

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale,
dell'Autoveicolo e della Produzione

**Corso di laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

Studio e analisi dei processi di finitura meccanica su componenti AM metallici



Relatori:

Relatore: Eleonora Atzeni

Correlatore: Alessandro Salmi

Candidato:

Stefano Molinar

Aprile 2019

INDICE

Sommario

Introduzione.....	3
CAPITOLO 1 L' Additive Manufacturing per il metallo e le sue applicazioni industriali	4
1.1 Fasi della produzione AM	5
1.2 Tecnologie AM per componenti metallici.....	7
1.3 Vantaggi e svantaggi della Tecnologia Additive Manufacturing	10
1.4 Uso dell'Additive Manufacturing nell'industria.....	11
CAPITOLO 2 La finitura dei componenti AM	13
2.1 Caratteristiche e post-processamento dei componenti AM metallici.....	13
2.2 Problematiche nelle lavorazioni per asportazione di truciolo su componenti AM metallici.....	17
2.3 Proprietà del Ti6Al4V ottenuto tramite Electron Beam Melting (EBM)	19
CAPITOLO 3 Cenni teorici sulla fresatura	22
3.1 Fresatura periferica	23
3.2 Fresatura frontale	24
3.3 Parametri di taglio in fresatura.....	25
3.4 Stato dell'arte delle lavorazioni per asportazione di truciolo su componenti AM in Ti6Al4V in letteratura. ...	26
3.5 Scelta degli utensili per le prove sperimentali	28
CAPITOLO 4 Modello analitico per la predizione delle forze in fresatura periferica.....	33
4.1 Taglio ortogonale	33
4.2 Taglio obliquo.....	34
4.3 Formulazione del modello analitico delle forze di taglio in fresatura periferica	37
4.4 Andamento della forza di taglio nel tempo.....	43
4.5 Formulazione del modello nel caso di fresatura frontale	49
CAPITOLO 5 Convalida del modello analitico confrontandolo con lo stato dell'arte in letteratura.	51
5.1 Fresatura di provini in Ti6Al4V eseguita con fresa a candela integrale in discordanza	51
5.2 Fresatura di provini in Ti6Al4V eseguita con fresa a candela integrale in concordanza	53
5.3 Fresatura di provini in AlSi10Mg effettuata tramite fresa ad inserti.	55

Introduzione

In questo documento di tesi si andranno ad analizzare gli aspetti positivi e negativi, che derivano dalla lavorazione per asportazione di truciolo di componenti realizzati tramite tecnologia Additive Manufacturing. Inoltre, si formulerà un modello analitico per la predizione delle forze generate durante la fresatura di tali componenti. Inizialmente si è introdotta la tecnologia Additive Manufacturing riferendosi in particolare al ramo relativo alla produzione di componenti metallici, ed alla sua importanza nell'industria. Dopo aver analizzato i vantaggi di questa tecnologia, ci si è soffermati sulle problematiche in fase di lavorazione meccanica, riferendosi in particolare a componenti in lega di Titanio (Ti6Al4V). Di tale materiale sono state riportate le proprietà e si sono analizzati i fattori che influenzano maggiormente la lavorazione per asportazione di truciolo. Si è anche presentata la lavorazione di fresatura introducendo i parametri di taglio e gli aspetti, positivi o negativi, delle possibili configurazioni di taglio. Una parte importante del documento si riferisce alla creazione del modello matematico per la predizione delle forze generate durante le operazioni di fresatura. Si è analizzata una configurazione di taglio obliquo introducendo delle semplificazioni per creare un'analogia con la più semplice teoria del taglio ortogonale. Per sviluppare tale modello ci si è riferiti alla trattazione non semplificata del taglio obliquo descritta nel documento "Analytical modelling of milling forces for helical end milling based on a predictive machining theory" [32]. Si è deciso di sviluppare un modello semplificato in modo da ridurre il peso computazionale ed in particolare per facilitare la comprensione del taglio obliquo. Come ultima fase, si sono ricercati in letteratura dei dati derivanti da prove sperimentali effettuate in maniera analoga alla tipologia di fresatura descritta nel modello. In questo modo si sono potuti confrontare i risultati ottenuti e convalidare il modello. La convalida è stata effettuata per fresatura periferica, eseguita sia con una fresa a candela integrale che con una fresa ad inserti, lavorando Ti6Al4V e AlSi10Mg. Durante tutta la stesura del documento si sono riportati i dati necessari ad impostare delle prove sperimentali su campioni di Ti6Al4V ottenuti tramite EBM in modo da poter effettuare in sede delle prove di convalida.

CAPITOLO 1

L' Additive Manufacturing per il metallo e le sue applicazioni industriali

L'additive manufacturing (AM) in termini più popolari chiamata anche stampa 3D, è una tecnologia nata negli anni 80 per la realizzazione di prototipi e che solo dopo un decennio è diventata una tecnica adottata nell'industria. Inizialmente era usata solo nelle fasi di prototipazione e molto spesso i componenti ottenuti rispettavano solo le caratteristiche geometriche del manufatto ma non quelle meccaniche.

Oggi giorno l'AM nell'industria è sempre più usata soprattutto per produrre componenti in materie plastiche ed in metallo; questo perché l'evoluzione della tecnologia ha permesso di ottenere componenti con geometrie molto complesse e con caratteristiche paragonabili a quelle dei materiali tradizionali. Nell'industria quindi non è solo più usata nelle fasi di prototipazione ma anche nella produzione vera e propria, in particolare nei settori aerospaziale, biomedico e automotive [1].

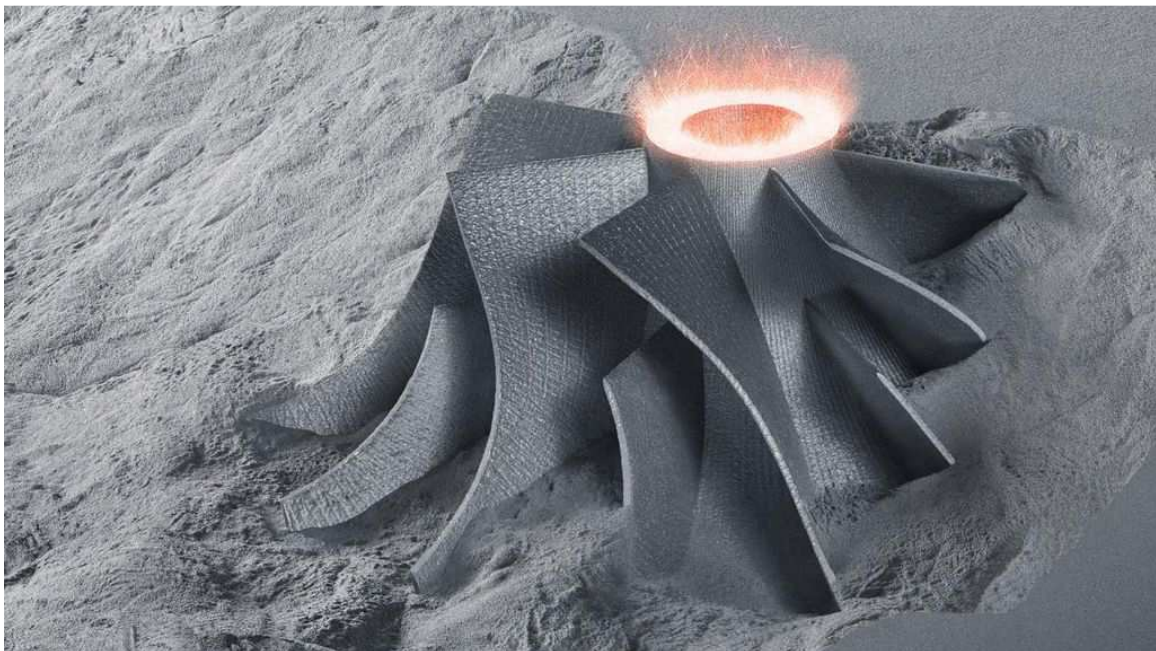


Figura 1: Esempio di componente Additive [2]

1.1 Fasi della produzione AM

Per produrre un componente con l'AM si parte da un file CAD che deve essere realizzato in maniera adeguata, ovvero non devono essere presenti errori come la compenetrazione di più superfici o linee. Successivamente si approssimano le superfici con dei triangoli ottenendo così un formato STL (Standard Triangulation Language) che rappresenta un punto di partenza comune a tutte le tecnologie AM esistenti in commercio. Da questo punto in poi iniziano le fasi di preparazione della produzione di un componente ottenuto tramite AM [1].

Tali fasi sono:

- Orientamento del pezzo
- Posizionamento dei supporti
- Slicing

Orientamento del pezzo

Con la tecnologia AM si crea il pezzo aggiungendo strati di materiale fino ad ottenere la geometria finale. Così facendo però si approssima tale geometria con una serie di piani; quindi, a seconda del posizionamento del componente, varia sia la finitura superficiale del pezzo che lo stato di tensione interno ad esso. Lo stato di tensione è influenzato dall'orientamento in quanto, per far aderire i vari strati che vengono realizzati in successione, si ha una microfusione del materiale che crea inevitabilmente uno stress residuo all'interno del componente [3]. Quanto detto sopra è valido solo qualora si lavori con materiali metallici poiché, se si realizzano componenti con materie plastiche, per far aderire i vari strati si utilizzano dei processi chimici.

Orientamento ideale



Finitura superficiale a gradini e necessità di supporti

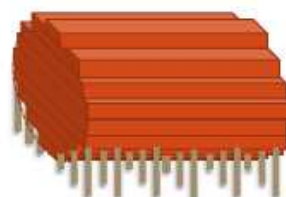
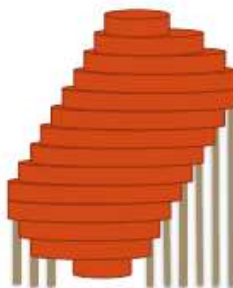


Figura 2: Schema orientamento del componente [1]

Posizionamento dei supporti

Come abbiamo già detto in precedenza con la tecnologia AM il componente viene creato sovrapponendo vari strati di materiale; così facendo, però, è necessario creare dei supporti per sorreggere determinate parti del componente che possono risultare a sbalzo. Naturalmente, la presenza dei supporti oltre a dipendere dalla geometria del componente dipende anche dal suo orientamento. Infatti, come si può vedere da Figura 2, occorre posizionare il pezzo in modo da ridurre al minimo la presenza dei supporti che, nella maggior parte dei casi, sono da rimuovere con operazioni aggiuntive esterne al processo AM.

Slicing

Con il termine slicing si intende la determinazione dello spessore dei piani con cui si approssima il componente.

Tale fase può essere eseguita seguendo 2 strategie differenti:

- *Slicing costante*
→ Lo spessore dei piani viene mantenuto costante su tutto il componente.
- *Slicing adattivo*
→ Lo spessore dei piani viene variato durante la creazione del componente al fine di migliorarne l'approssimazione.

Il vantaggio dello slicing adattivo è quello di riuscire ad approssimare meglio le superfici curve evitando che risultino a gradini. Tale tecnica presenta però degli svantaggi nel momento in cui si creano componenti differenti nello stesso ambiente di lavoro. In questo caso infatti potrebbero esserci delle curvature differenti alla stessa altezza di lavoro e quindi andare a decidere lo spessore del piano non è sempre semplice. Per migliorare questo aspetto occorre posizionare al meglio i componenti all'interno del volume di lavoro in modo da poter ottimizzare i parametri del processo [1].

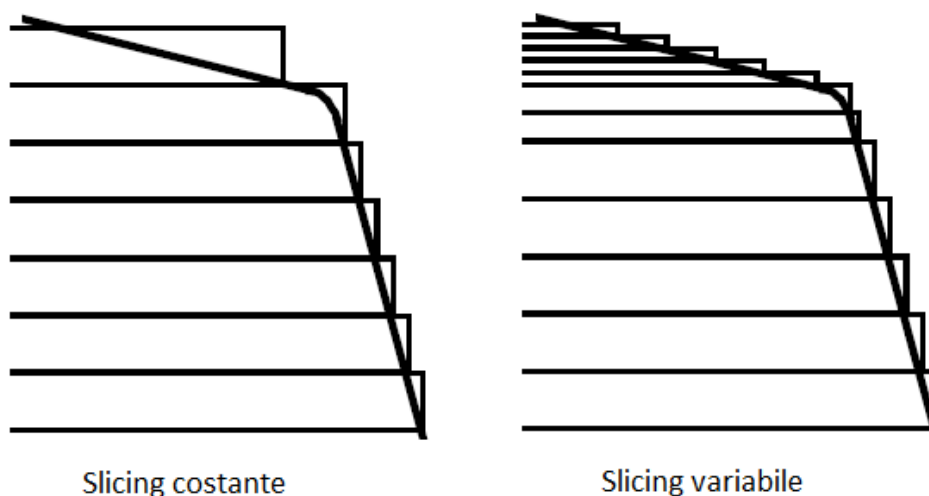


Figura 3: Schema dello slicing costante e variabile [1]

1.2 Tecnologie AM per componenti metallici

Oggigiorno esistono diverse tecniche AM per produrre componenti metallici; questo perché, grazie all'esperienza, si riescono ad ottenere componenti con caratteristiche paragonabili a quelle dei materiali classici sfruttando però i vantaggi di tale tecnologia.

Le tecniche più usate sono il Selective Laser Melting (SLM) e l'Electron Beam Melting (EBM), si prevede che nei prossimi anni queste due tecnologie continuino ad essere le più usate nell'industria, come mostrato nel grafico in Figura 4 [4].

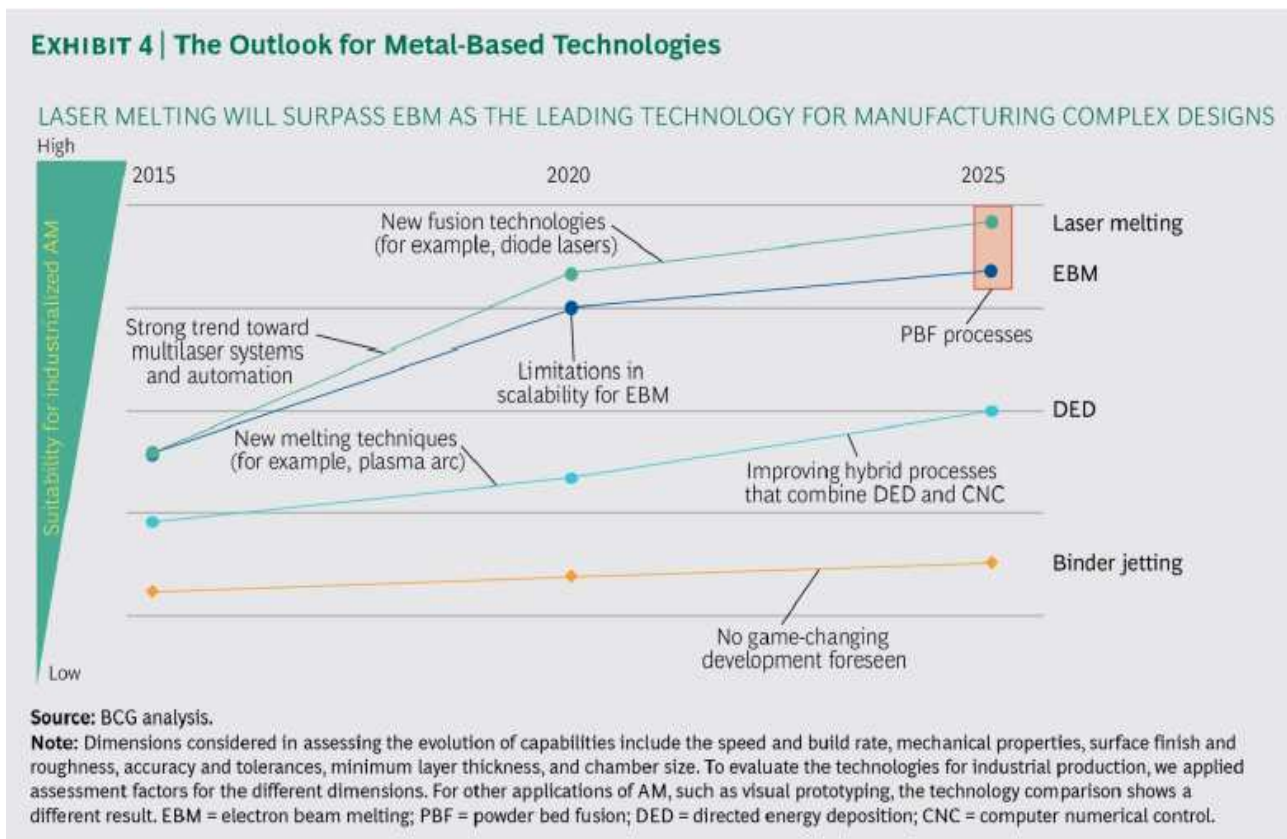


Figura 4: Andamento delle tecnologie AM per metalli nei prossimi anni [4]

Nella realtà ci sono molte altre tecnologie AM per componenti metallici; tra queste troviamo:

- *Directed Energy deposition (DED)*: questa tecnica è molto diffusa per creare i rivestimenti ma, il suo utilizzo nell'AM risulta ancora limitato poiché con essa si riescono solo a generare forme semplici, perdendo quindi uno dei più grandi vantaggi della tecnologia AM [4].
- *Hybrid processes*: i processi ibridi combinano la tecnica DED con la tradizionale lavorazione su macchine CNC. Generalmente queste tecniche vengono scartate perché si riscontrano svariate problematiche a fondere la lavorazione per asportazione di truciolo con la tecnologia AM [4].
- *Binder-jetting*: questa tecnica consiste nell'utilizzare un legante polimerico tra le particelle di polvere. Ha il vantaggio di essere molto rapida ed economica rispetto ad altre tecnologie AM per metalli ma i componenti ottenuti generalmente non possiedono proprietà meccaniche elevate. [4].

Nel seguito verranno brevemente descritti i due metodi AM più utilizzati nell'industria

Selective Laser Melting (SLM)

Questa tecnica prevede la stesura di un velo di polvere metallica con uno spessore che può variare da 20 a 200 micrometri su una piattaforma di costruzione o su uno strato precedentemente realizzato. In alcuni sistemi la polvere è compattata con l'ausilio di un rullo compattatore che ne garantisce una stesura uniforme e aumenta la densità della polvere in modo da aumentare quella del componente finale. Successivamente, un fascio laser colpisce la superficie del letto di polvere causando la fusione delle particelle metalliche. Un software regola la potenza del laser in base allo spessore dello strato e ne definisce il percorso in modo che colpisca e fonda la polvere solo nelle zone che corrispondono alla sezione del componente. Una volta ultimata questa procedura la piattaforma di costruzione si abbassa, un nuovo strato di polvere viene depositato e il processo si ripete.

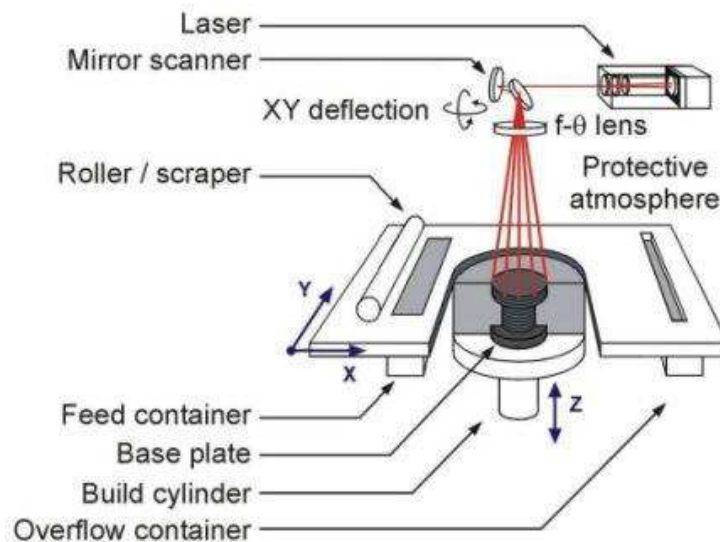


Figura 5: Schema della tecnologia SLM [6]

Tutto il processo deve essere eseguito in un ambiente con atmosfera inerte per evitare che le polveri di metallo si ossidino; i gas inerti più usati sono Argon, Elio o Azoto [5].

Un'altra peculiarità per aumentare l'uniformità delle proprietà dei componenti è quella di evitare di ripercorrere con il fascio laser sempre lo stesso percorso. Per fare ciò si possono seguire metodi differenti. Una strategia che può essere usata è quella di variare l'orientamento dei vari passaggi di 67° o 90° in modo da ottenere così degli strati incrociati come visibile in Figura 6 [5].

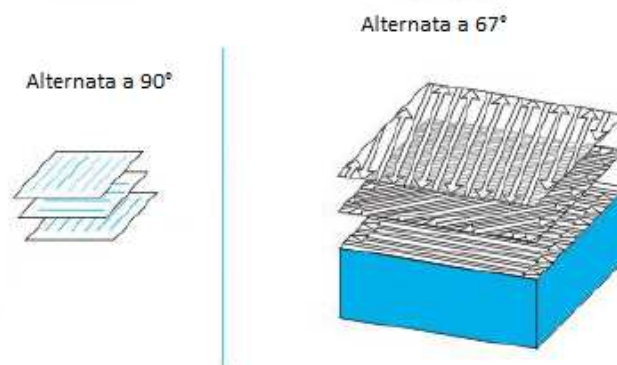


Figura 6: Schema della strategia per incrociare i vari passaggi del raggio laser [5]

Una volta che sono stati completati tutti i vari strati, prima di estrarre il componente ultimato, generalmente si effettua un trattamento termico per ridurre gli stress residui ed evitare così di avere delle deformazioni elevate [1].

Electron Beam Melting (EBM)

Questa tecnica è molto simile all'SLM infatti, si parte sempre da uno strato di polvere metallica. In questo caso, però, invece di esserci un rullo compattatore è presente un rastrello che ne garantisce una stesura uniforme. Nell'EBM per fondere le particelle di polvere si usa un fascio di elettroni ad alta densità di energia. I vantaggi del fascio di elettroni sono:

- riesce a fondere uno strato di polvere di spessore maggiore, permettendo così di usare strati più spessi e polveri con grani più grossi.
- la velocità del processo aumenta poiché il fascio di elettroni si muove quasi istantaneamente. L'elevata velocità del fascio di elettroni è legata al fatto che esso è comandato da bobine e da campi magnetici.

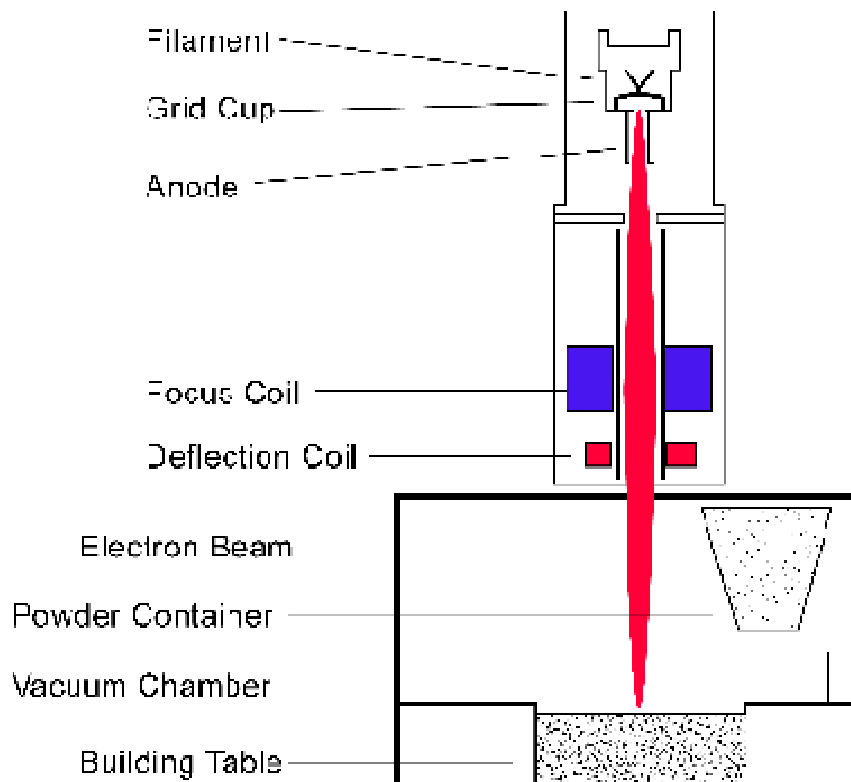


Figura 7: Schema della tecnologia EBM [7]

Oltre ai vantaggi sopracitati vi sono però anche degli svantaggi infatti, con questa tecnica si possono utilizzare solo polveri di materiali conduttori e la finitura superficiale dei componenti risulta di qualità inferiore rispetto all'SLM.

Tutto il processo viene realizzato in un ambiente sottovuoto, la temperatura è generalmente elevata e controllata per ridurre gli stress residui ed ottenere dei componenti con proprietà simili a quelli ottenuti con le tecniche tradizionali [5]. In questa tecnologia il fascio di elettroni riscalda la polvere prima di portarla a fusione, per questo motivo si dice anche che l'EBM sia un processo a caldo.

1.3 Vantaggi e svantaggi della Tecnologia Additive Manufacturing

Oggigiorno l'Additive Manufacturing è una tecnica sempre più usata poiché, grazie agli sviluppi fatti negli anni passati ora, si riescono a sfruttare al meglio i suoi vantaggi.

Uno dei più grandi vantaggi è quello di riuscire spesso ad ottenere un componente che ha già la forma finale senza dover essere successivamente lavorato; per questo si dice che la tecnologia AM è "net shape", ovvero forma netta. Questa caratteristica rende l'AM un'ottima candidata per ottenere componenti di geometrie complesse laddove le lavorazioni per asportazione di truciolo richiederebbero tempi di lavoro molto lunghi e di conseguenza costi elevati. E' da notare che grazie all'AM si riescono ad ottenere geometrie che con le classiche lavorazioni meccaniche sarebbero impossibili da ottenere; questo, ha anche permesso di facilitare la fase di progettazione snellendo molto la fase di studio del ciclo di lavoro del componente e di rendere effettuabili determinate soluzioni generalmente scartate.

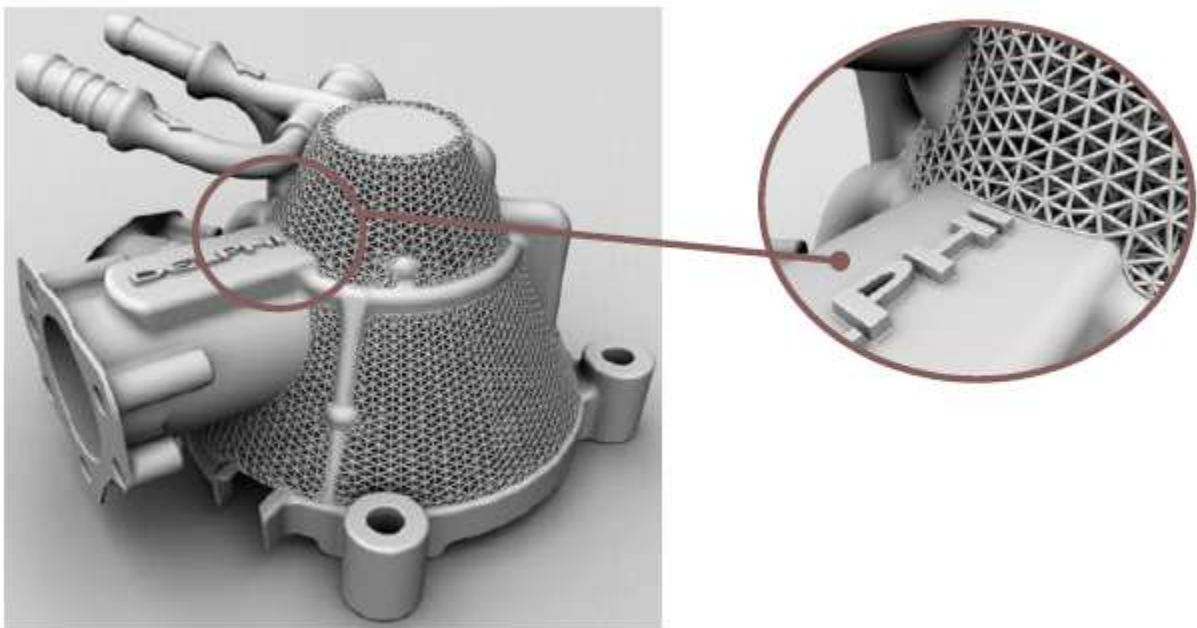


Figura 8: Esempio di uno scambiatore di calore prodotto con Tecnologia AM [1]

Un altro aspetto legato al "net shape" è la riduzione di scarti di materiale; questo può essere molto vantaggioso qualora si lavori con materiali costosi o di difficile riciclaggio.

Un grande vantaggio è legato al fatto che con la tecnologia AM basta una sola macchina per generare il componente e, per passare da un componente ad un altro, basta cambiare il file CAD. Infatti, un'unica macchina AM è in grado di generare svariate geometrie più o meno complesse senza l'ausilio di attrezzature speciali.

Il fatto che un'unica macchina sia in grado di produrre un componente a partire dal materiale grezzo fino al prodotto finito permette di ridurre gli interventi umani riducendo così i costi e la probabilità di errore.

Un'altra caratteristica fondamentale del processo AM riguarda il costo del componente e il tempo per realizzarlo; infatti, essi sono entrambi legati alla dimensione ma non alla complessità. Questo, fa sì che questa tecnologia sia particolarmente indicata e vantaggiosa per componenti molto complessi e di dimensioni non troppo elevate.

Tutte le caratteristiche sopracitate rendono l'Additive Manufacturing molto interessante per l'industria che oggi tende sempre più ad integrarla nella produzione di massa. Per questo, ad oggi, molte aziende investono grossi capitali nella ricerca e nello sviluppo di questa tecnologia

anche perché ci sono ancora molti aspetti da migliorare. Tra questi bisogna ricordare i costi, che sia per i macchinari che per le polveri risultano molto elevati. Anche i tempi di produzione sono un aspetto molto importante, infatti, l'AM ha una produttività bassa se paragonata ad altre tecnologie convenzionali.

Per quanto riguarda il "net shape" bisogna precisare che non sempre è possibile ottenere componenti già finiti; molte volte infatti è necessario inserire dei supporti, che una volta ultimato il componente dovranno essere rimossi tramite delle lavorazioni ausiliarie. Tali lavorazioni potrebbero essere necessarie anche per ottenere delle determinate finiture superficiali che con la tecnologia AM non si riescono ad ottenere. Un altro aspetto importante sono le tensioni residue ma, per quanto riguarda tali tensioni e tali lavorazioni meccaniche su componenti AM, saranno approfondite nel capitolo 2.

1.4 Uso dell'Additive Manufacturing nell'industria

Ad oggi l'Additive Manufacturing risulta essere usata soprattutto nei settori aerospaziale, medico e dell'automotive. In questi settori si riescono a sfruttare al meglio i vantaggi dell'AM soprattutto per produrre componenti in materiali difficili da lavorare e nel caso del settore medico personalizzati per il singolo paziente [4].

L'uso dell'Additive Manufacturing nelle industrie si può suddividere in tre step:

1) Sperimentale

In questa prima fase le industrie conducono dei test ed iniziano a capire le potenzialità della nuova tecnologia scontrandosi anche con i suoi limiti.

2) Prototipazione e produzione di piccole serie

Si inizia a sfruttare la tecnologia per produrre dei prototipi o dei pezzi in serie ma in quantità ridotte; generalmente, l'errore che viene compiuto dalle aziende in questa fase è quello di usare il design classico del componente o di modificarlo solo in parte, non riuscendo così a sfruttare al massimo le potenzialità dell'AM.

3) Produzione in serie

In questa fase si riescono a sfruttare al meglio le caratteristiche dell'AM producendo serie anche di 100'000 pezzi all'anno dove il design del componente è stato completamente revisionato. Arrivati a questo punto si può spingere la produzione sempre più verso un'industria di tipo 4.0 dove i processi sono sempre più digitalizzati e all'avanguardia.

Essendo l'Additive Manufacturing una tecnologia recente pochi settori industriali riescono a sfruttarla al meglio; anche perché ci sono ancora molte ricerche da sviluppare in materia. Il fatto che sia necessario investire ancora molto tempo e denaro scoraggia molte medio-piccole industrie ad addentrarsi in questa tecnologia che molte volte viene scartata. Nonostante questo, molteplici industrie medio-grandi investono ingenti capitali nella tecnologia AM per riuscire a sfruttare al meglio le sue proprietà ed offrire prodotti sempre più performanti e con costi competitivi. E' proprio grazie al successo ottenuto dalle sperimentazioni e dalle ricerche che oggi si sente sempre più spesso parlare di tecnologia AM e essa inizia ad avere un peso importante nella produzione dei settori aerospaziale, automotive e medico.

In Figura 9 è riportato un diagramma che mostra gli step raggiunti dai tre settori sopracitati.

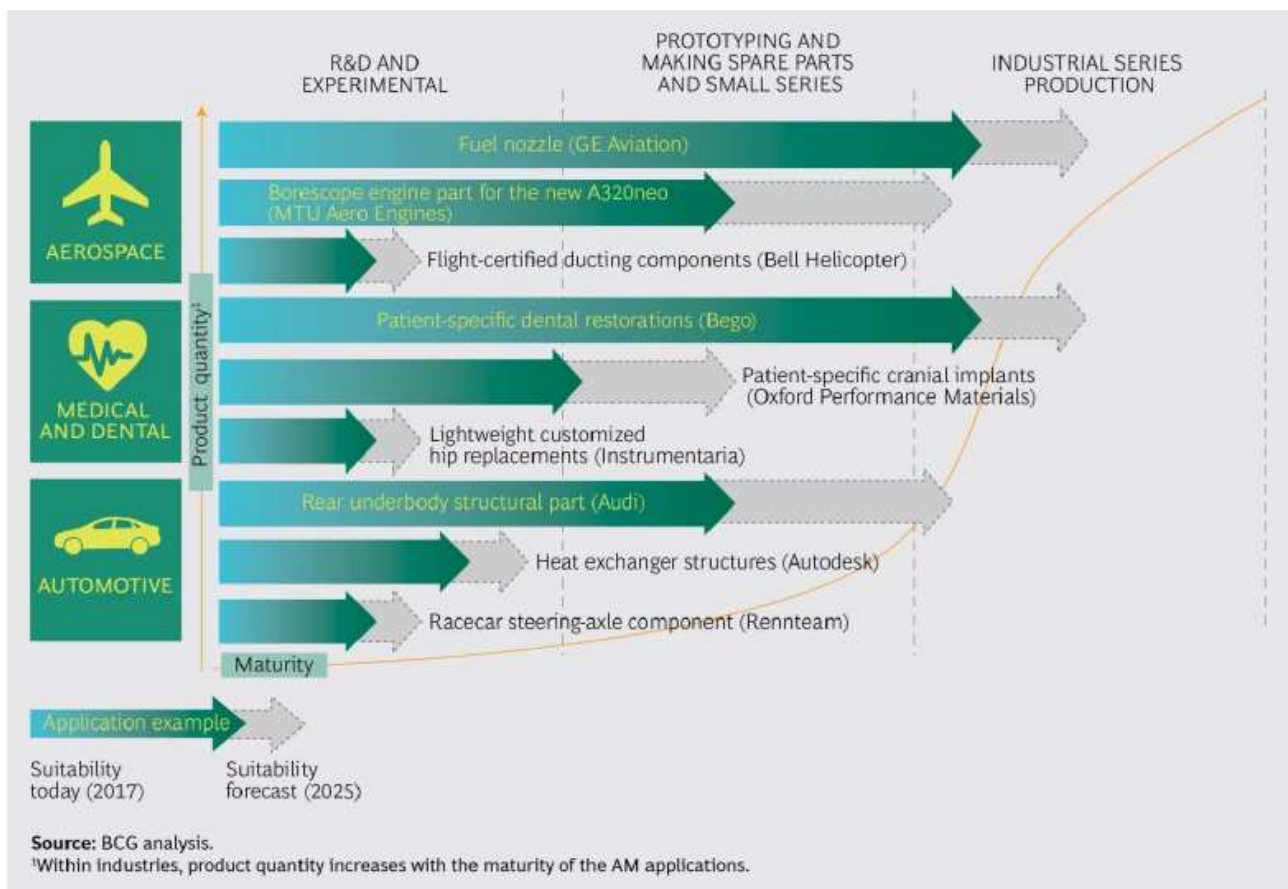


Figura 9: Diagramma settore industriale - step [4]

Come si può il settore aerospaziale è quello che ad oggi riesce a sfruttare al meglio i vantaggi della tecnologia AM; tale tecnologia è particolarmente usata per produrre componenti che puntano ad una maggiore leggerezza per ridurre i consumi o per componenti necessari alla propulsione. Quasi a pari merito troviamo il settore biomedico; esso sfrutta l'AM per creare componenti con una forte personalizzazione sfruttando al meglio le proprietà del materiale. Nel settore medico la tecnologia AM viene usata per produrre protesi di arti, protesi dentali o valvole cardiache. Come si può notare nel settore automotive non si riesce ancora a sfruttare al meglio la tecnologia AM ma si pensa che nei prossimi anni anche in questo settore l'uso di tale tecnologia aumenterà soprattutto per produrre componenti che riducano i tempi di montaggio dei veicoli [4].

CAPITOLO 2

La finitura dei componenti AM

In questo capitolo si andranno a descrivere le caratteristiche positive e negative dei componenti metallici ottenuti con la tecnologia AM e si analizzeranno tutte le fasi necessarie ad ultimare il componente una volta che viene estratto dalla macchina che lo ha creato. Particolare attenzione verrà posta allo stato di tensione residua presente nei componenti AM metallici e alle difficoltà incontrate nelle lavorazioni per asportazione di truciolo di tali componenti. Si introdurranno le proprietà del Ti6Al4V prodotto con EBM e le particolarità che tale materiale presenta in fase di lavorazione per asportazione di truciolo.

2.1 Caratteristiche e post-processamento dei componenti AM metallici.

La tecnologia AM, teoricamente, fornisce dei componenti finiti; nella realtà però prima di poter considerare il componente pronto all'uso, esso necessita di alcune operazioni, in particolare, se si tratta di un componente metallico.

Quando il componente viene estratto dalla macchina che lo ha prodotto, è necessario rimuovere tutta la polvere che rimane intrappolata in esso. Poiché l'AM generalmente viene usata per produrre geometrie complesse, quest'operazione non sempre è banale. La polvere può essere rimossa utilizzando un getto d'aria compressa o spazzolando il componente.



Figura 10: Componente AM appena ultimata la creazione[8].

Come detto nel capitolo precedente, sui componenti AM possono essere presenti dei supporti che, giunti in questa fase della produzione, dovranno essere rimossi. La tecnica usata per la rimozione dipende fondamentalmente dal componente; generalmente, se è in una zona accessibile si utilizza una sega altrimenti, si può ricorrere a delle lavorazioni più complesse, come ad esempio l'elettroerosione [9].

La tecnologia AM, sebbene venga chiamata net-shape, non sempre rispetta le tolleranze geometriche richieste; in tal caso può essere necessario lavorare i componenti per asportazione di truciolo. Tale operazione è necessaria anche qual'ora si vogliano delle finiture superficiali di qualità. Naturalmente, l'influenza di queste lavorazioni sul costo finale del componente dipenderà dalla geometria e dalle tolleranze richieste. Effettuare delle lavorazioni per asportazione di truciolo sui componenti AM presenta svariati problemi che verranno analizzati nel dettaglio nel paragrafo 2.2.

Alcune volte, i componenti AM possono essere sottoposti ad un trattamento di sabbiatura utilizzando la stessa tipologia di polvere con cui sono stati creati; questo trattamento serve ad uniformare la superficie del componente, a rimuovere eventuali incrostazioni dalla superficie e ad aumentarne le proprietà meccaniche [9].

Un grosso problema dei componenti AM è lo stato di tensione residua che deriva principalmente dall'elevato gradiente termico che si crea sul pezzo. Quando il laser colpisce in un punto lo strato di polvere, porta a fusione il materiale che, però, è a contatto con lo strato sottostante che è già solidificato. Questo quindi crea un forte sbalzo termico in una zona ristretta del componente. La zona superficiale dello strato già solidificato risulta ad elevata temperatura e quindi dilata ma, la zona sottostante si trova ad una temperatura più bassa; si crea quindi un vincolo alla dilatazione e nascono delle tensioni di compressione. Nello strato che si sta posizionando, quello che accade è differente; infatti, in esso, il materiale è fuso ma, quando questo cola sullo strato sottostante si raffredda e si contrae. Si crea così una zona di compressione nella parte più interna dello strato ed una zona di trazione in superficie. Tali tensioni creano delle deformazioni che possono rimanere nel campo elastico del materiale ma, molto spesso, poiché lo sbalzo termico è molto elevato si entra nel campo plastico. Quando il laser si allontana tutta la zona si raffredda ma, mentre le deformazioni del campo elastico vengono riassorbite, quelle del campo plastico restano e creano uno stato di tensione residua. Quello che si crea è quindi uno stato di tensione di compressione nella zona più bassa dell'ultimo strato posizionato, che si va a sommare ad una zona anch'essa in compressione presente nello strato sottostante che era già solidificato. Quindi, l'ultimo strato posizionato risulta in trazione nella zona superficiale e in compressione in quella più profonda mentre gli strati sottostanti risultano tutti in compressione.

Questi fenomeni creano il classico stato di tensione residua presente nei componenti AM metallici che, come si può vedere in Figura 11, risultano in trazione sulla superficie e in compressione in profondità [3].

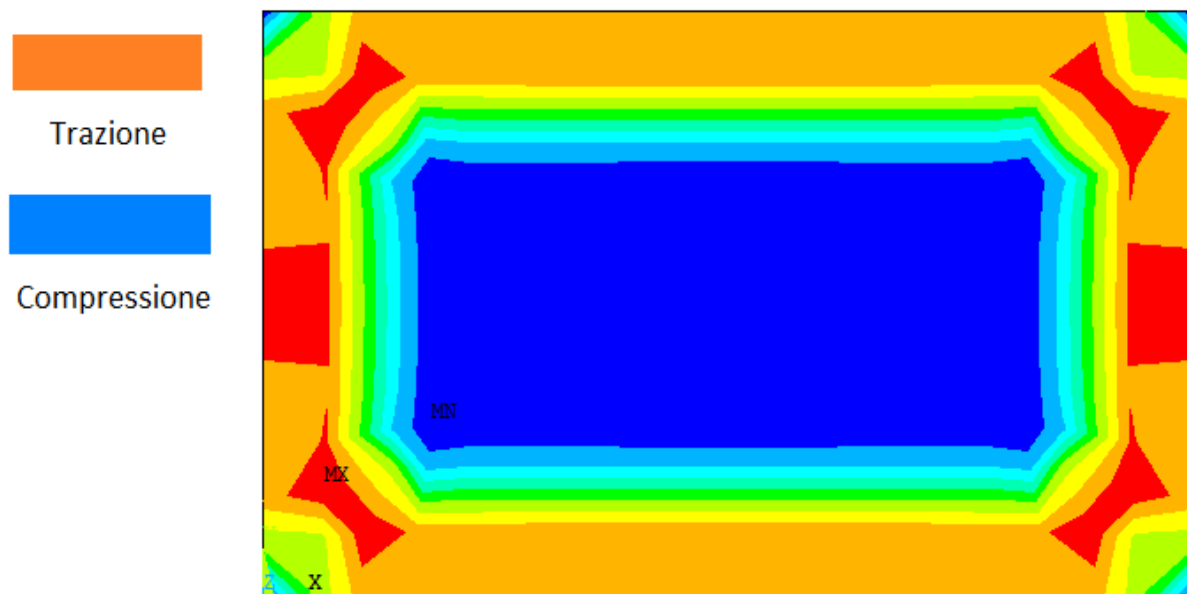


Figura 11: Stato di tensione residua su un componente AM metallico.

Questo stato di tensione è l'esatto contrario di quello desiderato, perché la trazione sulla superficie tende ad aprire eventuali microcricche che possono essere già presenti sul componente, o che si creano durante il suo uso. Infatti, se tali difetti sono immersi in uno stato di tensione di compressione, la loro propagazione è ostacolata mentre una tensione di trazione tende ad aprirli e a farli propagare.

Lo stato di trazione superficiale crea anche dei problemi quando vengono effettuate delle lavorazioni per asportazione di truciolo; questo argomento sarà approfondito nel paragrafo 2.2.

L'aspetto delle tensioni residue può essere migliorato effettuando dei trattamenti termici; non sempre però le cose migliorano in modo significativo. Una particolarità che si manifesta nei componenti AM è legata al fatto che anche eseguendo dei trattamenti termici, l'anisotropia della struttura del materiale continua a rimanere. Generalmente, se un componente in acciaio viene sottoposto ad un'elevata temperatura per svariato tempo, i grani della microstruttura del materiale tendono ad ingrandirsi in modo isotropo; questo però, non vale per i componenti AM. Tali componenti presentano delle forti anisotropie della struttura del materiale legate alla tecnologia con cui sono creati infatti, i grani della microstruttura risultano allungati ed orientati lungo la direzione del gradiente termico che si forma durante la produzione. Tale orientamento persiste anche dopo aver effettuato dei trattamenti termici però, alcune proprietà meccaniche possono migliorare notevolmente [5].

Può essere interessante valutare come variano le proprietà del materiale confrontando campioni sottoposti a diversi trattamenti termici. In Figura 12 sono riportati i comportamenti sul grafico Tensione-Deformazione di provini ottenuti tramite AM e sottoposti a 5 tipologie di trattamenti termici[10].

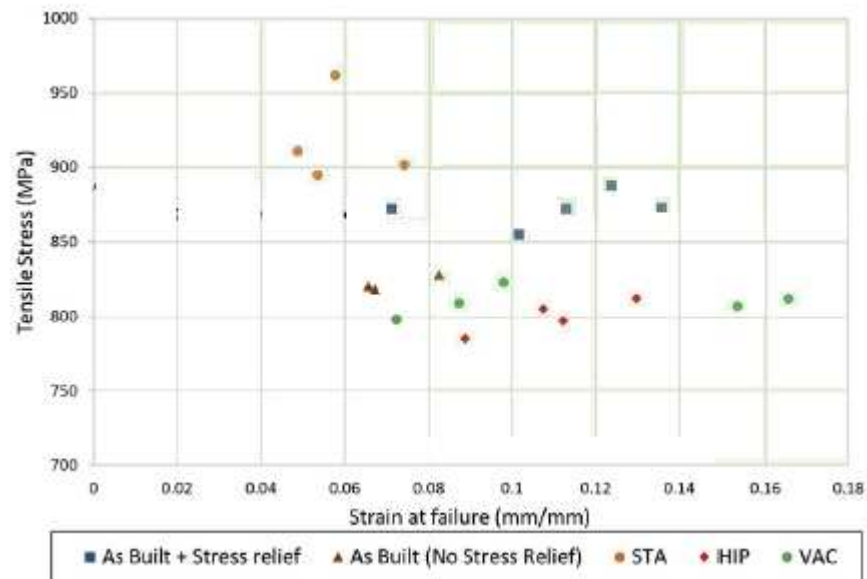


Figura 12: Confronto del comportamento Tensione-Deformazione del Ti6Al4V ottenuto tramite AM sottoposto a 5 tipologie di trattamenti termici [10].

Il confronto è stato fatto tra provini di Ti6Al4V sottoposti a:

- Nessun trattamento termico (As Built)
- Trattamento per il rilascio delle tensioni, $T=753K$ per un tempo di 2 ore (As Built + Stress relief)
- Solubilizzazione ed invecchiamento, soluzione trattata a $1240K$ per 1 ora, temprato in acqua e successivamente sottoposto ad invecchiamento con $T=868K$ per 2 ore con raffreddamento in aria (STA)
- Pressatura isostatica a caldo, $T=1200K$ per 2 ore in un'ambiente con Argon a 1500 bar con una velocità di riscaldamento e raffreddamento pari a $5K/min$ (HIP)
- Riscaldamento sottovuoto, $T=1200K$ per 2 ore in un ambiente senza pressione con una velocità di riscaldamento e raffreddamento pari a $5K/min$ (VAC)

In Figura 13 vengono riportati i valori medi dell'analisi sperimentale sopra mostrata, in questo modo è più semplice interpretare i risultati e valutare l'effetto dei vari trattamenti sulla tensione di snervamento ($0.2\% \sigma_y$) e su quella di rottura (UTS) [10].

	0.2% σ_y (MPa)	UTS (MPa)
As-Built + Stress Relief	766	872
As-Built (no Stress Relief)	710	820
Solution Treated + Age	858	918
Vacuum Heat Treatment	721	810
Hot Isostatic Press	712	800

Figura 13: Valori medi di Tensione di snervamento e tensione di rottura del Ti6Al4V per 5 tipologie di trattamenti termici differenti [10].

Come si può notare, a seconda del trattamento usato le proprietà meccaniche variano, in particolare un grande incremento è dato dal trattamento in soluzione con successivo invecchiamento. Per quanto riguarda la pressatura isostatica a caldo (HIP) o il riscaldamento sottovuoto (VAC) le proprietà meccaniche non variano di molto quindi non si hanno particolari benefici sui componenti trattati. Tuttavia, grazie alla pressatura isostatica a caldo, si ha un incremento della densità del materiale; questo può essere vantaggioso qual'ora si vogliano ottenere dei componenti con una densità prossima al 100% [10].

Un'ultima operazione che può essere prevista è quella di sottoporre i componenti ad un trattamento non distruttivo per verificare l'eventuale presenza di difetti interni al materiale; le tecniche più usate sono: magnetoscopia, radiografia o tecniche ad ultrasuoni [9].

2.2 Problematiche nelle lavorazioni per asportazione di truciolo su componenti AM metallici.

Come già accennato i componenti AM possono richiedere delle lavorazioni per asportazione di truciolo per ottenere determinate caratteristiche, ma eseguirle non è sempre semplice.

La prima difficoltà è legata alla complessità della geometria infatti, tale caratteristica rende difficile bloccare il componente sulla macchina utensile e anche i punti di riferimento per le lavorazioni non sono sempre semplici da definire. Si potrebbe pensare di integrare all'interno della geometria delle apposite zone di bloccaggio o di riferimento, le quali però andranno poi rimosse successivamente richiedendo quindi ulteriori lavorazioni. Un altro aspetto negativo di queste zone è che, quando vengono rimosse, lasciano un segno sul componente quindi, andrebbero posizionate in punti "nascosti" o che non richiedono delle particolari finiture superficiali.

Un altro problema legato alla geometria è la bassa rigidità delle pareti; infatti, la tecnologia AM viene spesso utilizzata per produrre dei componenti con geometrie complesse e con pareti molto sottili. Quando queste superfici sono sottoposte alla lavorazione flettono; così facendo, varia la quantità di materiale asportato e quindi la dimensione finale del componente. Questo fenomeno è molto chiaro se si pensa di fresare un'ampia superficie sorretta da due nervature sui fianchi; la forza generata dalla fresa fa flettere il piano che tende ad allontanarsi da essa.



Figura 14: Schema della deformazione di una superficie sottoposta a fresatura.

Una volta rimossa la fresa, il componente ritorna allo stato non deformato ma, lo spessore al centro della superficie risulterà maggiore di quello voluto. Questo aspetto può essere migliorato compensando la deformazione del pezzo con uno spostamento dell'utensile; così facendo, però, si complica di molto la lavorazione soprattutto se si hanno deformazioni elevate. La compensazione non è tuttavia un metodo applicabile qualora si producano componenti in serie, infatti con essa, per ogni singolo componente bisognerebbe impostare un valore di compensazione differente poiché ognuno di essi potrebbe avere una deformazione diversa. La soluzione più efficace sarebbe quella di staffare il componente in modo da evitare che esso si deformi durante la lavorazione, questo però come già citato sopra non è sempre di facile esecuzione.

Come già specificato nel paragrafo 2.1, è necessario prestare attenzione allo stato di tensione residua che si crea nei componenti AM metallici. Tali componenti risultano in trazione sulla superficie e in compressione a cuore. Questa configurazione, oltre a favorire la propagazione di eventuali cricche presenti sulla superficie, ne facilita la formazione durante le lavorazioni per asportazione di truciolo. Infatti, le forze che si generano durante la lavorazione generalmente sono molto elevate e possono far incrementare notevolmente la temperatura del componente. Questi due effetti combinati possono causare le seguenti problematiche: rugosità elevate, deformazioni plastiche, microcricche, trasformazioni di fase e tensioni residue [11]. Le forze di taglio e il calore sviluppato durante la lavorazione, sono funzione dei parametri di taglio e del materiale lavorato. Poiché la tecnologia AM generalmente viene usata per creare componenti con materiali di difficile lavorabilità, particolare attenzione va data a questi due parametri.

Analizziamo brevemente gli effetti legati ai due parametri sopracitati.

- **Rugosità elevate**

La rugosità della superficie lavorata è funzione dei parametri di taglio utilizzati e dalla geometria dell'utensile; ma, se si lavora un materiale tipo il Titanio che ha una conduttività termica limitata, nella zona di taglio si genera un elevato quantitativo di calore. Questo può provocare l'adesione tra il materiale lavorato e l'utensile andando così ad alterare il processo di taglio [11]. Per ridurre la possibilità di incollaggio tra materiale e utensile si può usare un utensile con un angolo di spoglia positivo in modo da facilitare il distacco del truciolo dall'utensile.

- **Deformazioni plastiche**

L'adesione tra il materiale lavorato e l'utensile fa aumentare di molto le forze in gioco; tali forze possono causare delle deformazioni che entrano facilmente nel campo plastico del materiale. Bisogna ricordare che il fenomeno dell'adesione avviene a temperature elevate e il limite di transizione tra il campo elastico e quello plastico è funzione della temperatura.

- **Microcricche**

Poiché le forze in gioco possono raggiungere valori molto elevati si possono generare delle microcricche; questo fenomeno è facilitato dalla tensione residua di trazione che è presente sulla superficie dei componenti AM.

- **Trasformazioni di fase**

Le trasformazioni di fase sono legate al calore sviluppato durante la lavorazione. Questo è particolarmente accentuato qualora si lavori un materiale a bassa conduttività termica come il Titanio.

- **Tensioni residue**

Le tensioni residue sono principalmente legate alle deformazioni plastiche generate dalla lavorazione.

Tutte le problematiche sopracitate non sono presenti solo nella produzione di componenti AM metallici, ma si possono presentare anche qualora si lavori un componente ottenuto tramite le tecniche tradizionali. Generalmente però, queste problematiche per i componenti tradizionali sono più semplici da risolvere. Questo, perché tali problematiche sono legate a dei punti di forza della tecnologia AM. Basti pensare alla complessità della geometria: se un componente ha una geometria semplice viene realizzato con i metodi tradizionali ma, se la geometria è semplice molte problematiche non sono presenti. Analogamente per la tipologia di materiale lavorato. Infatti, un materiale con elevate proprietà meccaniche sarà più difficile da lavorare di un materiale con basse prestazioni. Quindi, se creo un componente con un materiale ad alte prestazioni sfrutto la tecnologia AM per ridurre le lavorazioni ma, quelle necessarie saranno più complesse poiché il materiale usato si lavora meno facilmente.

2.3 Proprietà del Ti6Al4V ottenuto tramite Electron Beam Melting (EBM)

Il Ti6Al4V è un materiale leggero che presenta elevate proprietà meccaniche; per questo viene largamente utilizzato nei settori aerospaziale e dell'automotive, dove una maggior leggerezza consente di diminuire i consumi abbattendo così anche le emissioni. Questo materiale viene molto usato nel settore biomedico poiché presenta una buona biocompatibilità; questa proprietà con l'aggiunta di un'elevata resistenza alla corrosione lo rendono un candidato ideale per la realizzazione di protesi mediche.

La composizione chimica del materiale risulta essere quella riportata in Tabella 1

	Al	V	C	N	O	H	Fe	Y	Altri, ciascuno	Altri, totali	Ti
MIN	5,5	3,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
MAX	6,75	4,5	0,08	0,05	0,2	0,0125	0,3	0,005	0,1	0,4	Rimanenza

Tabella 1: Composizione chimica del Ti6Al4V [12].

E' da notare che la composizione chimica del materiale non varia al variare della tecnologia usata per realizzarlo; quindi, che si parli di un materiale "tradizionale" o di un materiale ottenuto tramite tecnologia AM la composizione rimane fissa. Il discorso risulta diverso per quanto riguarda le proprietà meccaniche poiché, a seconda della tecnologia usata, esse possono variare.

In Figura 15 vengono riportate le proprietà meccaniche del Ti6Al4V ottenuto tramite Electron Beam Melting (EBM).

Ti6Al4V	E [GPa]	UTS [MPa]	Yield Stress [MPa]	Elongation [%]	UTS = Carico di rottura Yield Stress = Tensione di snervamento
EBM*	118±5	915±10	830±5	13.1±0.4	

Figura 15: Proprietà meccaniche del Ti6Al4V ottenuto con EBM [13].

Oltre alle classiche proprietà è necessario soffermarsi su altre particolari caratteristiche che rendono il Titanio difficile da lavorare per asportazione di truciolo. Per prima cosa, esso è un materiale con una bassa conduttività termica, il che lo rende un buon isolante ma crea delle problematiche in fase di lavorazione. Il calore generato dalla lavorazione stessa rimane intrappolato nella zona di taglio; questo, provoca un incremento della temperatura che, come già accennato, può provocare l'adesione tra materiale e utensile.

Un'altra caratteristica da considerare è l'elevata affinità chimica che il Titanio presenta con i materiali generalmente usati per rivestire gli utensili; questo porta ad una rapida usura del rivestimento e quindi dell'utensile [11].

Particolare attenzione va data alla lubrificazione da utilizzare durante l'asportazione di materiale. Infatti, se si pensa ad una lavorazione di fresatura, l'utensile asporta materiale solo lungo una porzione di giro durante la rotazione della fresa; questo, lo sottopone a continui riscaldamenti e raffreddamenti che posso provocare degli shock termici. Tale fenomeno viene accentuato quando si lavorano materiali con una bassa conduttività termica come il Titanio [21].

Può essere interessante osservare come la vita dell'utensile sia influenzata dalla tipologia di lubro-refrigerante usato.

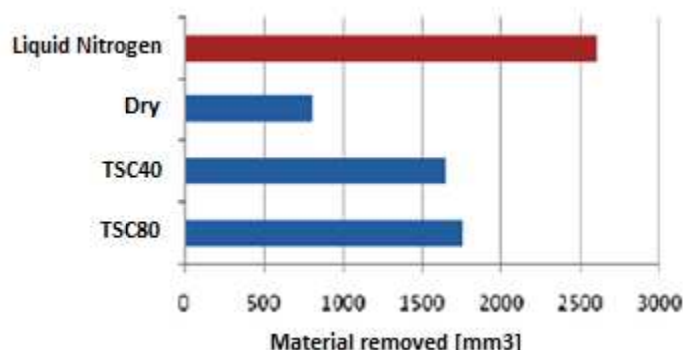


Figura 16: Grafico Durata utensile –Lubrore-frigerante [21].

Come si può osservare dal grafico in Figura 16 il sistema di refrigerazione che garantisce una maggior durata dell'utensile è l'utilizzo di Azoto liquido, questo perché orientando il getto di azoto direttamente sulla zona di taglio si riesce ad asportare una grossa quantità di calore evitando di far

surriscaldare troppo l'utensile. Si ottiene una durata accettabile anche con i sistemi TSC40 e TSC80 che corrispondono all'utilizzo di un getto di lubro-refrigerante con una pressione rispettivamente di 40 bar ed 80 bar.

Uno dei grossi vantaggi di utilizzare un getto ad alta pressione è quello di garantire l'allontanamento dei trucioli dalla zona di taglio evitando che questi alterino il processo. La tecnica Dry, ovvero senza l'utilizzo di lubro-refrigerante, garantisce la minor durata dell'utensile. Tale tecnica non è però da scartare poiché la scelta del sistema di raffreddamento non deve riguardare la sola vita dell'utensile ma anche altri parametri come il costo e l'integrità della superficie lavorata[21]. Infatti, se si pone l'attenzione sull'integrità della superficie lavorata, al variare dei parametri di taglio si osserva che in determinate configurazioni i risultati ottenuti senza l'utilizzo di lubro-refrigeranti sono migliori rispetto ad altri sistemi.

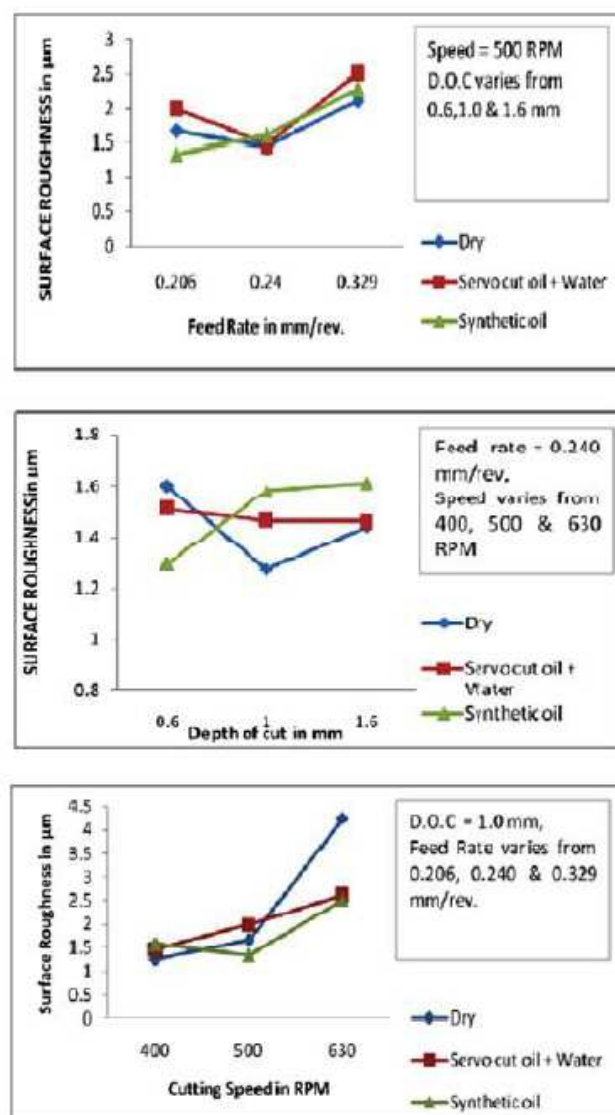


Figura 17: Grafici riguardanti la qualità della superficie lavorata in funzione dei parametri di taglio [21].

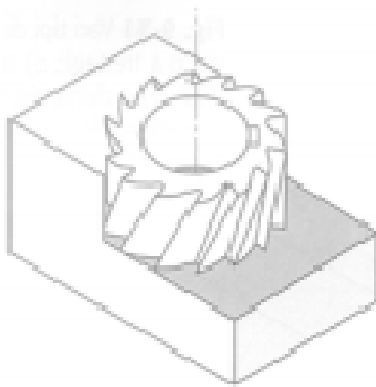
Dai grafici riportati sopra si può osservare che la finitura superficiale risulta più elevata per certe configurazioni di taglio in condizioni dry, in particolare se si utilizzano velocità di taglio medio-basse o valori di avanzamento al dente e profondità di passata medio-alti [21].

CAPITOLO 3

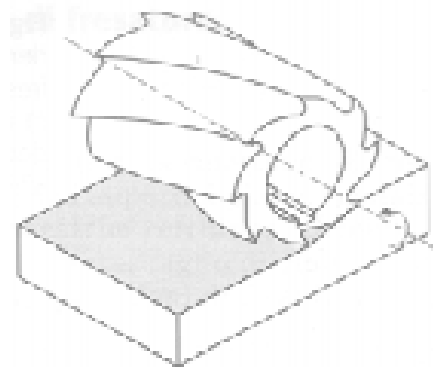
Cenni teorici sulla fresatura

In generale le tecniche di fresatura possono essere suddivise in due grosse categorie:

- *La fresatura periferica*: l'asse di rotazione della fresa è parallelo alla superficie lavorata
- *La fresatura frontale*: l'asse di rotazione della fresa è perpendicolare alla superficie lavorata.



FRESATURA FRONTALE



FRESATURA PERIFERICA

Figura 18: Schema fresatura frontale e periferica[18].

La grossa differenza tra queste due tecniche è la formazione del truciolo; infatti, nella fresatura periferica esso assume la classica forma a virgola, mentre nel caso di fresatura frontale il truciolo può possedere uno spessore costante o avere la forma a virgola.

In questo lavoro di tesi si analizzerà in particolare un caso di fresatura periferica con riferimento ad una lavorazione di contornitura con fresa a candela integrale, come rappresentato in Figura 19 (A), e un caso di fresatura frontale rappresentato in Figura 19 (B).

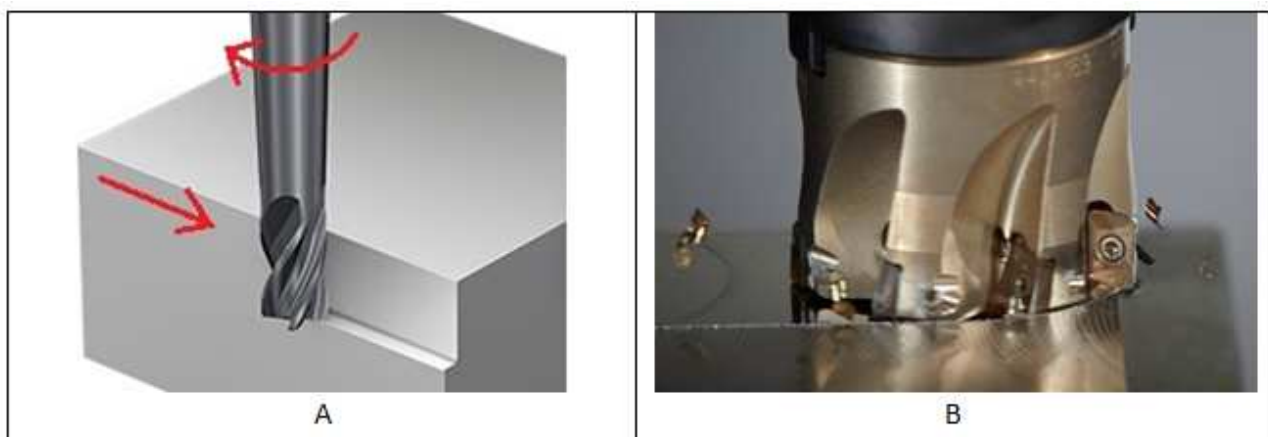


Figura 19: Schema fresatura periferica di contornitura e fresatura frontale [20] [30].

3.1 Fresatura periferica

Osservando la Figura 19 (A) e ponendo l'attenzione solo sulla relativa posizione tra l'asse di rotazione della fresa e il piano lavorato, questa configurazione di taglio sembrerebbe una fresatura frontale; ma, osservando meglio lo schema si nota che il materiale viene asportato dal fianco dell'utensile ottenendo quindi una fresatura periferica.

Quando si lavora in fresatura periferica si possono avere due casi differenti, infatti, si può lavorare in concordanza o in discordanza. La differenza riguarda la direzione della tavola porta pezzo rispetto alla direzione del tagliente; in particolare se i due versi risultano concordi si parla di fresatura in concordanza, qualora siano discordi si parla di fresatura in discordanza.

Analizziamo brevemente come avviene l'asportazione di materiale nei due casi:

Fresatura in discordanza

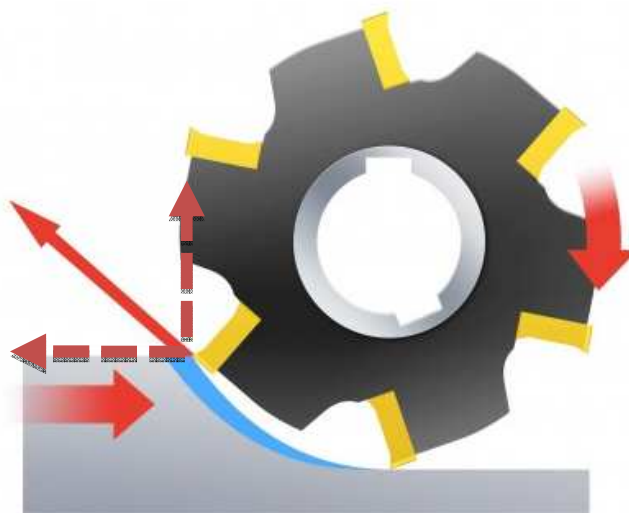


Figura 20: Schema fresatura in discordanza [20]

Nella fresatura in discordanza il tagliente si muove in direzione opposta al moto della tavola porta pezzo e il truciolo risulta avere uno spessore crescente. Il fatto che all'inizio del taglio il truciolo abbia spessore nullo porta ad avere uno strisciamento tra il tagliente e il pezzo nella parte iniziale del taglio; questo provoca un incremento della temperatura e facilita l'usura dell'utensile. E' da notare che l'incremento di temperatura, qualora si lavorino materiali con una bassa conduttività termica tipo il Titanio, può provocare l'incollaggio tra utensile e truciolo alterando il processo di taglio. Come si può vedere in Figura 20 scomponendo le forze che si creano in questa configurazione nascono delle componenti che tendono ad allontanare il pezzo dalla fresa e a sollevarlo dalla tavola portapezzo [20]. In questa configurazione di taglio se il componente non è ben fissato alla tavola portapezzo le forze generate tendono a farlo vibrare influenzando negativamente il processo di taglio.

Fresatura in concordanza

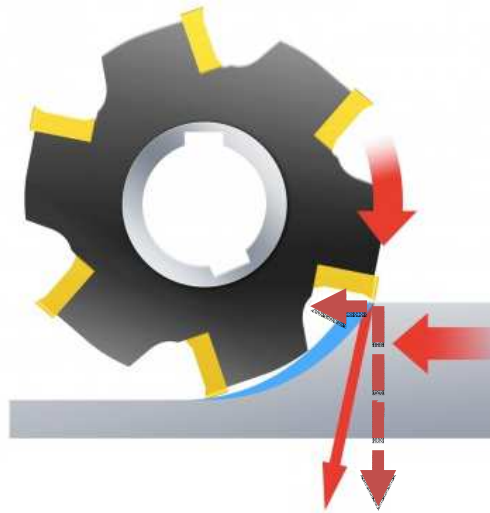


Figura 21: Schema fresatura in concordanza [20].

Nella fresatura in concordanza il tagliente si muove in direzione concorde alla tavola portapezzo e il truciolo risulta avere una sezione decrescente. Questa configurazione di taglio è preferibile alla fresatura in discordanza perché, quando il tagliente incontra il materiale riesce subito a penetrarvi senza avere strisciamento. Inoltre osservando la scomposizione delle forze riportata in Figura 21 le componenti generate durante il taglio tendono ad attirare il pezzo verso la fresa e generalmente si ha anche una riduzione delle vibrazioni [20].

3.2 Fresatura frontale

In fresatura frontale l'asse della fresa è perpendicolare alla superficie lavorata. Anche in questo caso a seconda della posizione della fresa e della suo verso di rotazione possiamo avere configurazioni di fresatura in discordanza, concordanza o mista.

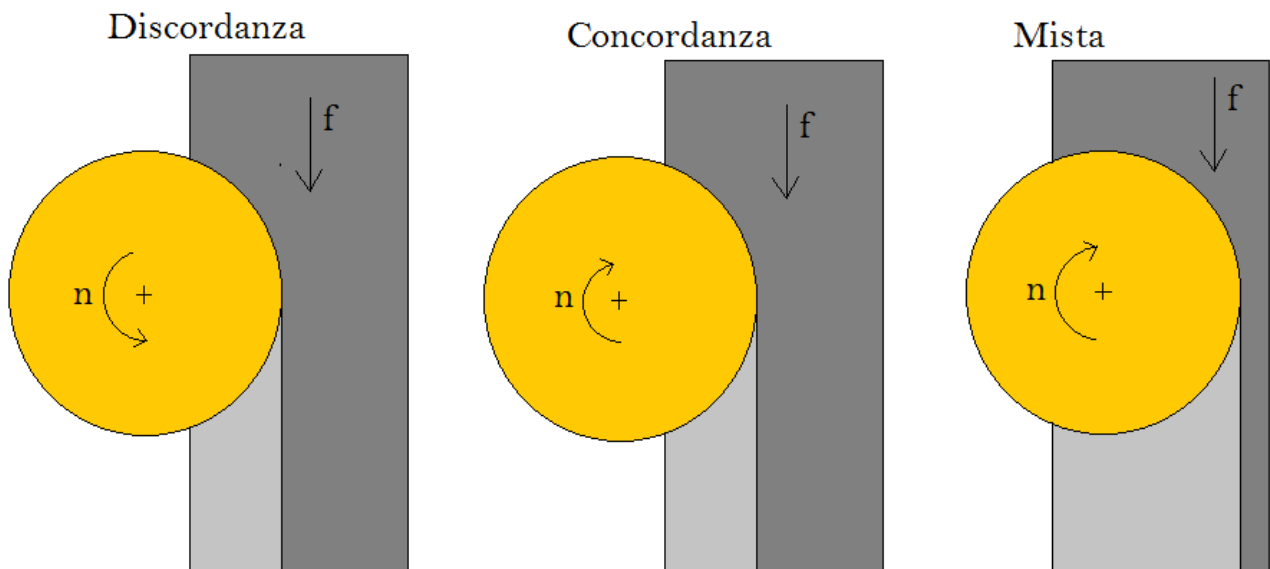


Figura 22: Schema delle varie configurazioni in fresatura frontale.

La formazione del truciolo è analoga a quella spiegata per la fresatura periferica; anche in questo caso la differenza tra concordanza e discordanza è legata ai versi della velocità di taglio e della velocità di avanzamento. Nella fresatura frontale si può ottenere però anche una configurazione mista, ovvero inizialmente l'utensile lavora in concordanza e successivamente in discordanza o viceversa. Una peculiarità di questa tipologia di fresatura è quella di non far mai coincidere l'asse della fresa con il profilo del pezzo; questo serve ad evitare che in fase di uscita la fresa rompa il materiale invece di tagliarlo e riduce inoltre le vibrazioni [31].

In fresatura frontale esiste anche una configurazione di taglio che garantisce di avere uno spessore del truciolo costante, essa si ottiene facendo coincidere l'asse della fresa con l'asse del pezzo come mostrato in Figura 23.

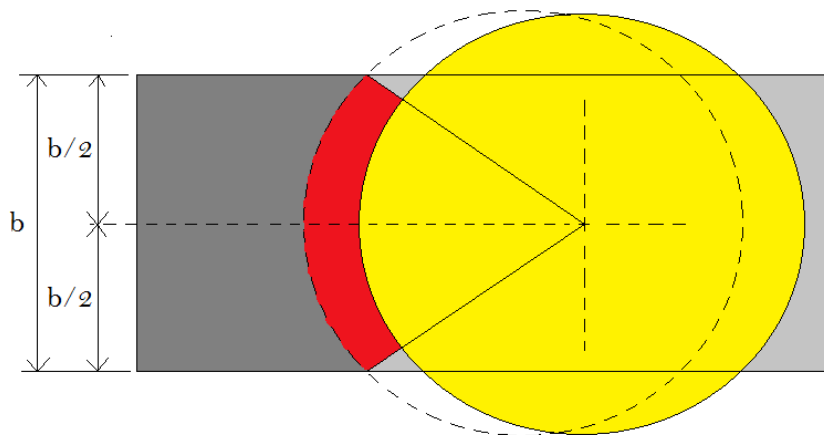


Figura 23: Schema configurazione fresatura frontale con spessore del truciolo costante.

In letteratura si trovano svariate dimostrazioni che confermano che il quantitativo di materiale asportato, che corrisponde alla porzione rossa, possiede uno spessore che può essere considerato costante. Su tale lavoro di tesi non ci si sofferma su questo aspetto poiché nel paragrafo 4.5 verranno effettuate delle assunzioni che permettono di semplificare il calcolo dello spessore del truciolo nel caso di fresatura frontale.

3.3 Parametri di taglio in fresatura

I parametri di taglio sono delle grandezze che devono essere fornite in fase di lavorazione per impostare la macchina utensile ed ottenere un taglio adeguato. Da questi parametri dipendono le forze in gioco, le finiture superficiali e le tolleranze; proprio per questo è importante definire a priori dei parametri di taglio adeguati riferendosi al materiale che si lavora, alle macchine a disposizione ed alle proprietà finali che deve possedere il componente. Per definire queste grandezze spesso ci si basa sull'esperienza ma, quando si vanno ad effettuare lavorazioni con cui non si ha affinità si possono trovare sui cataloghi degli inserti dei valori consigliati o ricercare in letteratura se sono disponibili lavorazioni analoghe a quelle da effettuare.

Naturalmente ogni lavorazione per asportazione di truciolo possiede dei parametri di taglio specifici.

Quando in fresatura si parla di parametri di taglio ci si riferisce alle seguenti grandezze:

- **Avanzamento al giro (f):** indica di quanto avanza la tavola porta pezzo ad ogni giro della fresa; generalmente viene espressa in millimetri al giro [mm/giro].
- **Profondità di passata (d):** Indica la quantità di materiale asportata lungo la direzione normale alla superficie lavorata; generalmente viene espressa in millimetri [mm].
- **Velocità di taglio (V_c):** indica la velocità relativa tra utensile e materiale da asportare; generalmente viene espressa in metri al minuto [m/min]
- **Larghezza di taglio (w):** indica la larghezza della zona dove viene asportato il materiale; generalmente è espressa in millimetri [mm].

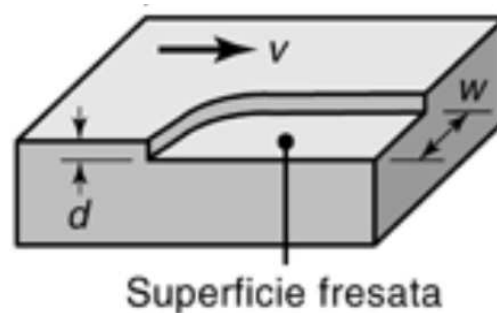


Figura 24: Schema parametri di taglio.

3.4 Stato dell'arte delle lavorazioni per asportazione di truciolo su componenti AM in Ti6Al4V in letteratura.

Per definire i parametri di taglio che verranno utilizzati nelle prove sperimentali necessarie a validare il modello analitico, ci si è basati sullo stato dell'arte presente in letteratura. In tale analisi si sono ricercati dei documenti scientifici che descrivessero la procedura sperimentale usata ed i relativi i parametri di taglio.

Uno dei problemi riscontrati da tale analisi è l'assenza di informazioni relative a prove di fresatura su componenti in Ti6Al4V prodotti con EBM. In letteratura si trovano svariati dati su prove di tornitura ma, in questo lavoro di tesi ci si è soffermati sulle lavorazioni di fresatura poiché generalmente i componenti AM hanno delle geometrie complesse che richiedono operazioni di fresatura e non di tornitura.

Tale analisi è stata comunque utile per ottenere i parametri di taglio da utilizzare durante le prove sperimentali ma soprattutto per avere delle informazioni relative alla tipologia di utensile e per decidere il tipo di lubro-refrigerante più adatto. Per quanto riguarda gli utensili, essendo presenti informazioni solo su lavorazioni di tornitura non è stato possibile usare inserti analoghi a quelli trovati ma; da quest'ultimi si sono potute ricavare informazioni utili alla scelta, per esempio per quanto riguarda la tipologia di materiale con cui erano rivestiti.

I dati raccolti sono riportati nella seguente tabella

Materiale	Ti6Al4V EBM (ARCAM Q10)	Doc [14]
Tipologia utensile	Coated carbide (DCGT 11 T3 08-UM GC1105)	
Marca	SandvikCoromant	
Lavorazione	Tornitura	
Tipologia di refrigerante	Azoto liquido	
Velocità di taglio	60 [m/min]	
Avanzamento al giro	0,1 [mm/rev]	
Profondità di passata	0,25 [mm]	

Materiale	Ti6Al4V	Doc [15]
Tipologia utensile	Coated carbide (CNMG 120412)	
Marca	Mitsubishi	
Lavorazione	Tornitura	
Tipologia di refrigerante	Azoto liquido e fluido criogenico	
Velocità di taglio	70 e 100 [m/min]	
Avanzamento al giro	0,25 [mm/rev]	
Profondità di passata	0,5 [mm]	

Materiale	Ti6Al4V EBM (ARCAM Q10)	Doc [16]
Tipologia utensile	Coated tungsten carbide (DNMG 150604 SM H13A)	
Marca	SandvikCoromant	
Lavorazione	Tornitura	
Tipologia di refrigerante	Azoto liquido ed a secco	
Velocità di taglio	50 e 80 [m/min]	
Avanzamento al giro	0,1 e 0,2[mm/rev]	
Profondità di passata	0,25 [mm]	

Materiale	Ti6Al4V EBM (Q10)	Doc [17]
Tipologia utensile	Uncoated tungsten carbide (CNMG 120404-23 H13A)	
Marca	SandvikCoromant	
Lavorazione	Tornitura	
Tipologia di refrigerante	Azoto liquido ed a secco	
Velocità di taglio	50, 80 e 100 [m/min]	
Avanzamento al giro	0,1 [mm/rev]	
Profondità di passata	-	

Materiale	Ti6Al4V EBM (Q10)	Doc [13]
Tipologia utensile	Wc coated TiAlN (CNMG 120404-SM1105)	
Marca	SandvikCoromant	
Lavorazione	Tornitura	
Tipologia di refrigerante	Azoto liquido	
Velocità di taglio	80 [m/min]	
Avanzamento al giro	0,2 [mm/rev]	
Profondità di passata	0,25 [mm]	
Durata utensile	15 [min]	

Tabella 2: Parametri dello stato dell'arte della lavorazione per asportazione di truciolo del Ti6Al4V presente in letteratura.

Dopo aver osservato i parametri di taglio trovati e considerato le differenze tra la tornitura e la fresatura si è deciso di eseguire le prove con i seguenti parametri di taglio:

- **Avanzamento (f) = 0.1 – 0.25 [mm/rev]**
- **Profondità di passata (d) = 0.25 – 0.5 [mm]**
- **Velocità di taglio (Vc) = 60 -70 [m/min]**

Questi parametri non derivano solamente dall'analisi riportata in Tabella 2 ma, sono stati anche affinati considerando i valori consigliati dai costruttori degli utensili scelti nel paragrafo 3.5.

3.5 Scelta degli utensili per le prove sperimentali

Come si può vedere nello schema riportato in Figura 25 la fresatura periferica eseguita durante le prove sperimentali con la fresa a candela integrale risulta in concordanza; si è scelta questa tipologia perché, come già accennato sopra, risulta la migliore dal punto di vista della creazione del truciolo e inoltre riduce le vibrazioni. Anche per quanto riguarda la creazione di calore durante il processo tale tipologia risulta più appropriata a lavorare un materiale come il Titanio.

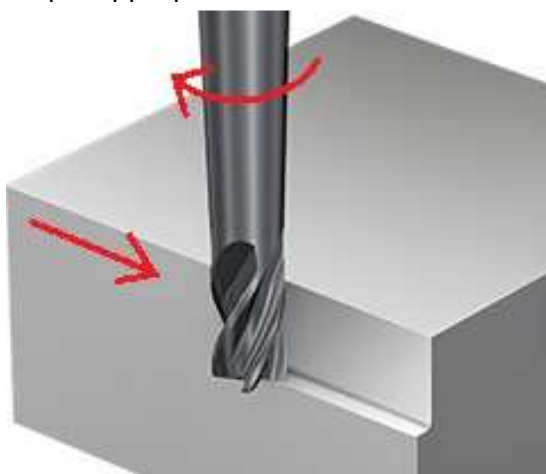


Figura 25: Schema della fresatura utilizzata durante le prove sperimentali effettuate con la fresa a candela integrale [20].

Nel seguente paragrafo si riportano i criteri adottati per la scelta degli utensili da usare durante le prove sperimentali necessarie a validare la simulazione analitica.

Un aspetto fondamentale che ha guidato la scelta è stato quello di cercare utensili con una geometria semplice in modo da facilitare il processo di taglio e la sua simulazione.

Un altro punto chiave è stato quello di rivolgere l'attenzione ad utensili che fossero compatibili con le macchine a disposizione in laboratorio in modo da limitare l'acquisto di nuove attrezzature. Dal punto di vista tecnico-produttivo è presente una vasta scelta di utensili innovativi creati appositamente dalle case produttrici per le lavorazioni delle superleghe come il Ti6Al4V. Riferendosi per esempio al produttore "Osawa" esiste un'ampia gamma di frese integrali a candela denominata HF.

Tali frese possiedono una geometria leggermente modificata rispetto alle frese classiche per facilitare la lavorazione delle superleghe.



Figura 26: Aspetti migliorativi per la lavorazione delle superleghe [24].

Le frese HF presentano un angolo d'elica ed una spaziatura tra i denti variabili in modo da migliorare gli aspetti legati alle forze ed alle vibrazioni; in più presentano un tagliente leggermente modificato in modo da migliorare la finitura superficiale e renderle più versatili [24].

Naturalmente questa serie di frese esula dai nostri limiti di ricerca poiché presentano una geometria complessa che renderebbe troppo complicata la creazione del modello ma, risultano appropriate qual'ora si parli di produzione in ambito industriale. Un'analisi interessante che potrebbe essere sviluppata è quella di comparare le forze generate in fresatura utilizzando delle frese innovative di tipo HF e delle frese a candela integrali "tradizionali"; naturalmente quest'analisi è al di fuori del lavoro sviluppato in questa tesi.

Tenendo conto delle caratteristiche necessarie a semplificare il modello, della compatibilità con le macchine presenti in laboratorio e del materiale da lavorare la scelta è ricaduta sulle seguenti due tipologie di utensili:

- Fresa a candela in metallo duro integrale (1P341-1000-XA 1630 "Sandvik coromant") utilizzata per la fresatura periferica.
- Inserti triangolari (TNGX 100408SR-F:M8340 "Pramet") utilizzati per la fresatura frontale.

Analizziamo nel dettaglio gli utensili selezionati.

Fresa a candela in metallo duro integrale

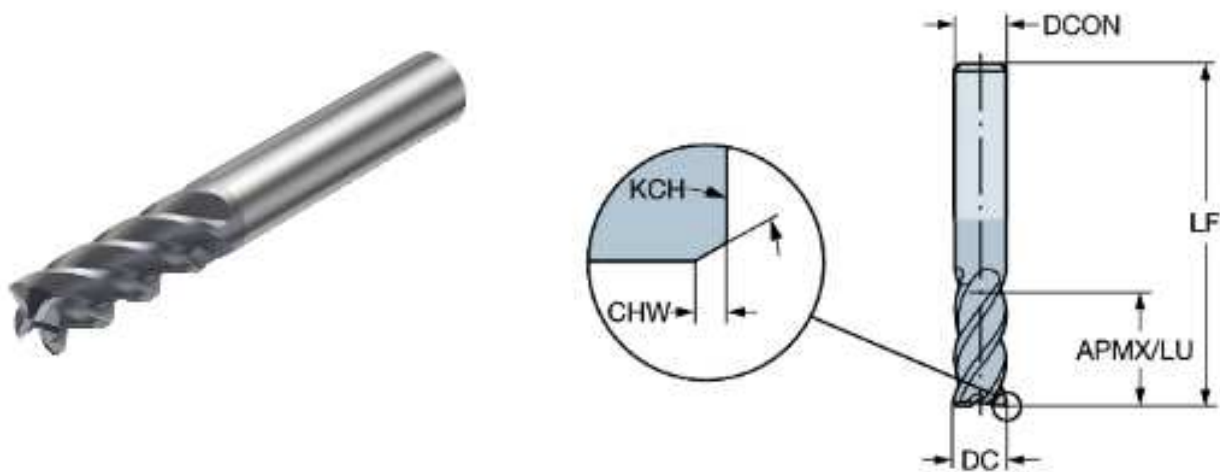


Figura 27: Schema geometrico della fresa a candela indicata per le prove sperimentali[20].

I dati geometrici della fresa designata per le prove sperimentali sono riportati nella Tabella 3

Diametro di taglio (DC)	10	[mm]
Massima profondità di taglio (APMX)	22	[mm]
Angolo di smusso (KCH)	45	[deg]
Profondità smusso (CHW)	0,1	[mm]
Diametro di taglio della faccia di contatto (DCF)	9,8	[mm]
Diametro di montaggio (DCON)	10	[mm]
Lunghezza utile (LU)	22	[mm]
Angolo d'elica (FHA)	45	[deg]
Angolo di spoglia radiale (GAMF)	10,5	[deg]
Angolo di spoglia assiale (GAMP)	13,5	[deg]
Materiale (SUBSTRATE)	HC	[-]
Rivestimento (COATING)	Ti, Al	[-]
Numero di denti (Z)	4	[-]

Tabella 3: Dati geometrici della fresa a candela integrale indicata per le prove sperimentali [20].

Naturalmente durante la scelta si è cercata una fresa che fosse adatta alla lavorazione delle leghe di Titanio e su tale aspetto si sono anche cercati i parametri di taglio suggeriti dal produttore in modo da poter essere confrontati con quelli derivanti dall'analisi dello stato dell'arte presente in letteratura ed eventualmente apportare opportune modifiche.

Uno dei vantaggi della fresa a candela integrale è quello di avere i taglienti perfettamente allineati. Questo facilita le operazioni sperimentali perché, una volta montato l'utensile in macchina si può procedere direttamente con l'asportazione di materiale senza dover verificare il corretto allineamento dei taglienti.

Inserti triangolari per fresatura frontale



Figura 28: Inserto triangolare scelto per le prove [26].

La scelta è ricaduta su un inserto triangolare con 6 taglienti, questo perché esso presenta una geometria semplice da implementare in fase di modellazione ed inoltre l'elevato numero di taglienti consente di effettuare numerose prove ruotando soltanto l'inserto senza doverlo cambiare.

Come si può osservare dall'immagine in Figura 28, tale inserto presenta un angolo di spoglia negativo. Per definire gli altri parametri geometrici bisogna tenere conto del montaggio sul corpo fresa rappresentato in Figura 29.

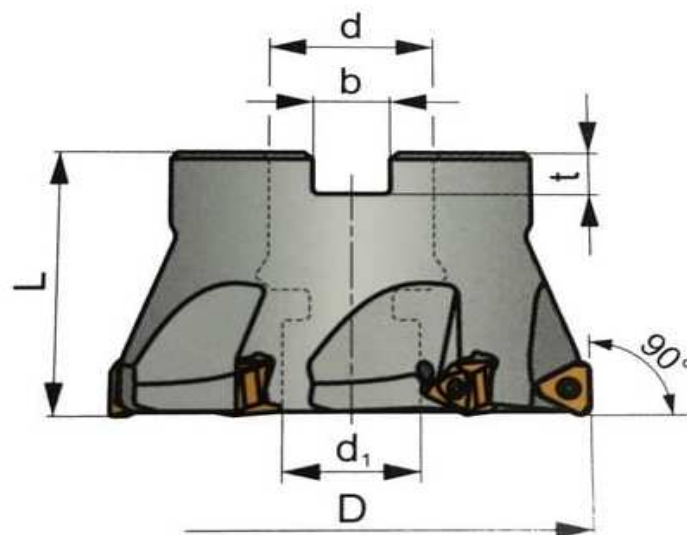


Figura 29: Dettaglio corpo fresa usato nelle prove sperimentali con inserti triangolari [28]

I dati geometrici del corpo fresa su cui verranno montati gli inserti designati per le prove sono:

- $D = 80$ [mm]
- $d_1 = 38$ [mm]
- $L = 50$ [mm]

- $z = 6$ [-]
- $\chi = 90$ [deg]

Da catalogo non si sono trovate informazioni relative ad un eventuale angolo di inclinazione dell'alloggiamento dell'inserto; tale parametro sarà da valutare prima di effettuare le prove sperimentali in modo da poterlo inserire nella modellazione analitica.

Uno degli svantaggi di questa soluzione è quello di dover accertarsi che, una volta montati sul corpo fresa, tutti gli inserti risultino perfettamente allineati. Naturalmente anche questo inserto risulta adatto alla lavorazione delle leghe di Titanio.

CAPITOLO 4

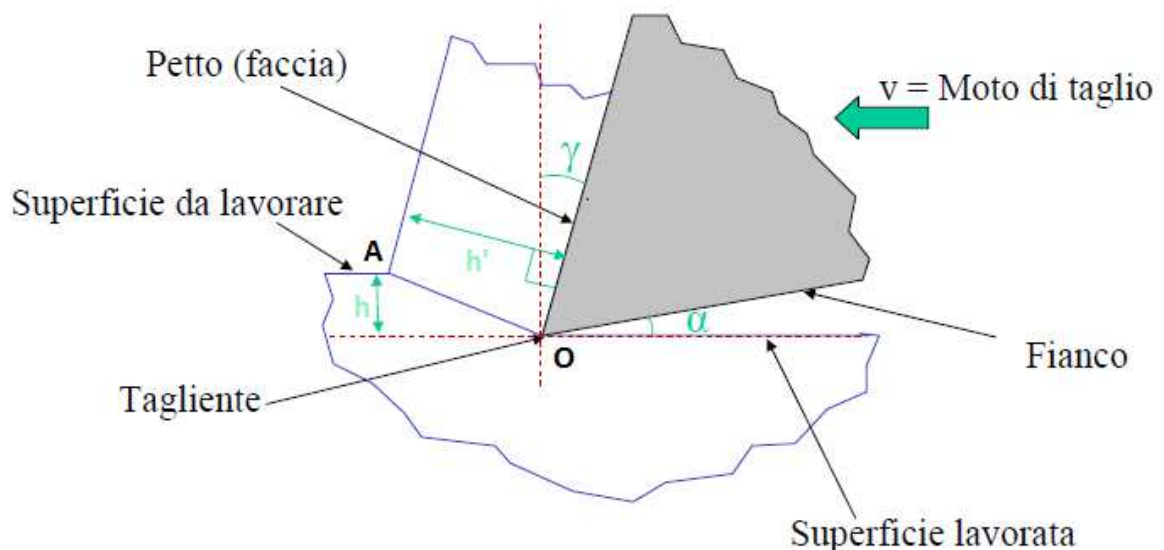
Modello analitico per la predizione delle forze in fresatura periferica

Come già accennato precedentemente è stato creato un modello analitico implementato su Excel per ottenere ed analizzare le forze che verranno generate durante le prove sperimentali. Tenendo presente la configurazione di taglio delle prove sperimentali si è utilizzato il modello di taglio obliquo aggiungendo alcune ipotesi semplificative. Si è partiti dal modello descritto dall'articolo "Analytical modelling of milling forces for helical end on a predictive machining theory" che considera tutti gli aspetti del taglio obliquo ma sono state usate delle formule compatibili legate al taglio ortogonale.

Prima di entrare nei dettagli della formulazione del modello vengono riportati alcuni schemi per spiegare brevemente la teoria del taglio ortogonale ed obliquo.

4.1 Taglio ortogonale

Nel taglio ortogonale la lunghezza del tagliente si estende in una direzione normale rispetto alla velocità di taglio; questo permette di poter descrivere il fenomeno di taglio in uno spazio 2D [22].



γ = Angolo di spoglia superiore

α = Angolo di spoglia inferiore

h = Spessore di taglio

h' = Spessore del truciolo

Figura 30: Schema nomenclatura utensile [22].

La formazione del truciolo può essere schematizzata nelle seguenti fasi:

1. Inizialmente il tagliente penetra nel materiale ad una profondità pari alla profondità di passata (h).
2. Il materiale viene compresso e si deforma plasticamente iniziando a scorrere lungo il piano OA definito piano di scorrimento o di taglio.
3. Distacco del materiale dal tagliente e relativa trasformazione in truciolo.
4. Scorrimento del truciolo sul petto dell'utensile.

Particolare attenzione va data anche alle forze che si generano; per ricavarle ci si riferisce alla teoria di Merchant che si basa sull'equilibrio tra le forze che si generano sull'utensile e sul componente [22].

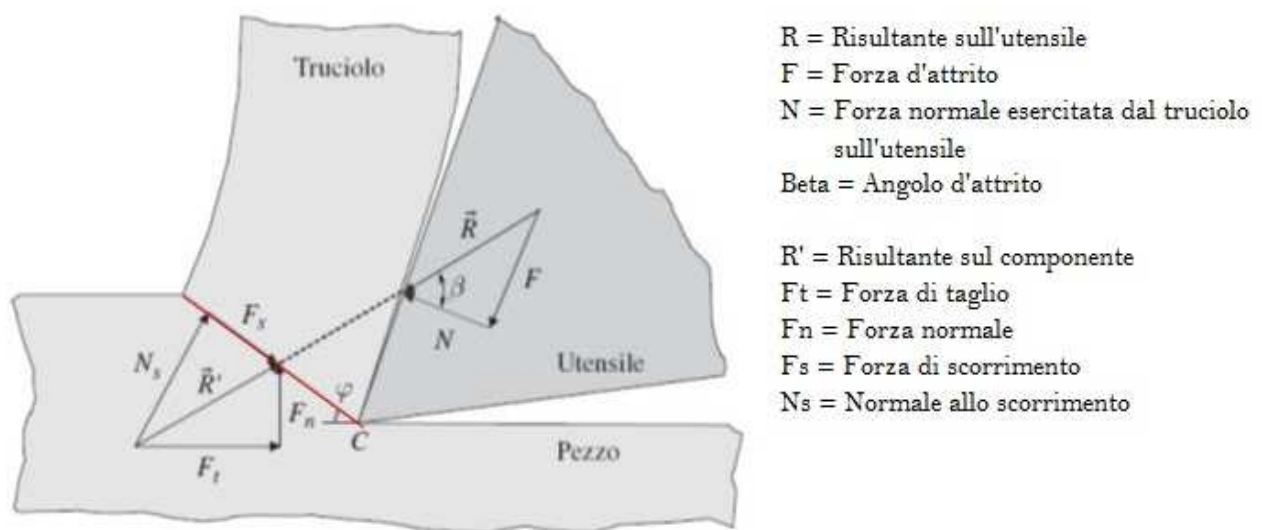


Figura 31: Schema delle forze generate durante il taglio ortogonale [23].

Secondo questa teoria la risultante delle forze che agiscono sul pezzo è orientata sulla stessa retta d'azione di quella generata dalle forze agenti sull'utensile. Naturalmente per avere l'equilibrio le due risultanti hanno la stessa direzione, lo stesso modulo ma verso opposto [23]. In questa parte si tralasciano le formule utilizzate per ottenere le singole componenti di forza poiché esse saranno analizzate nel dettaglio nei paragrafi seguenti.

4.2 Taglio obliquo

In questo caso il tagliente non è più ortogonale alla velocità di taglio ma risulta inclinato di un certo angolo.

Per visualizzarlo meglio si può pensare ad una fresa a candela, dove il tagliente si avvolge attorno all'asse della fresa creando un elica; se si asporta materiale col fianco dell'utensile il contatto tra il componente e il tagliente avverrà lungo una zona inclinata sia rispetto alla velocità di taglio rispetto all'asse della fresa.

Se si immagina invece di avere una “fresa a candela con denti dritti” ,lavorando col fianco dell’utensile il tagliente incontra il materiale lungo una linea che risulta perpendicolare alla velocità di taglio e parallelo all’asse della fresa.

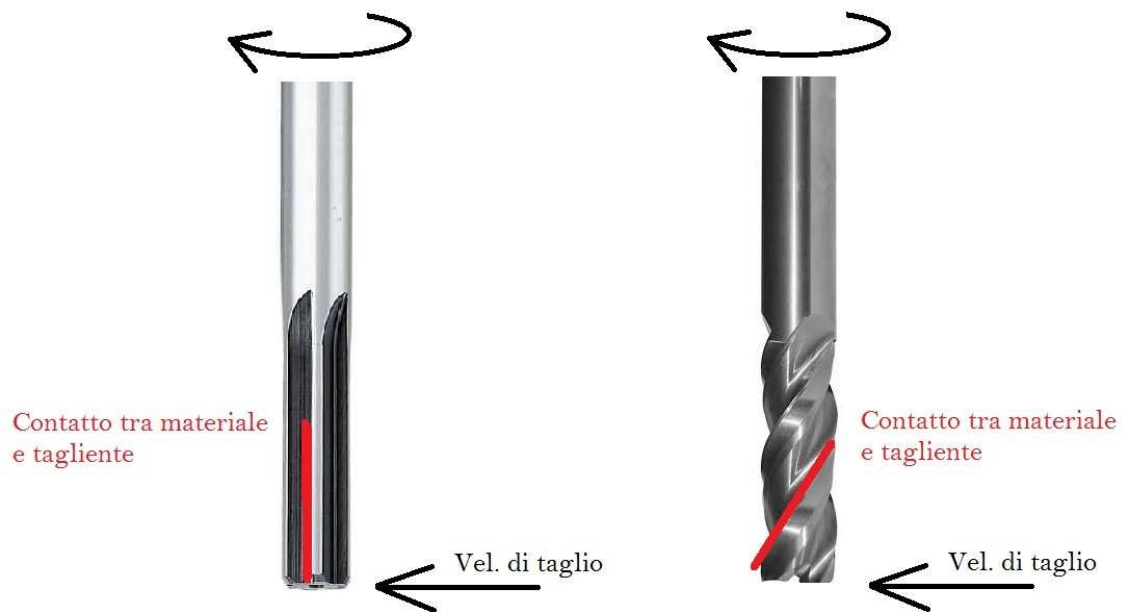


Figura 32: Dettaglio zona di contatto tra materiale e tagliente.

Nel caso di taglio obliquo si vanno prima a definire gli angoli di taglio caratteristici su un piano normale al tagliente (Figura 33) in analogia al taglio ortogonale; successivamente, si riportano tali grandezze sul piano di taglio effettivo (Figura 34), che è il piano che contiene la velocità di taglio e la direzione del flusso del truciolo. A questo punto si calcolano le forze generate durante il taglio su tale piano ed infine si riportano le forze sul piano verticale (Figura 35), che risulta normale all’asse della fresa.

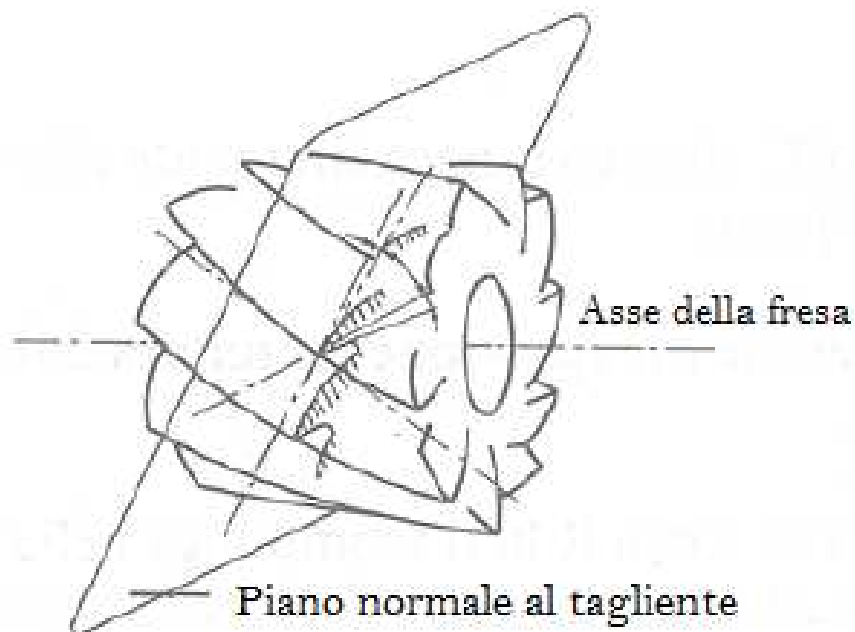


Figura 33: Piano normale al tagliente [23].

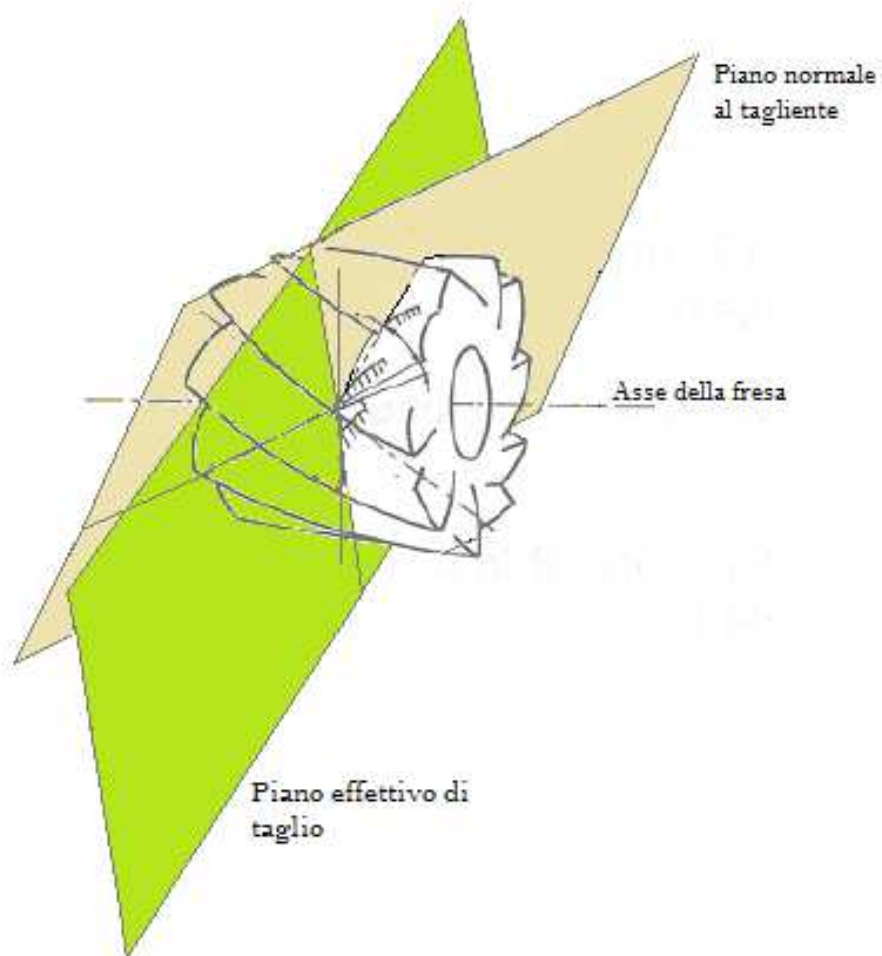


Figura 34: Piano normale al tagliente e piano effettivo di taglio.

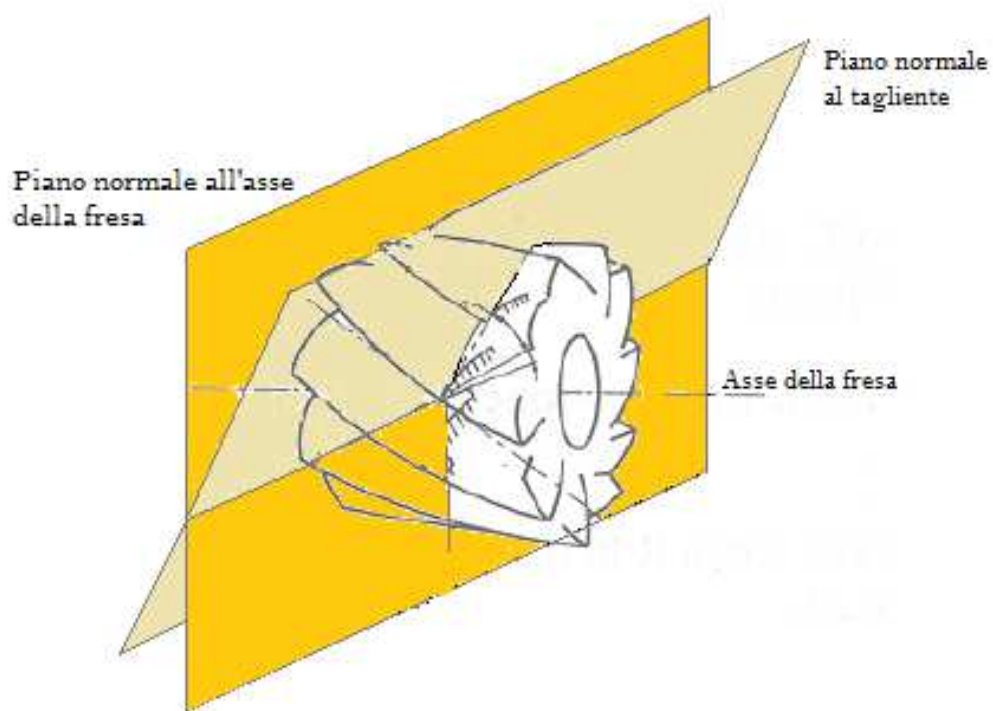


Figura 35: Piano normale al tagliente e piano normale all'asse della fresa.

Utilizzando la teoria di Merchant si ricavano le forze finali che risultano essere quelle riportate in Figura 36.

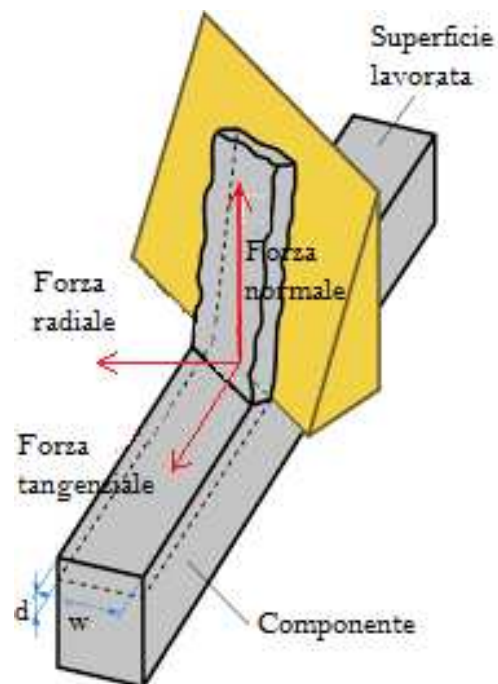


Figura 36: Schema forze finali [27].

Le componenti di forza che è necessario ricavare sono:

- Forza tangenziale
- Forza radiale
- Forza normale o assiale

4.3 Formulazione del modello analitico delle forze di taglio in fresatura periferica

Prima di addentrarci nella formulazione del modello vera e propria è utile riportare una tabella con la nomenclatura delle variabili usate.

z	Numero di denti della fresa	[-]
$\varnothing$	Diametro della fresa	[mm]
γ_n	Angolo di spoglia normale	[deg]
φ_n	Angolo normale di taglio	[deg]
β_n	Angolo d'attrito	[deg]
i	Angolo d'elica	[deg]
r_c	Fattore di ricalcamento	[-]
γ_e	Angolo di spoglia effettivo	[deg]
φ_e	Angolo di taglio effettivo	[deg+]
β_e	Angolo d'attrito effettivo	[deg]
F_s	Forza di scorrimento	[N]
τ_s	Tensione di scorrimento	[MPa]
h_{av}	Altezza media del truciolo	[mm]
η	Angolo di flusso del truciolo	[deg]

η_c'	Proiezione dell' angolo di flusso del truciolo sul piano verticale	[deg]
UTS	Carico di rottura	[MPa]
R	Forza risultante	[N]
$F_{c,e}$	Forza di taglio sul piano effettivo	[N]
$F_{n,e}$	Forza normale sul piano effettivo	[N]
F_t	Forza di taglio-Forza tangenziale	[N]
F'_r	Forza radiale sul tagliente	[N]
F'_a	Forza assiale sul tagliente	[N]
F_a	Forza assiale	[N]
F_r	Forza radiale	[N]
χ	Angolo di registrazione	[deg]

Per iniziare la trattazione sono stati ricavati gli angoli normali al tagliente, ovvero quelli contenuti nel piano evidenziato in Figura 37.

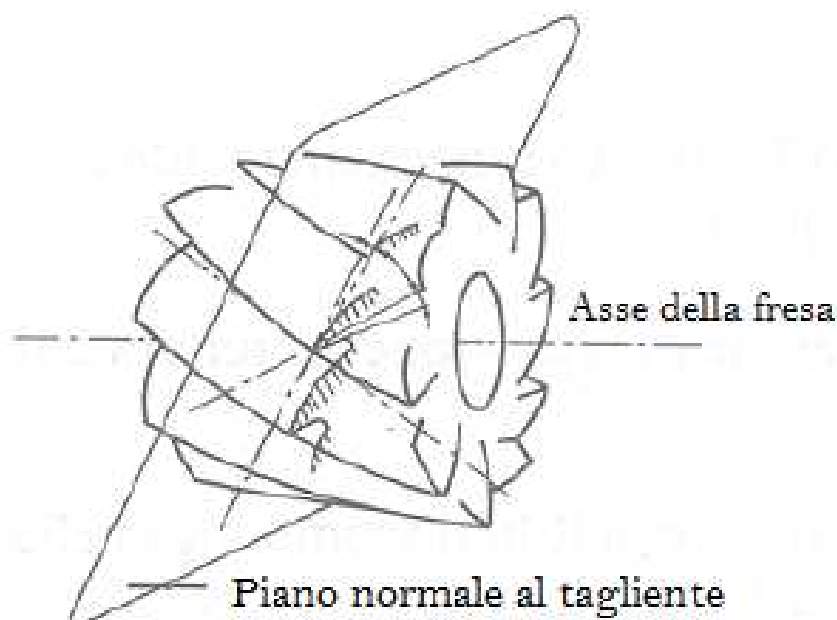


Figura 37: Piano normale al tagliente [23].

Su questo piano si è calcolato l'angolo φ_n utilizzando la seguente formula che deriva dalla teoria del taglio ortogonale.

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \gamma_n}{\frac{1}{r_c} - \sin \gamma_n} \right)$$

Il valore di γ_n deriva dal catalogo della fresa a candela acquistata mentre, il fattore di ricalcamento è il rapporto tra lo spessore del truciolo indeformato e quello del truciolo effettivo.

$$r_c = \frac{h}{h'}$$

In questa prima fase non è stato possibile calcolare tale valore poiché non avendo ancora effettuato le prove sperimentali il valore del truciolo deformato non era disponibile. Per ovviare a questo problema si è utilizzato un valore prova che è stato scelto considerando il fatto che il

fattore di ricalcamento deve sempre essere compreso tra 0 e 1, inoltre, ci si è basati anche sui valori presenti in letteratura [25].

Naturalmente questo approccio è valido poiché noi siamo su un piano normale al tagliente e come si può vedere in Figura 38 siamo nel caso di taglio ortogonale.

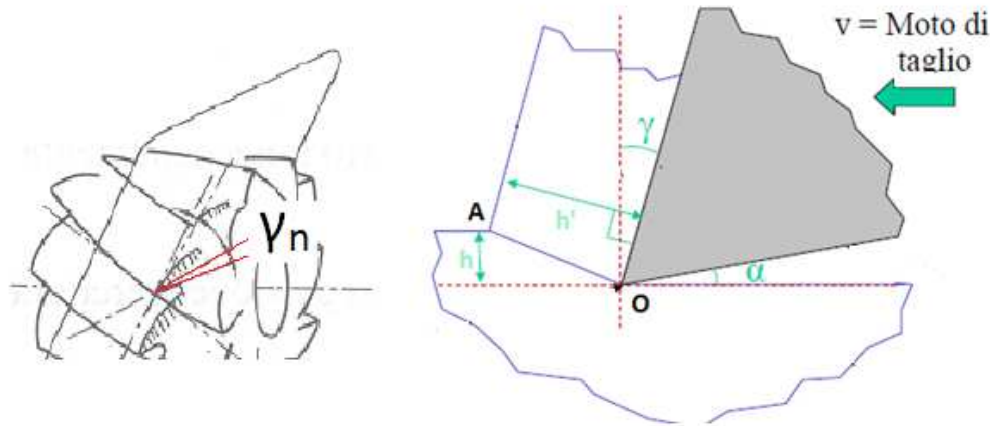


Figura 38: Schema taglio ortogonale sul piano normale al tagliente.

Come già accennato precedentemente, essendo nel caso di taglio obliquo, ovvero quando il tagliente è inclinato di un angolo “ i ” rispetto all’asse della fresa, anche il truciolo fluisce lungo una direzione inclinata di un angolo η ; in questo modello si è assunto che:

$$\eta = i$$

Gli angoli fondamentali di taglio sul piano effettivo si ottengono per proiezione:

- $\gamma_e = \text{sen}^{-1}(\text{sen}^2 i + \cos^2 i * \text{sen} \gamma_n)$
- $\varphi_e = \frac{\cos \gamma_e * \text{sen} \varphi_n}{\cos \gamma_n * \cos i}$
- $\beta_e = \frac{\pi}{2} - 2\varphi_e + \gamma_e$

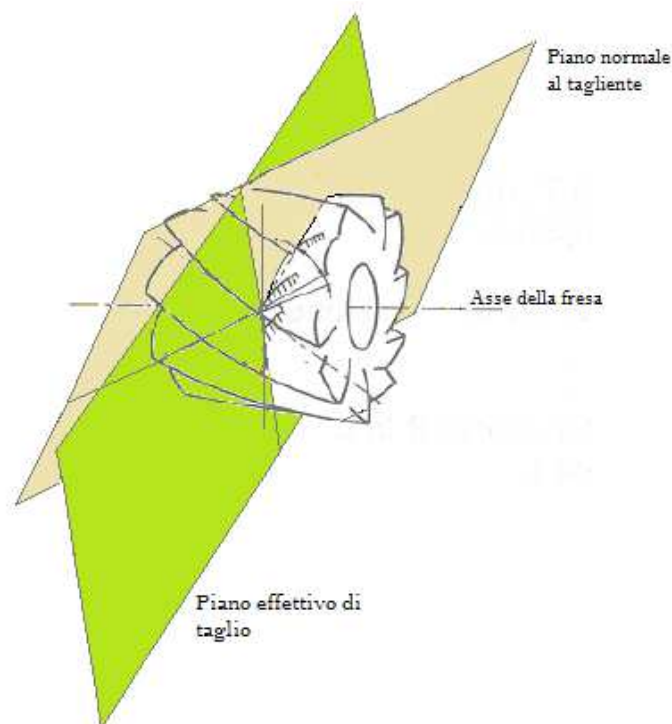


Figura 39: Piano effettivo di taglio e piano ortogonale al tagliente.

Per procedere con l'analisi è necessario ricavare la proiezione di tale angolo sul piano normale all'asse della fresa, ovvero dobbiamo ricavare l'angolo η'_c . Il valore della proiezione dell'angolo η sul piano verticale si calcola usando la seguente espressione:

$$\eta'_c = \cos^{-1} \left(\frac{\cos \gamma_n * \cos i}{\cos \gamma_e} \right)$$

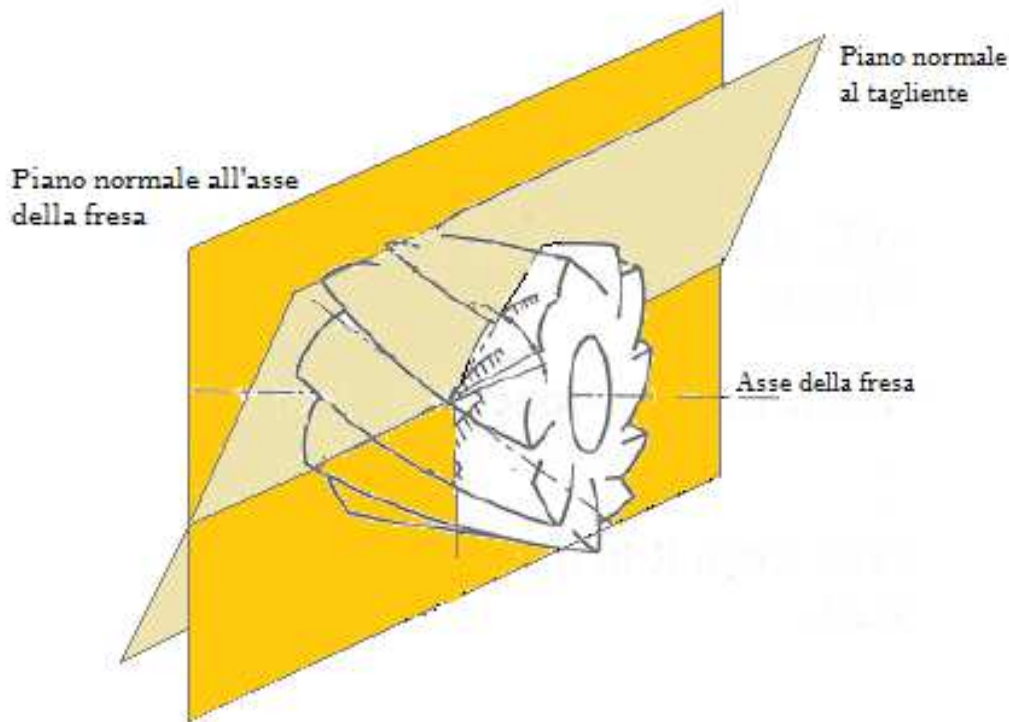


Figura 40: Piano normale al tagliente e piano normale all'asse della fresa.

Calcolo degli angoli per la fresa a candela

Analizzando la scheda tecnica della fresa acquistata si sono ricavate le grandezze geometriche che la caratterizzano. Tali parametri sono stati implementati su Excel in modo da ottenere i valori di tutti gli angoli necessari al calcolo delle forze. In Tabella 4 vengono riportati i valori numerici di tale angoli.

In particolare i dati valori sono:

Catalogo	Piano normale al tagliente	Piano effettivo	Piano normale all'asse della fresa
$\gamma_n = 10,5^\circ$	$\gamma_n = 10,5^\circ$	$\gamma_e = 36,2^\circ$	$\eta'_c = 30,5^\circ$
$i = 45^\circ$	$\varphi_n = 20,2^\circ$	$\varphi_e = 22,9^\circ$	
		$\beta_e = 80,4^\circ$	

Tabella 4: Valori degli angoli di taglio sui vari piani.

Osservando i risultati si può affermare che l'angolo di spoglia γ varia di molto passando dal piano normale al tagliente a quello effettivo di taglio, invece l'angolo di scorrimento φ risulta meno influenzato da questo passaggio. Naturalmente si sono calcolati solo i valori degli angoli necessari a proseguire con l'analisi delle forze tralasciando quelli che non compaiono nei passaggi successivi.

Una volta ottenuti i valori di tutti gli angoli possiamo calcolare la forza di scorrimento sul piano effettivo di taglio. Tale forza rappresenta la forza che deve essere esercitata perché si abbia lo scorrimento del materiale lungo il piano di taglio OA (Figura 41).

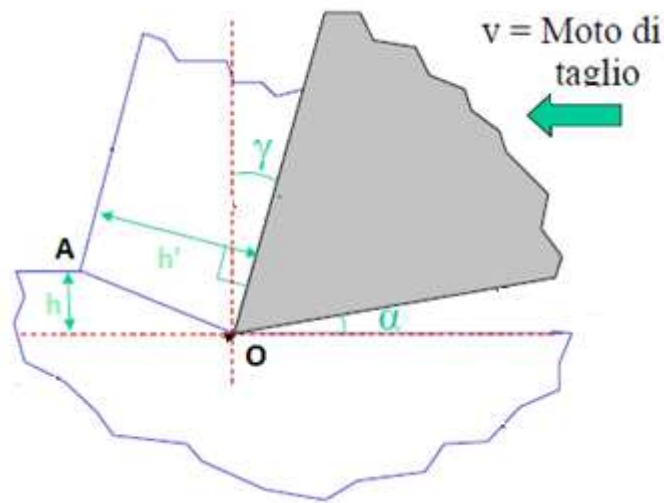


Figura 41: Dettaglio dello schema del taglio ortogonale.

$$F_s = \frac{\tau_s * h_{av} * d}{\cos \eta'_c * \sin \varphi_e * \cos i}$$

Per determinare i termini mancanti sono stati effettuati alcuni ragionamenti semplificativi, in particolare per quanto riguarda lo spessore medio del truciolo h_{av} . Per calcolare tale valore si è usata la formulazione classica del taglio ortogonale:

$$h_{av} = \frac{1}{2} * f_z * \sin \varphi_0$$

dove f_z (avanzamento al dente) corrisponde all'avanzamento al giro diviso il numero di denti della fresa, mentre l'angolo φ_0 è definito come l'angolo di lavoro.

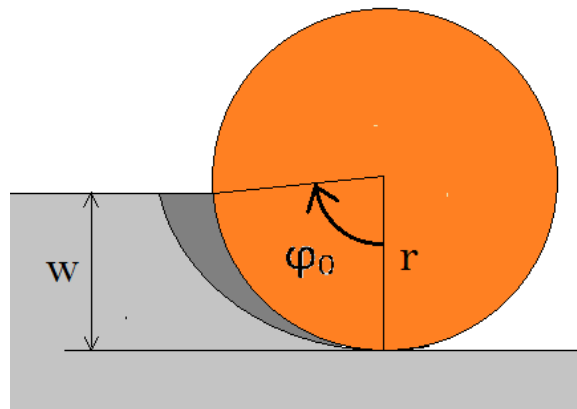


Figura 42: Schema angolo di lavoro.

Dalla Figura 42 si può facilmente dedurre che:

$$\varphi_0 = \cos^{-1} \left(1 - \frac{w}{r} \right)$$

La tensione di scorrimento τ_s è una caratteristica propria del materiale. Non avendo ancora effettuato delle prove specifiche sui nostri provini, per poter ottenere un valore esatto di questa proprietà sono stati ricercati dei valori in letteratura; in particolare è stato adottato un valore pari a 613 MPa [25].

Ottenuto il valore di h_{av} è stato possibile ricavare la forza risultante e mediante la teoria di Merchant la si è scomposta lungo le direzioni principali.

$$R = \frac{Fs}{\cos(\varphi_e + \beta_e + \gamma_e)}$$

Di conseguenza possiamo ottenere la componente di taglio e quella normale sul piano effettivo.

- $F_{c,e} = R * \cos(\beta_e - \gamma_e)$
- $F_{n,e} = R * \sin(\beta_e - \gamma_e)$

Da queste due forze si possono determinare le componenti di forza che agiscono sul tagliente della fresa.

- $F_t = F_{c,e}$
- $F'_r = F_{n,e} * \cos\eta'_c$
- $F'_a = F_{n,e} * \sin\eta'_c$

Le forze appena trovate non sono quelle finali, infatti, bisogna ancora considerare l'angolo di registrazione χ ; per definizione esso è l'angolo tra il tagliente principale dell'utensile e la superficie lavorata. In base al suo valore variano le forze sviluppate, lo spessore del truciolo e la relativa durata dell'utensile [20].

Per considerare tale effetto basta applicare una matrice di rotazione alle forze trovate in precedenza in modo da trovare le componenti di forza tangenziale, assiale e radiale.

$$\begin{bmatrix} F_t \\ F_a \\ F_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\chi & -\sin\chi \\ 0 & \sin\chi & \cos\chi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} F_t \\ F'_a \\ F'_r \end{bmatrix}$$

Nel nostro caso l'angolo di registrazione è pari a 90° poiché stiamo lavorando una superficie normale all'asse della fresa ma stiamo asportando materiale col fianco dell'utensile.

4.4 Andamento della forza di taglio nel tempo

La procedura appena illustrata consente di ottenere dei valori di forza media ma non di valutare l'andamento di queste forze durante il taglio. Per ottenere dei valori di forza puntuali è necessario valutare come variano lo spessore del truciolo e la porzione di tagliente che asporta materiale al variare della rotazione della fresa. Inoltre, è necessario considerare il numero di denti in presa ed analizzare nel dettaglio la fase di ingresso e di uscita di ogni singolo dente.

Nel seguito verrà descritta la procedura utilizzata per ottenere i valori di forza puntuali considerando tutti i vari aspetti.

Tali valori di forza sono stati calcolati per ogni grado di rotazione della fresa, in particolare è stato necessario determinare quanto fosse l'incremento di materiale asportato per ogni $\Delta\theta$. Si è ovvero calcolato il percorso Δx per ogni $\Delta\theta$ in modo da poter ricavare tramite l'angolo d'elica "i" quanto fosse l'incremento assiale Δd .

Riepilogando sono stati quindi definiti 3 incrementi:

- $\Delta\theta$ = Incremento angolare della rotazione della fresa (assunto pari a 1°).
- Δx = Spazio percorso dal tagliente per ogni incremento di rotazione $\Delta\theta$.
- Δd = Incremento di materiale asportato in direzione assiale per ogni $\Delta\theta$.

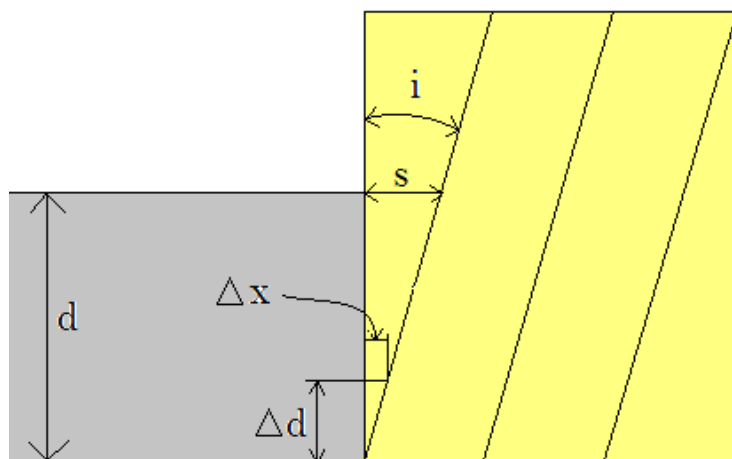


Figura 43: Schema incrementi per ogni grado di rotazione.

Per ottenere il Δx è stata calcolata la circonferenza della fresa e successivamente è stata divisa per un angolo giro. In questo calcolo è stato trascurato lo smusso presente sulla punta del tagliente assumendo un diametro di taglio pari al diametro della fresa.

$$L. \text{circonferenza} = \pi * d$$

Quindi:

$$\Delta x = \frac{L.circonferenza}{360}$$

Ragionando sul triangolo rappresentato nello schema di Figura 33 si è ottenuto:

$$\Delta d = \Delta x * \cotang i$$

Ottenuto l'incremento assiale Δd è stato possibile suddividere il taglio in 4 fasi:

1. Ingresso del tagliente
2. Taglio con un solo dente in presa che lavora "a pieno"
3. Ingresso secondo dente
4. Uscita del primo dente

La posizione angolare di queste fasi è legata alla profondità di passata (d) ed alla larghezza di taglio (w). Per semplicità nel caso della fresa a candela è stata scelta una larghezza di taglio pari al raggio della fresa in modo che, avendo 4 denti equispaziati, la 3° e la 4° fase coincidano come visibile in Figura 44.

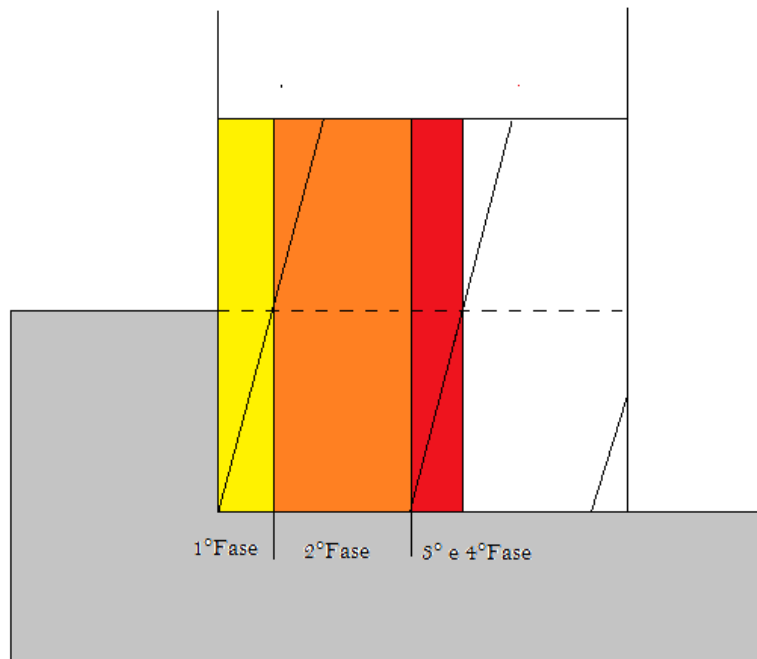


Figura 44: Schema delle 4 fasi del taglio in fresatura.

Andiamo adesso a determinare le posizioni angolari delle varie fasi.

1° fase

L'ingresso del tagliente termina quando la somma dei Δd ha raggiunto un valore pari alla profondità di passata, ovvero quando:

$$\sum \Delta d = d$$

Per ottenere l'angolo percorso dalla fresa è necessario ragionare sullo spazio percorso e quindi sui Δx . Sempre ragionando sullo schema di Figura 33 si può definire che:

$$s = d * \tan i$$

Ovvero, la fresa asporta una quantità di materiale pari a d solo dopo che il tagliente ha percorso uno spazio pari ad s ; conoscendo il Δx percorso per ogni grado è possibile ottenere l'angolo percorso.

$$\theta_{1^{\circ}fase} = \frac{s}{\Delta x}$$

2°fase

Arrivati a questo punto il tagliente continua ad asportare materiale con tutta la lunghezza impegnata fino a quando non inizia l'uscita. Il tagliente esce dopo che la punta del tagliente ha ruotato di un angolo pari all'angolo di lavoro φ_0 . Quindi l'angolo in cui permane la 2°fase risulta essere:

$$\theta_{2^{\circ}fase} = \varphi_0 - \theta_{1^{\circ}fase}$$

3°fase

Considerando la semplificazione sulla larghezza di taglio, l'uscita del tagliente avviene dopo aver percorso 90° ; ma, poiché la fresa possiede 4 denti equispaziati, l'uscita del primo dente avviene in contemporanea all'entrata del secondo.

Per quanto detto sopra vale:

$$\theta_{3^{\circ}fase} = \theta_{1^{\circ}fase}$$

L'entrata e l'uscita del dente risultano distribuite lungo una porzione di angolo giro poiché il tagliente è inclinato dell'angolo d'elica. Nella creazione del modello si è tenuto conto di questo fatto ma lungo l'incremento Δd il tagliente è stato considerato parallelo all'asse della fresa come visibile in Figura 45.

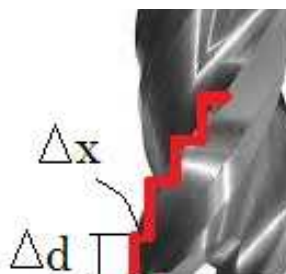


Figura 45: Schema approssimazione tagliente

Per diminuire l'effetto di questa approssimazione si potrebbero calcolare gli incrementi per un $\Delta\theta$ minore.

Per calcolare i valori puntuali delle forze è stato necessario calcolare lo spessore del truciolo in funzione dell'angolo percorso dalla fresa, o meglio, si è calcolato lo spessore del truciolo per ogni incremento angolare $\Delta\theta$.

La formula utilizzata è la seguente:

$$h_i = f_z * \sin(\theta_i + \Delta\theta)$$

Tali valori devono essere ottenuti fino ad un angolo $(\theta_i + \Delta\theta)$ pari all'angolo di lavoro φ_0 .

Per ottenere gli andamenti è necessario calcolare i valori delle forze puntuali.

Prima determiniamo però i valori i-esimi di tutte le componenti di forza.

- $FS_i = \frac{\tau_s * h_i * \Delta d}{\sin\varphi_e * \cos i * \cos\eta'_c}$
- $R_i = \frac{FS_i}{\cos(\varphi_e + \beta_e - \gamma_e)}$
- $Ft_i = Fc_{e,i} = R_i * \cos(\beta_e - \gamma_e)$
- $Fn_{e,i} = R_i * \sin(\beta_e - \gamma_e)$
- $Fr_i = Fn_{e,i} * \cos\eta'_c$
- $Fa_i = Fn_{e,i} * \sin\eta'_c$

Infine si possono ottenere le i-esime componenti lungo x, y e z:

- $Fx_i = Ft_i * \cos\theta_i + Fr_i * \sin\theta_i$
- $Fy_i = Ft_i * \sin\theta_i + Fr_i * \cos\theta_i$
- $Fz_i = Fa_i$

Dalle formule appena scritte si può notare che per ogni incremento angolare $\Delta\theta_i$ si ha una nuova componente di forza. L'unica variabile influenzata dalla rotazione però è lo spessore del truciolo, mentre gli angoli fondamentali di taglio e la proiezione sul piano verticale dell'angolo di flusso del truciolo restano invariati.

Combinando opportunamente i valori i-esimi che devono essere ottenuti per ogni incremento angolare fino a raggiungere un angolo pari a coprire tutte le 4 fasi del taglio, si possono ottenere i valori puntuali e gli andamenti delle forze; infatti, è sufficiente aggiungere e sottrarre i vari contributi in base alla fase di taglio in cui siamo.

Fase 1

Per ogni incremento angolare si calcolano le 3 componenti di forza con le seguenti formule:

- $Fx_{p,i} = \sum_{\theta_i=0}^{\theta_{1^\circ fase}} (Fx_i + Fx_{i-1})$
- $Fy_{p,i} = \sum_{\theta_i=0}^{\theta_{1^\circ fase}} (Fy_i + Fy_{i-1})$
- $Fz_{p,i} = \sum_{\theta_i=0}^{\theta_{1^\circ fase}} (Fz_i + Fz_{i-1})$

In questa fase si descrive l'ingresso del tagliente. Appena l'utensile incontra il materiale impegna un tratto di tagliente necessario ad asportare una profondità di passata Δd con uno spessore del truciolo che sarà quasi nullo se siamo in discordanza e massimo se siamo in concordanza. In questa configurazione, che corrisponde ad un angolo percorso dalla fresa pari ad 1° , si ricavano le 3 componenti di forza. Dopo un incremento $\Delta\theta$ il tratto di tagliente impegnato vedrà variare lo spessore del truciolo. A questa nuova componente di forze (F_i) però bisogna sommarne una pari a quella precedente (F_{i-1}); questo perché ci sarà una nuova porzione di tagliente che si trova nelle stesse condizioni dell'incremento precedente.

Per quanto riguarda lo spessore del truciolo se ci troviamo in discordanza esso aumenta per ogni incremento $\Delta\theta$, viceversa se siamo in concordanza. Un'ulteriore differenza tra fresatura in concordanza e discordanza è il valore iniziale dell'angolo θ_i ; infatti, in discordanza l'angolo iniziale è nullo ($\theta_{i=1}=1^\circ$) mentre in concordanza l'angolo iniziale è massimo ($\theta_{i=1}=\theta_{finale}$). Quest'ultima considerazione consente di ottenere dei valori esatti di Fx_i e Fy_i .

Fase 2

Durante la seconda fase la porzione impegnata del tagliente rimane costante ma lo spessore del truciolo continua a variare. Per ottenere le forze puntuali relative ad ogni θ_i è necessario quindi continuare a sommare alla componente di forza i -esima quella precedente, ma bisogna anche sottrarre il primo contributo di forza.

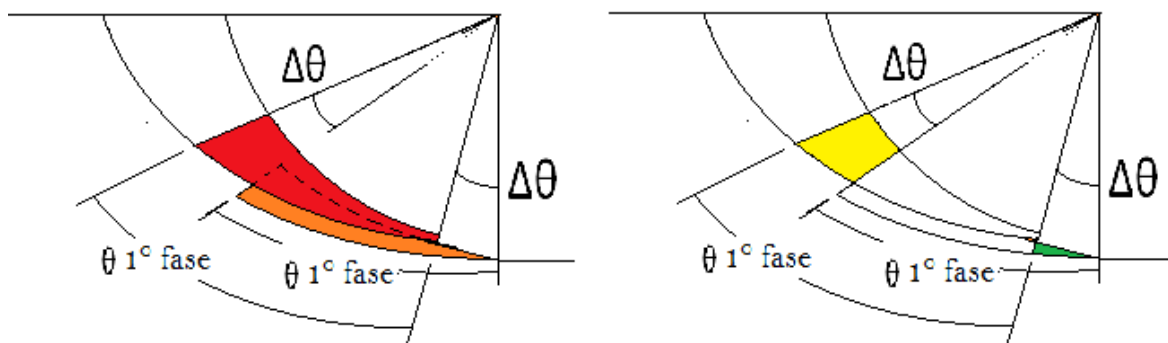


Figura 46: Schema variazione dello spessore del truciolo 2° Fase.

Come si può vedere dalla Figura 46 quando ci spostiamo di un incremento $\Delta\theta$ la sezione di truciolo da considerare varia; se siamo in discordanza è necessario aggiungere la componente di forza legata al tratto giallo e rimuovere quella legata al tratto verde, in concordanza viceversa.

Dal punto di vista matematico questa operazione può essere eseguita con le seguenti formule, dove l'indice n è pari al numero di incrementi $\Delta\theta$ necessari a coprire la prima fase.

- $Fx_{p,i} = \sum_{\theta_i=\theta_{1^\circ fase}}^{\theta_{2^\circ fase}} (Fx_i + Fx_{i-1} - Fx_{i-n})$
- $Fy_{p,i} = \sum_{\theta_i=\theta_{1^\circ fase}}^{\theta_{2^\circ fase}} (Fy_i + Fy_{i-1} - Fy_{i-n})$
- $Fz_{p,i} = \sum_{\theta_i=\theta_{1^\circ fase}}^{\theta_{2^\circ fase}} (Fz_i + Fz_{i-1} - Fz_{i-n})$

Fase 3

Per le semplificazioni fatte, in questa fase bisogna considerare in contemporanea l'ingresso del secondo dente e l'uscita del primo. Per capire meglio cosa accade analizziamo i due fenomeni separati.

Durante l'uscita del tagliente, le forze diminuiscono poiché la porzione di tagliente che fuoriesce non asporta più materiale. Infatti, come si può vedere in Figura 47, analizzando l'uscita non è necessario sommare nuove componenti di forza perché per ogni incremento $\Delta\theta$ la sezione della virgola di truciolo che consideriamo diminuisce del tratto verde.

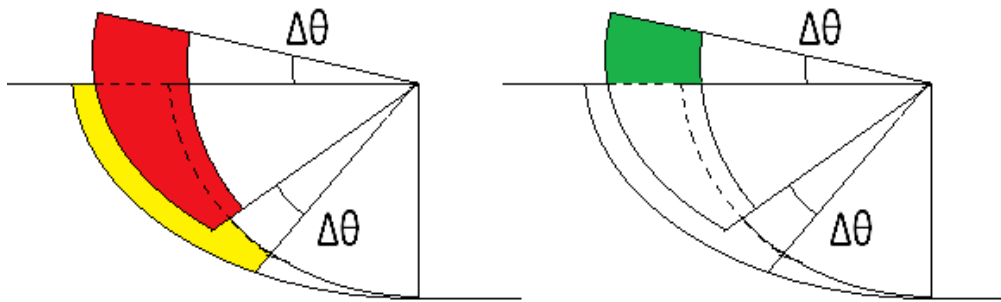


Figura 47: Schema della sezione della virgola da considerare nell'uscita del dente in discordanza.

Analizzando l'ingresso del secondo dente la situazione risulta analoga a quella descritta nella prima fase poiché essendo i taglienti equispaziati ed identici ricadiamo nelle stesse condizioni.

Prima di riportare la formulazione matematica è necessario definire:

- $\theta_{finale} = \theta_{1^\circ fase} + \theta_{2^\circ fase} + \theta_{3^\circ fase}$
- $m = \text{numero di incrementi } \Delta\theta \text{ necessari a coprire la } 1^\circ \text{ e la } 2^\circ \text{ fase}$

L'angolo θ_{finale} corrisponde alla posizione angolare in cui il 1°dente è completamente uscito ed il 2° è completamente entrato; da questo punto in poi l'andamento delle forze puntuali si ripete in modo periodico durante la lavorazione.

Per ottenere gli ultimi valori puntuali di forze si utilizzano le seguenti formule:

- $Fx_{p,i} = \sum_{\theta_i=\theta_{2^{\circ}fase}}^{\theta_{finale}} (Fx_i - Fx_{i-n} + Fx_{i-m})$
- $Fy_{p,i} = \sum_{\theta_i=\theta_{2^{\circ}fase}}^{\theta_{finale}} (Fy_i - Fy_{i-n} + Fy_{i-m})$
- $Fz_{p,i} = \sum_{\theta_i=\theta_{2^{\circ}fase}}^{\theta_{finale}} (Fz_i - Fz_{i-n} + Fz_{i-m})$

4.5 Formulazione del modello nel caso di fresatura frontale

Per quanto riguarda la formulazione del modello essa è analoga a quella utilizzata per la fresa a candela; infatti, valgono le stesse considerazioni, tolta la semplificazione di avere una larghezza di taglio pari al raggio della fresa. In questo caso bisognerà porre maggiore attenzione alla combinazione delle componenti i-esime per ottenere i valori puntuali delle forze. Una semplificazione che può essere utilizzata in questo caso è quella di impostare una larghezza di taglio tale da avere sempre un solo dente in presa.

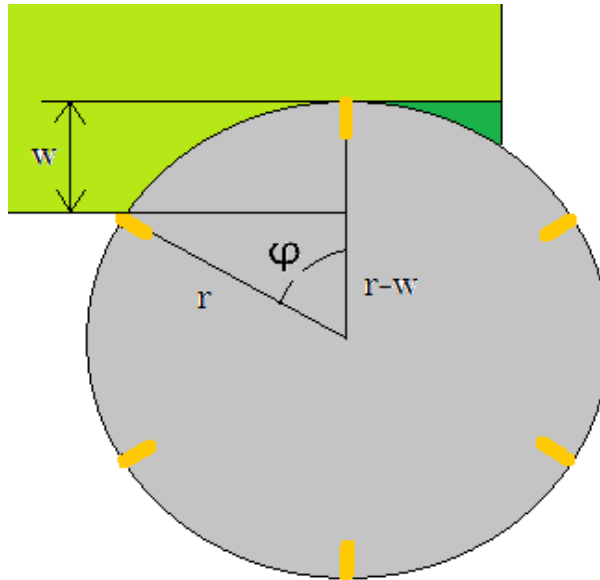


Figura 48: Schema larghezza di taglio per avere un solo dente in presa.

Osservando l'immagine sopra si può dedurre che la larghezza di taglio massima che può essere usata avendo un solo dente in presa è pari a:

$$w_{max} = r - r * \cos\varphi$$

dove φ è l'angolo tra i denti della fresa ottenuto semplicemente dividendo l'angolo giro per il numero di denti della fresa.

Se si imposta una larghezza di taglio pari o minore a w_{max} , la modellazione può essere effettuata trascurando la 4° fase poiché una volta terminata la terza si ricade esattamente in una condizione analoga alla prima.

Un'altra differenza rispetto al caso di fresatura periferica riguarda il calcolo dello spessore medio del truciolo.

Infatti, in fresatura frontale bisognerebbe utilizzare la media integrale utilizzando la seguente formula:

$$h_m^* = \frac{1}{\varphi_0} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} f_z * \sin\varphi * d\varphi$$

Se ci si posiziona però in una configurazione con fresa disassata rispetto al pezzo e si usa una larghezza di taglio piccola, si può utilizzare la stessa formulazione usata per il truciolo a virgola nel caso di fresatura periferica in modo da semplificare il calcolo.

In questo caso il taglio è quindi suddiviso in:

- 1° fase: ingresso del tagliente
- 2° fase: asportazione di materiale con tagliente che lavora “a pieno”
- 3° fase: uscita del tagliente

Naturalmente nel caso in cui la larghezza di taglio sia minore di $w_{\max}$ sul grafico che rappresenta l'andamento delle forze di taglio si avranno dei tratti con forze nulle poiché il primo dente fuoriesce prima che il secondo inizi ad asportare materiale.

CAPITOLO 5

Convalida del modello analitico confrontandolo con lo stato dell'arte in letteratura.

Per considerare valida la formulazione del modello precedentemente descritto e le relative semplificazioni, è necessario confrontare i risultati derivanti da tale simulazione con i risultati di prove sperimentali presenti in letteratura.

La convalida è stata effettuata confrontando tipologie di prove differenti:

- Fresatura di campioni di Ti6Al4V mediante l'uso di fresa integrale a candela.
- Fresatura di campioni di AlSi10Mg mediante l'uso di una fresa ad inserti.

Per ogni convalida si sono inseriti su Excel i parametri di taglio usati e si sono ricavate le forze medie e quelle puntuali in modo da poter ottenere gli andamenti e poterli confrontare con quelli trovati in letteratura.

Analizziamo nel dettaglio i risultati ottenuti nei vari casi.

5.1 Fresatura di provini in Ti6Al4V eseguita con fresa a candela integrale in discordanza

I parametri di taglio, le grandezze geometriche utilizzate e i risultati ottenuti dalle prove sperimentali sono stati presi dall'articolo "Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data" [25]. In questo articolo è stato creato un modello per la predizione delle forze in fresatura nel caso di taglio obliquo. La trattazione è stata effettuata ricavando le formule dal taglio ortogonale ma si è utilizzato un approccio empirico semplificato basato su un coefficiente k_s . Successivamente in questo articolo sono state svolte delle prove sperimentali per convalidare il modello creato.

- Avanzamento al dente = 0,05 [mm/rev/dente]
- Profondità di passata = 5,08 [mm]
- Velocità di taglio = 30 [m/min]
- Larghezza di taglio = 9,5 = ϕ fresa/2 [mm]
- Angolo in ingresso = 0°
- τ_s = 613 MPa

- ϕ fresa = 19 [mm]
- $z = 4$
- Fattore di ricalcamento = 0,55
- Angolo di spoglia normale (γ_n) = 12°
- Angolo d'elica (i) = 30°
- Angolo di registrazione (χ) = 90°

I risultati presenti sull'articolo derivanti dalle prove sperimentali sono rappresentati nel grafico seguente.

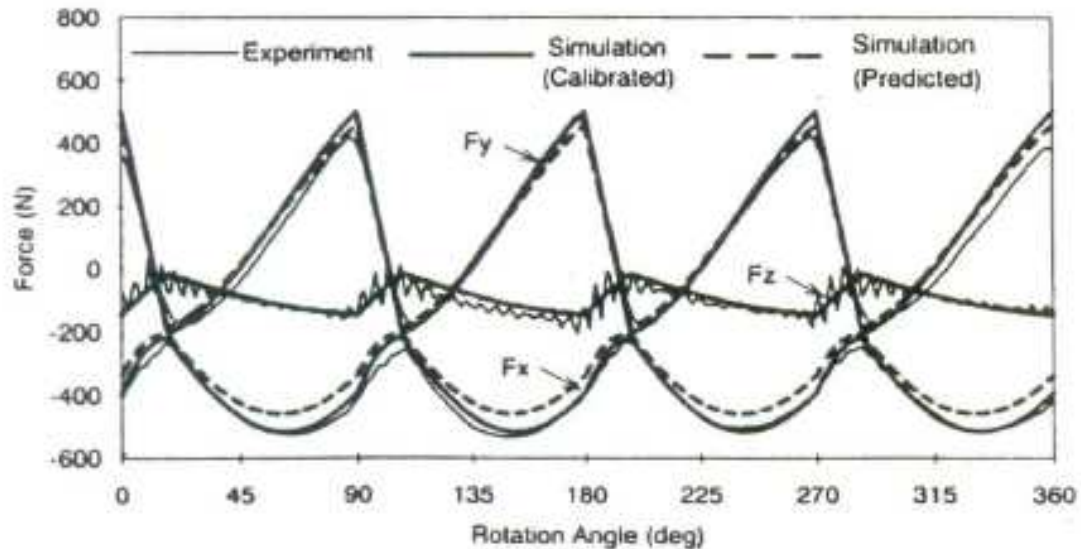


Figura 49: Andamento delle forze generate durante la fresatura di Ti6Al4V con fresa a candela integrale in condizione di discordanza [25].

I risultati restituiti dal modello analitico sviluppato sono:

CS	CT	CU	CV	CW	CX	CY	CZ	DA	DB	DC	DD	DE
F _s	F _s	F _s singolo graco R	F _t	F _r	F _a	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z	F _z
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0568	0,0009	0,38706811	0,7833	0,673	0,3714	0,1504	0,6794	0,3831	0,1504	0,6794	0,3831	0,1504
0,1703	0,0017	0,77401832	1,5663	1,3458	0,7427	0,3007	1,3709	0,7893	0,1504	2,0503	1,1724	0,3008
0,3405	0,0026	1,16073275	2,3489	2,0182	1,1138	0,451	2,0737	1,2179	0,3007	4,124	2,3903	0,6015
0,5674	0,0035	1,54703362	3,1307	2,69	1,4846	0,6011	2,787	1,6686	0,451	6,311	4,0589	1,0525
0,8508	0,0044	1,93298322	3,9116	3,3609	1,8549	0,751	3,5098	2,1408	0,6011	10,421	6,1997	1,6536
1,1908	0,0052	2,31828402	4,6913	4,0309	2,2246	0,9007	4,2413	2,6338	0,751	14,662	8,8335	2,4046
1,5872	0,0061	2,70287864	5,4696	4,6996	2,5937	1,0502	4,9806	3,1471	0,9007	19,643	11,981	3,3054
2,0398	0,007	3,08664995	6,2462	5,3669	2,9619	1,1993	5,7269	3,68	1,0502	25,37	15,661	4,3555
2,5486	0,0078	3,46948103	7,0209	6,0325	3,3293	1,348	6,4791	4,232	1,1993	31,849	19,893	5,5548
3,1134	0,0087	3,85125527	7,7934	6,6963	3,6957	1,4963	7,2363	4,8023	1,348	39,085	24,695	6,9028
3,734	0,0095	4,23185638	8,5636	7,3581	4,0609	1,6442	7,9977	5,3903	1,4963	47,083	30,085	8,3991
4,4102	0,0104	4,61116843	9,3312	8,0176	4,4249	1,7916	8,7624	5,9951	1,6442	55,845	36,08	10,043
5,1418	0,0112	4,98907587	10,096	8,6747	4,7875	1,9384	9,5293	6,6162	1,7916	65,374	42,696	11,835
5,9286	0,0121	5,36546359	10,858	9,3291	5,1487	2,0847	10,298	7,2527	1,9384	75,672	49,949	13,773
6,7704	0,0129	5,74021694	11,616	9,9807	5,5083	2,2303	11,066	7,9038	2,0847	86,738	57,853	15,858
7,6669	0,0138	6,11322176	12,371	10,629	5,8662	2,3752	11,834	8,5688	2,2303	98,573	66,422	18,088
8,6178	0,0146	6,48436444	13,122	11,275	6,2224	2,5194	12,601	9,2469	2,3752	111,17	75,669	20,463
9,6229	0,0155	6,85353192	13,869	11,916	6,5766	2,6628	13,366	9,9371	2,5194	124,54	85,606	22,983
10,682	0,0163	7,22061174	14,612	12,555	6,9289	2,8055	14,127	10,639	2,6628	137,99	95,861	25,495
11,794	0,0171	7,58543209	15,35	13,189	7,279	2,9472	14,883	11,351	2,8055	151,5	106,42	28,15
12,96	0,0179	7,94806184	16,084	13,82	7,6269	3,0881	15,635	12,073	2,9472	165,06	117,28	30,797
14,178	0,0187	8,30821052	16,813	14,446	7,9725	3,228	16,38	12,803	3,0881	178,65	128,41	33,434
15,449	0,0195	8,66582844	17,536	15,068	8,3157	3,367	17,119	13,542	3,228	192,26	139,81	36,061
16,772	0,0203	9,02080667	18,255	15,685	8,6564	3,5049	17,85	14,288	3,367	205,87	151,47	38,677
18,146	0,0211	9,37303707	18,967	16,297	8,9944	3,6417	18,571	15,039	3,5049	219,46	163,36	41,281
19,572	0,0219	9,72241236	19,674	16,905	9,3296	3,7775	19,284	15,796	3,6417	233,02	175,48	43,873
21,049	0,0227	10,0688261	20,375	17,507	9,662	3,9121	19,985	16,557	3,7775	246,53	187,8	46,451
22,576	0,0235	10,4121728	21,07	18,104	9,9915	4,0455	20,676	17,321	3,9121	259,96	200,32	49,015
24,152	0,0242	10,7523478	21,759	18,695	10,318	4,1776	21,354	18,088	4,0455	273,32	213,02	51,564
25,779	0,025	11,0892476	22,44	19,281	10,641	4,3085	22,019	18,856	4,1776	286,58	225,88	54,097
27,454	0,0258	11,4227695	23,115	19,861	10,961	4,4381	22,67	19,625	4,3085	299,72	238,89	56,614
29,177	0,0265	11,7528118	23,783	20,435	11,278	4,5664	23,306	20,393	4,4381	312,73	252,03	59,114
30,949	0,0272	12,0792742	24,444	21,003	11,591	4,6932	23,927	21,16	4,5664	325,59	265,28	61,596
32,767	0,028	12,4020571	25,097	21,564	11,901	4,8186	24,532	21,925	4,6932	338,28	278,64	64,059
34,633	0,0287	12,7210622	25,742	22,119	12,207	4,9426	25,12	22,686	4,8186	350,8	292,08	66,502
36,545	0,0294	13,0361924	26,38	22,666	12,51	5,065	25,69	23,443	4,9426	363,13	305,59	68,925

Figura 50: Valori numerici ottenuti nel caso di fresatura in discordanza.

Per comprendere meglio i risultati ottenuti si riportano in via grafica.

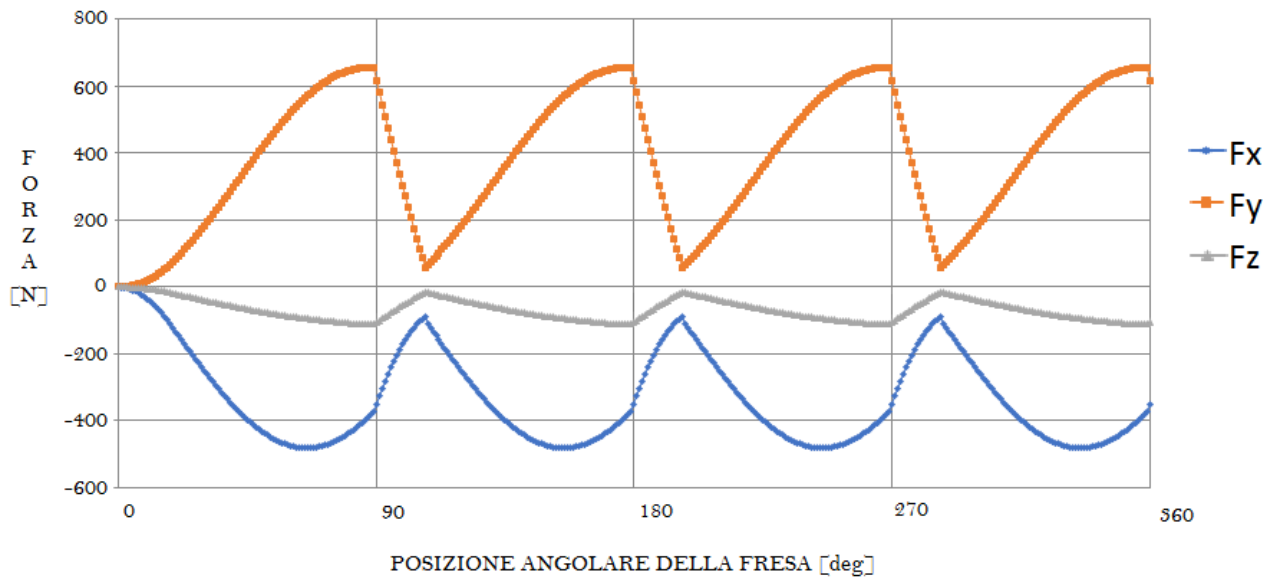


Figura 51: Andamento delle forze generate durante la fresatura di Ti6Al4V con fresa a candela integrale in condizione di discordanza ottenuto col modello.

Osservando i due grafici si può osservare che gli andamenti risultano analoghi. Tuttavia è presente una piccola differenza sull'andamento della F_y che nel modello di riferimento presenta un tratto con valori negativi nell'intorno della posizione angolare corrispondente all'uscita del tagliente dal componente. Ci sono anche altre piccole differenze sui valori di picco degli andamenti ma, nonostante questo, la convalida è risultata positiva poiché il modello implementato in questo lavoro di tesi presenta delle assunzioni semplificative che durante le prove sperimentali e nelle simulazioni presenti nel documento di riferimento non erano state effettuate.

5.2 Fresatura di provini in Ti6Al4V eseguita con fresa a candela integrale in concordanza

I dati per effettuare questa convalida sono stati presi dallo stesso articolo da cui derivano quelli utilizzati nel paragrafo 5.1. I parametri utilizzati sono:

- Avanzamento al dente = 0,0127 [mm/rev/dente]
- Profondità di passata = 5,08 [mm].
- Velocità di taglio = 30 [m/min]
- Larghezza di taglio = 9,5 = ϕ fresa/2 [mm]
- Angolo in ingresso = 0°
- τ_s = 613 MPa
- ϕ fresa = 19 [mm]
- z = 4
- Fattore di ricalcamento = 0,35
- Angolo di spoglia normale (γ_n) = 0°
- Angolo d'elica (i) = 30°
- Angolo di registrazione (χ) = 90°

I risultati presenti sull'articolo derivanti dalle prove sperimentali sono rappresentati nel grafico sotto.

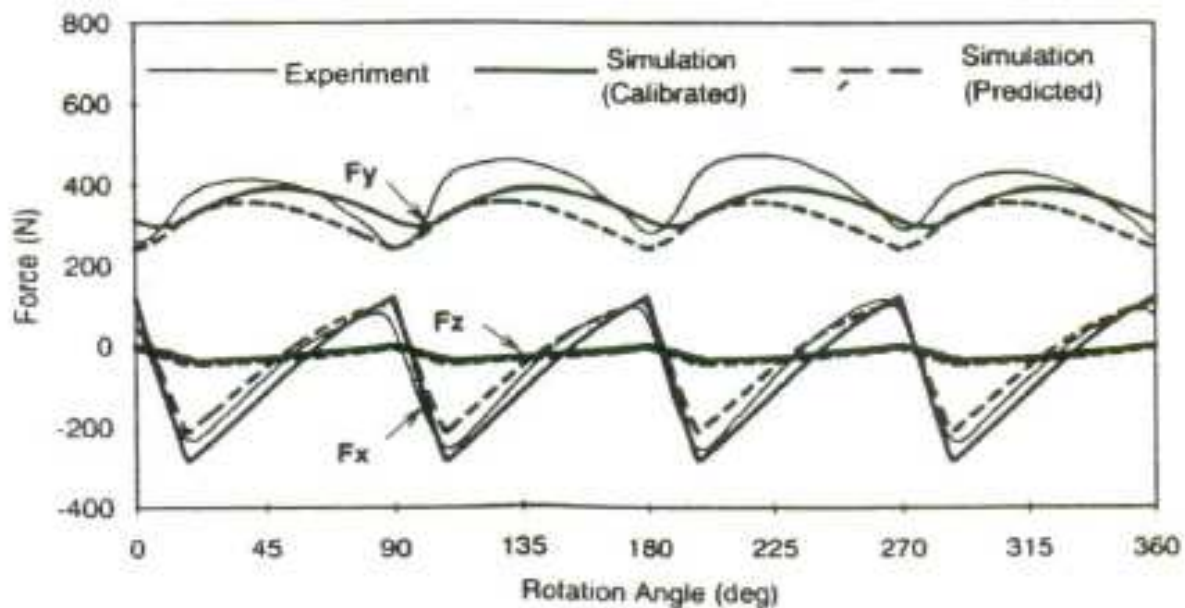


Figura 52: Andamento delle forze generate durante la fresatura di Ti6Al4V con fresa a candela integrale in condizione di concordanza [25].

I risultati restituiti dal modello analitico sviluppato sono:

		F _{singol}	R	F _t	F _r	F _a	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z	-F _x	-F _z
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
89	0,0127	7,9901	22,133	14,903	14,637	7,3183	15,156	14,894	7,3183	15,156	14,894	7,3183	15,156	14,894	7,3183	15,156	14,894	7,3183	-15,16	-7,318
88	0,0127	7,9865	22,123	14,896	14,63	7,315	15,397	15,141	7,3183	30,553	30,035	14,637	30,553	30,035	14,637	30,553	30,035	14,637	-30,55	-14,64
87	0,0127	7,9804	22,106	14,884	14,619	7,3094	15,629	15,378	7,315	46,182	45,413	21,952	46,182	45,413	21,952	46,182	45,413	21,952	-46,18	-21,95
86	0,0127	7,9719	22,083	14,869	14,603	7,3016	15,851	15,605	7,3094	62,033	61,018	29,261	62,033	61,018	29,261	62,033	61,018	29,261	-62,03	-29,26
85	0,0127	7,9609	22,052	14,848	14,583	7,2916	16,063	15,822	7,3016	78,096	76,84	36,563	78,096	76,84	36,563	78,096	76,84	36,563	-78,1	-36,56
84	0,0126	7,9476	22,015	14,823	14,559	7,2793	16,264	16,028	7,2916	94,36	92,868	43,854	94,36	92,868	43,854	94,36	92,868	43,854	-94,36	-43,85
83	0,0126	7,9318	21,971	14,794	14,53	7,2649	16,454	16,224	7,2793	110,81	109,09	51,133	110,81	109,09	51,133	110,81	109,09	51,133	-110,8	-51,13
82	0,0126	7,9136	21,921	14,76	14,496	7,2482	16,634	16,409	7,2649	127,45	125,5	58,398	127,45	125,5	58,398	127,45	125,5	58,398	-127,4	-58,4
81	0,0125	7,8929	21,864	14,721	14,459	7,2293	16,802	16,584	7,2482	144,25	142,09	65,646	144,25	142,09	65,646	144,25	142,09	65,646	-144,2	-65,65
80	0,0125	7,8699	21,8	14,678	14,416	7,2082	16,959	16,746	7,2293	161,21	158,83	72,876	161,21	158,83	72,876	161,21	158,83	72,876	-161,2	-72,88
79	0,0125	7,8445	21,73	14,631	14,37	7,1849	17,104	16,898	7,2082	178,31	175,73	80,084	178,31	175,73	80,084	178,31	175,73	80,084	-178,3	-80,08
78	0,0124	7,8167	21,653	14,579	14,319	7,1595	17,238	17,037	7,1849	195,55	192,77	87,269	195,55	192,77	87,269	195,55	192,77	87,269	-195,6	-87,27
77	0,0124	7,7865	21,569	14,523	14,264	7,1318	17,359	17,165	7,1595	212,91	209,93	94,428	212,91	209,93	94,428	212,91	209,93	94,428	-212,9	-94,43
76	0,0123	7,754	21,479	14,462	14,204	7,102	17,469	17,281	7,1318	230,38	227,21	101,56	230,38	227,21	101,56	230,38	227,21	101,56	-230,4	-101,6
75	0,0123	7,719	21,382	14,397	14,14	7,07	17,566	17,384	7,102	247,94	244,6	108,66	247,94	244,6	108,66	247,94	244,6	108,66	-247,9	-108,7
74	0,0122	7,6818	21,279	14,327	14,072	7,0359	17,651	17,476	7,07	265,6	262,07	115,73	265,6	262,07	115,73	265,6	262,07	115,73	-265,6	-115,7
73	0,0121	7,6422	21,169	14,254	13,999	6,9996	17,724	17,555	7,0359	283,32	279,63	122,77	283,32	279,63	122,77	283,32	279,63	122,77	-283,3	-122,8
72	0,0121	7,6002	21,053	14,175	13,922	6,9612	17,784	17,621	6,9996	301,1	297,25	129,77	301,1	297,25	129,77	301,1	297,25	129,77	-301,1	-129,8
71	0,012	7,5556	20,93	14,093	13,841	6,9206	17,831	17,675	6,9612	303,78	300,03	129,41	303,78	300,03	129,41	303,78	300,03	129,41	-303,8	-129,4
70	0,0119	7,5094	20,801	14,006	13,756	6,878	17,866	17,717	6,9206	306,25	302,61	129,01	306,25	302,61	129,01	306,25	302,61	129,01	-306,2	-129
69	0,0119	7,4606	20,666	13,915	13,667	6,8333	17,888	17,745	6,878	308,51	304,97	128,58	308,51	304,97	128,58	308,51	304,97	128,58	-308,5	-128,6
68	0,0118	7,4094	20,525	13,82	13,573	6,7864	17,898	17,761	6,8333	310,55	307,13	128,1	310,55	307,13	128,1	310,55	307,13	128,1	-310,6	-128,1
67	0,0117	7,3561	20,377	13,72	13,475	6,7376	17,894	17,765	6,7864	312,39	309,07	127,58	312,39	309,07	127,58	312,39	309,07	127,58	-312,4	-127,6
66	0,0116	7,3004	20,223	13,616	13,373	6,6866	17,878	17,755	6,7376	314	310,8	127,03	314	310,8	127,03	314	310,8	127,03	-314	-127
65	0,0115	7,2426	20,062	13,508	13,267	6,6336	17,85	17,733	6,6866	315,4	312,31	126,44	315,4	312,31	126,44	315,4	312,31	126,44	-315,4	-126,4
64	0,0114	7,1826	19,896	13,396	13,157	6,5786	17,808	17,698	6,6336	316,57	313,6	125,81	316,57	313,6	125,81	316,57	313,6	125,81	-316,6	-125,8
63	0,0113	7,1203	19,724	13,28	13,043	6,5216	17,754	17,651	6,5786	317,52	314,66	125,14	317,52	314,66	125,14	317,52	314,66	125,14	-317,5	-125,1
62	0,0112	7,0559	19,545	13,16	12,925	6,4627	17,688	17,591	6,5216	318,25	315,51	124,43	318,25	315,51	124,43	318,25	315,51	124,43	-318,3	-124,4
61	0,0111	6,9894	19,361	13,036	12,803	6,4017	17,609	17,518	6,4627	318,76	316,13	123,68	318,76	316,13	123,68	318,76	316,13	123,68	-318,8	-123,7
60	0,011	6,9207	19,171	12,908	12,678	6,3388	17,517	17,433	6,4017	319,04	316,53	122,9	319,04	316,53	122,9	319,04	316,53	122,9	-319	-122,9
59	0,0109	6,8499	18,975	12,776	12,548	6,274	17,414	17,336	6,3388	319,09	316,7	122,08	319,09	316,7	122,08	319,09	316,7	122,08	-319,1	-122,1
58	0,0108	6,777	18,773	12,64	12,414	6,2072	17,298	17,226	6,274	318,92	316,64	121,22	318,92	316,64	121,22	318,92	316,64	121,22	-318,9	-121,2
57	0,0107	6,7021	18,565	12,5	12,277	6,1386	17,17	17,105	6,2072	318,52	316,36	120,33	318,52	316,36	120,33	318,52	316,36	120,33	-318,5	-120,3
56	0,0105	6,6251	18,352	12,357	12,136	6,0681	17,031	16,971	6,1386	317,9	315,86	119,4	317,9	315,86	119,4	317,9	315,86	119,4	-317,9	-119,4
55	0,0104	6,5461	18,133	12,209	11,991	5,9957	16,879	16,826	6,0681	317,06	315,13	118,43	317,06	315,13	118,43	317,06	315,13	118,43	-317,1	-118,4
54	0,0103	6,4651	17,909	12,058	11,843	5,9215	16,717	16,669	5,9957	315,99	314,18	117,42	315,99	314,18	117,42	315,99	314,18	117,42	-316	-117,4

Figura 53: Valori numerici ottenuti nel caso di fresatura in concordanza.

Riportando in via grafica i risultati si ottiene il grafico di Figura 54.

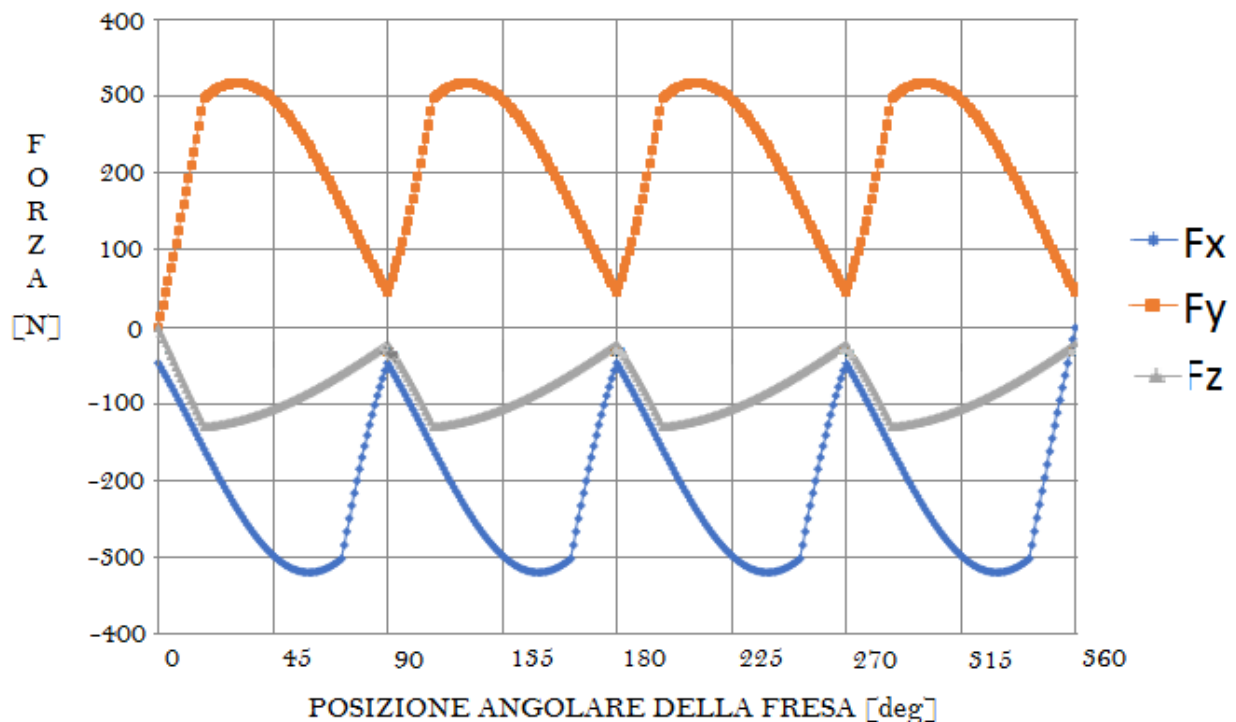


Figura 54: Andamento delle forze generate durante la fresatura di Ti6Al4V con fresa a candela integrale in condizione di concordanza ottenuto col modello.

Anche in questo caso sono presenti alcune differenze sugli andamenti e sui valori di picco delle forze ma, nonostante questo la convalida è stata considerata positiva per gli stessi motivi specificati nel primo caso.

5.3 Fresatura di provini in AlSi10Mg effettuata tramite fresa ad inserti.

In questo caso il confronto è stato fatto basandosi sui risultati presenti nel documento “Machining induced residual stresses in AlSi10Mg component produced by laser power bed fusion (L-PBF)” [29]. In questo articolo sono state effettuate delle prove sperimentali su componenti in AlSi10Mg ottenuti tramite tecnologia AM e si sono paragonati ai valori di forza ottenuti durante la lavorazione di componenti dello stesso materiale ma ottenuti in modo tradizionale. Un'altra analisi effettuata riguarda le tensioni residue presenti nei campioni dopo le operazioni di fresatura; tale aspetto è molto importante quando si parla di componenti AM metallici poiché essi presentano uno stato di tensione residua molto particolare.

Questo articolo è molto interessante perché mostra che nel caso dell'alluminio le forze ottenute durante la fresatura risultano differenti nel caso di componenti additive. In particolare i componenti AM durante le operazioni di fresatura creano delle forze più basse rispetto a quelli dei componenti tradizionali. Implementare questa lavorazione sul modello analitico non è stato semplice poiché gli utensili utilizzati non possedevano una geometria semplice; questo perché durante la scelta degli utensili non si era posta attenzione a quest'aspetto ma, soprattutto perché

nella lavorazione delle leghe leggere come l'alluminio vengono usati utensili con angoli di spoglia "molto positivi" per evitare che l'utensile si impasti.

I dati utilizzati sono:

- Avanzamento al dente = 0,2 [mm/rev/dente]
- Profondità di passata = 1 [mm]
- Velocità di taglio = 380 [m/min]
- Larghezza di taglio = 15 [mm]
- Angolo in ingresso = 0°
- $\tau_s = 180$ MPa
- ϕ fresa = 100 [mm]
- $z = 7$
- Fattore di ricalcamento = 0,4
- Angolo di spoglia normale (γ_n) = 24°
- Angolo d'elica (i) = 7
- Angolo di registrazione (χ) = 70°

I risultati ottenuti dal modello creato in questo lavoro di tesi sono stati sovrapposti a quelli ottenuti dalle prove sperimentali. Il grafico ottenuto è rappresentato in Figura 55.

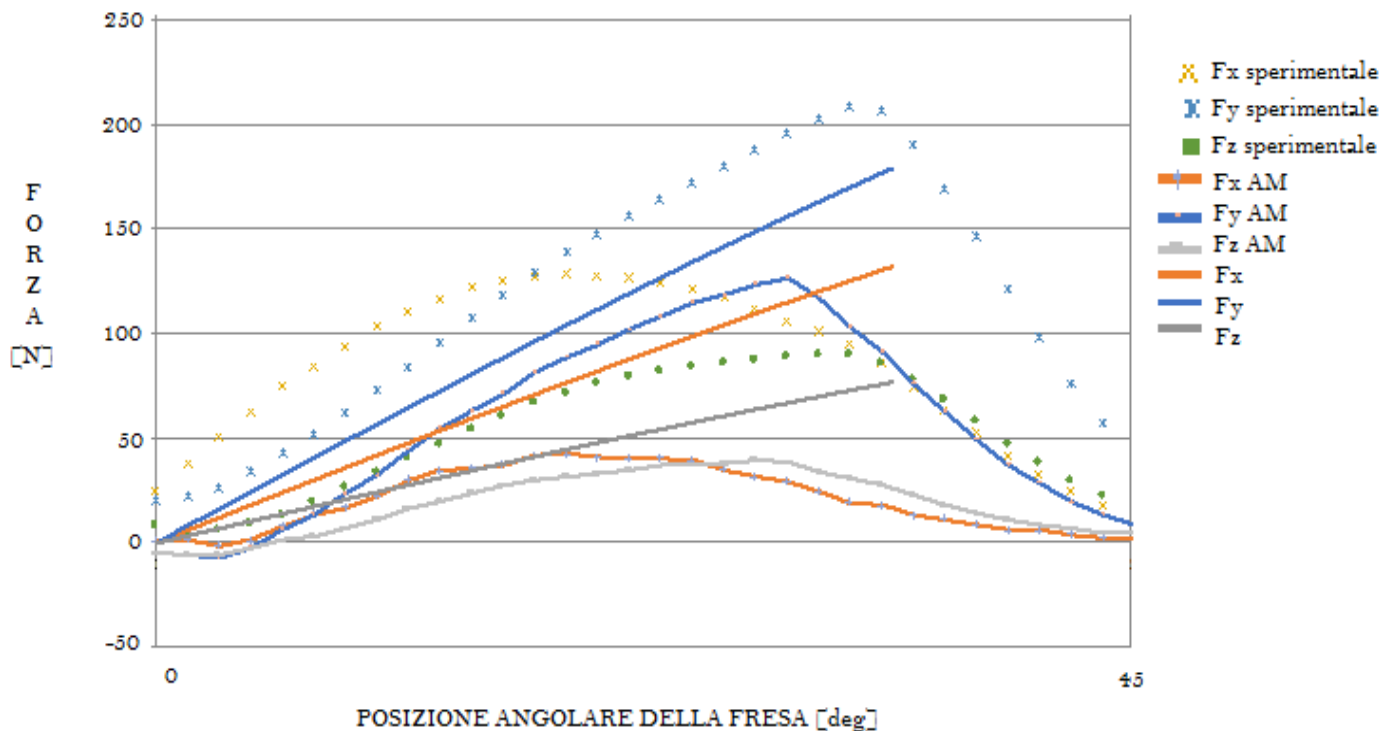


Figura 55: Risultati ottenuti nel caso di fresatura di campioni di AlSi10Mg.

Osservando i risultati si può osservare che con la modellazione sviluppata in questo documento si ottengono dei valori intermedi tra le curve ottenute sperimentalmente. Questo aspetto è positivo se si considera che si è sempre fatto riferimento alla tecnologia AM. Durante la stesura del documento si sono determinate le informazioni per effettuare delle prove sperimentali su provini in Ti6Al4V ottenuti tramite EBM; questo perché in un lavoro futuro potranno essere confrontati i valori sperimentali derivanti da queste prove e quelli ottenuti con il modello creato per verificare se anche in questo caso le forze generate durante la fresatura di componenti AM in Titanio risultano più basse rispetto a quelle generate dalla lavorazione di componenti ottenuti con le tecniche tradizionali.

Conclusioni

In questa tesi si è creato un modello matematico per la predizione delle forze in condizioni di taglio obliquo. Il modello sviluppato è valido sia in condizioni di concordanza che di discordanza, sia per fresatura periferica che frontale e per materiali metallici differenti. In letteratura non sono presenti dei dati su operazioni di fresatura effettuate su componenti AM, per questo si è definito un piano sperimentale per effettuare tali lavorazioni. Dalle operazioni di convalida si è osservato che gli andamenti delle forze, ottenuti dalla modellazione e dalle prove sperimentali presenti in letteratura risultano analoghi, almeno per quanto riguarda i materiali tradizionali. Per componenti AM è stata effettuata una convalida su delle prove effettuate presso il Politecnico di Torino su campioni in AlSi10Mg osservando che il modello restituisce dei risultati intermedi tra i valori di forze ottenuti con campioni tradizionali e campioni AM. E' tuttavia presente qualche piccola differenza sui valori di picco e su brevi tratti di diagramma ma, tali differenze sono accettabili poiché il modello sviluppato presenta al suo interno alcune semplificazioni. Per ottenere gli andamenti delle forze si è usato un metodo incrementale; ovvero si sono calcolati i valori di forza suddividendo la rotazione della fresa in incrementi angolari assunti pari a 1° . Il modello ottenuto riesce a predire le forze di fresatura con un errore del 10 % circa.

Nella parte introduttiva si è effettuata un'analisi dettagliata sugli aspetti, positivi e negativi, della tecnologia Additive Manufacturing; soffermandosi in particolare sugli aspetti che influenzano la lavorazione per asportazione di truciolo di tali componenti. Particolare attenzione è stata data allo stato di tensione residua generato nei componenti AM metallici e all'effetto che essa genera durante la fresatura. Si sono inoltre analizzate le proprietà del Ti6Al4V ottenuto tramite EBM ponendo particolare attenzione agli aspetti legati alla lavorabilità di tale materiale. Durante la stesura di tutto il documento ci si è soffermati sulla lavorabilità di tale materiale poiché si sono anche determinati dei parametri di taglio ed i relativi utensili adottabili per un'ulteriore prova di convalida da effettuare in sede.

Ringraziamenti

Arrivato alla fine del mio percorso universitario desidero ringraziare la relatrice Eleonora Atzeni e il correlatore Alessandro Salmi per la disponibilità e gli aiuti che mi hanno dato durante lo sviluppo del lavoro di tesi.

Ringrazio la mia famiglia per avermi dato l'opportunità di studiare e intraprendere questa esperienza formativa supportandomi e motivandomi.

Dedico questo mio traguardo a tutti coloro che mi hanno sempre sostenuto ed hanno sempre creduto nelle mie potenzialità.

Bibliografia

- [1] Slide del corso di “Tecnologia Meccanica”, Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica, Eleonora Atzeni.
- [3] 17 Novembre 2015, Dimitrios Chantzis, Konstantinos Salonitis, Laurent D’Alvise, Babis Schoinochoritis, “Additive manufacturing and post-processing simulation: laser cladding followed by high speed machining”
- [4] 5 Aprile 2017, Daniel Küpper, Wilderich Heising, Gero Corman, Meldon Wolfgang, Claudio Knizeke Vladimir Lukic, “Get Ready for Industrialized Additive Manufacturing”
- [5] Settembre 2017, Briantais Lucas, Xavier Ayneto Gubert, “Metal Additive Manufacturing: Process, Conception and Post-treatments”
- [7] 9 Marzo 2007, Joe Hiemenz, Stratasys Inc, “Rapid prototypes move to metal Components”
- [8] 11 Dicembre 2017, Henry Canaday, “Additive Manufacturing Could Disrupt A Lot of Aerospace Markets”.
- [9] 22 giugno 2017, “State-of-the-art for Additive Manufacturing of metals”
- [10] 21 Aprile 2018, M.J. Bermingham, L. Nicastro, D. Kent, Y. Chen, M.S. Dargusch, “Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments”.
- [11] 13 Agosto 2004, C.H. Che-Haron, A. Jawaid, “The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6%Al-4% V”.
- [13] 2016, Stefano Sartori, Alberto Bordin, Lorenzo Moro, Andrea Ghiotti, Stefania Bruschi, “The influence of material properties on the tool crater wear when machining Ti6Al4V produced by Additive Manufacturing technologies”.
- [14] 2018, Stefania Bruschi, Rachele Bertolinia, Fabrizio Medeossia, Andrea Ghiottia, Enrico Savioa, Rajiv Shivpurib, “Case study: The application of machining-conditioning to improve the wear resistance of Ti6Al4V surfaces for human hip implants”.
- [15] 2016, Ampara Aramcharoen, “Influence of cryogenic cooling on tool wear and chip formation in turning of titanium alloy”.
- [16] 25 Maggio 2016, S. Bruschi n, R. Bertolini, A. Bordin, F. Medea, A. Ghiotti, “Influence of the machining parameter and cooling strategies on the wear behavior of wrought and additive manufactured Ti6Al4V for biomedical applications”.

- [17] 2 Novembre 2016, D. Umbrello, A. Bordin, S. Imbrogno, S. Bruschi, "3D finite element modelling of surface modification in dry and cryogenic machining of Ti6Al4V alloy".
- [21] 4 Agosto 2015, Patil Amit S., Ingle Sushil V., More Yogesh S., Nathe Manik S., "Machining Challenges in Ti-6Al-4V.-A review".
- [24] Edizione MECPSE 2017, "Osawa drills & end mills hf evolution"
- [25] E. Budak, Y. Altintas, E. J. A. Armarego, "Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data".
- [29] Gabriele Piscopo, Eleonora Atzeni, Flaviana Calignano, Manuela Galati, Luca Iuliano, Paolo Minetola, Alessandro Salmi, "Machining induced residual stresses in AlSi10Mg component produced by laser power bed fusion (L-PBF)".
- [32] 2015, Zhongtao Fu, Wenyu Yang, Xuelin Wang, Jurgen Leopold, "Analytical modeling of milling forces for helical end milling based on a predictive machining theory".

Sitografia

- [2] www.trumpf.com/it_IT/applicazioni/additive-manufacturing/
- [6] <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-13103>
- [12] www.neonikel.com
- [18] www.unicas.it
- [19] www.rctools.it/frese-a-candela-integrali-coromill-plura
- [20] www.sanavik.coromant.com
- [22] <http://ingegneriaterni.altervista.org>
- [23] <https://slideplayer.it/slide/568582/>
- [26] www.kraemer-praezisionswerkzeuge.de/TNGX-100408SR-F-M8340-10391686.html
- [27] https://www.google.com/search?q=schema+oblique+cutting&tbm=isch&tbs=rimg:CX6o6sAb128dljibUyGqaVUfTJk_1lm8kreb2JZytyW6H7H1kBHFzWu08brc2LyqT75lwqU53nls_11OR0cMXsGM3gUioSCdtTlappVR9MEYEVhiGg5aGjKhIJmT8ibySt5vYRh7Pi_1CGQ0X8qEgklnK3JbofsfRF_1VileEjUdiCoSCWQEcXPC7TxuEYxg6NQD6JxQKhIJtzYvKpPvkjARyNDbU_1my_1RQqEgmpTneeWz_1U5BHAK9TziPceqSoSCXRwxewYzeBSEXgTTgnWoQkS&tbo=u&sa=X&ved=2ahUKEwiq5bmqmZDhAhVCMewKHbBAA80Q9C96BAgBEBs&biw=1366&bih=608&dpr=1#imgsrc=21MhqmlVH0yN4M:
- [28] <https://www.nestools.com/Products/dormer-pramet-stn10-90-face-mill-iso6462-din1830/04-0702F>
- [30] <http://siccasrl.it/preventivi-lavorazioni-fresatura-meccanica-frontale-orizzontale-periferica-cnc-carpi-reggio-emilia/lavorazioni-fresatura-periferica-reggio-emilia/>
- [31] http://ingegneriaterni.altervista.org/wp-content/uploads/2013/10/Parte_11-2.pdf