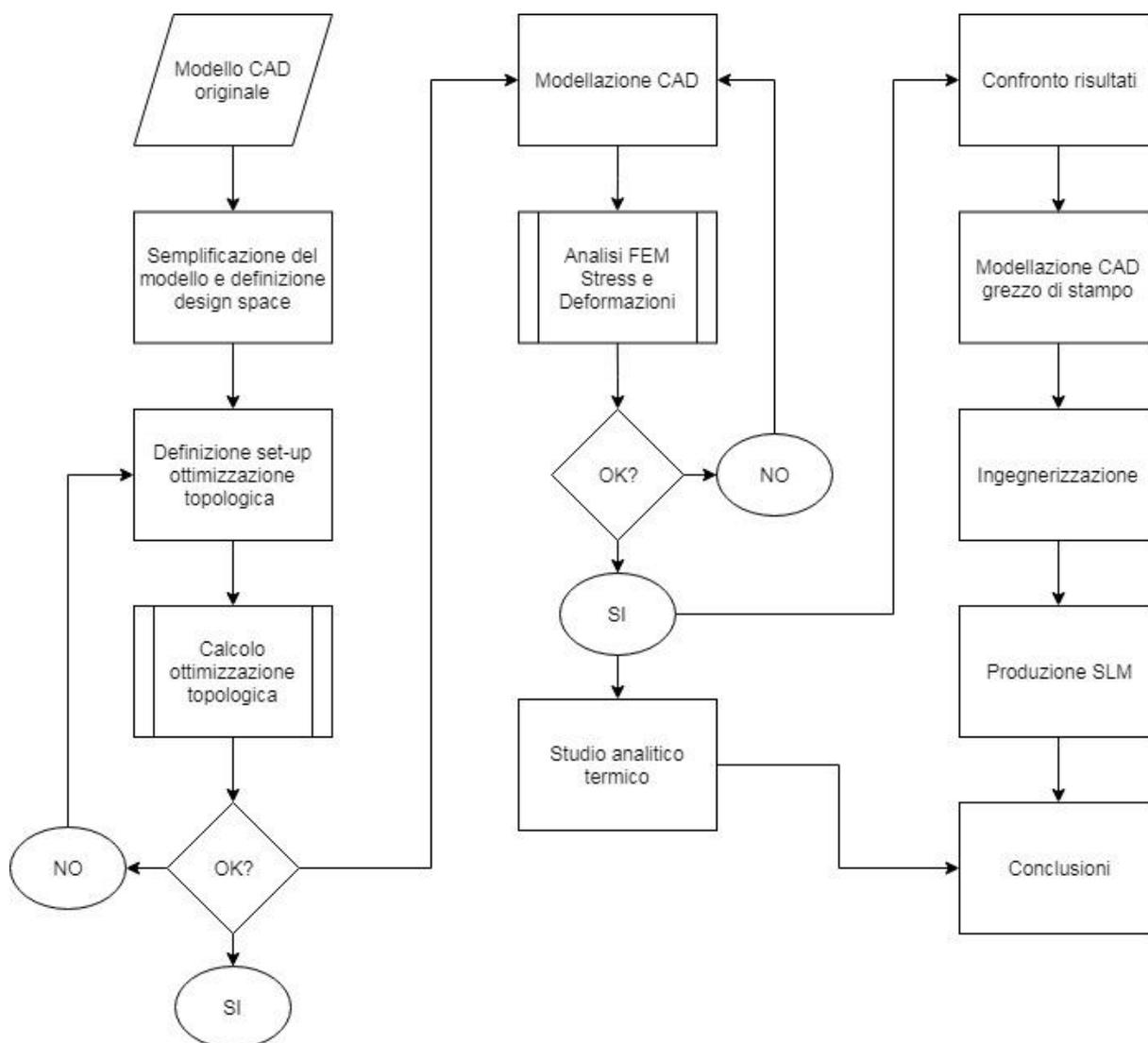


Figura 51. Work-flow

Come si nota dal grafico, una volta validato un design che rispetta i vincoli di processo, avviene una biforcazione in quanto nello studio verrà eseguita un'analisi termica analitica visto che le soluzioni adottate potrebbero andare a peggiorare le condizioni attuali di scambio termico. Questa analisi sarà puramente indicativa e verrà menzionata solo come conclusione e non farà parte dell'iter di progettazione del componente.

4.2. Carichi

La pinza freno è soggetta sia a carichi di natura meccanica sia termica. I carichi meccanici sono stati forniti e questi sono derivati dalla dinamica del veicolo e da sensori montati in vettura. I principali carichi sono la forza tangenziale che si genera

tra disco e pastiglie e che di conseguenza viene a generarsi come forza di reazione sul corpo pinza e la pressione del circuito idraulico che creerà una forza di reazione che deformerà la pinza in direzione assiale dei pistoncini.

I dati dinamici della vettura sono:

- Decelerazione massima 17 m/s^2 (primi istanti di frenata)
- Ripartizione frenata 70% anteriore, 30% posteriore
- Coefficiente di attrito dello pneumatico 1.5.
- Condizione estrema per il ribaltamento: forza verticale 1800N, forza longitudinale 2700N applicate al centro della ruota e non al punto di contatto con il suolo.

Il circuito oleodinamico in condizioni di massima pressione raggiunge la pressione di 100 Bar e la forza tangenziale massima è di 14 KN. Questi valori saranno utilizzati come input per le ottimizzazioni topologiche e come dati per lo studio agli elementi finiti per la validazione.

Un altro carico che non si può tenere fuori considerazione è quello termico. Dalla componentistica a bordo vettura, come sensori termici a infrarosso, è stata rilevata la temperatura di esercizio e le temperature critiche in casi estremi. In questo studio verrà considerata la temperatura di esercizio di $220 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.3. Scelta dei materiali

Come già discusso nei capitoli precedenti l'additive manufacturing permette l'utilizzo di una gamma di materiali limitata e questo porta a vincolare il numero di applicazioni della tecnologia. Fortunatamente, grazie alla possibilità di lavorare metalli che vanno dall'alluminio alle leghe cromo-nickel e alla possibilità di poter effettuare trattamenti termici che permettono una minima regolazione delle caratteristiche meccaniche dei metalli è possibile trovare soluzioni ai più disparati problemi.

Nel nostro caso il problema nasce dalle caratteristiche termo strutturali della lega d'alluminio di cui è composta la pinza freno di serie. Si tratta di una lega d'alluminio Ergal trattata con invecchiamento artificiale 7075-t6. Questo metallo presenta ottime caratteristiche meccaniche e dei rapporti proprietà meccaniche peso eccellenti. Il

problema di questa lega, anche in confronto ad altre leghe di alluminio, è la drastica decadenza di caratteristiche meccaniche che presenta a relativamente alte temperature.

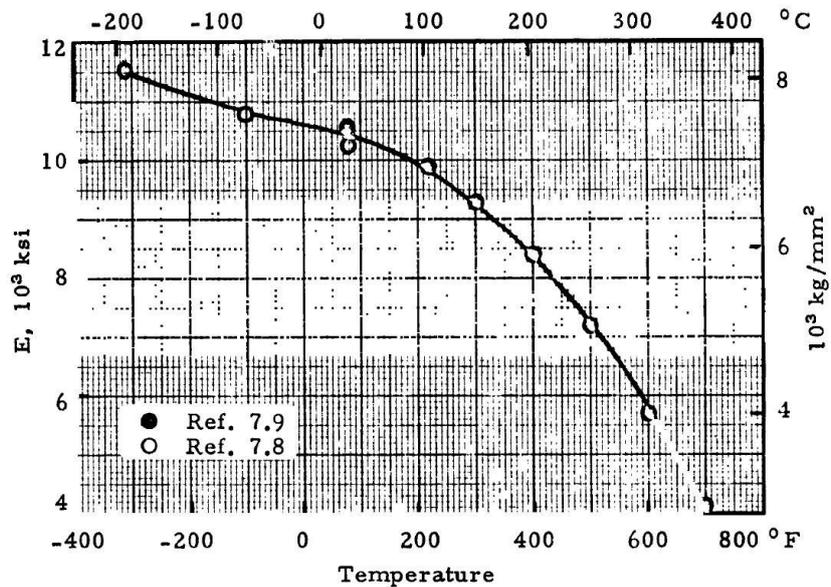


Figura 52. Andamento modulo di Young in funzione della temperatura lega 7075-t6

Come si nota nel grafico qui sotto le leghe di titanio si offrono come ottimi sostituti alle leghe di alluminio:

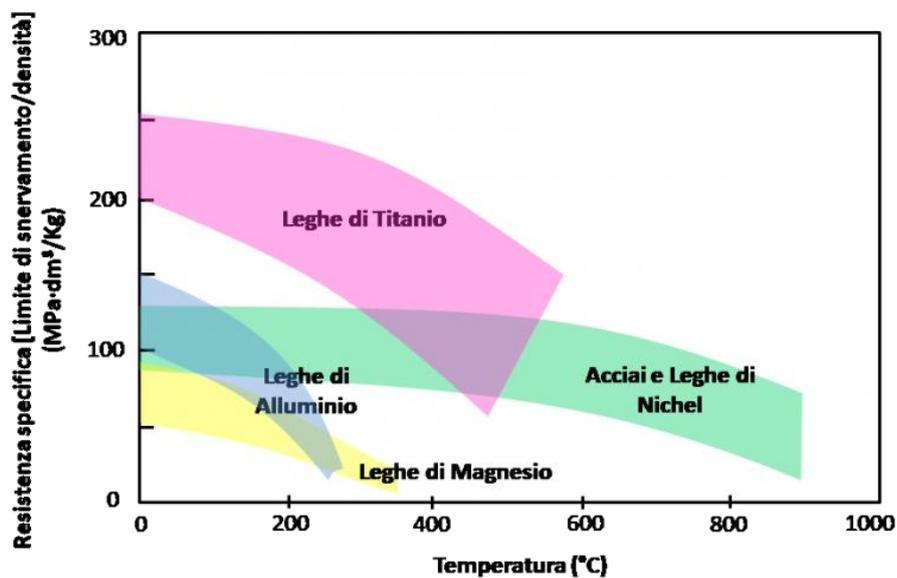


Figura 53. Resistenza specifica in funzione della temperatura

Si vede, infatti, che il rapporto tra il limite di snervamento a fatica e la massa delle leghe di titanio rimane più costante al variare della temperatura rispetto alle leghe di alluminio.

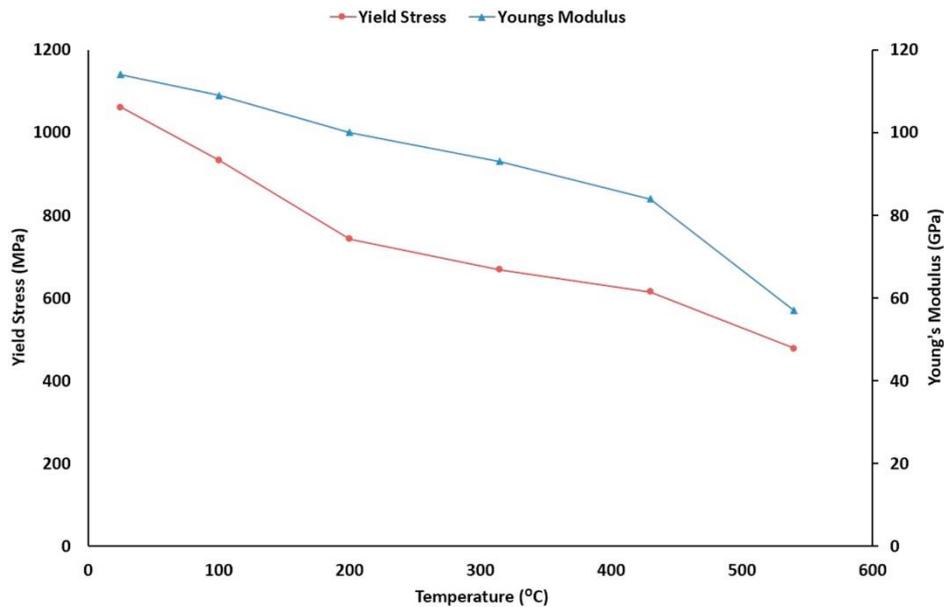


Figura 54. Andamento modulo di Young in funzione della temperatura lega Ti6Al4V

Fortunatamente la tecnologia Selective Laser Melting offre la possibilità di utilizzare leghe di titanio, una delle quali è la lega Ti6Al4V. Un altro materiale che va preso in considerazione è l'acciaio inossidabile 317L che grazie alla sua elevata diffusione è un materiale ampiamente conosciuto nel mondo del metal additive con processi Powder Bed Fusion e quindi offre gran confidenza in fase di progettazione e ingegnerizzazione. Inoltre, le leghe di acciaio inox offrono una grande elongazione percentuale prima dello snervamento. Un parametro fondamentale di cui terremo conto è carico di snervamento, fondamentale visto che vogliamo che la nostra struttura lavori sempre in campo elastico.

	<i>P</i>	<i>E</i>	<i>RP0.2</i>	<i>E/P</i>	<i>E/P%</i>	<i>RP0.2/P</i>	<i>RP0.2/P%</i>
	[<i>KG/M³</i>]	[<i>GPA</i>]	[<i>MPA</i>]				
7075-T6 (20°C)	2810	72	503	0.0256	-	0.1790	-
317L (20°C)	7966	193	585	0.0242	-5.76%	0.0734	-143.75%
TI6AL4V (20°C)	4430	116	950	0.0261	1.82%	0.2144	16.53%
7075-T6 (220°C)	2810	59	240	0.211	-	0.0854	-
317L (220°C)	7966	176	477	0.0221	4.65%	0.0599	-42.64%
TI6AL4V (220°C)	4430	105	680	0.0237	11.12%	0.1535	44.36%

Tabella 3. Comparativa materiali per pinza freno

Nel grafico è stata mantenuta la densità del materiale costante anche alla temperatura di esercizio in quanto una volta che il pezzo è costruito la massa non cambia al variare della temperatura.

Le leghe di alluminio considerate nella tabella hanno, come già detto, subito un trattamento termico di invecchiamento artificiale, mentre la lega di titanio visto il suo comportamento fragile, cioè alto carico di snervamento e rottura e bassa elongazione percentuale, è trattata con ricottura. Per quello che riguarda i dati sull'acciaio 317L sono riguardanti la lega senza trattamento termico.

Le percentuali mostrate in tabella si riferiscono a confronti rispetto all'alluminio 7075-t6 alla stessa temperatura per apprezzare al meglio le differenze di prestazioni che condentiranno una riduzione di peso. Come sarà spiegato più avanti, più che il carico di snervamento che ci sarà utile nella fase di validazione del componente, la riduzione di peso ottenuta grazie al calcolo di ottimizzazione topologica si basa sulla conoscenza

del modulo elastico, come spiegato precedentemente per l'algoritmo SIMP. Classifichiamo la prestazione di queste leghe tramite il rapporto tra modulo di Young e densità del metallo. Possiamo notare che a temperatura ambiente, rispetto alla lega alluminio 7075-t6, l'acciaio 317L ha prestazioni inferiori mentre la lega Ti6Al4V circa l'eguaglia. Invece, per ciò che riguarda le caratteristiche meccaniche a temperatura di esercizio, sia l'acciaio che il titanio hanno proprietà superiori all'alluminio per quello che riguarda il rapporto modulo elastico e densità. Nel confronto tra acciaio e titanio, quest'ultimo primeggia sia per modulo elastico sia per tensione di snervamento. In questa applicazione verrà adottato quindi il titanio Ti6Al4V che presenta caratteristiche superiori sia a temperatura ambiente che a temperatura di esercizio. In temperatura di esercizio raggiunge il 45% in più di rapporto carico snervamento densità rispetto all'alluminio e circa l'11% in più di rapporto di modulo elastico. Quindi a parità di efficacia della geometria il titanio dovrebbe presentare circa un 11% in meno di massa a parità di deformazioni con lo stesso carico.

4.4. Ottimizzazione topologica

Una volta selezionato il materiale, raccolti tutti i dati su questo e determinato i carichi, si può iniziare lo studio di ottimizzazione topologica. Lo studio della topologia porterà a trovare dei design di base da seguire durante la progettazione. Questo studio si compone di varie fasi: modellazione del design space, definizione delle aree funzionali, definizione dei carichi, discretizzazione del design space e analisi fem strutturale, set-up parametri e definizione target, calcolo geometria ottimizzata, analisi dei risultati.

4.4.1. Modellazione design space

La modellazione del design space parte con l'analisi del componente iniziale e dell'assieme dove va accoppiato. Dal volume del componente si ricavano le principali aree con assenza di materiale dove, nel nostro caso, avviene l'accoppiamento con i pompanti.

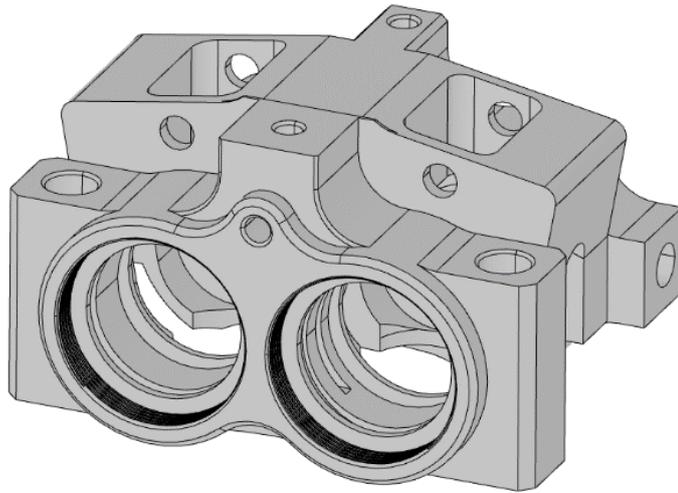


Figura 55. Corpo pinza freno originale

Le semplificazioni prevedono l'eliminazione di particolari funzioni geometriche che definiscono dettagli troppo piccoli come ad esempio filettature, circuito interno olio e tutti i dettagli geometrici che non sono utili alla definizione del design space.

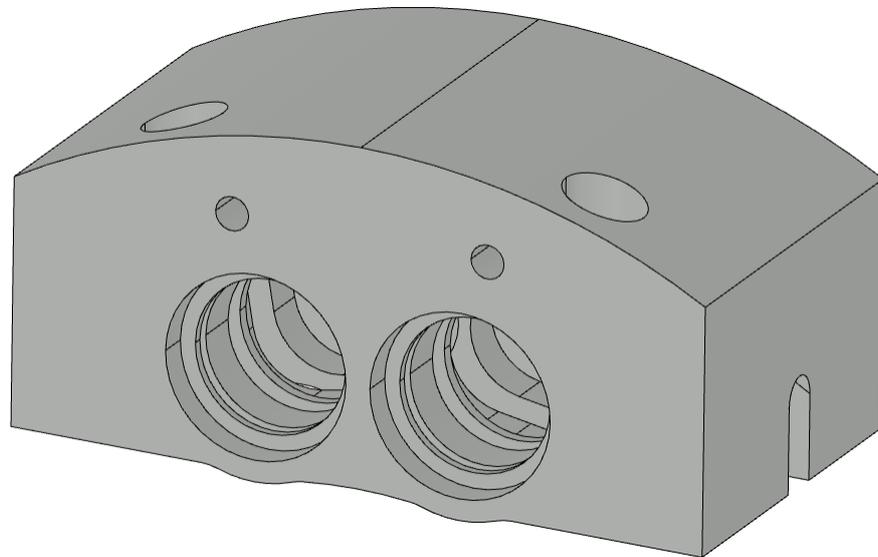


Figura 56. Vista frontale design space

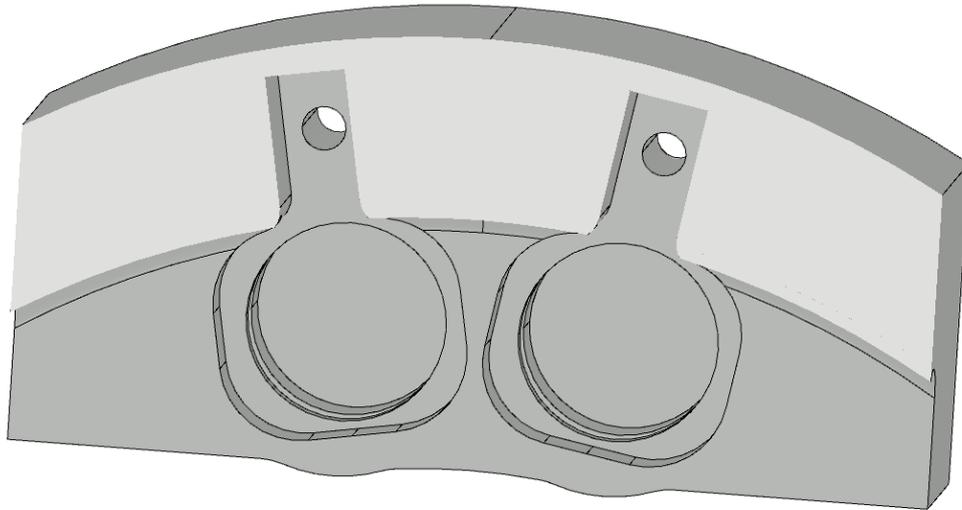


Figura 57. Vista in sezione design space

Dalla modellazione del design space è stato mantenuto tutto il volume necessario per l'alloggiamento dei pompanti e pastiglie freno, inoltre vi sono anche i fori per l'assemblaggio della pinza sul mozzo, con un taglio estruso che prosegue fino alla superficie superiore del design space per garantire la possibilità di montaggio dei bulloni. Oltre a queste cavità sono stati mantenuti i fori per i perni delle pastiglie. Fondamentale è stato mantenere anche lo scasso per l'alloggiamento del disco freno.

Il volume di questo corpo è stato limitato in direzione radiale dal diametro interno del cerchio e dal piano proiettato dalla base di accoppiamento sul porta mozzo.

Una considerazione particolare va fatta sulla riduzione laterale di questo spazio. Infatti, questa poteva essere sia limitata dal diametro interno del cerchio per poter utilizzare tutto il volume possibile, poiché avere più volume di design porta il calcolo a costruire strutture meno vincolate dagli spazi e più prestanti, ma questo avrebbe portato al momento della discretizzazione del design space una quantità di elementi che rendevano il costo computazionale non più sostenibile. Per questo motivo, in base a prove fatte con discretizzazioni con elementi di dimensioni maggiori, vedendo che le strutture create dall'ottimizzazione si limitavano in un certo intorno è stato ridotto questo volume per ridurre i tempi di calcolo avendo comunque una mesh più raffinata che porta a dei risultati meno imprecisi.

4.4.2. Definizione delle aree funzionali

Una volta definito lo spazio di design dove l'ottimizzazione può spostare il materiale per ottenere l'ottimale è necessario definire delle aree funzionali di non design space necessarie in un secondo fine per avere aree di accoppiamento con altre parti o aree che per necessità varie vogliamo siano presenti nel nostro componente finito. Il non design space andrà a sottrarre volume al design space diminuendo la libertà del calcolo ma andrà a costituire del volume strutturale.

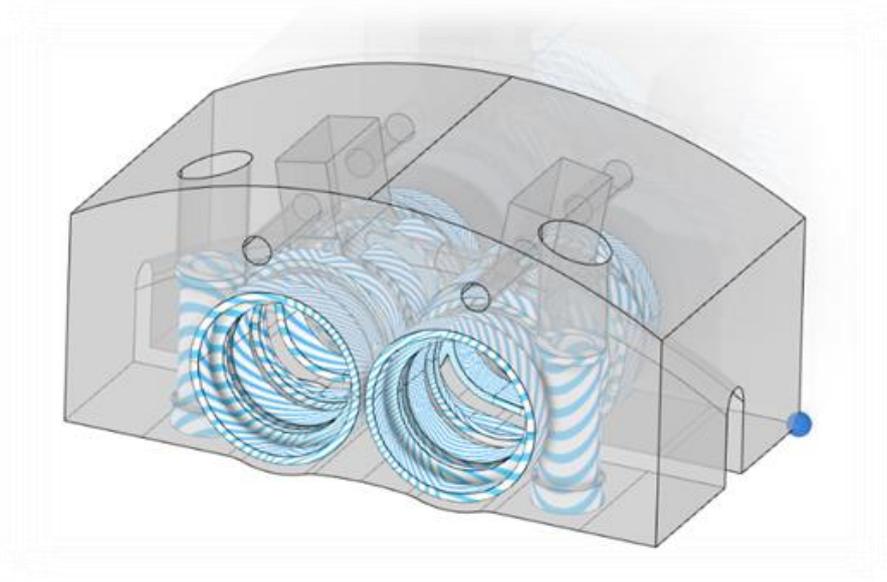


Figura 58. Vista frontale non design space

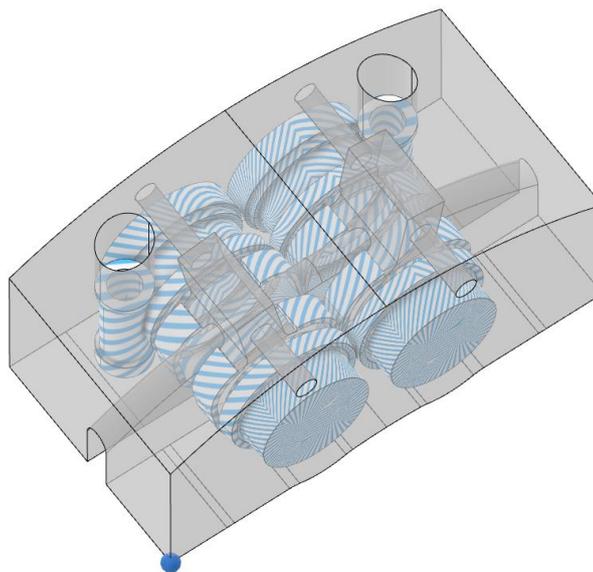


Figura 59. Vista superiore non design space

Nel nostro caso, le aree del non design space vanno a definire gli alloggi per i bulloni di fissaggio con le loro spine di centraggio, le battute laterali per le pastiglie, le sedi dei tappi e le sedi dove scorreranno i pistoncini.

4.4.3. Definizione dei carichi e dei vincoli

Come già detto i carichi sono stati definiti attraverso sensori a bordo vettura e dati di dinamica.

I vincoli virtuali invece sono stati realizzati vincolando le superfici dei bulloni con delle cerniere che approssimano il problema perché vengono viste come bulloni infinitamente rigidi.

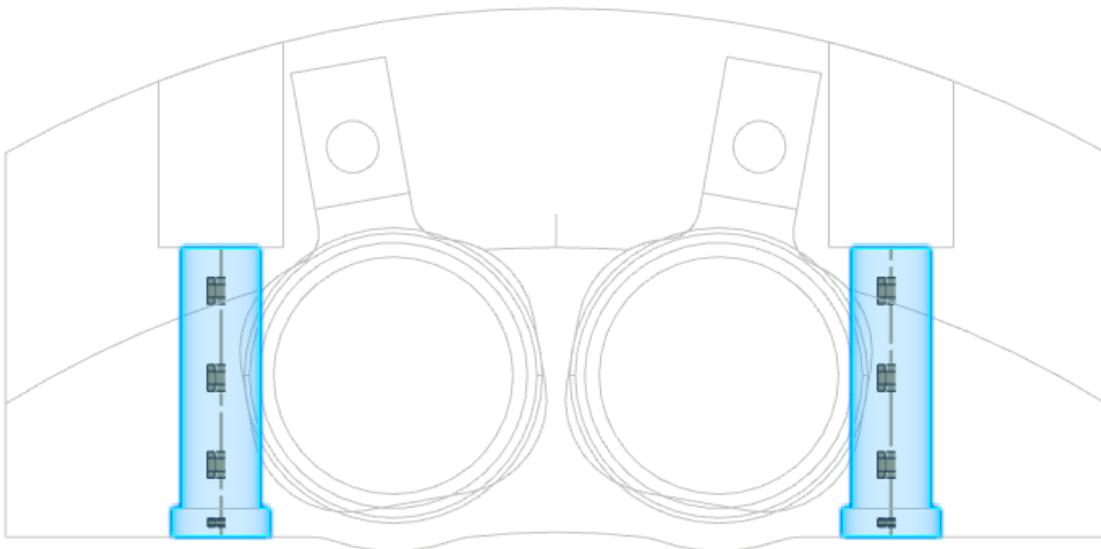


Figura 60. Vincoli design space

Invece per quanto riguarda le sollecitazioni queste sono state virtualizzate imponendo 3 carichi. Partendo dalla forza tangenziale creata dal trascinarsi delle pinze a causa dell'attrito con il disco, è stata creata una forza applicata al centro della pinza, in direzione della tangenza con il disco, di magnitudine 14 KN che tramite elementi RBE3 è stata collegata alle sedi delle pastiglie.

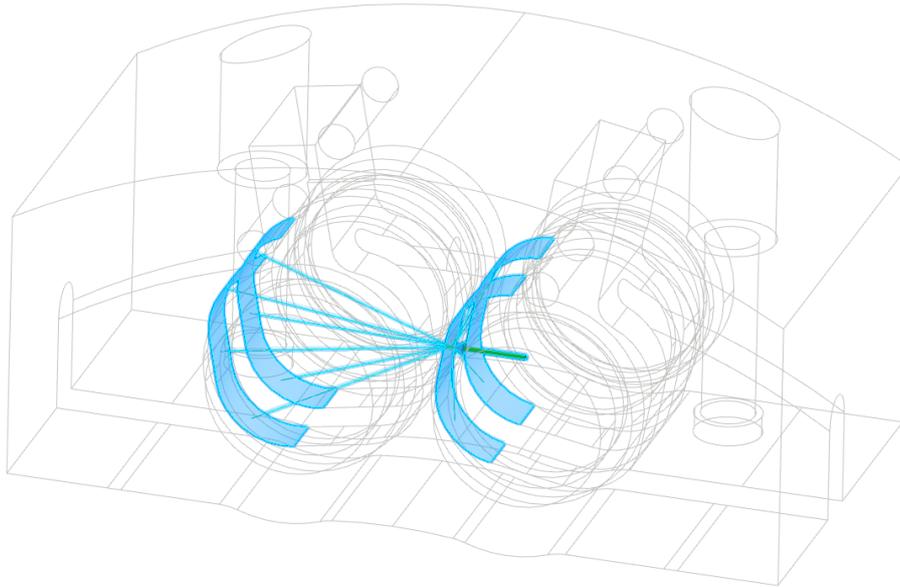


Figura 61. Carico tangenziale design space

Il secondo carico riguarda la pressione esercitata sul corpo pinza durante l'attuazione dell'impianto frenante. In condizioni critiche questo arriva a una pressione di alimentazione di 100 bar che equivale a 10 N/mm^2 . Questa pressione viene distribuita su tutte le superfici interne dove vengono alloggiati i quattro pompanti e sui fondi che si trovano direttamente nella parte opposta dei tappi per l'assemblaggio.

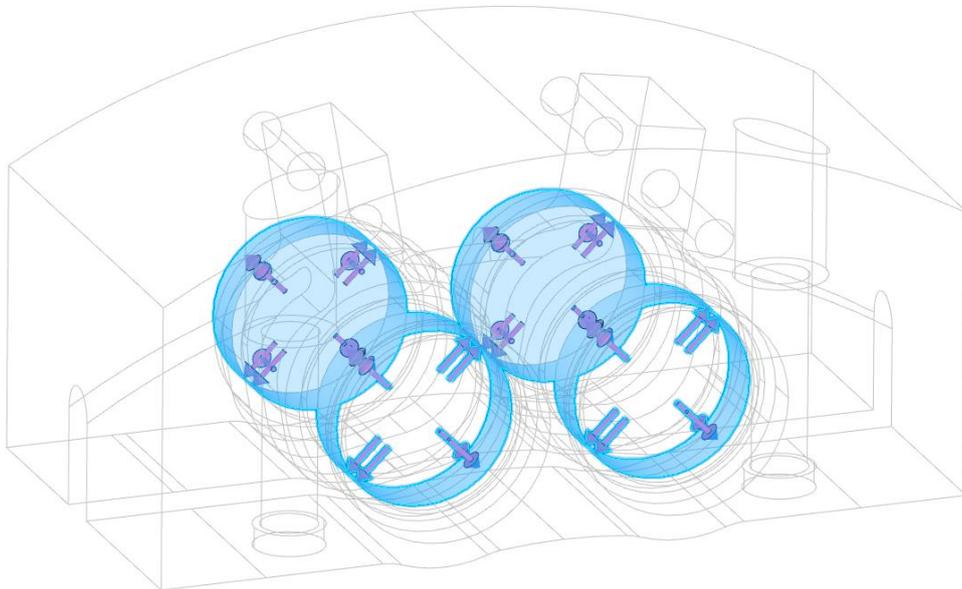


Figura 62. Pressione design space

È necessario notare che le pressioni che si esprimono radialmente rispetto all'asse dei pompanti riescono ad auto bilanciarsi. Invece, quella che si trova sul fondo in concomitanza con la pressione che si genera sui tappi andranno a creare la

deformazione maggiore che subisce il corpo pinza in direzione sempre dell'asse dei pompanti.

Dato che lo strumento di ottimizzazione topologica non poteva contenere anche altre parti nel dominio di simulazione, per rappresentare la pressione sui tappi che va a scaricarsi sul corpo pinza tramite l'accoppiamento con filettature è stato modellato come una forza con direzione parallela agli assi dei pompanti e modulo calcolato secondo la seguente espressione:

$$F = A_t * 2 * p = 490 * 2 * 10 = 9800$$

Dove F è la forza generata in N distribuita su entrambe le superfici, A_t è l'area sul tappo dove agisce la pressione in mm² e p è la pressione di attuazione dell'impianto in N/mm².

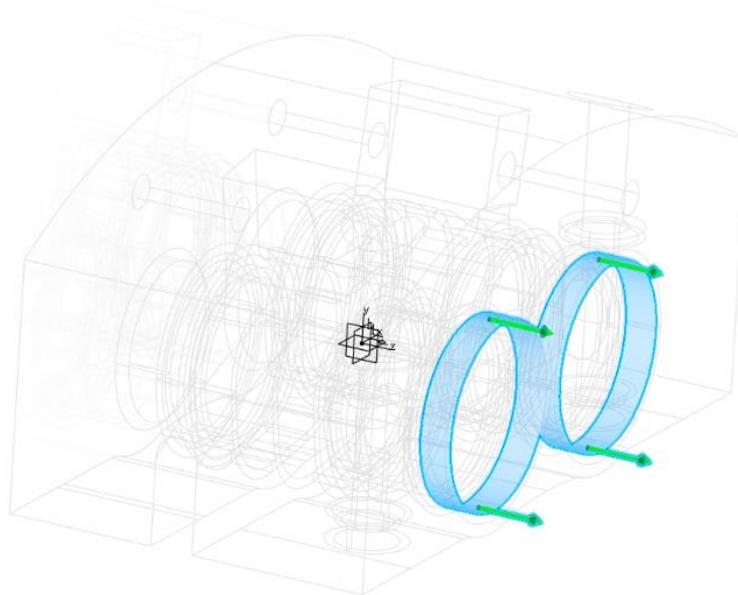


Figura 63. Carico tappi design space

Definiti tutti i vincoli e carichi si può passare alla fase di discretizzazione del dominio spaziale di calcolo.

4.4.4. Discretizzazione del design space e analisi fem strutturale

Prima di eseguire un calcolo di ottimizzazione topologica che può essere molto oneroso sia dal punto di vista computazionale che di tempo è buona pratica verificare le impostazioni e i parametri che andranno come input all'algoritmo. Infatti, in questa fase si procede a discretizzare il volume di design e si verifica con un'analisi struttura

agli elementi finiti se le forze applicate al corpo sono state definite correttamente. L'ambiente di lavoro che stiamo utilizzando, ovvero 3D Experience di Dassault Systèmes, all'interno dello strumento di lavoro non permette particolari aggiustamenti e regolazioni della mesh. Infatti, la regolazione della mesh avviene tramite l'impostazione di una dimensione principale dei triangoli che sono poi regolati in dimensione autonomamente dal software ed è possibile selezionare elementi tetraedrici TL4 o TL10. Nel nostro caso, il software consigliava una dimensione dei triangoli di 2,74 mm e abbiamo impostato il valore su 1,5 mm in quanto lo spessore minimo del non design space era di 1,5 mm e la tipologia degli elementi è stata impostata su TL4, che nonostante una maggiore approssimazione offre un carico computazionale molto minore.

In questa fase inoltre è molto importante verificare le deformazioni che il nostro design space presenta. Infatti, un buon metodo per valutare la qualità dei risultati di un calcolo di ottimizzazione topologica, prima di eseguire un calcolo è proprio quello di valutare la rigidità del design space. Un volume che presenta una rigidità maggiore rispetto a un altro volume dopo un processo di ottimizzazione topologica a partita di parametri di input avrà una probabilità maggiore di generare geometrie con una rigidità migliore. Inoltre, sarebbe totalmente inutile ottimizzare un design space che presenta una rigidità inferiore al componente originale.

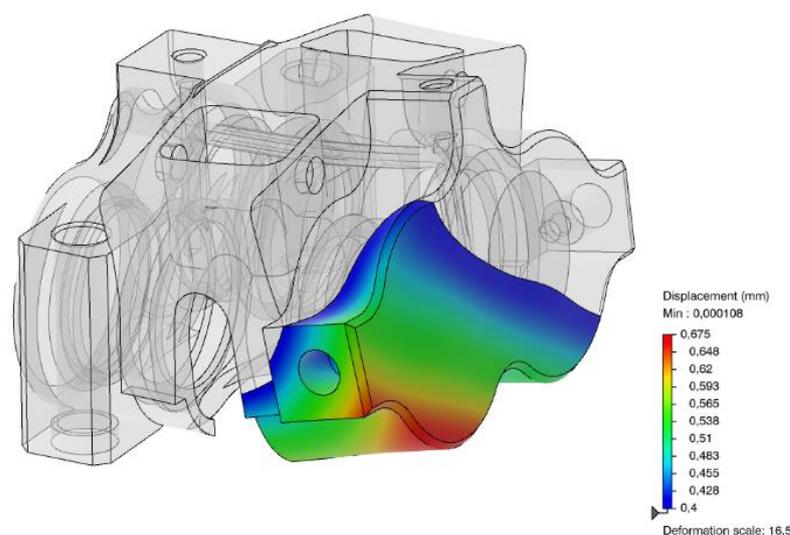


Figura 64. Deformazioni pinza freno originale

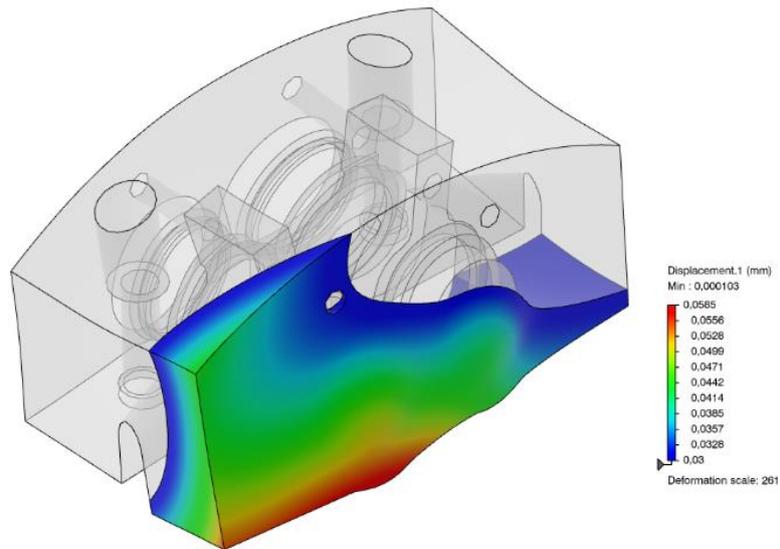


Figura 65. Deformazioni design space vista posteriore

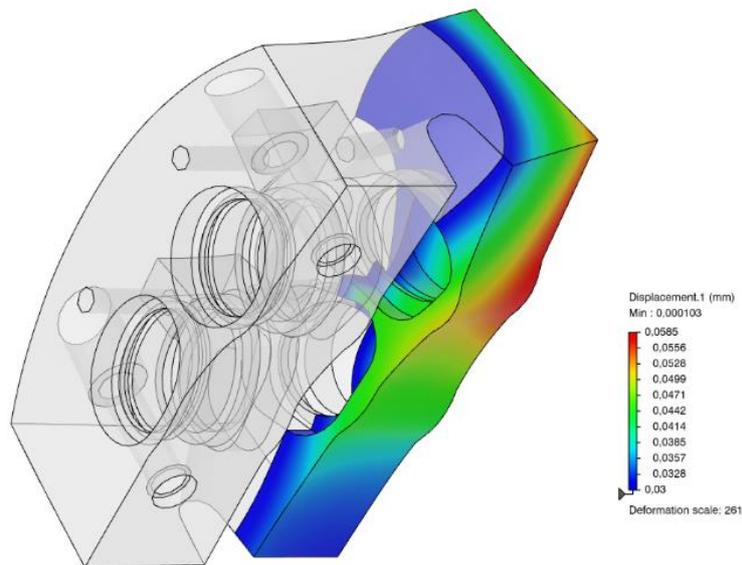


Figura 66. Deformazioni design space vista inferiore

Si può notare che il design space rispetto alla pinza originale presenta deformazioni di un ordine di grandezza di misura inferiore e che le deformazioni si presentano in maniera corretta. In questo caso visto che il nuovo corpo pinza verrà costruito in lega di titanio, già dal design space vengono applicate le caratteristiche meccaniche di densità e modulo elastico del titanio a 220°C.

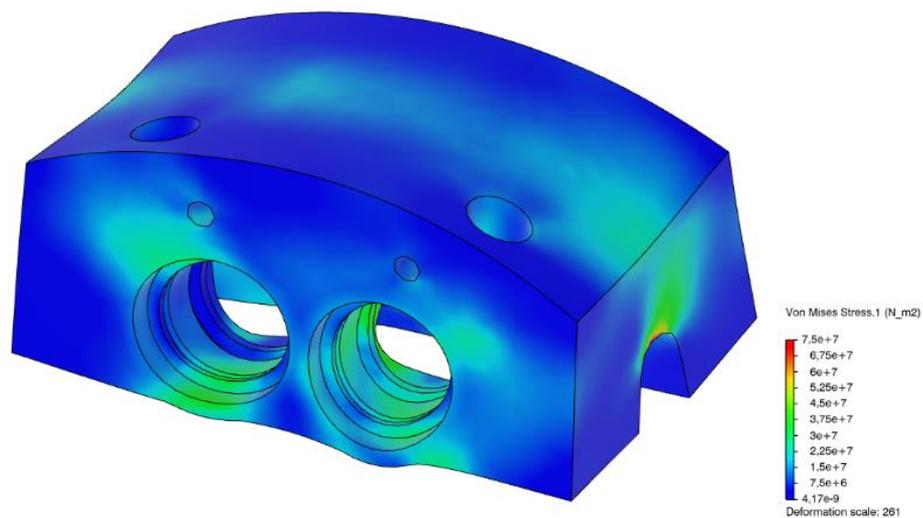


Figura 67. Tensioni equivalenti design space vista frontale

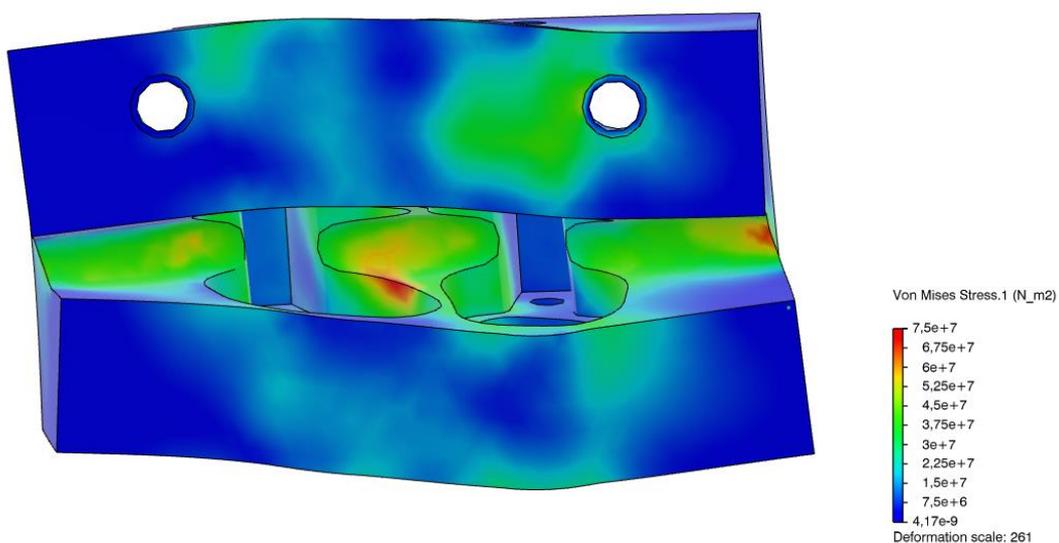


Figura 68. Tensioni equivalenti design space vista inferiore

Dai grafici delle tensioni equivalenti di Von Mises si può notare subito quali saranno le zone più critiche e prevedere dove sarà rimosso materiale.

4.4.5. Set-up parametri e definizione target

Finita la validazione del design space si può passare alla fase di impostazione dei target e dei vincoli dell'ottimizzazione topologica. I target sono gli obiettivi che l'algoritmo dopo varie iterazioni deve cercar di massimizzare. I target disponibili su

questo ambiente di lavoro sono tre: massimizzare la rigidezza, minimizzare la massa e massimizzare la frequenza propria del corpo.

Nel nostro caso utilizzeremo lo strumento di massimizzazione della rigidezza in quanto vogliamo che la pinza freno si deformi il meno possibile. In questo modo sarà anche possibile definire il massimo di massa che l'algoritmo potrà distribuire. Un'altra strada possibile per definire il target di massa può essere quella di impostare un vincolo sulla tensione massima del materiale e chiedere all'algoritmo di minimizzare la massa. Una volta ottenuto il risultato si può procedere a eseguire un nuovo calcolo per massimizzare la rigidezza e come vincolo di massa il risultato ottenuto nella ottimizzazione precedente. Non utilizzeremo questa strategia in quanto per il primo calcolo di minimizzazione della massa è necessario discretizzare il dominio di calcolo con elementi TL10 che vanno ad aumentare il costo computazione. Tale costo è aumentato anche dal fatto che sono necessarie due ottimizzazioni topologiche per ottenere il risultato.

Nel nostro caso siamo partiti provando a ridurre la massa del 35% considerando che circa 11% della riduzione di peso può essere raggiunta solo con il passaggio alla lega di titanio e circa la riduzione del 25% può essere considerato un ottimo risultato dal punto di vista dell'ottimizzazione topologica pura. Inoltre, va specificato che la riduzione di massa imposta all'algoritmo di ottimizzazione topologica sarà puramente indicativo e la riduzione di peso nel risultato finale non dipenderà da questa scelta, ma delle scelte che si faranno al momento della progettazione CAD.

Quindi, una volta determinato il target di dell'algoritmo e l'ammontare della percentuale di riduzione di massa si possono impostare i vincoli geometrici. I vincoli geometrici possono essere di varia natura, da geometrie simmetriche rispetto a determinati piani di riferimento ad angoli di sforno per ottenere geometrie producibili tramite processi di colata. Un vincolo geometrico molto importante è il minimo spessore della sovrastruttura. Una volta impostato l'algoritmo cercherà di evitare sovrastrutture sotto la soglia preimpostata, ma va ricordato che non è un vincolo imperativo, quindi nei risultati potrebbero essere generate strutture che non seguono questa indicazione.

Nel nostro caso specifico sono state impostate due simulazioni al fine di ottenere geometrie di riferimento diverse entrambe utili in fase di progettazione. Entrambi i calcoli hanno mantenuto la medesima riduzione di massa del 35% e il vincolo sulle minime dimensioni delle strutture di 1,5mm. Nella prima però è stato impostato il vincolo di simmetria della struttura principale, in modo da creare una sovrastruttura nella parte centrale del pezzo di riferimento e la seconda è rimasta libera in modo da dare indicazioni sulle parti più esterne del componente e garantire una prestazione rigidità-peso maggiore rispetto a quella simmetrica visto che il carico sulla pinza è fortemente asimmetrico.

4.4.6. Calcolo geometria ottimizzata ed estrazione dei risultati semplificati

Dopo che i calcoli delle due ottimizzazioni hanno raggiunto i target prefissati il software a restituito i seguenti risultati:

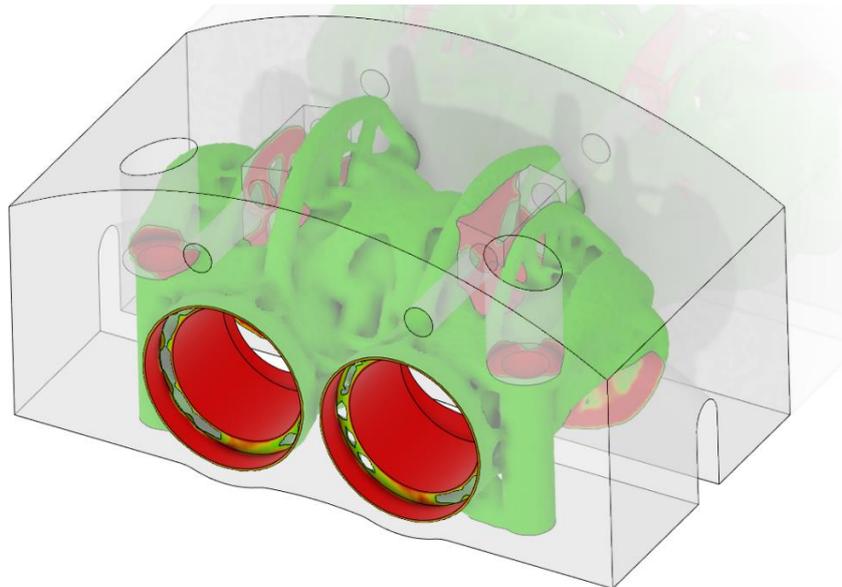


Figura 69. Ottimizzazione topologica simmetrica vista frontale

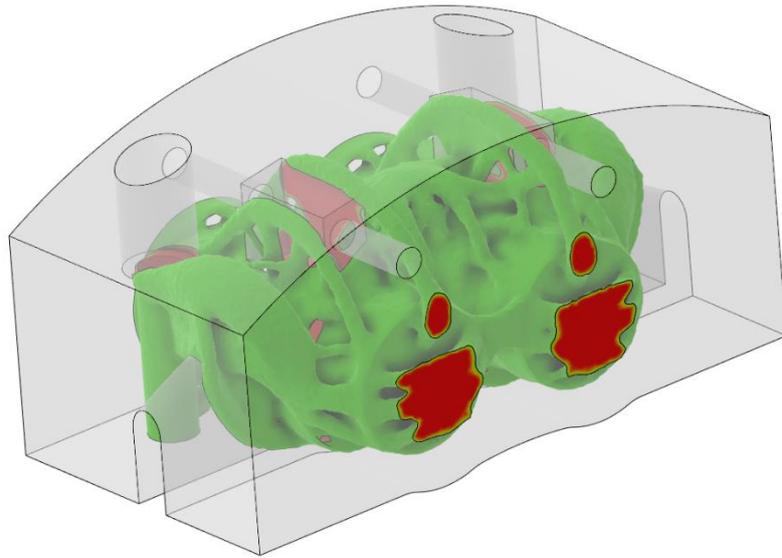


Figura 70. Ottimizzazione topologica simmetrica vista posteriore

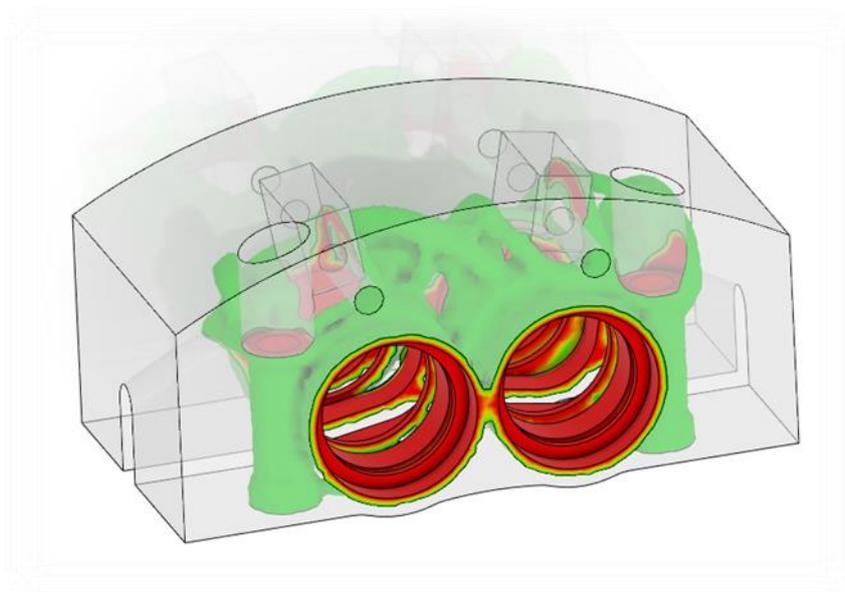


Figura 71. Ottimizzazione topologica vista frontale

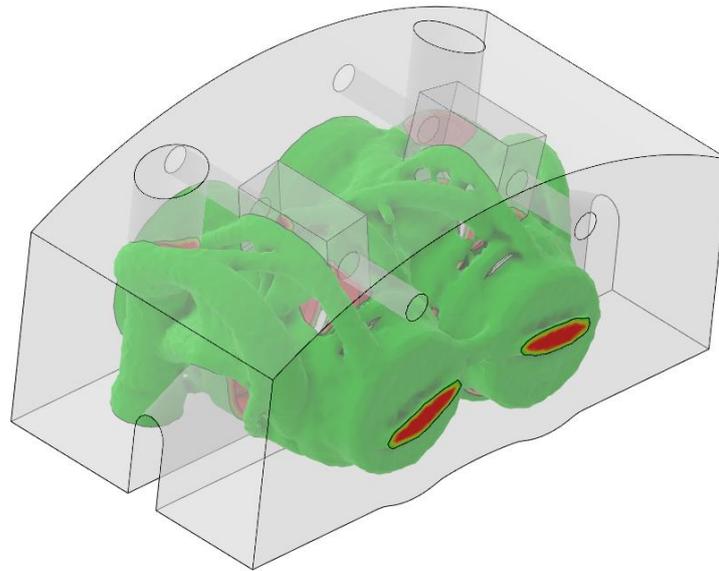


Figura 72. Ottimizzazione topologica vista posteriore

Le immagini 69 e 70 raffigurano il risultato ottenendo il vincolo di simmetria, mentre le immagini 71 e 72 mostrano l'output della geometria senza nessun vincolo geometrico. Entrambi i risultati riportati sono ottenuti imponendo isovalori di densità del 50%. Negli algoritmi di ottimizzazione topologica SIMP viene offerta la possibilità di far variare la densità del risultato e quindi renderlo più o meno voluminoso. Ovviamente le aree di maggiore densità, colorate nel nostro caso in rosso saranno quelle più sollecitate.

Si nota come il design space sia sufficientemente voluminoso in quanto poche strutture vengono a contatto con il margine del dominio di calcolo. Nel caso si avesse avuto la possibilità di aumentare il volume del design space l'algoritmo avrebbe sicuramente dato risultati migliori. Come si nota nella immagine 70, nel caso in esame non è possibile in quanto andare ad aumentare il volume in direzione ortogonale alle aree rosse andrebbe in interferenza con il profilo del cerchio ruota.

3D Experience permette di estrarre i risultati con uno strumento di generazione di geometrie a partire dai risultati dell'ottimizzazione topologica. Questo strumento permette inoltre di livellare le superfici per rendere il componente generato quasi finito. Questa pratica è sì utile a semplificare il risultato ma porta ad aggiungere una quantità di volume che nasconde i dettagli molto piccoli. Nonostante ciò, generare queste geometrie con o senza questo livellamento rende possibile esportare i corpi e

importarli nella parte CAD dell'ambiente di lavoro per la modellazione della parte finita. Le figure qui in seguito mostrano i risultati dell'estrazione con lo strumento di generazione delle geometrie.

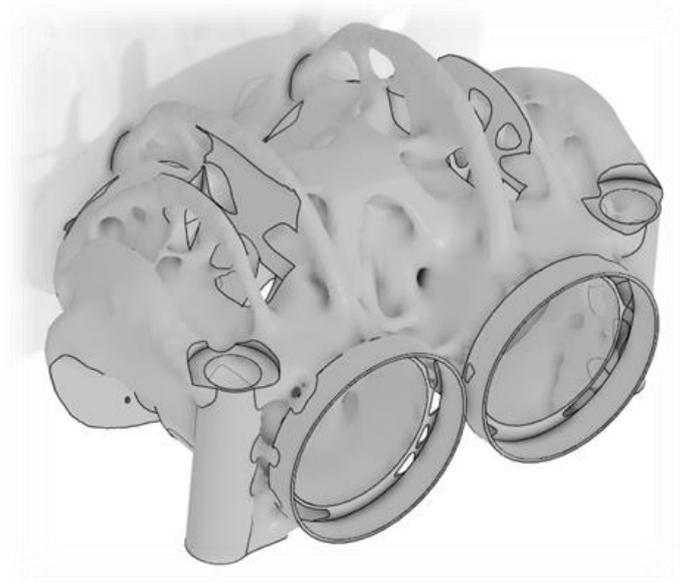


Figura 73. Geometria simmetrica vista frontale

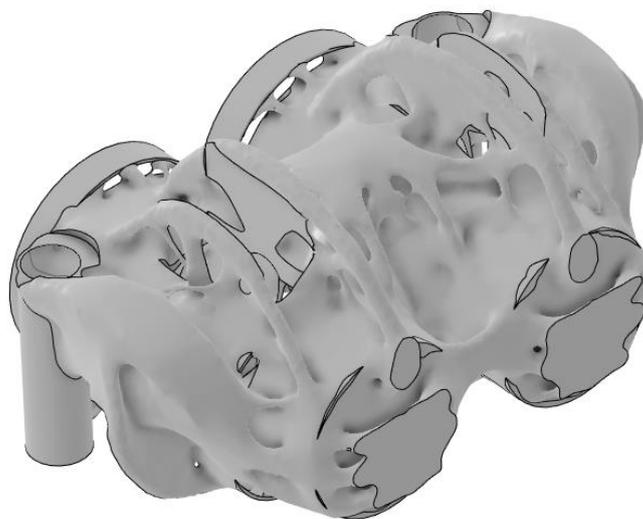


Figura 74. Geometria simmetrica vista posteriore

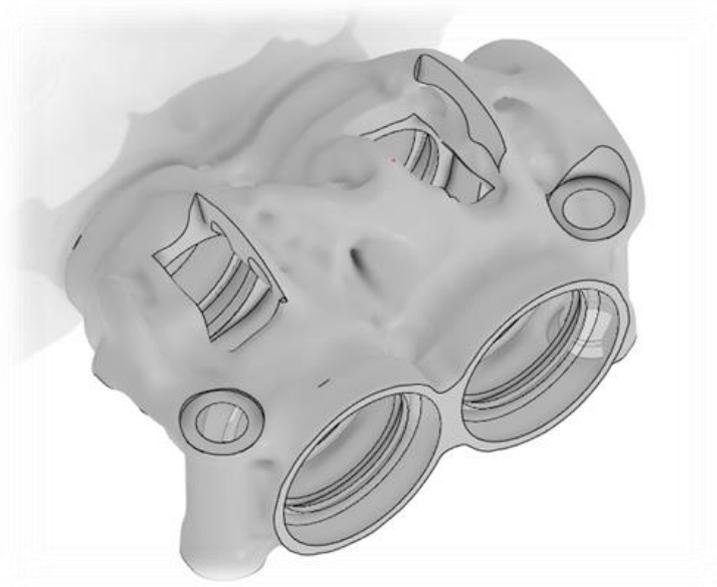


Figura 75. Geometria asimmetrica vista frontale

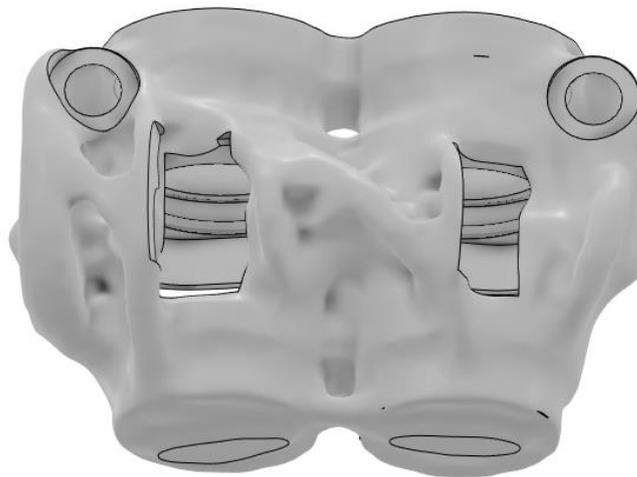


Figura 76. Geometria simmetrica vista superiore

4.4.7. Confronto Altair OptiStruct

In questo studio è stato possibile realizzare un confronto dei risultati ottenuti con 3D Experience con un software incentrato proprio sul calcolo agli elementi finiti: Altair OptiStruct.

Questo software permette di realizzare mesh molto più complesse e di avere un maggior numero di gradi di libertà nell'impostare il calcolo.

Nel nostro caso in esame abbiamo discretizzato lo spazio di calcolo con una mesh di grandezza maggiore di 2mm e abbiamo impostato il fattore di penalizzazione uguale a 3.

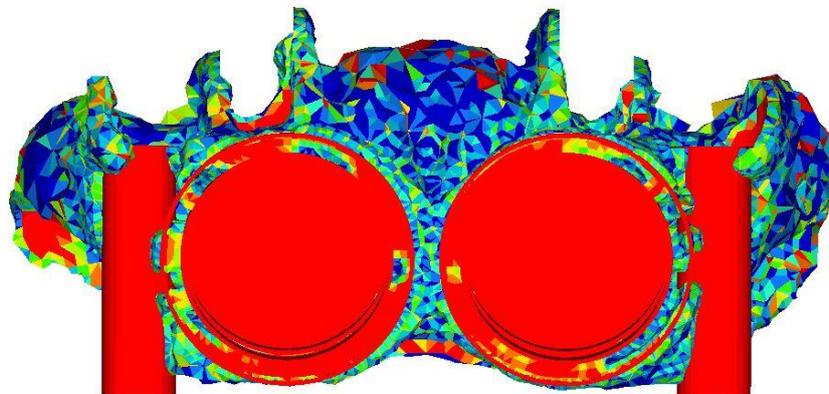


Figura 77. Risultato OptiStruct vista frontale

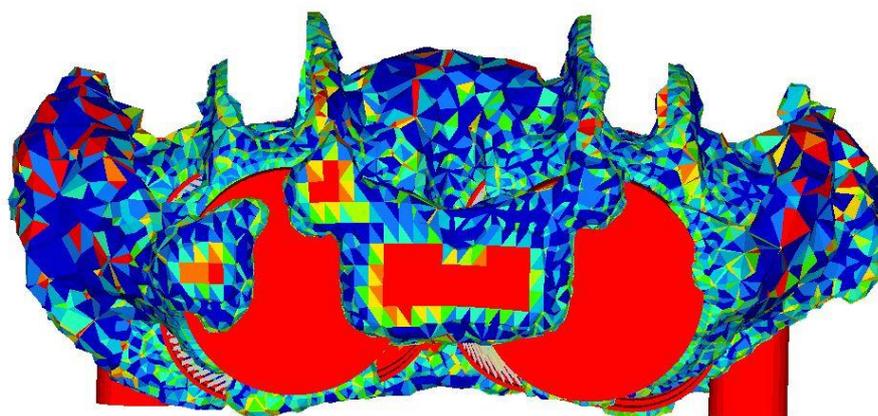


Figura 78. Risultato OptiStruct vista posteriore

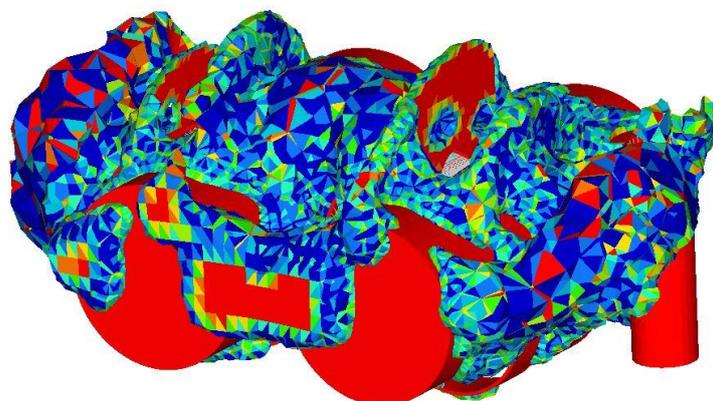


Figura 79. Risultato OptiStruct vista posteriore laterale

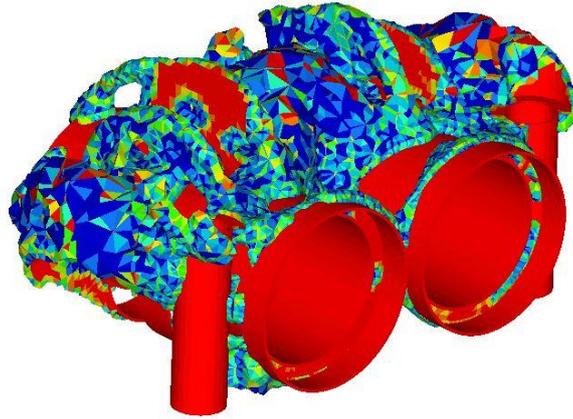


Figura 80. Risultato OptiStruct vista frontale laterale

Dal confronto si nota che entrambi i software vanno ad aggiungere massa negli stessi punti e a creare le stesse sovrastrutture per aumentare il momento di inerzia flettente. A livello di utilizzo OptiStruct si è dimostrato più flessibile nella parte di calcolo, ma d'altro canto i risultati ottenuti sono di una difficoltà superiore nella comprensione e non possono essere esportati come corpi in quanto non esiste uno strumento di generazione della geometria integrato nel software che risulta molto utile.

4.5. Modellazione CAD

La suite 3D Experience al suo interno ha svariati prodotti della casa Dassault Systèmes. La parte CAD è affidata a CATIA. La modellazione del nostro componente prevede la realizzazione di un primo design che sarà validato per valutare i risultati nel campo delle deformazioni e delle tensioni e ci saranno altri design sempre validati ma questa volta presenteranno tutte le appendici e accortezze per essere funzionali. Ed esempio nel primo design trascureremo la parte del circuito oleodinamico.

La modellazione è molto onerosa a livello di tempo, come già spiegato nei capitoli precedenti, e prevederà essenzialmente due macro parti. Una parte di modellazione chiamata free-shape che prevederà a creare tutte le superfici complesse e sarà un tipo di modellazione non parametrica e una modellazione parametrica di tutte le parti funzionali.

La modellazione non parametrica si concentra soprattutto in quelle aree dove la geometria è particolarmente complessa come le nervature nella parte alta del corpo pinza.

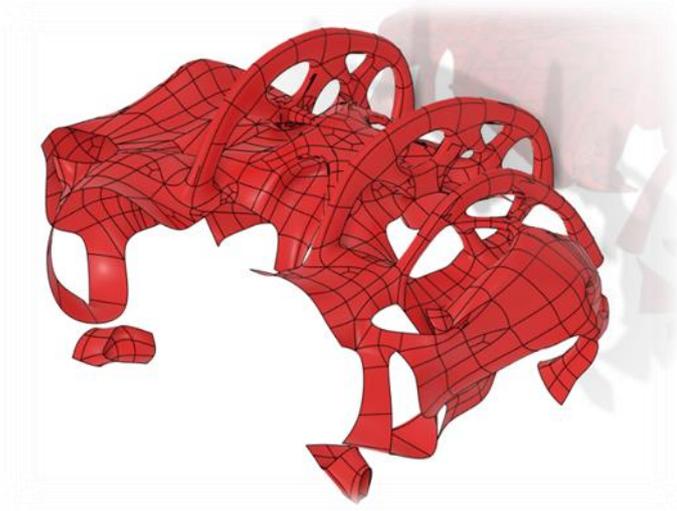


Figura 81. Superficie free-shape vista frontale



Figura 82. Superficie free-shape vista posteriore

Questo tipo di modellazione viene eseguito facendo aderire dei quadrilateri sulle superfici delle geometrie estratte dall'ottimizzazione topologica. Una volta definite varie aree queste possono essere unite automaticamente specificando i bordi di adesione. Il software in seguito provvederà a raccordare tutte le superfici per avere la geometria più liscia possibile. Il grande difetto di questa modellazione è che il software non registra uno storico di azioni usate per definire queste forme e questo rende molto difficile una correzione futura o delle modifiche retroattive.

Completata questa modellazione si passa a definire la parte più funzionale del componente, con tutte le aree di accoppiamento con altre parti.

In questa fase si utilizza una modellazione parametrica di superfici, quindi le geometrie possiedono una gerarchia. È strettamente necessario modellare con superfici in quanto la parte free-shape, che anche essa è una superficie, viene intersecata con quella funzionale.

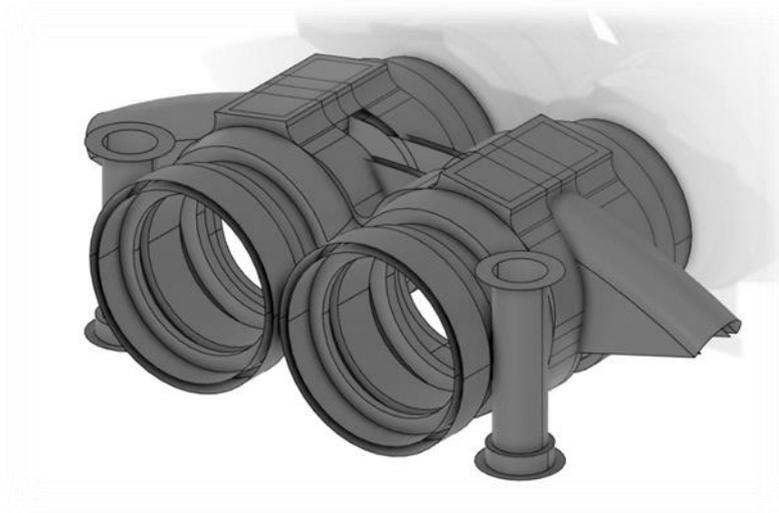


Figura 83. Superfici parametriche

La parte funzionale viene creata partendo dalle superfici dove vengono accoppiate altre parti del gruppo frenante, come tenute, o-ring, bulloni di fissaggio, pompanti e pastiglie, e off settandole di 1,5 mm per garantire un minimo spessore a queste superfici. È stato scelto 1,5mm in quanto il processo di stampa non garantisce la piena densità del prodotto e per avere sezioni del componente che formeranno i layer abbastanza robusti, visto che il titanio è abbastanza critico da utilizzare.

Una volta completate le modellazioni le due parti sono state intersecate, sono state chiuse eventuali aree aperte e l'insieme di superfici è stato solidificato.

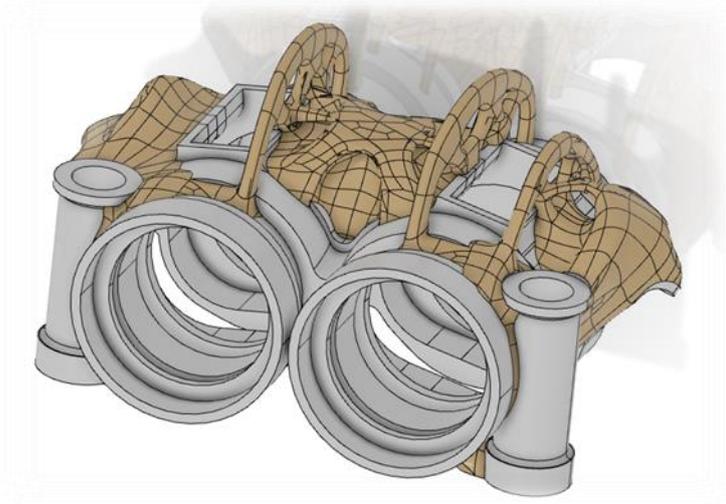


Figura 84. Pinza freno versione uno vista frontale

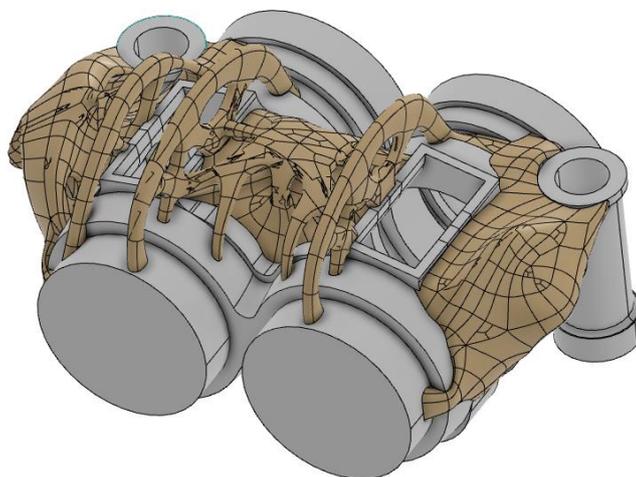


Figura 85. Pinza freno versione uno vista posteriore

Si può notare da queste immagini come la geometria creata con la parte free-shape vada effettivamente a costituire solo la parte puramente strutturale, emergendo dalla parte funzionale e andando a irrigidirla.

Il componente costruito in questa sua prima versione presenta un peso di 159 grammi, ma va tenuto conto che in questo modello mancano ancora alcune aree funzionali come ad esempio il circuito oleodinamico.

Per valutare questo primo design utilizzeremo un'analisi statica agli elementi finiti.

4.6. Analisi statica

Per valutare la qualità della geometria e controllare se questa rientra nelle specifiche di progetto ci avvarremo di una analisi statica. I carichi e i vincoli rimarranno nella medesima configurazione. Visto che il software 3D Experience in concessione per questo studio ha una licenza limitata non sarà possibile definire la dimensione della mesh ma soltanto l'ordine degli elementi tetraedrici, TL4 o TL10. Nel nostro caso utilizzeremo per questa analisi fem e quelle future elementi quadratici TL10 per avere un'approssimazione minore del risultato.

Per validare il risultato terremo fede alle caratteristiche del titanio a temperatura di 220 °C, quindi con modulo elastico pari a 105 Gpa e tensione di snervamento di 680 Mpa. Il componente verrà ritenuto valido quando presenterà deformazioni inferiori al suo corrispettivo originale in alluminio e tensioni con magnitudine inferiore a σ_{amm} , valore calcolato come:

$$\sigma_{amm} = \frac{\sigma_{Rp0.2}}{C.S.} = \frac{680}{1,2} \approx 560$$

Il coefficiente di sicurezza pari a 1,2 è stato adottato vista l'applicazione Motorsport del componente e visto che la parte non è studiata per durare per lunghi periodi come può esserlo per un componente automotive, ma per gare di breve durata. Inoltre, questo fattore di sicurezza è stato utilizzato in altri studi che applicavano sempre ottimizzazione topologica e additive manufacturing a componenti da competizione.

Il secondo parametro da valutare è la scala delle deformazioni che deve rimanere nell'intorno delle deformazioni del componente di serie. Ricordiamo che il corpo pinza ISR ha una deformazione massima di: 0,675mm.

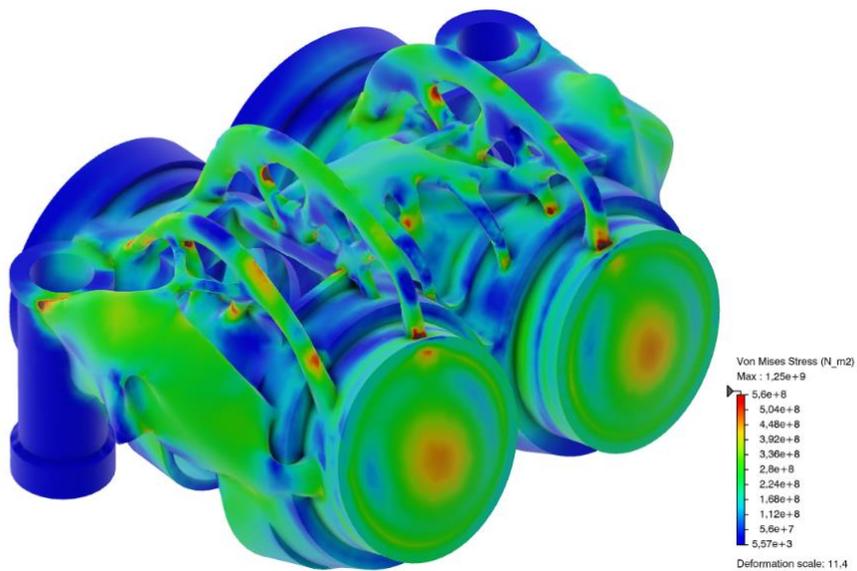


Figura 86. Tensioni equivalenti pinza prima versione vista posteriore

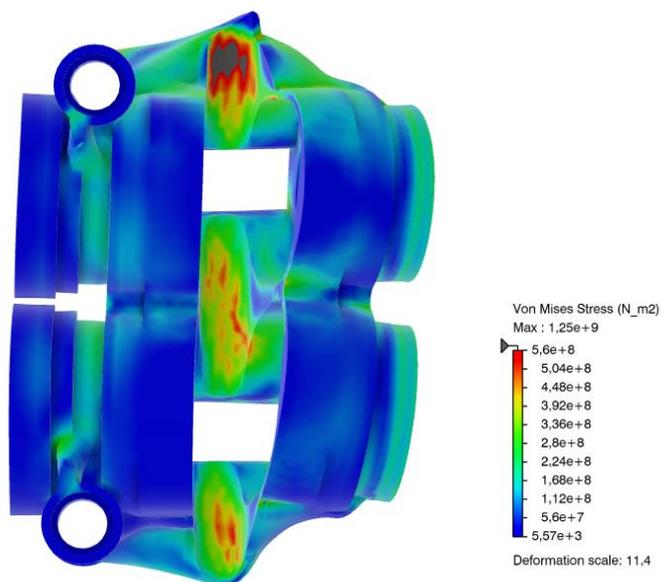


Figura 87. Tensioni equivalenti pinza prima versione vista inferiore

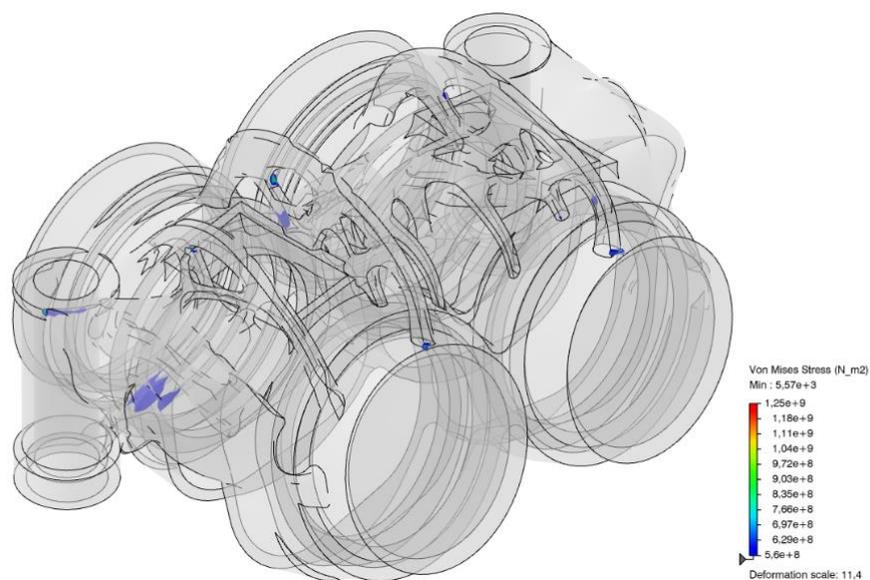


Figura 88. Cut-off tensioni equivalenti pinza prima versione

Dai grafici in figura 86 e 87, si può notare che il volume è per la maggior parte al di sotto del σ_{amm} , ma ci sono aree critiche come viene evidenziato in figura 88. Questo grafico è stato ottenuto imponendo un cut-off delle aree con tensione inferiore a σ_{amm} . Molte di queste aree possono essere risolte raccordando adeguatamente la struttura per diminuire il concentrazione delle tensioni. Nella zona inferiore invece, in prossimità del cielo della gola dove scorre il disco freno, vi è una discreta zona che presenta tensioni oltre il limite ammissibile.

Cercheremo di risolvere questa criticità rimodellando il componente.

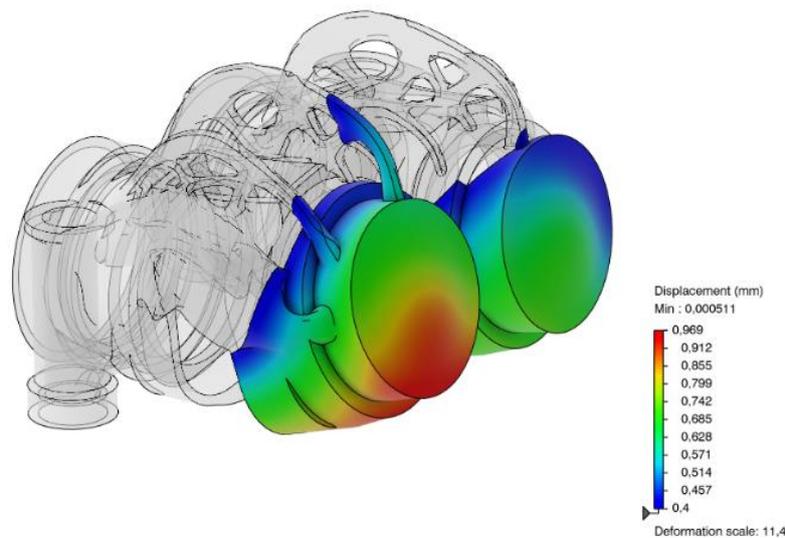


Figura 89. Deformazioni pinza prima versione

Invece, dal grafico delle deformazioni si può notare che la massima deformazione è di 0,969 mm, valore accettabile visto che è della stessa scala di grandezza della pinza freno originale che equivale a 0,675 mm.

Visto che deformazioni maggiori portano a diminuire la prestazione del componente, nel prossimo design cercheremo di diminuire anche questo aspetto.

4.7. Modellazione seconda versione

La modellazione della seconda versione ha essenzialmente previsto accorgimenti sia alla parte di geometria non parametrica sia nella parte parametrica. Oltre alle correzioni a livello strutturale sono stati aggiunti anche i componenti funzionali che mancavano nella prima versione, quindi questo modello è perfettamente funzionale e potrebbe essere prodotto e utilizzato nel caso rispettasse le specifiche di progetto.

Le parti funzionali che sono state aggiunte sono le appendici per l'accoppiamento con i perni che mantengono in posizione le pastiglie, i canali del circuito oleodinamico che mettono in comunicazione tutti i vani olio di pompanti e un condotto di scarico per il circuito di spurgo di eventuale aria inclusa nell'impianto frenante.

Inoltre, sono state apportate modifiche a livello di struttura per risolvere i problemi tensionali del modello precedente. Si può notare dalle immagini a seguire che le

nervature sono state modificate, la parte posteriore non presenta più nervature, in quanto l'alloggiamento del canale olio dovrebbe rinforzare la struttura e quindi sono state eliminate per risparmiare peso, mentre la parte anteriore della pinza vede delle strutture geometricamente simili a quelle della prima versione ma con spessori maggiori. Anche gli alloggiamenti dei bulloni sono stati modificati per ottenere una geometria con gradienti dimensionali ridotti.

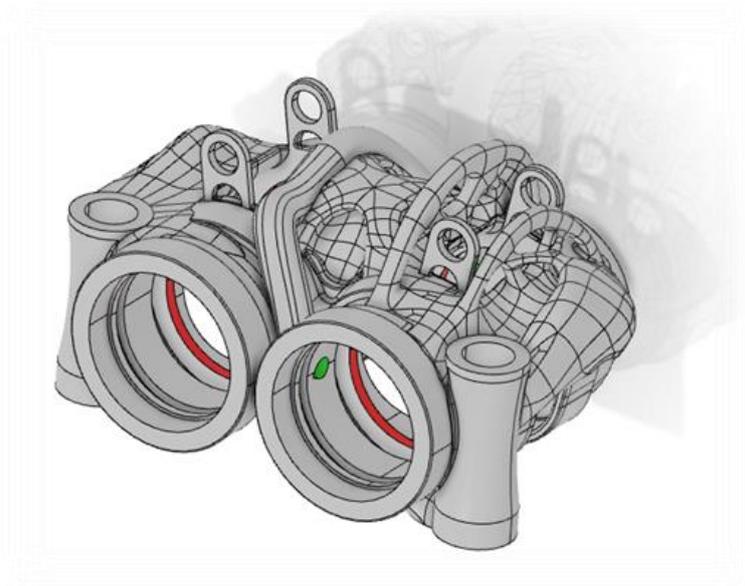


Figura 90. Pinza freno versione due vista frontale

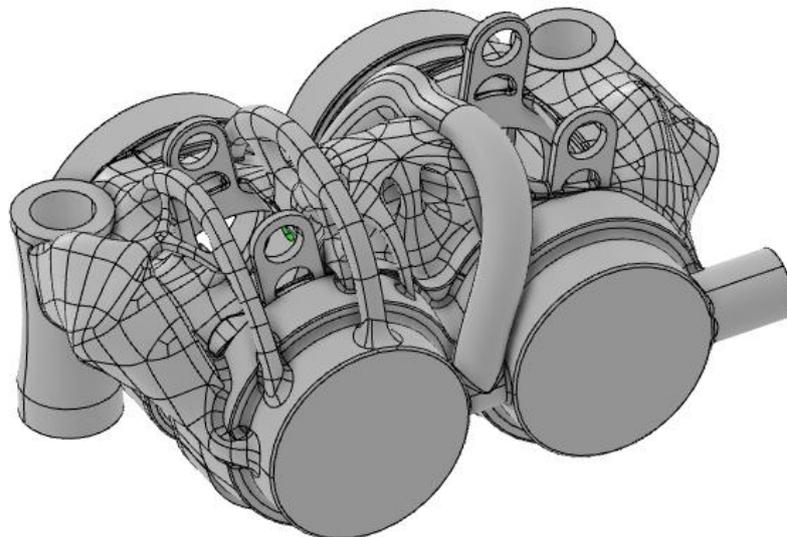


Figura 91. Pinza freno versione due vista posteriore

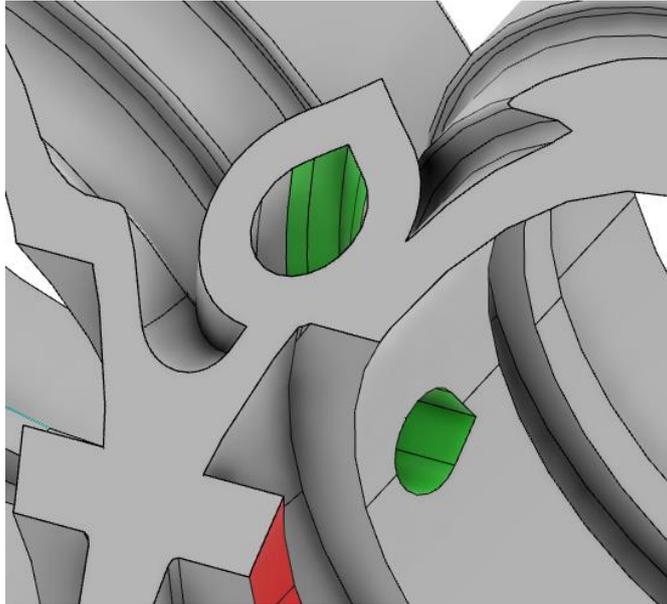


Figura 92. Dettaglio condotti olio pinza freno versione due

Come si può notare dalla figura 92, questo design prevede già una direzione di stampa, infatti i condotti hanno una sezione a goccia con la parte sottile rivolta in direzione di accrescimento in modo che il canale non necessiti di supporti che sarebbero impossibili da rimuovere. Il canale ha uno spessore sempre di 1,5mm per le motivazioni già spiegate in precedenza ed è stato immerso il più possibile nei corpi già precedentemente modellati per risparmiare materiale e di conseguenza peso e tempo di realizzazione. Il nuovo design presenta un peso di 176 g rispetto ai 159 g della prima versione e i 248 g della pinza di serie.

4.8. Analisi statica seconda versione

L'analisi strutturale sulla seconda versione del corpo pinza è stata condotta utilizzando gli stessi parametri di materiale e di simulazione di quelli definiti per la prima versione. In questo caso, però, è stata aggiunta una pressione di 100 Bar sulle superfici dei condotti dell'olio dato che anche queste sono in pressione durante il funzionamento.

Si può notare dalle figure riportanti i grafici delle tensioni equivalenti di Von Mises che tutto il corpo sta al di sotto della σ_{amm} che ci eravamo imposti.

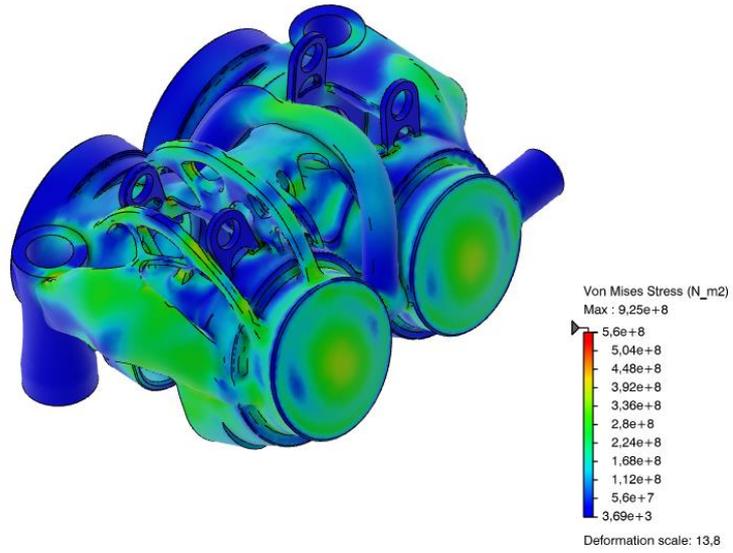


Figura 93. Tensioni equivalenti pinza seconda versione vista posteriore

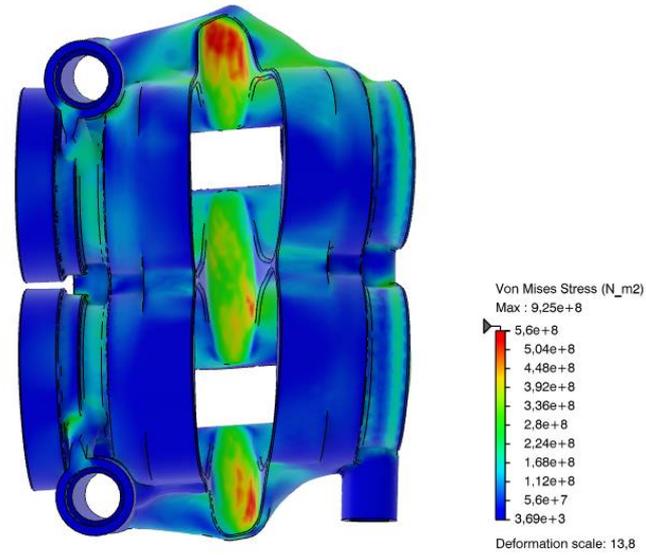


Figura 94. Tensioni equivalenti pinza seconda versione vista inferiore

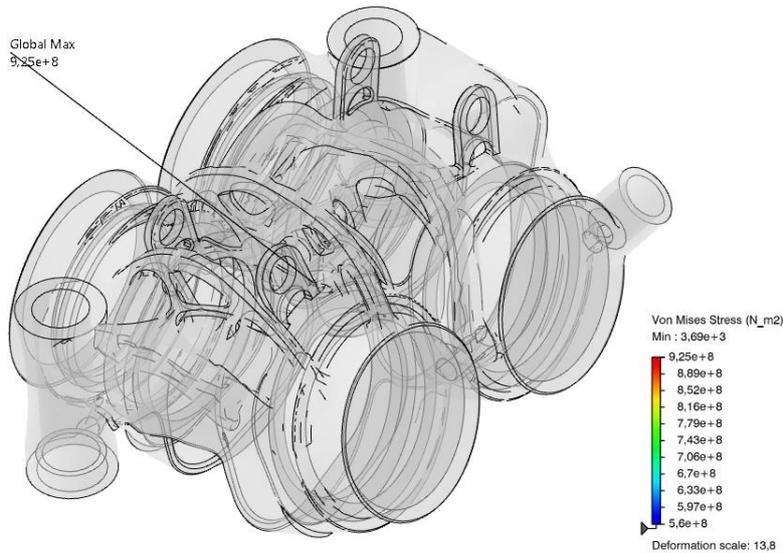


Figura 95. Cut-off tensioni equivalenti pinza seconda versione

Anche utilizzando la funzione di cut-off notiamo che non esistono zone di concentrazione di tensioni superiori a σ_{amm} . I massimi locali vengono creati per errori di discretizzazione della mesh, ma come già detto questo ambiente di lavoro non ci permette di costruire una mesh manualmente. Notiamo comunque che la situazione generale a livello di tensioni è migliorata.

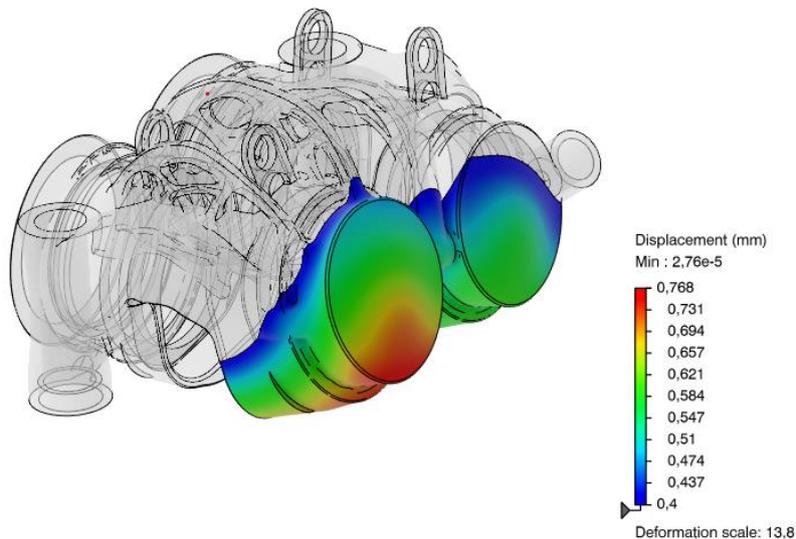


Figura 96. Deformazioni pinza seconda versione

Di conseguenza anche a livello di deformazioni la geometria è più efficace. La deformazione massima equivale a 0,768 mm mentre per la prima versione 0,969 mm e i 0,675 mm della pinza originale.

4.9. Modellazione terza versione

Visti i buoni risultati ottenuti con la prima revisione del modello si è proceduti a realizzare una terza versione cercando ancora di irrigidire la struttura per ottenere una prestazione rigidità peso superiore a quello della pinza freno originale e alla seconda versione.

Le parti funzionali sono più o meno rimaste invariate. Piccole modifiche sono state apportate al canale per lo spurgo dell'aria dall'impianto frenante, modifiche atte a una migliore la facilità dell'utilizzo di questa e modifiche ai supporti dei perni delle pastiglie che hanno ora un design con volume ridotto e che sfrutta le nervature per il sostegno.

Inoltre, sono state fatte importanti modifiche alla parte dei condotti dell'olio. Infatti, visto che si è stata scelta una direzione di stampa differente, le sezioni dei condotti sono variate riorientando l'apice nella medesima direzione di accrescimento. La modifica più importante è stata fatta a livello dei condotti che alimentano la parte sospesa della pinza. Ora, questi sono integrati con gli elementi strutturali e oltre a dover avere una fluidodinamica migliore dovrebbero anche contribuire alla struttura del corpo pinza. Ultima ma non meno importante variazione è stata portata ai fondi presenti in contrapposizione ai tappi per il montaggio dei pompanti. Visto che le deformazioni maggiori si presentavano in questa zona sono stati rinforzati.



Figura 97. Pinza freno versione tre vista frontale

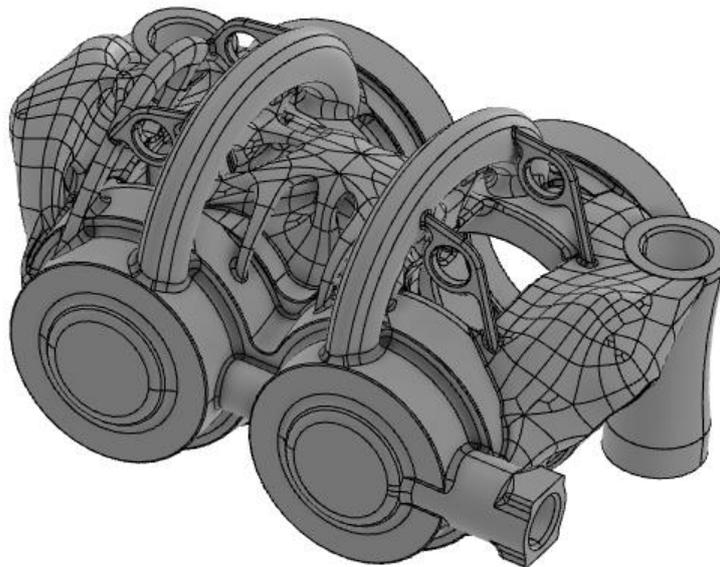


Figura 98. Pinza freno versione tre vista posteriore

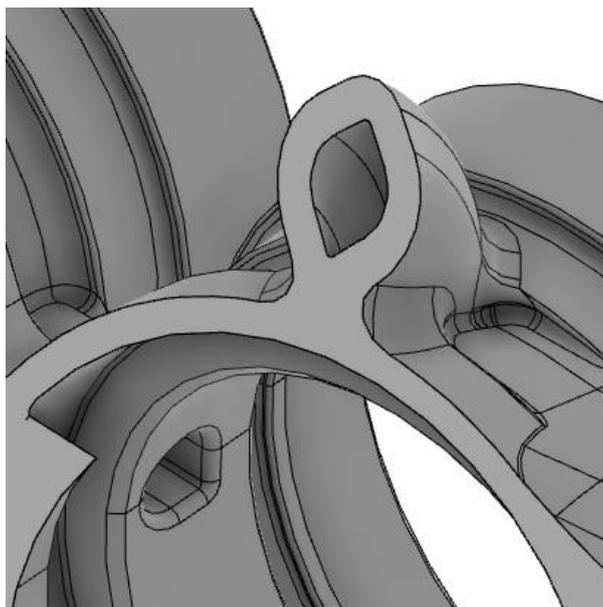


Figura 99. Dettaglio condotti olio pinza freno versione tre

Nell'immagine precedente si nota la nuova sezione del condotto che funge anche da nervatura. In questo caso la sezione di passaggio è stata maggiorata e insieme a questo è cresciuto il momento di inerzia flettente della sottostruttura. Il componente così modellato presenta un peso di 184 g.

4.10. Analisi statica terza versione

Questa analisi è stata condotta del tutto con parametri, carichi e vincoli uguali a quelli impostati sulla seconda versione.

Anche in questo caso, come si nota dai grafici in figura 100, 101 e 102, le distribuzioni dei valori tensioni equivalenti di Von Mises sono al di sotto del σ_{amm} . Come nel caso precedente, esiste un massimo globale di area infinitamente ridotta che supera i valori di σ_{amm} . Anche in questa analisi possiamo dire che il picco di tensioni è dovuta a errori di discretizzazione in quanto gli elementi interessati da questi valori sono poche unità.

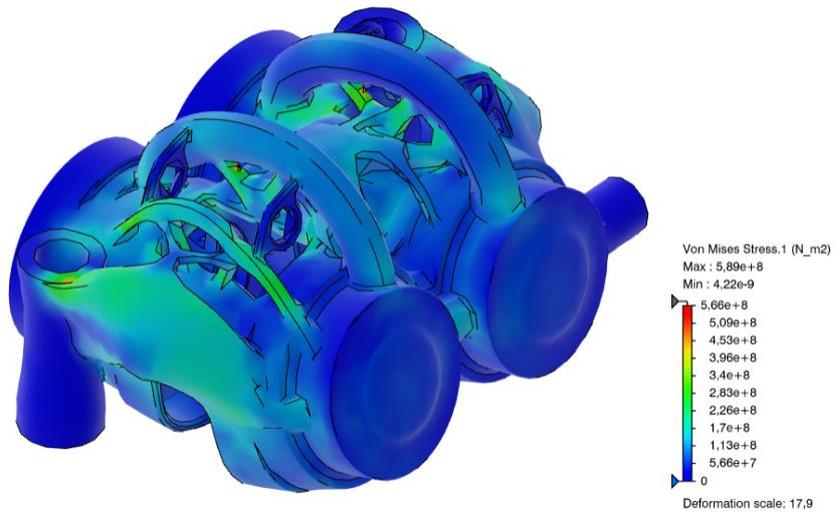


Figura 100. Tensioni equivalenti pinza terza versione vista posteriore

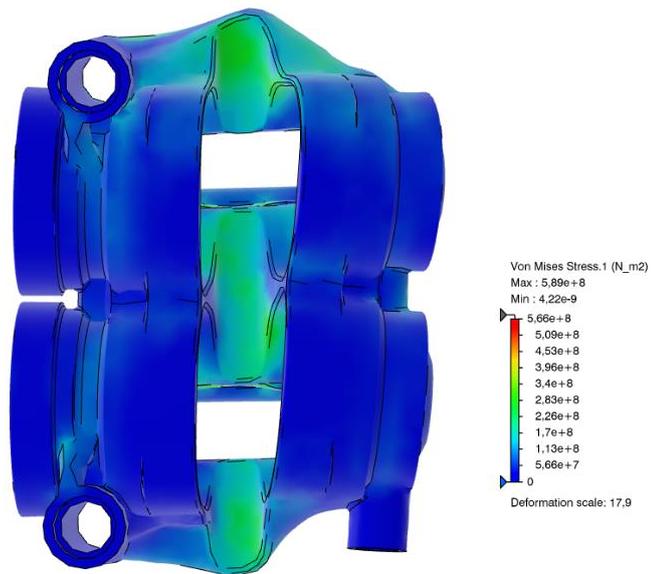


Figura 101. Tensioni equivalenti pinza terza versione vista inferiore

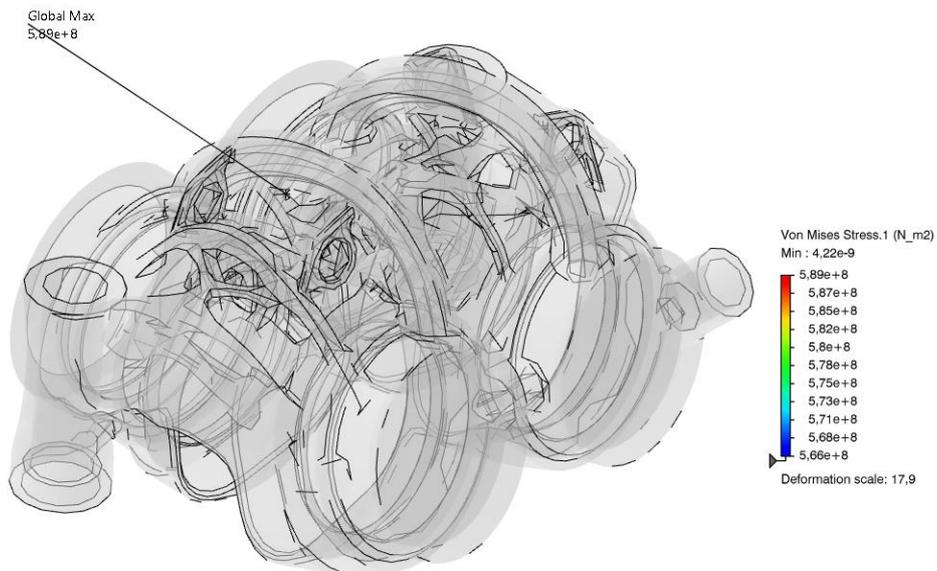


Figura 102. Cut-off tensioni equivalenti pinza terza versione

Possiamo notare inoltre una migliore distribuzione delle tensioni e dovuto a un design con nervature di dimensioni superiori e raccordi tra le strutture molto più generosi.

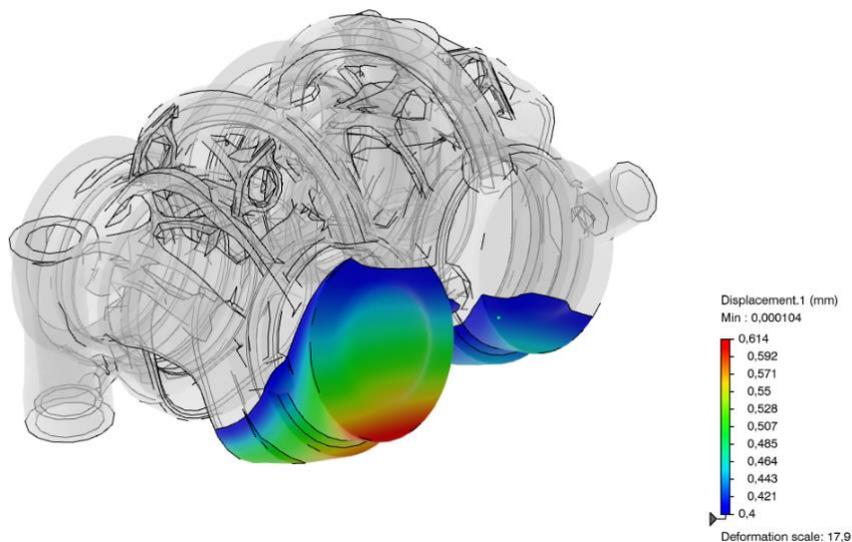


Figura 103. Deformazioni pinza terza versione

Dal punto di vista delle deformazioni il risultato è migliorato in quanto sono state raggiunti spostamenti massimi di 0,614 mm in confronto ai 0,768 mm della versione precedente.

4.11. Risultati modellazione

In questa sezione andremo a valutare e validare i vari design ottenuti ad esclusione della prima versione che non è integralmente funzionale, in quanto l'ultimo design presenta ottimi risultati a livello di deformazioni e stato tensionale ma risulta più pesante se confrontato con il design della seconda versione.

Prenderemo quindi in considerazione il corpo pinza originale, la versione due e tre. Inoltre, i parametri di confronto saranno il peso, caratteristica che va a migliorare le prestazioni del gruppo sospensione, e le deformazioni, che sono responsabili delle sensazioni che riceve il pilota quando aziona l'impianto, sia a temperatura di 220 °C che di 20°C. Le analisi strutturali a temperatura ambiente non sono state riportate in modo esplicativo in questo elaborato, ma sono state eseguite senza variare alcun parametro di carico e discretizzazione, ma soltanto cambiando le caratteristiche dei materiali. Inutile sottolineare che in tutte le analisi le geometrie rientrano nei vincoli di tensione e deformazione visto che risultano accettabili anche a temperature di 220 °C.

	<i>Originale</i>	<i>V2</i>	<i>V3</i>
<i>Peso [g]</i>	248	176	184
<i>Riduzione di peso [%]</i>	-	29,03	25,81
<i>Deformazione 220°C [mm]</i>	0,675	0,768	0,614
<i>Riduzione deformazione 220°C [%]</i>	-	+13,78	-9,03
<i>Deformazione 20°C [mm]</i>	0,555	0,694	0,551
<i>Riduzione deformazione 20°C [%]</i>	-	+25,05	-0,72

Dalla tabella si può notare che la pinza freno versione due sotto il punto di vista della riduzione del peso raggiunge risultati migliori rispetto sia al corpo pinza originale. Ma dal punto di vista delle deformazioni è di molto inferiore al design originale sia a temperatura ambiente che a temperatura di esercizio.

Invece, per quanto riguarda il corpo pinza nella sua terza versione, porta solo a miglioramenti, sia dal punto di vista del peso che degli scostamenti rispetto alla pinza originale. Sebbene ci sia circa un 3% a favore della riduzione di peso per la pinza freno versione due si preferisce continuare lo sviluppo dell'ultimo design dato che oltre a contenere il peso questo limita anche le deformazioni rispetto al corpo di serie. La pinza versione due è comunque un risultato accettabile visto che gli scostamenti sono nello stesso ordine di grandezza.

4.12. Modellazione grezzo di stampa e ingegnerizzazione

Una volta definito il design del componente da realizzare si passa alla parte di ingegnerizzazione. Questa fase prevede la realizzazione di sovrametalli laddove vi sia la necessità di avere una tolleranza dimensionale e delle proprietà superficiali adeguate. Altre zone che ricevono modifiche sono tutte quelle aree critiche per il processo di produzione.

La modellazione del grezzo di stampa e la parte di ingegnerizzazione sono un processo che si sviluppa in parallelo, in quanto in base alla geometria da realizzare vanno creati dei supporti che potrebbero finire su aree dove vi sia la necessità di un'ottima finitura superficiale, quindi ci sarà necessità di creare del sovrametallo in queste aree che sarà poi rimosso tramite macchina utensile.

Per avere dei fori per lo staffaggio della pinza sul porta mozzo in tolleranza è stato deciso di realizzarli pieni con del sovrametallo anche sulle battute in direzione assiale come si può ben vedere nella figura 104, in quanto il processo di stampa può portare a distorsioni indotte da tensioni residue da stress termico. Per questo, la prima presa in macchina utensile sarà realizzata tramite il montaggio con apposite morse. Queste morse andranno a serrarsi sui tre lembi creati appositamente per la prima lavorazione. Una volta realizzati i fori, il componente verrà riposizionato e serrato in macchina con l'utilizzo di queste aperture per eseguire tutte le lavorazioni interne al corpo e rimuovere i tre lembi esterni.

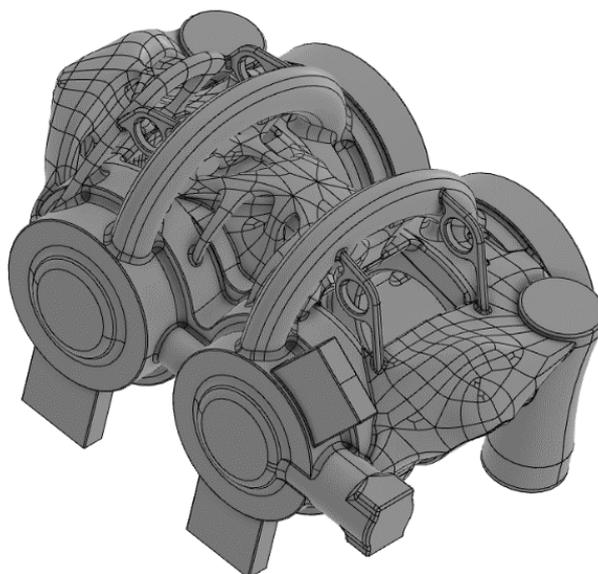


Figura 104. Vista posteriore grezzo di stampa

Oltre a sigillare i fori, e creare questi lembi sono state apportate ulteriori modifiche. Ad esempio, sono state rimosse tutte le gole per o-ring e tenute presenti nella cavità interna ed è stato aggiunto del sovrmetallico sulle superfici cilindriche dove scorreranno i pompanti. È stato aggiunto del sovrmetallico anche nella parte anteriore, dove vengono posizionati i tappi, sia in direzione assiale, per poi creare un piano di appoggio, sia in direzione radiale, in modo da avere sovrmetallico per creare la filettatura. Inoltre, il canale per lo spurgo dell'aria è stato totalmente riempito visto che verrà poi lavorato per alloggiare una filettatura e un cono di battuta per la vite di spurgo.

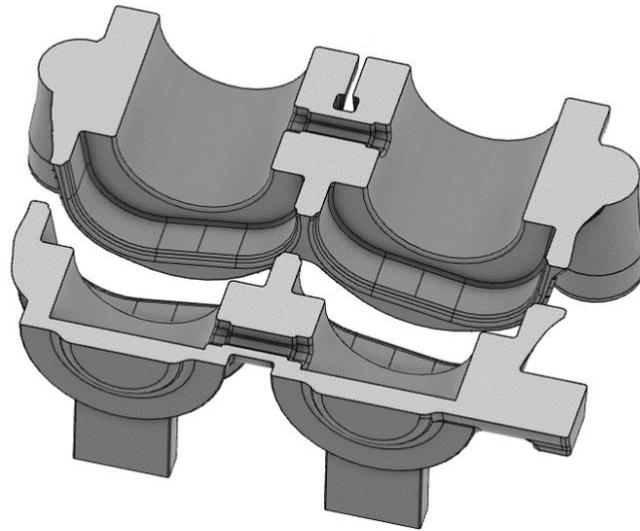


Figura 105. Vista in sezione grezzo di stampa

Definito il grezzo di stampa, tramite la conversione in un file STL si è portata la geometria sul software di pre processo. Nel nostro caso abbiamo utilizzato Materialise Magics.

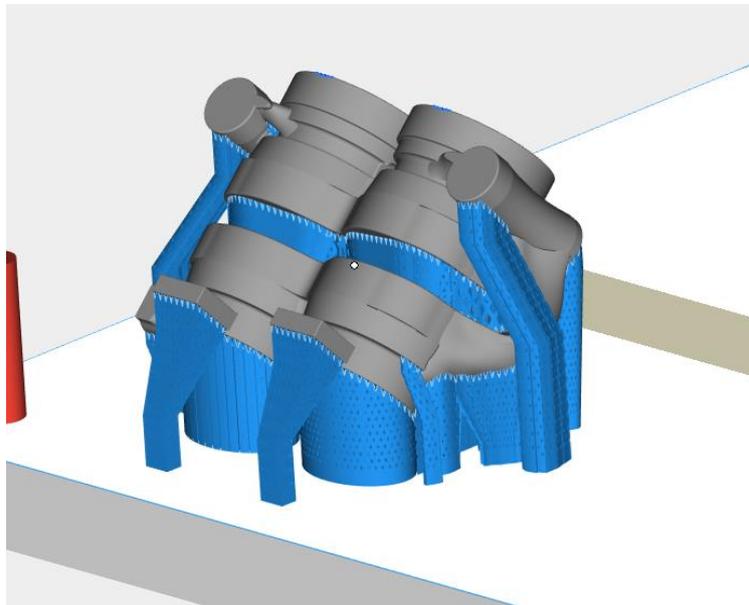


Figura 106. Vista posteriore supporti

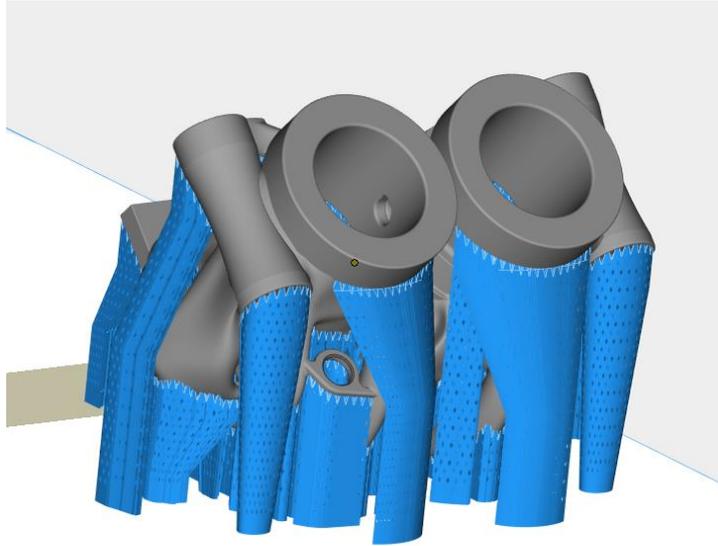


Figura 107. Vista anteriore supporti

Una volta orientato il componente e definiti tutti i supporti, abbiamo valutato se questi ultimi andassero ad attaccarsi in superfici di interesse. In questo caso nella parte interna, come si nota dalla figura 108, dei supporti finivano sulle superfici di contatto con il fianco della pastiglia. Si nota anche dalla stessa immagine che il canale progettato per essere autossupportante è stato riconosciuto come tale anche dal software e non sono stati inseriti dei supporti in questa zona.

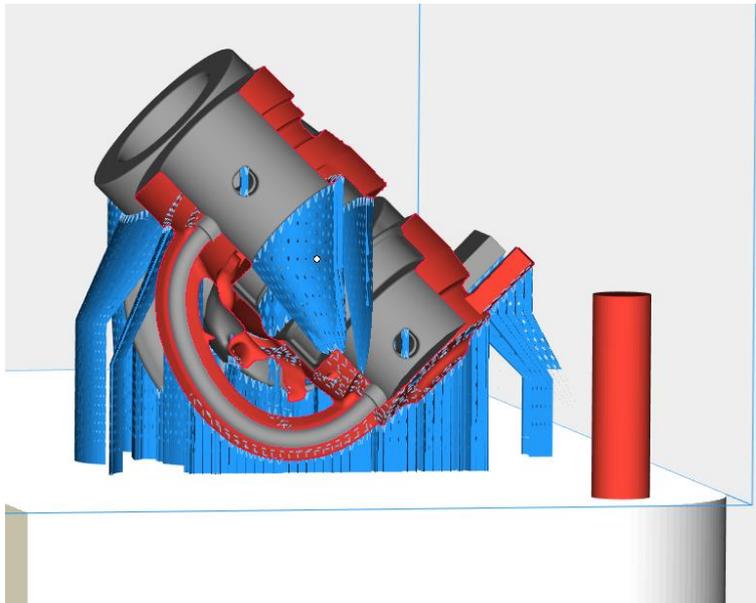


Figura 108. Vista in sezione supporti

Visto il problema del posizionamento dei supporti, si è tornati alla fase di modellazione del grezzo e sono stati aggiunti dei sovrametalli in modo che questi possano essere successivamente rimossi in macchina utensile e l'adesione del supporto in quella zona non crei alcun problema.

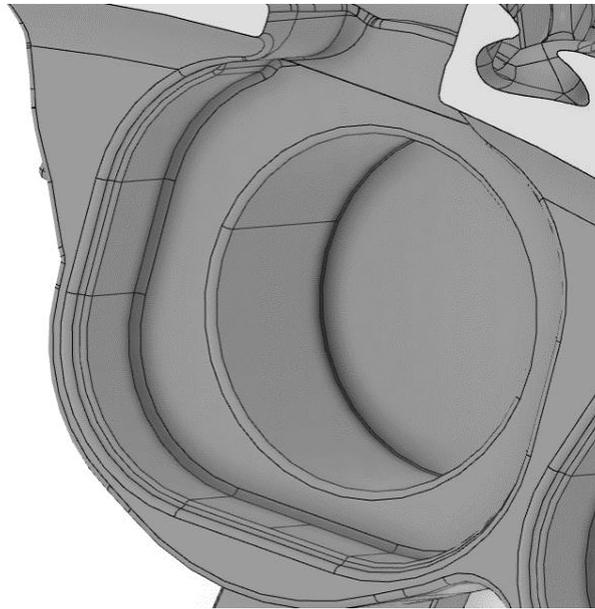


Figura 109. Dettaglio sovrametallo sedi pastiglie

Rimodellata la parte, questa è stata nuovamente esportata come file STL e reimportata sul software di pre processo. Non avendo una gerarchia geometrica si è dovuto realizzare tutta la parte di ingegnerizzazione dall'inizio. I risultati della nuova ingegnerizzazione sono i medesimi di quella precedente.

Insieme alla realizzazione del grezzo di stampa è stato generato un disegno tecnico per le lavorazioni e le tolleranze richieste. Questo è consultabile in appendice A.

4.13 Cambio materiale pistoncini

Per ridurre ulteriormente il peso di tutto il gruppo si è deciso di cambiare materiale anche per i pompanti. Questi in origine sono prodotti in acciaio con un peso di 24 grammi. Oltre a ridurre il peso è necessario cambiare materiale in quanto la pinza freno di serie era costruita in alluminio che ha dei coefficienti di espansione termica superiori a quelli dell'acciaio. Se mantenessimo pompanti in acciaio con un corpo della pinza freno in titanio non sarebbe da escludere un possibile grippaggio a

temperature di esercizio. Per questo si è deciso di costruire dei pistoncini in titanio Ti6Al4V da barra con geometria omologa a quelli originali producendoli per asportazione di truciolo.

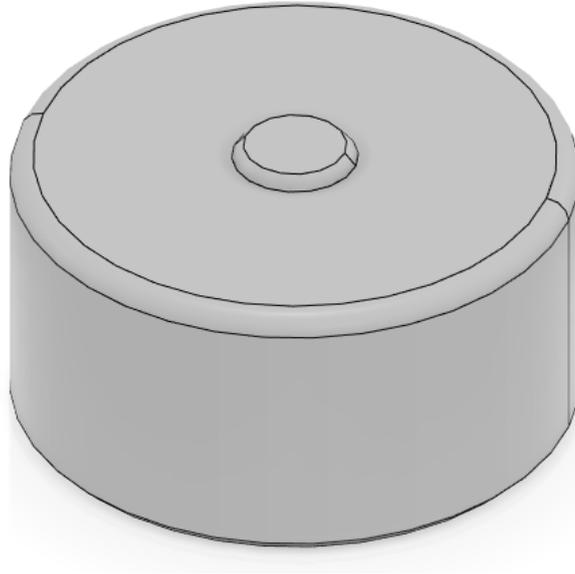


Figura 110. Pompante

Per validare questo cambio di materiale è stata utilizzata un'analisi agli elementi finiti. L'analisi è stata svolta imponendo una pressione di 100 Bar su tutte le superfici a contatto con il circuito oleodinamico e vincolando le superfici del pistoncino nella parte inferiore dove avviene il contatto con la pastiglia. Come si può vedere dai grafici riportati nelle figure sottostanti, le deformazioni sono praticamente inesistenti e le tensioni equivalenti di Von Mises non superano i 57 MPa.

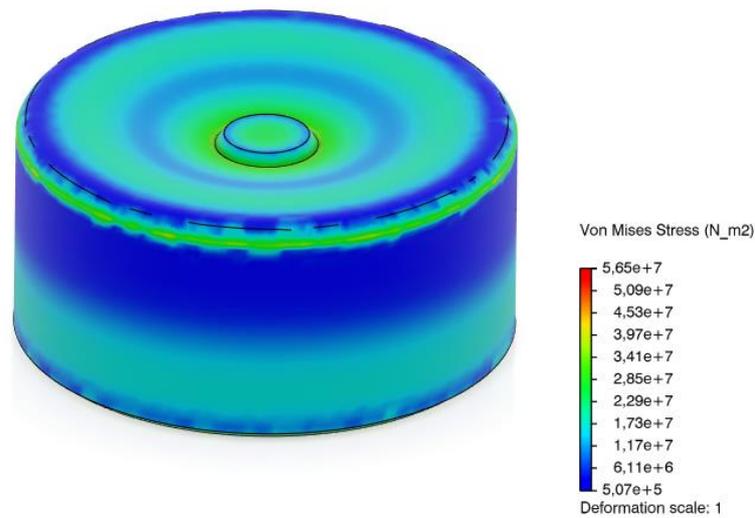


Figura 111. Tensioni equivalenti pompante

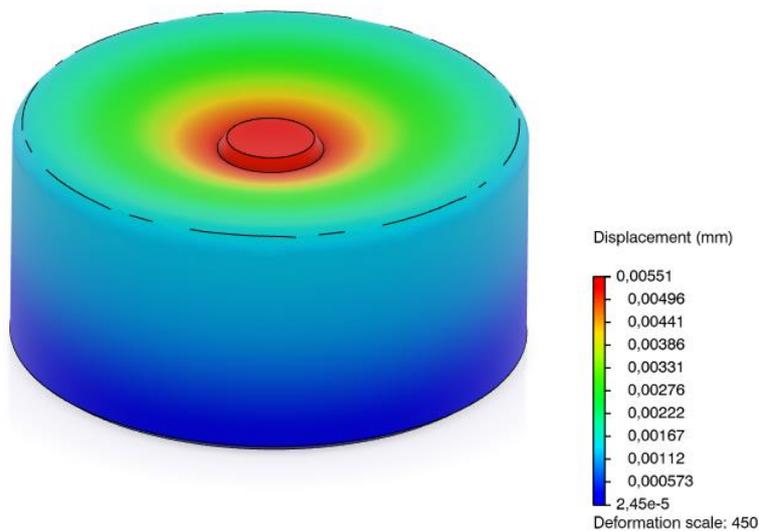


Figura 112. Deformazioni pompante

I nuovi elementi costruiti in titanio pesano 17 grammi, circa il 29% in meno del componente di serie. Inoltre, il vantaggio va esteso su tutti e 4 i pompanti con un risparmio complessivo di 48 grammi.

4.14. Trattamenti superficiali parti striscianti

L'adozione di pistoncini in titanio che scorrono all'interno di un corpo pinza in titanio, rende l'accoppiamento tribologicamente critico. Il titanio ha la particolare

caratteristica di presentare un comportamento adesivo, bassa resistenza all'usura e forte tendenza al grippaggio. Inoltre, a causa della sua configurazione atomica degli elettroni esterni la sua lubrificazione è molto inefficiente.

Per ovviare a queste problematiche che portano a coefficienti di attrito instabili e rapide usure, si possono utilizzare rivestimenti superficiali che vanno a modificare la natura delle superfici.

Nelle figure 113 e 114 sono evidenziate le superfici dove ci interessa avere una buona caratteristica tribologica.

Il trattamento superficiale è stato scelto grazie alla consulenza di aziende esterne che si occupano direttamente della realizzazione di questi riporti.

Vista la geometria complessa del corpo pinza si è ritenuto idoneo un trattamento con Nickel chimico con basso contenuto di fosforo.

Il processo di nichelatura chimica consiste in una deposizione di nichel senza l'uso di corrente elettrica: la presenza nella soluzione di trattamento di un riducente chimico innesca una reazione autocatalitica controllata, con una codeposizione di fosforo.

Proprio per la deposizione tramite bagno chimico è possibile raggiungere le cavità interne della pinza, cosa non possibile con un trattamento PVD, che prevede la trasformazione del materiale di riporto da una fase solida o liquida a una fase gassosa e il trasporto di questa fase tramite fascio elettronico che colpisce le superfici da trattare depositandone la fase gassosa.

In questo processo è possibile regolare la deposizione di fosforo, alti contenuti di questo sono richiesti per applicazioni dove la resistenza alla corrosione è il requisito principale, mentre come nel nostro caso, bassi contenuti di fosforo garantiscono buona resistenza all'usura e durezza superficiale.

Il trattamento da noi scelto viene chiamato commercialmente Niplate 600® ed è realizzato dall'azienda Micron. Il trattamento prevede un riporto di 20 ± 2 μm di spessore, una durezza di 1000 ± 50 HV e coefficienti di attrito di $0,5 \pm 0,1$.

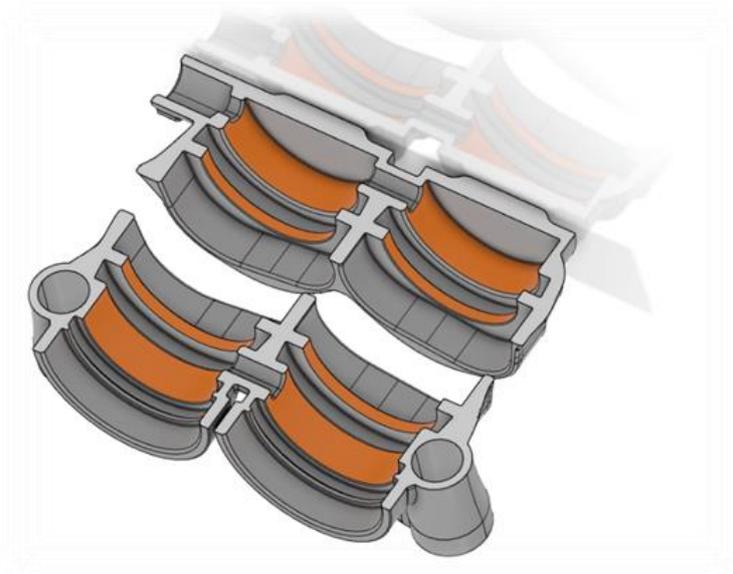


Figura 113. Superfici di contatto tribologico corpo pinza

Per quanto riguarda il rivestimento sulle superfici dei pompanti è stato optato un trattamento DLC, Diamond Like Carbon, un rivestimento innovativo a base carbonio con ampio spettro di applicazione e permette di fronteggiare problemi legati all'abrasione, allo scorrimento e all'aggressione chimica.

Il DLC viene depositato mediante tecnologia PA-CVD (Plasma Assisted-Chemical Vapour Deposition) che permette di mantenere bassa la temperatura di deposito e allo stesso tempo di garantire un'ottima adesione.

L'elevata durezza ed il basso coefficiente d'attrito nascono dalla simultanea presenza di Carbonio ibridizzato sp² (Grafite) e sp³ (Diamante).

Oltre alla grande durezza superficiale e il bassissimo coefficiente di attrito, il rivestimento DLC è stato scelto anche perché, in caso di non compatibilità con il rivestimento a base di nickel utilizzato sul corpo pinza, è di facile rimozione e non c'è la necessità di scartare il pezzo.

Il trattamento da noi preso in considerazione è prodotto da Lafer, con spessori di 5±1 µm, durezza di 1800-2600 HV e coefficienti di attrito di 0,1.

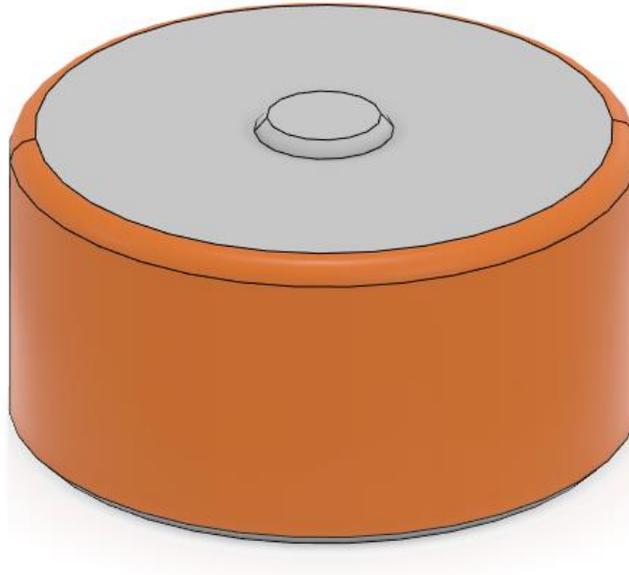


Figura 114. Superfici di contatto tribologico pompante

4.15. Carico termico e codice Matlab

Un'ultima considerazione è stata fatta riguardo alle temperature che il corpo pinza freno può subire a causa della generazione di attrito da parte dei corpi striscianti.

Il calcolo analitico è stato svolto nell'ambiente di calcolo Matlab e i dati sono stati importati utilizzando manuali di componenti per attrito di freni commerciali.

Il calcolo è stato eseguito discretizzando il tempo e imponendo un ciclo fittizio di accelerazione, frenata e veleggio. Questo ciclo è stato ripetuto fino a quando non si è trovato un andamento stabile delle temperature.

Sono stati usati dati provenienti dal CAD per quanto riguarda superfici di scambio termico, volumi e masse e dati termici sui materiali provenienti dalle librerie di simulazione di 3D Experience.

Va detto che questo modello è del tutto qualitativo in quanto non vengono valutati gli scambi termici per conduzione verso il porta mozzo, non viene valutato l'irraggiamento termico da parte del disco freno e le superfici di scambio termico lavorano tutte con un coefficiente di scambio termico convettivo costante, mentre nella realtà questo andrebbe ricavato da simulazioni CFD. Il codice può essere visionato in appendice C.

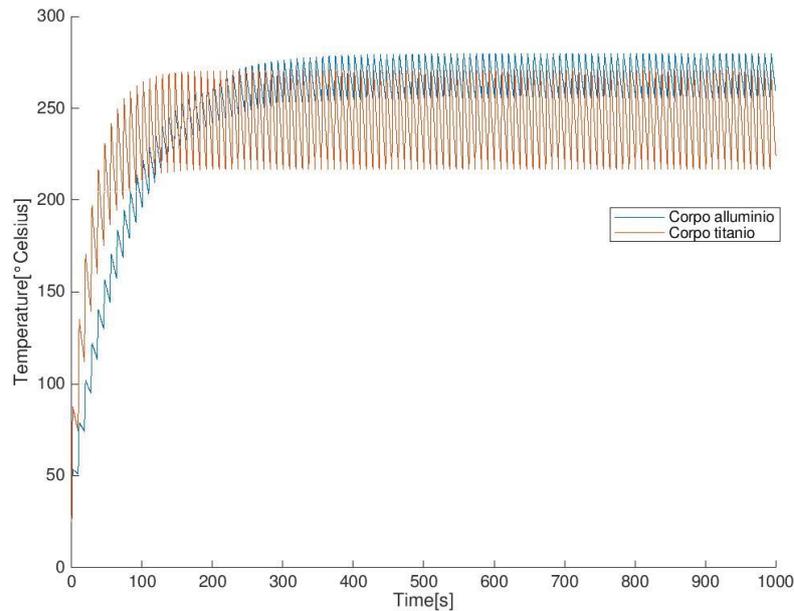


Figura 115. Andamento temperatura in funzione del tempo copo pinza alluminio e titanio

Il modello è abbastanza vicino alla realtà in quanto le temperature della pinza freno originale si distaccano di poco da quelle misurate. Si può notare che il corpo pinza realizzato in titanio ha un'inerzia termica molto più bassa in quanto ha molta meno massa e anche in ragione di ciò le fluttuazioni a regime sono molto più ampie. La temperatura media però è più bassa in quanto il codice valuta un rapporto superfici volume molto più alto nel corpo in titanio, quindi visto che l'area di scambio termico è di molto maggiore in quest'ultimo la potenza dissipata per convezione è più alta. Il fattore di scambio termico per convezione andrebbe rivalutato in base all'esposizione delle superfici all'aria più fredda. Nonostante ciò, il titanio porta diversi svantaggi a livello termico, vantaggi che però possono essere livellati con un design dall'altissimo rapporto superfici volume.

5. Conclusioni

Per concludere questo elaborato è d'obbligo dover trarre delle conclusioni e degli spunti per continuare lo studio sia per la pinza freno sia per l'additive manufacturing. L'elaborazione della pinza è stato un discreto successo. Oltre alla riduzione del peso del corpo pinza, il complessivo con tutte le componenti, quali tenute, vite di spurgo, pistoncini, pastiglie e perni pastiglie ha portato una riduzione del peso da 405 grammi del complessivo originale a 302 grammi. Questa riduzione del 25% è stata ottenuta nonostante diversi componenti siano rimasti i medesimi. Inoltre, insieme alla diminuzione del peso, si è ottenuto un corpo più rigido e senza problemi termo-strutturali.

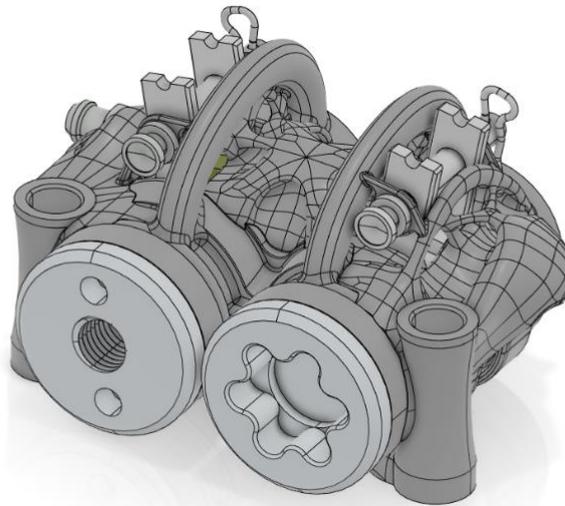


Figura 116. Pinza freno completa

Per completare lo studio sarebbe l'ideale sviluppare la parte di dissipazione del calore, tramite simulazioni CFD. Un altro punto interessante potrebbe essere quello della caratterizzazione tribologica dei contatti striscianti, per avere la conferma dell'effettiva efficacia dei rivestimenti utilizzati. Per finire, si potrebbero studiare ulteriori design, diminuire gli spessori minimi delle pareti, sovrastrutture ancora più efficaci, aumentare i rapporti superfici volume per aumentare la dissipazione termica o addirittura studiare

un'aerodinamica, tramite condotti che trasportano il flusso d'aria nelle zone di interesse, per avere un raffreddamento forzato grazie ai flussi d'aria che investono la vettura.

Invece per quanto riguarda l'additive manufacturing, questo studio ha dimostrato la grande potenzialità della tecnologia visti i risultati raggiunti conseguiti da una persona con nessuna esperienza nel settore.

Il design for additive e l'ottimizzazione topologica uniti creano la possibilità di realizzare strutture particolarmente prestanti. Per questo motivo credo, che la formazione dei giovani ingegneri debba essere focalizzata oltre che sulle tradizionali tecniche di produzione anche su questa nuova tecnologia che con il passare degli anni sta trovando applicazioni che con altre tecniche non sarebbero possibili.

Un buon metodo per prevedere gli sviluppi futuri di queste tecnologie è guardare i progressi fatti negli anni passati. Infatti, negli ultimi 30 anni, si è consolidata l'idea che costruire parti per strati partendo da un modello virtuale 3D non è solo fattibile, ma potrebbe andare a compensare le lacune delle altre tecnologie produttive. Non credo infatti che questa tecnologia soppianderà le correnti tecnologie, come invece viene condiviso in diversi articoli di divulgazione tecnica, ma andrà a coesistere aumentando le possibilità di designer e ingegneri.

Come discusso il 16 maggio 2019 da CECIMO, ossia European Association of the Machine Tool Industries and related Manufacturing Technologies, un'associazione che raccoglie al suo interno un consorzio che detiene il 97% di tutta la produzione europea, ossia il 33% di quella mondiale, è fondamentale mantenere il passo con l'oriente su questa nuova tecnologia. Sempre CECIMO afferma che il potenziale di questa nuova tecnologia potrebbe portare a una nuova idea di produzione, non più incentrata in macro fabbriche, ma dislocando la produzione in tante micro fabbriche o addirittura presso le abitazioni dei privati, realizzando una specie di "teletrasporto" dove le merci non viaggiano più sui vari mezzi di trasporto, ma vengono realizzate immediatamente sul luogo di utilizzo tramite la condivisione di dati via Internet.

Inoltre, non è assurdo credere che un giorno i pronto soccorso negli ospedali possano essere stazioni mobili in cui i materiali biologici sono sintetizzati e stampati in 3D su ferite per il recupero in tempo reale delle lesioni.

Questa tecnologia apre qualsiasi tipo di opportunità, dalla più tradizionale alla più paradossale. Per questo, come già detto, è fondamentale insegnare ai nuovi ingegneri le tecniche e le accortezze per l'utilizzo di queste e continuare a studiare, testare e sviluppare questa tecnologia, insieme a tutte le altre che fanno parte del mondo dell'additive manufacturing, per renderla sempre più alla portata di tutti, sempre più economica, sempre più prevedibile e con un campo di applicazione sempre più vasto.

Riferimenti bibliografici e sitografia

- Fred Puhn, *Brake Handbook*, HP Books, U.S.A., 1985.
- Rudolf Limpert, *Brake Design and Safety*, S.A.E.International, U.S.A., 1999.
- ASTM International, *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, West Conshohocken PA U.S.A., 2012.
- Terry Wohlers e Wohlers Report, *Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry - Annual Worldwide Progress Report*, Fort Collins CO U.S.A., 2013.
- Gibson, D.W. Rosen E B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, Springer Science Business Media, U.S.A., 2010.
- Li Yang, Keng Hsu e Brian Baughman, *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*, Springer Science Business Media, UK, 2013.
- Anurag Dey, *Thermal analysis of disk brake in order to study the brake fluid vaporization phenomenon of a formula sae*, U.S.A., 2015.
- Lucas Travi Farias, *Design of a brake caliper using topology optimization integrated with Direct Metal Laser Sintering*, S.A.E.International, BR, 2015.
- Haider Ali, *In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of Selective Laser Melted Ti6Al4V*, UK, 2017.
- Bianca Maria Colosimo e Marco Grasso, *A Study on Quality Control Problems in Additive Manufacturing*, Milano IT, 2014.
- Julien Gardan, *Additive manufacturing technologies: state of the art and trends*, U.S.A., 2015.

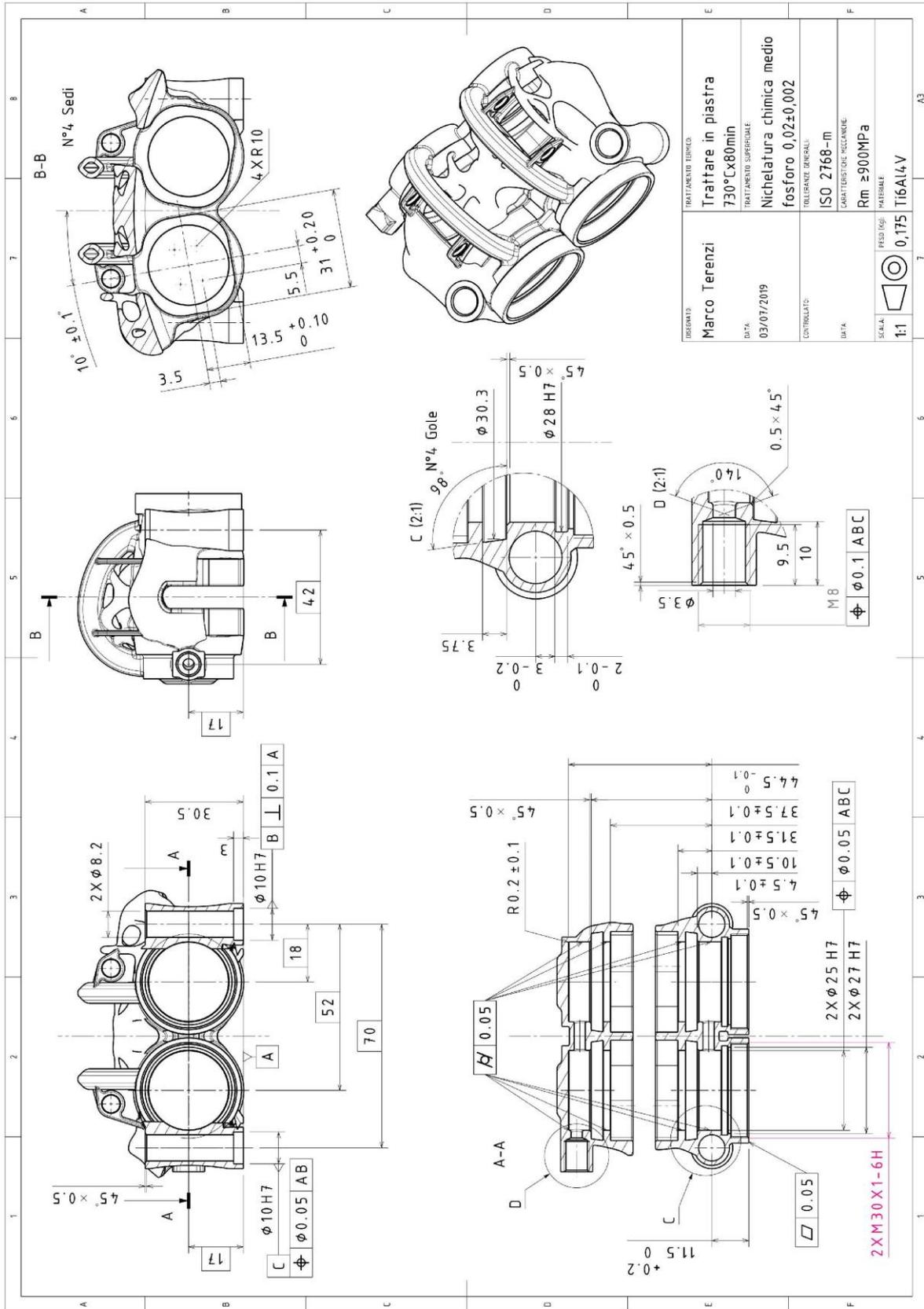
- Erica Liverani, *Studio e ottimizzazione del processo di fabbricazione additiva (SLM) per applicazioni in ambito biomedicale: produzione di protesi e strutture reticolari*, Bologna IT, 2017.
- Víctor Algara Muñoz, *Analysis of the optimal parameters for 3D printing aluminum parts with a SLM 280 machine*, Barcellona ES, 2017.
- Jacopo Carlo Sisti, *Effetto dei principali parametri di processo sulla stabilità della pozza fusa durante un processo additivo di una lega di alluminio*, Torino IT, 2018.
- Tobias Maconachie e Martin Leary, *SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges*, U.S.A., 2019.
- Christoph Klahn, Bastian Leutenecker, Mirko Meboldt, *Design for Additive Manufacturing – Supporting the Substitution of Components in Series Products*, Zurigo CH, 2014.
- Sebastian Hällgrena., Lars Pejryd, Jens Ekengren, *(Re)Design for Additive Manufacturing*, SE, 2016.
- Vahid Shobeiri, *Structural Topology Optimization Based on the Smoothed Finite Element Method*, IR, 2016.
- Erin Komi, Petteri Kokkonen, Mikko Savolainen, *Design for Metal AM*, FI, 2017.
- Grazia Gesualdo e Sabino Del Vecchio, *Ottimizzazione topologica e Additive Manufacturing (AM) di un componente racing in ambito motociclistico*, Torino IT, 2014.
- R. F. Muraca e J. S. Whittick, *Materials data handbook: Aluminum Alloy 7075*, Nasa, U.S.A., 1972.
- Gilbert Chahine, Pauline Smith e Radovan Kovacevic, *Application of Topology Optimization in Modern Additive Manufacturing*, U.S.A., 2010.
- Aremu A., Ashcroft I. e Hague R., *Suitability of SIMP and BESO Topology Optimization Algorithms for Additive Manufacturing*, UK, 2010.
- *Introduction to additive manufacturing technology*, EPMA, UK, 2019.

- R. C. Sachdeva, *Fundamentals of Engineering Heat and Mass Transfer*, IN, 2009.
- *Manuale Tecnico Attrito*, METELLI, IT, 2015.
- Nicolas Sergent, Marko Tirovic e Jeronimas Voveris, *Design optimization of an opposed piston brake caliper*, UK, 2013.
- Qifei Jian e Yan Shui, *Numerical and experimental analysis of transient temperature field of ventilated disc brake under the condition of hard braking*, Cn, 2017.
- *Bosch automotive handbook*, Robert Bosch GmbH, DE, 2008.
- *DLC Lafer*, 23/09/2019, <http://www.lafer.eu/i-nostri-rivestimenti/dlc/>
- *Additive Manufacturing Technologies: An Overview*, 23/09/2019, <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview#/vat-photopolymerization>
- *Rivestimenti DLC*, 23/09/2019, <http://www.sts-group.it/catalogo-rivestimenti-dlc/>
- *Il processo di nichelatura chimica dei metalli*, 23/09/2019, <https://galvanicapaciotti.it/index.php/it/nichelatura-chimica>
- *Come funziona il trattamento PVD per i rivestimenti a film sottile*, 23/09/2019, <https://www.cmgroupsrl.eu/it/come-funziona-il-trattamento-pvd-rivestimenti-a-film-sottile>
- *Cos'è il PVD?*, 23/09/2019, <https://www.protim.it/rivestimenti-pvd/>
- *CECIMO Additive Manufacturing and 3D Printing European Conference 2016*, 23/09/2019, <http://www.metalsalliance.eu/it/2016/05/cecimo-additive-manufacturing-and-3d-printing-european-conference-2016/>
- *Design Guidelines - Titanium - Metal 3D Printing*, 23/09/2019, <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/titanium/design-guidelines>
- *How to design parts for Metal 3D printing*, 23/09/2019, <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-metal-3d-printing>

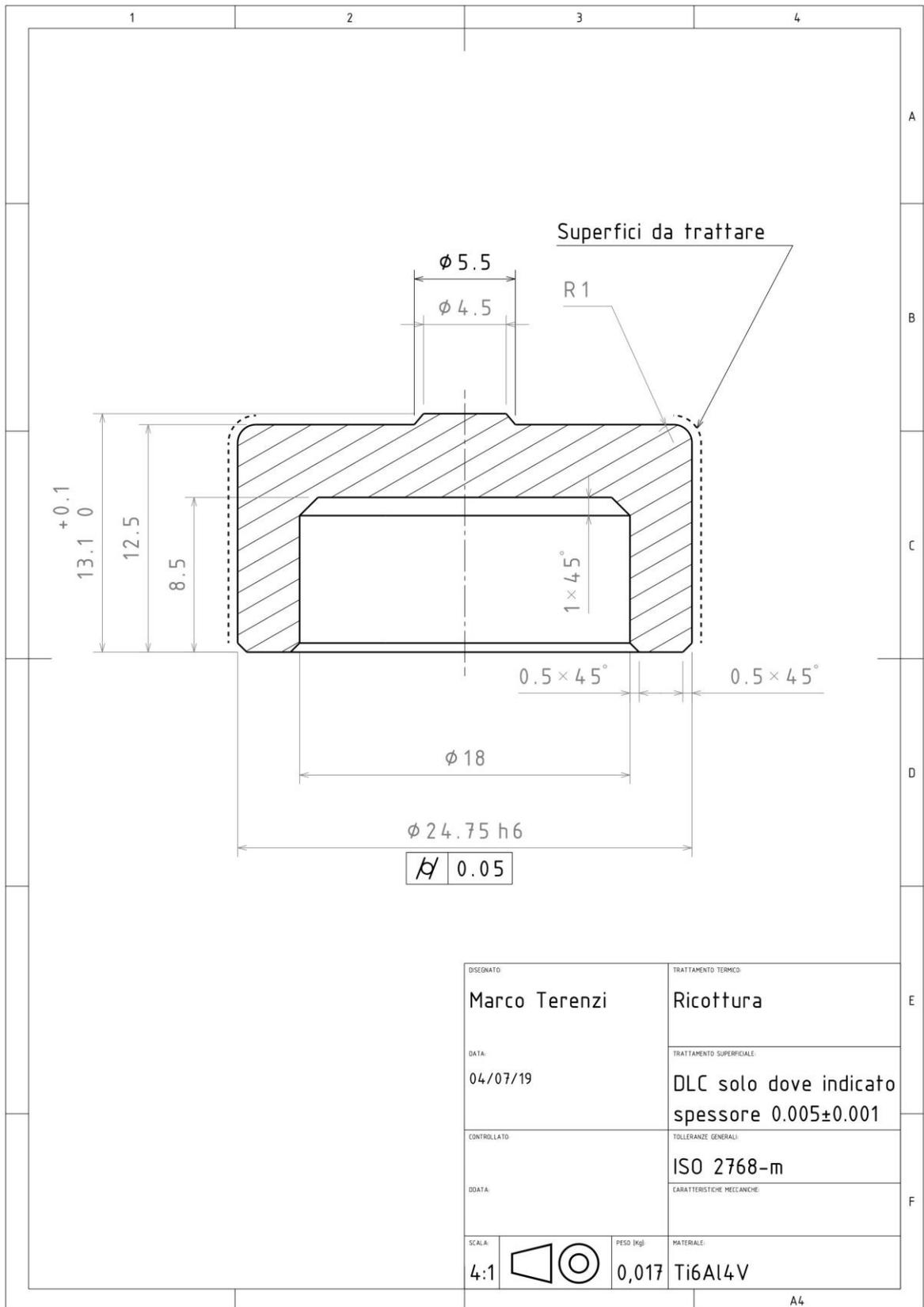
- *3D printing additive*, 23/09/2019,
<https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing>

Appendice

Appendice A



Appendice B



Appendice C

%Reset

```
clc
close all
clear all
```

%Dati

```
Tamb=25;
Tiniziale=25;
Wcar=3000;
g=9.81;
gees=-1.5;
Vmax=29.17;
Vmin=8.33;
Cp1=896;
Cp2=565;
A1=.0174;
A2=.0195;
M1=.248;
M2=.176;
h=150;
Fv=1;
Fe=.9;
SB= 5.67e-8;
FvFeSB=Fv*Fe*SB;
Tstep=0.1;
Tfinal=1000;
X= zeros (5,Tfinal/Tstep);
X(1,1)=Vmax;
X(3,1)=0;
X(4,1)=Tiniziale;
X(5,1)=Tiniziale;
Gdec=-1.5*g;
Gacc=0.5*g;
tset=0;
```

%Calcolo

```
for t=0:Tstep:Tfinal
i=round((t*10)+1);
X(2,i)=t;
if X(1,i)>=Vmax
X(1,i+1)=X(1,i)+Gdec*Tstep;
X(3,i+1)=X(3,i) - (Wcar*.5*.67)*X(1,i)*gees;
tset=0;
```

```

elseif Vmax>X(1,i) && X(1,i)>Vmin && X(1,i)<X(1,i-1)
X(1,i+1)=X(1,i)+Gdec*Tstep;
X(3,i+1)=X(3,i) - (Wcar*.5*.67)*(X(1,i+1)-X(1,i))*gees;
elseif Vmax>X(1,i) && X(1,i)>Vmin && X(1,i-1)<X(1,i)
X(1,i+1)=X(1,i)+Gacc*Tstep;
X(3,i+1)=0;
elseif X(1,i)<=Vmin && tset<=30
tset = tset+1;
X(1,i+1)=X(1,i);
X(3,i+1)=0;
elseif X(1,i)<=Vmin && tset>30
X(1,i+1)=X(1,i)+Gacc*Tstep;
X(3,i+1)=0;
end
X(4,i+1)=(X(3,i)*(1-.85)-(h*A1*(X(4,i)-Tamb))-(FvFeSB*A1*((X(4,i)+273.15)^4-
(Tamb+273.15)^4)))*0.1/(Cp1*M1)+X(4,i);
X(5,i+1)=(X(3,i)*(1-.85)-(h*A2*(X(5,i)-Tamb))-(FvFeSB*A2*((X(5,i)+273.15)^4-
(Tamb+273.15)^4)))*0.1/(Cp2*M2)+X(5,i);
end

%Grafico
z=Tfinal*10+1;

hold on
plot (X(2,1:z),X(4,1:z))
plot (X(2,1:z),X(5,1:z))
xlabel('Time[s]')
ylabel('Temperature[°Celsius]')
legend('Corpo alluminio','Corpo titanio')

```