



**Politecnico  
di Torino**

# **Politecnico di Torino**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria**

**Meccanica**

**A.a. 2023/2024**

**Studio del processo di brocciatura e analisi dati  
raccolti mediante sistema di sensoristica**

**Relatori:**

**Prof. Franco Lombardi**

**Prof.ssa Manuela De Maddis**

**Ing. Razza Valentino**

**Tesi di Laurea di:**

**Pasquale Gala**

**N.Matr. 292702**



## INDICE

<b>Introduzione</b> .....	7
<b>Capitolo 1: La Brocciatura</b> .....	8
1.1    Nozioni fondamentali.....	8
1.2    Tipi di Cave.....	10
1.3    Lavorazione Dischi .....	11
1.3.1 Geometria delle Cave.....	11
1.3.2 Angoli di Inclinazione.....	12
1.3.3    Tolleranze.....	14
1.3.4    Processo di Lavorazione .....	16
1.4    Metodo di collaudo cava .....	19
1.5    Brocciatrici utilizzate .....	26
1.5.1 Brocciatrice Verticale.....	26
1.5.2 Brocciatrice orizzontale .....	28
1.6    Le brocche.....	29
1.6.1 Geometria e dimensioni caratteristiche.....	30
<b>Capitolo 2: Problematiche riscontrate</b> .....	32
2.1    Problemi Tipici della lavorazione .....	32
2.2    Problema Evacuazione del Truciolo .....	36
2.2.1 Introduzione .....	36
2.2.3 Formazione Truciolo nel processo di brocciatura.....	37
2.4    Soluzioni per evacuazione efficace del truciolo .....	43
2.4.1 Evacuazione tramite ugelli.....	43

2.4.2 Nuovo sistema di spazzole .....	47
2.4.3 Spazzole .....	47
2.4.4 Soluzione con doppie spazzole .....	48
2.4.5 Soluzione con robot .....	50
<b>Capitolo 3: Prime analisi sui dati raccolti.....</b>	<b>53</b>
3.1 Sensoristica installata.....	54
3.1.1 Sensore di Corrente .....	54
3.1.2 Sensore di Vibrazioni .....	57
3.1.3 Unità di Controllo (TCU).....	59
3.1.4 Esportazione dei Dati .....	61
3.2 Prove su disco provino .....	63
3.2.1 Brocche utilizzate.....	64
3.2.2 Prove effettuate .....	66
3.3 Analisi sui dati di potenza .....	69
3.3.1 Confronto potenza di cave con stessa velocità.....	70
3.3.2 Confronto potenza di cave a diversa velocità .....	73
3.3.3 Prova di scheggiatura .....	75
3.3.4 Prova di rottura .....	80
3.4 Analisi sui dati di accelerazione.....	84
3.4.1 Confronto accelerazione di cave con stessa velocità .....	84
<b>Capitolo 4: Analisi delle vibrazioni .....</b>	<b>88</b>
4.1 Risposta accelerazione in frequenza .....	89
4.1.1 Confronto accelerazione con passate a vuoto .....	90

4.2 Nuova posizione del sensore.....	92
4.2.1 Prove su provino .....	93
4.3 Eliminazione del rumore.....	96
4.3.1 Tipi di rumore .....	98
4.3.2 Primi risultati nuova posizione sensore .....	102
4.4 Prove di ottimizzazione posizione sensore di vibrazione .....	105
4.4.1 Prove posizionamento su asse motore .....	107
4.4.2 Prove su montante.....	108
4.4.3 Confronto posizioni sensore .....	110
4.5 Miglior posizionamento per il sensore di vibrazione.....	112
<b>Capitolo 5: Usura .....</b>	<b>114</b>
5.1 Confronto potenza prima e ultima cava prima passata .....	115
5.2 Confronto prima cava e ultima cava seconda passata.....	118
5.3 Confronto prima e ultima cava terza passata .....	119
5.3 Rilevazione usura brocche .....	121
5.3.1 Ispezione broccia prima passata.....	122
5.3.2 Ispezione broccia seconda passata .....	124
5.4 Stima durata del tagliente.....	126
5.4.1 Legge di Taylor lineare .....	126
5.4.2 Equazione di Taylor generalizzata .....	127
<b>Conclusioni .....</b>	<b>131</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>132</b>



# Introduzione

Il lavoro di tesi, svolto presso l'azienda *EthosEnergy* nella sua sede di Torino, è incentrato sullo studio del processo di brocciatura. Lo scopo ricercato è stato quello di ottimizzare il processo attraverso dei sensori installati sulla macchina utensile, cercando di risolvere alcune problematiche verificatesi, e di comprendere maggiormente le logiche dietro questa lavorazione.

L'uso del processo di brocciatura attualmente in uso nell'officina meccanica dell'azienda è incentrato sulla produzione di cave di accoppiamento, tra dischi e palette di macchine turbogas. In una prima parte, che interesserà il primo capitolo di questo lavoro, si riprenderanno i concetti di base del processo di brocciatura, studiati tramite il lavoro precedente, a cui si rifà questo lavoro di tesi, e realizzati nell'officina dove ho potuto apprendere le principali soluzioni messe in pratica dai tecnici di macchina. Nei capitoli a seguire si esporranno le varie problematiche riscontrate, gli approcci dei primi studi e soluzioni adottate, fino ad arrivare alla raccolta e all'analisi dei dati ricavati in macchina dai sensori installati, con le soluzioni adottate per migliorare l'ottimizzazione degli stessi e la conseguente analisi che ne deriva. Confrontando risultati teorici con quelli sperimentali.

# Capitolo 1: La Brocciatura

## 1.1 Nozioni fondamentali

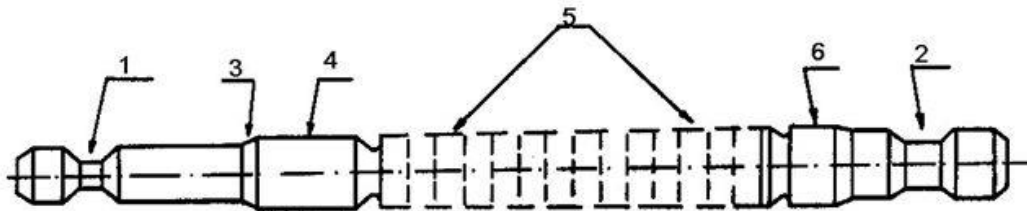
Il processo di brocciatura si basa su un concetto semplice, cioè quello di dotare di una sagoma ben definita l'elemento che viene sottoposto a questo processo. Tuttavia, gli utensili che adempiono a questo scopo sono tutt'altro che semplici o di facile realizzazione, e conseguentemente, anche molto costosi. Questi sono le brocche. La brocciatura viene impiegata in grande scala da molti anni, il cui campo di applicazione è molto ampio e alcune volte anche l'unico possibile, come per la realizzazione di fori di piccoli diametri con striature (profili ASA). Data la sua prerogativa di precisione e di velocità, la brocciatura è usata anche vantaggiosamente in sostituzione dell'alesatura di fori cilindrici [1].

Con il termine brocciatura, si intende non solo la lavorazione di superfici interne, ma anche di superfici esterne. In questo ultimo caso, le brocche per esterni sono degli spezzoni piatti che vengono fissati in serie su particolari attrezzi (slittoni) e presentano sulla superficie da lavorare una serie di taglienti incrementali che progressivamente danno al pezzo la forma e le dimensioni volute, nel nostro caso sarà proprio impiegata nella lavorazione di superfici esterne. Nelle lavorazioni di superfici interne occupa un posto di grande rilievo la brocciatura per le dentature a evolvente. Essa è un'operazione eseguita molto frequentemente perché è veloce, precisa e complessivamente poco costosa, in quanto, la broccia, se correttamente impiegata, può eseguire un elevatissimo numero di pezzi. Nelle produzioni di grandi serie quindi la brocciatura è indispensabile per ottenere prodotti di basso costo e con caratteristiche dimensionali uguali, fattore questo della massima importanza per assicurare l'intercambiabilità dei pezzi. Per completezza, si riporta



nella figura 1.1, una tipica broccia per lavorazioni interne con l'elenco dei suoi principali elementi [1]:

1. *Attacco e codolo anteriore*
2. *Codolo posteriore*
3. *Imbocco*
4. *Guida iniziale*
5. *Tratto attivo*
6. *Guida finale*



*Figura 1.1.1.1 Tipica broccia per lavorazioni interne [1]*

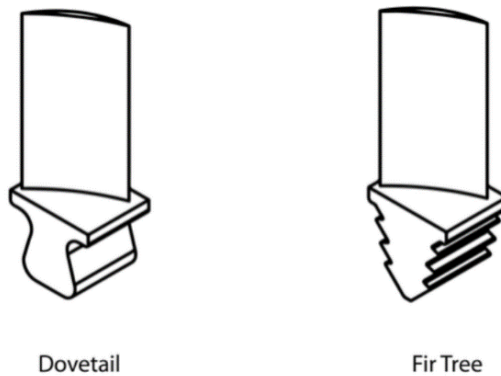
Ognuno di questi elementi che definiscono la broccia deve essere progettato con cura e precisione, per ottenere un profilo a bassi intervalli di tolleranza e basse rugosità.

## 1.2 Tipi di Cave

Nell'ambito della brocciatura di superfici esterne troviamo la realizzazione delle cave presenti nei dischi compressore e turbina di macchine turbogas per produzione di energia elettrica. Il loro scopo è quello di ancorare saldamente le pale al rotore; infatti, esse nella loro parte finale, detta radice, presentano un profilo di accoppiamento con le cave di tipo positivo-negativo, le cui cave rappresentano il negativo della radice. Per garantire il corretto posizionamento e minimizzare i fenomeni vibrazionali si devono assicurare delle tolleranze dimensionali molto strette, e basse rugosità. Inoltre, le cave presentano una geometria a sezione costante. Per tutti questi motivi esse si prestano molto bene a essere realizzate tramite brocciatura.

Le cave attualmente realizzate presso l'impresa EthosEnergy sono di due tipi:

- Dovetail, geometria realizzata per dischi compressori
- Fir tree, geometria realizzate per dischi turbina.



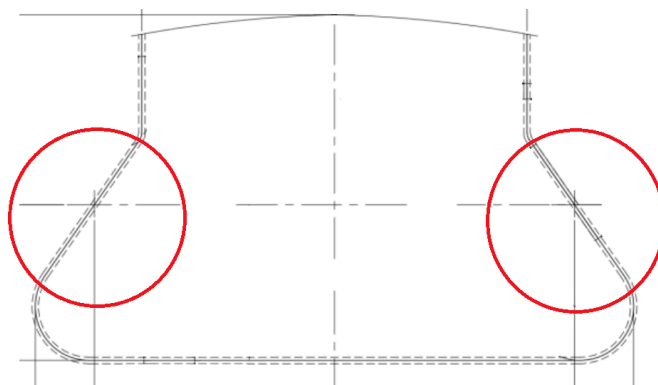
*Figura 1.2 Tipi di radici di pale realizzate*

## 1.3 Lavorazione Dischi

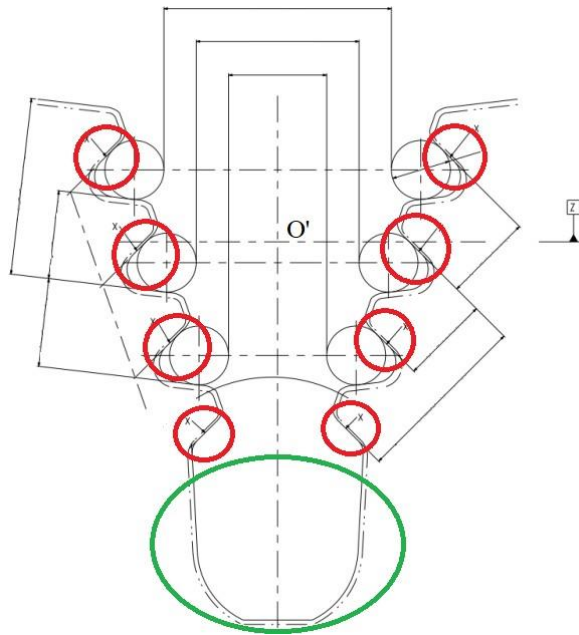
La lavorazione dei dischi di compressore e di turbina è essenziale per garantire la corretta funzionalità e sicurezza di questi componenti. Di seguito verranno illustrate geometrie, tolleranze e processo di lavorazione sia di dischi compressore che dischi turbina in uso nell'azienda.

### 1.3.1 Geometria delle Cave

Le cave dei dischi compressore hanno una forma a coda di rondine (Figura 1.3.1), con due piani attivi che sono i punti di contatto tra le pale e il disco, importanti per il trasferimento delle forze radiali. Mentre le cave dei dischi compressore sono relativamente semplici, quelle dei dischi turbina hanno otto piani attivi e una forma più complessa, detta a pino rovesciato (Figura 1.3.2), a causa delle maggiori sollecitazioni e temperature a cui sono sottoposte. Inoltre, in quest'ultime è presente un'ulteriore zona detta bulbo che convoglia l'aria di refrigerazione delle pale proveniente dal compressore.



*Figura 1.3.1 Geometria cave Dischi compressore*



*Figura 1.3.2 Geometria cave Dischi Turbina, in verde zona del bulbo e in rosso i piani attivi*

### 1.3.2 Angoli di Inclinazione

Si identificano due angoli di inclinazione per le cave dei dischi compressore: l'angolo  $\alpha$ , legato alla conicità del disco (Figura 1.3.3), e l'angolo  $\theta$ , che si trova in un piano tangente alla circonferenza del disco e passante per il centro cava P.O. (Figura 1.3.4). Per i dischi turbina, si identifica solo l'angolo di inclinazione  $\theta$ , definito nello stesso modo dei dischi compressore (Figura 1.3.5).

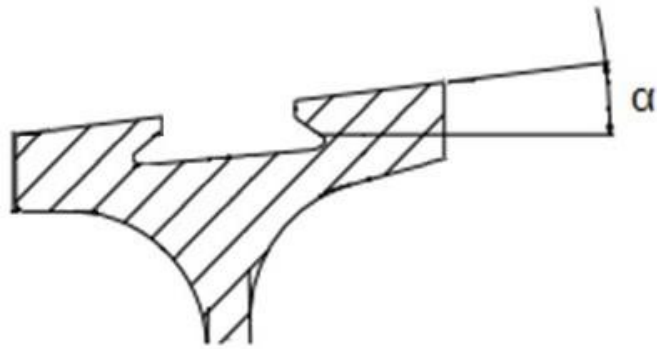


Figura 1.3.3 Angolo di Inclinazione  $\alpha$  della cava (Dischi Compressore)

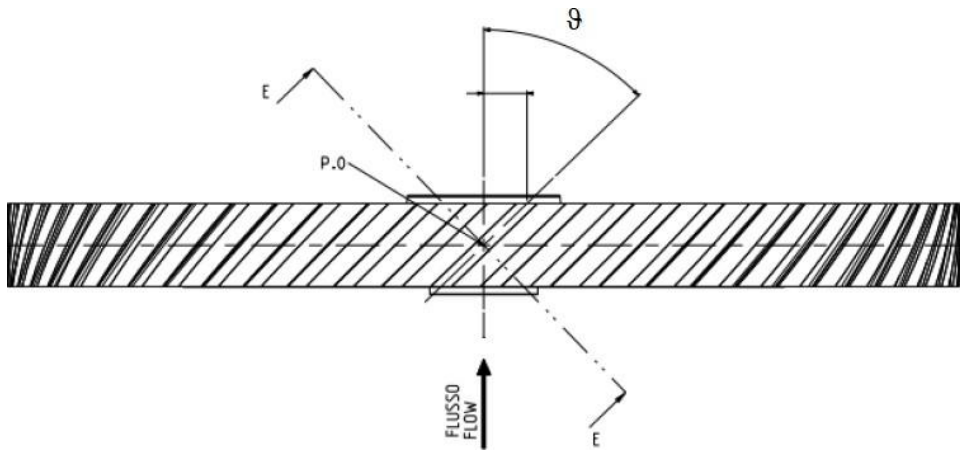


Figura 1.3.4 Angolo  $\theta$  di Inclinazione della cava (Dischi Compressore)

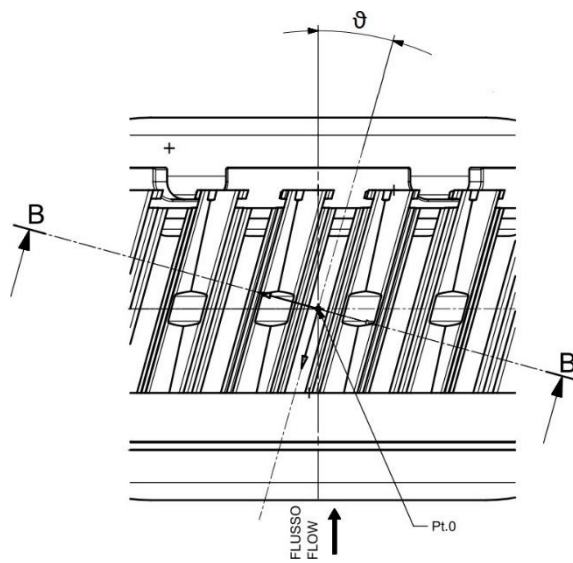
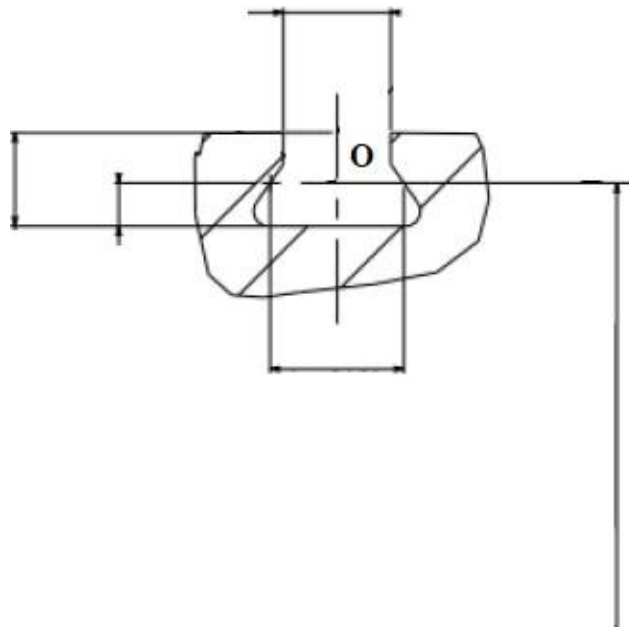


Figura 1.3.5 Angolo  $\theta$  di Inclinazione della cava (Dischi Turbina)

### 1.3.3 Tolleranze

Le tolleranze sono molto importanti e si riferiscono alla precisione delle dimensioni dei componenti. I piani attivi hanno tolleranze più strette per garantire la correttezza del funzionamento del rotore. Viene data una tolleranza anche sull'intero profilo della cava, con requisiti più stringenti per parti critiche come il bulbo nei dischi turbina, dove non devono esserci giochi eccessivi per evitare perdite di aria di refrigerazione.

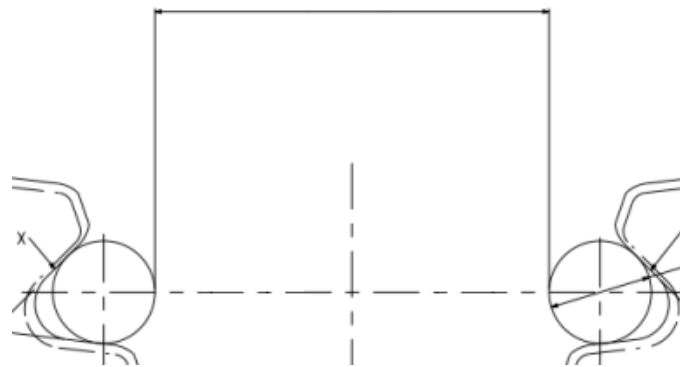
Il riferimento geometrico della cava, nei dischi compressore, è il centro O (figura 1.3.3.1), posizionato nella sezione inclinata dell'angolo  $\theta$  e passante per P.O. Su O sono definite profondità della cava, larghezza della cava e distanza dal centro del disco.



*Figura 1.3.3.1 Centro O della cava e dimensioni caratteristiche*

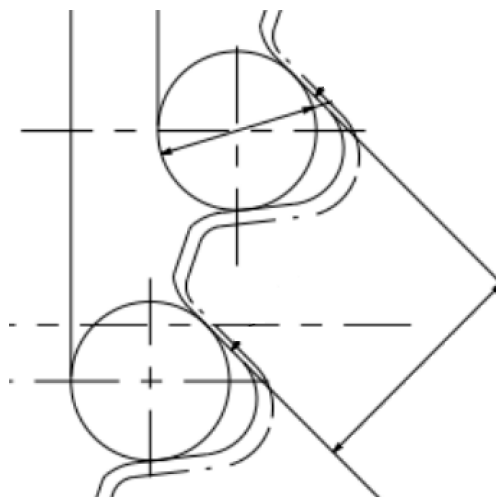
Nei dischi turbina, invece, si prende come riferimento per definire la geometria della cava, il centro  $O'$ , intersezione tra l'asse di simmetria e il piano di riferimento Z (figura 1.3.3.2). Le dimensioni caratteristiche della cava sono:

- Almeno due ampiezze, possono essere di più, note anche come misure di rullaggio, impostate su rullini che toccano sia i piani attivi che quelli passivi al di sotto mostrate in figura 1.3.3.2.



*Figura 1.3.3.2 Quota rulli sui primi piani attivi*

- Le distanze fra un piano attivo e l'altro, calcolate seguendo un angolo di inclinazione identico a quello dei piani attivi.

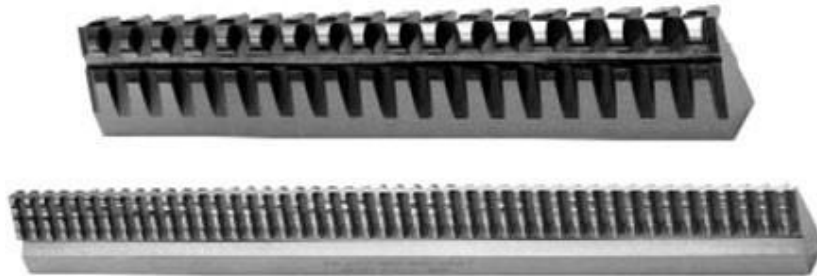


*Figura 1.3.3.3 Quota tra piani attivi.*

Inoltre, si applica una tolleranza sull'intera forma della cava, simile a quella prevista per le cave dei compressori. La gamma di tolleranza è ridotta per i piani attivi. Per i piani non attivi, la sezione del bulbo richiede parametri dimensionali più rigorosi, per prevenire l'eccessiva fuga dell'aria di raffreddamento.

### 1.3.4 Processo di Lavorazione

L'attuale produzione di cave da parte dell'azienda è realizzata attraverso processi di brocciatura e fresatura. La brocciatura è un metodo di rimozione del materiale con un movimento lineare: l'eccesso di materiale è asportato usando uno strumento noto come broccia, che contiene una serie di denti con profili e dimensioni che aumentano progressivamente. Questo approccio distribuisce il taglio su numerosi denti taglienti.



*Figura 1.3.4.1 Settori di brocche utilizzate per dischi turbina*

Le cave sono lavorate utilizzando vari segmenti di broccia (Figura 1.3.4.1), dividendo il lavoro in diverse aree, ciascuna rimossa da un segmento diverso. Questi segmenti collettivamente formano un "set di brocche". La lavorazione è suddivisa in più passaggi, determinati dalla capacità del contenitore della macchina di montare i settori e dalla necessità di completare una cava. Questi set di brocche sono divisi in più carrellate o treni; ogni carrellata lavora tutte le cave del disco prima di essere sostituita per la carrellata successiva. In certi casi, una



carrellata può effettuare più passaggi prima di procedere alla successiva. I settori di broccia sono identificati con un sistema di numerazione X.Y, dove X rappresenta la carrellata cui appartengono, e Y la posizione del settore all'interno della carrellata. Nell'esempio fornito (figura 1.3.4.2), la cava è realizzata con cinque carrellate, ognuna composta da sette settori, tranne per la quinta che ne contiene otto. Si nota anche che la terza carrellata esegue due passate, poiché la geometria dei suoi settori è adatta a essere utilizzata più volte.

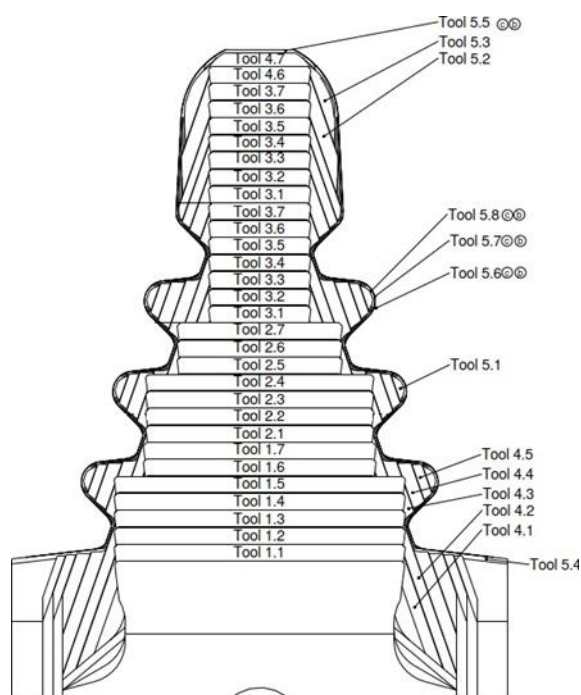


Figura 1.3.4.2 Suddivisone della cava in più aree di lavorazione

Questo metodo di lavorazione permette di raggiungere eccellenti tolleranze dimensionali e rugosità superficiali, rispettivamente fino a  $\pm 0,01$  [2] mm e  $0.4 \mu\text{m}$  [3,4,5]. Nonostante le velocità di taglio ridotte, all'incirca 4-15 m/min [5], la brocciatura offre il vantaggio di un'elevata produttività, poiché è in grado di lavorare completamente la cava in un'unica fase, dalla sgrossatura alla finitura. Se i carichi e la resistenza della broccia lo consentono, è possibile lavorare più pezzi contemporaneamente, utilizzando un solo treno di brocche per ogni fase.

I vari settori di brocce vengono classificati come segue:

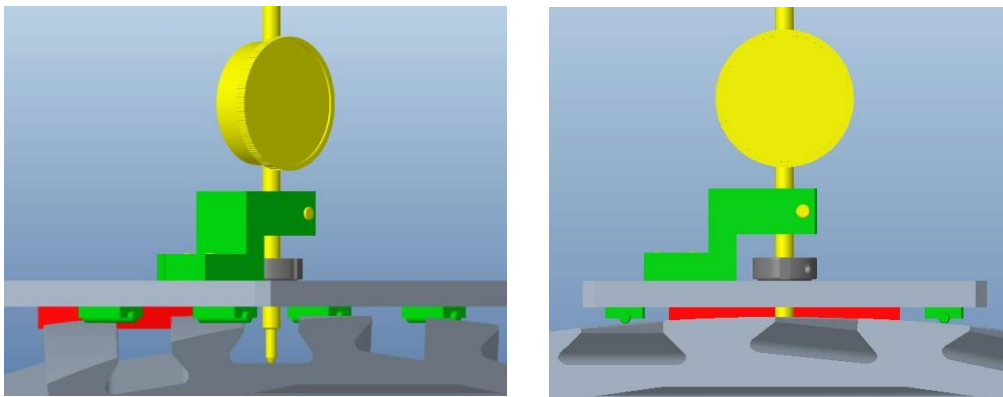
- Sgrossatori: rimuovono una grande quantità di materiale, con incrementi di dimensione significativi e una forma dei denti molto diversa da quella finale della cava.
- Semifinitori: hanno una forma simile a quella definitiva della cava, con incrementi di dimensioni minori rispetto agli sgrossatori e preparano la cava per la geometria finale, oltre a correggere eventuali difetti lasciati dagli sgrossatori.
- Finitori: portano la cava alle dimensioni finali e lisciano la superficie lavorata, con incrementi minimi permettendo di raggiungere le tolleranze dimensionali e di rugosità richieste, oltre a rimuovere irregolarità lasciate dalle fasi precedenti.
- Calibratori: questi denti non rimuovono materiale e non presentano incrementi; servono a mantenere le dimensioni finali dei finitori, compensando le riduzioni dovute all'usura e alle affilature. Quando gli utensili vengono affilati, il primo calibratore diventa un finitore per mantenere le tolleranze progettate.

## 1.4 Metodo di collaudo cava

In questa sezione, si descrivono i protocolli di verifica qualitativa adottati per assicurare l'integrità strutturale e la conformità dimensionale dei dischi prodotti. Sono stati implementati tre distinti approcci di collaudo, ognuno corrispondente a una differente fase del ciclo produttivo.

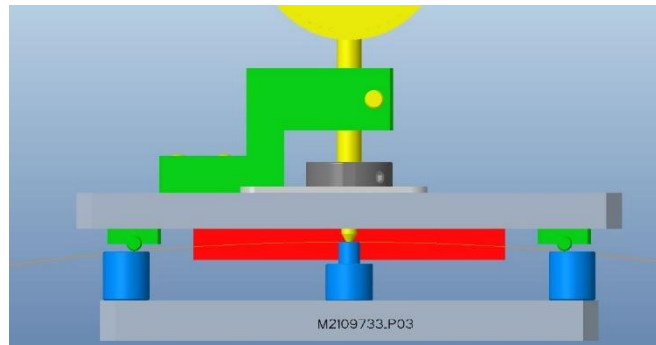
### 1. Collaudo in Fase di Lavorazione

Durante il procedimento di brocciatura, si effettua un monitoraggio progressivo della profondità delle cave. Questo controllo è realizzato misurando cinque cave differenti a ogni passaggio utilizzando un comparatore e un apposito supporto posizionato sul diametro esterno del disco. Tale pratica assicura l'adeguamento continuo del processo produttivo rispetto alle tolleranze stabilite, permettendo interventi correttivi tempestivi (Figura 1.4.1).



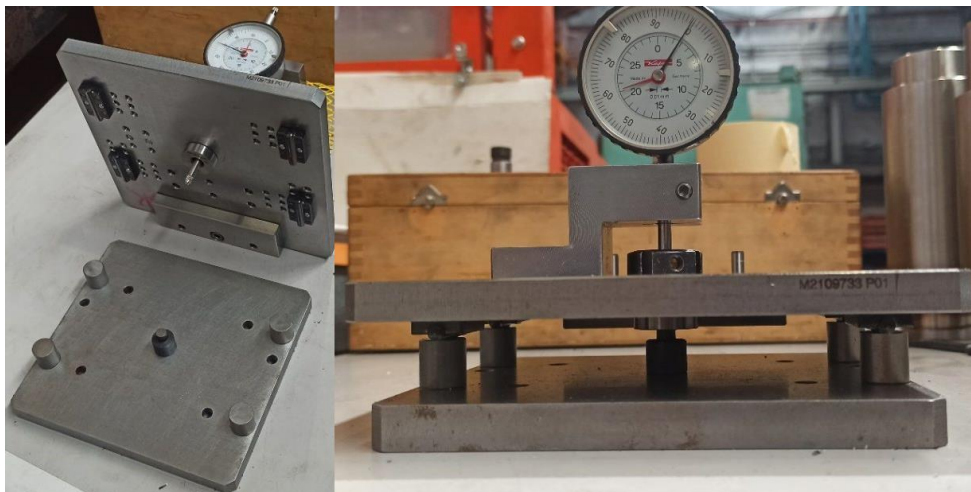
*Figura 1.4.1 Collaudo cava in lavorazione*

La misura viene presa nel centro P.0 e Pt.0 della cava, per fare ciò è presente una superficie nell'attrezzo che va in battuta col disco e permette di fissare la posizione assiale del comparatore (Figura 1.4.2).

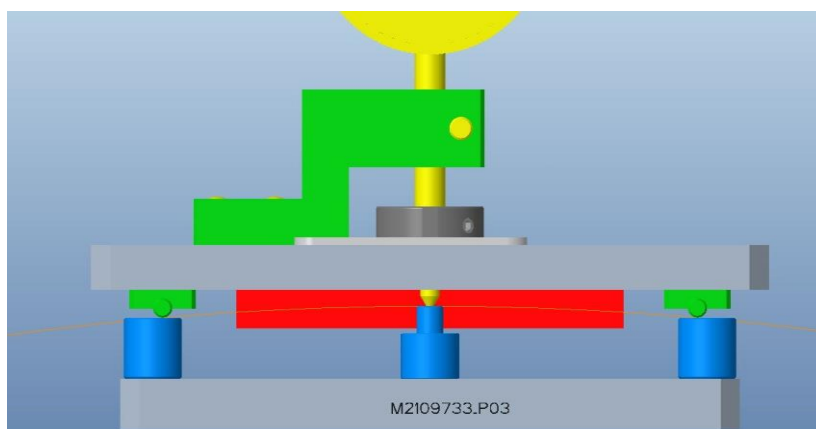


*Figura 1.4.2 Bloccaggio assiale comparatore su centro cava*

Prima di effettuare la misura sul disco si azzerava il comparatore con un secondo attrezzo (Figura 1.4.3). In questo modo lo zero coincide con la quota del raggio esterno (Figura 1.4.4).



*Figura 1.4.3 Azzeramento comparatore controllo in lavorazione*



*Figura 1.4.4 Dettaglio azzeramento comparatore*

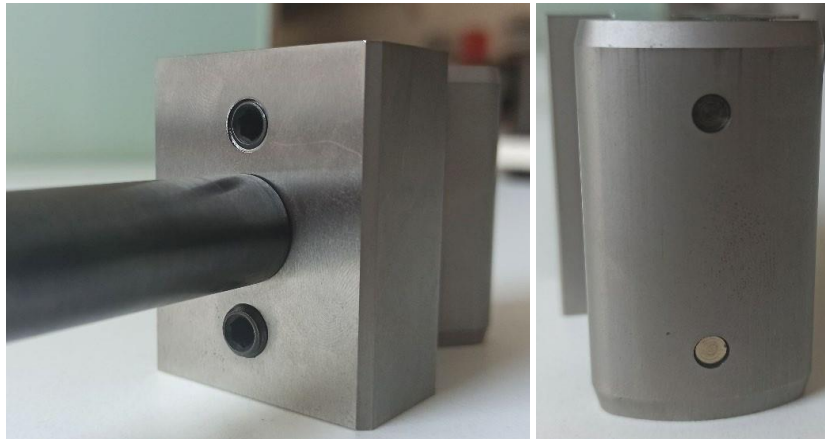
## 2. Collaudo Preliminare con Calibro Passa/Non Passa

Al termine della lavorazione, si procede con un collaudo preliminare impiegando un calibro passa/non passa. Questo strumento, presenta una geometria identica alla geometria della cava e quindi fornisce una valutazione rapida sulla conformità dimensionale del pezzo. Un passaggio positivo del calibro nella cava appena lavorata, indica la fabbricazione entro i limiti di tolleranza, mentre un esito negativo segnala la necessità di sostituire la broccia per eccessiva usura e per via delle ripetute affilature, che non garantiscono più i requisiti minimi dimensionali del profilo da garantire. In questa fase, si garantisce che ogni disco rispetti il range dimensionale progettato.

Quando un settore di broccia viene sostituito con uno nuovo, si effettua un controllo per assicurarsi che le dimensioni delle cave lavorate siano al di sotto del limite massimo di tolleranza. Questo controllo avviene attraverso una scansione della prima cava lavorata con il nuovo set di utensili tramite una macchina di misura a coordinate. La geometria ottenuta viene quindi confrontata con il disegno CAD2D per verificare che sia entro i limiti massimi consentiti. Il design degli utensili è appositamente concepito in modo che, quando sono nuovi, possano lavorare al massimo delle dimensioni consentite per massimizzarne la durata, con la sostituzione programmata quando non sono più in grado di produrre cave con dimensioni superiori al minimo richiesto.

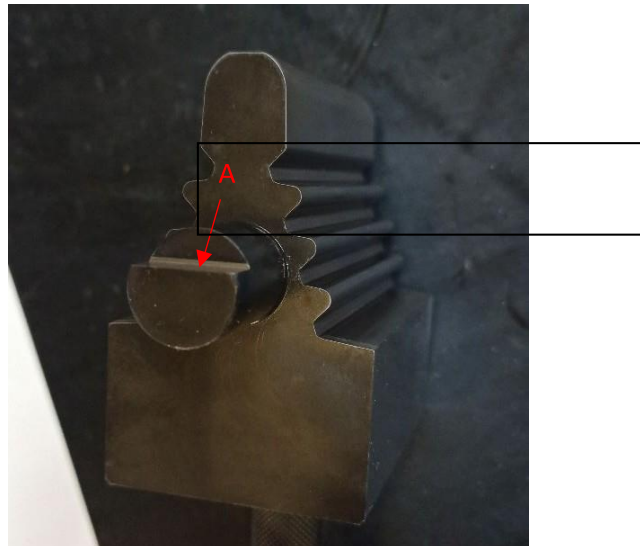
Il calibro passa/non passa è progettato con le dimensioni minime di tolleranza corrispondenti alle dimensioni minime della cava. Questo approccio massimizza il numero di pezzi approvati attraverso il collaudo, garantendo contemporaneamente che le dimensioni reali della cava non scendano al di sotto del minimo richiesto. Il calibro è dotato alla base di due viti che permettono di far avanzare due spine posizionate nella parte interna del calibro in contatto con la

zona più interna della cava. Queste spine, spingendo sulla base della cava (Figura 1.4.5), simulano la forza centrifuga a cui la pala è sottoposta durante il funzionamento, e fissano il calibro al disco.



*Figura 1.4.5 Viti e spine di fissaggio di un calibro per compressore*

Il calibro turbina presenta una geometria, su una delle due facce, che permette di individuare il centro su cui è costruito il profilo della cava (Figura 1.4.6).



*Figura 1.4.6 Dettaglio calibro con piano che individua centro cava*

Questo punto di riferimento è impiegato per valutare la posizione radiale della cava. Per determinare la posizione del centro della cava, si utilizza uno spessore noto insieme a dei blocchetti Johnson (Figura 1.4.7). Questi vengono posizionati tra il piano A (Figura 1.4.6), che identifica il centro della cava, e il diametro D (Figura 1.4.8), il cui valore è stato precedentemente misurato tramite un comparatore.



Figura 1.4.7 Spessore noto e blocchetti Johnson

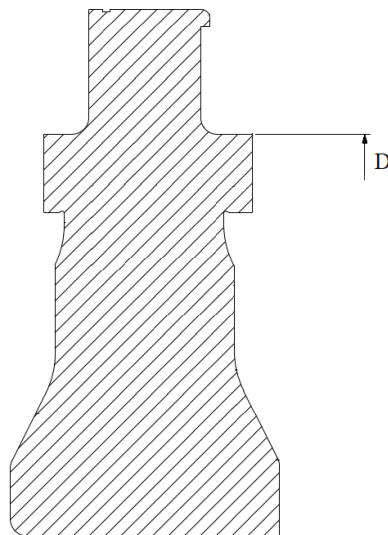


Figura 1.4.8 Diametro D del disco a partire dal quale si effettua misura posizione del centro cava



*Figura 1.4.9 Collaudo centro cava*

### 3. Collaudo con Macchina di Misura a Coordinate

Infine, per confermare la precisione complessiva del disco, si utilizza una macchina di misura a coordinate (CMM) (Figura 1.4.10).

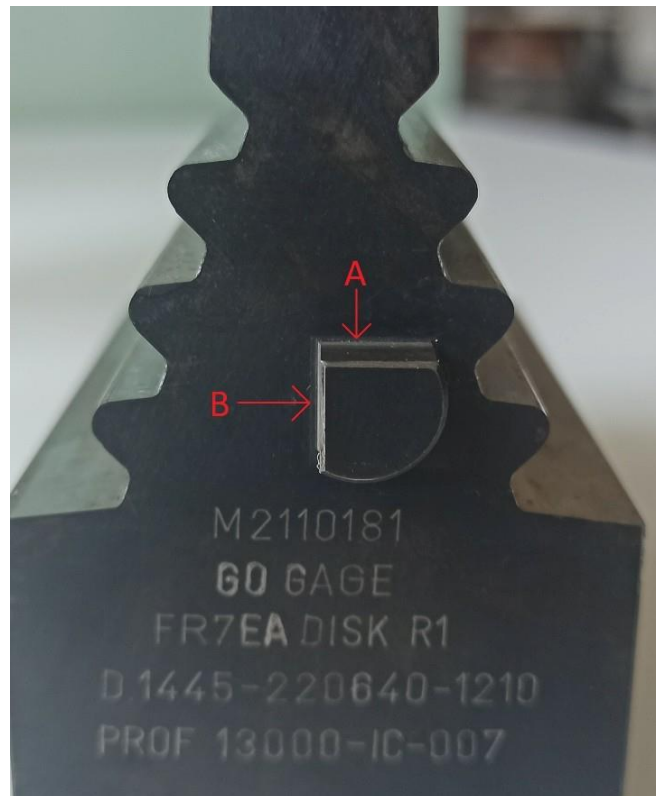


*Figura 1.4.10 Macchina di misura a coordinate per collaudo*



Questa verifica finale, effettuata con un calibro ancorato al disco, consente di definire con esattezza la posizione del centro della cava rispetto all'asse del disco. La corrispondenza delle misurazioni con i parametri CAD 2D costituisce il criterio di approvazione finale del prodotto.

L'adozione di questo rigoroso schema di collaudo garantisce che ogni disco non solo rispetti le specifiche tecniche richieste, ma contribuisce anche all'ottimizzazione del processo produttivo attraverso un feedback costante che permette miglioramenti mirati e un controllo qualità di alta precisione.



*Figura 1.4.11 Piano di identificazione centro cava*

## 1.5 Brocciatrici utilizzate

Durante il lavoro di tesi, ci si è focalizzati sull'analisi della brocciatrice verticale (Varinelli) in quanto, su di essa, sono stati installati dei sensori di vibrazione e di potenza, avendo così la possibilità di sviluppare un sistema di monitoraggio del processo, e ottimizzare le performance di questa macchina.

### 1.5.1 Brocciatrice Verticale

La brocciatrice verticale, progettata da Varinelli S.r.l., si caratterizza per la sua struttura a cinque assi, ognuno con specifiche funzioni.

- Asse Y: è l'asse che avvicina e allontana il pezzo dal contenitore delle brocche con una corsa massima di 500 mm.
- Asse  $W_1$ : è l'asse di rotazione attorno a Y. Il suo utilizzo si rende necessario per lavorare le cave inclinate di un angolo  $\theta$ , come visto in precedenza nel sottocapitolo 1.3.2.; l'asse ha una corsa di  $50^\circ$  in senso positivo e di  $35^\circ$  in senso negativo.
- Asse X: è l'asse di traslazione laterale che sposta il disco da destra verso sinistra rispetto al contenitore delle brocche. Questo asse si muove per garantire la simmetria tra l'asse della broccia e il centro della cava P.0 e Pt.0.
- Asse Z: è l'asse di traslazione verticale che muove il treno di brocche, la cui corsa è di 4000 mm; che è maggiore della lunghezza della carrellata, così facendo quando lavora l'ultima broccia, a fine corsa, quest'ultima è completamente al di fuori della cava appena lavorata.
- Asse  $W_2$ : è l'asse che ruota il disco per passare alla lavorazione della cava successiva. La sua corsa è di  $360^\circ$ .

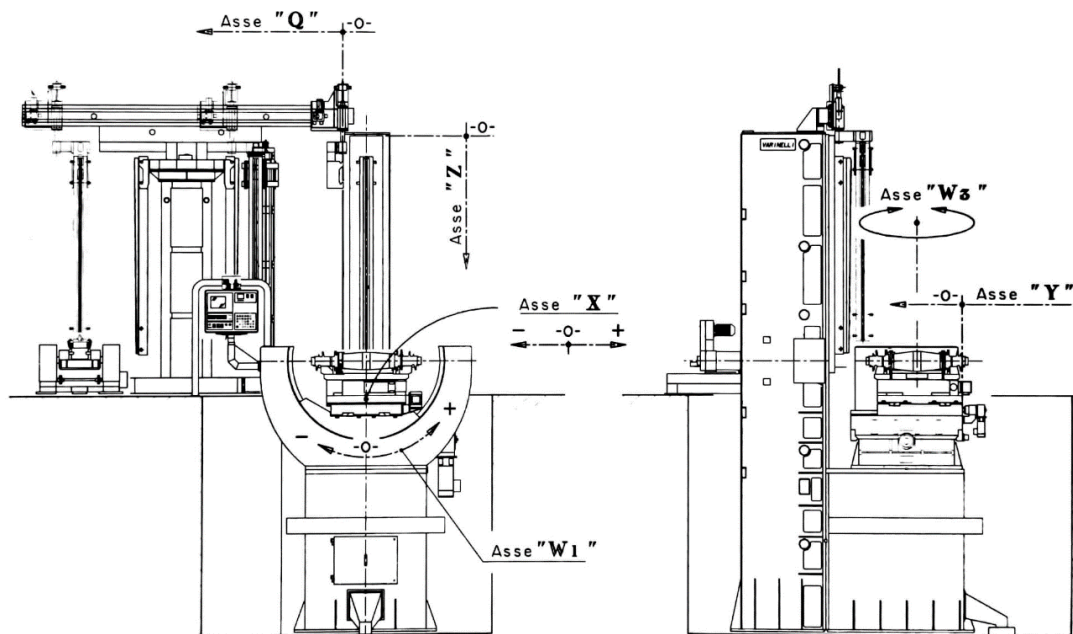


Figura 1.5.1 Disegno Brocciatrice con assi di movimentazione

La struttura su cui poggia il disco è composta da diverse parti, tra cui base, culla, spessore, divisore e attrezzo. Lo spessore è l'elemento che serve ad avvicinare il più possibile il centro cava con il centro di rotazione dell'asse  $W_1$ . Mentre l'attrezzo fissa e posiziona il disco.

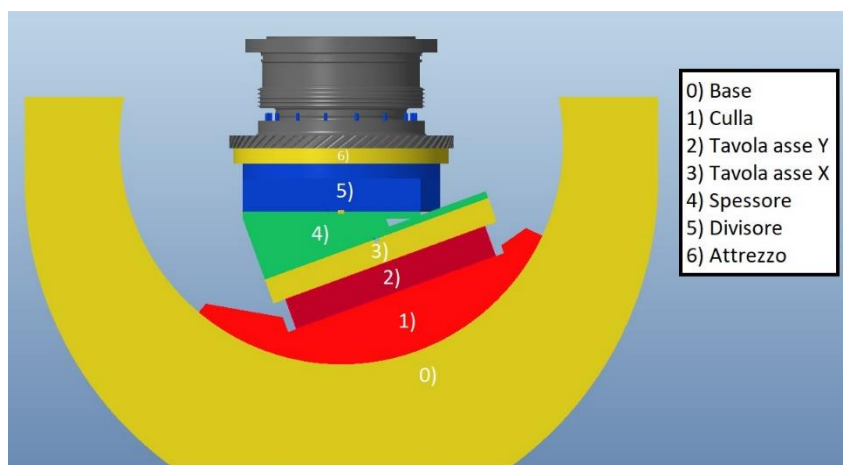


Figura 1.5.2 CAD della struttura su cui viene montato il disco

## 1.5.2 Brocciatrice orizzontale

Si riporta per completezza anche la seconda tipologia di brocciatrice utilizzata nell'azienda ma, che, per questo lavoro, non è stata presa in analisi.

La brocciatrice orizzontale (Lapointe) è una macchina datata agli anni '60 che non dispone di controllo numerico degli assi. La posizione degli assi è garantita meccanicamente attraverso l'uso di spessori noti. La macchina presenta quattro assi analoghi a quelli della brocciatrice verticale.

Caratteristiche degli assi:

- Asse Y: gestisce l'avvicinamento e l'allontanamento del pezzo dal contenitore delle brocche.
- Asse W1: responsabile della rotazione attorno a Y, con la sua posizione garantita da un fissaggio meccanico.
- Asse Z: controlla la movimentazione delle brocche secondo la direzione del moto di taglio.
- Asse W3: permette la rotazione del disco quando si deve lavorare una nuova cava.

La struttura su cui poggia il disco è composta da diverse parti, tra cui base, culla, spessore, divisore e attrezzo.

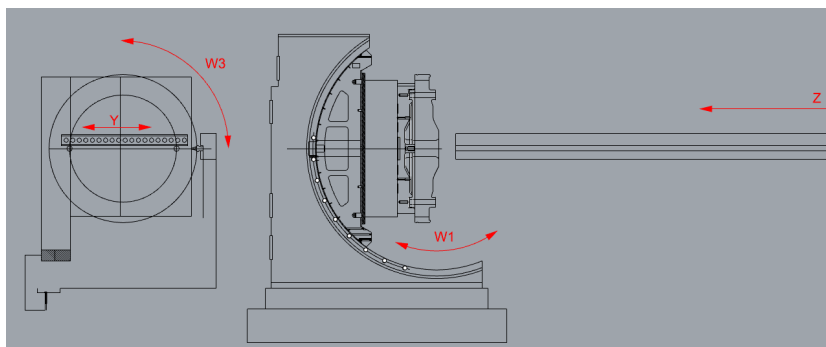


Figura 1.5.3 Disegno brocciatrice orizzontale con assi di movimentazione.

## 1.6 Le brocche

La progettazione della broccia costituisce un elemento cruciale per il corretto svolgimento del processo di lavorazione. Questa fase è affidata a fornitori esterni e seguita attentamente dall'azienda per tutta la durata del processo. In passato, si sono verificate problematiche che hanno causato la rottura dei settori della broccia a causa di una progettazione non adeguata.

La sommità del semifinitore, a causa di vibrazioni o altri fenomeni, ha urtato la cava, provocando la rottura dell'utensile e il rifiuto del pezzo. Le dimensioni di questo spazio non consentivano un corretto rifornimento di olio, influenzando negativamente il processo di taglio.



*Figura 1.6.1 Rottura di una broccia a causa di progettazione errata*

## 1.6.1 Geometria e dimensioni caratteristiche

Per progettare correttamente una broccia, si devono considerare molti parametri e dimensioni caratteristiche del dente tagliente (fig 1.6.1.1):

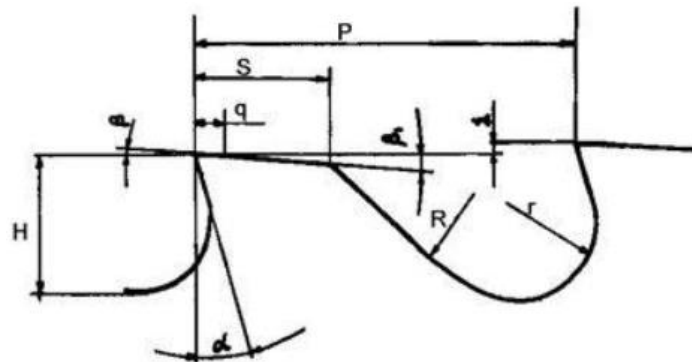


Figura 1.6.1.1 Dimensioni caratteristiche profilo del dente [15]

- $P$  = Passo
- $i$  = Incremento
- $H$  = Altezza dente
- $S$  = Tratto utile
- $R, r$  = Raggi di raccordo
- $\beta$  = Angolo di spoglia inferiore
- $\alpha$  = Angolo di spoglia superiore

Il passo è la distanza tra due denti taglienti successivi; ha un valore che dipende dalla lunghezza della cava da lavorare, ciò che importa e che durante la lavorazione ci siano almeno due o tre denti in presa, per consentire la continuità del taglio e non più di sei per evitare che la gola di contenimento del truciolo si intasi [15].

L'incremento e l'aumento di dimensioni che sia tra un dente e il successivo, per far sì che il dente successivo avendo maggiori dimensioni asporti del nuovo materiale [15].

L'altezza del dente viene scelta in base al materiale lavorato dal materiale della broccia e dall'incremento. Maggiori sono i carichi lo sforzo durante il taglio più piccola dovrà essere l'altezza del dente [15].

Il tratto utile S deve essere proporzionato al passo e alla profondità della gola [15].

I raggi di raccordo devono avere, nei limiti, la massima ampiezza possibile per facilitare l'avvolgimento del truciolo. Spesso, il cattivo funzionamento di un abbraccio deriva da raggi di raccordo sottodimensionati [15].

L'angolo di spoglia superiore, o spoglia dorsale, evita difetti di danneggiamento sul dorso del dente e sulla superficie già lavorata [15].

L'angolo di spoglia frontale viene scelto in base al materiale da brocciare, in generale questo angolo è tanto minore quanto più duro è il materiale da lavorare [15].

## Capitolo 2: Problematiche riscontrate

Come tutte le lavorazioni meccaniche, anche la brocciatura presenta molteplici problematiche, che portano ad una non corretta lavorazione che a sua volta porta allo scarto del pezzo lavorato e nei casi peggiori anche alla rottura dello stesso o ancor di più alla rottura del tagliente della broccia o della macchina stessa, con conseguente danno economico. Molto importante è quindi, ridurre al minimo il rischio di queste problematiche.

In questo capitolo si riportano i casi noti in bibliografia di problematiche tipiche della brocciatura, nonché verificatesi nella stessa azienda nel corso degli anni e riferite da parte dei tecnici, inoltre si riprende il problema principale, individuato nella tesi precedente, di cui questo lavoro fa parte, e si analizzano le soluzioni proposte dal tesista, esposte all'azienda e che la stessa potrebbe adottare.

### 2.1 Problemi Tipici della lavorazione

I problemi principali riscontrati sono riconducibili e suddivisibili in due tipici danneggiamenti; il danneggiamento della broccia o il danneggiamento del disco.

Ognuno dei due danneggiamenti presenta dei casi specifici. Per quanto riguarda il danneggiamento della broccia è possibile riscontrare una rottura della broccia, usura anomala del tagliente o una scheggiatura del tagliente. Il caso di rottura della broccia è evidentemente, molto grave e rappresenta il problema più serio tra quelli identificati, trattandosi di una rottura improvvisa dell'utensile all'interno della cava in lavorazione. A seconda dell'entità del danno o della fase di lavorazione, può causare lo scarto del disco. Ciò comporta una perdita economica,



non solo per la rottura dell'utensile, ma anche per i costi legati alla produzione del disco e alle lavorazioni precedenti. La brocciatura delle cave è una delle ultime fasi di produzione del pezzo, e, conseguentemente, un suo fallimento implica la perdita di tutto il lavoro fatto sul disco. Lo scarto del pezzo diventa più probabile man mano che ci si avvicina alle ultime fasi della lavorazione. Le fasi di semi finitura e finitura sono le più critiche perché anche un minimo danno può risultare irreparabile. Nel caso della sgrossatura, è possibile sostituire il segmento di broccia rotto e riprendere il lavoro, rimuovendo la parte danneggiata, a meno che non comprenda aree del disco da non eliminare. A volte è possibile prevenire la rottura dell'utensile grazie alla presenza dell'operatore, che, tramite ispezione visiva può notare comportamenti anomali durante la lavorazione. Nei casi registrati dall'azienda, le cave lavorate prima della rottura mostravano difetti attribuibili a un danno della broccia, che, se rilevati in anticipo avrebbero potuto prevenire la rottura stessa. Anche in questo caso l'intervento di un operatore può ridurre l'intensità del danno. Non appena si verifica la rottura o la macchina mostra segni di una rottura imminente, è necessario bloccare immediatamente la lavorazione. Poiché questo tipo di intervento presenta alta variabilità, diventa necessario installare meccanismi di sicurezza che intervengano automaticamente appena si verificano le condizioni necessarie [6].

Per quanto riguarda l'usura del tagliente e i meccanismi per i quali avvengono sono individuate cinque categorie principali [6]:

### Principali categorie di usura degli utensili

#### 1. Usura per abrasione

- causata principalmente dai precipitati duri del materiale del pezzo lavorato, comporta l'usura dell'utensile a causa delle sollecitazioni meccaniche subite. La resistenza dell'utensile a questo tipo di

usura aumenta con l'aumentare della durezza del materiale da cui è composto [7].

## **2. Usura per diffusione**

- Si verifica a causa di reazioni chimiche tra il materiale dell'utensile e il materiale del pezzo lavorato, con la diffusione di particelle dal petto dell'utensile al truciolo. Questo fenomeno è caratterizzato dalla formazione di un cratere nel petto dell'utensile, e la diffusione aumenta con l'aumentare della temperatura del truciolo e della reattività tra i materiali.

## **3. Usura per ossidazione**

- Si verifica a causa di temperature elevate e della presenza di ossigeno, portando all'ossidazione dell'utensile e alla sua usura, soprattutto nella zona di separazione tra il truciolo e l'utensile a causa della maggior quantità di ossigeno. Questo tipo di usura si presenta sottoforma di intagli nell'utensile.

## **4. Usura per fatica**

- Questo tipo di usura è causato dal carico ciclico o oscillante applicato all'utensile durante la lavorazione.

## **5. Usura per adesione**

- Si verifica a causa dell'adesione di materiale del pezzo lavorato all'utensile a causa delle elevate temperature e pressioni durante la lavorazione [6].

## Scheggiatura degli utensili e i suoi effetti

La scheggiatura degli utensili avviene quando il tagliente si rompe perdendo dei frammenti anziché usurarsi in modo graduale, e di solito si verifica nella zona più esterna del tagliente. Questo difetto comporta diversi problemi:

- peggioramento della rugosità superficiale del disco;
- modifica della geometria ottenuta col taglio del dente scheggiato;
- aumento dell'usura dell'utensile, che non lavora più in condizioni ottimali;
- possibile interferenza dei frammenti persi con il moto di taglio, generando imperfezioni sulla superficie del disco e aumentando le forze di taglio.

La scheggiatura può essere recuperata tramite affilatura, ma ciò porta a una diminuzione significativa della vita dell'utensile a causa della maggiore profondità del difetto da rimuovere rispetto a un'affilatura ordinaria. Tra le possibili cause della scheggiatura ci sono [6]:

- Materiale della broccia troppo fragile rispetto a quello del disco;
- Geometria dell'utensile troppo debole;
- Utilizzo di tagliente di riporto.

## 2.2 Problema Evacuazione del Truciolo

### 2.2.1 Introduzione

Il truciolo è il residuo di materiale che si forma durante l'asportazione di materiale da un pezzo grezzo mediante utensili da taglio. Quando l'utensile entra in contatto con il materiale, avviene una deformazione plastica del materiale stesso. La geometria del contatto tra l'utensile e il pezzo determina la fuoriuscita del truciolo, ovvero la parte di materiale che viene asportata [8].

Esistono diverse tipologie di truciolo, ciascuna con caratteristiche specifiche:

- Truciolo frammentato discontinuo: composto da piccoli elementi separati, questa forma non è ideale per la brocciatura perché interferisce con il processo di taglio e non consente un riempimento ottimale della gola porta truciolo.
- Truciolo segmentato: costituito da elementi parzialmente collegati tra loro, con spaccature di diversa profondità che li separano in parte.
- Truciolo ondulato: mantiene la continuità del materiale, ma presenta deformazioni periodiche che variano lo spessore lungo tutta la sua lunghezza.
- Truciolo fluente: il materiale è continuo e con spessore uniforme, ideale per la brocciatura perché consente di ottenere un truciolo regolare, composto da un unico pezzo che si avvolge su sé stesso formando una spirale durante la lavorazione [8].

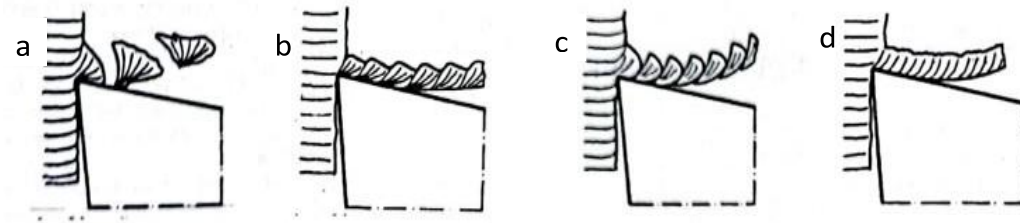


Figura 2.2.1.1 Tipi di truciolo: a) Frammentato, b) Segmentato, c) Ondulato, d) Fluente.

### 2.2.3 Formazione Truciolo nel processo di brocciatura

La formazione del truciolo è influenzata da una serie di parametri che possono variare il truciolo da frammentato a fluente, passando per il truciolo segmentato, adottando i seguenti accorgimenti [9,13]:

- Riduzione della velocità di taglio;
- Aumento dell'angolo di spoglia superiore;
- Diminuzione dell'incremento delle brocche;
- Refrigerazione adeguata;
- Affilatura precisa dell'utensile.

Durante il processo di brocciatura, il truciolo viene guidato all'interno della gola, progettata, in modo tale che durante il taglio il materiale formi una spirale che si avvolga su sé stessa. Questo consente al truciolo di occupare il volume della gola nel modo più regolare possibile. Per ottenere ciò, il truciolo deve essere continuo, costituito da un unico pezzo e regolare (Figura 2.2.3.1).



*Figura 2.2.3.1 Forma corretta truciolo*

Quando si verificano problemi durante la lavorazione, è utile analizzare la forma del truciolo prodotto fino a quel momento. In alcune situazioni, il truciolo può apparire deformato e distorto (Figura 2.2.3.2).



*Figura 2.2.3.2 Forma non corretta del truciolo*

Questo può essere causato da diversi fattori, tra cui:

- Affilatura errata della broccia: Durante l'affilatura possono formarsi gradini vicino al raggio di raccordo  $r$  (Figura 2.2.1.1). Questi gradini possono ostacolare la formazione del truciolo, che si impunta e si distorce avanzando.
- Volume della gola insufficiente o gola intasata: se il truciolo si sta formando e lo spazio nella gola non è sufficiente, sia per problemi di progettazione che per la presenza di trucioli residui dalla passata precedente, il truciolo si deforma causando problemi come l'aumento delle forze di taglio e conseguenti danni all'utensile e alla cava lavorata.

Le brocche possono presentare intagli rompitruciolo lungo il dorso dei denti (Figura 2.2.3.3).



*Figura 2.2.3.3 Tipici intagli rompitruciolo su broccia*

Questi intagli segmentano il truciolo lungo lo spessore, facilitandone l'espulsione. Gli intagli rompitruciolo sono presenti solo nelle fasi di sgrossatura e semifinitura, poiché durante la finitura è necessario garantire un processo di taglio il più regolare possibile.

I rompitruciolo devono essere sfalsati in modo che ogni dente asporti il materiale non rimosso dal dente precedente. La profondità del rompitruciolo deve essere maggiore rispetto all'incremento.

Durante la finitura e semifinitura, non si utilizzano intagli rompitruciolo; per risolvere questo problema, durante la progettazione della broccia, si adottano soluzioni che permettono di suddividere il truciolo in più porzioni. Nel caso delle cave turbina, si suddivide l'asportazione della geometria del pino e del bulbo su settori diversi, evitando così la formazione di un unico truciolo di grandi dimensioni. Questo approccio consente anche un miglior accesso del liquido lubrificante, che raggiunge il tagliente più facilmente attraverso lo spazio creato dalla lavorazione del bulbo. Tuttavia, per alcune geometrie, questa soluzione non è praticabile, poiché è necessario mantenere il maggior allineamento possibile tra il bulbo e il resto della cava; pertanto, le due porzioni vengono finite contemporaneamente.

Una volta definite le condizioni al contorno per un certo *part number* che caratterizzano il processo di brocciatura, la velocità di taglio è l'unico parametro di lavorazione che può essere variato immediatamente per influenzare la realizzazione delle cave. Durante la brocciatura, l'operatore può variare questo parametro da una cava all'altra per gestire eventuali anomalie del processo produttivo e prevenire danni agli utensili e al disco.

Il range di velocità utilizzato nelle lavorazioni dell'azienda è compreso tra 0,8 e 2,0 m/min. La velocità di taglio influisce su diversi fenomeni del processo:

- Tagliente di riporto: la riduzione della velocità diminuisce le temperature, accentuando il fenomeno del tagliente di riporto, peggiorando la qualità della superficie lavorata e riducendo la vita dell'utensile, che sarà più incline a scheggiarsi.



- Temperature: con la riduzione delle temperature, diminuisce la criticità del *white layer*. A seconda del materiale lavorato, si possono raggiungere temperature inferiori a quelle di ricristallizzazione o di trasformazione di fase del metallo, rendendo lo strato del *white layer* più simile al materiale base.
- Formazione del truciolo: la diminuzione della velocità permette di ottenere un truciolo continuo anziché frammentato.
- Forze di taglio: l'aumento della velocità richiede una potenza maggiore.
- Vibrazioni: la velocità influenza le oscillazioni di carico causate dall'uscita ed entrata dei denti della broccia. A seconda della broccia e della struttura su cui è montata, si presentano frequenze di risonanza associate a specifiche velocità di taglio, che possono massimizzare le vibrazioni durante la lavorazione.
- Usura: Utilizzare velocità elevate aumenta l'usura dell'utensile. Diversi modelli sono stati sviluppati per correlare la durata dell'utensile alla velocità di taglio, tra cui il più semplice è il modello di Taylor (vedi cap. 5):

$$VT^n = C_t$$

dove V è la velocità in m/min, T è la durata dell'utensile in minuti,  $C_t$  è il valore della velocità che porta a una vita dell'utensile di un minuto, e n determina l'inclinazione della curva (Figura 2.3.4) [10].

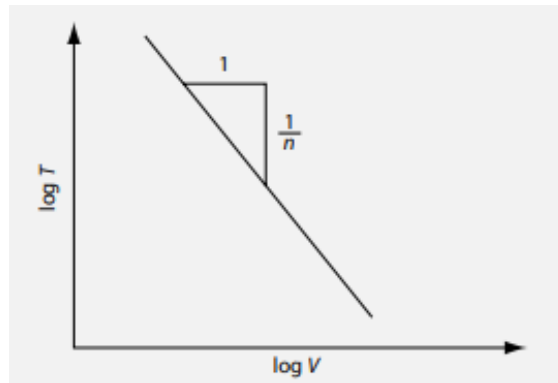


Figura 2.2.3.4 Equazione di Taylor [10]

Durante la lavorazione, le velocità vengono cambiate in base alla fase in cui ci si trova. Per la sgrossatura si usano velocità maggiori, generalmente tra 1,5 e 2 m/min, mentre per la semifinitura e finitura si avvicinano a circa 1 m/min. È necessario investigare ulteriormente l'influenza della velocità di passata sulla qualità della superficie del disco e su eventuali danneggiamenti degli utensili. Utilizzare velocità sempre minori non garantisce un miglioramento della lavorazione [11] a causa di fenomeni come il tagliente di riporto e le vibrazioni elevate.

## 2.4 Soluzioni per evacuazione efficace del truciolo

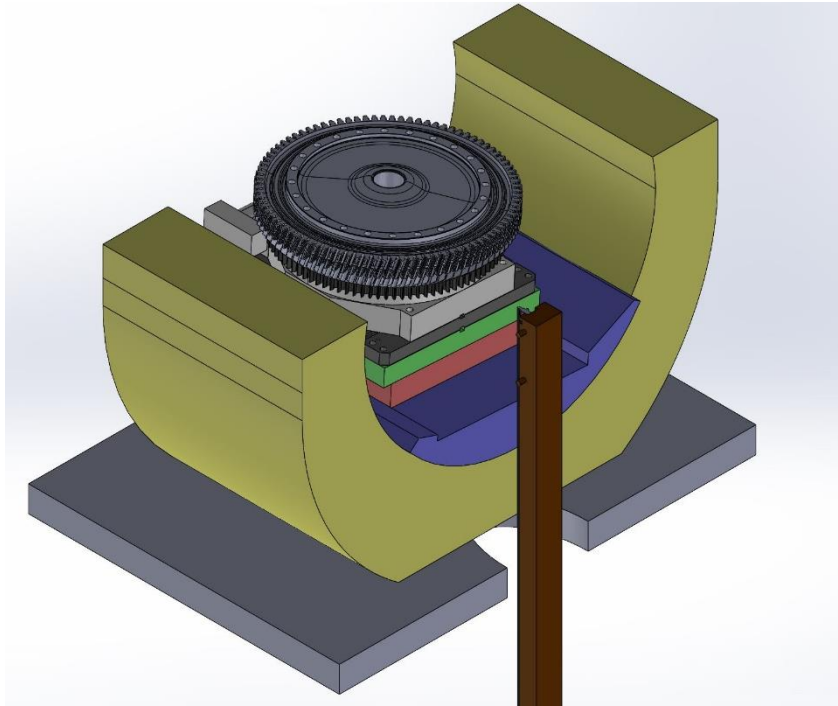
Come abbiamo visto, evacuare correttamente il truciolo, e garantire una forma corretta dello stesso, è fondamentale per ottenere una lavorazione secondo le corrette specifiche, per prevenire rotture improvvise e diminuire il rischio di scarto tra i pezzi. Quindi, per un percorso di ottimizzazione del processo di brocciatura, una partita fondamentale si gioca proprio nel cercare metodi più efficaci possibili per aiutare a espellere i residui di lavorazione nel modo più congruo possibile, cercando di prevenire su tutto, l'incastro di materiale asportato nelle gole della broccia che non vengono evacuate correttamente.

Per questo in questo capitolo si presentano delle soluzioni studiate e progettate per potere evacuare correttamente il materiale in eccesso che si produce durante il taglio.

### 2.4.1 Evacuazione tramite ugelli

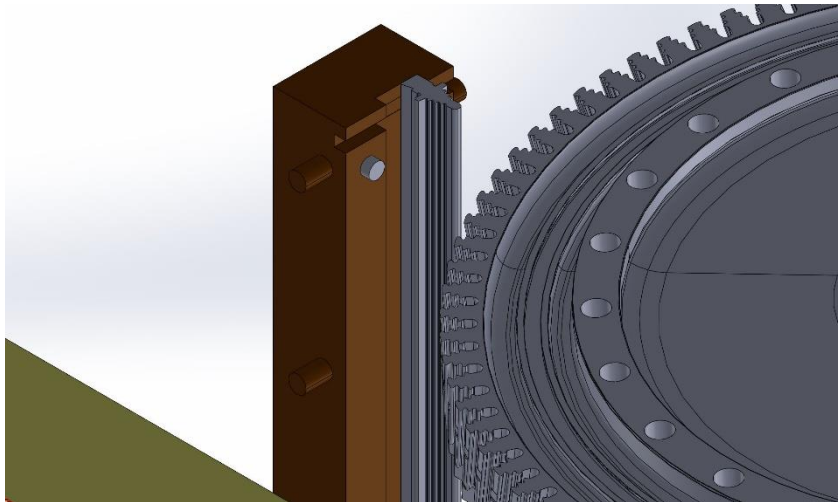
Una prima soluzione che si è studiata durante il lavoro in azienda è stata quella di definire un sistema di ugelli che potesse, tramite getto d'aria in pressione, pulire, spingere e facilitare l'evacuazione del truciolo, con il vantaggio di questo sistema di non bloccare la lavorazione, con conseguente rallentamento della linea produttiva, ma di svolgere la pulizia del materiale in eccesso sulle gole delle brocche durante il processo di taglio tra una cava e l'altra.

Dapprima si è reso necessario ricostruire un modello Cad 3D dell'intera brocciatrice verticale Varinelli (vedi cap. 1.5.1), definendo tramite software Cad accoppiamenti tra le parti, compresi base, culla, montanti, tavole, divisore e attrezzo. (Figura 2.4.1.1)



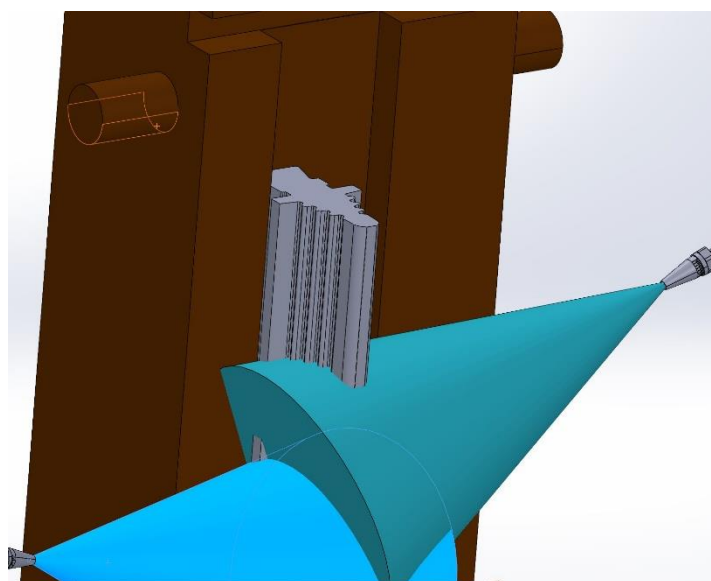
*Figura 2.4.1.1 Disegno 3D del Sistema brocciatrice verticale.*

In figura 2.4.1.2 si vede ancora più nel particolare in marrone lo slittone dove vengono montate i set di brocche durante le varie passate per la produzione delle cave dei dischi turbina.

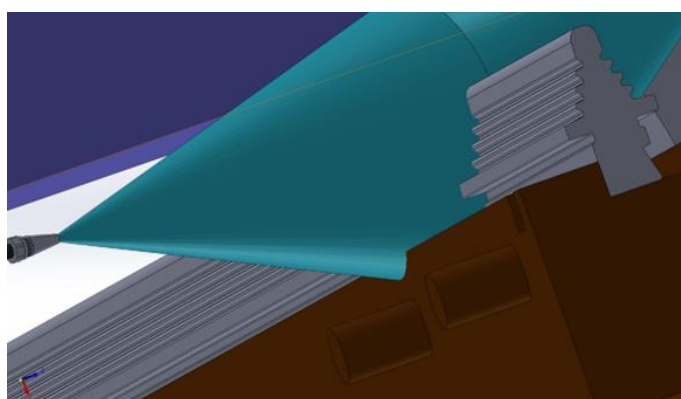


*Figura 2.4.1.2 Particolare frontale slittone con brocche e cave del disco lavorate*

E, proprio a ridosso nella parte bassa evidenziata dal basamento con l'asola per far passare il montante, si è pensato di strutturare il sistema di ugelli, in modo tale che, durante tutta la corsa dello slittone che è più lunga del set di brocche montate, si possano raggiungere facilmente tutte le gole dei taglienti delle brocche. Inoltre, si sono posizionate lì in basso e si sono rivolti gli ugelli verso il basso, così che il getto d'aria spinga i trucioli in basso, lontano dal disco in lavorazione, così da prevenire eventuali scheggiature dello stesso come effetto proiettile del truciolo sul disco in lavorazione, e, allo stesso tempo, limitare la nebulizzazione dell'olio di lubrificazione usato durante la lavorazione in goccioline fastidiose anche per i tecnici in macchina (Figure 2.4.1.3-2.4.1.4).



*Figura 2.4.1.3 Particolare ugelli con getto aria su*



*Figura 2.4.1.4 Particolare ugelli con getto aria su brocche*

Quindi, attraverso un sistema di generatore di compressione tubi per gli ugelli, si riesce a ottenere il sistema raffigurato nelle figure precedenti. Questo sistema, studiato garantirebbe l'evacuazione del truciolo in maniera molto più efficace. L'unica problematica è che, data la lavorazione particolare di questi dischi turbini nell'azienda, la lubrificazione durante la lavorazione dei dischi è molto abbondante, a tal punto che, anche con le dovute accortezze illustrate durante questa soluzione, il getto d'aria nebulizzerebbe troppe goccioline all'interno della zona di lavorazione. Ciò di per sé, non è un problema ma, vista ormai la datata costruzione della macchina Varinelli e la poca automatizzazione del processo, questa richiede costantemente la presenza di un operatore, che quindi sarebbe investito dalle goccioline.

## 2.4.2 Nuovo sistema di spazzole

Un sistema, già adottato dall'azienda per rimuovere pezzi di truciolo che tra una passata e la successiva rimangono intrappolati tra le gole della dentatura delle brocche, è rappresentato da un sistema di spazzole progettato per rimuovere tutti i trucioli non evacuati correttamente dal sistema di lubrificazione. Questa azione è fondamentale per una corretta brocciatura.

## 2.4.3 Spazzole

Quando ci troviamo a fine lavorazione della cava, appunto appena lavorata, il contenitore delle brocche e tutto lo slittone viene fatto risalire, in questo preciso momento viene effettuata la pulizia del treno di brocche mediante l'uso di due spazzole rotanti. Queste, sono composte da filamenti in fibra di bronzo fosforato (Figura 2.4.3.1).



*Figura 2.4.3.1 Esempio di spazzola per pulizia brocche*

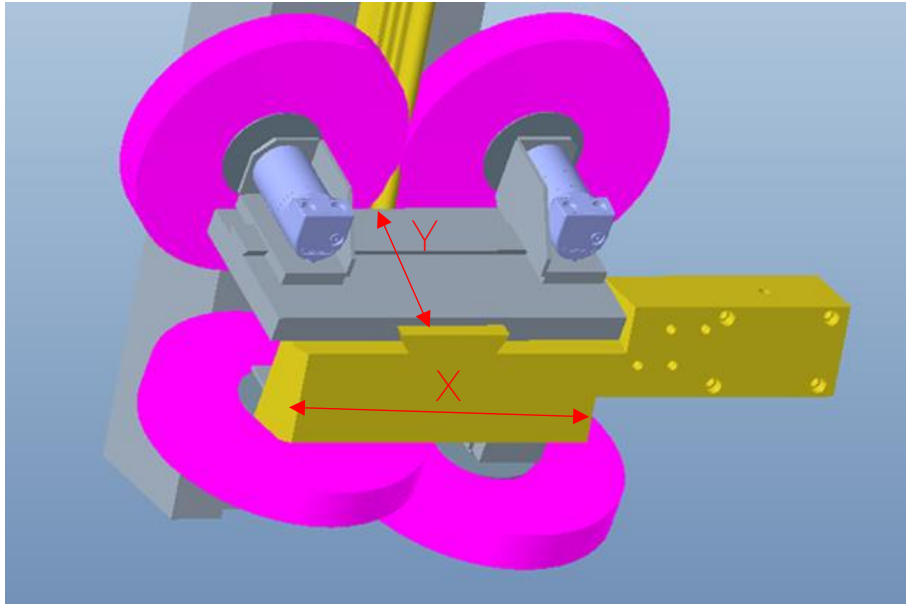
Nella brocciatrice verticale Varinelli, queste vengono disposte sui due lati delle brocche, in modo tale da massimizzare la capacità di evacuare il truciolo rimasto intrappolato. Quindi, vengono fatte ruotare, con l'asse che giace sul piano yz e inclinato di  $15^\circ$  rispetto all'asse z di macchina. La rotazione delle due spazzole è azionata tramite due motori elettrici, con una vista dall'alto la spazzola destra ruota in senso antiorario, quella di sinistra in senso orario.

#### 2.4.4 Soluzione con doppie spazzole

Nel caso in cui la spazzola fallisca nel rimuovere la totalità di materiale rimasto intrappolato dopo la lubrificazione, si andrebbe a influire negativamente sulla lavorazione della cava successiva. Questo perché il materiale asportato andrebbe a impattare con quello asportato e rimasto intrappolato durante la lavorazione della cava precedente, intasando le gole della broccia e causando vibrazioni inaspettate e indesiderate che andrebbero a danneggiare la finitura superficiale del disco appena lavorato e causerebbero un aumento delle forze sui taglienti delle brocche che si usurerebbero in maniera molto più celere del normale. E, in taluni casi potrebbe portare anche alla rottura del settore di broccia.

Per tali motivi, si è pensato a una soluzione che potesse massimizzare l'efficacia delle spazzole rotanti con un sistema di un'altra coppia di spazzole, dello stesso tipo, ma con la possibilità di essere movimentate, tramite motore elettrico, lungo asse Y (figura 2.4.4.1).





*Figura 2.4.4.1 Nuovo sistema di spazzole movimentazione lungo Y*

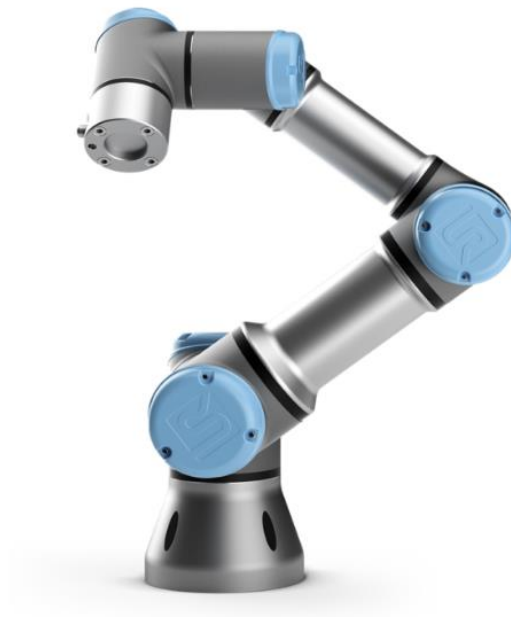
Così facendo, si rende possibile la pulizia e la rimozione dei trucioli da un'altra angolatura e quindi si potrebbe ridurre drasticamente la possibilità che qualche truciolo rimanga incastrato, poiché si avvolgerebbero completamente tutte le gole della broccia. Inoltre, essendo la rimozione più efficace, lo slittone porta brocche potrebbe risalire molto più velocemente nella posizione di inizio lavorazione della cava successiva del disco, poiché si ridurrebbe il tempo di permanenza delle spazzole su ciascuna gola, dato che si rende possibile rimuovere più facilmente il materiale. E al contempo verrebbe incrementata la produttività. L'efficienza del processo descritto non solo potrebbe migliorare la produttività, ma potrebbe anche portare a una significativa riduzione dei costi operativi.

Un altro vantaggio significativo è la riduzione dell'usura delle spazzole, poiché queste possono operare per meno tempo su ciascuna gola senza compromettere l'efficacia della pulizia.

### 2.4.5 Soluzione con robot

Un'altra soluzione analizzata riguarda l'uso di un robot collaborativo di piccole - medie dimensioni. Un robot antropomorfo a sei gradi di libertà, che dovrà raggiungere la sede delle brocche e, tramite l'installazione di appropriati *tools* da montare sull'*end effector* riuscire a pulire con precisione, quasi umana, anche il più ostinato dei trucioli, rimasto saldamente intrappolato tra i taglienti.

Un esempio di robot che potrebbe essere utilizzato è UR3 della Universal Robots in figura 2.4.5.1.



*Figura 2.4.5.1 robot collaborativo UR3*

Sull'*end effector*, che corrisponde alla parte terminale del robot, verranno montati dei *tool* specifici per la rimozione dei trucioli implementati nella figura 2.4.5.2 e figura 2.4.5.3.

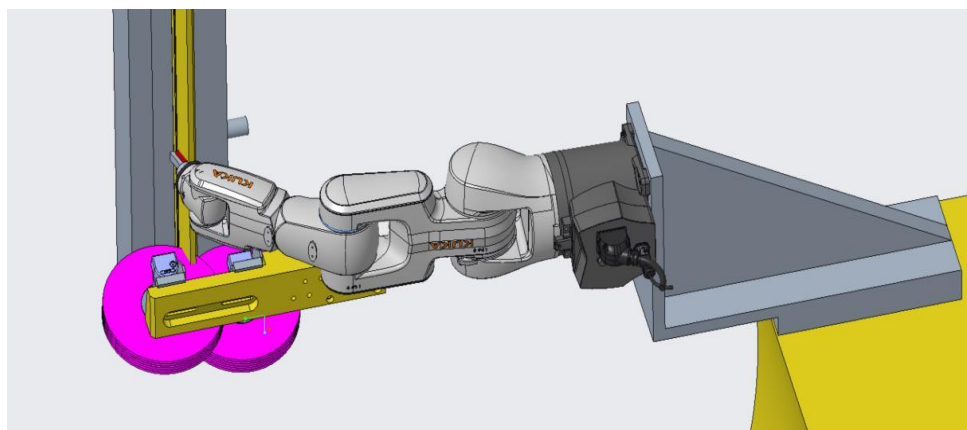


Figura 2.4.5.2 Tool 1: spazzola orizzontale

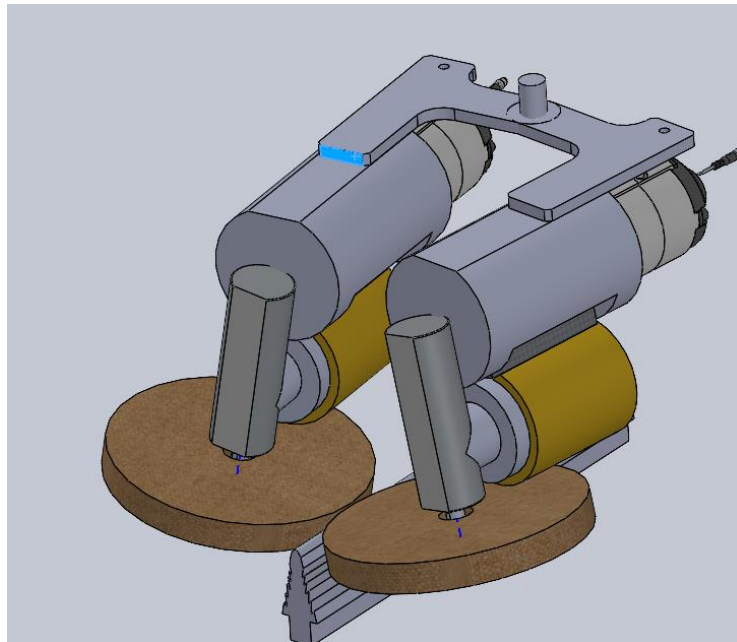


Figura 2.4.5.3 Tool 2: sistema doppia spazzola

Il tool 1 opererebbe con il sistema di spazzolatura già presente in officina, mentre il tool 2 sarebbe utilizzato con coppia di spazzole che potranno, essendo un robot antropomorfo, ricoprire con movimenti molto precisi su tutti i lati dei taglienti delle brocche. Ovviamente, per l'utilizzo del robot si renderà necessaria una programmazione di traiettoria differente a seconda del tool montato e dell'operazione che lo stesso deve svolgere.

Per aumentare l'efficacia di questa soluzione, inoltre, si è previsto di montare dei sensori che aiuterebbero il robot a implementare i cicli di pulizia nel modo corretto. Ad esempio, sarà possibile utilizzare scanner 3D per creare un modello digitale della brocciatrice e delle sue gole e creare percorsi di pulizia ottimali basati sul modello 3D, per garantire che tutte le aree vengano coperte. E, tramite sensori visivi, si potranno implementare cicli di pulizia che si adattino dinamicamente alle condizioni rilevate, ad esempio intensificando la pulizia in aree con maggiori accumuli di trucioli. In più, con l'implementazione della programmazione con logica di feedback loop, si consentirà al robot di monitorare e adattare la pulizia in tempo reale.

## Capitolo 3: Prime analisi sui dati raccolti

In questo capitolo, si affronteranno le prime analisi sul sistema di sensoristica e sui dati raccolti nelle varie lavorazioni di dischi dell'azienda, in particolar modo di dischi turbina, lavorati durante il periodo di tesi dall'azienda.

Dapprima, si presenterà il sistema di sensoristica installato durante il lavoro di tesi precedente in macchina, come indicato nei capitoli iniziali, nella brocciatrice verticale Varinelli. Inoltre, si presenterà l'interfaccia software con cui si registrano i dati, durante la lavorazione delle cave di dischi turbina presi in analisi. Gli stessi dati saranno esaminati per migliorare e ottimizzare il processo di brocciatura come, a esempio, settare dei limiti di potenza e di vibrazione massimi concessi durante la lavorazione. Nell'eventualità tali limiti vengano superati, il sistema manderà un allarme visivo attraverso l'accensione di una spia in macchina che, catturando l'attenzione dell'operatore, che gli permetteranno di verificare cosa stia effettivamente succedendo. Nel caso in cui la spia diventi rossa, indicando un superamento ulteriore dei limiti imposti, si procederà con un arresto della macchina per non rovinare completamente il disco e, conseguentemente, scartare il pezzo, subendo una perdita economica importante.

Per ottenere un maggiore controllo sulle variazioni del processo e sulle situazioni che possono portare alle problematiche precedentemente descritte, è stata presa la decisione di installare un sistema di diagnostica sulla brocciatrice verticale Varinelli. Questo sistema consente di monitorare, in tempo reale, il processo e di intervenire durante la lavorazione sia tramite segnali di allarme forniti all'operatore sia attraverso l'arresto automatico della macchina.

L'implementazione del sistema di diagnostica è stata effettuata sulla brocciatrice verticale poiché, nel corso del 2023, l'azienda ha avviato la produzione di un nuovo *part number* che sarà lavorato con questa macchina. Pertanto, è stato deciso di investire in un sistema che ottimizzi il processo di brocciatura, riducendo al minimo gli imprevisti che potrebbero portare allo scarto dei pezzi e ai blocchi della produzione.

### 3.1 Sensoristica installata

Il sistema di diagnostica comprende due sensori principali:

- Sensore di corrente, che misura la potenza assorbita dalla macchina.
- Accelerometro, che rileva le vibrazioni della superficie su cui è montato.

#### 3.1.1 Sensore di Corrente

Il sensore di corrente PT800 è costituito da un'unità centrale (Figura 3.1.1.1) collegata a un anello (Figura 3.1.1.2) che avvolge il cavo di alimentazione del motore dell'asse Z.



Figura 3.1.1.1 Unità centrale del sistema di misurazione della corrente



Figura 3.1.1.2 Anello del sistema di misurazione della corrente

La misurazione della corrente si basa sull'effetto Hall. Questo fenomeno fisico avviene quando un conduttore attraversato da corrente elettrica viene perpendicolarmente investito da un campo magnetico, generando una differenza di potenziale trasversale al conduttore stesso (Figura 3.1.1.3).

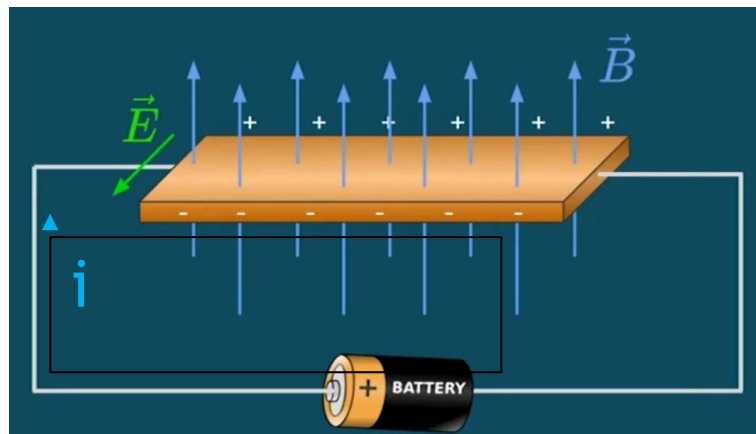


Figura 3.1.1.3 Rappresentazione effetto Hall

La tensione trasversale si forma a causa dello spostamento degli elettroni verso un bordo del conduttore, dovuto alla forza di Lorentz prodotta dal campo magnetico perpendicolare al movimento degli elettroni (Figura 3.1.1.4).

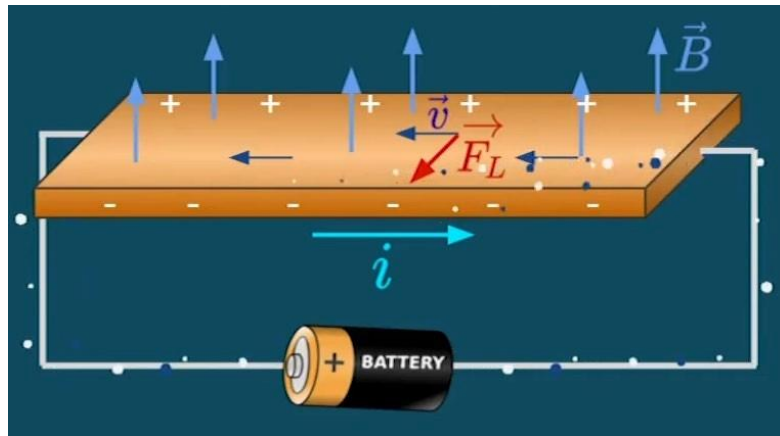


Figura 3.1.1.4 Rappresentazione della forza di Lorentz nell'effetto Hall

Utilizzando questo principio, i sensori di corrente sono costruiti in questo modo: il trasduttore anulare circonda il cavo da misurare, generando un campo magnetico le cui linee di forza sono concentriche al cavo stesso. Il sensore comprende:

- Un nucleo ferromagnetico a forma di "C" che concentra il campo magnetico.
- Un conduttore rettangolare sottile posto alle estremità del nucleo, attraversato perpendicolarmente dal campo magnetico.

Il conduttore, alimentato da una corrente continua costante, genera una tensione ai suoi bordi, proporzionale all'intensità del campo magnetico, che a sua volta è direttamente proporzionale alla corrente nel filo, secondo la legge di Biot-Savart.



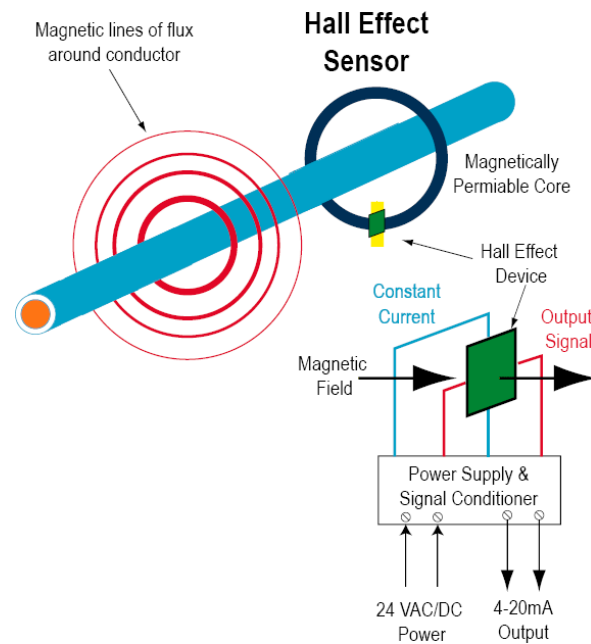
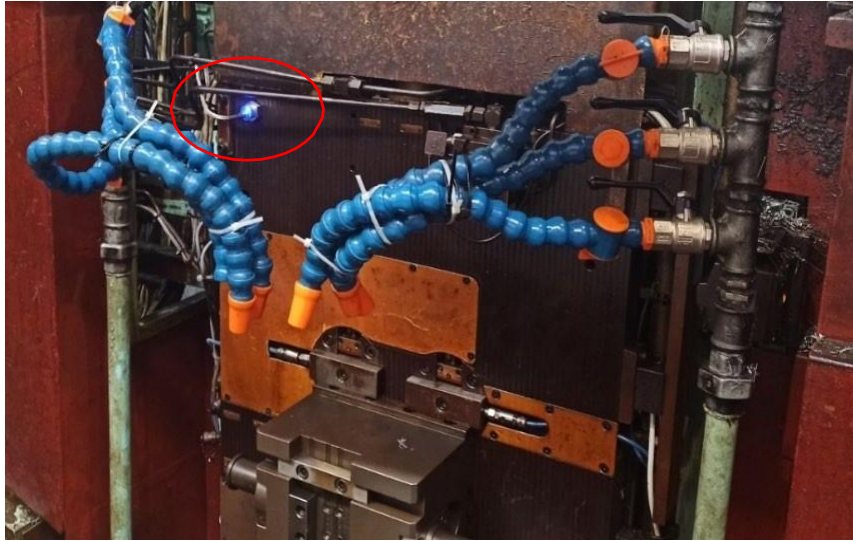


Figura 3.1.1.5 Schema sensore di corrente a effetto Hall

Conoscendo la corrente e la tensione di lavoro del motore, si può calcolare la potenza assorbita dalla macchina usando la prima legge di Ohm.

### 3.1.2 Sensore di Vibrazioni

Il sensore di vibrazione CEI-VIB-WMR è un accelerometro triassiale in grado di misurare fino a 16 g di accelerazione, con un range di frequenze da 0 a 1600 Hz. Il sensore è fissato magneticamente alla superficie dell'asse Z, in una posizione che evita l'esposizione al flusso di refrigerante a fine corsa (figura 3.1.2.1). Questa collocazione potrebbe però ridurre la percezione delle vibrazioni iniziali provenienti dalla parte inferiore dell'asse.



*Figura 3.1.2.1 Sensore di vibrazioni*

Infatti, nella prima trattazione il sensore di vibrazione era posizionato sulla slitta, abbastanza lontano dalla lavorazione, precisamente sopra gli ugelli per la lubrificazione. In questa posizione, come detto precedentemente, risulterà per il sensore più difficile cogliere tutte le vibrazioni della lavorazione e, anzi, raccogliere vibrazioni che non dipendono solo dalla lavorazione ma molto rumore. Per questo, nelle trattazioni dei seguenti capitoli esporranno le prove effettuate in azienda per trovare la posizione migliore in cui collocare il sensore.

### 3.1.3 Unità di Controllo (TCU)

I sensori sono collegati a un computer di piccole dimensioni nell'armadio elettrico della macchina. L'unità di controllo (TCU) gestisce gli input dai sensori e, dal computer di macchina, elabora i dati e fornisce output. È collegata sia al controllore logico programmabile (PLC) della brocciatrice sia a un computer esterno.



*Figura 3.1.3.1 Unità di controllo del sistema di diagnostica*

La TCU riceve i seguenti input dal PLC:

- Numero utensile usato in ogni passata;
- Sezione utensile usata, considerando la possibilità di più passate nello stesso ciclo di lavorazione;
- Job del pezzo lavorato, includendo informazioni su utensili, sezioni e soglie di allarme per ogni fase della brocciatura;
- Inizio e fine acquisizione segnale.

Gli output inviati includono:

- Allarme di usura, per avvisare l'operatore della necessità di verificare lo stato degli utensili e della cava;
- Allarme estremo, segnalato in caso di rottura o imminente rottura dell'utensile;
- Arresto macchina, programmabile per fermare la macchina in caso di allarme estremo, minimizzando i danni.

I livelli di allarme sono stati impostati manualmente dopo una campagna di acquisizione dati e prove sperimentali. Fissato un *part number*, in generale si definiscono per ogni passata i livelli ottimali di vibrazione e potenza, evitando danni al disco e all'utensile.

La connessione della TCU con il computer a bordo macchina utilizza il software TMAC Explorer, che visualizza in tempo reale i segnali dei sensori e gli allarmi di lavorazione. Fuori dalla lavorazione, il software consente di impostare i "Job", descrizioni della lavorazione di un *part number* specifico, con indicazioni sul numero di carrelli e passate, e i livelli di allarme per ciascuna parte della curva di potenza (Figura 3.1.3.2).



Figura 3.1.3.2 Esempio di limiti su una curva di potenza

### 3.1.4 Esportazione dei Dati

Il software TMAC consente l'esportazione dei dati registrati durante le lavorazioni. Il file esportato ha una estensione .TMD, utilizzato per il database, contenente tabelle come:

- Monitors, con informazioni sul Job, errori e canali di acquisizione;
- Recordings, con ID, numero di allarmi, tipo di acquisizione e durata;
- Series, contenente le serie per ogni recording, comprese potenza, accelerazione e loro integrali temporali, con unità di misura, ID e frequenza di acquisizione;

- Packets, suddividendo ogni segnale in pacchetti di dati BLOB, compressi in formato MessagePack.

Per l'esportazione dei dati è stato sviluppato un programma in Python e SQL:

- Creazione della connessione al database;
- Ottenimento del numero di registrazioni;
- Estrapolazione degli ID dei segnali di potenza e accelerazione;
- Acquisizione del numero di pacchetti per ogni segnale;
- Unione e conversione dei pacchetti da binario a decimale, esportando i dati in file *.txt* nominati automaticamente;
- Creazione di un file con la durata di ogni acquisizione.

Questo codice consente di esportare e organizzare i segnali registrati per ogni passata del job. I file *.txt* generati contengono i valori acquisiti dalla TCU, in formato vettoriale e cronologico (Figura 3.1.4.1).

```
0.09262429457655302, 0.09262429457655302, 0.09262429457655302,
0.09262429457655302, 0.09262429457655302, 0.09262429457655302,
0.09262429457655302, 0.09262429457655302, 0.09380023364102884,
0.09380023364102884, 0.09380023364102884, 0.09380023364102884,
0.09380023364102884, 0.09380023364102884, 0.09380023364102884,
0.09380023364102884, 0.09380023364102884, 0.09380023364102884,
0.09380023364102884, 0.09380023364102884, 0.09380023364102884,
0.09380023364102884, 0.0923223041114288, 0.0923223041114288,
0.0923223041114288, 0.0923223041114288, 0.0923223041114288,
0.0923223041114288, 0.0923223041114288, 0.08407819706023544,
0.08407819706023544, 0.08407819706023544, 0.08407819706023544,
0.08407819706023544, 0.08407819706023544, 0.08407819706023544,
0.08407819706023544, 0.08407819706023544, 0.08407819706023544,
0.07697371047565091, 0.07697371047565091, 0.07697371047565091,
0.07697371047565091, 0.07697371047565091, 0.07697371047565091,
0.07697371047565091, 0.07697371047565091, 0.07697371047565091,
0.07697371047565091, 0.07697371047565091, 0.0779980459102187,
0.0779980459102187, 0.0779980459102187, 0.0779980459102187,
0.0779980459102187, 0.0779980459102187, 0.0779980459102187,
0.0779980459102187, 0.0779980459102187, 0.0779980459102187,
```

Figura 3.1.4.1 Esempio di porzione di un file esportato in forma vettoriale

Con i valori di ogni acquisizione e la durata della registrazione è possibile manipolare e graficare i segnali usando software come Matlab, o Python. Un ulteriore codice importa i vettori nei file di testo nel Workspace e costruisce i vettori temporali, permettendo di graficare i segnali per l'analisi.

### 3.2 Prove su disco provino

In questo sottocapitolo si esporranno le prove effettuate su un disco provino per indagare la capacità dei sensori di registrare e catturare variazioni di potenza e di vibrazione. Queste prove avranno come scopo quello di riuscire a settare dei limiti di potenza e di vibrazione oltre i quali la macchina genererà degli allarmi e, nel caso peggiore, che coincide con un certo aumento locale di potenza e vibrazione, un arresto totale della macchina per non incidere e, conseguentemente, rischiare di portare rottura il disco o le brocche. Le prove sono state effettuate da specifiche brocche con un loro incremento, una loro larghezza e a diverse velocità, a seconda della cava lavorata. Ovviamente, per confrontare i dati, sono state comparate le cave che lavorassero a una stessa velocità e, su queste, a uguale velocità sono state effettuate anche le prove di scheggiatura e rottura della broccia. Così facendo, si è potuto capire l'effettiva potenza sviluppata da una broccia prima scheggiata e che, in seguito, arrivava a rottura. Avendo i dati di potenza sviluppata dapprima per la scheggiatura e poi per la rottura, è stato possibile settare dei limiti di potenza.

### 3.2.1 Brocche utilizzate

Le brocche utilizzate per condurre queste prove sperimentali sono sei, di differente tipologia, fornite dall'azienda Berghaus. Abbiamo differenti tipologie poiché ogni tipologia fa riferimento a una forma di cava specifica che, come sappiamo sulla base dei capitoli precedenti, cambia a seconda della fase in cui ci troviamo tra sgrossatura, semifinitura e finitura. Come riportato in tabella 3.2.1.1, abbiamo un riassunto delle specifiche delle brocche utilizzate, partendo dal numero di broccia, all'incremento [mm], alla larghezza del tagliente [mm] e alla tipologia.

Numero broccia	Incremento [mm]	Larghezza tagliente [mm]	Tipologia	Fornitore
1	0.079	12.8	1	Berghaus
2	0.079	12.7		
3	0.079	12.6		
4	0.079	12.5		
5	0.079	12.4		
6	0.026	17.0	2	

Tabella 3.2.1.1 Specifiche brocche utilizzate

Mentre in figura 3.2.2.1 e figura 3.2.2.2 si riportano le foto delle brocche utilizzate, di diverse tipologie. In particolare, come evidenziato dalla tabella 3.2.1.1, l'unica broccia di differente tipologia è quella che corrisponde al numero di broccia 6.





*Figura 3.2.1.1 Broccia tipologia 1*

La broccia di tipologia 1, corrispondono al numero broccia che va da 1 al 5 in tabella 3.2.1.1, questo poiché corrisponde a cave con la stessa fase di lavorazione. Infatti, come si può notare, l'incremento in millimetri è lo stesso per ogni settore di broccia. L'unica informazione che varia nelle brocche di questa tipologia, nell'ordine del decimo di millimetro, è la larghezza del tagliente, che si riduce all'aumentare del numero di broccia.



*Figura 3.2.1.2 Broccia n° 6 tipologia 2*

Mentre, abbraccia numero 6 è l'unica di tipologia 2, che si differenzia della prima tipologia per incremento e larghezza tagliente, come mostrato in tabella 3.2.1.1.

### 3.2.2 Prove effettuate

Per quanto riguarda le prove effettuate, esse sono state suddivise in tre categorie, cioè, il numero di cava corrispondente, la velocità di lavorazione della cava in metri al minuto e gli eventi particolari che si sono verificati durante la lavorazione. In particolare, come anticipato, gli eventi particolari corrispondono a prove di scheggiatura e di rottura. In tabella 3.2.2.1, sono riportate le tre categorie di suddivisione: si noti che le prime 6 cave non sono afflitte da eventi particolari, il che indica che le lavorazioni si sono svolte senza danni o problemi. Per queste prime cave l'unico dato che cambia corrisponde alla velocità della lavorazione, che è possibile confrontare per notare se siano presenti delle variazioni in termini di potenza e accelerazione.

Numero cava	Velocità [m/min]	Eventi particolari
1	1.4	-
2	1.4	-
3	1.4	-
4	0.6	-
5	2.0	-
6	3.0	-
7	4.0	Rottura Broccia
8	2.0	Dente scheggiato
9	2.0	Rottura Broccia
10	2.0	Due denti scheggiati
11	2.0	Rottura Broccia

Tabella 3.2.2.1 Schema e suddivisione prove effettuate

Il range di velocità rappresentato in tabella corrisponde effettivamente alle velocità tipiche delle diverse fasi di lavorazione, quindi, è stato preso un ampio margine di velocità per coprire i casi reali in lavorazione.

Nelle cave dalla 7 alla 11 abbiamo il verificarsi degli eventi particolari appositamente studiati per settare i limiti sulla macchina. In particolare, abbiamo una rottura della broccia a velocità di 4 metri al minuto per la cava numero 7, mentre altri eventi a velocità di 2 metri al minuto dalla cava 8 alla 11. Per la cava numero 8, si è effettuata una prova di scheggiatura in cui solo un dente della broccia era scheggiato. Diversamente, per la cava numero 10, mantenendo la stessa velocità, si è effettuata una prova di scheggiatura con due denti scheggiati della broccia. Le prove di rottura sono state effettuate per le cave numero 7, 9 e 11.

Prima di procedere all'analisi dei dati raccolti tramite queste prove si è effettuato un test di acquisizione automatica dei dati. Cioè, si è indagato se effettivamente l'interfaccia di sensoristica installata fosse in grado di raccogliere automaticamente i dati appena iniziata la lavorazione. Per fare ciò, si è confrontata la velocità teorica tenuta durante la lavorazione e, attraverso la corsa teorica della macchina, si è ricavato il tempo di lavorazione teorico. Questo è stato confrontato con la durata della registrazione dei dati effettuata della sensoristica installata. Inoltre, per le cave con la stessa velocità di passata, si è verificato che la differenza massima di durata della registrazione fosse poco influente (Tabella 3.2.2.2).

Numero cava	Velocità teorica [m/min]	Durata registrazione [s]	Differenza massima di durata [s]	Corsa teorica macchina [mm]*
4	0.6	402.11	-	4021
2	1.4	173.69	0.16	4052
3	1.4	173.75		4054
5	2.0	122.32	0.12	4077
8	2.0	122.34		4078
10	2.0	122.44		4081
6	3.0	82.44	-	4122

*Tabella 3.2.2.2 Tabella confronto durata lavorazione cave*

Il risultato di questa analisi ha permesso di verificare il corretto funzionamento dell'acquisizione automatica. La banda di oscillazione presente nella differenza di durata della registrazione di cave con la stessa velocità è nell'ordine dei decimi di secondo. Questo permette di concludere che vi sia una buona ripetibilità tra differenti cave lavorate con la stessa velocità di passata.

L'unica criticità che non è possibile eliminare è rappresentata dal fatto che l'operatore, a sua discrezione, possa far variare la velocità, nelle situazioni che ritiene opportune, tramite il potenziometro che è installato in macchina, causando delle variazioni sulla durata effettiva delle passate.

### 3.3 Analisi sui dati di potenza

Prima di effettuare un confronto tra le diverse cave alle molteplici velocità e, conseguentemente, capire se sia possibile settare dei limiti di allarme per la macchina, si rende necessario un'analisi dei dati sulla potenza registrate dal sensore di potenza, per riuscire a capire se ci sia una buona ripetibilità e una piccola oscillazione tra i risultati di potenze di cave lavorate alla stessa velocità.

In particolare, come si vede nella tabella 3.2.2.1, le prime tre cave presentano la stessa velocità di passata corrispondente a 1.4 metri al minuto. Quindi, verranno confrontate e analizzate tramite software Python graficando la potenza di lavorazione acquisita dal sensore per le tre cave. Analizzando la banda di oscillazione a vuoto, cioè senza che ci sia effettiva lavorazione, tra una passata e l'altra e durante la singola lavorazione, verranno confrontate le potenze di taglio durante la lavorazione di queste cave che si trovano nella fase di sgrossatura, quindi nella prima fase della lavorazione.

In questa prima parte, verranno analizzati i dati ricavati dal sensore di potenza, per capire se il sensore installato sia in grado di fornire e di monitorare la potenza effettiva durante il processo di lavorazione. Se, dai dati analizzati, si troveranno dei riscontri positivi, sarà allora possibile, attraverso le prove scheggiature e di rottura, settare dei limiti di allarme per la macchina. La stessa analisi verrà poi effettuata per indagare la capacità di monitorare il processo da parte del sensore di vibrazione.

### 3.3.1 Confronto potenza di cave con stessa velocità

In figura 3.3.1.1 viene riportato il grafico di potenza durante le passate delle cave 1,2 e 3 evidenziate dai diversi colori. Sull'asse verticale è riportata la potenza ricavata dal sensore mentre, sull'asse orizzontale, è riportata la posizione dell'asse Z in millimetri, che è stata ricavata a partire dalla corsa e dalla durata della registrazione. La velocità di passata per tutte le cave è di 1.4 m/min.

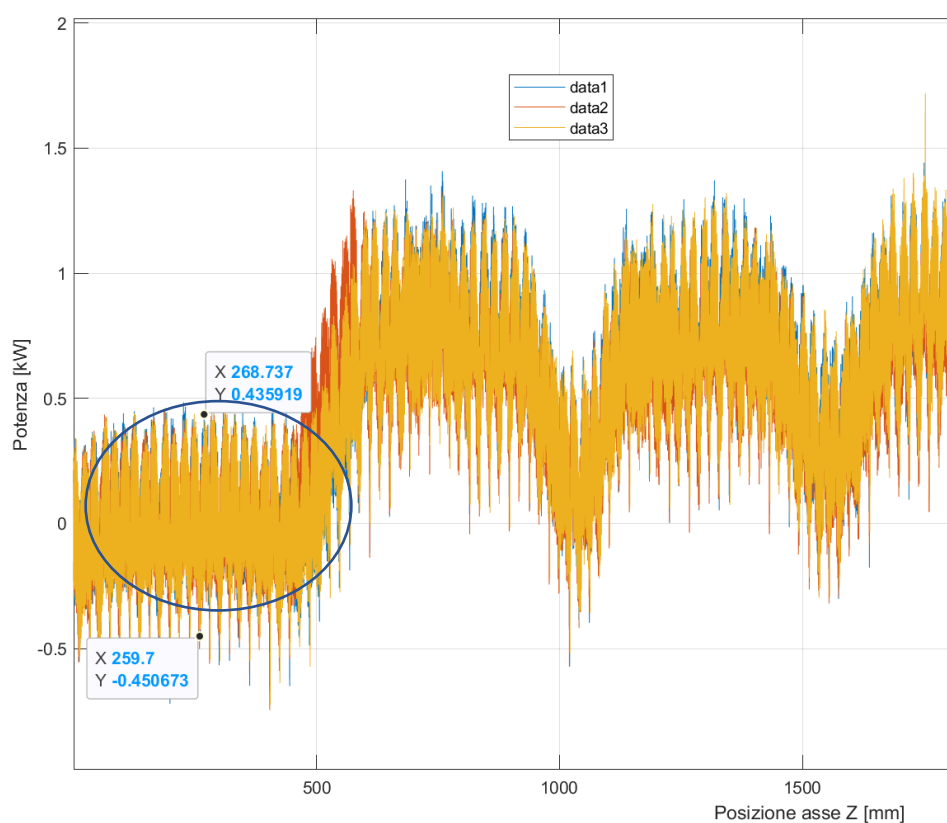
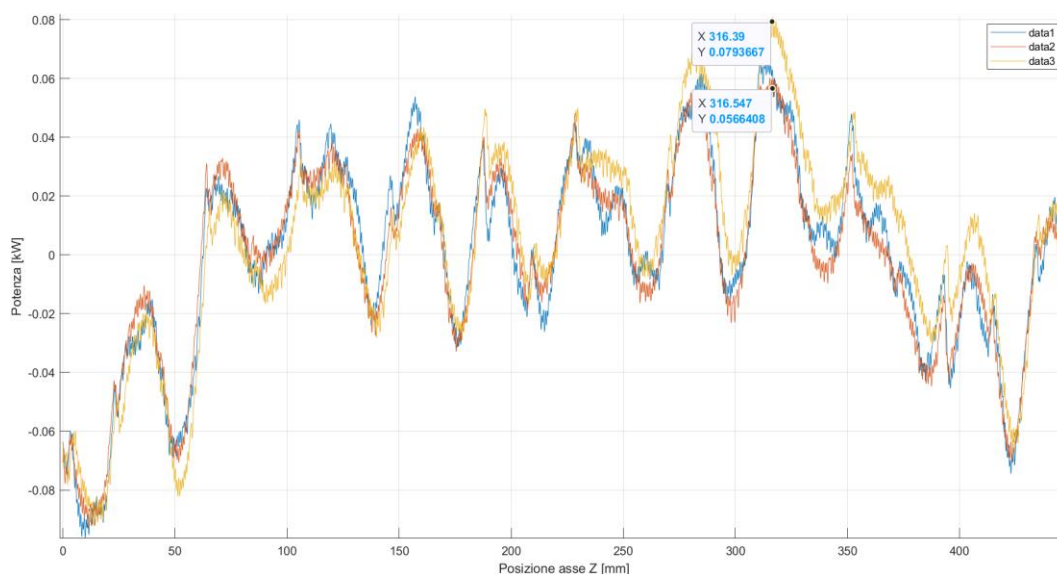


Figura 3.3.1.1 Grafico di dati di potenza rispetto pozione asse z della slitta

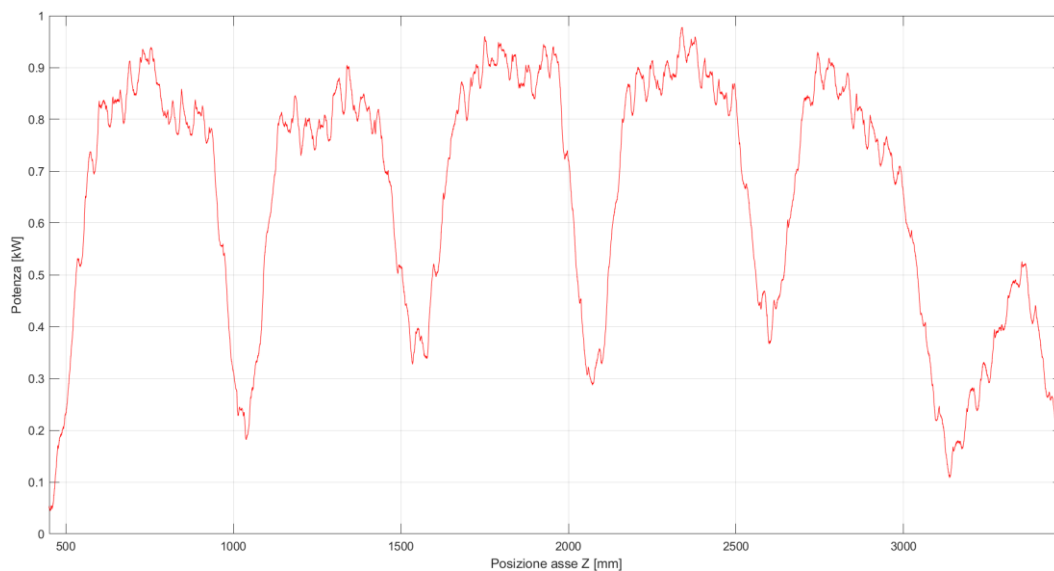
La parte cerchiata in figura, invece, rappresenta la banda di oscillazione a vuoto della potenza che, come si vede dal grafico, è di circa 0,9 kW. Filtrando i dati attraverso la media mobile, possiamo ricavare un grafico più lineare come si vede in figura 3.3.1.2.



*Figura 3.3.1.2 Ingrandimento banda oscillazione potenza a vuoto*

In quest'ultimo grafico si mostra un ingrandimento della zona cerchiata nella figura 3.3.1.1 dove, attraverso l'uso della media mobile, si può apprezzare maggiormente le differenti curve tra le diverse cave. In particolare, si nota che la variazione massima di potenza a vuoto tra una passata e l'altra è di circa 0.02 kW, lungo la posizione di circa 320 mm dell'asse Z.

Mentre, per quanto riguarda la potenza registrata durante la lavorazione di sgrossature di queste tre cave è dell'ordine di 0.9 kW (figura 3.3.1.3).



*Figura 3.3.1.3 Potenza di taglio registrata durante lavorazione*

Dal grafico si nota distintamente quando i denti della broccia sono in presa e che lavorano, il cui inizio coincide con la salita repentina del segnale di potenza fino ad arrivare a un picco di potenza, che si ripete per ogni settore di broccia.

In questo modo si è constatato che nella banda di oscillazione la potenza a vuoto è di circa 0.9 kW e presenta un ordine di grandezza uguale a quello della potenza di taglio. L'oscillazione dei valori di potenza, così limitati tra una cava e l'altra (circa 0.02 kW), come visto in precedenza nella figura 3.3.1.2, suggerisce che vi è una buona ripetibilità tra le cave permettendo, dunque, di poter confrontare i segnali di potenza l'uno con l'altro nelle prove a differenti velocità di passata.

Un punto critico è evidenziato dal fatto che, col passare del tempo si provoca un conseguente aumento dell'usura delle brocche e una diminuzione dell'efficacia del



liquido lubrificante, e ci si può imbattere in delle variazioni, sia nell'ampiezza di oscillazione sia nella potenza a vuoto, che nel suo valore medio.

### 3.3.2 Confronto potenza di cave a diversa velocità

Per quanto riguarda i dati di potenza elaborati e acquisiti tramite il sensore, essi possono essere confrontati con gli altri dati di potenza acquisiti a diverse velocità. Dapprima, si sono volute illustrate in grafico le diverse potenze a vuoto delle cave a velocità di passate differenti (figura 3.3.2.1). In particolare, abbiamo velocità di passata di 0.6 m/min curva blu più in basso, poiché velocità minore ne consegue potenza minore sia a vuoto che durante il taglio, velocità di 1.4 m/min, velocità di 2.0 m/min e infine velocità di 3.0 m/min con curva di colore viola.

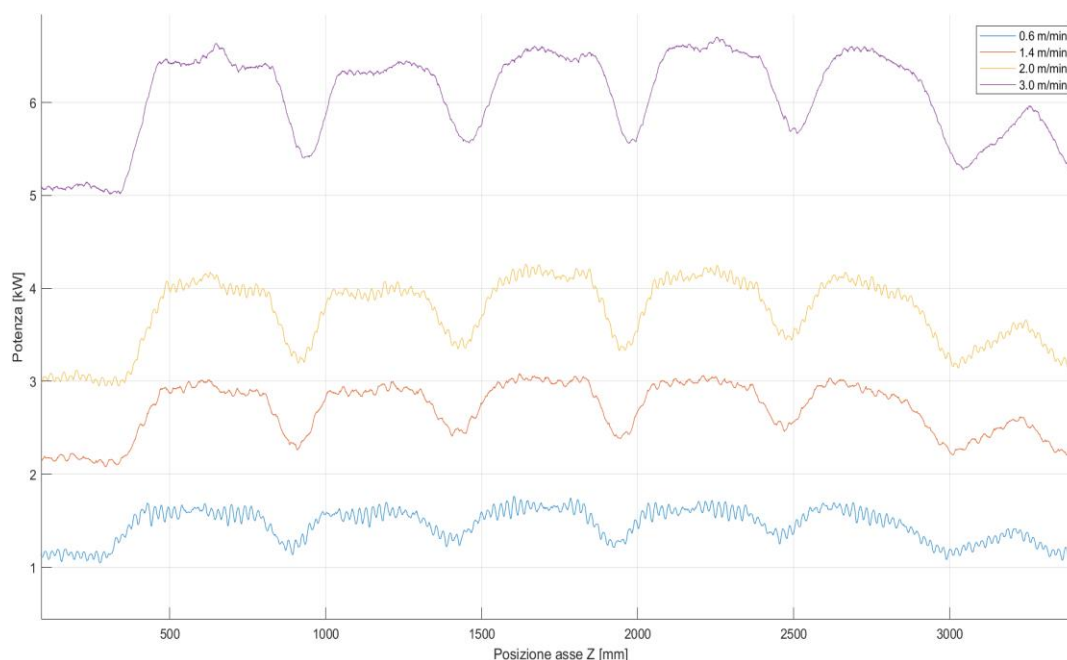


Figura 3.3.2.1 Grafico potenza a vuoto cave a diversa velocità

Mentre, in figura 3.3.2.2, troviamo il grafico di confronto di potenze durante la lavorazione delle cave alle diverse velocità.

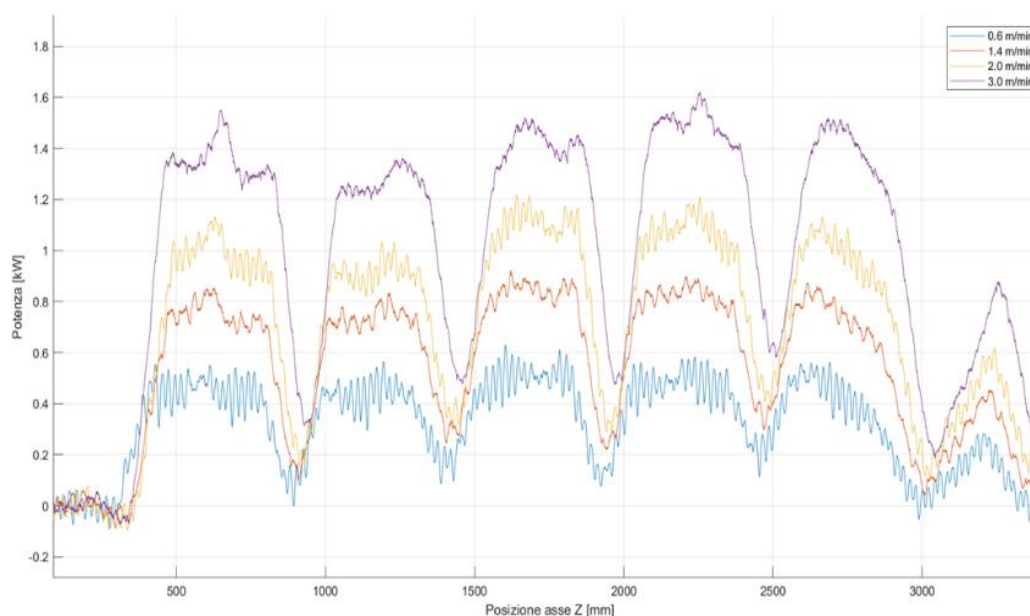


Figura 3.3.2.2 Grafico potenze durante taglio alle diverse velocità

Analizzando i due grafici, è possibile ricavare gli incrementi di potenza sia vuoto che durante la lavorazione rispetto alla lavorazione della cava a velocità più bassa di 0.6 m/min, come mostrato in tabella 3.3.2.1 e 3.3.2.2.

Velocità [m/min]	Potenza a vuoto media [kW]	Picco di potenza di taglio [kW]
0.6	1.1	0.63
1.4	2.2	0.92
2.0	3.0	1.22
3.0	5.1	1.62

Tabella 3.3.2.1 Tabella velocità, potenza a vuoto e potenze in lavorazione

Velocità [m/min]	Potenza a vuoto media [kW]	Picco di potenza di taglio [kW]	Incremento di velocità*	Incremento di potenza a vuoto*	Incremento picco di potenza*
0.6	1.1	0.63	-	-	-
1.4	2.2	0.92	+133%	+100%	+46%
2.0	3.0	1.22	+233%	+172%	+93%
3.0	5.1	1.62	+400%	+363%	+157%

Tabella 3.3.2.2 Tabella riassuntiva con valori velocità, e incrementi potenze rispetto a velocità più bassa

Come mostrato dalle tabelle precedenti, all'incremento di velocità corrisponde sia un incremento di potenza a vuoto che un incremento del picco di potenza durante la lavorazione. In particolare, l'incremento di velocità e l'incremento di potenza a vuoto hanno in valori percentuali circa gli stessi incrementi rispetto alla cava lavorata a velocità più bassa. Mentre, l'incremento del picco di potenza durante la lavorazione, rispetto all'incremento di velocità, è di circa la metà in valore percentuale.

Questi valori forniscono un database di potenze massime raggiungibili alle velocità di lavorazione tipiche, senza danneggiamenti o rotture. E, dunque, lasciano la possibilità che, al di sopra di questi incrementi, si possano settare i vari allarmi che permettano di arrestare la macchina in caso di imminente rottura.

### 3.3.3 Prova di scheggiatura

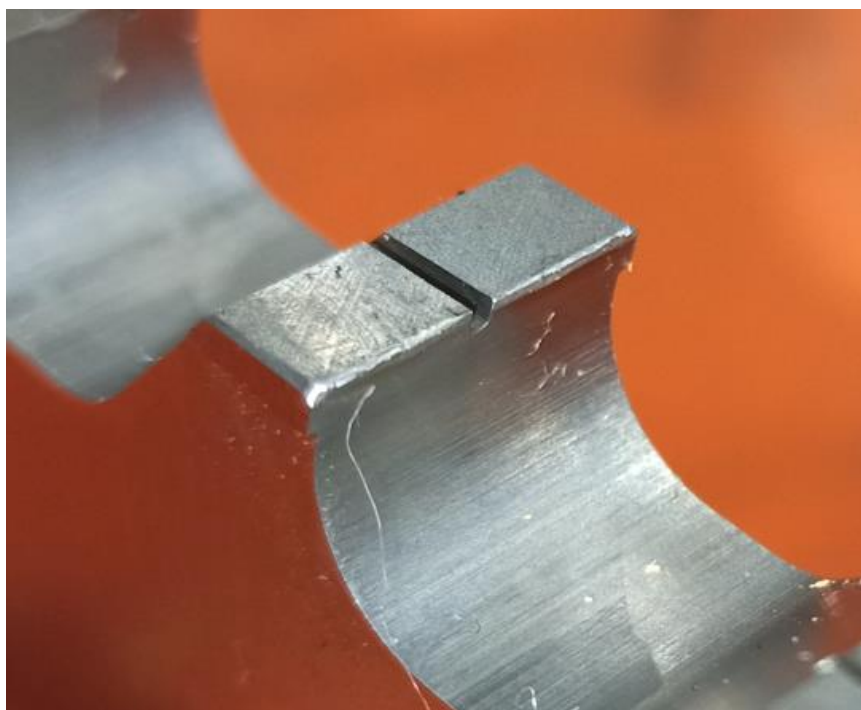
Si procede a illustrare le prove sperimentali effettuate in azienda per riuscire a individuare gli incrementi di potenza dati da una anomalia durante la lavorazione, ovvero della scheggiatura della broccia. Si è scelto di confrontare gli incrementi di potenza di tre cave: una cava dove non ci sia nessuna scheggiatura nella broccia, la cui lavorazione procede come progettato mentre, per le altre due cave, abbiamo una lavorazione con una broccia fornita di un dente scheggiato e una

broccia con due denti scheggiati. Il confronto è stato effettuato su passate alla stessa velocità di 2.0 m/min (tabella 3.3.3.1).

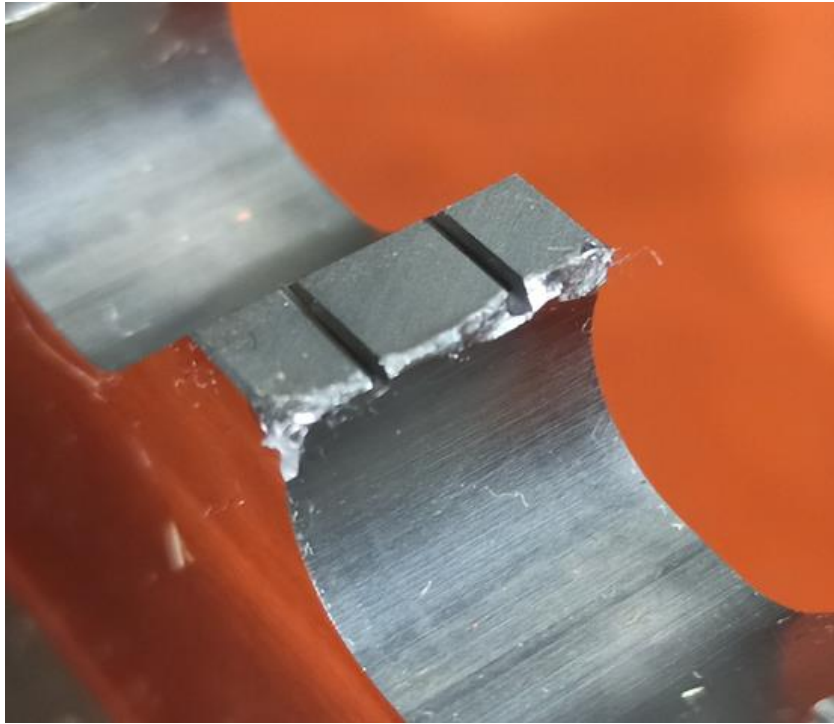
Numero Cava	Velocità [m/min]	Eventi
5	2.0	-
8	2.0	1 dente scheggiato
10	2.0	2 denti scheggiati

*Tabella 3.3.3.1 Tabella con caratteristiche delle cave*

In figura 3.3.3.1 e 3.3.3.2 vengono mostrate le due scheggiature delle brocche, la prima con un solo dente scheggiato, la seconda con due denti scheggiati in modo più evidente.



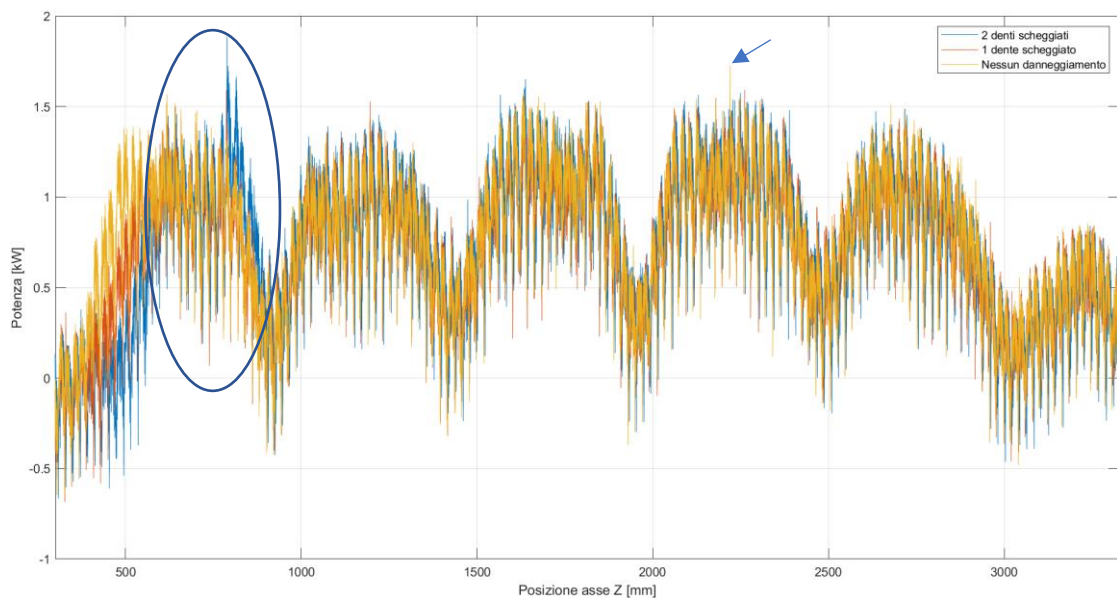
*Figura 3.3.3.1 Broccia con un dente scheggiato*



*Figura 3.3.3.2 Broccia con due denti scheggiati*

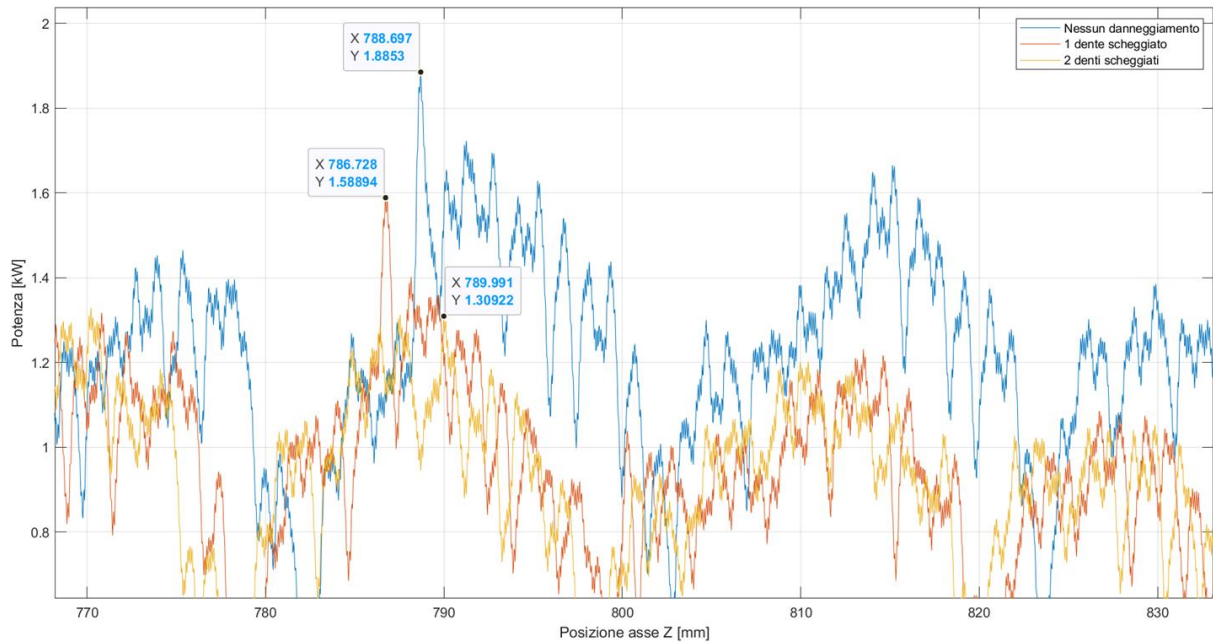
Confrontando le potenze generate da queste tre lavorazioni con queste differenti condizioni e ponendole in grafico con l'utilizzo del software Python, si nota come ci sia uno sfasamento iniziale di potenza dovuto dalla scheggiatura dei denti che non sono più in presa sul materiale. Mentre, come si vede in figura 3.3.3.3, dopo i 500 millimetri di posizione dell'asse Z abbiamo un riallineamento dei segnali, poco dopo nella parte evidenziata e cerchiata si nota il picco di potenza dovuto alla scheggiatura della broccia. I valori di potenza locale rilevati nei pressi della broccia con denti scheggiati sono di 1.58894 kW per la broccia con un dente scheggiato e 1.8853 kW per la broccia con due denti scheggiati. Mentre nella broccia senza danneggiamenti il valore di potenza locale è di 1.3092 kW.

Tutto ciò, si traduce in un incremento locale di potenza rispetto alla cava lavorata senza danneggiamento della broccia, cava numero 5, di +21% per la lavorazione della cava con broccia avente un dente scheggiato, cava numero 8, e del +44% per la lavorazione della cava numero 10 avente broccia con due denti scheggiati. In figura 3.3.3.4 sono mostrati i valori di potenza citati, con un ingrandimento nella zona di interesse.



*Figura 3.3.3.3 Grafico confronto potenze prova di scheggiatura*

Con la freccetta in figura 3.3.3.3 si evidenzia un picco aleatorio, che trasporta un'informazione di incertezza del segnale. Questo tipo di segnale può variare nel tempo e presenta una componente di casualità che rende difficile prevederne l'andamento esatto. Pertanto, viene trascurato in quanto non rilevante ai fini della trattazione.[13]



*Figura 3.3.3.4 ingrandimento con incremento di potenza locale*

Da questa prima prova si rende possibile settare un primo allarme sul software di monitoraggio del processo di lavorazione. In particolare, durante la lavorazione, se si supera un incremento locale di potenza maggiore del 50%, il sistema di monitoraggio fa accendere la lampadina di colore giallo che, una volta visualizzata dall'operatore, gli permette di decidere tra l'arresto della macchina o di verificare sia un allarme senza nessuna conseguenza di rottura, o che permette al tecnico di segnalare, l'incremento per poi effettuare un'ispezione alle brocche e al disco in lavorazione.

### 3.3.4 Prova di rottura

La prova più importante per settare i limiti di potenza è rappresentata dalla prova di rottura effettuata sul disco provino, poiché in questa prova è possibile settare l'allarme che, una volta arrivato il segnale al software di monitoraggio, provoca l'arresto della macchina.

La prima rottura verificatasi, come mostrato in tabella 3.2.2.1, durante la lavorazione nella cava numero 7, presenta una velocità di passata di 4 m/min, ed è avvenuta senza allarme da parte del sistema. La macchina è stata arrestata tramite l'intervento dell'operatore, con una quantità di materiale erroneamente rimosso e che ha portato alla rottura, con *in feed* di 8 millimetri.

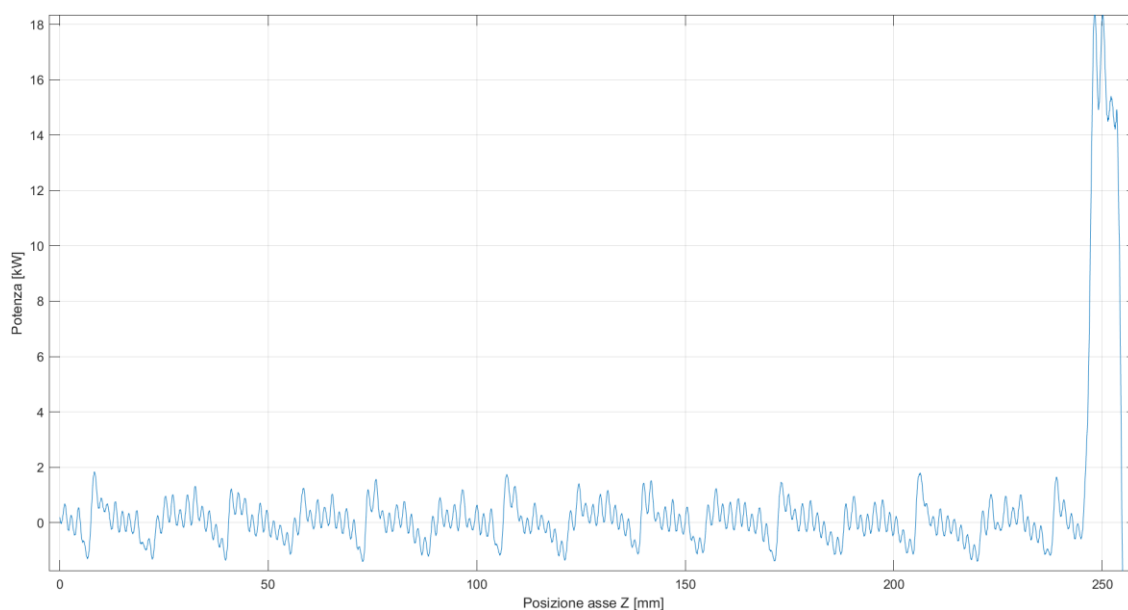


Figura 3.3.4.1 Grafico potenza prima rottura

Dalla figura 3.3.4.1 è evidente che la rottura sia avvenuta lungo circa 240 millimetri rispetto la posizione dell'asse Z. Proprio in questa posizione dell'asse orizzontale si vede un aumento di potenza spropositato rispetto alla lavorazione, il cui picco intorno ai 18 kW. E con un incremento di potenza di oltre l'800%, considerando che la potenza media durante la lavorazione era di circa 1.5kW

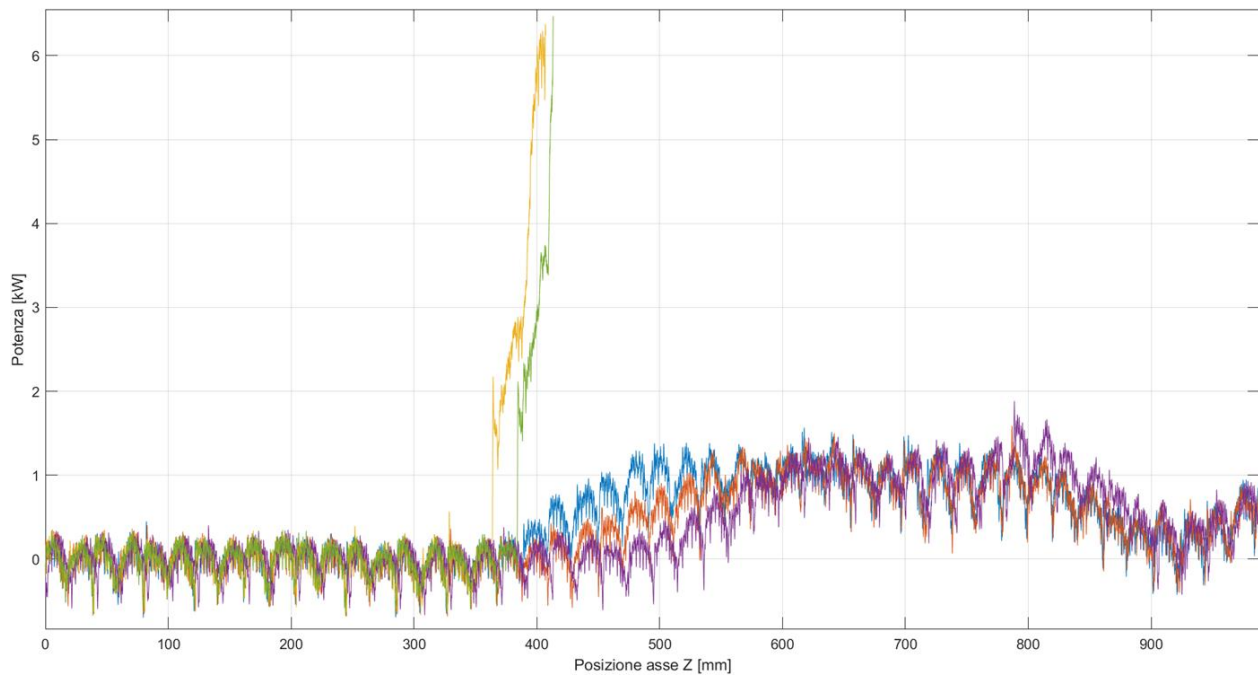




Figura 3.3.4.2 Materiale asportato a causa della rottura

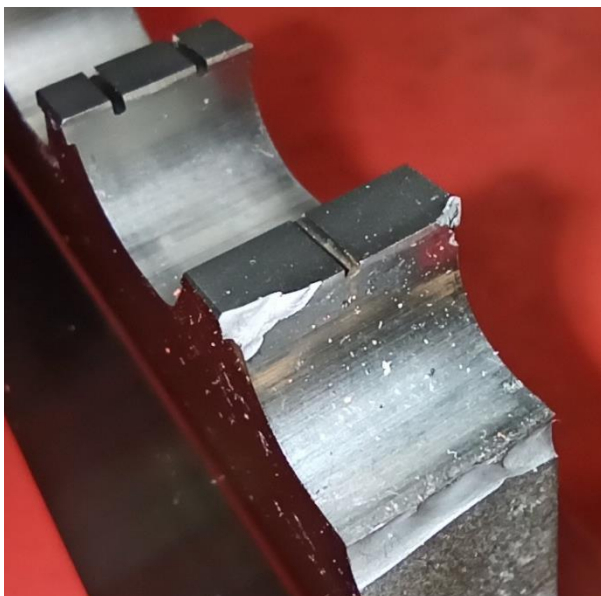
Mentre, nel grafico in figura 3.3.4.3, si riporta l'andamento delle potenze durante la rottura, avvenuta durante la lavorazione delle cave numero 9 e numero 11 con una velocità di passata di 2 m/min.

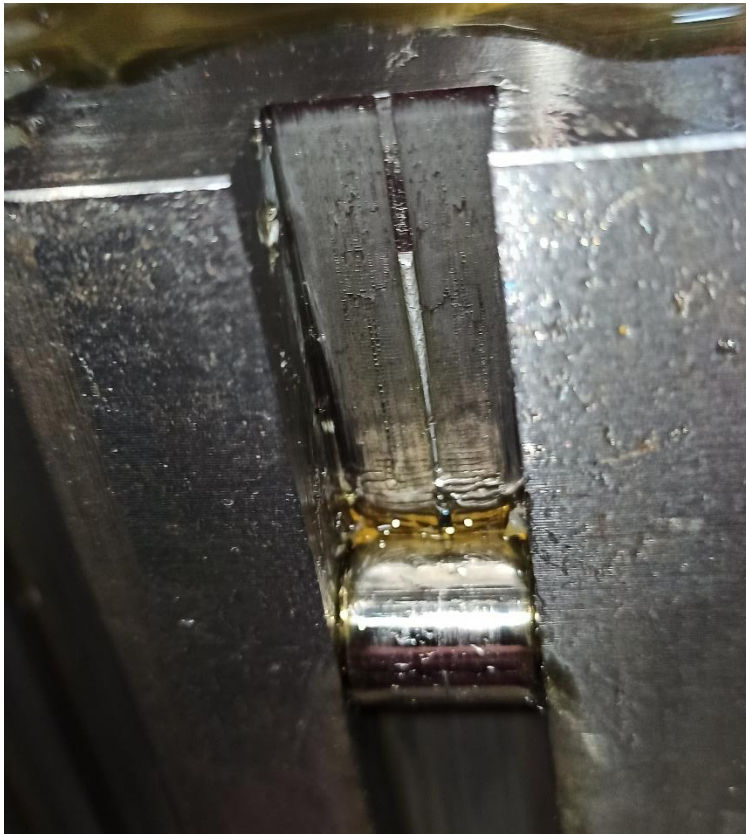
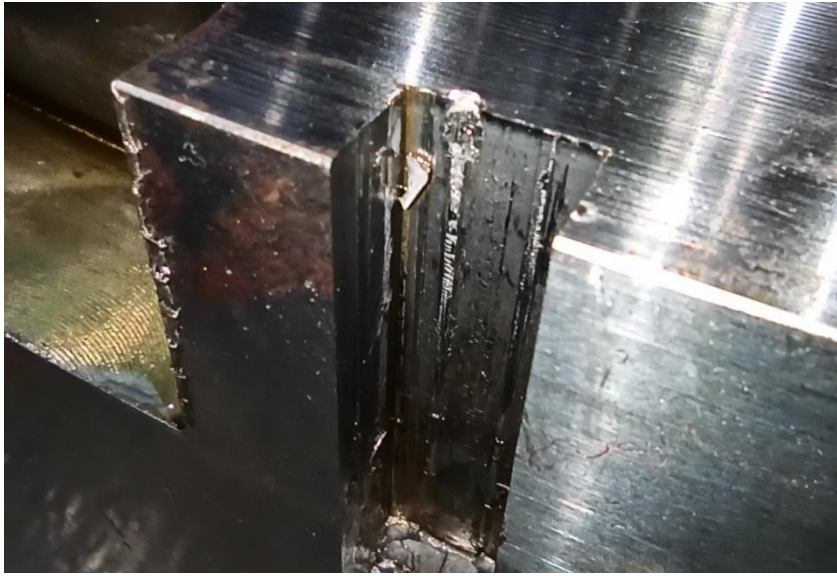
In questo caso, la lavorazione è stata interrotta dal sistema di monitoraggio: con l'intervento del sistema questa volta con *in feed* di soli 1.2 mm. Quindi, anche se la prova è stata effettuata a velocità minore, il sistema stato più efficace. La rottura verificatasi durante la lavorazione delle due cave avviene all'incirca allo stesso valore di potenza di circa 6.5 kW. Con una potenza massima di lavorazione di circa 1.8 kW, si ha un incremento di potenza di circa il 250% rispetto alla potenza massima. Quindi, è possibile settare il limite di allarme rispetto alla rottura e far sì che la macchina si arresti.



*Figura 3.3.4.3 Grafico potenza con rotture della broccia per cava 9 e 11*

Nelle foto seguenti si mostrano le rotture dei denti delle brocche e del materiale asportato.





### 3.4 Analisi sui dati di accelerazione

La trattazione dei capitoli precedenti si basava solo sulla capacità del sensore di potenza di raccogliere i dati. In questo capitolo, si dovranno ripetere le stesse prove, per verificare se anche il sensore di vibrazione possa essere utilizzato per il confronto tra i dati di lavorazione a velocità diverse e per il settaggio dei limiti di vibrazione prima di arrivare a rottura.

Anche per questa parte della trattazione, si rimanda alla tabella 3.2.2.1, dove si analizzerà, come fatto per i dati sulla potenza, prima le tre cave a stessa velocità di passata (1.4 m/min). Si verificherà l'ordine di grandezza della banda di oscillazione di accelerazione a vuoto e, tramite pulizia dei dati con media mobile, si metterà in grafico l'andamento dell'accelerazione delle tre cave. Dopo aver evidenziato la variazione massima tra una passata e l'altra, si verificherà se la ripetibilità sia buona, che poi permetterà di confrontare cave e passate a velocità diverse.

#### 3.4.1 Confronto accelerazione di cave con stessa velocità

Nella figura 3.4.1.1 si trova il grafico con l'accelerazione in [g] sull'asse delle ordinate e, come prima, la posizione dell'asse Z sulle ascisse. Si nota come la banda di oscillazione a vuoto sia di circa 0.09 g. Filtrando i dati in media mobile e, ingrandendo nella zona di 0-500 mm dell'asse di posizione Z (zona cerchiata nella figura 3.4.1.1 e ripresa in figura 3.4.1.2 si può notare come la variazione massima di accelerazione a vuoto tra una passata e l'altra sia di circa 0.02 g.

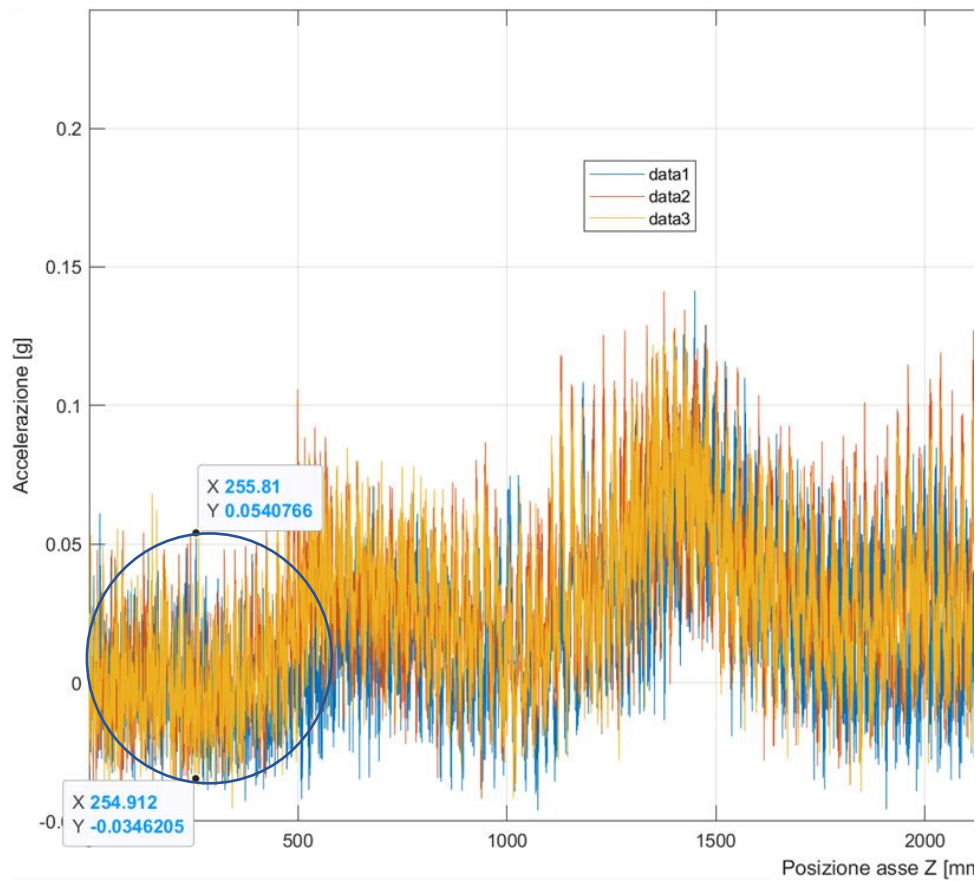


Figura 3.4.1 Dati di accelerazione registrati su cave disco provino

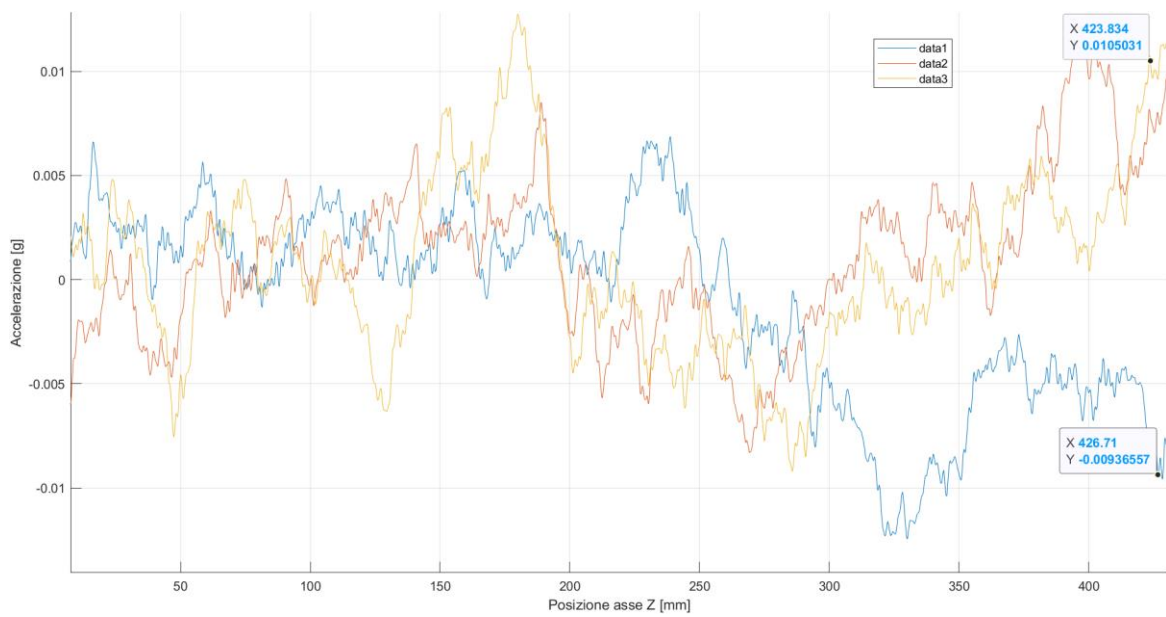
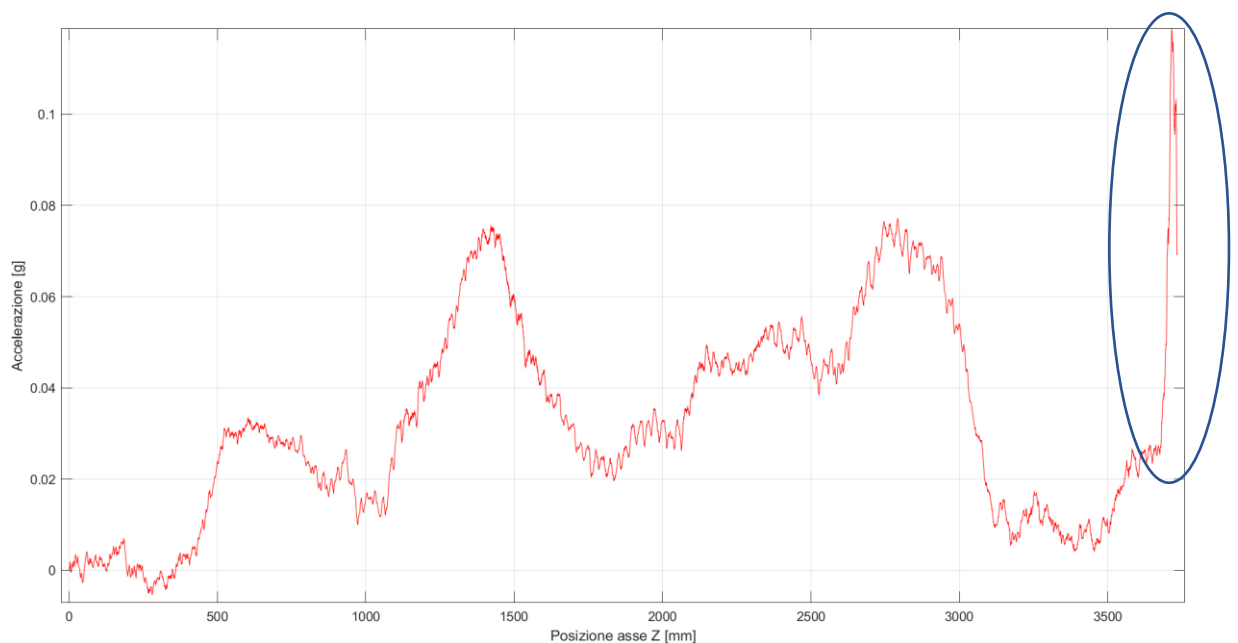


Figura 3.4.1.2 Ingrandimento grafico precedente zona iniziale filtrata da media mobile

Mentre, in figura 3.4.1.3 troviamo il grafico di accelerazione durante la lavorazione, nella fase di sgrossatura. L'accelerazione in questa fase della lavorazione è nel range di circa 0.03 g e 0.08g. Inoltre, nella zona cerchiata, si nota un picco di accelerazione dovuto all'arresto della slitta.



*Figura 3.4.1.3 Grafico accelerazione durante lavorazione cave disco provino*

Dai grafici ottenuti dai dati rilevati dal sensore di vibrazione si può concludere come la banda di oscillazione dell'accelerazione a vuoto presenti un ordine di grandezza uguale a quello dell'accelerazioni durante la fase di lavorazione, cioè di circa 0.9g per la banda di oscillazione e nel range di 0.3g-0.8g durante la lavorazione. Inoltre, la ripetibilità tra una cava e l'altra non è trascurabile, essendo dello stesso ordine di grandezza della lavorazione stessa, rendendo problematica l'individuazione dei limiti di accelerazione precisi anche tra cave lavorate a diverse velocità.

Un punto critico è rappresentato dal picco di accelerazione raffigurato in figura 3.4.1.3, che si verifica quando la slitta è a fine corsa. Questo picco, come detto, è dovuto all'intervento dei freni sulla slitta sull'asse. Tutto ciò può causare dei falsi allarmi e, se settati dei limiti di vibrazione, si potrebbe bloccare la macchina anche senza il verificarsi di nessuna anomalia durante la lavorazione.

Visti i risultati non soddisfacenti per quanto riguarda l'acquisizione dei dati da parte del sensore di vibrazione, nei capitoli seguenti si cercherà di indagare la reale capacità del sensore di individuare anomalie in termini di vibrazioni anomale.

## Capitolo 4: Analisi delle vibrazioni

In questo capitolo, si cercheranno di risolvere i problemi legati ai dati raccolti e processati dal sensore di vibrazione che, nel capitolo precedente, diversamente da quanto ottenuto con il sensore di potenza, non erano stati di alcuna utilità. Anzi, l'unico dato utile ricavato dall'analisi fatta precedentemente sul sensore di vibrazione è stata che esso, in quella posizione specifica lungo la slitta come raffigurato in figura 3.1.2.1, non riesca a catturare dei dati della lavorazione che possano risultare sostanziali per un'analisi completa e con l'obiettivo finale di poter settare dei limiti di allarme, che nel caso più estremo possa intervenire a fermare la brocciatrice durante la lavorazione, per limitare i danni e prevenire degli errori di finitura del disco lavorato.

Questa analisi, si rende ancor più necessaria, poiché, in concomitanza, con il lavoro svolto, l'azienda ha cominciato una lavorazione di un *part number* dischi molto costosi, con delle specifiche da rispettare molto stringenti. Quindi, l'obiettivo è di riuscire a ricavare dei dati interessanti anche per il sensore di vibrazione il che sarebbe molto importante al fine di prevenire rotture o errori di finitura superficiale su questi nuovi dischi. Dapprima, si esporranno le prove effettuate su un provino, i cui dati di accelerazione saranno analizzati tramite elaborazione di codice in Python, per fornire l'accelerazione non più nel dominio del tempo ma nel dominio delle frequenze.



## 4.1 Risposta accelerazione in frequenza

Nel capitolo precedente si era svolta un'analisi nel tempo per quanto riguarda i dati di potenza e di accelerazione, che risultava abbastanza idonea per trattare i dati relativi alla potenza, mentre per un'analisi delle vibrazioni è preferibile un'analisi in frequenza. I motivi che supportano questa analisi sono molteplici: il primo è che i segnali catturati nel dominio del tempo mostrano come le vibrazioni varino nel tempo, ma non forniscono informazioni sulle frequenze specifiche che compongono il segnale della lavorazione [16]. Mentre, nel dominio delle frequenze si possono utilizzare strumenti come la trasformata di Fourier, utilizzata anche nella scrittura del codice Python attraverso un algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) per questa analisi, dove è possibile identificare facilmente le frequenze dominanti. Tutto ciò risulta utile per riconoscere vibrazioni dovute a componenti specifici della lavorazione del disco.

Un altro motivo fondamentale per cui si è scelta questa analisi riguarda la diagnosi di guasti. Nel dominio del tempo prevedere dei segnali che porteranno a dei guasti durante la lavorazione è molto complicato, poiché i segnali assumono una forma caotica si sovrappongono e sono di difficile interpretazione, come abbiamo visto in figura 3.4.1. Mentre, nel dominio delle frequenze, è possibile riconoscere firme spettrali che identificano dei guasti o delle rotture. Inoltre, nel dominio delle frequenze è possibile filtrare delle frequenze per ridurre il rumore e isolare le componenti di interesse [17].

#### 4.1.1 Confronto accelerazione con passate a vuoto

Per prima cosa, si sono voluti confrontare i dati di accelerazione di una cava, ottenuta nelle lavorazioni precedenti, ricavando i dati dal software di monitoraggio installato sulla brocciatrice. Questi dati, tramite codice in Python che utilizza lo strumento di FFT, si sono trasformati in segnali nel tempo nel dominio delle frequenze. Per cercare di ridurre i dati di accelerazione che non interessino la lavorazione, sono stati sottratti i valori di accelerazioni a vuoto e confrontati (figura 4.1.1.1).

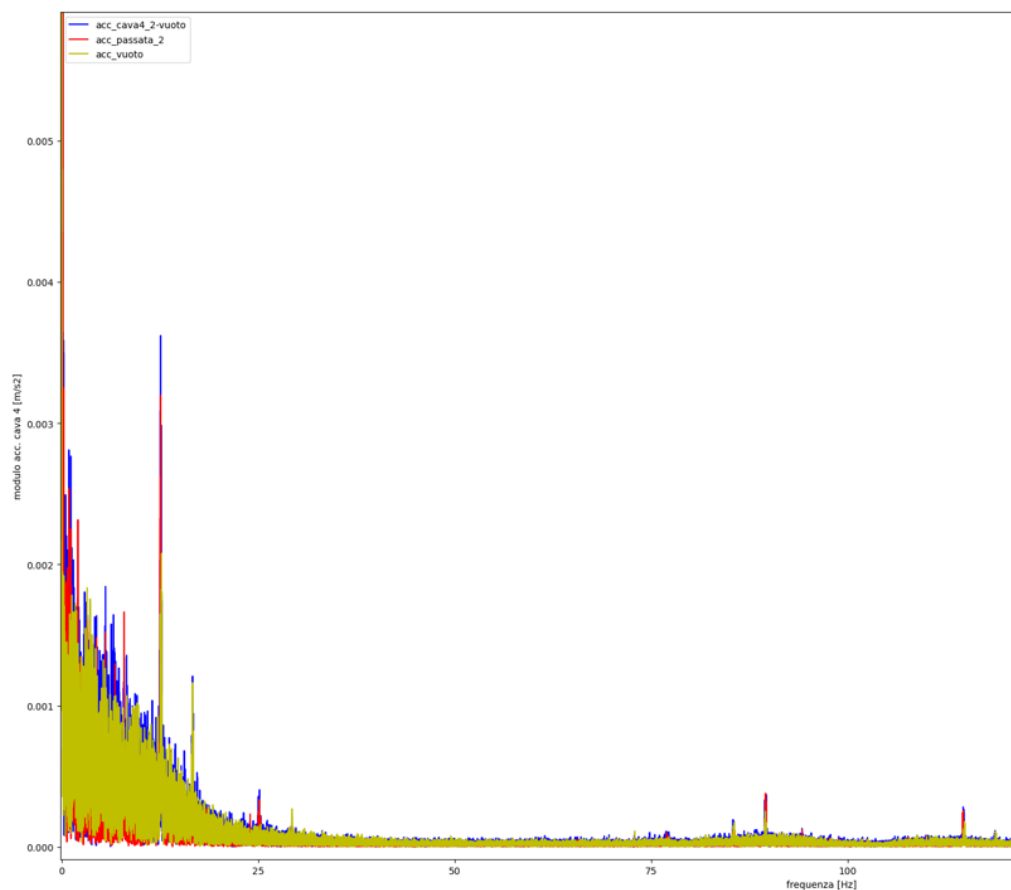
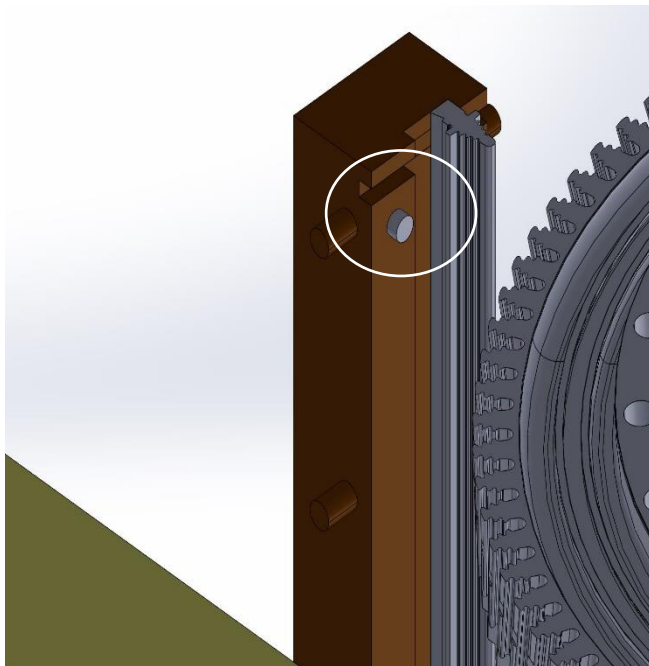


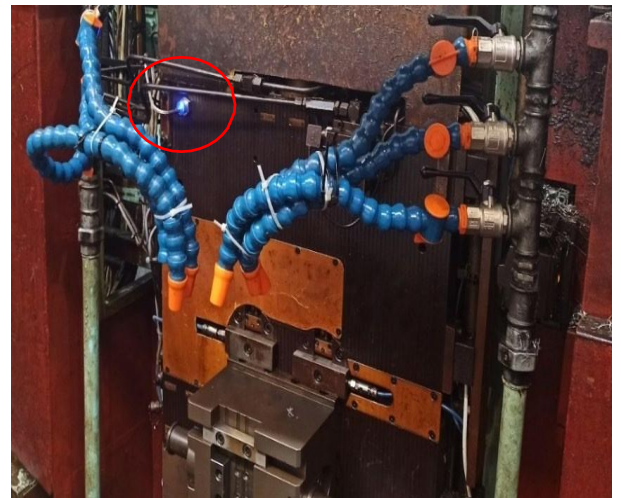
Figura 4.1.1.1 Confronto accelerazione a vuoto dominio delle frequenze

Come si vede dal grafico è possibile notare dei picchi di accelerazioni nelle frequenze di taglio che sono però poco distinguibili e sovrapposti, a causa del molto rumore nella zona di interesse, rendendo impossibile una correlazione tra danneggiamento e segnali acquisiti.

Il problema principale per cui i dati di accelerazione anche nel dominio della frequenza risultano contaminati dal rumore, è stato identificato dal fatto che il sensore di vibrazione posizionato sulla slitta viene influenzato, nella cattura dei dati, dal movimento della slitta (figure 4.1.1.2 e 4.1.1.3). Quindi, sono state effettuate delle prove spostando in diverse zone il sensore di vibrazione.



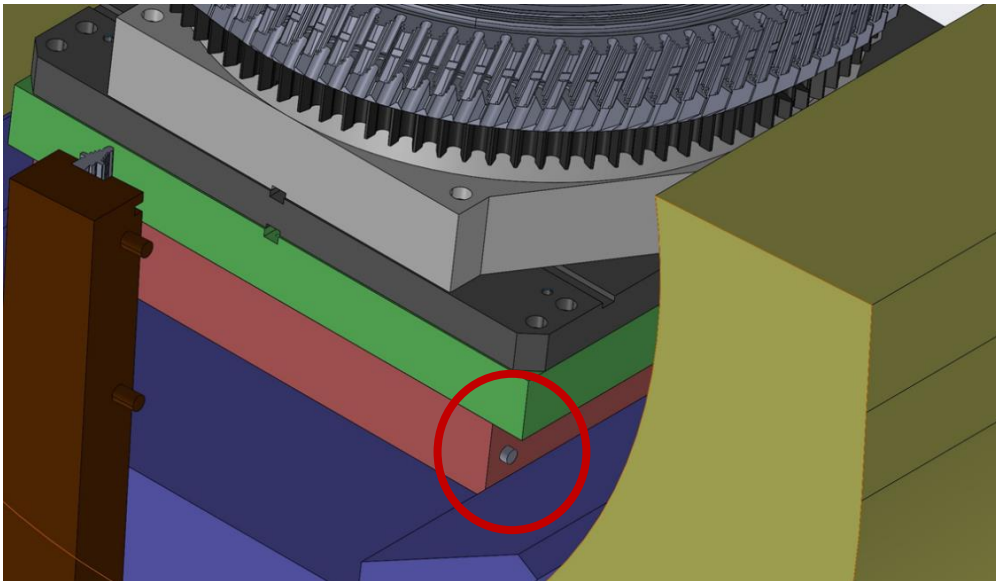
*Figura 4.1.1.2 Posizione sensore slitta con CAD*



*Figura 4.1.1.3 Posizione sensore su slitta*

## 4.2 Nuova posizione del sensore

Per spostare il sensore in una nuova posizione, si è considerato il fatto che non si potesse spostare troppo lontano rispetto alla cabina di ricezione dati poiché il cavo che porta i dati possiede una lunghezza limitata. Come prima prova di posizione, si è scelto di disporre il sensore sulla tavola dell'asse y della macchina. Così facendo, è possibile ottenere dei dati di accelerazione non più influenzati dai movimenti della slitta dalle accelerazioni e decelerazioni dei freni sulla slitta sull'asse Z, ma solo dati riguardanti la lavorazione della cava. Inoltre, si è cercato di posizionare il sensore in modo tale che fosse il più possibile riparato dagli schizzi dell'olio lubrificante. Come si vede in figura 4.2.1, con la rappresentazione CAD 3D, e in foto nella 4.2.2.



*Figura 4.2.1 Rappresentazione nuova posizione sensore di vibrazione*



*Figura 4.2.2 nuova posizione sensore vibrazione*

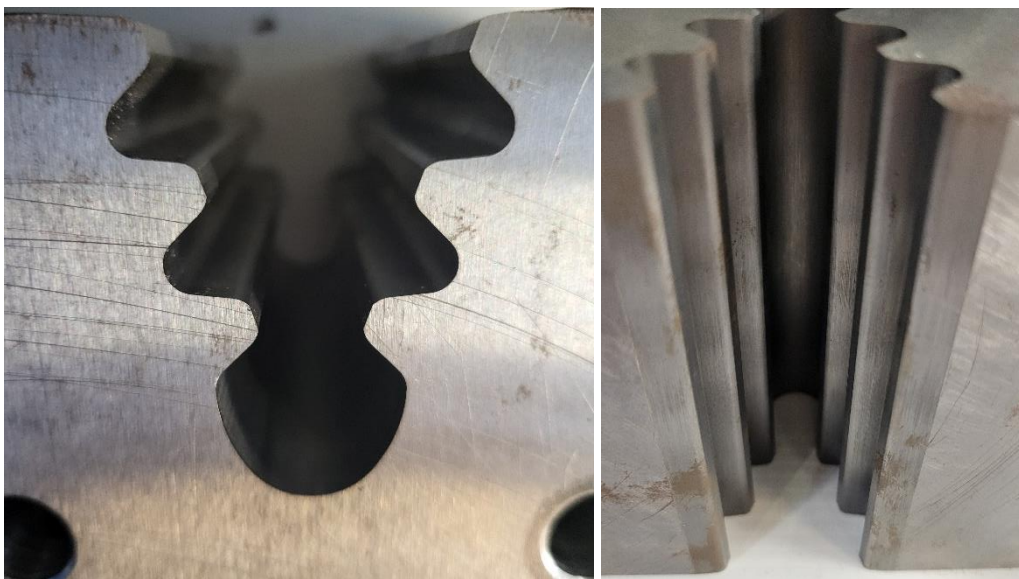
#### 4.2.1 Prove su provino

Le prime prove della nuova posizione del sensore sono state effettuate su un provino, in cui si è ottenuta un'unica cava con la forma finale. Tale forma dovrà essere lavorata anche sui nuovi dischi da brocciare. In particolare, la cava per avere la forma finale necessita di dieci passate.

I provini utilizzati sono di tre tipi uno senza calibratore e uno col calibratore, tutti e due di materiale diverso da quello effettivo del disco da lavorare successivamente. Il terzo tipo è un provino dello stesso materiale finale di cui

saranno costituiti dischi da lavorare successivamente, ma con uno spessore pari a circa un terzo rispetto a quello effettivo del disco.

In questa trattazione, si tiene presente solo l'ultimo provino (figura 4.2.1.1) che, essendo dello stesso materiale dei dischi da lavorare, ci fornisce informazioni sui dati di accelerazione più dettagliate. Anche se lo spessore non coincide con lo spessore effettivo del disco.

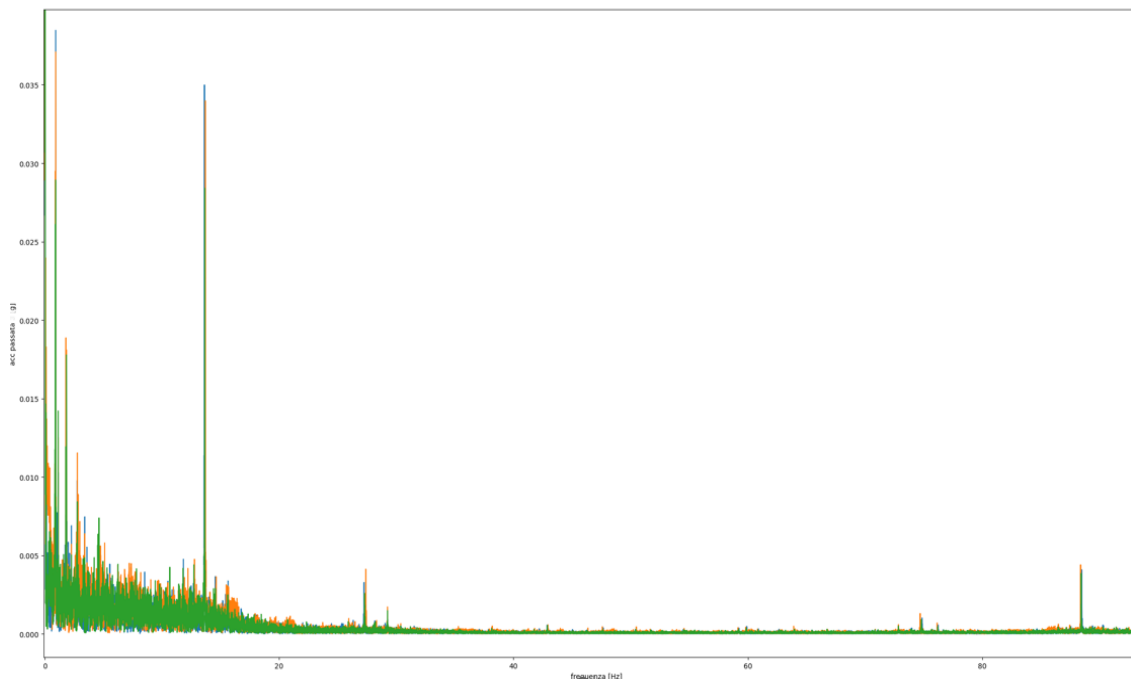


*Figura 4.2.1.1 Provino con sagoma cava finale*

Per il plottaggio del grafico in figura 4.2.1.2, si sono prese in considerazione le prime tre passate effettuate sul provino. Rispetto al grafico in figura 4.1.1.1, si nota come ci sia molto meno rumore, ottenuto grazie allo spostamento del sensore di vibrazione.

Nel grafico si sono confrontate le tre passate corrisponde a tre colori diversi. Si nota come, rispetto alla trattazione precedente i dati di vibrazione presentano dei picchi all'incirca le stesse frequenze ciò si fa dire che i dati sono sovrapponibili. Tuttavia, rimane ancora abbastanza rumore alle frequenze di taglio, attribuibile in

parte al fatto che, essendo il provino di spessore minore di quello poi effettivo, risente di molte più vibrazioni considerando che non essendo un disco, non è avvolto circolarmente da altro materiale questo fa sì che le vibrazioni non disperdano energia nel materiale circostante e si rivelino molto più elevate.



*Figura 4.2.1.2 Grafico vibrazioni in frequenza del provino*

### 4.3 Eliminazione del rumore

Dal punto di vista della circuiteria impiegata nella strumentazione non v'è differenza tra segnale e rumore: entrambi rappresentano variazioni di voltaggio o di intensità di corrente. La differenza può eventualmente, essere percepibile dalla diversa distribuzione di frequenza che caratterizza un segnale rispetto al rumore, che può essere ottenuta passando dal dominio del tempo a quello delle frequenze. Se si considera un'onda sinusoidale pura, ad esempio, un potenziale alternato di frequenza  $f_0$  la sua rappresentazione tipica quella nel dominio del tempo rappresentata in figura 4.3.1[17].

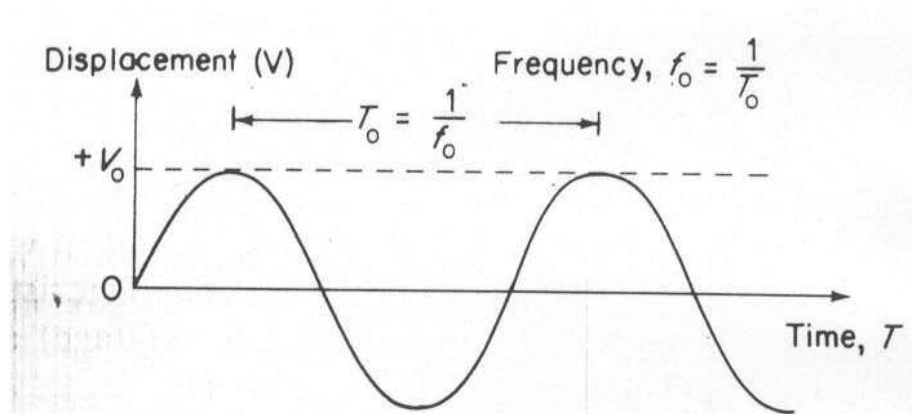


Figura 4.3.1 Tipico segnale sinusoidale nel tempo

Allo stesso tempo, la stessa informazione può essere racchiusa in un grafico in dominio delle frequenze dove il segmento posizionato al valore di frequenza  $F$  e un picco di altezza pari all'ampiezza dell'onda  $V_0$ . (figura 4.3.2)



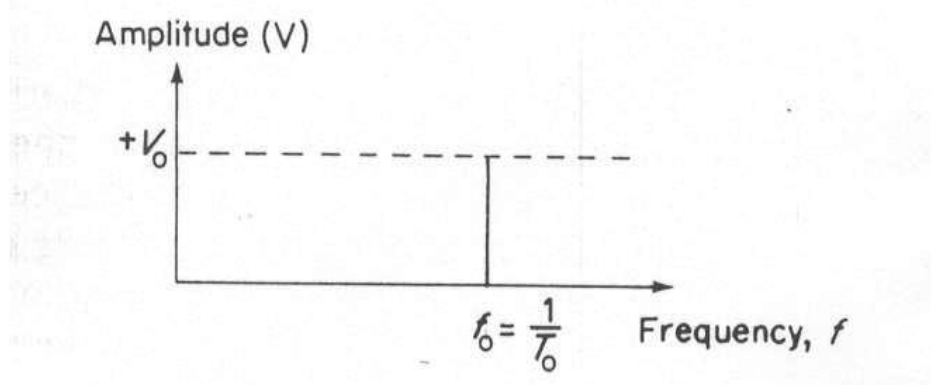


Figura 4.3.2 Segnale sinusoidale nel dominio delle frequenze

Tipicamente in un segnale, dal punto di vista del dominio delle frequenze, l'onda risultante finale sarà rappresentata da più componenti. Si dice in questo caso che  $f_0$  è la frequenza fondamentale, mentre le altre, ossia le frequenze multiple di  $f_0$ , sono le armoniche.

La rappresentazione dell'onda risultante nel dominio delle frequenze può essere ottenuta effettuando la trasformata di Fourier della rappresentazione nel dominio del tempo. Mentre, quest'ultima può essere ottenuta effettuata l'anti trasformata di Fourier della funzione nel dominio delle frequenze [18].

Il confronto fra quello che può essere tipicamente definito un segnale, vale a dire una variazione di voltaggio nel tempo avendo una certa regolarità, ed un rumore, che può essere definito come una variazione random di voltaggio (figura 4.3.3 e 4.3.4), porta chiaramente a distinguere che il  $\Delta t$  caratteristico del rumore è molto più piccolo, il che implica che la larghezza di banda di frequenza associata al rumore sia certamente più elevata.

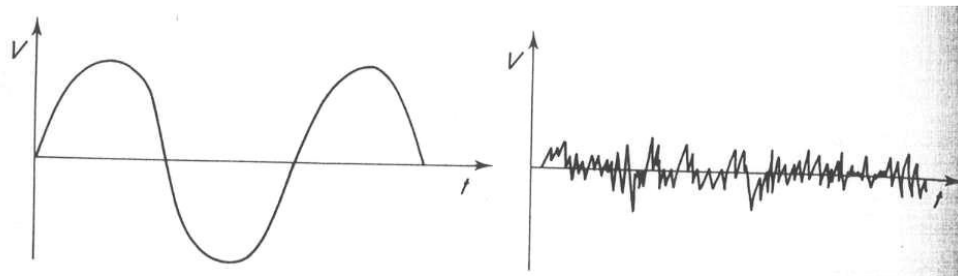


Figura 4.3.3 Raffigurazione segnale puro con segnale con rumore a destra

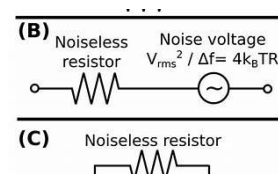


Figura 4.3.4 Segnale con rumore  $\Delta t$  molto piccolo

### 4.3.1 Tipi di rumore

#### 1. Rumore Termico

Il rumore termico, noto anche come rumore Johnson, è un tipo di rumore elettronico generato dall'agitazione termica dei portatori di carica, principalmente gli elettroni all'interno dei conduttori in equilibrio termico. Questo rumore è indipendente dalla tensione applicata e si presenta in tutti i circuiti elettrici. Nei dispositivi elettronici sensibili, come i ricevitori radio, il rumore termico può produrre un segnale debole. La sua intensità cresce con la temperatura assoluta [19].



La tensione associata al rumore Johnson-Nyquist è data dalla seguente espressione:

$$V_{JN} = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

Dove:

- (k) è la costante di Boltzmann.
- (T) è la temperatura (in Kelvin) del componente circuitale.
- (R) rappresenta la resistenza associata al circuito elettrico.
- ( $\Delta f$ ) è la larghezza di banda (espressa in Hz) su cui il rumore viene misurato.

Questo rumore deriva dai moti termici degli elettroni (o di altri portatori di carica) nei vari componenti dei circuiti strumentali, come resistenze e condensatori, o in dispositivi come rivelatori di radiazione e celle elettrochimiche [19].

## **2. Rumore dovuto all'effetto granulare (Shot noise)**

Il rumore shot, noto anche come rumore granulare, rumore Schottky o rumore impulsivo, è un tipo di rumore che può essere modellato come un Processo di Poisson. In elettronica, il rumore shot deriva dalla natura discreta delle cariche elettriche. Si manifesta anche nel conteggio dei fotoni nei dispositivi ottici, dove è associato alla natura corpuscolare della luce [20].

La corrente associata al rumore shot è espressa dalla seguente formula:

$$I_{shot} = \sqrt{2eI}$$

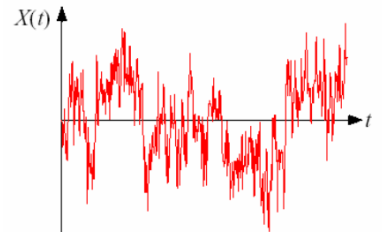
Dove:

- $e$  è la carica dell'elettrone ( $1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb).
- $I$  rappresenta l'intensità di corrente media che scorre nel circuito.

Questo rumore è distribuito su un ampio intervallo di frequenze ed è considerato un rumore bianco fino a frequenze dell'ordine dell'inverso del tempo di transito degli elettroni nel conduttore.

### 3. Rumore di sfarfallamento (flicker noise)

Il rumore rosa, noto anche come rumore  $1/f$  o rumore flicker, è un particolare tipo di rumore caratterizzato dalla sua ampiezza inversamente proporzionale alla frequenza. A differenza del rumore bianco, in cui la potenza è uguale per tutte le frequenze, il rumore rosa ha una distribuzione spettrale di potenza che diminuisce all'aumentare della frequenza [17].



### 4. Rumori ambientali

Sotto questa voce, sono inclusi i rumori che hanno origine nell'ambiente circostante la strumentazione, ossia nello stesso laboratorio o anche nell'edificio, e officina. Ad esempio, i conduttori presenti nello strumento possono comportarsi come antenne in grado di captare radiazione elettromagnetica e trasformarla in un segnale elettrico.

Un esempio tipico di rumore ambientale è una tensione alternata con la stessa frequenza della rete elettrica (50 Hz in Italia). Altre possibili fonti di rumore ambientale includono:

- Stazioni radio/TV
- Ripetitori delle reti di telefonia mobile
- Improvvisi impulsi elettrici, come quelli dovuti all'accensione di una cappa aspirante o del motore di un ascensore

Per strumenti particolarmente sensibili, perfino la scarica di un fulmine a distanza relativamente breve dall'edificio in cui si trova il laboratorio

Nel caso di strumentazione sensibile alle vibrazioni (ad esempio i microscopi a effetto tunnel, STM, o a forza atomica, AFM), anche le vibrazioni naturali dell'edificio che la ospita possono causare rumore [17-22].

### 4.3.2 Primi risultati nuova posizione sensore

Nel nostro caso, analizzando gli andamenti dei grafici precedenti si cerca di ridurre il rumore nei dati e nei segnali che attribuiamo ai rumori ambientali tra cui le vibrazioni del treno della slitta che porta il set di brocche, che sono trasmesse dal disco alla tavola dove è posizionato il sensore. Oscillazioni della struttura stessa, trasmesse sulla tavola  $y$ , e al rumore ambientale dovuto alle altre lavorazioni in officina.

Per ridurre tali rumori esistono diversi strumenti, a partire dagli interventi di tipo fisico come schermatura e messa a terra che consiste nel realizzare una rete di conduttori collegati a terra che possano schermare la strumentazione. La filtrazione analogica invece si basa sull'uso di filtri elettronici in grado di far passare solo determinate frequenze amplificando in particolare il guadagno (gain). Per le nostre prove l'unico metodo percorribile risultato essere l'applicazione di filtri passa basso durante la scrittura del codice in Python.

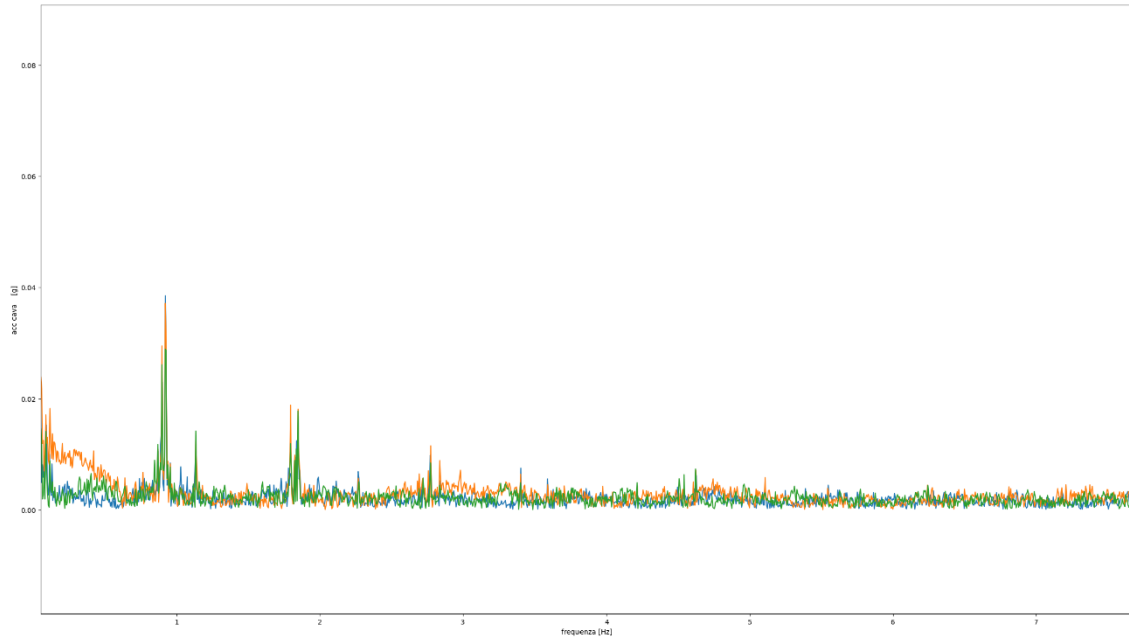
In particolare, il filtro passa basso ci permette di eliminare dai segnali di vibrazione il rumore che si manifesta ad alta frequenza. Infatti, ricavando il passo della broccia per la specifica lavorazione e la velocità di passata si ricava la frequenza fondamentale della lavorazione che nel nostro caso è di circa 1 Hz.

$$f = v_p/p$$

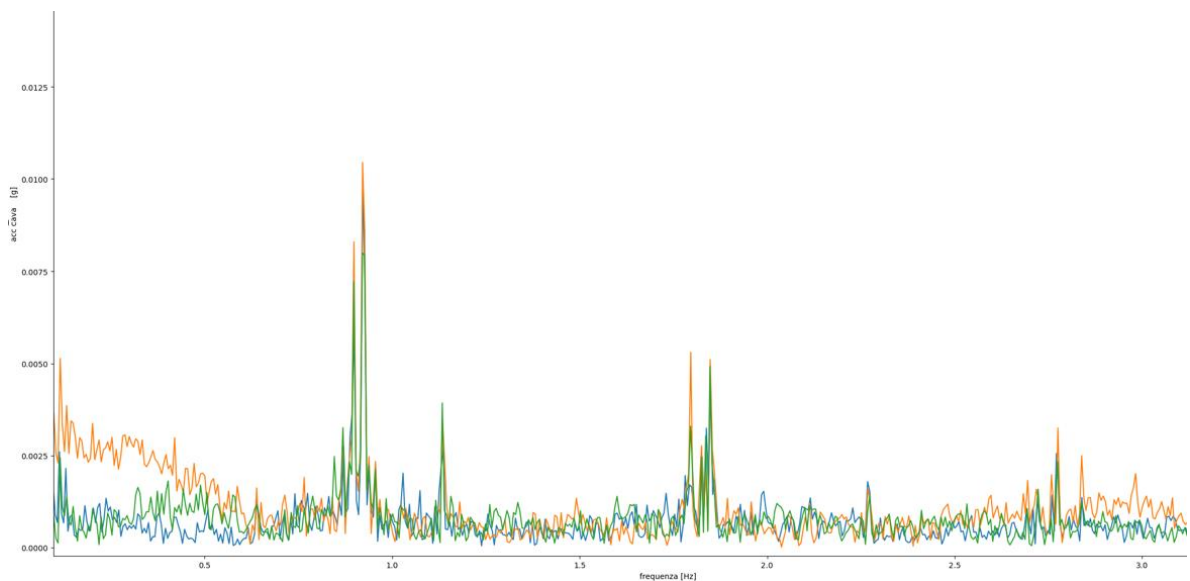
Dove,  $v_p$  è la velocità di passata, e  $p$  il passo dei denti della broccia.

Compreso, che il rumore si presenta con tempo caratteristico minore ne consegue, frequenze del rumore molto maggiori nello spettro di Fourier. Si procede a tagliare tramite filtro passa basso, le frequenze molto maggiori rispetto alla frequenza di taglio che abbiamo detto essere di circa 1 Hz.

Impostando quindi, una frequenza di filtro(10 Hz) di 0.01 la frequenza con cui vengono campionati i segnali (1000 Hz). Si sono ricavati, i grafici in figura 4.3.3.1 e 4.3.3.2 delle tre cave del provino analizzate precedentemente.



*Figura 4.3.3.1 Grafico accelerazioni tre cave provino con eliminazione rumore*



*Figura 4.3.3.2 Ingrandimento zone frequenza di taglio e armoniche successive*

Si nota dai grafici, il comportamento che ci si aspettava dal processo di taglio della brocciatrice. Abbiamo uno sfasamento iniziale dovuto alle diverse accelerazioni della slitta durante l'approccio al taglio, e poi come ci si aspettava a circa 0.9 Hz ritroviamo la frequenza fondamentale che corrisponde alla frequenza di taglio  $f_1$  (primo picco). Gli altri picchi, in figura, a circa 1.8 Hz e 2.7 Hz, sono le armoniche successive  $f_2 = 2f_1$  e  $f_3 = 3f_1$ .

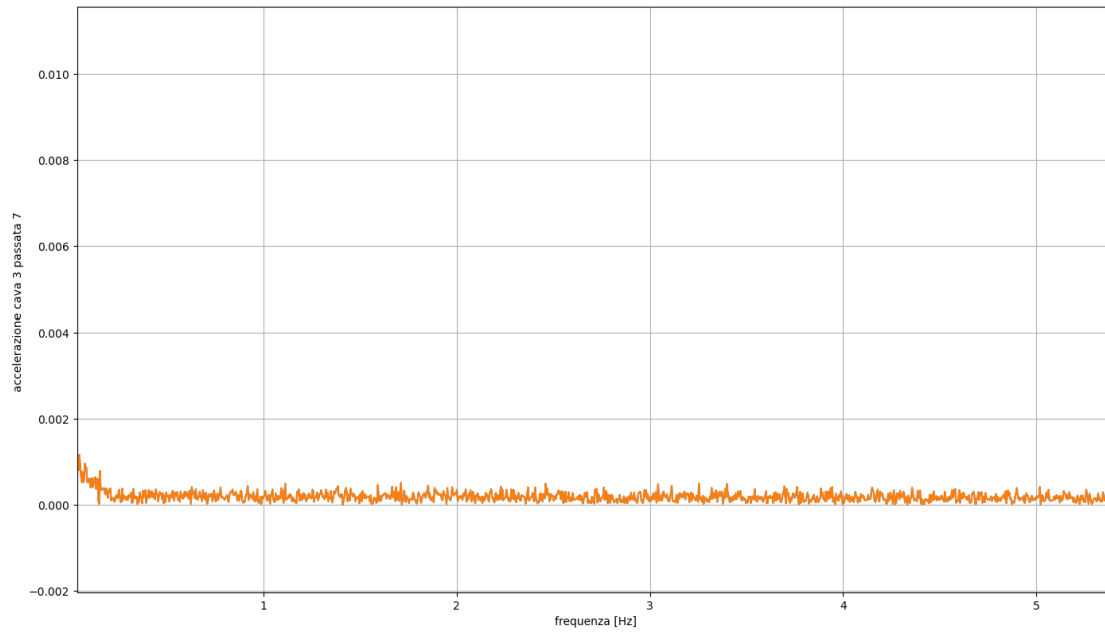
A frequenze maggiori, troviamo sempre delle armoniche successive del fenomeno, ma il cui picco è sempre meno evidente. Queste attenuazioni sono normali e sono dovute a: naturali attenuazioni delle vibrazioni del materiale, assorbimento dell'energia del taglio e dissipazione dell'energia del taglio, e alla dispersione nelle misurazioni.

Per identificare la frequenza di filtraggio, sono state considerate in letteratura delle frequenze tipiche per il filtro passa basso, quindi sperimentate mano a mano nel codice le frequenze più adatte, attraverso varie prove è stato possibile trovare l'ordine di grandezza giusta per la frequenza da inserire nel filtro, cercando di ridurre il rumore più possibile ma senza intaccare dei segnali tipici della lavorazione così come frequenze si ripetevano per ogni registrazione sono state attribuite a le frequenze tipiche del motore.

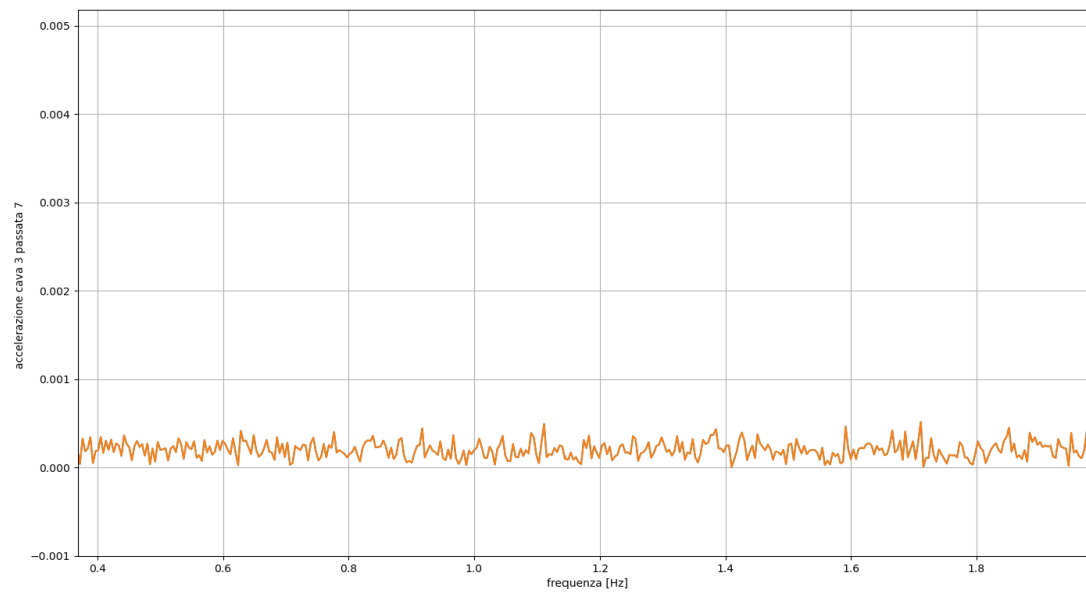


## 4.4 Prove di ottimizzazione posizione sensore di vibrazione

Finite le prove sul provino, si è passati alla lavorazione dei dischi in inconel, per cui visti i risultati soddisfacenti dall'analisi dei dati del sensore di vibrazione sulla tavola dell'asse y, per le prime passate di sgrossatura si è lasciato invariata la posizione del sensore. Conseguentemente, si sono analizzati i dati, e si è subito notato che, applicando il filtro per la riduzione del rumore su questa nuova lavorazione del disco, i picchi di vibrazioni e le vibrazioni stesse erano molto attenuate, come si vede in figura 4.4.1, dove è stata presa in considerazione la lavorazione delle cave di un 3° stadio turbina (*Frame 1500 Bolted 7FA*). Questa attenuazione è stata attribuita al fatto che, le prove di taglio condotte su provino, sono influenzate dalle caratteristiche stesse del provino. Infatti, essendo il provino di spessore diverso dei dischi poi lavorati, ed essendo un pezzo che non ha altro materiale attorno rispetto al disco, le vibrazioni durante il taglio risultino accentuate, come una trave a sbalzo, è che quindi, tornati alla lavorazione di dischi, essi risultino meno sensibili alle vibrazioni, e i dati riflettono questa attenuazione. Pertanto, si è cercato di ottimizzare la posizione del sensore, analizzando altri due posizionamenti differenti. E confrontando i dati di accelerazione, si è scelto il posizionamento che rispecchiasse meglio il comportamento registrato durante il processo di lavorazione. Come si vede in figura 4.4.2, la presenza dei picchi alla frequenza di taglio, che per questa lavorazione corrisponde a circa 0.70 Hz, non è più distinguibile per via dell'attenuazione nella lavorazione del disco rispetto al provino.



*Figura 4.4.1 Grafico accelerazione durante taglio cava disco con posizione sensore su tavola asse Y*

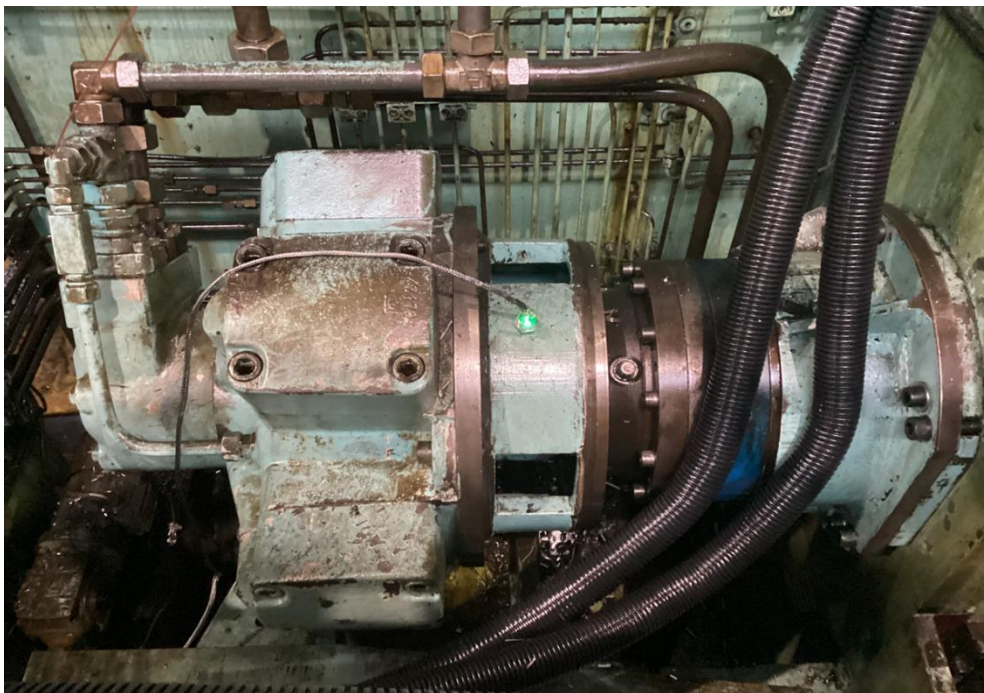


*Figura 4.4.2 Zoom grafico in fig.4.4.1 in corrispondenza frequenze di taglio*

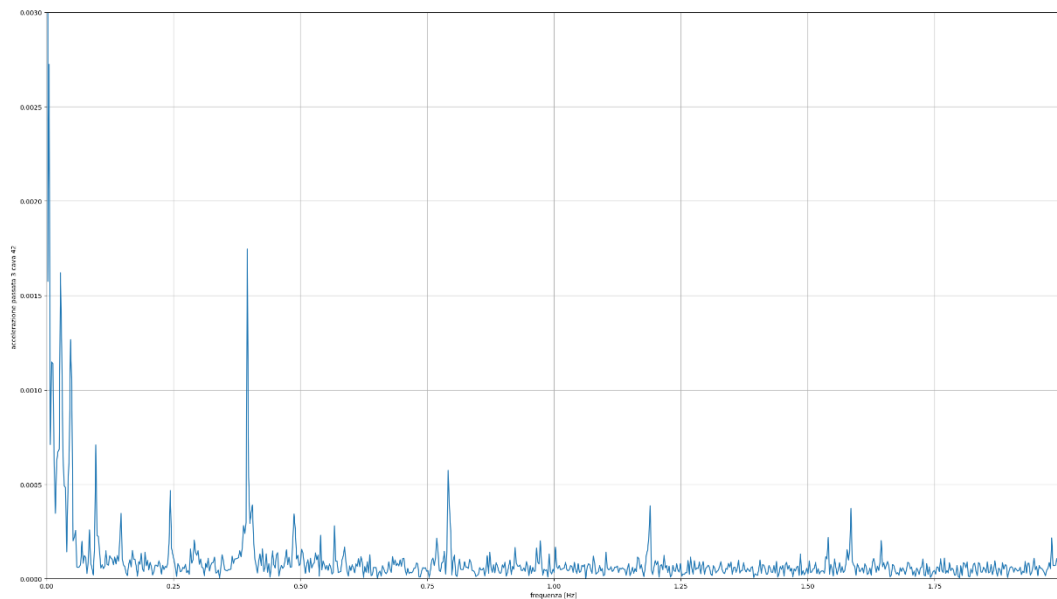
#### 4.4.1 Prove posizionamento su asse motore

Durante la lavorazione del 2° stadio del frame 1500, il sensore è stato posizionato su asse motore (figura 4.4.1.1).

In questa posizione, come si nota dal grafico ottenuto in figura 4.4.1.2, ritornano ad essere ben visibile il picco in corrispondenza della frequenza di taglio, e le sue armoniche successive. Avendo cambiato posizione del sensore, i problemi di attenuazione riscontrati in precedenza risultano superati, ritornando ad un andamento assimilabile a quello riscontrato sulle prove effettuate sul provino.



*Figura 4.4.1.1 Posizionamento sensore vibrazione su asse motore*



*Figura 4.4.1.2 Grafico accelerazione con sensore posto su asse motore*

## 4.4.2 Prove su montante

Per cercare di avere un'analisi più completa possibile, si è studiata un'altra possibile configurazione del sensore di vibrazioni, posizionata su montante della brocciatrice come si vede in figura 4.4.2.1. In questo caso, si nota dal grafico (figura 4.4.2.2), come il picco in corrispondenza della frequenza di taglio è ben visibile. Tuttavia, prima di trarre delle conclusioni sulla miglior posizione, si è effettuata un'analisi durante la stessa passata di una stessa lavorazione, cambiando la posizione del sensore nelle tre confrontate prima.



Figura 4.4.2.1 Posizionamento sensore su montante

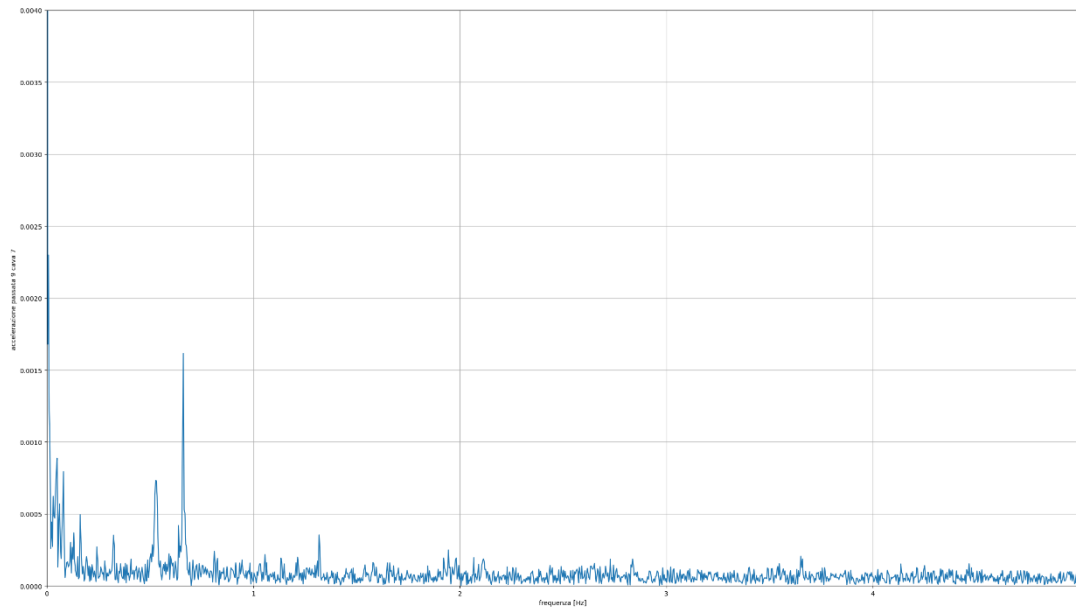


Figura 4.4.2.2 Grafico accelerazioni con sensore posizionato su montante

### 4.4.3 Confronto posizioni sensore

Per cercare di individuare la miglior posizione dove installare il sensore di vibrazione, sono state effettuate delle prove spostando il sensore durante la realizzazione del 2° stadio frame 1500. In particolare, sono state prese in considerazione tre cave lavorate durante la nona passata, ognuna corrisponde ha un diverso posizionamento del sensore:

- Cava 1: posizione del sensore su asse del motore;
- Cava 3: posizione del sensore sul montante;
- Cava 7: posizione del sensore su tavola asse y.

Il grafico in figura 4.4.3.1, è il risultato del plottaggio dei dati di accelerazione delle tre cave, ognuna di colore diverso.

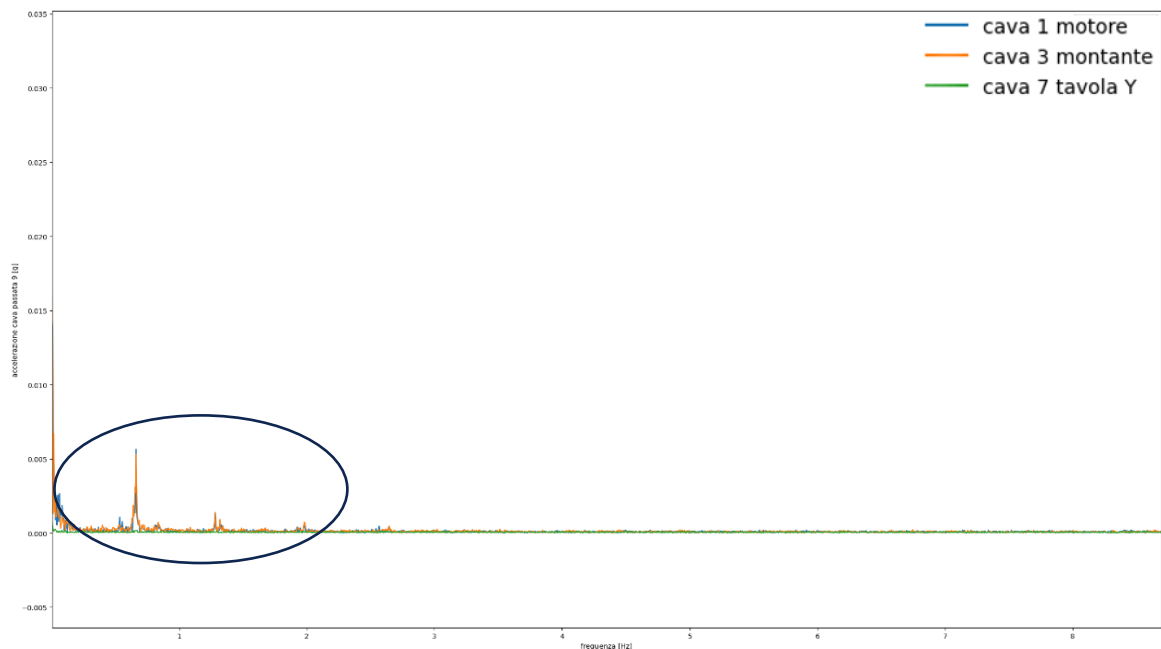
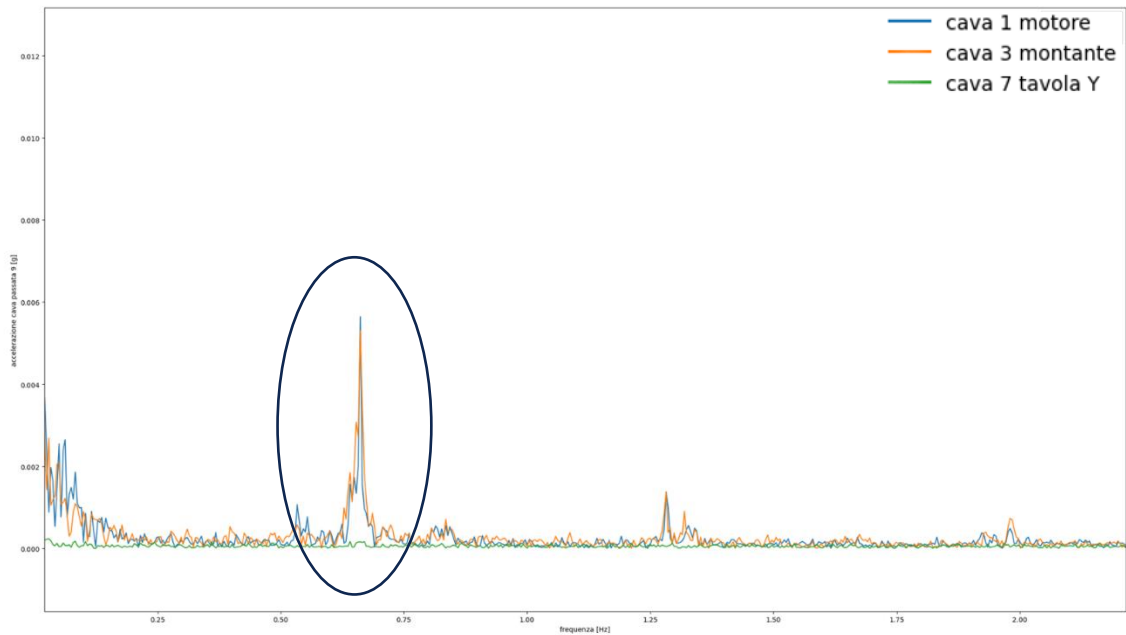


Figura 4.4.3.1 Grafico confronto accelerazioni cave 1-3-7



*Figura 4.4.3.2 Grafico accelerazione cave 1-3-7 con zoom su armoniche successive*

In figura 4.4.3.2, troviamo evidenziato con il cerchio il picco di vibrazione in corrispondenza la frequenza fondamentale, e si notano anche le armoniche successive, rappresentati dagli altri picchi in figura. Nell'ultimo grafico con zoom sul picco alla frequenza fondamentale, figura 4.4.3.3, si distingue chiaramente come, la cava 1, posizione del sensore sull' asse motore e la cava 3, posizione del sensore sul montante, seguono pressoché lo stesso andamento nel grafico di accelerazione. Mentre, la cava 3 in verde in figura, con posizione del sensore sulla tavola asse Y, segua un andamento nel grafico di accelerazione che è completamente attenuato, dove le cave 1 e 3 presentano il picco di accelerazione alla frequenza fondamentale, la cava 7 non presenta alcun picco.

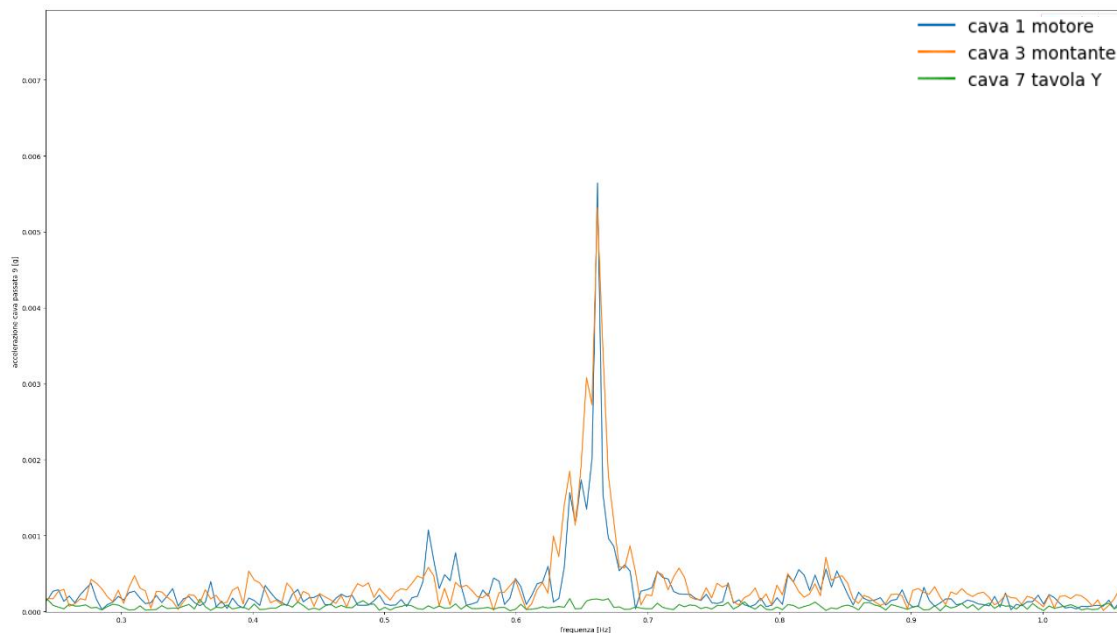


Figura 4.4.3.3 Grafico accelerazioni cave 1-3-7 con zoom su frequenza principale

## 4.5 Miglior posizionamento per il sensore di vibrazione

Alla luce delle analisi svolte, dalle prove effettuate e dai grafici ottenuti utilizzando l'analisi di Fourier, si nota che rispetto al posizionamento del sensore sulla tavola dell'asse y, sia sul montante che sul motore, considerata una stessa passata durante la stessa lavorazione, si trovano andamenti pressoché simili con picco nel segnale di vibrazione alla frequenza fondamentale di taglio e successivi picchi alle armoniche successive come ci si aspettava in questo tipo di analisi. Mentre, col posizionamento del sensore sulla tavola dell'asse y, si riscontra un'attenuazione su tutte le frequenze anche sulla frequenza fondamentale e nelle frequenze delle armoniche successive. Perciò per ottimizzare i risultati dati dal sensore di vibrazione, esso andrebbe collocato sul montante o sul motore.



Identificate le frequenze rilevanti durante il taglio, si possono così impostare dei limiti accettabili di vibrazione a quelle frequenze. Infatti, durante le lavorazioni successive calcolata la frequenza principale, lì ci si aspetta il massimo della vibrazione, mentre, al limite inferiore abbiamo le vibrazioni che troviamo nelle armoniche successive.

Inoltre, sulla base di questi studi, è possibile inizializzare un registro dati per le lavorazioni future di dischi dello stesso materiale, che l'azienda possa consultare, in modo tale da avere un database di dati di vibrazioni ammissibili, oltre le quali sia possibile identificare anomalie e tendenze del processo di taglio. Allo stesso modo, è possibile effettuare una manutenzione preventiva: utilizzando i dati se si nota un aumento nelle vibrazioni alle frequenze specifiche del taglio, si può programmare una revisione nell'usura dei taglienti delle brocche, o un'ispezione in macchina.

E infine, ora è possibile il settaggio dei limiti in tempo reale: impostare dei limiti durante la lavorazione, come è fatto per la potenza di taglio, con conseguente generazione di allarme, o di arresto macchina. Impostando, ad esempio, un range di percentuale massimo di superamento del valore di vibrazione alla frequenza principale. Ad esempio, se durante la lavorazione si verifica un picco che è due volte più grande del picco ottenuto alla frequenza principale allora si genera un allarme.

## Capitolo 5: Usura

In quest'ultimo capitolo si confronteranno dei grafici di potenza, di una lavorazione di un secondo stadio di turbina Bolted 7FA 1500, sempre in inconel, con lo scopo di analizzare l'aumento di potenza la prima cava lavorata rispetto all'ultima. Aumento di potenza, dato dal fatto che la broccia si è usurata rispetto alla condizione di lavoro della prima cava, dove risultava priva di usura.

Nello specifico sia analizzeranno le prime tre passate, nella prima a velocità di passata di 1.2 m/min, le altre due seconda e terza alla stessa velocità di passata di 0.6 m/min. Le cave lavorate sono 92 per ogni passata, e inoltre, per la seconda e terza passata, sono stati ispezionati, attraverso apposita strumentazione, il livello di usura di un settore di broccia per ogni passata. Identificando, il grado di usura del tagliente, e sapendo che questo non può essere maggiore di 0.2 mm, in modo tale da poter preservare le tolleranze e le curiosità del pezzo lavorato, si è fatto uso dell'equazione di Taylor generalizzata per andare a stimare la durata del tagliente in minuti anche per lavorazioni a velocità diverse dello stesso materiale del disco.

Ovviamente si è scelto di confrontare e analizzare le brocche che più erano sottoposte a sforzi maggiori durante il taglio queste sono appunto le fasi di sgrossatura che rimuovono molto materiale e che corrispondono alle prime passate.

## 5.1 Confronto potenza prima e ultima cava prima passata

La prima passata di questa lavorazione, è in realtà svolta per preparare la cava alle effettive passate di lavorazione; infatti, questa prima passata è svolta con brocche più resistenti perché asportano più materiale. Infatti, come si vede in tabella 5.1.1, abbiamo e uno sviluppo di potenza maggiore rispetto agli altri confronti.

Passata	Velocità di passata[m/min]	N° Cava	Potenza massima [kW]	Potenza media [kW]
1	1,2	1	3,6	2,8
1	1,2	92	3,84	3
			<b>Incremento potenza massima</b>	<b>Incremento potenza media</b>
			7%	7%

Tabella 5.1.1 Tabella confronto sviluppo di potenza prima passata cave 1 e cava 92

Come si nota dalla tabella, e ricavando i valori di potenza massima e potenza media dal grafico in figura 5.1.1, la potenza massima della prima cava è di circa 3.6 kW mentre, per la realizzazione dell'ultima cava, e con lo stato di usura della broccia che è aumentato, si ha un conseguente rialzo della potenza sviluppata per lavorare l'ultima cava, con una potenza massima di circa 3.85 kW, e un incremento del 7% sia sulla potenza massima che sulla potenza media.

Dal grafico (figura 5.1.1), si nota come nella prima cava, in blu nel grafico, la sua effettiva lavorazione avviene dopo più di due minuti, in cui il sensore ha iniziato a registrare poiché, l'operatore aveva iniziato il ciclo di lavorazione, ma che poi ha interrotto, poiché aveva notato delle anomalie (ad esempio, un non corretto posizionamento dei tubi per la lubrificazione, o un controllo sulle quote del disco). Per questo la registrazione dell'effettiva lavorazione è dopo i 120 secondi circa, in ogni caso notiamo il tipico andamento nello sviluppo di potenza per questa lavorazione, con una parte fino ai 150 secondi circa, dove la macchina non sta

ancora lavorando (potenza a vuoto), Subito dopo i 150 secondi abbiamo il primo dente che inizia a lavorare E successivamente le varie coppie di denti in presa.

Nella seconda curva, in colore arancione, abbiamo la potenza sviluppata durante la realizzazione dell'ultima cava. In questo caso, la lavorazione inizia senza problemi, quindi non c'è uno shift della curva, è il primo dente in presa, dopo la parte di potenza a vuoto, (circa 10 sec). Si vede come a causa dell'usura, la curva di potenza, dell'ultima cava sia sciftata leggermente più in alto della prima cava come ci aspettavamo, con un incremento di potenza media del 7%.

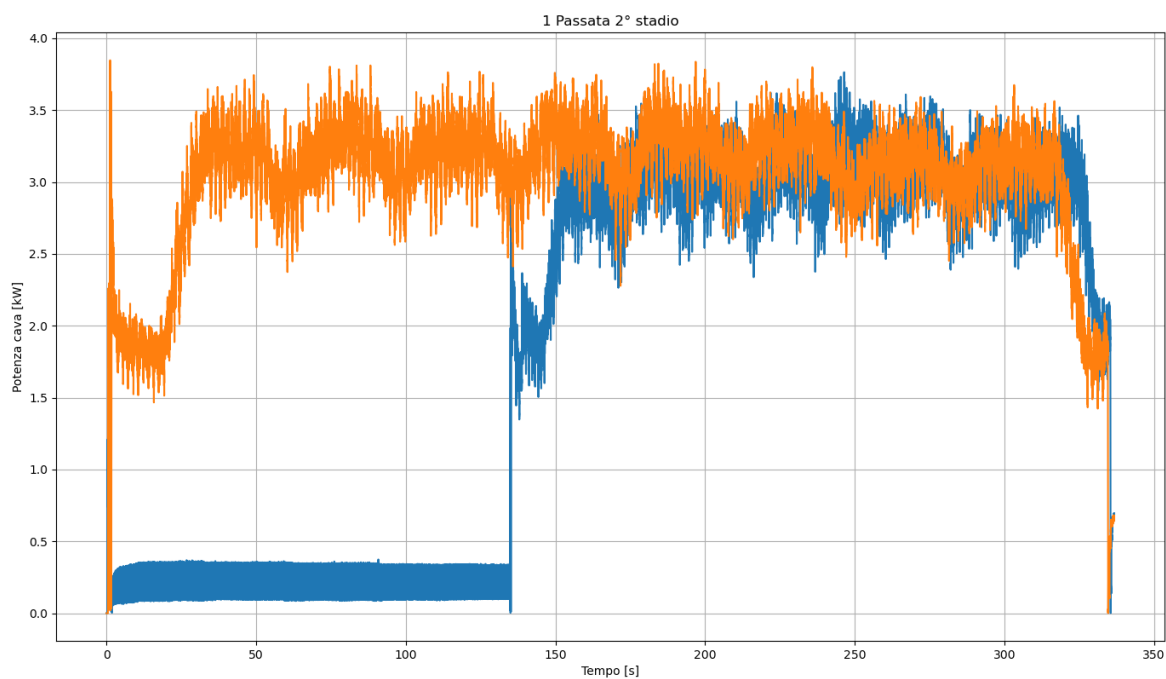


Figura 5.1.1 Grafico confronto potenze prima cava (blu) e ultima cava (arancione) della prima passata

Nel grafico in figura 5.1.2, si riporta il confronto delle potenze della seconda cava, che non ha subito interruzioni durante la lavorazione; quindi, non è presente uno shift temporale, il che ci permette di avere un confronto in linea con la lavorazione dell'ultima cava. Ovviamente, essendo la potenza di taglio della cava numero 2, le brocche erano già andati incontro al fenomeno di usura anche se in piccola parte, come ci dimostra la tabella in figura 5.1.2, dove la potenza massima è di 3,61 kW, con l'incremento che è di circa 6.4% rispetto al 7% della prima cava. Ovviamente l'incremento è diminuito, proprio perché rispetto alla prima cava, nella seconda abbiamo già un po' usurato il tagliente e quindi il gap tra seconda cava ultima è diminuito in termini percentuali.

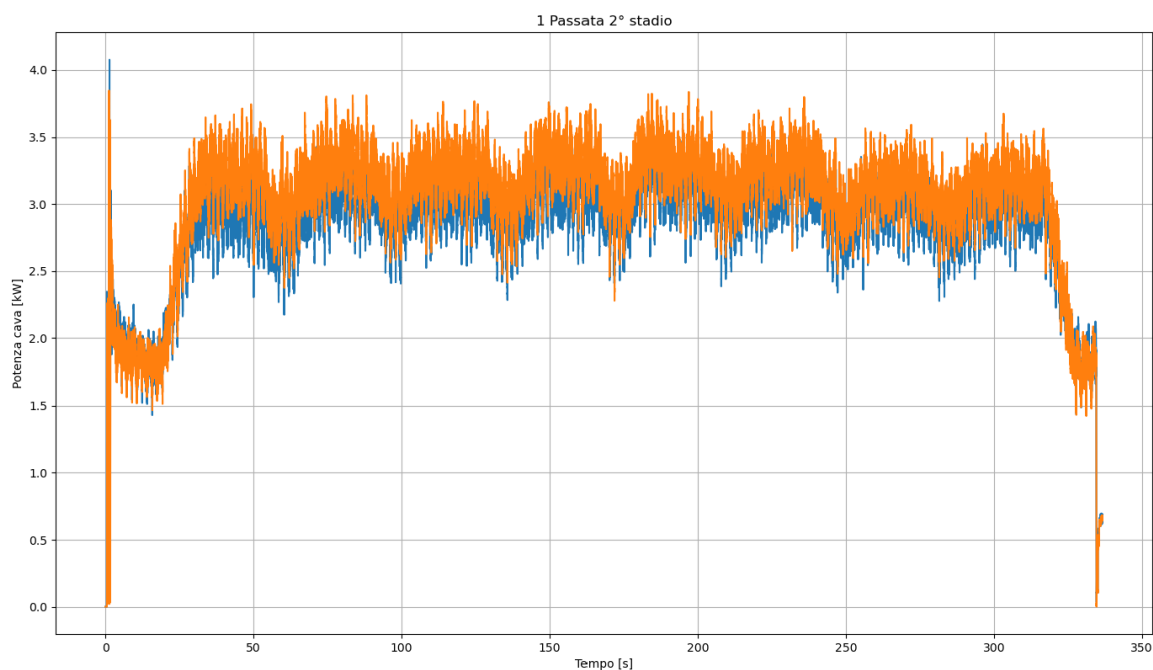


Figura 5.1.2 Grafico confronto potenze cava 2 (blu) e ultima cava (arancione) della prima passata

## 5.2 Confronto prima cava e ultima cava seconda passata

Si procede al confronto della seconda passata, che corrisponde alla prima vera passata di lavorazione; infatti, da qui si controlla che le cave del disco rispettino i limiti di profondità della passata, indicati da progetto. In tabella 5.2.1, troviamo di nuovo i valori di potenza a confronto tra prima e ultima cava, con valori assoluti di potenza sia massima che media, minori rispetto al caso precedente, questo poiché sono minori sia la velocità che il materiale del disco asportato. In particolare, la potenza massima in lavorazione per la prima cava è di 2.5 kW e di 2.9 kW per l'ultima, con un incremento percentuale del 16%.

Passata	Velocità di passata[m/min]	N° Cava	Potenza massima [kW]	Potenza media [kW]
2	0,6	1	2,5	1,85
2	0,6	92	2,9	2,15
			<b>Incremento potenza massima</b>	<b>Incremento potenza media</b>
			16%	16%

Tabella 5.1.2: Tabella di confronto sviluppo potenza tra prima e ultima cava seconda passata

Quindi, questa volta l'usura del tagliente delle brocche è più importante, questo perché la tipologia delle brocche è diversa, e anche perché essendo la velocità di passata minore del caso precedente, ogni dente tagliente insiste per più tempo nell'asportazione di materiale del disco. In figura 5.2.1 è graficato l'andamento delle potenze del taglio in blu della prima cava, e in arancione dell'ultima. Si nota subito, come incremento di usura sia molto più importante rispetto al caso precedente; infatti, la curva dell'ultima cava è shiftata in alto su valori di potenza già dall'inizio più importanti.



Figura 5.2.1: Grafico confronto potenza prima cava (blu) e ultima cava (arancione) della seconda passata

### 5.3 Confronto prima e ultima cava terza passata

Per l'ultimo confronto, la prima cava della terza passata viene effettuata a velocità leggermente minore, rispetto alla seconda passata. Troviamo in tabella 5.3.1, valori di potenza massima simili alla seconda passata, ma con incremento percentuale dovuto all'usura più importate. Questo è dato dal fatto che la broccia di questa terza passata, rimuove più materiale con profondità di passata maggiore.

Passata	Velocità di passata[m/min]	N° Cava	Potenza massima [kW]	Potenza media [kW]
3	0,5	1	2,71	1,65
3	0,6	92	3,22	2,18
			<b>Incremento potenza massima</b>	<b>Incremento potenza media</b>
			19%	32%

Tabella 5.3.1 Tabella di confronto sviluppo potenza prima cava e ultima cava terza passata

In figura 5.3.1, troviamo graficato la potenza della prima cava in blu e dell'ultima in arancione. Anche qui come in precedenza nel primo caso, troviamo uno shift temporale della prima cava, per problematiche insorte prima che iniziasse il taglio da parte dell'operatore. Si nota da subito, come incremento di potenza tra prima a cava e ultima sia importante, usura che quindi potrebbe essere stata anche influenzata dalla lubrificazione che nella seconda passata potrebbe essere stata più efficace.

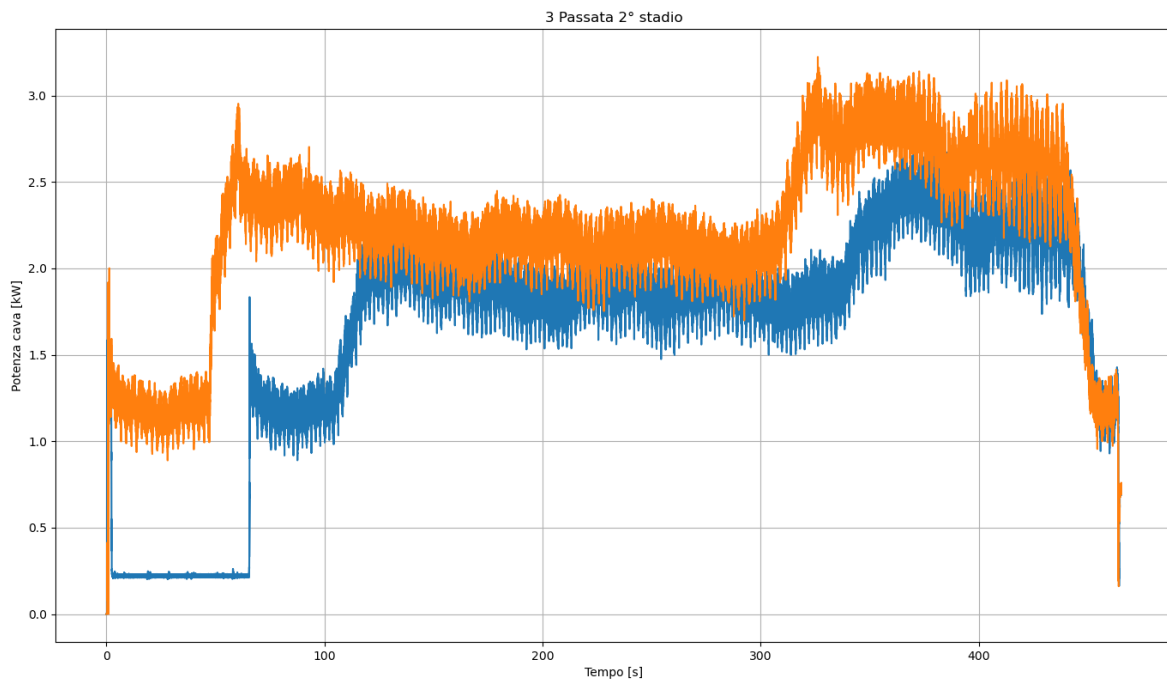
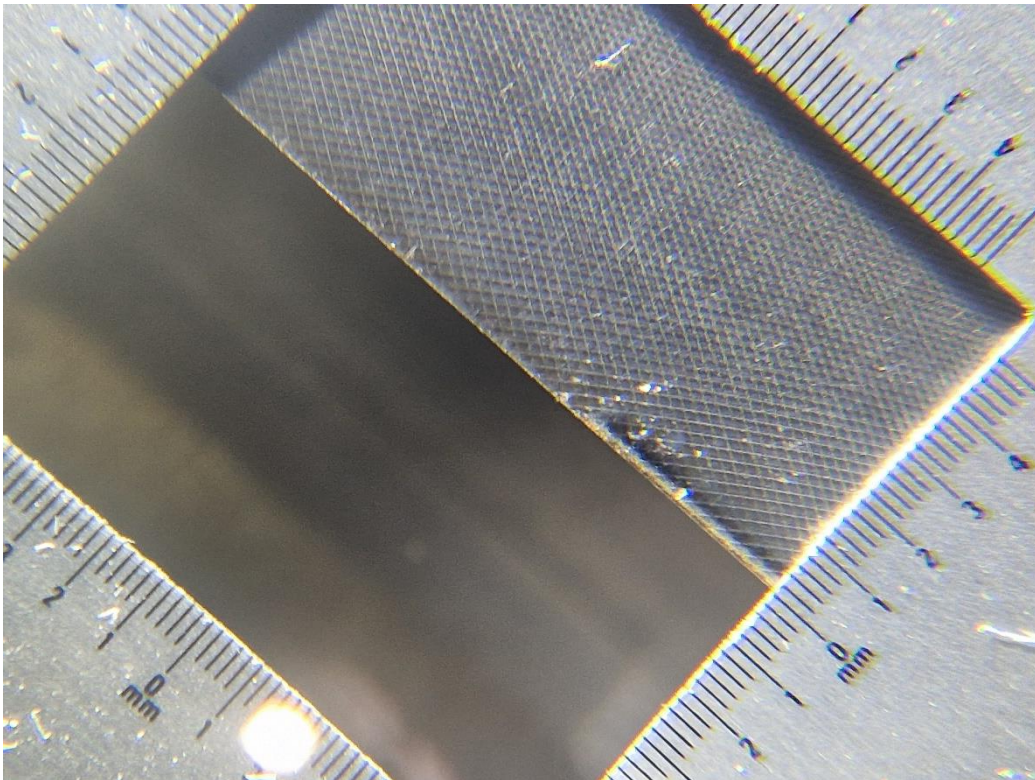


Figura 5.3.1 Grafico potenza prima cava (blu) ultima cava (arancione) terza passata



### 5.3 Rilevazione usura brocche

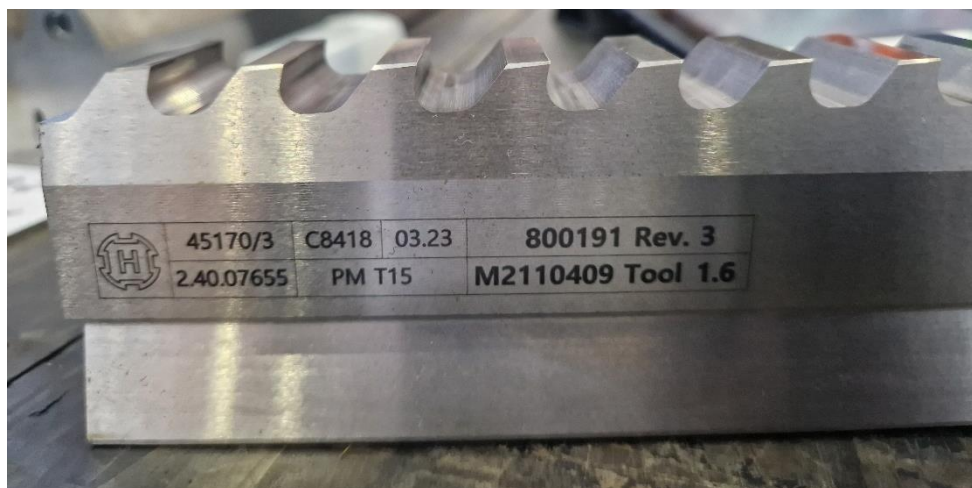
Durante l'uso delle brocche, in modo del tutto naturale, esse andranno incontro ad usura per graduale abrasione del tagliente. Esso, in maniera periodica dovrà essere sottoposto ad affilatura tramite una mola troncoconica. Per decidere quando è arrivato il momento dell'affilatura, si devono ispezionare visivamente le brocche e i denti taglienti. Attraverso micrometro oculare con scala graduata, si misura una fascia color scuro, che si forma a causa dell'usura, se essa supera gli 0.2 mm circa, allora la broccia viene sottoposta ad affilatura (figura 5.3.1).



*Figura 5.3.1 Fascia color scuro data dall'usura del tagliente della broccia*

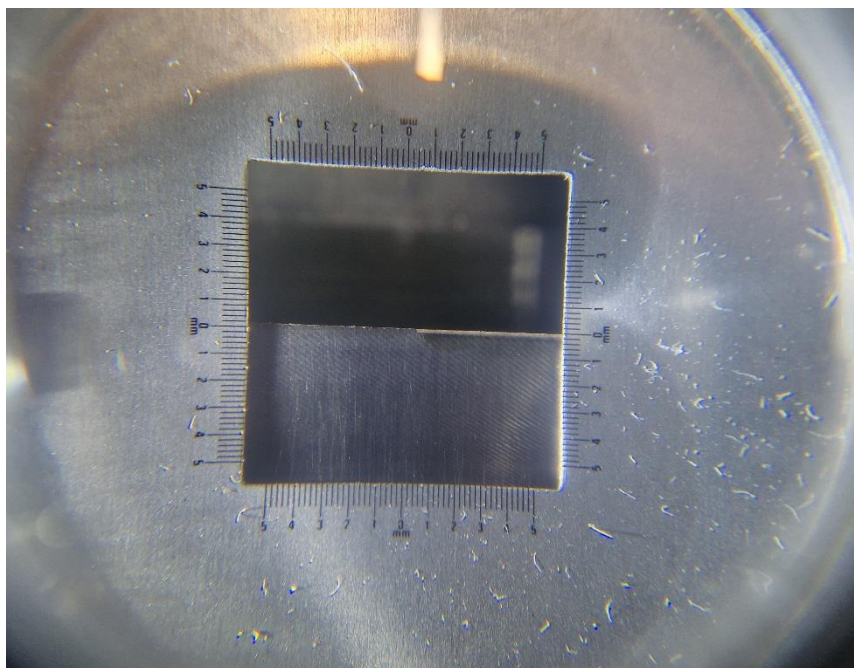
### 5.3.1 Ispezione broccia prima passata

Ispezionando le prime passate, fase di sgrossatura, si può notare come l'usura del tagliente della broccia stia man mano progredendo al termine della lavorazione delle 92 cave, usura che viene sempre misurata dopo la fine della passata e della lavorazione del disco, e mai tra due cicli di lavoro. In figura 5.3.1.1 troviamo il codice di riferimento della broccia e il numero della carrellata (1) a cui appartiene e il numero della posizione del settore nella carrellata (6), con l'indicazione Tool 1.6.

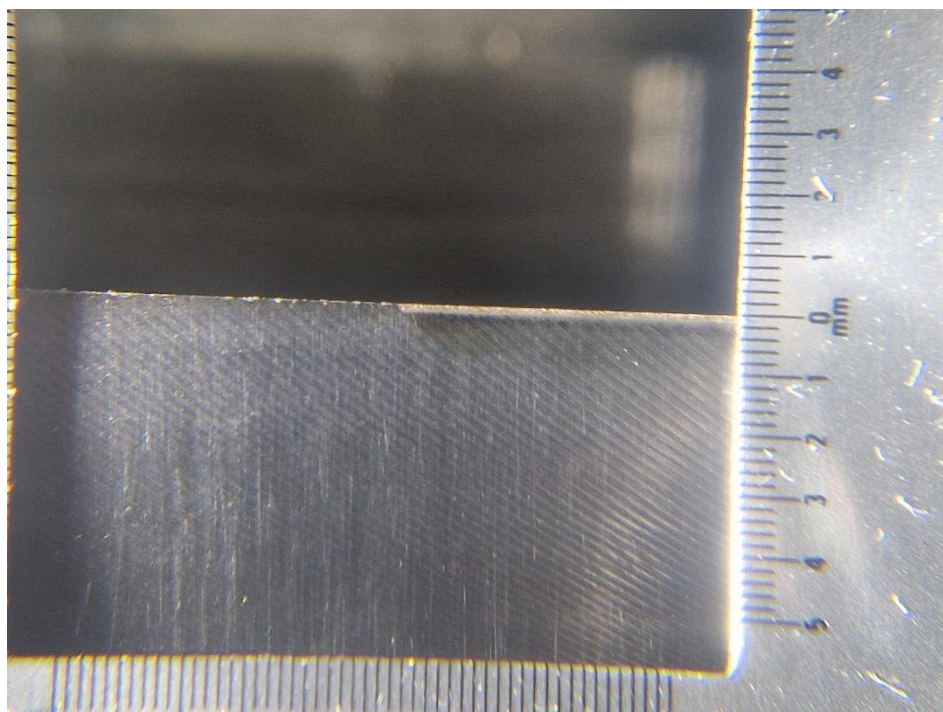


*Figura 5.3.1.1 Riferimento broccia prima passata*

Nelle figure 5.3.1.2 e 5.3.1.3, si vede come ispezionando i denti taglienti delle brocche essi abbiano già raggiunto il limite di circa 0.2 mm. Quindi, per questa lavorazione in particolare di dischi, l'azienda deve affidare le brocche al processo di affilatura al termine della lavorazione di ogni disco.



*Figura 5.3.1.2 Rilevazione stato usura prima passata (tool 1.6)*



*Figura 5.3.1.3 Ingrandimento ottico zona tagliente usurato prima passata*

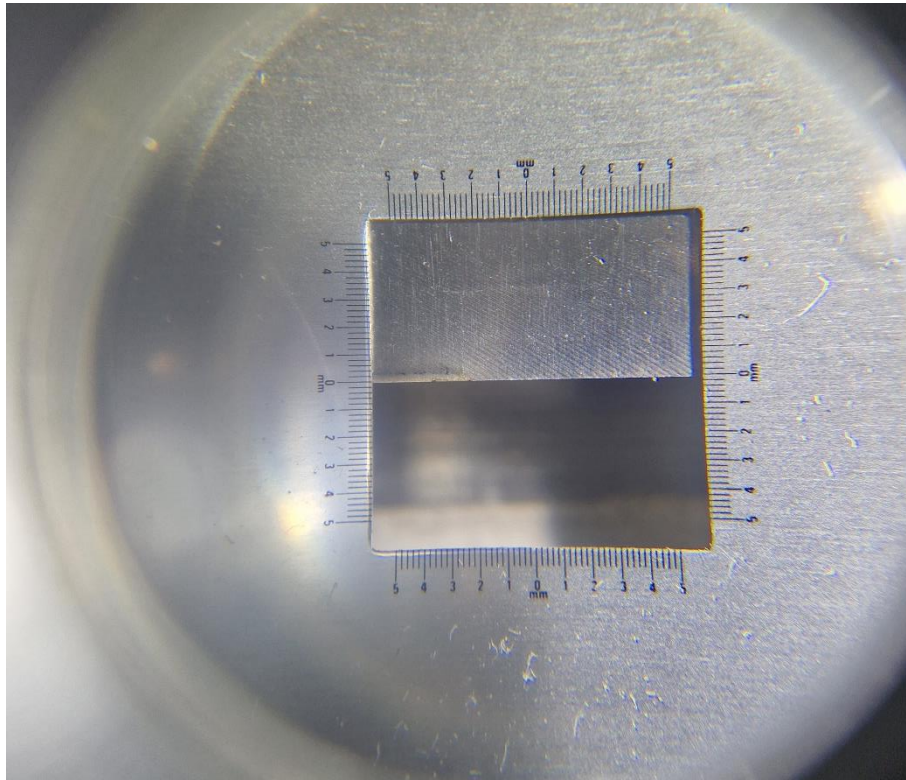
### 5.3.2 Ispezione broccia seconda passata

Per quanto riguarda la seconda passata, si è presi in considerazione la broccia tool 2.4, seconda carrellata, con posizione numero 4 del settore nella carrellata.

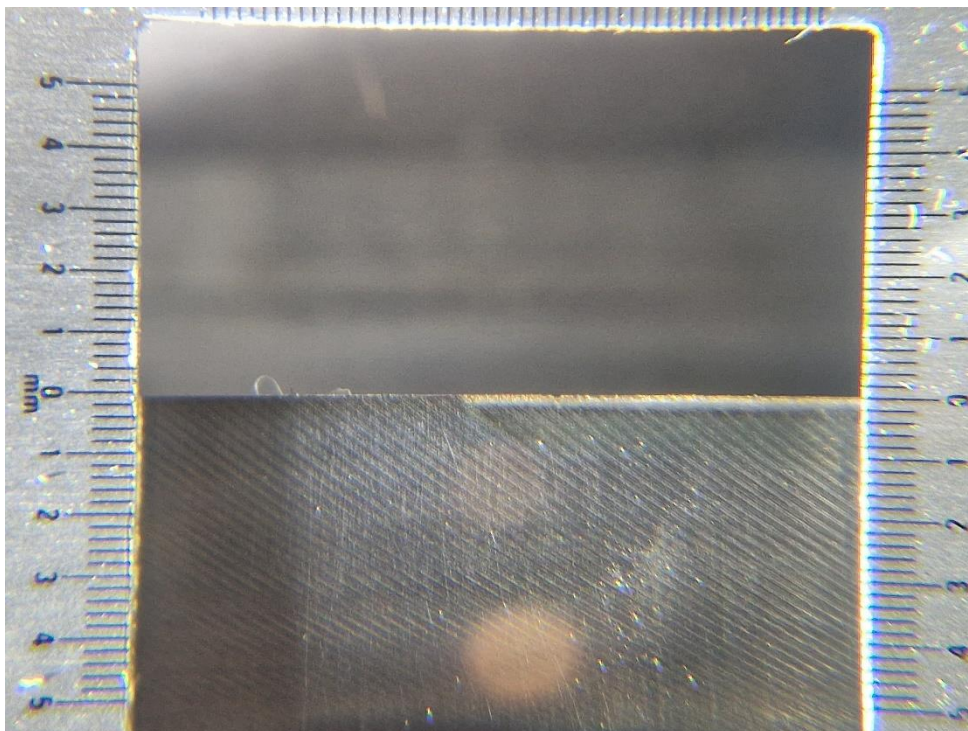
In figura 5.3.2.1, si riporta la broccia di riferimento con lo strumento di ispezione visiva poggiato sui denti taglienti, utilizzato per misurare strato di usura. In figura 5.3.2.2 e 5.3.2.3 si vede nel dettaglio lo strato di usura del tagliente e come esso sia arrivato alla larghezza massima di 0.2 mm circa. Anche qui si procede all'affilatura e alla rimozione del tagliente usurato appena finito il disco; quindi, così come a prima passata, anche adesso le brocche dopo la lavorazione delle 92 cave hanno raggiunto il limite massimo di usura accettabile.



*Figura 5.3.2.1 Broccia di riferimento usura seconda passata*



*Figura 5.3.2.2 Strato usura tool 2.4 seconda passata*



*Figura 5.3.2.3 Dettaglio zoom strato usura tool 2.4*

## 5.4 Stima durata del tagliente

Abbiamo visto nei capitoli precedenti, come l'usura massima dei taglienti delle brocche sia raggiunta ad ogni fine lavorazione, cioè a fine della novantaduesima cava le brocche sono da riaffilare. Per questo motivo conoscendo l'usura massima possibile, 0.2 mm, si è provato a stimare la durata del tagliente in termini di tempo massimo di lavoro per tagliente attraverso la legge generalizzata di Taylor [22].

### 5.4.1 Legge di Taylor lineare

La legge di Taylor lineare è stata la prima formulazione per provare stimare la durata del tagliente:

$$v_t * T^n = C$$

- $v_t$ : velocità del taglio;
- $T$ : durata tagliente;
- $n$ : esponente specifico del materiale;
- $C$ : è una costante che dipende dal materiale e dalle condizioni operative.

La linearità si espone in una scala doppio logaritmica, come in figura 5.4.1.1, dove la pendenza della retta è stabilita dall'esponente  $n$ . Bisogna notare che l'equazione non è valida nei casi in cui non è verificata la linearità. In particolare nelle lavorazioni con tempi di taglio inferiori ai 10 min e superiori ai 60 min, lavorazioni di materiali con alta resistenza alle temperature, e lavorazioni con forti valori di asportazione di materiale [21]. Quindi nel nostro caso, la linearità non è verificata, in quanto la lavorazione di una cava, e quindi il tempo per i taglio come si vede dai grafici ai capitoli 5.1, 5.2 e 5.3, le operazioni taglio durano meno di 500 sec.

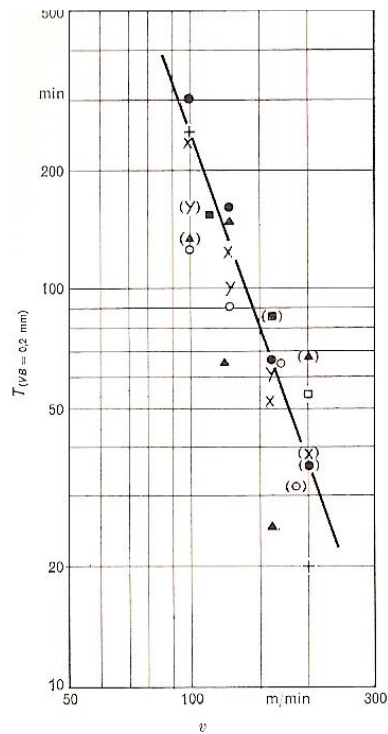


Figura 5.4.1.1 Grafico doppio logaritmico velocità di taglio – tempo [21]

## 5.4.2 Equazione di Taylor generalizzata

Dato che la linearità non viene rispettata, si è passati alla formulazione generalizzata, data dagli studi eseguiti da Kienzle e Viktor, che hanno cercato di determinare tutti gli altri parametri che influenzano la costante C, e che non erano stati presi in considerazione da Taylor. Ovvero, spessore del truciolo, larghezza di taglio e usura VB. In particolare, si è notato come, sia all'aumentare dello spessore del truciolo, sia all'aumentare della sua larghezza, la velocità di taglio diminuisce come si vede in figura 5.4.2.1 [23].

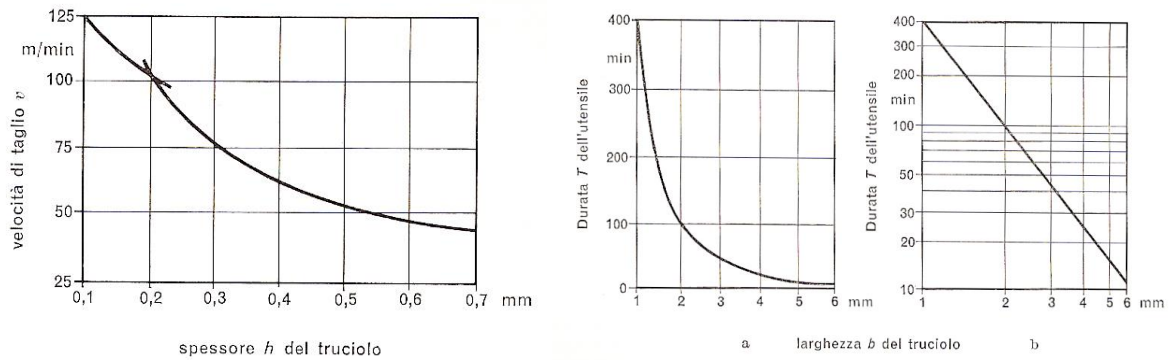


Figura 5.4.2.1 Grafici Velocità di Taglio – spessore e larghezza truciolo [23]

Si arriva così alla seguente equazione generalizzata:

$$V = \frac{K_{vB} VB^m}{a^x p^y \sin(\chi)^{x-y} T^\alpha} \quad 1$$

Dove:

- $V$ : velocità di taglio;
- $K_{VB}$ : costante di Taylor dipendente dal materiale in lavorazione materiale dell'utensile e dal tipo di lavorazione;
- $x, y, \alpha$  e  $m$ : esponenti dipendenti dal materiale dell'utensile;
- $a$ : avanzamento utensile;
- $p$ : profondità di passata;
- $VB$ : usura tagliente;
- $\chi$ : angolo tra la direzione del taglio e l'angolo inclinazione del bordo del tagliente;
- $T$ : durata del tagliente.



Per gli esponenti dell'equazione essi assumano i valori in tabella 5.4.2.1 [21]. Nel nostro caso si prendono in considerazioni materiale delle brocche realizzate in acciai rapidi HSS, poiché l'azienda fattualmente uso di brocche realizzate in acciaio HSS-PM.

MATERIALE	$\alpha$	X	Y	m
HSS	0,15	0,4	0,36	0,44
STELLITE	0,25	0,4	0,30	0,44
CARBURO	0,30	0,4	0,22	0,44
CERAMICO	0,70	0,4	0,15	0,44

Tabella 5.4.2.1 Valori esponenti x,y,m e  $\alpha$ , dipendenti dal materiale utensile [23].

In tabella 5.4.2.2, sono riportati i valori utilizzati per la stima della durata del tagliente T. In particolare, per ogni passata è stata riportata la velocità di taglio, è stata calcolata a costante  $K_{VB}$ , conoscendo la durata di un tagliente, l'usura, e la velocità della prima passata; la profondità di passata, l'avanzamento considerato come l'incremento tra un dente tagliente e il successivo, e l'angolo del tagliente ricavato dalle specifiche delle brocche.

Si nota come le durate calcolate, siano inferiori ai 10 minuti, che corrisponde a circa al tempo impiegato per ogni tagliente al termine delle 92 cave, che, come sappiamo, corrisponde alla massima usura accettata. Inoltre, si nota, come ipotizzato dalla formulazione di Taylor, all'aumentare nella velocità di taglio la durata del tagliente diminuisce così come se si aumentano la profondità di passata e l'incremento del taglio.

passata	v <sub>t</sub> [m/min]	K <sub>vB</sub> [m/min]	T [min] durata	VB[mm]	α	m	x	y	N° scanalature	p [mm]	a [mm]	χ [°]
1	1,2	0,8386	3,4	0,2	0,15	0,44	0,4	0,36	92	13,93	0,047	3
2	0,6	0,8386	8,2	0,2	0,15	0,44	0,4	0,36	92	8,26	0,047	3
3	0,6	0,8386	8,2	0,2	0,15	0,44	0,4	0,36	92	8,33	0,047	3
4	0,6	0,8386	8,2	0,2	0,15	0,44	0,4	0,36	92	8,33	0,047	3
5	0,6	0,8386	8,2	0,2	0,15	0,44	0,4	0,36	92	8,33	0,047	3
6	0,9	0,8386	5,5	0,2	0,15	0,44	0,4	0,36	92	8,33	0,047	3
7	1	0,8386	4,9	0,2	0,15	0,44	0,4	0,36	92	8,33	0,047	3
8	1	0,8386	4,7	0,2	0,15	0,44	0,4	0,36	92	8,49	0,052	3
9	1	0,8386	7,0	0,2	0,15	0,44	0,4	0,36	92	0,81	0,157	3
10	1	0,8386	6,5	0,2	0,15	0,44	0,4	0,36	92	2,45	0,07	3

Tabella 5.4.2.2: calcoli durata del tagliente

Infatti, come si nota nella prima passata, rispetto alla seconda, che è eseguita al doppio della velocità di taglio, e con una maggior profondità di passata, ne consegue una durata del tagliente minore della metà. Mentre, la nona passata che effettuata alla stessa velocità di taglio dell'ottava passata, presenta una durata superiore, e ci accorgiamo che questa, è dovuta al fatto, che la profondità di passata è diminuita drasticamente, poiché ci troviamo in finitura, anche se l'avanzamento è aumentato, ma in questo caso, visto che la profondità di passata è diminuita di circa dieci volte rispetto all'ottava passata, mentre l'incremento è aumentato solo del doppio circa, risulta più rilevante nel calcolo della durata della nona passata la profondità della stessa.

## Conclusioni

In conclusione, durante il lavoro di tesi è stato effettuato dapprima uno studio approfondito del processo di brocciatura, cercando di cogliere i punti fondamentali di questo processo attualmente in uso dall'azienda; sono state individuate le varie problematiche e successivamente si sono adottati dei metodi per risolvere queste criticità, rilevate nel lavoro di tesi precedente.

In secondo luogo, si è indagato in modo approfondito la capacità di raccolta dei dati da parte del sistema di sensoristica, cercando di capire il contesto nel quale essi venivano raccolti e interpretandoli nel miglior modo possibile atto alla descrizione del processo, e successivamente elaborati. Un ottimo risultato è stato raggiunto con il settaggio dei limiti di allarme, grazie ai quali sarà possibile evitare il più possibile eventuali danneggiamenti. Inoltre, molto importante è stata anche la costruzione, tramite analisi in frequenza, di una raccolta di dati e di andamenti, che nel corso di lavorazioni future potranno essere consultati in modo da identificare anomalie nel processo, e utilizzando questo database, mettere in atto manovre di manutenzione preventiva, programmando revisioni o ispezioni.

## Bibliografia

- [1] [https://www.biancogianfranco.com/AggArea\\_Italia/Brocce/Le\\_brocce-nozioni\\_fondamentali\\_prima\\_parte\\_.pdf](https://www.biancogianfranco.com/AggArea_Italia/Brocce/Le_brocce-nozioni_fondamentali_prima_parte_.pdf)
- [2] <https://www.ctemag.com/news/articles/long-and-short-broaching>
- [3] [https://www.engineeringtoolbox.com/surface-roughness-d\\_1368.html](https://www.engineeringtoolbox.com/surface-roughness-d_1368.html)
- [4] [https://www.researchgate.net/figure/Typical-surface-finish-for-basic-machining-operations\\_fig7\\_228420174](https://www.researchgate.net/figure/Typical-surface-finish-for-basic-machining-operations_fig7_228420174)
- [5] Secciani, A., Villani, G., Produzione metalmeccanica, Cappelli Editore, Bologna, 1993.
- [6] Moderna guida alla lavorazione dei metalli, Sandvik Coromant, Svezia, 1994.
- [7] <https://www.sandvik.coromant.com/it-it/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>
- [8] Manuale cremonese di meccanica, Edizioni Cremonese.
- [9] <https://meccanicatecnica.altervista.org/tornio-formazione-del-trucciolo/>
- [10] Stephenson, D. A., Agapiou, J. S., Metal cutting theory and practice, Taylore & Francis Group, 2016.

- [11] Telesman, J., Effect of broaching machining parameters, residual stresses and cold work on fatigue life of Ni-based turbine disk P/M alloy at 650 °C, International Journal of Fatigue, 2021
- [12] Dow, A. Studio sulla broccia. Journal of Manufacturing Engineering, vol. 42, n. 3, 1964, pp. 120-135.
- [13] <https://www.marcuccisergio.com/it/news/formazione-truciolo-tipologie-materiali-e-implicazioni/251/>
- [14] Chavalier, A., Bohan, J., Guide du technicien en fabrications mecaniques.
- [15] [https://www.biancogianfranco.com/Agg%20Area%20Italia/Brocce/Le%20brocche%20-%20nozioni%20fondamentali%20\(seconda%20parte\).pdf](https://www.biancogianfranco.com/Agg%20Area%20Italia/Brocce/Le%20brocche%20-%20nozioni%20fondamentali%20(seconda%20parte).pdf)
- [16] <https://it.farnell.com/guide-to-vibration-analysis-trc-ar>
- [17] [http://www.diim.unict.it/users/gfichera/MSIM\\_file/vibrazioni\\_misura.pdf](http://www.diim.unict.it/users/gfichera/MSIM_file/vibrazioni_misura.pdf)
- [18] <https://www.vitobarone.it/elettronica/dominio.htm>
- [19] Origine e trattamento del rumore\_ECAII (CNR)
- [20] La trasformata di Fourier, P. Tilli
- [21] <https://www.electricity-magnetism.org/it/come-funziona-il-rumore-di-corrente/>
- [22] [https://www.rp-photonics.com/shot\\_noise.html](https://www.rp-photonics.com/shot_noise.html)
- [23] Durata del tagliente, Vittore Carassiti

