

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

## Realizzazione Ruote Dentate: le Potenzialità della Fabbricazione Additiva

Relatore:

Prof. Carlo Rosso

Candidata:

Teresa Moramarco

Aprile 2021



*A coloro che rendono me,  
quella che sono.*



# Indice

1. Introduzione .....	7
1.1 L' Additive Manufacturing .....	8
2. Scelta dei materiali .....	10
2.1 Leghe Ferrose .....	11
2.1.1 16MnCr5 .....	16
2.1.2 18Ni Maraging 300.....	17
3. Design del componente .....	19
3.1 Design Space e Ottimizzazione topologica .....	19
3.2 Ricostruzione geometria del componente.....	23
3.3 Analisi Modale .....	26
4. Processo di Fabbricazione Additiva.....	33
4.1 Descrizione del processo.....	33
4.2 Parametri di processo.....	35
4.3 Messa in macchina.....	38
5. Post-processing.....	41
5.1 Rimozione del pezzo dalla macchina.....	41
5.2 Trattamenti.....	42
5.3 Finitura superficiale del componente .....	46
5.3.1 Pallinatura.....	46
5.3.2 Burattatura.....	48
5.3.3 Abrasive Flow Finishing.....	49
6. Lavorazione meccanica.....	52
6.1 Finitura superficiale del dente .....	52
6.1.1 Rasatura o sbavatura.....	53



6.1.2	Rettifica.....	54
6.1.3	Lappatura.....	56
7.	Conclusione .....	57
	Bibliografia.....	59



# Indice delle Figure

Figura 1 Dentatura non standard .....	7
Figura 2 Schema delle tecnologie AM per i metalli.....	9
Figura 3 Gas-atomizzatore polveri.....	11
Figura 4 Caratteristiche polveri 16MnCr5 .....	16
Figura 5 Andamento Durezza HV per 16MnCr5 .....	17
Figura 6 Caratteristiche polveri 18Ni300 .....	18
Figura 7 Modello ottimizzazione topologica .....	20
Figura 8 Parametri ottimizzazione topologica .....	21
Figura 9 Primo risultato ottimizzazione topologica.....	22
Figura 10 Secondo risultato con controllo di forma.....	22
Figura 11 Sezione risultato ottimizzazione topologica.....	23
Figura 12 Strutture autoportanti.....	24
Figura 13 Sezione del componente ricostruito .....	25
Figura 14 Componente con geometria ricostruita.....	25
Figura 15 Design componente tradizionale .....	27
Figura 16 Condizione di vincolo analisi modale .....	28
Figura 17 Analisi modale ruota AM .....	29
Figura 18 Analisi modale ruota tradizionale.....	29
Figura 19 Diagramma di Campbell ruota AM .....	31
Figura 20 Diagramma di Campbell ruota tradizionale.....	32
Figura 21 Schema processo SLM .....	34
Figura 22 Confronto di un componente con variazione di parametri di stampa.....	37
Figura 23 Pozze di fusione .....	38
Figura 24 EOS Eosint M280 .....	39
Figura 25 Messa in macchina .....	40
Figura 26 Attrezzatura UIT .....	45
Figura 27 Processo di pallinatura.....	47
Figura 28 Stato di compressione superficiale .....	48
Figura 29 Processo di burattatura .....	48
Figura 30 Processo Abrasive Flow Finishing.....	50



Figura 31 Processo di rasatura.....	53
Figura 32 Processo di rettifica a generazione continua.....	54
Figura 33 Processo di rettifica a generazione discontinua.....	55
Figura 34 Processo di rettifica di forma.....	55



# Abstract

Partendo da un ingranaggio con geometria non standard, si sono analizzate le potenzialità che la fabbricazione additiva può offrire nella realizzazione di ruote dentate. Per questa analisi, si è partiti dalla scelta del materiale, in particolare si sono ricercati gli acciai presenti sottoforma di polveri che si prestassero per la realizzazione di ruote dentate. Successivamente, considerando le proprietà meccaniche di uno degli acciai scelti, si è passati alla definizione del design del componente, partendo dal risultato ottenuto dall'ottimizzazione topologica condotta sulla cartella della ruota. Con la geometria ricostruita, si è voluto valutare il comportamento del componente in AM rispetto al tradizionale in campo vibratorio. Infine, conclusa la fase di progettazione, si passa alla produzione mediante processo SLM. Il prodotto stampato viene poi trattato termicamente e lavorato per migliorarne la finitura superficiale.

# 1. Introduzione

Questa tesi ha lo scopo di analizzare la fattibilità di realizzare componenti meccanici, come ruote dentate, utilizzando la tecnologia di fabbricazione additiva. Questa esigenza nasce in seguito ad uno studio svolto in precedenza in merito all'ottimizzazione del profilo del dente di un ingranaggio. Alla conclusione di questo studio, si è ottenuto un profilo del dente diverso da quello standard, previsto dalle normative, come è possibile notare nella Figura 1.



*Figura 1 Dentatura non standard*

Problematica principale di questo risultato era la difficoltà nel realizzare tale profilo utilizzando esclusivamente tecnologie tradizionali. Ecco dunque che si è pensato di adottare, come processo di lavoro, la fabbricazione additiva, che consente, da questo punto di vista, di avere maggiore libertà di progettazione. Infatti, con processi tradizionali, come tornitura o fresatura, non sarebbe stato possibile realizzare profili che prevedono la realizzazione di sottosquadri, come è possibile notare al piede del dente nella Figura 1.



## 1.1 L' Additive Manufacturing

All'interno del mondo delle tecnologie meccaniche, si sta affermando sempre più, una nuova tecnica di produzione: l'additive manufacturing. Essa rappresenta una rivoluzione rispetto alle tecniche di lavorazione tradizionale, che si basano sull'asportazione di materiale da un elemento di partenza grezzo in forme standard (cubi, barre, ecc.). La fabbricazione additiva, invece, come si evince dal nome stesso, lavora in senso opposto, ovvero aggiunge materiale senza necessariamente avere un componente di partenza. Questa sua peculiarità cambia radicalmente anche l'idea di progettazione del componente da realizzare, in quanto alcuni limiti del design tradizionale vengono superati. Esempio di questo è il caso analizzato in questa tesi. La presenza di sottosquadri non rappresenta più un problema, in quanto non è presente alcun utensile al quale permettere l'accessibilità. Infatti, una delle linee guida della progettazione per l'additive manufacturing è proprio la libertà di design finalizzata ad ottimizzare il componente. La grande difficoltà del progettista sta nello sfruttare al meglio tutte le potenzialità che il processo può offrire. È per questo che quando si parla di design per additive, conviene considerare come linee guida alcuni concetti chiave [1]:

- massima leggerezza del componente, grazie alla possibilità di “mettere il materiale solo dove serve”;
- canali interni integrati nel profilo;
- integrazione di più funzioni, riducendo quindi il numero di componenti negli assiemi;
- massima personalizzazione dell'oggetto;
- messa a punto delle proprietà meccaniche;
- porosità controllata.

Questi rappresentano tutti i vantaggi che è possibile ottenere adottando l'additive come processo di fabbricazione. Nel caso in questione, la scelta è nata dalla necessità di avere libertà di design, andando anche a cercare di ottimizzare il componente riducendone il peso.

In Figura 2, viene schematizzata la suddivisione dei processi di Fabbricazione Additiva per metalli ad oggi presenti.

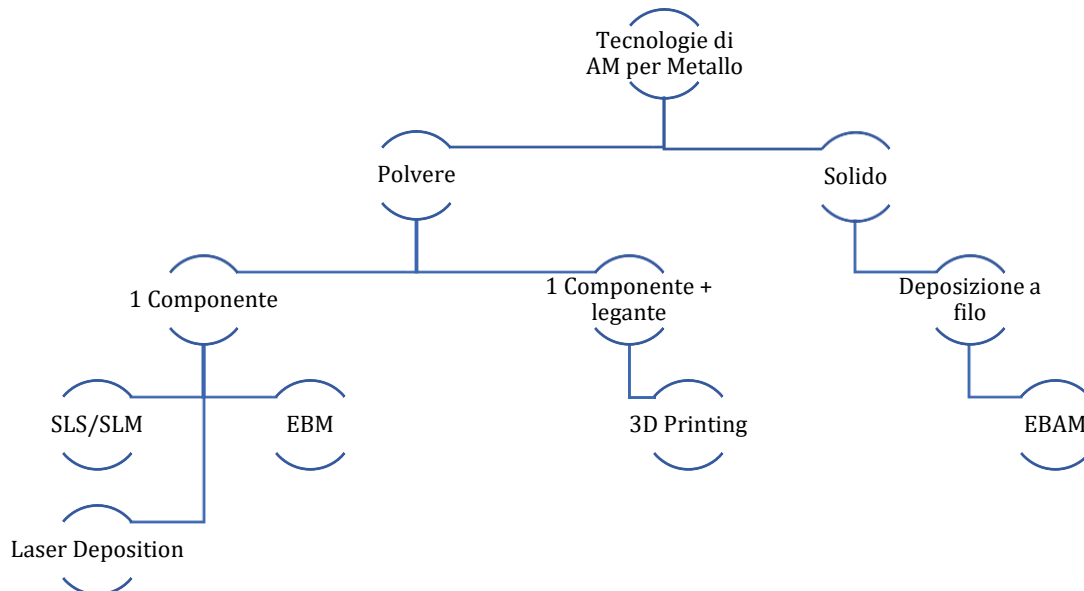


Figura 2 Schema delle tecnologie AM per i metalli

I processi più diffusi nel caso dei metalli, sono SLM (Selective Laser Melting) e EBM (Electron Beam Melting). Entrambi sono caratterizzati dal letto di polvere, ma ciò che li rende differenti tra loro è la fonte di energia utilizzata. Nel caso di SLM si è in presenza di laser, che attraverso sistemi di specchi viene deviato e localizzato sul letto di polvere; l'EBM, invece, sfrutta come fonte di energia un fascio di elettroni, il quale viene deviato senza che ci siano movimenti meccanici, come accade per il SLM, ma grazie all'uso di lenti elettromagnetiche che focalizzano e deflettono il fascio di elettroni. Ad oggi, l'EBM è meno diffuso, non solo per l'elevato costo delle macchine, ma anche perché è complessa la gestione del processo stesso, in quanto trattandosi di elettroni ed elevate potenze da gestire, il personale deve essere altamente qualificato e l'ambiente di installazione delle macchine deve prevedere maggiori norme di sicurezza ed essere isolato per evitare che il fascio di elettroni venga modificato. Per questi motivi viene utilizzato soprattutto per pochi materiali come le leghe di titanio.



## 2. Scelta dei materiali

Il mondo dell'additive, ad oggi, offre una diversa gamma di materiali metallici da poter utilizzare per i processi di fabbricazione additiva. La caratteristica principale dei materiali metallici usati nella gran parte dei processi è rappresentata dalla loro forma di polveri metalliche. Questa loro peculiarità, rappresenta uno scoglio importante per la diffusione della produzione dei materiali, poiché i processi di produzione polveri sono costosi e complessi, e richiedono, infatti, personale altamente qualificato. Alle polveri viene richiesta una forma quanto più sferica possibile affinché non oppongano resistenza, durante il processo di stampa, al passaggio della lama o rullo durante la stesura della polvere. Inoltre, la sfericità della polvere aiuta ad avere layer omogenei in spessore e densità, questo grazie all'assenza di spigoli vivi sul granello di polvere che permette di ricoprire in modo efficace tutto lo spazio. Oltre alla forma morfologica, ci sono altre caratteristiche importanti richieste alle polveri. Tra queste è presente la purezza chimica, cercando quindi di evitare il più possibile contaminazione con altre polveri che ne possono alterare le proprietà. Una terza caratteristica è la densità, essa rappresenta un parametro molto importante in fase di ispezione del componente finito, poiché la presenza di elevate porosità all'interno del pezzo ne potrebbe compromettere il suo utilizzo. Infine, altra caratteristica importante richiesta alle polveri metalliche, è la flowability, la quale rappresenta la capacità delle polveri di scorrere tra loro [2].

Il sistema di produzione delle polveri metalliche può essere suddiviso in tre parti: la prima parte prevede la trasformazione della materia prima, dall'estrazione alla produzione di semilavorati; la seconda parte consiste nel processo di atomizzazione, che può essere condotto con tecniche diverse, ottenendo quantità e qualità diverse; infine l'ultimo step è il post-processing e validazione delle polveri. Il processo più utilizzato è la gas-atomizzazione, dove il materiale metallico viene fuso e atomizzato con un flusso di gas, tipicamente argon o azoto. Questo processo può produrre polveri ad elevata purezza chimica e di forma sferica, ma allo stesso tempo, può

presentare porosità dovute alla presenza di gas intrappolato nella polvere. La gas-atomizzazione, rappresentato schematicamente in Figura 3, è il processo più semplice ed economico utilizzato per la produzione di polveri metalliche [3].

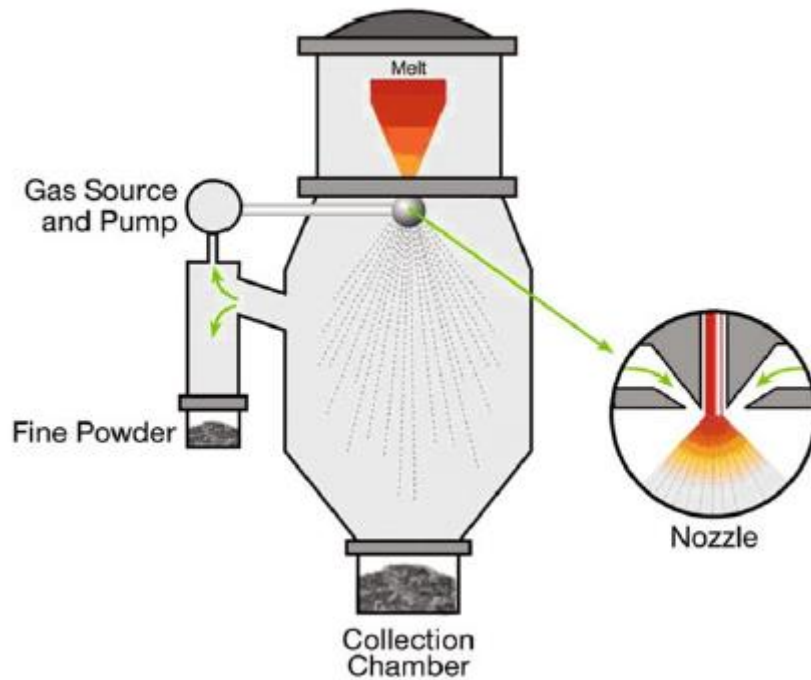


Figura 3 Gas-atomizzatore polveri

## 2.1 Leghe Ferrose

All'interno della gamma dei materiali presenti sottoforma di polveri per la fabbricazione additiva, è presente anche la famiglia delle leghe ferrose. Queste, a causa della vastità della conoscenza della lavorazione tradizionale di esse, vengono utilizzate laddove sono richiesti materiali particolarmente difficili da lavorare, o come nel caso in questione, per componenti non realizzabili con tecnologie tradizionali. Nell'Additive vengono utilizzati soprattutto acciai alto-legati che vengono additivati di elementi utili, ad esempio, ai processi di tempra del materiale, sfruttando così i gradienti termici presenti durante il processo di produzione per ottenere caratteristiche microstrutturali migliori; infatti, la variazione di temperatura rapida, provoca l'assenza del passaggio da austenite a ferrite, ma



direttamente a martensite. Inoltre, a questo si aggiunge anche la struttura cristallina fine, permettendo di ottenere così un materiale ad altre prestazioni meccaniche.

Per lo studio svolto durante questa tesi, è stata condotta una ricerca sui diversi tipi di acciai utilizzati per la realizzazione di ruote dentate in additive manufacturing. Molti sono gli studi svolti in questo campo, e molti sono i tipi di acciai analizzati, i quali presentano caratteristiche meccaniche e metodi di trattamento diversi. A tal proposito, per comprendere quali fossero tra questi i materiali migliori, ipotizzando un caso di lavoro delle ruote generico, è stato necessario focalizzare l'attenzione sulle caratteristiche principali che una ruota dentata debba avere, partendo da ruote realizzate tradizionalmente.

Di seguito vengono quindi elencati tutti gli acciai emersi dalla ricerca bibliografica condotta:

- **316 L:** appartenente alla famiglia degli acciai inox, è forse la polvere di lega ferrosa più utilizzata, soprattutto in fase di sperimentazione, in quanto facilmente reperibile e semplice da gestire. Dopo trattamenti termici si ottengono discrete proprietà meccaniche, tuttavia minori rispetto agli altri acciai che verranno elencati successivamente. Il 316 L è un acciaio a basso contenuto di carbonio e avendo anche meno cromo rispetto agli altri inossidabili, ha anche minore resistenza alla corrosione. Si tratta di un acciaio molto utilizzato nel settore automotive, grazie alla sua versatilità, elevata processabilità e costo delle polveri moderato [4].
- **17-4 PH:** facente parte anch'esso alla famiglia degli acciai inox, diffuso soprattutto nel mondo aeronautico. Caratterizzato da un elevato contenuto di cromo, ottimo per impieghi dove è richiesta elevata resistenza alla corrosione. È possibile trattarlo termicamente per incrementarne le proprietà meccaniche, ripristinando la quantità di martensite al suo interno. Grazie alla bassa presenza di carbonio, è possibile ridurre notevolmente la formazione di carburi. Tale materiale, infine, si presta bene ad essere lavorato meccanicamente e trattato termicamente [4].



- **AISI 420:** altro acciaio inossidabile utilizzato nel mondo dell'additive, che come i precedenti due materiali, grazie alla presenza di elementi come il cromo, presenta buona resistenza alla corrosione. In particolare, l'AISI 420 è un acciaio di tipo martensitico e quindi con la capacità di rispondere ai trattamenti termici in modo analogo agli acciai semplici, con conseguente miglioramento delle proprietà meccaniche. Tuttavia, come tutti gli acciai martensitici, ha una scarsa lavorabilità e per tale motivo vengono utilizzati elementi additivi per migliorarne proprietà importanti come la saldabilità [4].
- **16MnCr5:** acciaio da cementazione, con ottime prestazioni di durezza superficiale, proprio grazie al processo di cementazione. Prima di effettuare l'indurimento è sempre necessario effettuare un trattamento termico di rilassamento, come viene consigliato nel datasheet del materiale stesso. Altra caratteristica importante di questo materiale è la possibilità di avere pezzi non solo con elevata durezza superficialmente, ma anche buona tenacità al nucleo. È, infine, un acciaio facilmente lavorabile e saldabile. Questo è un materiale molto diffuso per la realizzazione di ruote dentate anche con tecnologie tradizionali [5].
- **18Ni 300:** acciaio maraging, caratterizzato da buone proprietà meccaniche e facilmente trattabile termicamente, che ne determinano anche una elevata durezza superficiale. Gli acciai al maraging sono noti per la loro elevata resistenza ad usura, resistenza alla frattura, buona saldabilità e stabilità dimensionale durante trattamenti di invecchiamento. Tuttavia, questo materiale, durante analisi su provini induriti, presenta cedimento con rottura fragile. Nelle applicazioni delle ruote dentate si cerca sempre di evitare la rottura fragile in quanto implica cedimento improvviso. Soluzione a questo, potrebbe essere evitare il trattamento di indurimento, ma effettuare solo ricottura. In questo caso si è visto che la rottura è duttile, a discapito delle proprietà di durezza superficiale [5].

Vengono, quindi, elencate nella Tabella 1 le proprietà meccaniche dei cinque materiali descritti:

Tabella 1 Proprietà acciai AM

	<b>Rm [MPa]</b>	<b>Rp0.2 [MPa]</b>	<b>Allungamento [%]</b>	<b>Durezza [HV]</b>
<b>316 L</b>	650	550	40	190
<b>17-4 PH</b>	1358	1262	14	390
<b>AISI 420</b>	1520	950	12	560
<b>16MnCr5</b>	1090	720	13	900
<b>18Ni 300</b>	2080	2010	4	650

Questa ricerca bibliografica ha portato a selezionare questi materiali che, ad oggi rappresentano i principali materiali potenzialmente utilizzabili, sia in via sperimentale che definitiva, per la realizzazione di ingranaggi. Lo step successivo che si vuole fare, in questa tesi, è confrontare le caratteristiche di questi materiali con le proprietà meccaniche richieste per ingranaggi realizzati tradizionalmente. Per fare ciò è necessario consultare la normativa ISO 6336-5, dove, all'interno della sezione 5, viene trattata proprio la resistenza e qualità dei materiali utilizzati per la realizzazione di ingranaggi. Bisogna, però, fare una premessa: trattandosi in questo caso di ruote con profili modificati e quindi non normati, non è possibile applicare la normativa fedelmente, ma cercare solamente di estrapolare valori di stress e durezza, principalmente, che caratterizzano casi di applicazione comuni degli ingranaggi. Una volta delineati tali parametri è, quindi, possibile restringere maggiormente il campo dei materiali selezionati in precedenza.

Tra le diverse classi di materiali, viene selezionato il caso con prestazioni medio alte, così che il confronto possa essere più realistico possibile. Ecco quindi che si va a considerare la categoria "*case hardened wrought steels*" e quindi degli acciai temprati.

All'interno della Tabella 2 estratta direttamente dalla normativa ISO 6336-5 [6], è possibile notare come viene fatta una prima distinzione tra due tipi di stress: da pitting e da flessione. Successivamente sono presenti i valori di coefficienti A e B, i quali rappresentano i fattori moltiplicativi per il calcolo dei valori di stress

ammissibili ( $\sigma_{H,lim}$ ) e nominali ( $\sigma_{F,lim}$ ). E infine nelle ultime due colonne sono presenti i valori minimi e massimi delle durezza Vickers.

Tabella 2 Estratto normativa ISO 6336-5

No.	Material	Stress	Type	Abbrevia- tion	Fig.	Qual- ity	A	B	Hard- ness	Min. hard- ness	Max. hard- ness
41	Case hard- ened wrought steels <sup>c</sup>	Contact		Eh	9	ML	0,000	1 300	HV	600	800
42						MQ	0,000	1 500		660	800
43						ME	0,000	1 650		660	800
44		Bend- ing	Core hardness: ≥25 HRC, lower	Eh	10	ML	0,000	312	HV	600	800
45						MQ	0,000	425		660	800
46							0,000	461		660	800
47							0,000	500		660	800
48	ME					0,000	525	660		800	

All'interno della normativa viene inoltre, indicato il metodo di calcolo degli stress:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_{H\ lim} \\ \sigma_{F\ lim} \end{matrix} \right\} = A \cdot x + B$$

dove:

x è la durezza superficiale in HV;

A, B le costanti presenti nella Tabella 2.

Una volta apprese dalla normativa ISO 6336-5 tutte le informazioni necessarie, è possibile procedere alla definizione dei parametri di ruote dentate realizzate con tecnologie tradizionali:

$\sigma_{H,lim}$ [MPa]	$\sigma_{F,lim}$ [MPa]	Durezza [HV]
1300 - 1500	312 - 525	600 - 800

È ora possibile, confrontando principalmente i valori di durezza, restringere il campo e selezionare in particolare due materiali: il maraging 18Ni 300 e l'acciaio da cementazione 16MnCr5. Questi due, come era anche possibile notare inizialmente,

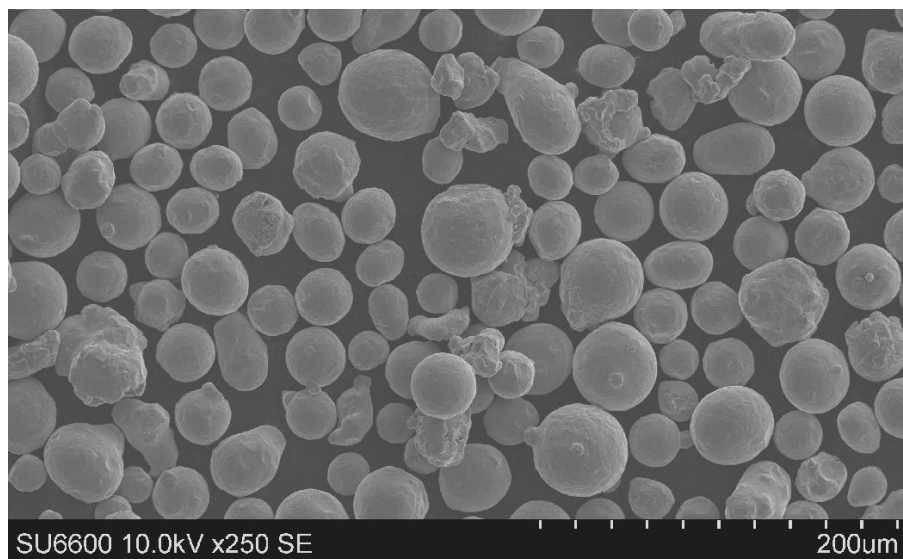


sono sicuramente gli acciai che meglio si prestano per realizzare ingranaggi in Additive Manufacturing.

Vengono di seguito analizzati, più nel dettaglio, i due materiali selezionati.

### 2.1.1 16MnCr5

La polvere di questo acciaio viene realizzata con atomizzazione in presenza di azoto. Il risultato che si ottiene è una polvere sferica, scorrevole e con ottima saldabilità. Queste caratteristiche sono molto importanti per un materiale utilizzato nella fabbricazione additiva, in quanto comportano una buona qualità del pezzo in termini rispettivamente di densità, facilità di processo e adesione dei layers. Nella Figura 4 è possibile vedere le caratteristiche delle polveri dopo atomizzazione.



*Figura 4 Caratteristiche polveri 16MnCr5 [5]*

Come detto in precedenza, questo materiale ha la caratteristica di avere superficie dura e cuore duttile, infatti questo emerge dal grafico in Figura 5, dove è rappresentato l'andamento della durezza HV all'allontanarsi dalla superficie del

pezzo. È necessario precisare che questo risultato si ottiene dopo aver trattato il componente con indurimento superficiale.

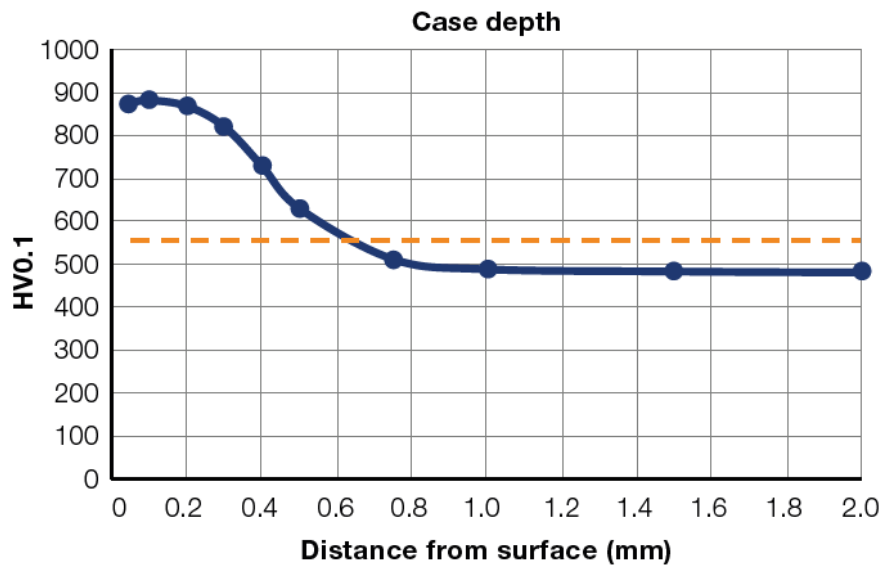
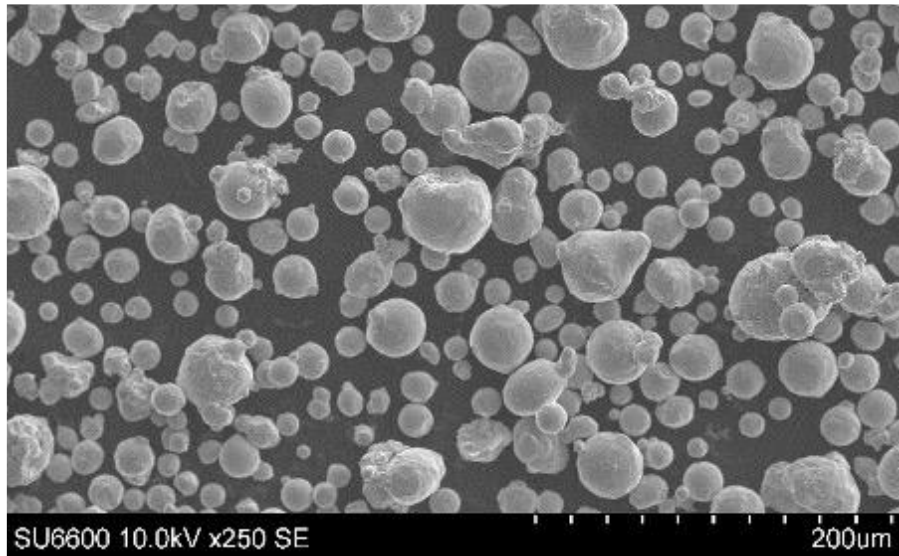


Figura 5 Andamento Durezza HV per 16MnCr5

### 2.1.2 18Ni Maraging 300

Anche questa polvere è ottenuta attraverso atomizzazione in presenza di azoto, con discreta sfericità delle polveri ottenute. Caratteristica molto importante di questo materiale è che con un solo trattamento di invecchiamento il risultato in termini di durezza è molto elevato. Inoltre, il maraging è un materiale con ottima stabilità dimensione e resistenza ad usura anche ad elevate temperature, questo grazie all'elevata presenza di Nichel.



*Figura 6 Caratteristiche polveri 18Ni300 [5]*

In Figura 6 è possibile notare come rispetto alle polveri dell'acciaio 16MnCr5, la qualità è leggermente inferiore sia in termini di forma sferica che di uguaglianza dimensionale delle particelle. Questa ultima, tuttavia, può essere risolta setacciando le polveri.

È, dunque, possibile concludere dicendo che in funzione dell'applicazione specifica dell'ingranaggio è possibile scegliere quale tra i due acciai qui proposti, possa andare meglio.



## 3. Design del componente

La scelta di adottare come metodo di produzione la fabbricazione additiva, come detto nell'introduzione, è stata dettata dalla impossibilità di utilizzare tecnologie tradizionali per la realizzazione del componente, a causa di elementi geometrici complessi. Per ottenere il massimo vantaggio da questa scelta è necessario che il componente venga ottimizzato, laddove è possibile, andando a modificarne la geometria. Il processo di definizione del design del componente è possibile suddividerlo in diversi steps da eseguire:

- Prima analisi del componente;
- Definizione del design space;
- Ottimizzazione topologica;
- Ricostruzione del componente;
- Analisi conclusiva.

In particolare, trattandosi di un caso di studio generico, senza vincoli di progetto precisi dettati dal contesto in cui la ruota lavora, l'analisi che si va a condurre del componente, prima e dopo ottimizzazione, sarà sia di tipo statico che modale.

### 3.1 Design Space e Ottimizzazione topologica

L'ottimizzazione topologica consiste in un processo di analisi del componente, dove la geometria viene modificata considerando le zone più sollecitate e le zone scariche di stress le quali vengono eliminate, lasciando quindi solo il materiale necessario affinché il componente lavori adeguatamente. Prima di procedere con l'ottimizzazione, è necessario andare a impostare il modello. All'interno del software *Altair Inspire*, come prima azione, è opportuno semplificare il più possibile la geometria del componente, andando ad eliminare raccordi e zone di alleggerimento non funzionali. Successivamente, si va a definire il *design space* e la zona di *non*

*design*, ovvero definire nel componente i volumi sui quali si va ad agire con l'ottimizzazione e i volumi che non devono essere modificati. Nel caso in questione, come possibile vedere in Figura 7, le zone di *non design* sono rappresentate dalla dentatura dell'ingranaggio e da un anello centrale di accoppiamento con l'albero. Una volta ottenuta la geometria desiderata, si va a definire il caso di carico e vincoli secondo cui ottimizzare il design, caratterizzato da momento torcente centrale e vincolo su un dente in presa, come mostrato sempre in Figura 7.

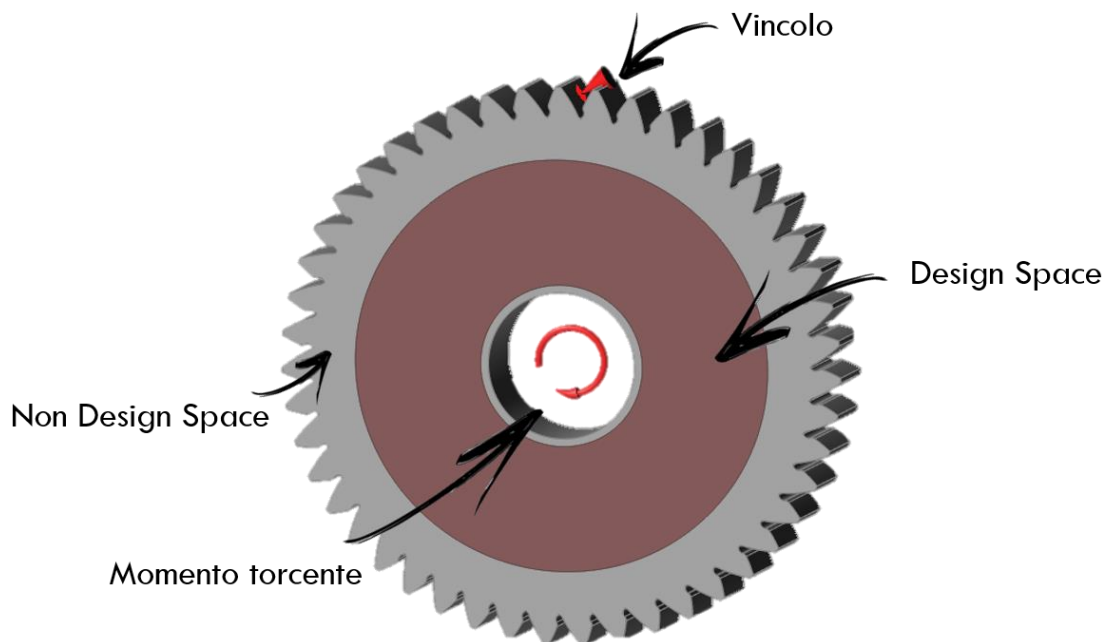
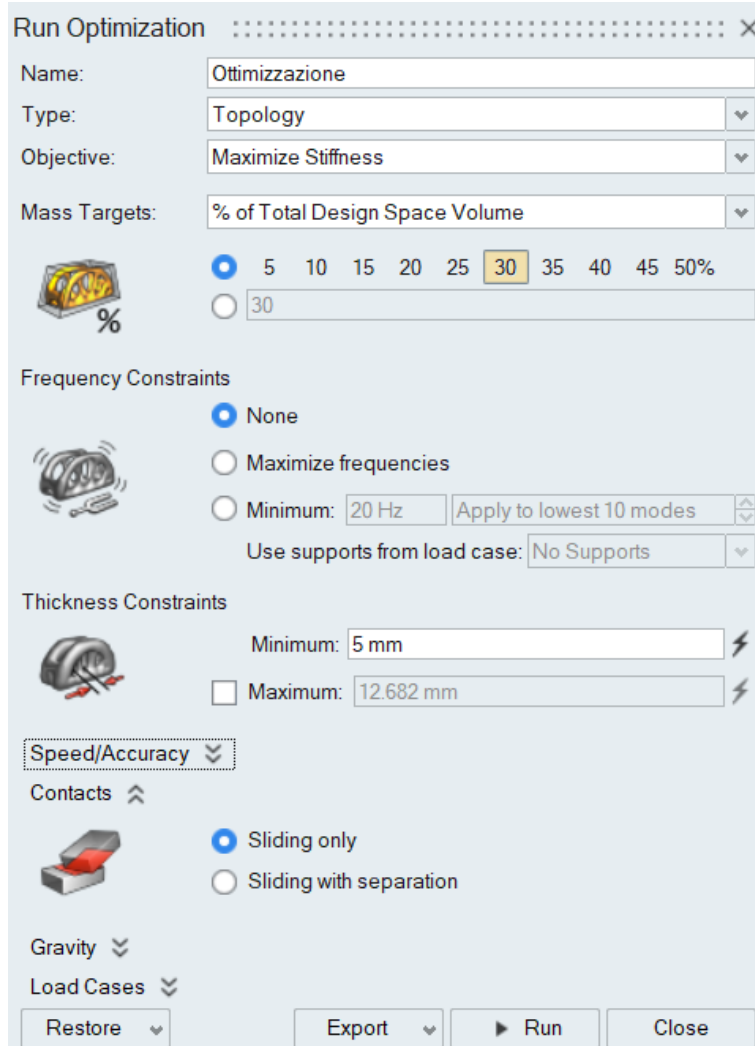


Figura 7 Modello ottimizzazione topologica

Infine, si vanno a definire i parametri dell'ottimizzazione, specificando gli obiettivi e le condizioni dell'analisi (Figura 8). In questo caso si è preferito adottare come *objective* il massimizzare la rigidezza ed andare ad impostare un *mass target* pari al 30% del volume totale della zona definita come *design space*. La percentuale pari al 30% è un'indicazione che può essere modificata anche successivamente, ad analisi compiuta.



Run Optimization

Name:

Type:

Objective:

Mass Targets:

5  10  15  20  25  30  35  40  45  50%

Frequency Constraints

None

Maximize frequencies

Minimum:

Use supports from load case:

Thickness Constraints

Minimum:

Maximum:

Speed/Accuracy

Contacts

Sliding only

Sliding with separation

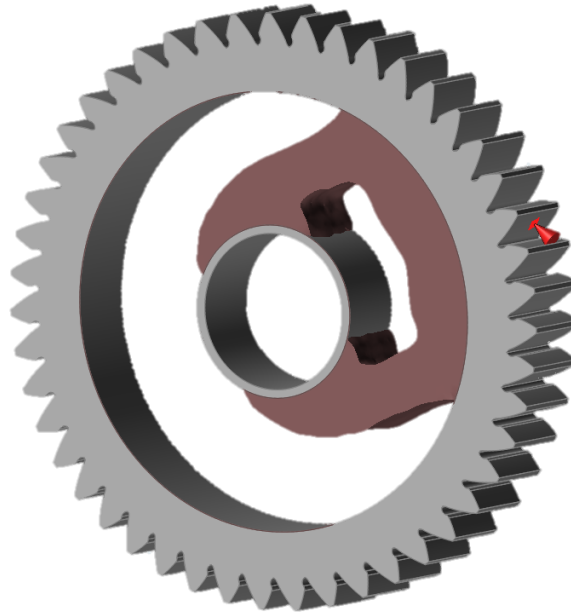
Gravity

Load Cases

Figura 8 Parametri ottimizzazione topologica

È quindi, possibile procedere con l'ottimizzazione, la quale però rappresenta solo il modo in cui gli stress sono distribuiti sul materiale, non il componente finito pronto per essere realizzato. Questa fase, infatti, fornisce la linea guida di quella che sarà poi la definizione finale del design, andando a considerare, non solo le proprietà meccaniche del componente, ma anche eventuali limiti di produzione e il comportamento reale del componente. Infatti, come si nota dal primo risultato ottenuto dall'ottimizzazione (Figura 9), il componente presenta una geometria che va a considerare il caso in cui a lavorare fosse sempre lo stesso dente, sul quale è presente il vincolo. Tuttavia, nella realtà è ovvio che ciò non accade, perché la ruota è sottoposta a rotazione. Per ovviare a questo problema, si è pensato di andare a impostare, in fase di ottimizzazione, un vincolo di sequenza della geometria lungo

tutta la circonferenza della ruota, in questo caso di cinque parti, ottenendo quindi il componente mostrato in Figura 10.



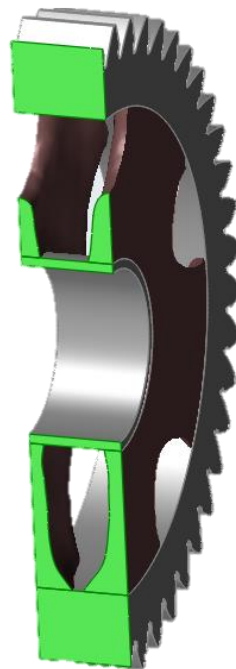
*Figura 9 Primo risultato ottimizzazione topologica*



*Figura 10 Secondo risultato con controllo di forma*

### 3.2 Ricostruzione geometria del componente

La ricostruzione della geometria del componente viene realizzata con software CAD, andando a considerare come punto di partenza il risultato dell'ottimizzazione precedentemente effettuata. In questa fase, è molto importante tenere ben presente il processo con cui il pezzo verrà realizzato, poiché la progettazione deve essere ottimizzata anche in funzione del processo. A tal proposito, analizzando il risultato dell'ottimizzazione in sezione (Figura 11), è possibile vedere come il componente, nella parte interna, sia privo di materiale.



*Figura 11 Sezione risultato ottimizzazione topologica*

Questo si ha, in quanto le zone della ruota che lavorano sono le facciate esterne. Tuttavia, è comprensibile come questa soluzione, così come è, non può essere considerata senza apportare alcune modifiche, per diversi motivi. Infatti, in primo luogo, se si va a considerare la rigidità del componente, questa soluzione, anche senza effettuare ulteriori analisi, è sicuramente poco rigida e può creare problematiche durante il funzionamento dell'ingranaggio. In secondo luogo, in



termini di produzione mediante fabbricazione additiva, la zona interna necessiterebbe di supporti, che però non potranno essere rimossi a causa di mancate zone di accesso per l'utensile.

Quindi, considerando le potenzialità della fabbricazione additiva, si è pensato di realizzare nella zona centrale della ruota, una struttura che ne aumenti la rigidezza, ma al contempo non richiede la necessità di inserire strutture di supporto. Per far ciò è bene considerare alcune caratteristiche dei componenti in fase di fabbricazione. In questo caso si vanno a disegnare le strutture con angolazioni tali da rendere le superfici autoportanti. In Figura 12 vengono mostrate le caratteristiche di strutture autoportanti realizzate con angoli di inclinazione differenti. Affinché la struttura sia autoportante, è necessario che venga disegnata con un'angolazione maggiore ai  $30^\circ$ , così da evitare l'inserimento di supporti [1].

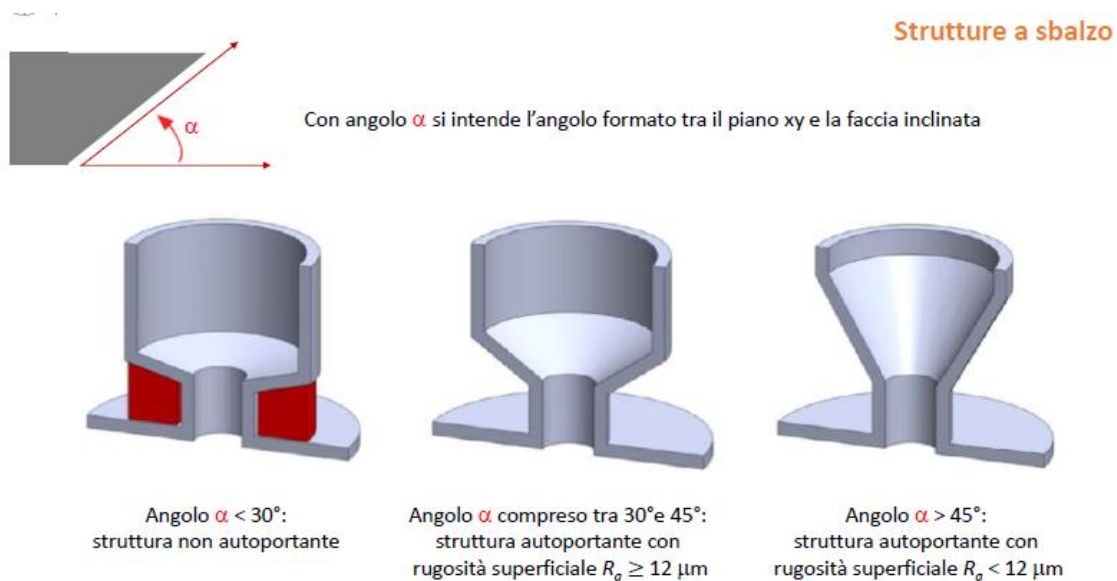
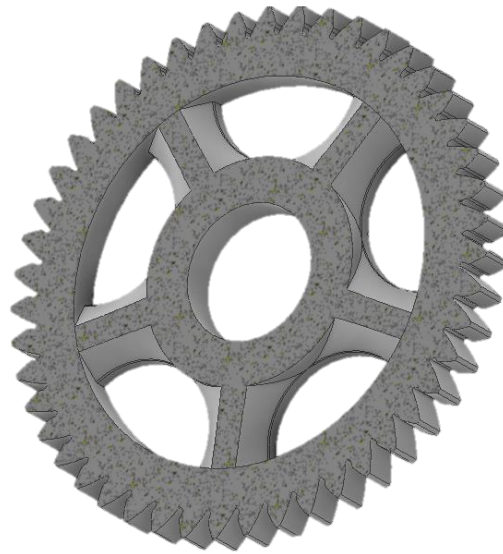


Figura 12 Strutture autoportanti

Nel caso dell'ingranaggio in questione, essendo una zona dove non è importante la qualità della finitura superficiale è possibile anche realizzarla con un'angolazione compresa tra i  $30^\circ$  e  $45^\circ$ . In Figura 13, è possibile vedere in sezione la ricostruzione della geometria tra le due facciate esterne della ruota.



*Figura 13 Sezione del componente ricostruito*

Ecco quindi, in Figura 14, la ricostruzione del componente ottenuta considerando il risultato dell'ottimizzazione ed il processo di produzione.



*Figura 14 Componente con geometria ricostruita*



Ottenuta la geometria del componente finito desiderata, va effettuata una ulteriore modifica necessaria per i processi di finitura superficiale che verranno spiegati in seguito. Infatti, durante la fase di post-processing e di lavorazioni meccaniche, si andrà a definire la geometria della ruota secondo tolleranze. Per fare ciò è necessario tener in considerazione il materiale che verrà asportato. A tal scopo, viene aggiunto al design finale un sovrametallo di 1 mm su tutta la superficie del componente.

### 3.3 Analisi Modale

L'analisi modale è un processo di simulazione con lo scopo di determinare le caratteristiche di vibrazione di una struttura meccanica, in questo caso di una ruota dentata. Questo processo di analisi è molto utile in quanto fornisce le frequenze di risonanza che porterebbero a conseguenze dannose. Durante i cicli di lavoro, infatti, un ingranaggio è sottoposto ad uno stato di sollecitazione che determina naturalmente delle vibrazioni e delle oscillazioni di rigidità, che intrinsecamente inducono la ruota a vibrare.

Per il caso studiato in questa tesi, l'analisi viene effettuata andando a considerare due geometrie del componente e confrontate, all'interno del software *Altair Hypermesh*. La prima geometria, in Figura 15, presenta un design tipico di ruote progettate per essere realizzate con tecnologie tradizionali. La seconda, invece, è la geometria ricostruita in seguito all'ottimizzazione. Studiare entrambe queste due geometrie è utile per comprendere come design così diversi si comportano in presenza di vibrazioni. In particolare, è necessario sottolineare come il design del componente ricostruito post ottimizzazione presenta, tra le facciate laterali della ruota, una geometria non piena, ma a forma doppio prisma triangolare. Questa caratteristica può determinare una variazione della rigidità della struttura meccanica.



*Figura 15 Design componente tradizionale*

La costruzione del modello per l'analisi modale è stata condotta partendo dalla definizione di un modello tridimensionale di mesh del componente, al quale si è impostato il caso di vincolo. In questo caso, rispetto al modello costruito per l'ottimizzazione, il caso di vincolo si è preferito posizionarlo diversamente. Infatti, in Figura 16, è possibile notare come il vincolo è stato posizionato nell'anello interno, bloccando tutti e sei i gradi di libertà. Questa scelta è nata dall'esigenza di simulare il caso reale di una ruota, e quindi della sollecitazione secondo rotazione. Quindi non essendoci qui il momento torcente, si è preferito applicare il vincolo nel foro centrale di calettamento dell'albero.

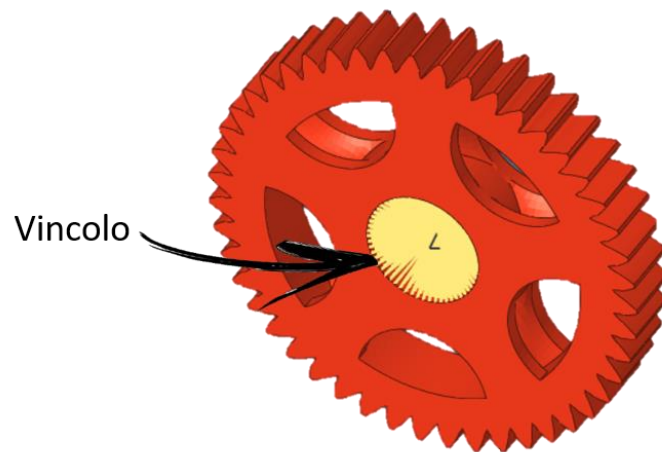
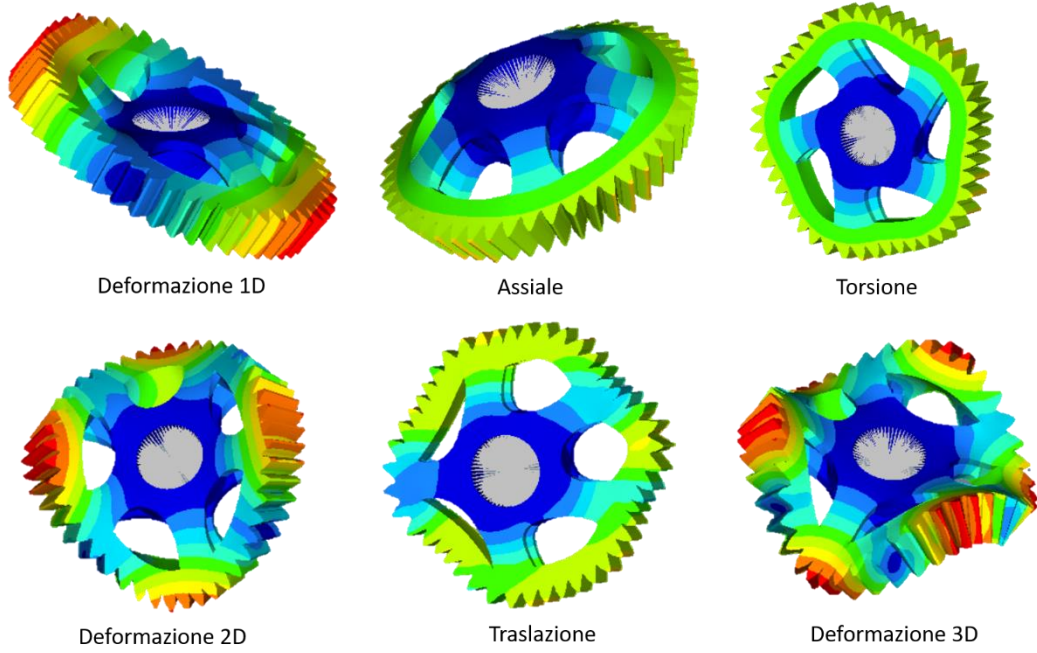
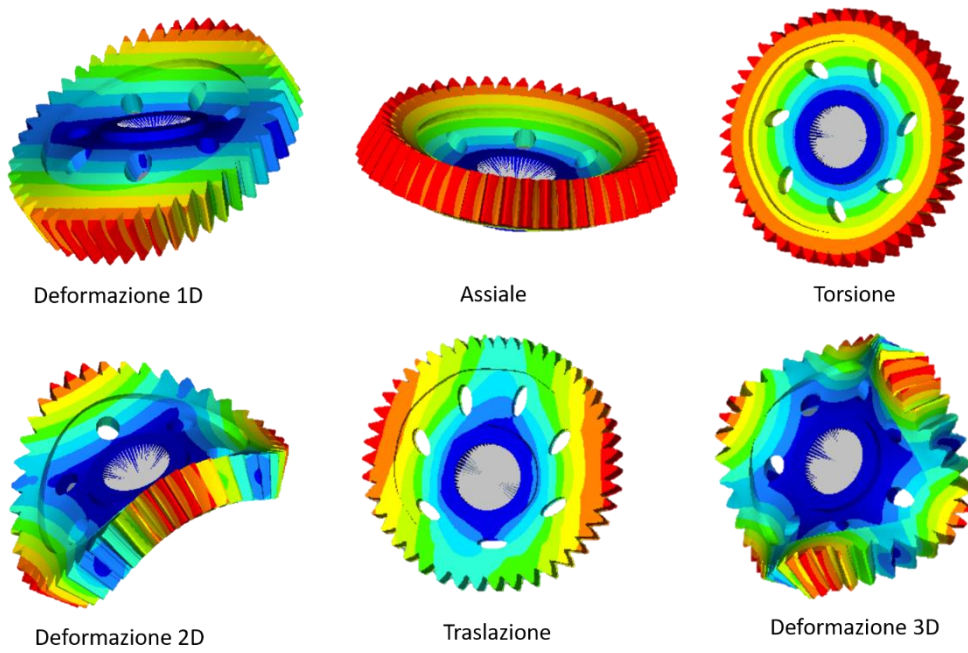


Figura 16 Condizione di vincolo analisi modale

Una volta costruito il modello, si vanno ad impostare le caratteristiche del materiale, in questo caso dell'acciaio 16MnCr5 e definiti il numero di modi che si vuole calcolare, in questo caso sono stati impostati 10 modi. Questo processo di preparazione del modello è stato effettuato analogamente per entrambe le geometrie analizzate. Conclusa l'analisi è possibile vedere graficamente come i componenti si deformano per ogni modo. Di seguito vengono rappresentati i modi di deformazione più significativi, poiché alcuni modi sono analoghi tra loro e differiscono solo gli assi attorno ai quali si deforma il componente. Questo accade perché il componente è quasi assialsimmetrico. Inoltre, nelle Figure 17 e 18, le immagini dell'analisi vengono ordinate e denominate in funzione del tipo di deformazione e non del modo proprio, in quanto si è preferito mettere a confronto le frequenze ottenute dei due componenti, per lo stesso comportamento. Nelle Tabelle 3 e 4, invece, sono elencate le frequenze proprie di tutti i modi.



*Figura 17 Analisi modale ruota AM*



*Figura 18 Analisi modale ruota tradizionale*

*Tabella 3 Frequenze proprie ruota AM*

<b>Modo</b>	<b>Frequenza [Hz]</b>
<b>1</b>	2650
<b>2</b>	2651
<b>3</b>	2836
<b>4</b>	3015
<b>5</b>	3272
<b>6</b>	3273
<b>7</b>	5695
<b>8</b>	5696
<b>9</b>	5780
<b>10</b>	5781

*Tabella 4 Frequenze proprie ruota tradizionale*

<b>Modo</b>	<b>Frequenza [Hz]</b>
<b>1</b>	2180
<b>2</b>	2181
<b>3</b>	2430
<b>4</b>	2746
<b>5</b>	2747
<b>6</b>	3752
<b>7</b>	5290
<b>8</b>	5291
<b>9</b>	7364
<b>10</b>	7365

Analizzando ed elaborando i dati ottenuti dall'analisi, si procede con la costruzione dei diagrammi di Campbell. Essi rappresentano graficamente la relazione presente tra frequenza e velocità di rotazione della ruota. In particolare, la funzione del



diagramma è quella di fornire un intervallo di velocità angolari all'interno del quale la ruota può entrare in risonanza. Infatti, la teoria ci dice che, qualora il componente raggiunga una frequenza pari ad un multiplo del prodotto tra numero di denti della ruota per la velocità angolare (in Hz) a cui è sottoposta, l'ingranaggio entra in risonanza provocando prematuri cedimenti.

Il diagramma viene costruito ponendo sulle ascisse le velocità angolari  $\omega$  in Hz e sulle ordinate le frequenze  $f$  sempre in Hz. Vengono ipotizzati valori di velocità angolari dai quali, utilizzando l'equazione  $f = z \omega$ , vengono definiti i valori di  $f$  sulle ordinate. Nel caso in questione, il numero di denti  $z$  è pari a 47. La retta ottenuta, rappresentata graficamente in Figura 19 e 20, indica l'eccitante. Infine, le rette orizzontali, presenti sempre nei diagrammi, rappresentano le frequenze proprie dei modi analizzati durante analisi modale ed elencate nelle Tabelle 3 e 4. Quando si verifica l'intersezione tra retta eccitante e frequenza propria, potenzialmente, si potrebbero verificare vibrazioni con ampiezze pericolose.

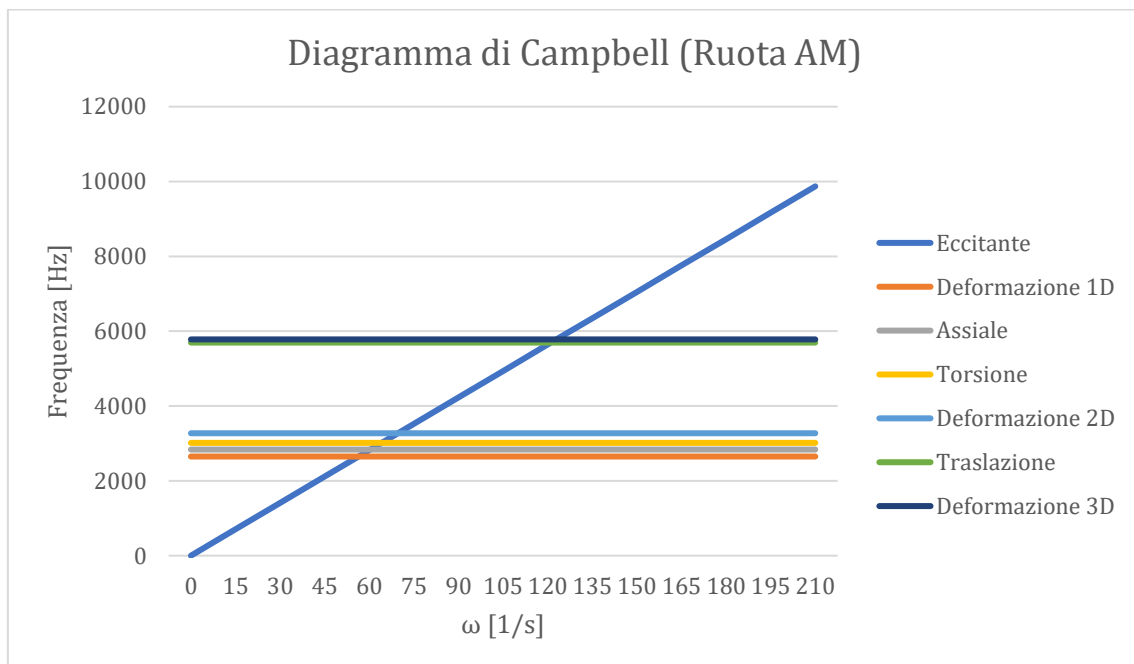


Figura 19 Diagramma di Campbell ruota AM



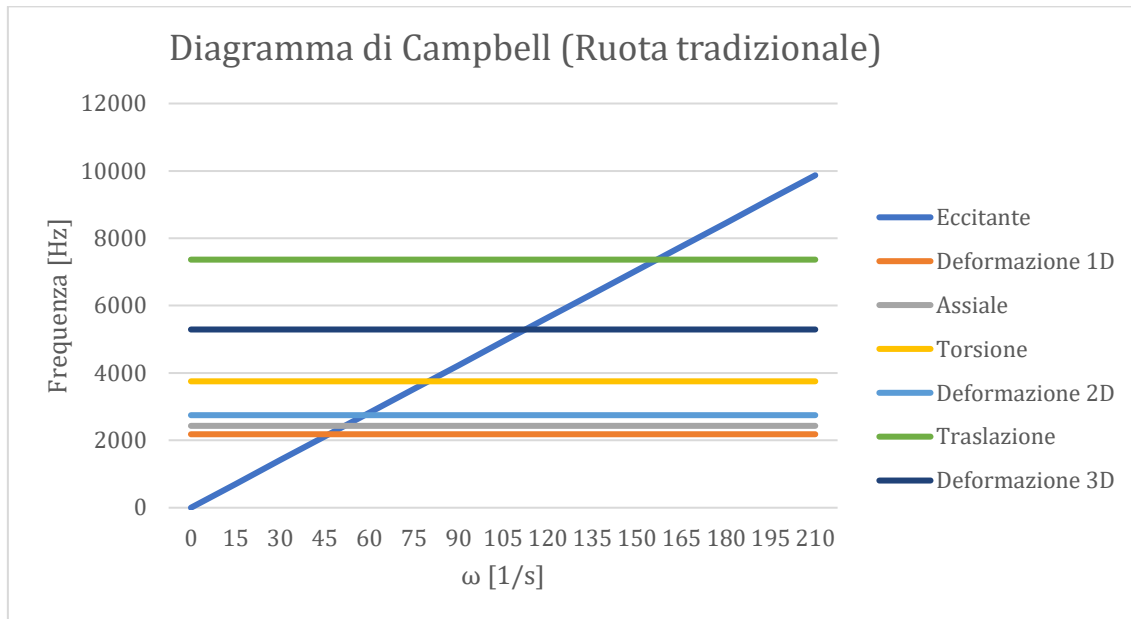


Figura 20 Diagramma di Campbell ruota tradizionale

Confrontando i due diagrammi, quello che emerge a prima vista è la presenza di un intervallo di velocità critica molto più ridotto per la ruota AM rispetto a quella tradizionale, questo perché molti dei valori delle frequenze proprie sono pressoché simili. Questa caratteristica ci permette di sfruttare meglio i dati forniti dal diagramma di Campbell per il caso della ruota AM, in quanto per il caso tradizionale l'analisi potrebbe essere troppo cautelativa e portare ad escludere valori di velocità angolari che non portano risonanza e risultare quindi un approccio poco efficace.

Inoltre, se si considera l'effetto della frequenza in funzione della rigidità del componente è possibile affermare che la rigidità della ruota ottimizzata per additive è diversa da quella tradizionale, non sempre è maggiore, ma aver contemporaneamente ridotto la massa, di fatto sposta poco la frequenza propria del sistema.



## 4. Processo di Fabbricazione Additiva

### 4.1 Descrizione del processo

Il processo di fabbricazione additiva più utilizzato per la realizzazione di componenti in leghe ferrose è il Selective Laser Melting (SLM). È un processo che presenta un fascio laser diretto meccanicamente da sistemi di lenti sul letto di polvere, come schematizzato in Figura 21. Appartenente alla classe dei processi con letto di polvere (powder bed fusion), è stato uno dei primi processi a diffondersi nel settore manifatturiero. Originariamente si parlava di SLS, ovvero Selective Laser Sintering, dove le polveri metalliche non raggiungevano il punto di fusione poiché i laser utilizzati non riuscivano a produrre potenze elevate e quindi l'aggregazione delle particelle avveniva per sinterizzazione, non per fusione. Il risultato era meno performante, caratterizzato da disomogenità e porosità. Con l'avanzamento della tecnologia laser, le potenze raggiungibili oggi permettono di fornire al materiale l'energia necessaria a raggiungere le temperature di fusione. Questo rappresenta un grande passo avanti, poiché i pezzi realizzati con SLM raggiungono densità vicine al 100%, molto simili a quelle dei materiali lavorati per asportazione [1].

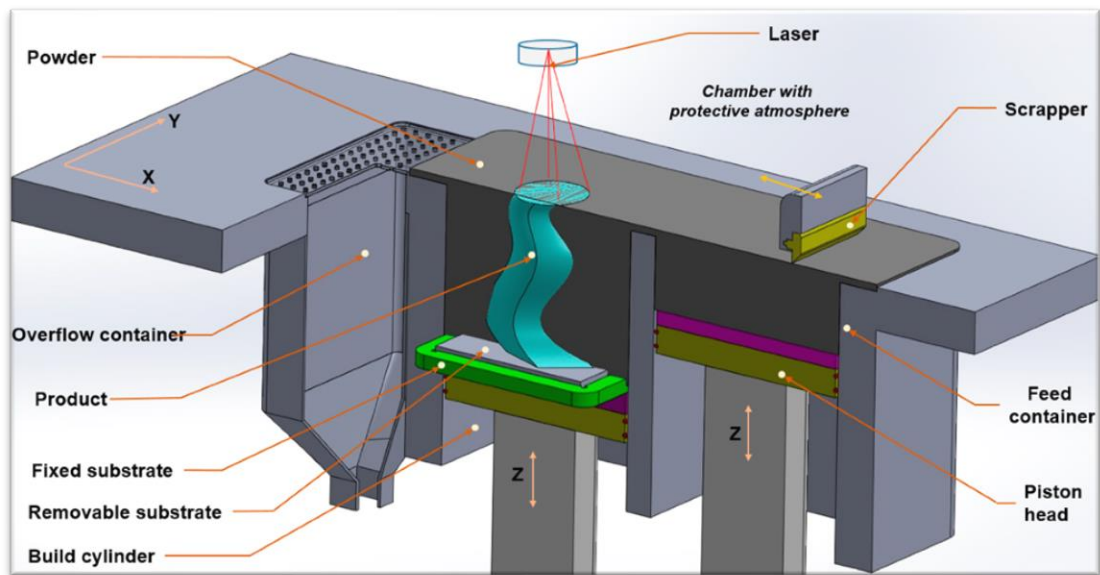


Figura 21 Schema processo SLM

La macchina è caratterizzata da una piattaforma di costruzione del pezzo con elevatore, che ad ogni layer scende fino alla conclusione del processo, con il pezzo ricoperto dalla polvere non fusa. Il serbatoio laterale al contrario sale, in quanto fornisce, ad ogni passata, la quantità di polvere necessaria, la quale viene stesa lungo il piano di lavoro da un roller o racla. Importante per la riuscita del processo è che l'atmosfera interna alla macchina sia inerte, così da ridurre al minimo l'ossidazione e la degradazione del materiale. Il fascio laser è molto puntuale e viene calibrato in maniera tale da fornire energia sufficiente a fondere lo strato interessato e una parte di quello precedente, affinché sia garantita la giusta aderenza dei layers. Le sorgenti laser utilizzate sfruttano come mezzo laser attivo CO<sub>2</sub> oppure un cristallo d'Ittrio e alluminio drogato.

Questa tipologia di processo è caratterizzata da tempi di fusione e solidificazione molto brevi, in quanto, a differenza di altri processi AM, come EBM, le polveri del letto non sono riscaldate. Questa velocità di raffreddamento abbinata ai gradienti termici elevati che si vengono a creare, porta ad avere conseguenze sul componente. Una prima peculiarità dei pezzi realizzati con SLM è la microstruttura, caratterizzata da grani molto fini e uniformi, che rappresenta un incremento delle prestazioni meccaniche in termini di tensioni, ma ne riduce notevolmente la duttilità. Una seconda conseguenza è la nascita di tensioni residue interne che possono portare



alla formazione di cricche. Il processo di rimozione del componente dal piatto di costruzione è molto delicato, in quanto facilmente il pezzo si può deformare plasticamente e quindi non essere più utilizzabile. Per entrambe queste conseguenze, microstruttura e tensioni residue, la soluzione risiede nei post-trattamenti a cui viene sottoposto il componente.

Se da un lato il processo consente di ottenere caratteristiche vantaggiose, dall'altro porta in sé una serie di problematiche e difettosità nel pezzo realizzato. Una di queste è la presenza di bolle d'aria intrappolate all'interno che possono essere presenti già nelle polveri oppure essere inglobate durante il processo. Quest'ultimo fenomeno viene chiamato *balling*. Per evitare che ciò accada, aziende come l'EOS hanno brevettato soluzioni che prevedono la movimentazione del laser e del flusso di gas protettivo nel senso opposto, per evitare che i gas generati dalla polvere appena fusa, possano essere intrappolati. In generale, la presenza di aria all'interno del pezzo va a ridurre la densità del materiale e a compromettere le proprietà meccaniche. È per questo motivo che i componenti stampati per fabbricazione additiva vengono quasi sempre ispezionati con radiografie per verificarne la densità.

## 4.2 Parametri di processo

La fase più complessa del processo di stampa, da parte dell'operatore, è quella relativa alla determinazione dei parametri di progetto. Ad oggi il know-how in merito a questo è molto limitato, poiché molti dei parametri derivano dall'esperienza e dalle prove effettuate in fase di sperimentazione e caratterizzazione del processo. In questo senso, le aziende fornitrici di macchine e polveri, all'interno dei datasheet, consigliano alcune metodologie di processo e valori standard dei parametri che, però, non ricoprono tutte le ampie potenzialità che la fabbricazione additiva offre. La messa punto dei parametri di processo permette di ottenere risultati ottimi in termini, ad esempio, di densità, di proprietà



meccanica o rugosità del pezzo. Ecco, quindi, perché generalmente quando viene acquistata una macchina, prima dell'inserimento di essa nella produzione definitiva, viene speso un periodo di tempo per la caratterizzazione della macchina.

In generale, i parametri di processo possono essere suddivisi in quattro diverse categorie [7]:

- parametri relativi al laser (potenza, *spot size*, durata dell'impulso, frequenza, ecc.);
- parametri di scansione (velocità di scansione, *spacing*, *pattern*);
- parametri relativi alle polveri (forma, dimensione, distribuzione, densità del letto di polvere, spessore del layer, proprietà del materiale, ecc.);
- parametri di temperatura (temperatura del letto di polvere, temperatura della camera, ecc.).

Per il rilevamento di questi parametri, le macchine sono dotate al loro interno di sensori e telecamere che controllano l'avanzamento del processo.

Si vuole ora descrivere meglio alcuni dei parametri citati e spiegarne l'importanza. Considerando la strategia di scansione, la quale rappresenta come il laser agisce sul letto, essa condiziona profondamente la nascita degli stress residui all'interno del pezzo. Le caratteristiche delle polveri, invece, influenzano la densità, la conduttività termica del letto di polvere o la diffusione della polvere. Infatti, particelle più fini forniscono maggiore superficie e hanno un assorbimento di energia laser più efficiente rispetto a particelle più grossolane. Temperatura, potenza del laser, velocità di scansione e spaziatura di scansione devono essere ben bilanciate per fornire il miglior compromesso tra precisione dimensionale, finitura superficiale, velocità di costruzione e proprietà meccaniche. Nello specifico, andando a considerare la potenza del laser e la temperatura del letto se entrambe vengono impostate molto alte portano ad avere componenti ad alta densità, ma al contempo provocano una bassa riciclabilità delle polveri non fuse e difficoltà nella pulizia delle parti; se invece si adottano potenze e temperature troppo basse, il risultato è una migliore precisione dimensionale, ma anche una minore densità e una tendenza alla delaminazione, in quanto l'energia non è stata sufficiente per fondere anche lo strato

precedente. In Figura 22 viene proposto un ingrandimento della superficie di un componente realizzato variando i parametri di strategia di scansione e potenza; questo rappresenta un esempio di come la migliore finitura superficiale si ottiene nel caso in cui si va ad effettuare una linea di *contour* a bassa potenza [8].

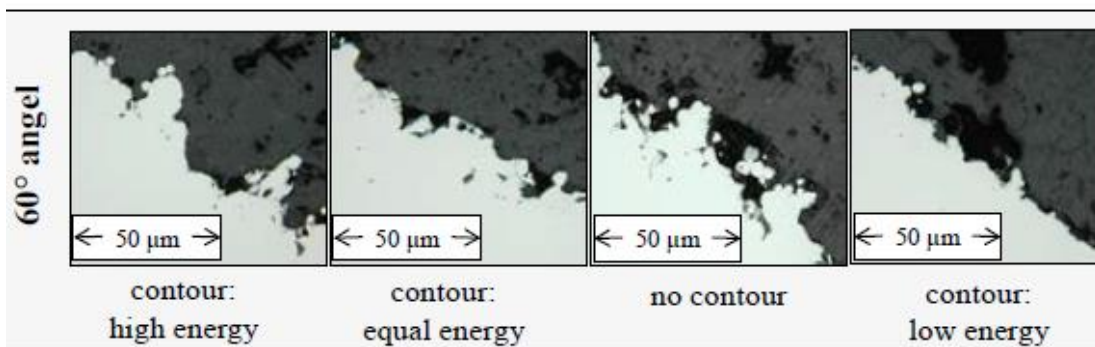


Figura 22 Confronto di un componente con variazione di parametri di stampa

Assieme a potenza e temperature, altri due parametri incisivi sono le dimensioni dello spot del laser e la velocità di scansione; essi, infatti, determinano l'energia fornita alle polveri. Tanto più a lungo il laser agisce in una particolare posizione, tanto più profonda e larga sarà la pozza fusa. I valori tipici di spessore del layer vanno dai 0.02 ai 0.15 mm. Le pozze di fusione devono essere inoltre leggermente sovrapposte tra loro per avere maggiore omogeneità del materiale e quindi assicurare elevate proprietà al componente. Per ottenere questo è necessario agire sulla spaziatura di scansione. Nella Figura 23, analizzando la microstruttura, in questo caso di un acciaio 16MnCr5 realizzato per SLM, è semplice riconoscere le pozze di fusione a forma di parabola.

È quindi necessario conoscere bene le caratteristiche della macchina e delle polveri che si stanno adottando per la definizione dei parametri di processo.

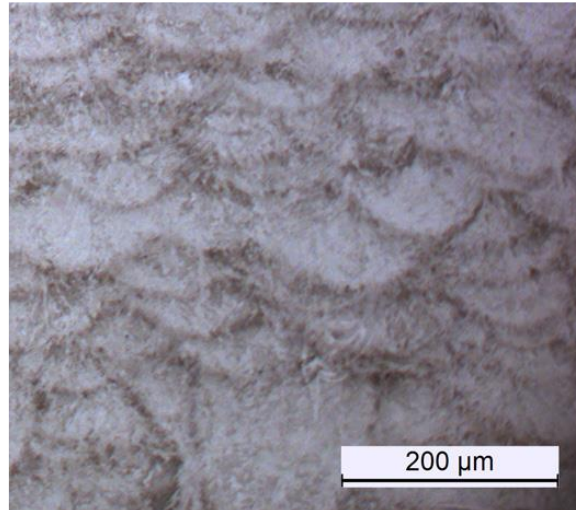


Figura 23 Pozze di fusione

### 4.3 Messa in macchina

La messa in macchina del componente viene fatta utilizzando il software *Materialise Magics*, all'interno del quale, una volta selezionata la macchina che si andrà ad usare per il processo, consente di posizionare il componente sulla piattaforma e generare i supporti, laddove sono necessari. Il file che viene importato all'interno del software è .STL, il quale presenta il componente come un modello di tipo "shell", in cui la superficie esterna viene approssimata con triangoli dimensionalmente diversi tra loro, in modo da seguire il profilo del modello.

Per il caso in questione, viene scelta come macchina per il processo la EOS Eosint M 280 (mm), (Figura 24) la quale presenta un volume di costruzione pari a 250 × 250 × 325 mm. Sebbene la piattaforma di costruzione presenta dimensioni maggiori di 250 × 250, è necessario posizionare il componente tenendo presente queste dimensioni, in quanto rappresentano l'area effettiva di utilizzo. Inoltre, è fondamentale andare a considerare la necessità, da parte dell'operatore, di accedere ai quattro spigoli della piattaforma, dove sono posizionati gli agganci di essa alla macchina. Per questo motivo va considerata una cornice ulteriore di spessore circa 10 mm che va lasciata attorno alla piattaforma.





Figura 24 EOS Eosint M280

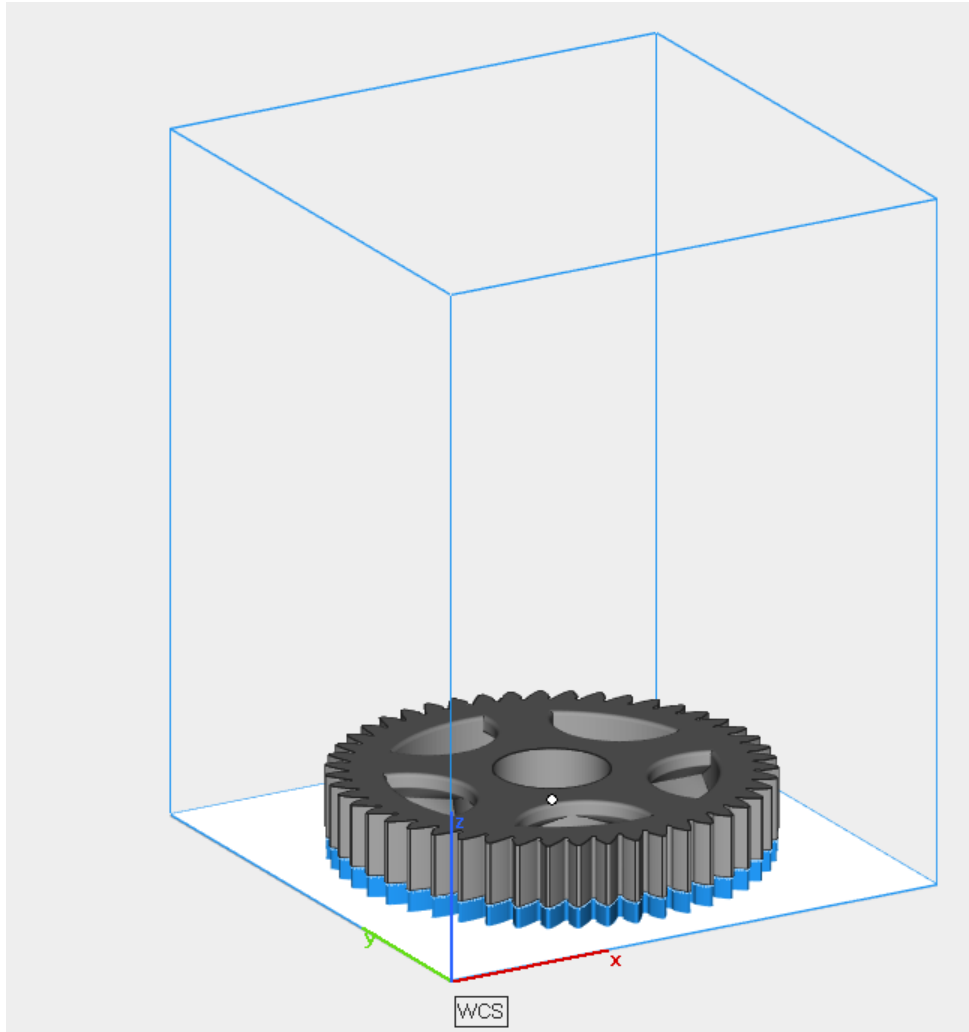
Per il caso in questione, l'orientamento ottimale è quello mostrato in Figura 25, ovvero con l'asse della ruota coincidente con l'asse z. Questo posizionamento consente di ridurre al minimo la generazione di supporti, i quali vengono inseriti solo tra il componente e la piattaforma, necessari per qualsiasi tipo di lavoro, in quanto garantiscono la corretta rimozione del componente senza danneggiamento alcuno sia della piattaforma che del componente stesso. Inoltre, questa posizione consente di avere l'impiego minimo di polveri da utilizzare, fattore che incide sia sui costi che sul tempo di stampa.

Nel dettaglio vengono riportate le caratteristiche volumetriche di stampa elaborate dal simulatore di processo:

- Volume componente: 556613.7 mm<sup>3</sup>;
- Volume supporto: 16665.9 mm<sup>3</sup>.

Questi valori rappresentano il materiale utilizzato per la fusione del componente, non della polvere effettivamente utilizzata. La polvere depositata e non fusa viene poi setacciata e riutilizzata.





*Figura 25 Messa in macchina*

## 5. Post-processing

Il post-processing è caratterizzato da tre fasi importanti: la rimozione del componente dalla macchina, i trattamenti termici per incrementare le proprietà ed eliminare tensioni residue e infine il miglioramento della rugosità superficiale del componente attraverso processi di finitura come pallinatura, burattatura o Abrasive Flow Finishing.

### 5.1 Rimozione del pezzo dalla macchina

Una volta conclusa la fase di stampa, è subito possibile accedere al componente realizzato. Questa seconda fase prevede la presenza di un operatore, provvisto di attrezzature di sicurezza, in quanto una volta aperta la macchina, le polveri non sono compatte, e perciò pericolose per l'uomo se disperse nell'ambiente. La prima operazione da compiere consiste nell'aspirare le polveri non fuse da attorno al componente. Questo viene fatto con attrezzature speciali che devono garantire la non contaminazione di queste polveri le quali verranno successivamente setacciate e riciclate per un secondo processo di stampa. La possibilità di riciclare le polveri non fuse rappresenta un ulteriore vantaggio del processo di Fabbricazione Additiva rispetto alle tecniche tradizionali, dove il materiale di scarto sottoforma di truciolo, ormai deformato plasticamente, non può essere riutilizzato.

Un'altra fase molto delicata dell'intero processo è quella della rimozione del pezzo dalla piattaforma di costruzione. Conclusa la fase di stampa, il componente è caratterizzato da elevati stress interni dovuti ai gradienti termici, perciò andare ad intervenire per la rimozione porterebbe alla deformazione plastica e quindi irreversibile del pezzo. Per questo motivo, spesso, viene effettuato un primo trattamento di rilassamento in questa fase, con il componente ancora vincolato alla piattaforma. Quindi, una volta ridotte al minimo le tensioni residue, si procede con



la rimozione manuale del pezzo. È importante che questa operazione venga effettuata manualmente dall'operatore perché si ha così la percezione della deformazione del pezzo. Inoltre, bisogna procedere con piccoli accorgimenti, di carattere empirico, per avere il risultato migliore. Ad esempio, è necessario non rimuovere il componente agendo da una sola parte, ma incidere poco per volta su tutti i lati, evitando così che il pezzo si imbarchi in un'unica direzione.

Va ricordato che andando ad agire manualmente, con scalpello e martello, non si va a rovinare il pezzo, poiché tra il componente e la piattaforma sono presenti i supporti, che avendo una densità molto inferiore al pezzo, sono anche facili da incidere. Inoltre, gli stessi supporti hanno la funzione di ridurre le deformazioni del componente in quanto le tensioni residue vengono scaricate su di essi.

## 5.2 Trattamenti

I trattamenti rappresentano una tappa importante per l'incremento delle proprietà del componente. In particolare, in questo caso, trattandosi di ruote dentate, sono richieste caratteristiche precise per il lavoro che svolgono, come ad esempio durezza superficiale elevata e buona resistenza alla fatica. In generale, i trattamenti termici che solitamente si effettuano nella fabbricazione additiva, sono quattro: distensione, ricottura, solubilizzazione e invecchiamento.

In particolare, il primo trattamento è stato citato nel paragrafo precedente, in quanto il processo di distensione o rilassamento, ha lo scopo di ridurre le tensioni residue senza alterare significativamente la durezza del componente. Esso consiste in un riscaldamento ad una temperatura sotto quella di fusione e un successivo raffreddamento lento. Spesso però le tensioni, se di compressione, non sono sempre dannose, infatti uno strato di tensione superficiale può rivelarsi utile per aumentarne la resistenza a fatica.

La ricottura e la solubilizzazione, invece, consistono in due trattamenti sempre termici con lo scopo di modificare la microstruttura del componente, migliorandone

le proprietà meccaniche. Nel dettaglio, la ricottura di una lega metallica consiste nel riscaldamento di essa ad una temperatura superiore a quella di austenitizzazione e mantenimento a tale temperatura per un tempo necessario e successivo lento raffreddamento. Mentre, la solubilizzazione consiste sempre in un primo riscaldamento e mantenimento, ma seguito da rapido raffreddamento. Questi due trattamenti portano ad una ricristallizzazione e contemporaneo aumento della dimensione del grano, in quanto i componenti realizzati per SLM sono caratterizzati da grana fine, che porta ad avere snervamento alto, ma bassa duttilità nel materiale. Si cerca quindi, variando le dimensioni dei grani, di ottenere il giusto equilibrio tra snervamento e duttilità. Inoltre, la ricottura, in particolare, ha la funzione anche di eliminare difetti della struttura cristallina e uniformare la composizione chimica dell'acciaio.

Infine, si ha il trattamento termico di invecchiamento, che può essere effettuato anche successivamente le finiture superficiali e lavorazioni meccaniche, in quanto non va ad alterare le caratteristiche dimensionali del componente. Questo processo ha lo scopo di far precipitare le fasi indurenti che a loro volta vanno ad ostacolare il moto delle dislocazioni. L'effetto di rinforzo è massimo quando i precipitati sono molto fini e coerenti con la matrice del materiale. In particolare, il compito dei precipitati è quello di creare un forte campo di deformazioni che ostacola efficacemente il moto delle dislocazioni. Il tutto si traduce in un importante aumento delle proprietà meccaniche.

I parametri di tempo e temperatura, ai quali vengono effettuati questi trattamenti, variano a seconda dei materiali che si sta trattando. In questo caso, si va a considerare i parametri dei due materiali, citati in precedenza, idonei per la realizzazione di ingranaggi: il 16MnCr5 e il 18Ni Maraging 300.

Per l'acciaio da cementazione 16MnCr5, l'azienda produttrice di polveri consiglia una serie di trattamenti termici [5]:

1. Distensione: 250°C in Argon per 1 ora.
2. Indurimento a 815-845°C con raffreddamento in olio o gas e successiva Tempra a 150-230°C.



3. Indurimento superficiale: Cementazione a 900-955°C, indurimento a 775-800°C, raffreddamento ad olio e tempra a 150-230°C.

Gli ultimi due trattamenti sono necessari per incrementare le prestazioni del materiale in termini di durezza, la prima al cuore, la seconda superficiale. Infatti, in Tabella 5, sono presenti i valori di durezza HV che si ottengono.

*Tabella 5 Valori durezza HV post trattamento*

<b>Indurimento superficiale</b>	<b>Durezza</b>
<b>Cuore</b>	450-500 HV
<b>Superficie</b>	850-900

Per quanto riguarda l'acciaio Maraging, invece, la casa produttrice di polveri, per aumentarne le proprietà meccaniche, non essendo il maraging un acciaio, che come il precedente si presta a processi di cementazione, consiglia i seguenti trattamenti [5]:

1. Solubilizzazione: 940°C per 2 ore
2. Invecchiamento: Indurimento per precipitazione a 480-500°C per 3-6 ore.

Questi trattamenti conferiscono al pezzo maggiore stabilità dimensionale e resistenza a usura.

Oltre a questi trattamenti termici fin qui citati, in via sperimentale si sta affermando una tipologia di trattamento chiamato UIT (Ultrasonic Impact Treatment). Questo processo, grazie all'azione di ultrasuoni, aumenta la resistenza a fatica del componente. I componenti realizzati per fabbricazione additiva possono presentare problematiche se sottoposti a cicli di fatica. Questo è dovuto alla possibilità di avere internamente porosità o tensioni che portano alla nascita di cricche inter-granulari, che con carichi ciclici portano a cedimento. Nel caso in questione di ruote dentate, la resistenza a fatica è fondamentale, in quanto gli ingranaggi lavorano a fatica. Per queste motivazioni, si cerca di trovare rimedi a questo problema ed uno studio condotto su provini sottoposti a trattamento UIT, ha portato ad ottimi risultati. Questa tecnologia viene generalmente utilizzata per incrementare la vita a fatica delle saldature, che, come nel caso della fabbricazione additiva, vede la presenza di materiale fuso apportato su una superficie. Lo studio condotto a riguardo [9], è stato

effettuato su provini in Ti-6Al-4V prodotti con tecnologia DMLS (direct metal laser sintering). I test sono stati condotti su lega di titanio, mentre gli ingranaggi in questione vengono realizzati in acciaio; tuttavia, il processo UIT viene effettuato generalmente su saldature in acciaio, in particolar modo su componenti degli scafi delle navi e dei ponti. Quindi questa tecnologia è più che consolidata su materiali come l'acciaio. Entrando nel dettaglio, è possibile comprendere quali sono le caratteristiche di questo processo. I risultati si ottengono principalmente alleviando le tensioni residue di trazione dannose e introducendo tensioni di compressione negli strati superficiali del materiale. La compressione agisce contro il cedimento per fatica, poiché tende a chiudere le cricche e quindi evitandone la propagazione, cosa che invece alimenta la trazione. L'attrezzatura UIT, mostrata in Figura 26, è caratterizzata da un utensile chiamato *peening system* con punte intercambiabili a seconda della tipologia di superficie da trattare. La tecnica si basa sull'effetto combinato di impulsi ad alta frequenza con oscillazioni ultrasuoni. I risultati forniti dallo studio condotto sulla lega di titanio sono sorprendenti; la performance del componente, in termini di fatica, è incrementata del 200%, diminuita la porosità superficiale e migliorata anche la rugosità superficiale del 69%. Questi valori sono significativi, ma bisogna anche dire che il processo non può essere fatto per grandi produzioni, perché è un processo lungo e che deve effettuare manualmente un operatore.



Figura 26 Attrezzatura UIT

## 5.3 Finitura superficiale del componente

Un ulteriore scoglio da affrontare per i componenti realizzati per fabbricazione additiva, è la qualità della finitura superficiale. I pezzi che escono dalla macchina presentano una rugosità elevata, che dipende molto dalla granulometria delle polveri e dall'accuratezza di stampa. Il processo SLM, fornisce ai componenti una finitura migliore rispetto ad altri processi di stampa AM, in quanto le polveri utilizzate sono molto fini e l'azione del laser puntuale. I valori di Ra che si possono ottenere sono tra i 4 e 6.5  $\mu\text{m}$ , lontani però dai valori standard richiesti agli ingranaggi di 1.6 - 3.2  $\mu\text{m}$ . Per questo, è necessario effettuare una serie di processi di finitura superficiale, che vanno ad eliminare polveri non fuse attaccate sulla superficie, ma anche incrementare, in alcuni casi le proprietà superficiali del componente. Ad esempio, il grado di finitura superficiale ha una forte influenza sulla resistenza a fatica poiché le cricche si innescano spesso a partire dalla superficie esterna del componente. Le irregolarità superficiali rappresentano punti di concentrazione delle tensioni e quindi potenziali punti di innesco della cricca.

I processi che è possibile utilizzare sono molti, ma di seguito vengono analizzati solamente quelli che sono applicabili al caso in questione. È necessario ricordare, infatti, che la geometria del componente è caratterizzata dalla presenza di zone non accessibili da utensili.

### 5.3.1 Pallinatura

Il primo processo che è sempre consigliato fare è la pallinatura controllata. Si tratta di un trattamento molto economico che ha un duplice scopo: eliminare microparticelle attaccate e aumentare la vita del componente. Il processo si basa sulla deformazione plastica a freddo della superficie che produce nel materiale delle tensioni residue di compressione. Come già accennato in precedenza, lo stato di

compressione porta alla chiusura di eventuali cricche presenti. La superficie viene bombardata con un getto localizzato e controllato di microsferi, spesso dello stesso materiale del componente, ad alta velocità (Figura 27).



*Figura 27 Processo di pallinatura*

Quello che accade sulla superficie, è la nascita di tante piccole impronte e una deformazione plastica delle fibre del componente, mentre nella zona più interna del pezzo, il materiale cerca di recuperare la propria forma originaria. La combinazione di queste due sollecitazioni, esterna e interna, porta lo stato di compressione del pezzo come mostrato in Figura 28. Le caratteristiche del processo, come dimensione delle particelle, velocità e inclinazione, vengono scelti in funzione della particolare geometria del pezzo e di eventuali criticità esistenti. In generale, il processo è effettuato manualmente da un operatore, che ha quindi la possibilità di vedere durante l'esecuzione zone di eventuali criticità.





Figura 28 Stato di compressione superficiale

### 5.3.2 Burattatura

Un secondo processo che può essere utilizzato per l'incremento delle proprietà superficiali del componente è una tecnologia di levigatura superficiale come la burattatura. Il processo consiste nel posizionare il componente in una vasca, chiamata buratto, all'interno del quale sono presenti agenti abrasivi di piccole dimensioni. La vasca, poi, viene azionata e compie la lavorazione grazie a moto di vibrazione combinato a moto di rotazione, che grazie all'attrito tra materiale abrasivo e componente, va a levigare la superficie [10].



Figura 29 Processo di burattatura



Anche la burattatura, come la pallinatura, è una tecnologia poco costosa che aiuta ad eliminare anche stress residui e picchi. Inoltre, questo processo può ridurre la rugosità media della superficie di un ingranaggio temprato anche di  $0.03 - 0.05 \mu\text{m}$ , rimuovendo circa  $5 \mu\text{m}$  di materiale dalla superficie, ottenendo quindi una variazione minima della geometria dell'ingranaggio.

I materiali più comuni utilizzati per la burattatura sono ceramica, schegge di granito, acciaio e sabbia, con dimensioni e forme differenti a seconda del componente trattato. Nello specifico, per gli ingranaggi vengono utilizzati materiali ceramici, poco abrasivi, per evitare che i componenti trattati possano ridurre troppo lo strato indurito. Inoltre, il processo, che può essere effettuato anche a secco, in questo caso si preferisce effettuarlo con la presenza nel buratto di una soluzione chimica lubrificante poco acida, la quale va a formare un rivestimento protettivo attorno al componente, facilitando la levigatura. Il tempo e la velocità vanno, invece, ad incidere sullo spessore dello strato superficiale da rimuovere. Una volta completato il processo, il componente viene semplicemente pulito con acqua e pronto per lo step successivo.

### 5.3.3 Abrasive Flow Finishing

L'Abrasive Flow Finishing rappresenta un processo avanzato per la finitura superficiale di precisione delle ruote. Esso viene utilizzato soprattutto per accedere a quelle zone altamente inaccessibili, sfruttando l'azione abrasivo di un fluido semisolido arricchito di particelle e sottoposto a pressione sopra i 220 bar. Gli abrasivi presenti nel fluido eliminano i picchi superficiali, andando a conferire al pezzo una levigatura migliore, anche lì dove non è facile accedervi. L'attrezzatura è composta da un cilindro idraulico ed un pistone, che a seconda del componente da trattare viene adattata.

Le moderne attrezzature sono dotate da sistemi di controllo CNC per facilitarne, laddove è possibile, anche la produzione di massa. La composizione del fluido è composta da una miscela di particelle abrasive, mix di polimero viscoelastico,

carburo di silicio o diamante, e olio lubrificante. Una caratteristica fondamentale del fluido è la viscosità, la quale viene costantemente controllata e modificata variando il rapporto tra polimero e lubrificante. La portata del fluido, invece, dipende dalle dimensioni del passaggio e dalla pressione idraulica. In particolare, se si va ad agire su sbavature, si utilizzano viscosità ridotte e portate più elevate, mentre, per applicazioni di finitura e lucidatura è consigliata una portata ridotta e costante.

Il processo può essere eseguito in tre modi differenti a seconda del moto del flusso: unidirezionale, bidirezionale e orbitale. Per gli ingranaggi è più utilizzato il secondo metodo, il bidirezionale (Figura 30), caratterizzato dalla presenza di due pistoni, ciascuno dei quali contenuto in un cilindro posto in direzione opposta rispetto all'altro. Il setup può essere organizzato verticalmente o orizzontalmente.

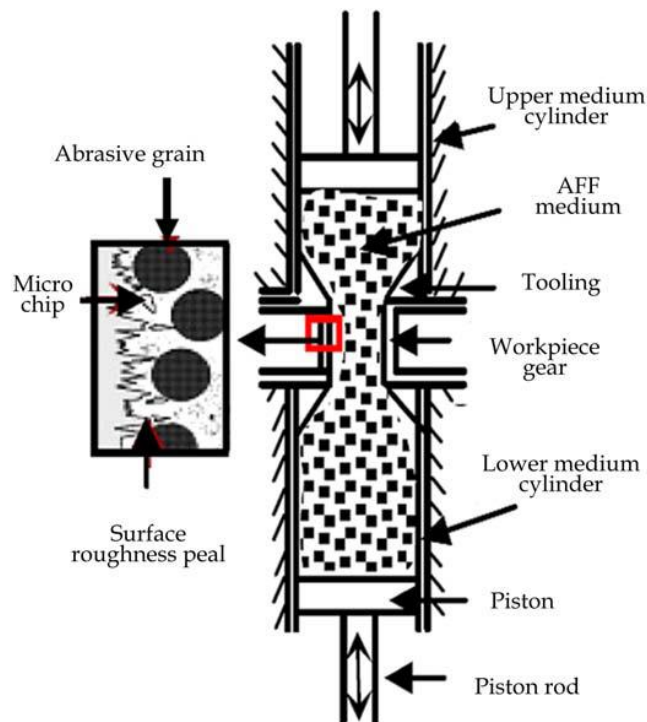


Figura 30 Processo Abrasive Flow Finishing

I risultati ottenibili con questo processo sono promettenti; infatti, l'Abrasive Flow Finishing, può portare ad ottenere valori medi di rugosità superficiale fino a 50 nm e realizzare tolleranze dimensionali fino a 65  $\mu\text{m}$  con buona ripetibilità. È inoltre un processo che può essere automatizzabile e adattato per componenti di diverso



materiale e diversa geometria. È particolarmente indicato per la rifinitura di materiali ad alta resistenza e induriti [10].

Oltre i processi di finitura qui elencati, esistono altre tecnologie applicabili che però richiedono attrezzature molto costose e processi complessi, ad esempio, la sbavatura elettrolitica o termica, processi di ossidazione o azione chimica. Pallinatura, burattatura e AFF sono processi molto utilizzati anche nei processi tradizionali e rappresentano un giusto compromesso tra costo, complessità del processo e risultato finale.



## 6. Lavorazione meccanica

Tutti i processi di finitura superficiale descritti non sono sufficienti per definire le tolleranze dimensionali e geometriche idonee affinché il componente superi la fase di verifica. Per fare ciò è necessario intervenire con lavorazioni di meccanica tradizionale. Perché ciò sia possibile, è necessario progettare il componente considerando tutte le lavorazioni che si andranno ad effettuare successivamente, in particolare andare a modificare il design del componente apportando sovrametallo, ovvero millimetri di materiale che verrà asportato meccanicamente per consentire la realizzazione di tolleranze necessarie per il funzionamento e l'accoppiamento corretto del componente.

Per l'ingranaggio in questione, le zone in cui è richiesto l'intervento della lavorazione meccanica sono principalmente due: il foro interno di accoppiamento con l'albero, compresa la sede della chiavetta, e la superficie del dente. Per quanto riguarda il foro e la sede della chiavetta, la soluzione è semplice, in quanto si va ad agire come se si stesse trattando una ruota dentata classica.

### 6.1 Finitura superficiale del dente

Il discorso si fa più complesso quando si va a considerare la lavorazione da effettuare sul profilo dei denti, in quanto si tratta di ingranaggi caratterizzati da una geometria del dente non standard e non simmetrica. Tuttavia, per garantire buona scorrevolezza e ottime performance del componente, è necessario intervenire sulla finitura superficiale del dente dell'ingranaggio, adottando un metodo classico, ovvero utilizzato per le ruote dentate realizzate tradizionalmente. I processi più utilizzati sono principalmente tre: rasatura o sbavatura, rettifica e lappatura.

### 6.1.1 Rasatura o sbavatura

Tra i diversi metodi per la finitura dei denti degli ingranaggi, la rasatura è il più adottato, soprattutto nella produzione di grandi serie, in quanto la qualità del risultato è buona e più veloce degli altri metodi. In generale il processo vede il pezzo e l'utensile rasatore ruotare insieme come fossero una coppia di ingranaggi ad assi incrociati. L'utensile, chiamato coltello rasatore, si muove grazie all'azione di un motore ed a sua volta muove il pezzo, il quale è calettato su un albero che ruota libero. La motivazione per cui gli assi sono tra loro incrociati risiede nel fatto che viene così generata un'azione di strisciamento relativo tra fianco del dente dell'utensile e fianco del dente del pezzo. Inoltre, sulle superfici del coltello rasatore sono presenti dei solchi, chiamati canalini, che vanno a formare una serie di spigoli taglienti. Proprio grazie alla presenza di tali spigoli taglienti, che per effetto dello strisciamento relativo tra i fianchi dei due denti, del coltello e dell'ingranaggio, asportano il materiale generando piccolissimi trucioli (Figura 31).



*Figura 31 Processo di rasatura*

In generale con l'azione di rasatura si può migliorare di circa 2 o 3 classi la precisione dell'ingranaggio e andare quindi a correggere errori di divisione, di profilo e di angolo d'elica. In particolare, i parametri che vanno ad influenzare la precisione dipendono non solo dall'accuratezza con cui si va a progettare e realizzare il coltello

rasatore e la macchina rasatrice, ma anche dalle condizioni del pezzo sul quale si sta lavorando e in particolar modo dal profilo della sua dentatura. Nel caso in cui le dentature siano non standard, come nel caso in questione, la progettazione dell'utensile è fondamentale per la qualità del lavoro.

### 6.1.2 Rettifica

Il processo di rettifica viene sottoposto a quelle dentature sulle quali sono stati effettuati trattamenti termici o cementazioni. Peculiarità della rettifica è la presenza di una mola profilata che varia le caratteristiche geometriche e fisiche in funzione della tipologia di rettifica che si sta effettuando: a generazione continua, generazione discontinua o metodo di forma. Per il primo caso, generazione continua, viene utilizzata una mola a vite paragonabile ad un creatore senza scanalatura di affilatura, dove l'asportazione del materiale avviene grazie all'azione abrasiva di piccoli taglienti sottoforma di cristalli abrasivi presenti sulla mola rotante. Inoltre, la mola deve traslare nella direzione assiale del pezzo affinché lavori completamente la fascia dentata (Figura 32).

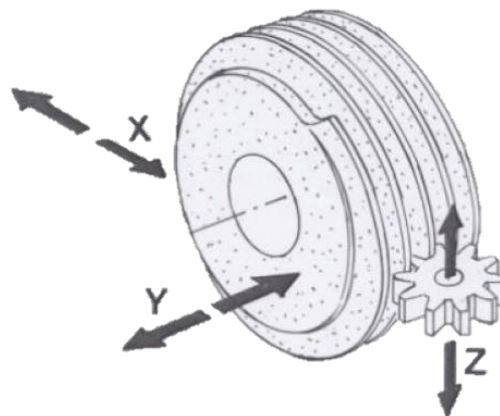


Figura 32 Processo di rettifica a generazione continua

Se si considera il metodo della generazione discontinua, le mole consistono in dischi dal profilo biconico nel caso di rettifica di un fianco o due fianchi alla volta, oppure sono mole a tazza per il metodo Maag (Figura 33).

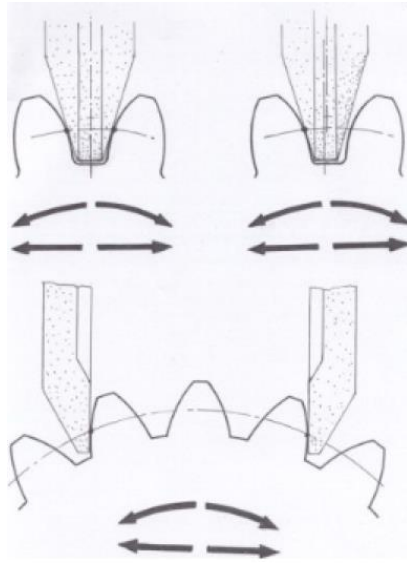


Figura 33 Processo di rettifica a generazione discontinua

Infine, nella rettifica di forma le mole hanno una geometria quasi simile al vano esistente tra i due denti da rettificare (Figura 34), infatti il profilo della mola viene modificato in funzione degli errori da eliminare dovuti all'interferenza tra mola e ingranaggio. Come nel caso precedente, si tratta di un processo discontinuo, in quanto dopo aver lavorato un vano, si divide e si passa a rettificare il vano successivo.



Figura 34 Processo di rettifica di forma





### 6.1.3 Lappatura

La lappatura, infine, prevede l'ingranamento di due ruote con l'utilizzo di lubrificante all'interno del quale sono presenti particelle di materiale abrasivo finissimo capace di asportare materiale con uno spessore di circa 15 – 20  $\mu\text{m}$ . Gli ingranaggi devono compiere la rotazione in entrambi i sensi affinché la lavorazione venga effettuata su entrambi i lati del dente. Si utilizza la lappatura per eliminare errori minimi della geometria del dente.

Tutti e tre i processi possono essere adottati per il caso analizzato in questa tesi, andando però, a progettare accuratamente l'utensile da usare, in quanto, come detto, si tratta di dentature non standard, ma soprattutto non simmetriche, dove quindi il profilo dell'utensile utilizzato per la finitura di un fianco del dente deve essere differente per la lavorazione del fianco opposto. Questo va ad aumentare le tempistiche e i costi di lavorazione del componente.

## 7. Conclusione

In seguito allo studio condotto, è possibile andare a comprendere le potenzialità della fabbricazione additiva per la realizzazione di ruote dentate. Considerando il caso particolare in questione, quello di una dentatura non standard, il primo grande vantaggio di questa tecnologia è proprio la maggiore libertà nella progettazione, in quanto consente di superare alcuni dei limiti che le tecnologie tradizionali hanno, come la lavorazione di sottosquadri. Per questo caso, quindi, la fabbricazione additiva è fondamentale, poiché ha permesso la produzione di un componente che altrimenti sarebbe stato difficile o addirittura impossibile realizzare senza modifiche alla geometria. Partendo da questa necessità, è possibile valutare tutti quelli che sono i vantaggi ottenibili dalla scelta di questa tecnologia. Per fare questa operazione è importante andare a effettuare un confronto con un componente ipotetico, disegnato con una geometria della cartella della ruota di tipo tradizionale. Partendo dalla fase di progettazione, in seguito ad ottimizzazione topologica, è stato possibile disegnare una geometria funzionale della cartella, andando a considerare solo le zone del componente che lavorano, eliminando zone scariche, senza quasi nessun vincolo dettato dal processo di produzione. Questa operazione rappresenta un aspetto importante della progettazione per l'additive, in quanto consente di andare ad ottimizzare il peso, a parità di condizioni meccaniche. Per il caso della ruota in questione il peso passa da 5.1 kg della tradizionale a 4.9 kg della AM con una diminuzione del peso del 4%. Questa riduzione di peso non va ad incidere su quella che è la rigidità del componente, che come si è visto dall'analisi modale, per alcuni modi di deformazione, vanno anche a migliorare. Infine, un altro grande vantaggio che offre questo processo, è la riduzione notevole del materiale di scarto. Infatti, se si considerano le tecnologie tradizionali, la realizzazione del componente avviene per asportazione di materiale da una materia prima di volume molto maggiore rispetto a quello effettivo del componente. Il materiale asportato, inoltre, sottoforma di truciolo, è completamente inutilizzabile e quindi materiale di scarto



poiché caratterizzato da deformazione plastica. Nella fabbricazione additiva, invece, vi è pochissimo materiale di scarto, in quanto la polvere non fusa depositata nel letto di polvere viene aspirata, setacciata e riutilizzata, in quanto non subisce alcun tipo di alterazione durante la fase di stampa. Questo, quindi, rappresenta un aspetto importante non solo ecologico, ma anche economico. Infatti, è vero che la materia prima per l'additive ha un costo maggiore rispetto a quella per l'asportazione di truciolo, però se ne utilizza di meno e vi è il minimo spreco dovuto solamente alle finiture superficiali e alle lavorazioni meccaniche successive.

Tuttavia, assieme a questi vantaggi, il processo di fabbricazione additiva ha al suo interno anche alcuni limiti. In primo luogo, è opportuno dire che ad oggi questa tecnologia presenta una diffusione limitata a causa dei costi elevati dei macchinari e della necessità di conoscenza del processo che man mano si sta ampliando. Questo porta ad avere poca concorrenza e costi sul mercato di macchinari e materie prime dettati da poche aziende. Inoltre, se si vanno a considerare anche il numero di tipologie di materiali processabili, è ancora molto inferiore al numero di materiali presenti per le tecnologie tradizionali. A causa della complessità della tecnologia e della difficoltà della messa a punto dei parametri di processo, spesso i componenti possono presentare difettosità importanti, come porosità, tensioni residue o cricche interne, tutti elementi che minano alla stabilità strutturale del componente soprattutto se sottoposto a fatica. Per questo motivo, i pezzi realizzati in additive vengono quasi sempre sottoposti ad ispezioni accurate prima di essere utilizzati. Infine, un'ultima caratteristica che ne limita la maggiore diffusione è anche la difficoltà di produrre pezzi di serie per la produzione di massa. Questo porta ad utilizzare questa tecnica in quei settori più di nicchia come l'automotive per alte prestazioni o l'aerospace.

In conclusione, è molto importante analizzare attentamente il caso che si ha davanti per valutare al meglio le potenzialità. In questo caso, per la ruota dentata, si è visto come questo processo può essere adottato e quali vantaggi si possono trarre. Tuttavia, trattandosi di ingranaggi, componenti meccanici con specifiche proprietà, è opportuno condurre una serie di test prima di andare ad inserire il componente in additive all'interno del sistema totale.



## Bibliografia

- [1] Iuliano, Calignano, Dispense corso “Tecniche di Fabbricazione Additiva”, Politecnico di Torino, 2019.
- [2] Fino, Dispense corso “Materiali per la Fabbricazione Additiva”, Politecnico di Torino, 2019.
- [3] Milewski, Additive Manufacturing of Metals, USA, Springer, 2017.
- [4] <https://www.eos.info/en>
- [5] <https://www.hoganas.com>
- [6] Normativa BS ISO 6336-5:2016, Part 5: Strength and quality of materials.
- [7] Baughman, Wiener, Hsu, Godfrey, Medina, Menon, Yang, Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production, UK, Springer, 2017.
- [8] Schmitt, Schlick, Seidel, Reinhart, Examination of the processability of 16MnCr5 by means of laser powder bed fusion, Germany, 2018.
- [9] Walker, Malz, Trudel, Nosir, ElSayed, Kok, Effects of Ultrasonic Impact Treatment on the Stress-Controlled Fatigue Performance of Additively Manufactured DMLS Ti-6Al-4V Alloy, Canada, 2019.
- [10] Gupta, Kapil Jain, Neelesh Kumar Laubscher, Rolf, Advanced Gear Manufacturing and Finishing Classical and Modern Processes, 2017, Academic Press.



# Ringraziamenti

Questa tesi rappresenta l'epilogo di un lungo percorso fatto all'interno del Politecnico di Torino e per il quale vorrei ringraziare in primo luogo il prof. Carlo Rosso, che durante questi mesi mi ha seguito e aiutato a portare a termine questo lavoro. Questo momento me lo aspettavo sicuramente diverso, ma purtroppo nessuno avrebbe potuto prevedere l'arrivo di una pandemia. Questo ultimo anno universitario non è stato facile per nessuno, né per i docenti né tantomeno per noi studenti, ma il fatto comunque di essere andati avanti ed essere riusciti a concludere questo percorso mi rende orgogliosa. Vorrei ringraziare tutti coloro che hanno continuato, anno dopo anno, a motivarmi, ad aiutarmi e a consolarmi nei momenti più duri. Ringrazio tutti i miei amici torinesi e altamurani, ringrazio la mia famiglia, senza il quale non avrei potuto fare nulla e ringrazio Mariano, colui che in tutti questi sei anni è stato accanto a me sempre, gioendo nei momenti migliori e aiutandomi a rialzare nei più bui.

*Teresa Moramarco*