



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria dei Materiali  
A.a. 2021/2022  
Sessione di Laurea 03/ 2022

**Sviluppo di un protocollo per la  
caratterizzazione della lavorabilità degli acciai  
inossidabili**

Relatore:

Ugues Daniele

Candidato:

Tolosano Riccardo

# Indice

<b>Introduzione</b> .....	1
Acciai Inossidabili.....	1
Elementi in lega negli acciai inossidabili.....	1
Tipologie di Acciaio Inossidabile .....	2
Processi di lavorazione tradizionali .....	7
Acciai inossidabili a lavorabilità aumentata .....	12
Aumento lavorabilità con aggiunta di elementi leganti .....	12
Aumento lavorabilità senza elementi leganti.....	14
<b>Modellizzazione Una Variabile Alla Volta (UVAV)</b> .....	16
Introduzione .....	16
Teoria dell'analisi di varianza e della regressione .....	18
Analisi di varianza .....	18
Regressione lineare.....	23
Parte sperimentale Una variabile alla volta.....	29
prove preliminari .....	29
Modello Una Variabile Alla Volta.....	32
Sviluppo dei modelli di Regressione .....	35
Marca 1 .....	35
Forza normale .....	35
Pressione normale .....	38
Marca 2 .....	41
Forza normale .....	41
Pressione normale .....	44
Marca 3 .....	47
Forza normale .....	47
Pressione normale .....	50
Discussione dei risultati .....	53
Forza normale .....	53
Pressione normale .....	55
Valori minimi prove Una Variabile Alla Volta .....	57
Studio delle derivate.....	57
Studio della Desiderabilità .....	58
Forza Normale.....	60
Pressione normale .....	61

Conclusioni.....	62
<b>Modellazione Design of Experiments (DoE) .....</b>	<b>63</b>
Teoria del Design of Experiments.....	63
Teoria dello sviluppo dei modelli di regressione.....	68
Analisi di Varianza.....	68
Regressione lineare.....	69
Response Surface sperimentale per lo studio delle forze .....	70
Modellizzazione dei dati sperimentali.....	73
Marca 1 .....	73
Forza normale .....	73
Pressione normale .....	77
Marca 2 .....	81
Forza normale .....	81
Pressione normale .....	85
Marca 3 .....	89
Forza normale .....	89
Pressione normale .....	93
Discussione dei risultati .....	97
Forza normale.....	97
Pressione Normale.....	99
Validazione del modello ottenuto .....	101
Marca 1 .....	101
Marca 2 .....	102
Marca 3 .....	104
Calcolo dei punti minimi per il modello DoE .....	106
Metodo di Cramer .....	106
Studio della Desiderabilità .....	109
Marca 1 .....	109
Forza Normale.....	109
Pressione Normale .....	110
Marca 2 .....	111
Forza Normale.....	111
Pressione Normale .....	112
Marca 3 .....	113
Forza Normale.....	113
Pressione Normale .....	114

Conclusioni.....	116
<b>Confronto tra i modelli Una Variabile Alla Volta e di Design of Experiments .....</b>	<b>117</b>
Prove a velocità di taglio variabile .....	119
Prove ad avanzamento per giro variabile.....	120
Prove a profondità di passata variabile .....	121
Analisi dei Residuali .....	122
Modelli Una Variabile Alla Volta .....	126
Modelli Design of Experiments.....	127
Conclusioni.....	128
<b>Sviluppo di un nuovo modello .....</b>	<b>129</b>
Marca 1 .....	129
Marca 2 .....	131
Marca 3 .....	133
Analisi dei Residuali .....	135
Dati Una Variabile Alla Volta.....	135
Dati Design of Experiments.....	136
Confronto tra modelli .....	137
Prove a velocità di taglio variabile .....	137
Prove ad avanzamento per giro variabile.....	138
Prove a profondità di passata variabile .....	139
Valori critici per minimizzare la risposta.....	140
Forza Normale.....	140
Pressione normale .....	141
<b>Conclusioni sullo sviluppo di modelli per lo studio di Forze e Pressioni normali .....</b>	<b>143</b>
<b>Usura Utensile .....</b>	<b>145</b>
Parte Teorica.....	145
Parte sperimentale .....	152
<b>Sviluppo del Protocollo .....</b>	<b>155</b>
Caratterizzazione metallografica .....	155
Micropurezza .....	155
Studio della microstruttura.....	157
Studio della percentuale di Ferrite .....	159
Prove Meccaniche.....	160
Analisi chimica Completa .....	162
Esperimenti di lavorabilità.....	164
Prove Una Variabile Alla Volta.....	164

Forza e Pressione normale.....	164
Usura Utensile.....	165
Prove di Design of Experiments.....	165
Post processing dei dati.....	166
<b>Lavori futuri</b> .....	<b>167</b>
<b>Ringraziamenti</b> .....	<b>168</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>169</b>

# Introduzione

Il seguente lavoro verterà sullo sviluppo di un protocollo per lo studio della lavorabilità degli acciai inossidabili, svolto presso l'azienda Cogne Acciai Speciali s.p.a.

In questa parte introduttiva verranno, in primo luogo, illustrate le varie famiglie di acciai inossidabili e verranno analizzati i principali elementi leganti che li compongono, in quanto l'azienda in cui è stato svolto il lavoro di tesi è una delle principali compagnie nel settore degli acciai inossidabili.

Successivamente verranno analizzate le varie tipologie di operazioni di lavorazione per asportazione di truciolo, in quanto l'azienda fornisce semilavorati e prodotti da lavorare come barre e vergelle, per cui tutti i materiali prodotti dalla Cogne Acciai Speciali subiscono o subiranno lavorazioni di asportazione di truciolo, motivo principale per cui è stato richiesto lo sviluppo di un protocollo per studiare la lavorabilità all'utensile delle varie famiglie e delle marche che le compongono.

Per concludere la parte introduttiva, verranno analizzati i metodi per aumentare la lavorabilità degli acciai inossidabili, in quanto il protocollo sviluppato riguarda in primo luogo le marche a lavorabilità aumentata, in modo da poter mostrare in maniera univoca e ripetibile effettive differenze tra varie marche a lavorabilità aumentata anche e soprattutto nella stessa famiglia di acciai.

## Acciai Inossidabili

### Elementi in lega negli acciai inossidabili

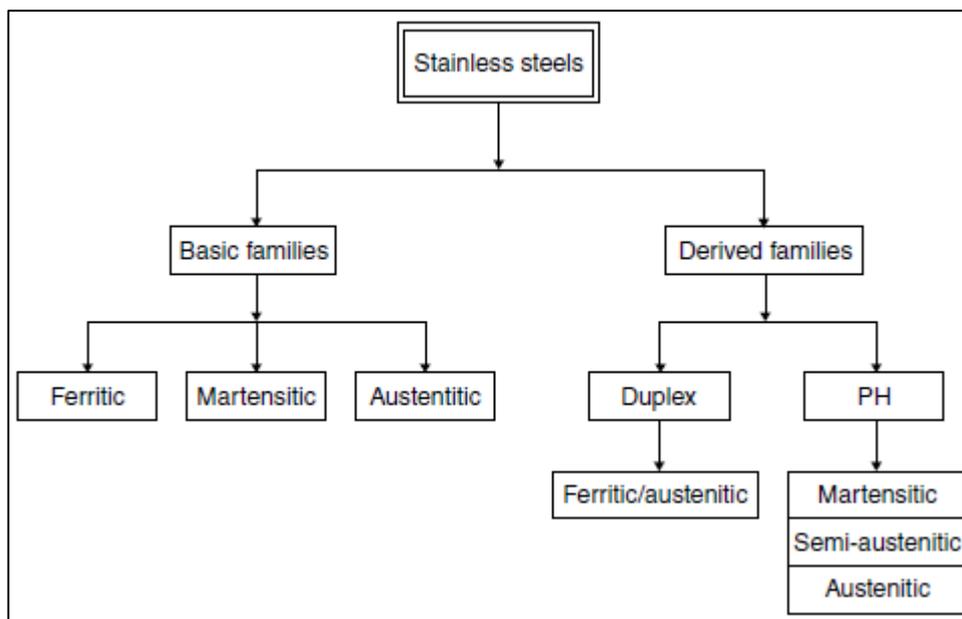
Negli acciai inossidabili, vengono aggiunti degli ulteriori elementi per assicurarsi il raggiungimento delle proprietà meccaniche, strutturali e chimiche [2]. Gli elementi di lega più importanti e la loro funzione all'interno della lega sono elencati di seguito:

1. **Carbonio (C)**, presente in soluzione solida. Presenza bassa tranne che negli acciai martensitici (alta percentuale per aumentare durezza e resistenza meccanica). Non influisce direttamente sulla resistenza a corrosione [2].
2. **Cromo (Cr)**, permette la passivazione degli acciai inossidabili formando uno strato superficiale passivato di ossido di Cromo ( $Cr_2O_3$ ). Deve essere presente in una concentrazione di almeno il 10,5% in peso per formare uno strato di ossido continuo e uniforme. La presenza di C è deleteria per la formazione dell'ossido in quanto ha una affinità con il Cromo simile all'ossigeno. Questa affinità tra Carbonio e Cromo va a diminuire la percentuale di Cromo libero in soluzione solida nella matrice e se questa riduzione scende, anche localmente, sotto la soglia del 10,5% si perdono le proprietà di resistenza a corrosione [2].
3. **Nichel (Ni)**, elemento austenitizzante. Durante il raffreddamento del materiale permette di mantenere la struttura della ferrite  $\gamma$  (detta Austenite) che in condizioni standard è stabile solo a temperature superiori della temperatura di austenitizzazione, anche a temperatura ambiente. Il Nichel permette anche un aumento nella resistenza agli attacchi acidi (soprattutto con acido solforico) e rende il materiale amagnetico ma non ha contribuito diretto sullo sviluppo dello strato passivante [2].
4. **Molibdeno (Mo)**, Aumenta resistenza a corrosione localizzata (pitting) e aumenta resistenza al Cloro (usato per applicazioni in ambienti ricchi di Cloro) [2].
5. **Manganese (Mn)**, aggiunto per ridurre la formazione di solfuri di Ferro e per rimuovere ossigeno durante la fusione dell'acciaio. Stabilizzante  $\gamma$  (Austenite) in alte percentuali (4-15%) e viene usato, in alcune leghe, per rimpiazzare il Nichel e quindi per ridurre il costo della lega [2].
6. **Silicio (Si)**, aggiunto in acciai austenitici con il Molibdeno per aumentare resistenza a attacchi acidi (in particolare con l'acido solforico). Stabilizzante della Ferrite  $\alpha$ , favorisce la formazione della fase ferritica cubica a corpo centrato termodinamicamente stabile a bassa temperatura. Aumenta la fluidità dell'acciaio fuso, utile per colaggio in stampo del materiale [2].

7. **Rame (Cu)**, riduce la tendenza all'incrudimento negli acciai austenitici, riducendo la formazione di martensite da stress formata nei trattamenti di lavorazione a freddo. Stabilizzante dell'Austenite [2].
8. **Azoto (N)**, aumenta resistenza al pitting (corrosione localizzata) e corrosione intergranulare in acciai austenitici e Duplex. Aumenta resistenza meccanica [2].
9. **Niobio (Nb)**, previene la corrosione intergranulare dopo saldatura (nella zona termicamente alterata). Previene la formazione dei carburi di Cromo. In acciai ferritici aumenta la resistenza a fatica termica [2].
10. **Titanio (Ti)**, stabilizza gli acciai inossidabili durante il trattamento in AOD (Argon-Oxygen Decarburization). Uno degli utilizzi principali del Titanio è quello di prevenire la formazione dei Carburi di Cromo, in quanto possiede una affinità maggiore con il Carbonio rispetto al Cromo. Grazie a questa maggiore affinità al Carbonio del Titanio, si previene la perdita dello strato passivato di Ossidi di Cromo ( $Cr_2O_3$ ) a causa della formazione dei Carburi di Cromo [2].
11. **Zolfo (S)** e **Selenio (Se)** formano inclusioni che aumentano la lavorabilità (sono più deboli della matrice circostante favorendo la rottura del materiale e garantendo una riduzione della lunghezza dei trucioli). Riducono la resistenza a pitting [2].

## Tipologie di Acciaio Inossidabile

Uno schema delle principali famiglie di acciaio inossidabile è riportato nella Figura 1.



(Fig. 1 schema delle famiglie di acciai inossidabili [2])

Dal grafico si vede come gli acciai inossidabili possono essere divisi in base e derivati.

Gli acciai che compongono la famiglia base sono:

**Austenitici:** classificati dalla nomenclatura AISI nella serie dei 300, nel caso delle leghe Ferro-Cromo-Nichel e nella serie dei 200 nel caso delle leghe Ferro-Cromo-Manganese. Presentano una percentuale di Carbonio massima pari 0.15% e una percentuale di Cromo minima del 16% e quantità sufficienti di Nichel e Manganese per avere struttura austenitica fino a temperatura ambiente [2].

Presentano una buona resistenza a corrosione ma sono suscettibili a stress corrosion cracking [2].

Tra le varie famiglie di acciai inossidabili, gli acciai austenitici sono quelli che presentano una duttilità maggiore grazie alla struttura Cubica a Facce Centrate (CFC) tipica dell'austenite [2].

Non presentano proprietà magnetiche. L'indurimento non può essere effettuato tramite trattamento termico in quanto l'austenite è la fase termodinamicamente stabile ad alta temperatura e, a causa degli elementi stabilizzanti (quali Nichel), è anche la fase metastabile a temperatura ambiente quindi non si ha

transizione di fase dopo tempra. Grazie all'elevata duttilità è possibile eseguire operazioni di deformazione plastica a freddo che aumenta la durezza del materiale e le sue proprietà meccaniche, a scapito della duttilità a causa dell'incrudimento elevato [2].

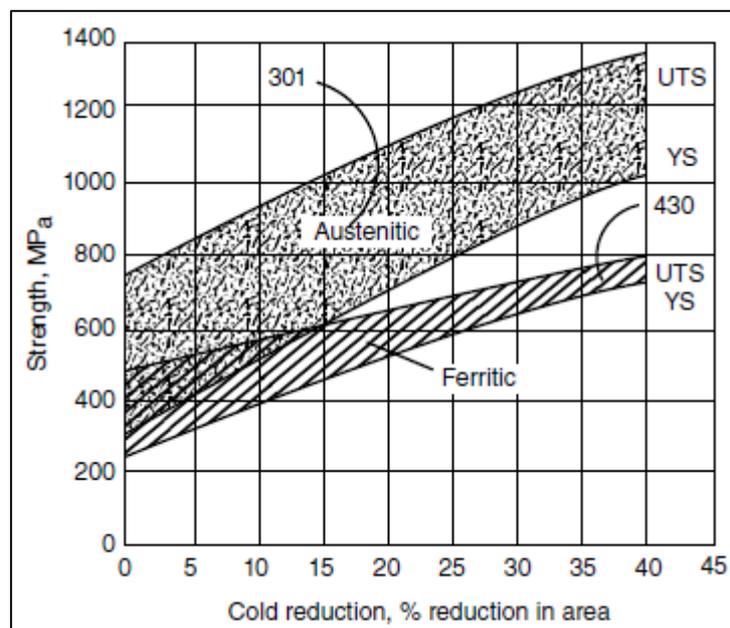
Essendo che la struttura Cubica a Facce Centrate (CFC) è metastabile a temperatura ambiente, occorre mantenere un raffreddamento elevato durante le operazioni di deformazione a freddo, in quanto per mantenere la struttura occorre mantenere la condizione di soluzione solida data dagli elementi in lega stabilizzanti della fase austenitica [2]. Buona resistenza a corrosione e all'ossidazione, che aumenta con la percentuale di elementi leganti in soluzione solida (quali Cromo, Nichel, Molibdeno e Rame) [2].

Per la nomenclatura standard AISI, gli acciai inossidabili possono essere divisi in due sottofamiglie in funzione dell'elemento legante utilizzato per rendere stabile l'austenite a temperatura ambiente [2], che sono:

- Serie 300, in cui viene utilizzato il Nichel come stabilizzante  $\gamma$  (austenite). Inoltre, è possibile aggiungere Azoto per aumentare le proprietà meccaniche [2].
- Serie 200, in cui viene utilizzato il Manganese come stabilizzante  $\gamma$  (austenite). Inoltre, la percentuale di Azoto aggiunto al materiale è maggiore [2].

Gli acciai austenitici hanno un costo molto variabile, ma in generale costano più degli altri acciai inossidabili per via degli elementi leganti più costosi (Nichel e Cromo in particolare) [2]. In generale, grazie all'elevata saldabilità, viene utilizzata nel settore Industriale, architettonico e dei trasporti. Vengono utilizzate per applicazioni nel settore culinario, raccordi, macchinari saldati, attrezzatura da trasporto a basso peso, componentistica per scambiatori di calore ed attrezzatura per il settore chimico [2].

**Ferritici:** classificati dalla nomenclatura AISI nella serie dei 400, presentano una percentuale di C inferiore a 0,12% e un contenuto di Cromo elevato (da 10,5 a 27 %). Viene aggiunto Molibdeno per aumentare la resistenza a corrosione in ambienti contenenti Cloro. Sono magnetici e non possono essere induriti per trattamento termico (tempra). Un possibile trattamento di indurimento è per lavorazione a freddo (incrudimento), ma a causa della struttura cristallina Cubica a Corpo Centrato (CCC) della ferrite  $\alpha$ , la durezza raggiungibile con questo trattamento è inferiore a quella ottenibile dalla deformazione a freddo di acciai austenitici a causa della minore duttilità della struttura [2], come mostrato dalla Figura 2.



(Fig. 2 Comparativa delle proprietà meccaniche a seguito di trattamenti di deformazione a freddo tra acciai austenitici e ferritici [2])

La resistenza a corrosione è, in generale, minore delle leghe austenitiche [2].

Sono le leghe meno care da produrre e presentano come principali settori d'impiego gli ambiti non strutturali, quali utensili da cucina ed elettrodomestici a contatto con l'acqua (ad esempio la lavastoviglie), nell'ambito dell'autoveicolo come rivestimenti per automobili e come riscaldatori per ambienti [2].

**Martensitici:** classificati dalla nomenclatura AISI nella serie dei 400, presentano un alto contenuto di Carbonio (0,15-1,2%) con Cromo tra 11,5 e 18%. Il Molibdeno, in percentuali al di sotto dell'1%, viene aggiunto per aumentare le proprietà meccaniche e la resistenza a corrosione, così come il Nichel, aggiunto in percentuali al di sotto del 2,5% [2].

Sono leghe con proprietà magnetiche [2].

Presentano una resistenza a corrosione minore di acciai ferritici e austenitici [2].

Dopo trattamento termico di tempra e rinvenimento aumentano le proprietà meccaniche, in particolare in funzione del tenore di Carbonio nella lega aumenta la resistenza a snervamento [2].

Più costose degli acciai inossidabili ferritici, a causa dei trattamenti termici che devono essere effettuati (quali austenitizzazione, tempra e rinvenimento) vengono utilizzate per strumenti da taglio anche in ambiti culinari e medicali, per componentistica di piccole dimensioni (anche in ambito aerospaziale), per macchinari da miniera e per la costruzione delle canne di fucile [2].

La tipica composizione degli acciai austenitici, ferritici e martensitici con gli intervalli di tolleranza dei principali elementi leganti e la struttura che la matrice assume [2] sono riassunti nella Figura 3.

Element	Ferritic (bcc)	Martensitic (bcc)	Austenitic (fcc)
Carbon	0.08–0.2	0.15–1.2	0.03–0.25
Chromium	11–27	11.5–18	16–26
Nickel	0–1	0–2.5	3.5–22
Manganese	1–1.5	1–1.5	2 (series 200, 5.5–10)
Silicon	1	1	1–1.5
Molybdenum	0–2.5	0–1	Some cases: 1.5–3
Phosphorus and sulfur <sup>a</sup>	0.075	0.075	0.075
Titanium	0–1	—	0–0.4

(Fig. 3 Composizione tipica delle leghe austenitiche, ferritiche e martensitiche [2])

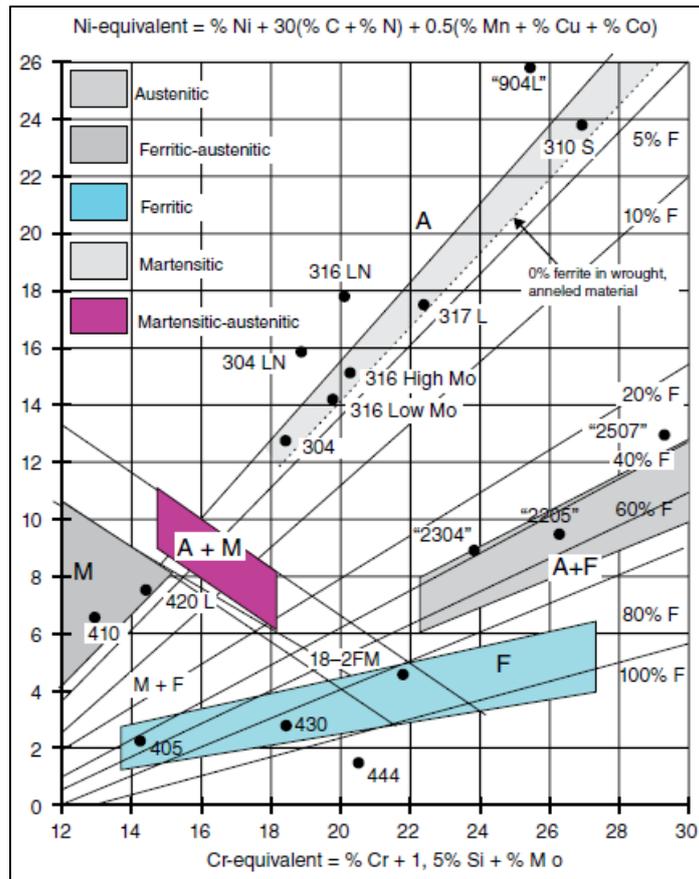
L'effetto degli elementi leganti sulla struttura viene mostrato dal diagramma di Schäffler-Delong, in cui la struttura risultante dell'acciaio viene restituita dalla posizione su un grafico che presenta sulle ascisse il valore di "Cr equivalente", calcolato tramite somma delle percentuali degli elementi ferrizzanti presenti nella lega [2], come mostrato nella Formula (1).

$$(1) \quad \text{Cr equivalente} = \%Cr + 1,5 * \%Si + \%Mo$$

Sull'asse delle ordinate è presente il parametro definito come "Ni equivalente", calcolato tramite somma delle percentuali di elementi austenizzanti presenti nella lega [2], come mostrato dalla Formula (2).

$$(2) \quad \text{Ni equivalente} = \%Ni + 30 * (\%C + \%N) + 0.5 * (\%Mn + \%Cu + \%Co)$$

Il grafico di Schäffler-Delong è mostrato nella Figura 4.



(Fig. 4 Diagramma di Schäffler-Delong [2])

Nella sottofamiglia degli acciai inossidabili derivati fanno parte le seguenti classi di acciai:

**Duplex:** Contengono Cromo (stabilizzante  $\alpha$ ) in una percentuale compresa tra il 21 e il 29% e Nichel (stabilizzante  $\gamma$ ) in una percentuale compresa tra il 2,5 e il 6,5%. Si effettua un trattamento di tempra in acqua per ottenere una struttura austenitica e ferritica [2].

Le parti della struttura che mantengono una microstruttura ferritica mantengono anche le proprietà tipiche di quella classe di acciai inossidabili, tra cui il comportamento magnetico [2].

Questa classe di acciai inossidabili presenta proprietà meccaniche maggiori degli acciai austenitici, grazie alla presenza della fase ferritica, e presenta una resistenza a corrosione maggiore degli acciai ferritici, grazie alla presenza della fase austenitica [2].

Un rapporto 1:1 tra la struttura ferritica e la struttura austenitica si ottiene con una percentuale di Cromo (Cr) compresa tra 23 e 28%, una percentuale di Nichel compresa tra il 2,5 e il 5% e con una percentuale di Molibdeno compresa tra l'1 e il 2% [2].

Le tipiche applicazioni di questa classe di acciai comprendono il settore medicale, chimico, industriale e alimentare e in processi che comprendono l'uso o il contatto con acidi e Cloro [2].

**Indurenti per precipitazione:** queste leghe contengono Cromo, Nichel, Rame, Alluminio, Titanio, Niobio o Molibdeno. Il Molibdeno viene aggiunto per aumentare le proprietà meccaniche e la resistenza a corrosione, mentre il Cu viene aggiunto per aumentare la resistenza a corrosione [2].

La principale caratteristica di questa classe di acciai inossidabili è il trattamento termico di invecchiamento che permette di ottenere diversi gradi di resistenze meccaniche in funzione del quantitativo di precipitati prodotti [2]. Inoltre, se sulla lega viene eseguito un passaggio di deformazione a freddo, l'incremento in resistenza meccanica è maggiore [2].

Gli acciai indurenti per precipitazione si dividono in:

- Martensitici (magnetici)

- Semi austenitici (magnetici)
- Austenitici (non magnetici)

Le principali leghe indurenti per precipitazione contengono Rame in quanto è il principale elemento responsabile per l'indurimento per precipitazione e Niobio per stabilizzare il Carbonio [2]. Come per le leghe Duplex, non presentano la possibilità di aumentare la lavorabilità con elementi in lega [2].

A causa degli elementi in soluzione e dei processi, sono tra le leghe più costose e trovano impiego nei settori aerospaziali e strutturali oltre che in tutte le applicazioni in cui elevate caratteristiche meccaniche sono richieste [2].

Per riassumere, le classi di acciai inossidabili con i principali vantaggi e svantaggi sono elencate di seguito:

- Austenitici, che presentano una buona resistenza a corrosione, facilmente ottenibili e ottima duttilità, ma vanno facilmente in contro ad incrudimento cosa che ne limita la lavorabilità e non hanno una buona resistenza alle spaccature date corrosione sotto stress [2].
- Ferritici, che presentano una buona resistenza a corrosione e duttilità oltre che al costo basso ma con una resistenza a corrosione e una duttilità inferiore alle leghe austenitiche [2].
- Martensitici, che presentano buone proprietà meccaniche e durezza dopo trattamento termico ma presentano una lavorabilità a caldo inferiore dei ferritici e una resistenza a corrosione inferiore agli austenitici [2].
- Duplex, buone proprietà meccaniche dopo ricottura e buona resistenza alla corrosione da stress, ma l'intervallo di temperature per cui possono essere trattati è inferiore a quello degli acciai austenitici [2].
- Indurenti per precipitazione, ottime proprietà meccaniche dopo trattamento termico e resistenza alla corrosione maggiore degli acciai martensitici, ma costosi e con duttilità a caldo e resistenza a corrosione inferiore rispetto agli acciai austenitici [2].

## Processi di lavorazione tradizionali

I processi di lavorazione per asportazione di truciolo sono, in generale, dei passaggi obbligati nella lavorazione degli acciai. Si dividono in varie categorie in funzione del tipo di taglio che viene eseguito sul materiale [2]. Per gli acciai inossidabili, le principali tecniche di taglio sono elencate di seguito.

**Tornitura;** Nella tornitura, l'utensile da taglio rimuove materiale dal pezzo in lavorazione mentre quest'ultimo si trova in rotazione. Gli utensili da taglio possono essere composti in acciaio per utensili o in carburi di Tungsteno con rivestimento o senza, in particolare questi ultimi vengono usati per aumentare la quantità di materiale asportato. La scelta del materiale che compone la punta dipende da parametri di lavorazione, velocità di produzione e macchinari utilizzati [2].

In generale, il tipo di utensile suggerito per la tornitura di acciai inossidabili è un utensile con tagliente a lama singola. Si cerca di aumentare al massimo la superficie del tagliente stesso in modo da aumentare lo scambio termico e permettere alla punta di fungere da radiatore in modo da smaltire il calore generato dall'operazione di taglio [2]. Per assicurare un supporto adeguato all'utensile, l'angolo di spoglia anteriore (front clearance angle) è preso positivo con un angolo più basso possibile, in generale con un valore compreso tra 7 e 10° [2].

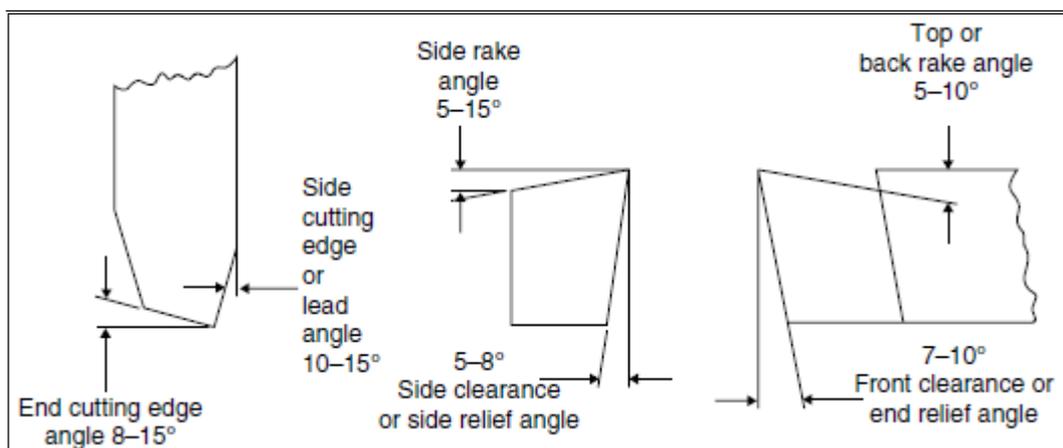
Gli acciai austenitici, a causa della difficoltà di lavorazione, richiedono generalmente utensili con un angolo di contatto laterale (side relief angle) di 10-15° e angoli di rilascio laterali (side rake angle) di 5-6° per evitare l'incrudimento [2].

Un problema si presenta nella tornitura di acciai inossidabili senza elementi leganti per aumentare la lavorabilità, in quanto si sviluppano generalmente dei trucioli molto lunghi che vanno ad impedire l'azione di taglio. Per evitare questo problema, si possono utilizzare dei rompi-trucioli per ridurre la dimensione dei chip o degli arricciatori di truciolo per ridurre l'ingombro di trucioli continui [2].

Utensili di carburi rivestiti possono essere usati per aumentare le velocità di lavorazione ma sono più rigidi quindi i tagli interrotti non sono applicabili [2].

Per concludere il taglio e permettere la rimozione dei trucioli si ha un angolo di scarico (end relief angle) che generalmente è compreso tra 10 e 15° ma deve essere diminuito a circa 5° se si usano diametri grandi e grosse profondità di passata

Uno schema degli angoli utilizzati in tornitura è mostrato nella Figura 5.



(Fig. 5 schema dell'utensile da taglio in tornitura a lama singola con valori tipici dei vari angoli [2])

**Foratura;** nella foratura, il materiale viene spinto dalla punta di taglio in rotazione verso l'esterno del tagliente. Questo movimento incrudisce il materiale, specialmente gli acciai austenitici [2].

Per buchi di piccole dimensioni, è possibile effettuare un trattamento di ricottura che diminuisce la durezza del materiale e la tendenza ad incrudire. D'altra parte, avere buone finiture superficiali occorre avere un materiale con durezza superiori che però porta a diminuire la vita utensile, quindi occorre trovare un compromesso tra buona forabilità e buona finitura superficiale [2].

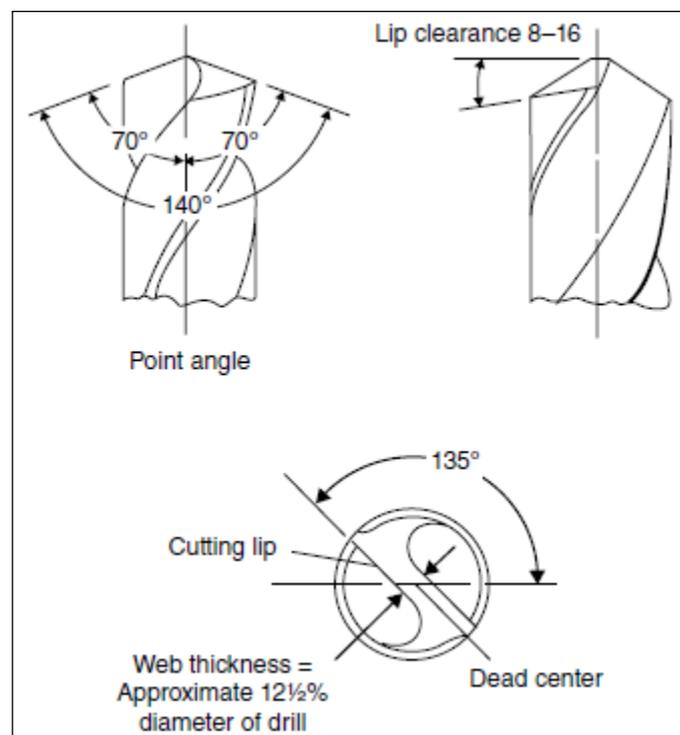
Punte con geometria delle lame a cono possono dare un incrudimento localizzato che rende difficile l'inizio dell'operazione, in quanto la punta tende a flettersi e a muoversi dalla zona di lavoro, specialmente per fori di piccole dimensioni [2].

Se i trucioli non vengono rimossi dalla zona di foratura, rischiano di generare attrito con la parete e causare intasamento e rottura della punta [2].

Per ottimizzare le operazioni di foratura occorre:

- Scegliere il macchinario, il refrigerante usato e la punta ottimale per il tipo di acciaio lavorato [2]
- Scegliere la punta più corta possibile e garantire adeguato fissaggio della punta e del materiale lavorato [2]
- Utilizzare velocità di taglio intermedie, funzioni del tipo di acciaio che viene lavorato in quanto velocità troppo elevate o troppo ridotte possono dare rottura della punta [2]
- Non avere tempi di permanenza dell'utensile sul fondo del foro che superi il tempo minimo per garantire una lavorazione adeguata, in quanto maggiore è il tempo di permanenza maggiore è l'incrudimento della zona terminale del foro [2]
- Utilizzare avanzamenti per giro della punta appropriati, in quanto aumentano la vita utensile [2]
- Utilizzare in generale avanzamenti per giro maggiori e velocità di taglio minori per ridurre l'incrudimento [2]
- Utilizzare macchinari che permettano un'operazione di taglio continua, in quanto la discontinuità del taglio genera problemi di finitura [2]
- Se la profondità del buco è minore di 3 volte il diametro, allora occorre ridurre l'avanzamento per giro e la velocità di taglio durante l'operazione di foratura del materiale [2]
- Utilizzare punte che siano senza difetti e non usurate [2]
- Utilizzare una piastra di fondo per evitare rotture della punta di taglio durante la creazione di fori passanti [2]
- Usare una quantità elevata di lubrificante e/o refrigerante diretto sulla punta di taglio [2]

Uno schema della geometria tipica delle punte utilizzate in foratura è mostrata nella Figura 6.



(Fig. 6 Geometria tipica di punte usate per la foratura [2])

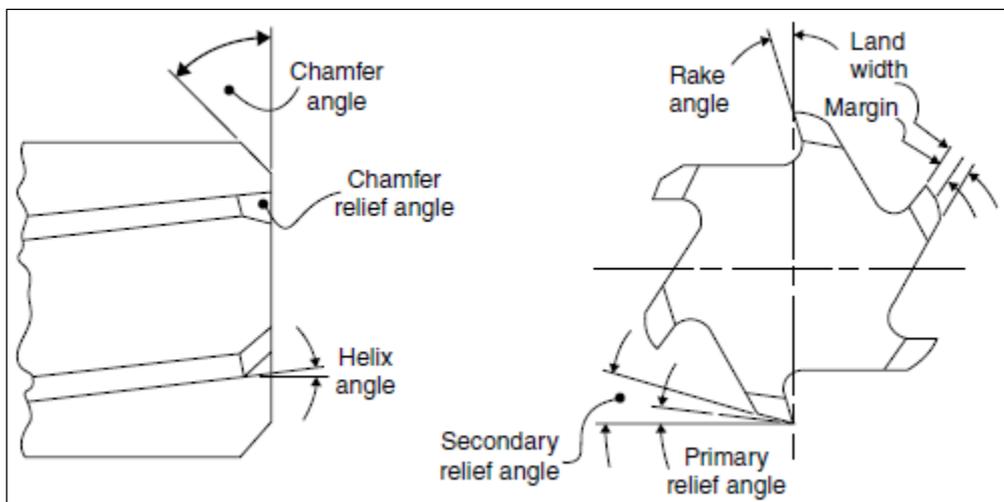
**Alesatura;** in cui si utilizza un utensile di taglio per migliorare l'assialità e il diametro dei fori.

Gli utensili solitamente utilizzati presentano punte dritte o con scanalature a spirale per la lavorazione di fori cilindri o conici, in particolare le punte con scanalature a spirale sono preferibili perché producono vibrazioni inferiori, riescono ad asportare con più facilità i trucioli dalla zona di lavorazione e danno una finitura superficiale in generale migliore delle punte dritte [2].

Se la direzione di taglio è in senso orario, spirali destrorse danno una maggiore azione di taglio rispetto a spirali orientate a sinistra. Il problema con le spirali destrorse è che tendono ad autoalimentarsi nel foro. Spirali a sinistra hanno una tendenza molto più bassa ad autoalimentarsi e vengono usate quando occorre un controllo molto preciso dell'avanzamento per giro [2].

I parametri di alesatura utilizzati per avere finiture superficiali elevate, prevedono l'utilizzo di velocità di taglio molto minori rispetto alla foratura. Fori con scarsa finitura o punte bruciate indicano una velocità di taglio troppo elevata. Anche i fluidi di taglio devono essere tenuti puliti per aumentare la finitura superficiale, in quanto l'alesatura produce trucioli molto sottili che tendono a galleggiare nel fluido, andando a ridurre la finitura superficiale, specialmente se è presente un sistema di ricircolo [2].

Uno schema di punta per alesatura è riportato nella Figura 7.



(Fig. 7 Geometria tipica di punte usate per la foratura [2])

**Fresatura;** processo in cui una testa rotante rimuove del materiale dalla superficie del pezzo in lavorazione per ottenere delle superfici piane o delle scanalature. Vengono utilizzate delle punte in acciaio da utensili e carburi rivestiti, queste ultime utilizzate soprattutto per materiali di difficile lavorazione [2].

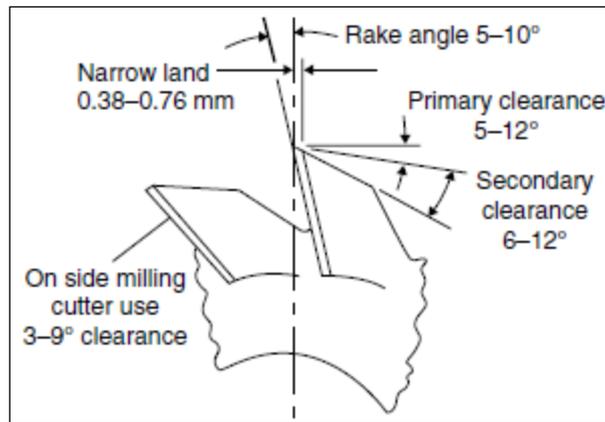
Finiture superficiali migliori si ottengono con punte con taglienti a spirale o elicoidali in acciai da utensili per velocità elevate [2].

In funzione del tipo di utensili da taglio è possibile modificare i parametri di processo. In particolare, punte a "dente grosso" permettono di utilizzare velocità maggiori e subire stress minori rispetto alle punte a "dente piccolo" [2].

Nel caso di operazioni di fresatura profonda, si possono creare dei problemi di vibrazioni e intaso delle punte da taglio da parte dei trucioli, problemi che possono essere risolti con l'utilizzo di una fresa a denti sfasati, che permette la fuoriuscita dei trucioli e evita le vibrazioni connesse al taglio del materiale [2].

Durante la lavorazione di un pezzo, se l'avanzamento per giro è troppo basso la superficie del materiale in lavorazione tende ad appannarsi, mentre se è troppo elevata la vita utensile ne risente. In generale, in operazioni di sgrossatura, la fresatura viene utilizzata con avanzamenti per giro più alti e velocità di taglio più basse rispetto alle operazioni di finitura [2].

Uno schema di utensile da taglio utilizzato per la fresatura di acciai inossidabili è dato dalla Figura 8.



(Fig. 8 Geometria tipica di punte usate per la fresatura [2])

**Brocciatura o spinatura;** Operazione che prevede la creazione di scanalature o di rifinitura di fori tramite l'utilizzo di una serie di taglianti. Questo tipo di operazione è rapida nella rimozione del materiale sia internamente che esternamente, dando a fine processo delle buone tolleranze [2].

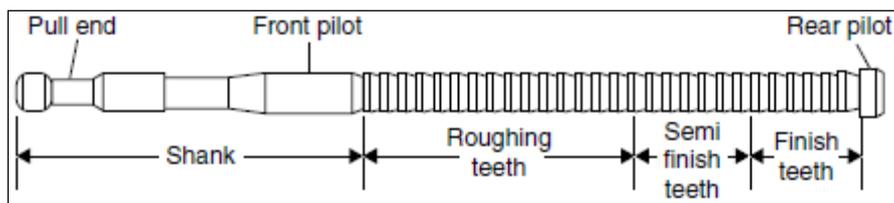
Esistono due classi di brocciatori o spinatori: verticali e orizzontali ed entrambi si dividono in interni ed esterni. Per operazioni di brocciatura esterna occorrono delle lavorazioni precedenti per preparare la superficie del materiale, mentre per brocciatura interna una pre-operazione di foratura generale è sufficiente [2].

Per evitare che si abbiano danni al macchinario e alla superficie del materiale, occorre impedire che i trucioli generati dalla lavorazione vengano rimossi, altrimenti tendono ad accumularsi sugli utensili da taglio. Un'altra fonte di danni è l'errato allineamento della broccia, in quanto fornisce un carico maggiore su un numero minore di denti [2].

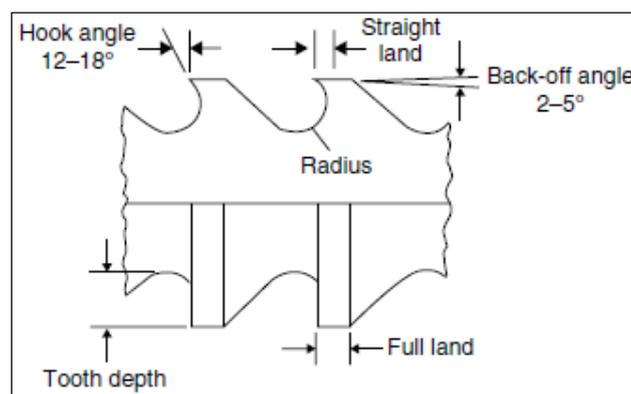
Le punte sono in generale in acciaio per utensili ottenute sia per vie convenzionali sia per metallurgia delle polveri, in quanto presentano una maggiore resistenza. Quando l'utensile perde il filo, l'unico modo di affilarlo è tramite una mola specifica o riportarla dal produttore [2].

Una procedura di brocciatura può incorporare sgrossatura e tagli di finitura semi finali e finali [2].

Uno schema delle punte da taglio generalmente utilizzate in brocciatura interna ed esterna sono riportati nelle Figure 9 – 10.



(Fig. 9 Geometria tipica di punte usate per la spinatura interna [2])



(Fig. 10 Geometria tipica di punte usate per la spinatura esterna [2])

**Rettifica** Operazione nel quale viene eseguito il molaggio del materiale per assicurarsi di ottenere le tolleranze richieste. Utensile utilizzato è solitamente in allumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o di carburo di silicio (SiC) [2]. Le tipiche velocità di lavorazioni della ruota per il molaggio sono di circa 1500-2000 [m/min]. Per rettifica superficiale, il banco di lavoro su cui è appoggiato il materiale da lavorare si muove con velocità di circa 15-30 [m/min] con avanzamenti per giro di 0.05 [mm/passata] per operazioni di sgrossatura e 0.013 [mm/passata] per le operazioni di finitura. Durante le operazioni di rettifica degli acciai inossidabili, a causa della conduttività termica ridotta rispetto ad altre classi di acciai, è necessario il refrigerante [2].

## Acciai inossidabili a lavorabilità aumentata

Esistono, in generale, due possibilità per aumentare la lavorabilità degli acciai.

La prima prevede l'aggiunta di elementi leganti solitamente non voluti che permettono la formazione di inclusioni non metalliche con proprietà meccaniche più basse della matrice circostante, che fungono da punti di propagazione delle cricche e quindi da "rompi-truciolo" oltre che da lubrificanti tra la punta da taglio e il materiale, a discapito però delle proprietà di resistenza a corrosione e di resistenza meccanica [2].

La seconda è attraverso trattamenti, in genere di deformazione meccanica a freddo, che hanno come risultato l'aumento della durezza e delle proprietà meccaniche in generale, a discapito della duttilità e della formabilità della lega [2].

Entrambe le tecniche di aumento della lavorabilità verranno affrontate di seguito.

### Aumento lavorabilità con aggiunta di elementi leganti

Essendo che gli acciai inossidabili sono difficilmente lavorabili a causa dell'incrudimento e la tendenza a gripparsi durante il taglio, sono state sviluppate delle leghe per tutte le classi di acciai inossidabili che lo consentono, definite a lavorabilità aumentata, che utilizzano specifici elementi in lega per migliorare la lavorabilità in quanto formano delle fasi infragilenti nella matrice per favorire le operazioni di asportazione di truciolo [2].

L'aggiunta di questi elementi causa la diminuzione o la perdita di alcune proprietà caratteristiche degli acciai inossidabili, quali la resistenza a corrosione, le proprietà meccaniche, la lavorabilità a caldo, la formabilità a freddo (intesa come la capacità di deformare plasticamente il materiale a freddo) e la saldabilità, per cui è fondamentale bilanciare l'incremento della lavorabilità con il mantenimento delle caratteristiche che rendono la lega di partenza inossidabile [2].

Gli elementi più utilizzati per aumentare la lavorabilità sono:

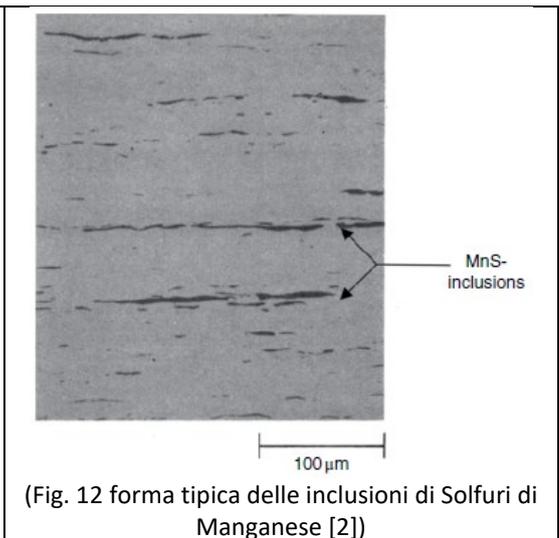
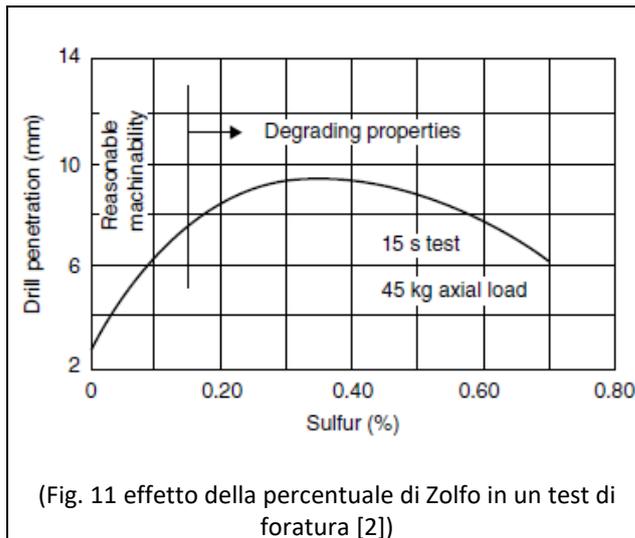
1. **Zolfo (S)**; l'aggiunta di questo elemento fornisce un aumento della vita utensile e della lavorabilità con perdita di proprietà meccaniche direttamente proporzionale con l'incremento della percentuale di Zolfo [2].

Le inclusioni a base Zolfo hanno la duplice funzione di ridurre la lunghezza del truciolo in modo che non vada ad interagire con la punta di taglio generando grippaggio e di fungere da lubrificante allo stato solido grazie all'elevata duttilità di queste inclusioni [2] [3].

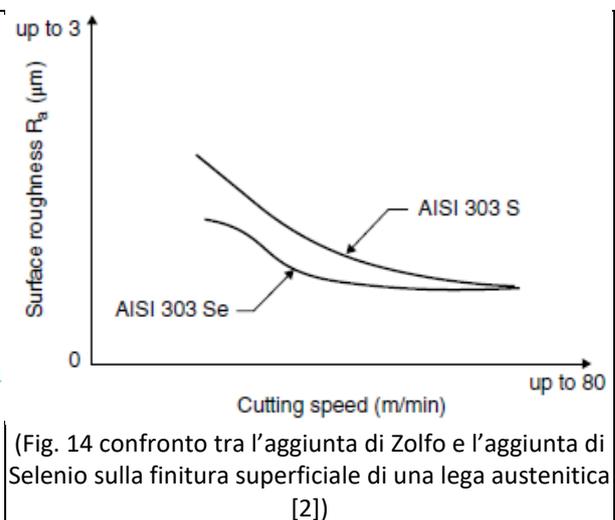
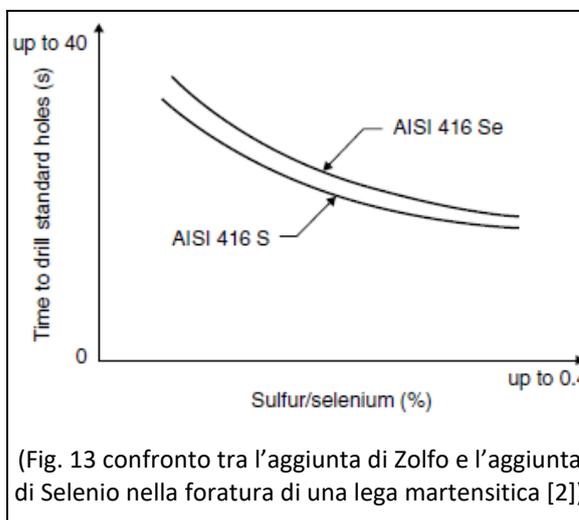
Aggiunte possibili fino ad una percentuale di 0,3-0,35%, pari a circa 10 volte il limite per le leghe non pensate per aumentare la lavorabilità. Oltre la soglia massima dello 0,35% si ha di nuovo una diminuzione di lavorabilità legata al fatto che oltre quei livelli di Zolfo, si perde il fattore di lubrificazione allo stato solido che le fasi basso fondenti a base Zolfo presentano ad elevate velocità di taglio, garantendo solo la diminuzione della lunghezza del truciolo [2].

I solfuri sono presenti come composti, generalmente sotto forma di Solfuri di Manganese (MnS), a meno che la lega non presenti una bassa concentrazione di Manganese. Maggiore è la concentrazione di Manganese e migliore è l'effetto sulla lavorabilità a discapito della resistenza a corrosione del pezzo. Per migliorare la res a corrosione mantenendo la stessa concentrazione di Zolfo si può utilizzare Titanio [2]. Una presenza di solfuri di grandi dimensioni con forma globulare fornisce un aumento maggiore alla lavorabilità rispetto a una distribuzione di solfuri sottili e allungati [2]. Un'alta concentrazione di solfuri aumenta la lavorabilità e la vita utensile ma riduce la finitura superficiale [2].

La variazione di resistenza meccanica ad un test di penetrazione in foratura in funzione della percentuale di Zolfo e la forma dei Solfuri di manganese sono mostrati nelle Figure 11 - 12.



2. **Selenio (Se)**; Il Selenio ha un utilizzo analogo allo Zolfo, in quanto forma composti di Seleniuro di Manganese (MnSe), che presentano proprietà meccaniche e funzionali analoghe con alle inclusioni date dallo Zolfo [2]. Le differenze tra i due elementi sono nelle regioni di utilizzo, in quanto lo Zolfo è tendenzialmente più utilizzato in Europa mentre il Selenio trova maggiore utilizzo negli Stati Uniti. Inoltre, l'utilizzo del Selenio presenta come vantaggio una migliore finitura superficiale rispetto all'utilizzo dello Zolfo, ma a parità di percentuale aggiunta l'effetto dello Zolfo sull'incremento della lavorabilità è maggiore. Possono essere aggiunti in contemporanea per ottenere Solfuri più grandi e globulari, che danno un incremento maggiore alla lavorabilità delle leghe [2].
- Il confronto tra l'aggiunta di Zolfo e l'aggiunta di Selenio nella lega per quanto riguarda la lavorabilità di una lega Martensitica, misurata in una operazione di foratura, e la finitura superficiale per quanto riguarda delle leghe Austenitiche è mostrato nei grafici sottostanti (Figure 13 - 14).

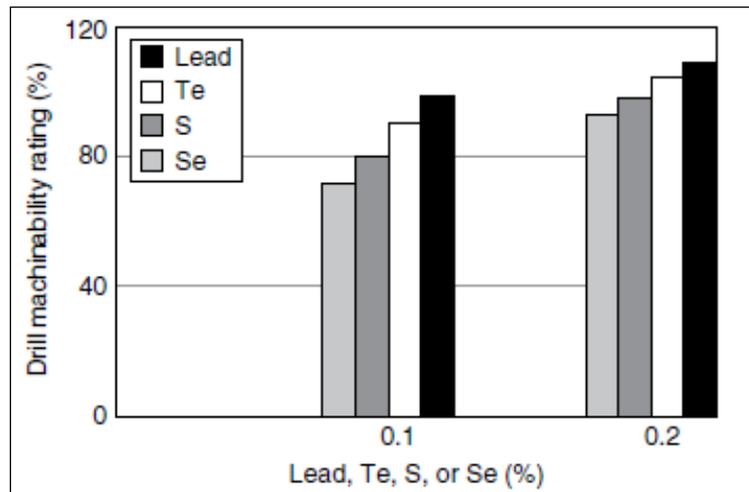


3. **Tellurio (Te)**; stesso comportamento dello Zolfo e del Selenio, in quanto forma composti con il manganese (MnTe). Come il Selenio può essere usato per favorire la formazione di inclusioni grosse e globulari per quanto riguarda i solfuri di Manganese [2]. Il Tellurio fornisce un migliore incremento della lavorabilità rispetto allo Zolfo e al Selenio, ma provoca la perdita di lavorabilità a caldo soprattutto nelle leghe austenitiche [2].
4. **Piombo (Pb) e Bismuto (Bi)**; presentano una bassa solubilità nell'acciaio e formano inclusioni che aumentano la lavorabilità. In particolare, il Piombo fornisce un incremento maggiore rispetto ad altri elementi leganti (compreso lo Zolfo) alla lavorabilità, alla finitura superficiale, resistenza alla corrosione e alla lavorabilità a freddo. Il problema con l'utilizzo del Piombo nelle leghe è la tossicità

dello stesso, oltre alla riduzione della lavorabilità a caldo e a problemi di dispersione, in quanto è difficile avere una distribuzione uniforme nell'acciaio [2].

5. Fosforo (P); a differenza degli altri elementi leganti che creano inclusioni esterne alla matrice, il Fosforo modifica la matrice rendendola più fragile, aumentando la facilità di rottura dei trucioli durante le operazioni di asportazione di truciolo. In generale viene aggiunto assieme allo Zolfo e al Selenio [2].

Il confronto dell'aumento della lavorabilità, misurata in un test di foratura, tra i vari elementi leganti che causano la formazione di inclusioni non metalliche in un acciaio austenitico [2] è mostrato nella Figura 15.



(Fig. 15 Confronto della lavorabilità di un acciaio austenitico a parità di diversi elementi leganti in foratura [2])

In generale, le leghe che presentano elementi leganti che aumentano la lavorabilità vengono impiegate quando le proprietà meccaniche sono di secondaria importanza rispetto alla facilità di lavorazione [1] [2] [3]. Non è correntemente possibile avere leghe ad alta lavorabilità per acciai Duplex e per acciai indurenti per precipitazione, in quanto gli acciai duplex si distinguono dalle altre classi per la buona resistenza a corrosione e una buona lavorabilità a caldo, mentre gli acciai inossidabili indurenti per precipitazione presentano buona resistenza a sollecitazioni alte, caratteristiche che andrebbero perse con l'aggiunta di elementi leganti che aumentano la lavorabilità [2] [3].

### Aumento lavorabilità senza elementi leganti

Per le varie classi di acciai inossidabili, è possibile anche adottare delle tecniche di lavorazione differenti che permettono alla lega di migliorare la lavorabilità senza aggiunta di elementi leganti che andrebbero ad indebolire caratteristiche importanti come la resistenza alla corrosione [2].

Per ogni classe di acciai vengono elencate le possibili soluzioni che non riguardano l'aggiunta di elementi leganti che favoriscano la lavorabilità a discapito delle proprietà meccaniche e di resistenza a corrosione [2].

**Leghe Austenitiche;** in generale sono le leghe che presentano maggiori problematiche nelle lavorazioni per asportazione di truciolo in quanto presentano:

- incrudimento maggiore rispetto alle altre leghe, problema specialmente a bassi avanzamenti per giro [2]
- duttilità maggiore delle altre leghe, dando quindi una rottura non omogenea del truciolo del chip e generano built up edge [2]
- minore conducibilità termica rispetto alle altre leghe tendendo quindi a scaldarsi più facilmente [2]
- coefficienti di espansione termica maggiori, tendendo quindi a dare imperfezioni e basse finiture superficiali [2]
- vibrazioni elevate quando l'utensile di taglio non è sufficientemente rigido [2]

Per ridurre le problematiche legate sopra citate senza aggiunta di elementi leganti, si utilizza la deformazione a freddo prima della lavorazione all'utensile. La deformazione diminuisce la duttilità dando trucioli più omogenei e riducendo il built up edge in quanto si riduce la duttilità della lega, andando inoltre a migliorare la finitura superficiale, ma diminuendo leggermente la vita utensile [2].

Aggiunte di Carbonio e Azoto aumentano le proprietà meccaniche della lega in quanto aumentano le proprietà meccaniche della lega, ma ad alte percentuali diminuiscono la lavorabilità per lo stesso motivo [2]. Elementi con una forte tendenza a formare Carburi/Nitruri possono dare precipitazione a bordo grano e possono ridurre la resistenza alla corrosione intergranulare e inoltre diminuiscono la vita utensile a causa del comportamento abrasivo, in quanto i Carburi hanno durezza generalmente elevate [2].

**Leghe ferritiche e Martensitiche;** in generale, l'Influenza sulla lavorabilità per le leghe martensitiche (oltre alla presenza di elementi leganti) è data da:

- la durezza [2]
- dal contenuto di Carbonio, in quanto si ha una diminuzione della lavorabilità per leghe martensitiche con aumento della percentuale di Carbonio. Ad alti contenuti di Carbonio, sia in presenza di elementi leganti che aumentano la lavorabilità della lega sia in loro assenza, si formano dei carburi di cromo che hanno comportamento abrasivo sull'utensile, aumentandone l'usura [2].
- Dal contenuto di Nichel, in quanto si ha un aumento della durezza della fase ricotta [2]
- Dal rapporto tra la ferrite  $\alpha$  libera e ferrite  $\delta$  presenti con la matrice martensitica, in quanto un aumento della ferrite diminuisce le proprietà meccaniche e la durezza, rendendo la lega martensitica più facile da lavorare [2]

**Leghe duplex;** la lavorazione degli acciai duplex è complicata a causa della durezza elevata dopo rinvenimento, in quanto si verifica martellamento di trucioli e lo sviluppo di una grande quantità di calore con la lavorazione di questi materiali che causano rispettivamente usura da cratere sull'utensile e deformazione plastica sul pezzo lavorato [2].

Non esistono versioni ad alta lavorabilità per le leghe duplex a causa delle proprietà di lavorabilità a caldo e di resistenza a corrosione che non vogliono essere perse.

**Leghe Indurenti per precipitazione;** le condizioni di lavorazione di questa classe di acciai inossidabili dipende del tipo di matrice che possiedono. In particolare, le leghe martensitiche possono essere lavorate nella condizione a lavorabilità aumentata, prima dei trattamenti termici oppure possono essere lavorate nella condizione solubilizzata, su cui successivamente alla lavorazione occorre eseguire il trattamento di invecchiamento per raggiungere la condizione di durezza desiderata, ma la durezza iniziale è resta sufficientemente alta da abbassare la lavorabilità rispetto alla condizione a lavorabilità elevata.

Anche le leghe austenitiche soffrono dei relativi problemi riguardanti i trattamenti termici della matrice [2].

# Modellizzazione Una Variabile Alla Volta (UVAV)

## Introduzione

In un qualunque processo di lavorazione meccanica di materiali metallici sono presenti delle variabili indipendenti che vanno a influire sulle caratteristiche finali del pezzo lavorato [2]. Queste variabili sono:

1. Materiale lavorato (composizione e struttura metallografica)
2. Geometria iniziale del materiale lavorato
3. Tipo di lavorazione
4. Materiale e geometria dell'utensile da taglio
5. Parametri di taglio (velocità di taglio, avanzamento per passata e profondità di taglio)
6. Strutture di supporto del materiale lavorato (materiale e geometria)
7. Lubrificanti di taglio

Dal punto di vista dello sviluppo del protocollo, molte di queste variabili possono essere considerate costanti e quindi rimosse dallo studio.

In particolare, il tipo di lavorazione viene concentrato su una lavorazione di tornitura in quanto, da uno studio aziendale svolto dalla Cogne Acciai speciali s.p.a., risulta come una grossa percentuale delle lavorazioni svolte sui pezzi finiti sia la tornitura, eseguita sia in operazioni di sgrossatura sia in operazioni di finitura. Il primo passo del progetto prevede lo studio delle operazioni di tornitura in sgrossatura.

Il macchinario utilizzato per le operazioni di tornitura, un tornio a controllo numerico modello Okuma LB 2000 EX II [4], viene utilizzato con lo stesso operatore durante tutte le prove eseguite. Le strutture di supporto dei pezzi in lavorazione non vengono modificate prima, durante e dopo la lavorazione dei pezzi.

Il modello di utensile da taglio utilizzato, un utensile di carburo di tungsteno [6] rivestito con TiN e TiAlN depositati per PVD marca DNMG 15 06 08 – MR 2035 utilizzato per la sgrossatura [5], viene utilizzato sempre in tutte le prove e sostituito alla fine di ogni prova per assicurarsi di non avere misurazioni errate a causa di una rottura del tagliente.

Il lubrificante utilizzato è un lubrorefrigerante a base d'olio minerale miscibile in acqua modello Blaser BLASOCUT 2000 Universal [7], ed è l'unico refrigerante che viene utilizzato per l'operazione di tornitura.

Il materiale da lavorare viene fornito al tornio in provini cilindrici di 34 [mm] di diametro e lunghezza di 150 [mm]. La tornitura avviene per una lunghezza di 120 [mm] lungo l'asse del pezzo in modo da evitare il contatto tra l'utensile da taglio e il mandrino e per assicurare una sufficiente zona libera per i sistemi di afferraggio.

I termini che restano come variabili dipendenti sono i parametri di taglio e il materiale da tornire.

I materiali che verranno torniti saranno acciai austenitici AISI 304 ad elevata lavorabilità. Si andranno a testare 3 differenti marche che differiscono per contenuto di elementi leganti legati al miglioramento della lavorabilità.

I termini di velocità di taglio, avanzamento per giro e profondità di passata sono i termini che verranno modificati nelle varie prove in modo da misurare la risposta dei singoli materiali e valutare eventuali differenze tra gli stessi [2].

Le variabili dipendenti del processo [2] sono:

1. Forze di taglio e potenza di taglio; forze influenzano formazione di chip, potenza influenza calore generato e usura utensile
2. Geometria del prodotto finito
3. Finitura superficiale
4. Vita utensile
5. Costi
6. Aspetti ecologici

Tra tutte le risposte, molte dipendono da una singola risposta del materiale misurabile in funzione dei parametri di taglio.

In particolare, i costi e gli aspetti ecologici sono entrambi dipendenti dalla Potenza sviluppata dal macchinario [30]. In particolare, il costo dell'energia e l'emissione di CO<sub>2</sub> sono direttamente proporzionali con la potenza utilizzata, quindi minimizzando la potenza di taglio si riducono l'impatto ambientale e il costo di produzione [30].

La geometria del prodotto finito non viene considerata perché il processo di tornitura utilizzato prevede una semplice riduzione di diametro di un provino cilindrico quindi la geometria all'inizio e alla fine del processo non cambia.

Lo studio della potenza di taglio può essere ricondotto allo studio delle Pressioni in quanto in tornitura la potenza di taglio [8] [9] è definita dalla Formula (3)

$$(3) \quad P_c = \frac{s * f * DoC * k_c}{60 * 10^3 * \eta}$$

Dove:

s è la velocità di taglio (speed), espressa in [m/min] [8] [9]

f è l'avanzamento per giro (feed), espresso in [mm/rev] [8] [9]

DoC è la profondità di passata (Depth of Cut), espressa in [mm] [8] [9]

k<sub>c</sub> è la pressione di taglio o anche detta la forza di taglio specifica, espressa in [Mpa] [8] [9]

η è un coefficiente che dipende dalla macchina di tornitura utilizzata [8] [9]

La rugosità superficiale non verrà considerata in quanto le prove che verranno eseguite si concentrano solo sulle lavorazioni in sgrossatura, che hanno come obiettivo principale quello di asportare una elevata quantità di volume dal materiale senza concentrarsi sulla rugosità superficiale che verrà portata in tolleranza da passate successive di finitura [30].

Le variabili dipendenti del processo restano l'usura utensile e lo studio delle Forze/Pressioni.

Tutti i parametri verranno studiati in termini di Forza tramite un Dinamometro Kistler 9129AA con Amplificatore Kistler 5167A81DK per misurare le forze esercitate sull'utensile da parte dei parametri di processo e del materiale tornito [10] e saranno visualizzate tramite software Dynoware 2825D-03.

Considerato l'uso del Dinamometro, il primo passo dello sviluppo del protocollo riguarderà lo studio delle Forze e lo studio delle Pressioni attraverso esperimenti una variabile alla volta. Le marche testate saranno nominate Marca 1, Marca 2 e Marca 3 (per motivi di segreto industriale).

L'obiettivo è quello di verificare in prima istanza se esistono differenze individuabili sperimentalmente al Tornio e, nel caso esistano, come queste differenze impattino sulla costruzione di un modello in grado di predire l'andamento delle variabili indipendenti in funzione delle variabili di velocità di taglio, avanzamento per giro e profondità di passata.

Il modello per la previsione delle forze e delle pressioni normali verrà ottenuto tramite uno studio di analisi di varianza e di regressione su dati di Forza e Pressione ottenuto tramite esperimenti "Una Variabile Alla Volta"

## Teoria dell'analisi di varianza e della regressione

### Analisi di varianza [15]

L'analisi di varianza è lo strumento statistico che permette di identificare l'influenza dei singoli fattori sulla risposta. L'analisi viene fatta studiando vari parametri in modo da confermare o rifiutare un'ipotesi statistica. L'ipotesi da verificare consiste nell'identificare se i vari gruppi di dati testati presentano una media di gruppo uguale tra i vari gruppi oppure esiste almeno un gruppo per cui la media non è uguale alle altre [14] [15], secondo le Formule (4) – (5).

$$(4) \quad H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_p$$

$$(5) \quad H_A : \exists i, j \mid \mu_i \neq \mu_j \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, p)$$

Dove:

$H_0$  è l'ipotesi iniziale

$H_A$  è l'ipotesi alternativa

$\mu$  è la media di un gruppo dei  $p$  gruppi dati presenti

$p$  totale dei gruppi di dati

I Parametri che servono per confermare l'ipotesi  $H_0$  o  $H_A$  sono:

1. devianza (SS) [15]; questo studio restituisce la devianza (anche detta somma dei quadrati degli scarti) dei dati dalla media delle osservazioni effettuate. Le devianze calcolate sono 3
  - Devianza tra trattamenti ( $SS_B$ ) [15]; definisce la somma del quadrato degli scarti di ogni media di gruppo dalla media generale, il tutto moltiplicato per il numero di dati nel gruppo (o numero di osservazioni). Viene calcolata come descritto dalla Formula (6).

$$(6) \quad SS_B = \sum_{j=1}^p n_j * (\bar{X}_j - \bar{X})^2$$

Dove:

$p$  è il numero di gruppi di dati totali

$n_j$  è il numero di osservazioni e quindi la numerosità di ogni gruppo

$X_j$  è la media del gruppo  $j$ -esimo

$X$  è la media generale

- Devianza entro trattamenti o errore ( $SS_W$ ) [15]; definisce la somma del quadrato degli scarti di ogni valore dalla media del suo gruppo. Viene definita come descritto dalla Formula (7).

$$(7) \quad SS_W = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_j)^2$$

Dove:

$p$  è il numero di gruppi di dati totali

$n_j$  è il numero di osservazioni e quindi la numerosità di ogni gruppo

$X_j$  è la media del gruppo  $j$ -esimo

$X_{ij}$  è il singolo valore

- Devianza totale ( $SS_T$ ) [15]; definisce la somma del quadrato degli scarti di ogni valore dalla media generale. Viene descritto come definito dalla Formula (8).

$$(8) \quad SS_T = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X})^2 = SS_B + SS_W$$

Dove:

$p$  è il numero di gruppi di dati totali

$n_j$  è il numero di osservazioni e quindi la numerosità di ogni gruppo

$X_j$  è la media del gruppo  $j$ -esimo

$X$  è la media generale

2. Gradi di libertà (df) [15]: servono per calcolare le medie dei quadrati (MS) e corrispondono al numero di somme indipendenti richieste per il calcolo delle devianze relative. Vengono calcolati in maniera diversa per le singole devianze e valgono:

- Per la devianza tra trattamenti ( $SS_B$ ) [15], i gradi di libertà ( $df_B$ ) corrispondono al numero di somme indipendenti su una sommatoria di  $p$  gruppi di dati e viene descritta dalla Formula (9).

$$(9) \quad df_B = p - 1$$

Dove:

$p$  è il numero di gruppi di dati totali

- Per la devianza entro trattamenti o errore ( $SS_W$ ) [15], i gradi di libertà ( $df_W$ ) corrispondono al numero di somme indipendenti su una sommatoria di  $n_j$  dati in ogni serie di dati  $p$  e viene descritta dalla Formula (10).

$$(10) \quad df_W = \sum_{j=1}^p (n_j - 1) = n - p$$

Dove:

$p$  è il numero di gruppi di dati totali

$n_j$  è il numero di osservazioni e quindi la numerosità di ogni gruppo

$n$  è il numero totale di dati

- Per la devianza totale ( $SS_T$ ) [15], i gradi di libertà ( $df_T$ ) corrisponde al numero di somme indipendenti su una sommatoria di tutti i dati e viene descritta dalla Formula (11).

$$(11) \quad df_T = n - 1$$

Dove:

$n$  è il numero totale di dati

3. Medie dei quadrati (MS) [15]: eseguita in quanto lo studio della devianza tende ad avere una grandezza che cresce con l'aumentare del numero di dati (o osservazioni). Per ovviare a questo problema si considerano le medie dei quadrati ottenute come il rapporto tra le somme dei quadrati e i rispettivi gradi di libertà. Viene eseguita solo per i valori tra trattamenti e di errore, descritte dalle Formule (12) – (13), mentre quella totale (essendo una combinazione lineare tra le due) non è solitamente studiata.

Media dei quadrati tra trattamenti [15]

$$(12) \quad MS_B = \frac{SS_B}{df_B}$$

Media dei quadrati di errore [15]

$$(13) \quad MS_W = MS_E = \frac{SS_W}{df_W}$$

Si ha inoltre che grazie al metodo con cui vengono calcolate le medie dei quadrati esse siano anche, rispettivamente, delle stime della varianza  $\sigma_B^2$  e  $\sigma_W^2$ .

4. Parametro F [15]: studiato come il rapporto tra la media dei quadrati tra trattamenti e la media di errore e utilizzato per studiare quale delle due ipotesi è valida. L'indice F viene descritto dalla Formula (14)

$$(14) \quad F = \frac{MS_B}{MS_W}$$

Se l'indice F è basso,  $MS_B < MS_W$  e si accetta  $H_0$

Se l'indice F è alto,  $MS_B > MS_W$  e si accetta  $H_A$

5. Parametro P [15]: il parametro P è definito come la probabilità che il valore di F sia maggiore o minore di un valore predefinito della funzione F di Fisher-Snedecor.

La funzione F di Fisher-Snedecor è una distribuzione lognormale [13] definita tra  $(0; +\infty)$  e descritta dalla Formula (15).

$$(15) \quad y = f(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{x * \sigma * \sqrt{2\pi}} * \exp\left\{-\frac{(\log(x) - \mu)^2}{2 * \sigma^2}\right\}$$

Dove:

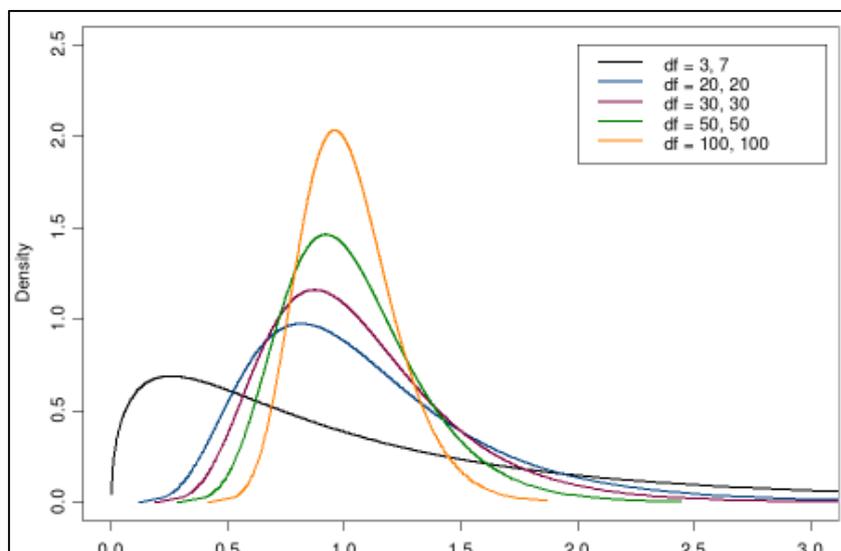
y è il valore che assume la funzione di Fisher-Snedecor

x sono i valori dei dati

$\mu$  è la media dei dati

$\sigma$  è la varianza dei dati

Dal punto di vista grafico, la distribuzione lognormale è descritta nella figura 16.



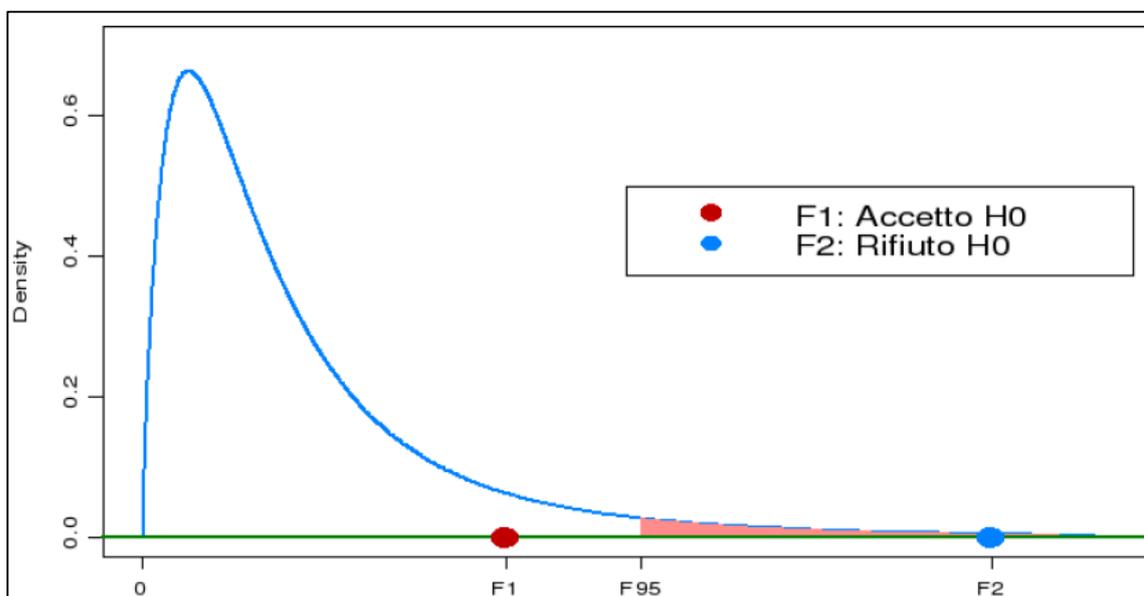
(Fig. 16 esempio di distribuzioni lognormali di Fischer-Snedecor [13])

Si ha che il parametro F tende a distribuirsi secondo una F di Fisher-Snedecor con  $df_B = p-1$  e  $df_W = n-p$  gradi di libertà, se l'ipotesi  $H_0$  è verificata. Questo definisce una probabilità P che il valore  $F_{(p-1)(n-p)}$  sia maggiore del fattore F (calcolato come il rapporto delle medie dei quadrati dei valori) pari o superiore ad un livello di probabilità  $\alpha$  (generalmente posto uguale a 0,05 o 5%) se vale l'ipotesi  $H_0$  mentre se vale l'ipotesi  $H_A$  la probabilità sarà minore del livello di probabilità  $\alpha$  [13] [15]. In termini matematici, la validità dell'ipotesi  $H_0$  o  $H_A$  è descritta dalle Formule (16) – (17).

$$(16) \quad H_0 \text{ valida se } P(F_{(p-1),(n-p)} > F) \geq \alpha$$

$$(17) \quad H_A \text{ valida se } P(F_{(p-1),(n-p)} > F) < \alpha$$

In termini grafici, gli intervalli di validità delle ipotesi sono mostrati dalla Figura 17.



(Fig. 17 schema grafico della definizione di validità delle ipotesi dell'ANOVA [15])

I valori F di Fisher-Snedecor con  $\alpha = 0,05$  sono tabellati [23] [24] come mostrato nella Figura 18.

Critical Values of the <i>F</i> -Distribution: $\alpha = 0.05$										
Denom. d.f.	Numerator Degrees of Freedom									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161.448	199.500	215.707	224.583	230.162	233.986	236.768	238.883	240.543	241.882
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385	19.396
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.786
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.687	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.848	2.796	2.753
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.621	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236
26	4.225	3.369	2.975	2.743	2.587	2.474	2.388	2.321	2.265	2.220
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.572	2.459	2.373	2.305	2.250	2.204
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.558	2.445	2.359	2.291	2.236	2.190
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.545	2.432	2.346	2.278	2.223	2.177
30	4.171	3.316	2.922	2.690	2.534	2.421	2.334	2.266	2.211	2.165
31	4.160	3.305	2.911	2.679	2.523	2.409	2.323	2.255	2.199	2.153
32	4.149	3.295	2.901	2.668	2.512	2.399	2.313	2.244	2.189	2.142
33	4.139	3.285	2.892	2.659	2.503	2.389	2.303	2.235	2.179	2.133
34	4.130	3.276	2.883	2.650	2.494	2.380	2.294	2.225	2.170	2.123
35	4.121	3.267	2.874	2.641	2.485	2.372	2.285	2.217	2.161	2.114
36	4.113	3.259	2.866	2.634	2.477	2.364	2.277	2.209	2.153	2.106
37	4.105	3.252	2.859	2.626	2.470	2.356	2.270	2.201	2.145	2.098
38	4.098	3.245	2.852	2.619	2.463	2.349	2.262	2.194	2.138	2.091
39	4.091	3.238	2.845	2.612	2.456	2.342	2.255	2.187	2.131	2.084
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.449	2.336	2.249	2.180	2.124	2.077
41	4.079	3.226	2.833	2.600	2.443	2.330	2.243	2.174	2.118	2.071
42	4.073	3.220	2.827	2.594	2.438	2.324	2.237	2.168	2.112	2.065
43	4.067	3.214	2.822	2.589	2.432	2.318	2.232	2.163	2.106	2.059
44	4.062	3.209	2.816	2.584	2.427	2.313	2.226	2.157	2.101	2.054
45	4.057	3.204	2.812	2.579	2.422	2.308	2.221	2.152	2.096	2.049
46	4.052	3.200	2.807	2.574	2.417	2.304	2.216	2.147	2.091	2.044
47	4.047	3.195	2.802	2.570	2.413	2.299	2.212	2.143	2.086	2.039
48	4.043	3.191	2.798	2.565	2.409	2.295	2.207	2.138	2.082	2.035
49	4.038	3.187	2.794	2.561	2.404	2.290	2.203	2.134	2.077	2.030
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.400	2.286	2.199	2.130	2.073	2.026
60	4.001	3.150	2.758	2.525	2.368	2.254	2.167	2.097	2.040	1.993
70	3.978	3.128	2.736	2.503	2.346	2.231	2.143	2.074	2.017	1.969
80	3.960	3.111	2.719	2.486	2.329	2.214	2.126	2.056	1.999	1.951
90	3.947	3.098	2.706	2.473	2.316	2.201	2.113	2.043	1.986	1.938
100	3.936	3.087	2.696	2.463	2.305	2.191	2.103	2.032	1.975	1.927
120	3.920	3.072	2.680	2.447	2.290	2.175	2.087	2.016	1.959	1.910
140	3.909	3.061	2.669	2.436	2.279	2.164	2.076	2.005	1.947	1.899
180	3.894	3.046	2.655	2.422	2.264	2.149	2.061	1.990	1.932	1.884
200	3.888	3.041	2.650	2.417	2.259	2.144	2.056	1.985	1.927	1.878
$\infty$	3.841	2.996	2.605	2.372	2.214	2.099	2.010	1.938	1.880	1.831

(Fig. 18 valori critici della funzione *F* di Fisher-Snedecor con  $\alpha = 0,05$ , in funzione dei gradi di libertà tra trattamenti ( $df_B$ ) e dei gradi di libertà dell'errore ( $df_W$ ) [23] [24])

Alla fine dell'analisi di varianza, ciò che valuta l'importanza di una variabile nella risposta è il valore del parametro *P*. In particolare, minore sarà il suo valore e maggiore sarà l'importanza della variabile sulla risposta, mentre se la probabilità supera il valore di 0,05 la variabile non avrà influenza sulla risposta [15].

## Regressione lineare [16]

Il modello di regressione viene sviluppato successivamente utilizzando i valori considerati importanti sulla risposta a seguito dell'analisi di varianza. Il modello utilizzato è un modello di regressione lineare multipla in quanto più di una variabile indipendente influisce sulla risposta. Per poter applicare la regressione [16], la forma della risposta deve seguire la Formula (18).

$$(18) \quad y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^p (\beta_i * x_i) + \varepsilon_i$$

Dove:

$y_i$  è la risposta osservata i-esima

$\beta_0$  è il coefficiente che il valore della risposta quando le variabili indipendenti valgono 0

$\beta_i$  sono i coefficienti delle variabili indipendenti deterministiche

$x_i$  sono le variabili indipendenti i-esime

$p$  è il numero di variabili indipendenti

$\varepsilon_i$  è l'errore casuale associato ad una osservazione i-esima

Si avrà che la stima della risposta [16] sarà data dalla Formula (19).

$$(19) \quad \hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^p (\hat{\beta}_i * x_i)$$

Dove:

$\hat{y}_i$  è la risposta stimata i-esima dal modello di regressione

$\hat{\beta}_0$  è il coefficiente stimato che determina l'incremento medio della risposta in funzione dell'incremento di una variabile indipendente

$\hat{\beta}_i$  sono la stima dei coefficienti delle variabili indipendenti

$x_i$  sono le variabili indipendenti i-esime

$p$  è il numero di variabili indipendenti

l'errore associato al modello [16] sarà dato dalla Formula (20).

$$(20) \quad e_i = y_i - \hat{y}_i$$

Dove:

$e_i$  è l'errore associato al modello applicato ad un'osservazione i-esima

$y_i$  è la risposta osservata i-esima

$\hat{y}_i$  è la risposta stimata i-esima dal modello di regressione

i coefficienti  $\hat{\beta}$  [16] vengono calcolati secondo il criterio dei minimi quadrati ordinari, per cui si cercano quei valori che minimizzano la somma dei quadrati dei residui. Considerando il numero di osservazioni e il numero di variabili, il criterio dei minimi quadrati viene applicato in termini matriciali come descritto dalla Formula (21).

$$(21) \quad \underline{\hat{\beta}} = \min_{\underline{\beta}} \left\{ \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i; \underline{\beta})]^2 \right\}$$

Dove:

$\underline{\hat{\beta}}$  è il vettore dei coefficienti stimati di lunghezza  $p$

$n$  è la lunghezza del vettore delle risposte

$y_i$  è l'i-esima risposta del vettore  $Y$  lungo  $n$

$p$  è il numero di variabili indipendenti

$\beta$  è il vettore di lunghezza  $p+1$  dei coefficienti delle variabili indipendenti ( $p+1$  perché si considera anche il coefficiente  $\beta_0$ )

$x_i$  rappresenta la i-esima riga della matrice  $X$  di dimensioni  $n * (p+1)$  delle variabili indipendenti

$f(x_i; \beta)$  rappresenta una funzione lineare delle variabili indipendenti

I coefficienti ottenuti indicheranno anche se la risposta sarà direttamente o inversamente proporzionale alla variabile indipendente in funzione del segno del coefficiente [16].

- Se il valore è maggiore di 0, l'andamento della risposta sarà direttamente proporzionale all'andamento della variabile indipendente.
- Se il valore è minore di 0, l'andamento della risposta sarà inversamente proporzionale all'andamento della variabile indipendente.

**Grafico di Pareto:** questo grafico fornisce una rappresentazione visiva dei contributi di tutti i termini studiati dal modello sulla risposta. Viene utilizzato soprattutto nel caso la tabella dell'analisi di varianza presenti molte variabili per dare una indicazione più intuitiva dell'influenza di tutti i parametri sulla risposta, ma può essere in ogni caso [19].

Il grafico si riferisce al valore "t-value" fornito dalla regressione lineare a seguito del calcolo dei coefficienti di ogni componente [18].

Il valore "t-value" viene calcolato andando a rapportare ogni coefficiente ottenuto con il suo errore standard. Per una regressione lineare semplice [18], l'errore standard dei coefficienti viene descritto dalla Formula (22).

$$(22) \quad SE_{coef_i} = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

Dove:

$SE_{coef_i}$  è l'errore standard del coefficiente i-esimo

$s$  è la radice quadrata della media dei quadrati di errore del modello ( $MS_W$  o  $MS_E$ ),  $s = \sqrt{MS_E}$

$x_i$  sono le variabili indipendenti i-esime

$\bar{x}$  è la media associata ai valori delle variabili indipendenti

Per una regressione lineare multipla [17], il numero di coefficienti è maggiore, per cui la formula descritta prima viene riarrangiata in termini matriciali, restituendo la Formula (23).

$$(23) \quad SE_{coef_i} = (\underline{X}' \underline{X})^{-1} s^2$$

Dove:

$SE_{coef_i}$  è l'errore standard del coefficiente i-esimo

$\underline{X}$  è la matrice delle variabili indipendenti di dimensione  $n * p + 1$

$n$  è la lunghezza del vettore delle risposte

$p$  è il numero di variabili indipendenti

$\underline{X}'$  è la trasposta della matrice delle variabili indipendenti

$s^2$  è la media dei quadrati di errore ( $MS_W$  o  $MS_E$ )

Una volta stabilito il valore dell'errore standard dei coefficienti, il valore t-value [18] viene descritto dalla Formula (24).

$$(24) \quad t_i = \frac{\hat{\beta}_i}{SE(\hat{\beta}_i)}$$

Dove:

$t_i$  è il valore t per l'i-esimo coefficiente

$\hat{\beta}_i$  è la stima del coefficiente i-esimo della variabile indipendente i-esima

$SE(\hat{\beta}_i)$  è il l'errore standard del coefficiente i-esimo

Le variabili significative vengono valutate rispetto ad un test t, anche detto "t di student" che restituisce un valore univoco funzione solo del livello di probabilità  $\alpha$  e dei gradi di libertà [18] [19].

Dal punto di vista matematico la t di student [13] è descritta dalla Formula (25).

$$(25) \quad t_v = \frac{Z}{\sqrt{\frac{\chi^2}{v}}}$$

Dove:

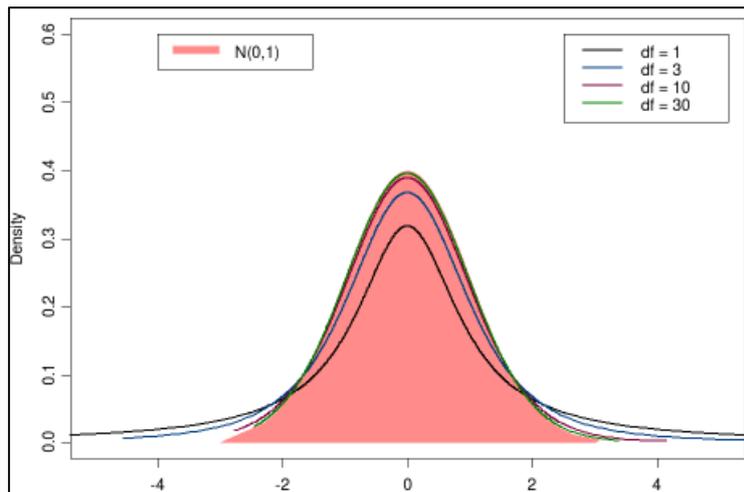
$t_v$  è il valore della variabile casuale t di student

Z è una variabile casuale standardizzata

$\chi^2$  è una variabile casuale data dalla somma dei quadrati di una serie di variabili distribuite seguendo la curva normale (quindi con media = 0 e varianza = 1) e dipendente soltanto dai gradi di libertà (che sono pari al numero di variabili distribuite normalmente)

v gradi di libertà della funzione  $\chi^2$

Graficamente la t di student [13] si presenta come descritto nella Figura 19.



(Fig. 19 distribuzione di una t di student in funzione dei gradi di libertà [13])

Il valore di t di student, fissato il numero di variabili e il livello di probabilità, è nota e tabulata [20] [21] [22], come mostrato dalla Figura 20.

<b>t Table</b>											
cum. prob	$t_{.50}$	$t_{.75}$	$t_{.80}$	$t_{.85}$	$t_{.90}$	$t_{.95}$	$t_{.975}$	$t_{.99}$	$t_{.995}$	$t_{.999}$	$t_{.9995}$
one-tail	0.50	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
two-tails	1.00	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
df											
1	0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.385	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.308	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.000	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.000	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.000	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.000	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.000	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.000	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.000	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.000	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.000	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.000	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.000	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.000	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.000	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.000	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.000	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.000	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.058	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.000	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.000	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.000	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.000	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	0.000	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.000	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
80	0.000	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
100	0.000	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
1000	0.000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300
<b>Z</b>	0.000	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291
	0%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99.8%	99.9%
	<b>Confidence Level</b>										

(Fig. 20 valori critici per la funzione t di student per vari livelli di confidenza e gradi di libertà (df) [20] [21] [22])

Viene fissato un valore limite nel grafico di Pareto che corrisponde a un valore di t di student ottenuto con  $\alpha$  pari a 0.05 e con un numero di gradi di libertà corrispondente al numero di gradi di libertà di errore restituiti dall'analisi di varianza. Tutti i valori standardizzati che presentano un valore t di student maggiore del valore critico stabilito avranno influenza sulla risposta, mentre quelli minori non ne avranno. La rappresentazione grafica è proporzionale all'entità di contributo che il valore ha sulla risposta ma non della proporzionalità in quanto tutti i valori vengono espressi in valore assoluto [19].

La significatività di un modello di regressione (cioè quanto un modello descrive bene i dati forniti) viene studiata tramite il concetto dell'indice di determinazione ( $R^2$ ) [16] [18]. Questo indice definisce la quota di variabilità della variabile dipendente che il modello riesce a spiegare.

Per definire l'indice di determinazione occorre conoscere il valore delle devianze dei coefficienti e dei residuali. Le devianze, o somma dei quadrati (SS), sono:

1. Devianza della componente "spiegata" della regressione ( $SS_E$ ) [16], che indica quanto della variabilità della variabile dipendente viene spiegata dal modello e viene descritta dalla Formula (26).

$$(26) \quad SS_E = \sum_{i=1}^n (f(x_i; \underline{\beta}) - \bar{y})^2$$

Dove:

$SS_E$  è la devianza "spiegata" del modello di regressione

$\bar{y}$  è la media dei valori delle variabili dipendenti

$n$  è la lunghezza del vettore delle risposte

$\underline{\beta}$  è il vettore di lunghezza  $p+1$  dei coefficienti delle variabili indipendenti ( $p+1$  perché si considera anche il coefficiente  $\beta_0$ )

$\underline{x}_i$  rappresenta la  $i$ -esima riga della matrice  $\underline{X}$  di dimensioni  $n * (p+1)$  delle variabili indipendenti

$f(\underline{x}_i; \underline{\beta})$  rappresenta una funzione lineare delle variabili dipendenti

2. Devianza dei residui ( $SS_R$ ) [16], che misura la parte di variabilità della variabile dipendente che non viene spiegata dal modello e viene descritta dalla Formula (27).

$$(27) \quad SS_R = \sum_{i=1}^n \left( y_i - f(\underline{x}_i; \underline{\beta}) \right)^2$$

Dove:

$SS_R$  è la devianza dei residui del modello di regressione

$y_i$  è il valore  $i$ -esimo della variabile dipendente

$n$  è la lunghezza del vettore delle risposte

$\underline{\beta}$  è il vettore di lunghezza  $p+1$  dei coefficienti delle variabili indipendenti ( $p+1$  perché si considera anche il coefficiente  $\beta_0$ )

$\underline{x}_i$  rappresenta la  $i$ -esima riga della matrice  $\underline{X}$  di dimensioni  $n * (p+1)$  delle variabili indipendenti

$f(\underline{x}_i; \underline{\beta})$  rappresenta una funzione lineare delle variabili dipendenti

3. Devianza totale ( $SS_T$ ) [16], che descrive la variabilità complessiva del sistema e viene descritta dalla Formula (28).

$$(28) \quad SS_T = SS_E + SS_R = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Dove:

$SS_T$  è la devianza totale del modello di regressione

$SS_R$  è la devianza dei residui del modello di regressione

$SS_E$  è la devianza "spiegata" del modello di regressione

$\bar{y}$  è la media dei valori delle variabili dipendenti

$y_i$  è il valore  $i$ -esimo della variabile dipendente

$n$  è la lunghezza del vettore delle risposte

L'indice  $R^2$  sintetizza le relazioni tra le componenti di varianza [16] e viene definito dalla Formula (29).

$$(29) \quad R^2 = \frac{SS_E}{SS_T} = 1 - \left( \frac{SS_R}{SS_T} \right)$$

Dove:

$R^2$  è l'indice di determinazione

$SS_T$  è la devianza totale del modello di regressione

$SS_R$  è la devianza dei residui del modello di regressione

$SS_E$  è la devianza "spiegata" del modello di regressione

$R^2$  restituisce un valore compreso tra 0 e 1 [16] dove:

- Se  $R^2 = 1$ , tutta la variabilità viene descritta dalla funzione di regressione
- Se  $R^2 = 0$ , la variabilità non viene descritta dalla funzione di regressione

L'indice  $R^2$  ha la possibilità di essere aumentato tendendo ad 1 dalla sola introduzione di variabili esplicative, che però tendono ad abbassare la validità generale del modello, in quanto tendono ad essere esplicative solo

nel caso particolare e non hanno validità generale [16]. Per ovviare a questo problema si ricorre all'indice "R<sup>2</sup> aggiustato" (o corretto) [16], il quale restituisce un valore compreso tra 0 e 1 con la possibilità di restituire anche valori inferiori a 0. La possibilità di restituire valori negativi è legata al fatto che l'indice R<sup>2</sup> corretto presenta un fattore di correzione che dipende dal numero di variabili esplicative [16]. Questo coefficiente va a ridurre l'accuratezza del modello per ogni variabile esplicativa introdotta. L'indice R<sup>2</sup> corretto [16] è descritto dalla Formula (30).

$$(30) \quad \overline{R^2} = 1 - \left[ \left( \frac{n-1}{n-p-1} \right) * \left( \frac{SS_R}{SS_T} \right) \right] = 1 - \left[ \left( \frac{n-1}{n-p-1} \right) * (1 - R^2) \right]$$

Dove:

R<sup>2</sup> è l'indice di determinazione aggiustato o corretto

n è la lunghezza del vettore delle risposte

p è il numero di variabili indipendenti

(n-1)/(n-p-1) è il fattore di correzione

SS<sub>T</sub> è la devianza totale del modello di regressione

SS<sub>R</sub> è la devianza dei residui del modello di regressione

R<sup>2</sup> è l'indice di determinazione

Un buon modello presenta sia R<sup>2</sup> che  $\overline{R^2}$  prossimi all'unità [16] [18].

## Parte sperimentale Una variabile alla volta

### prove preliminari

Gli esperimenti vengono eseguiti tenendo fisse due delle 3 variabili indipendenti e variando la terza in modo da testare tutti i valori generalmente utilizzati nell'ambito della sgrossatura. I valori tenuti fissi sono stati presi come valori solitamente utilizzati nella sgrossatura. Le prove sono state effettuate su diversi materiali, tutti differenti nuances dell'AISI 304 a lavorabilità aumentata.

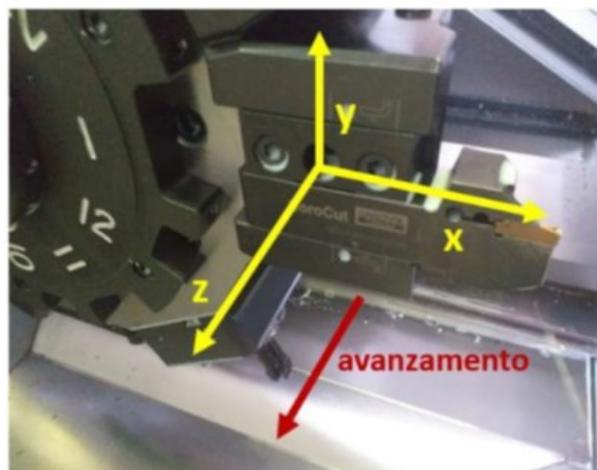
I valori usati sperimentalmente sono espressi nella Tabella 1.

speed variabile			feed variabile			DoC variabile		
Speed [m/min]	Feed [mm/rev]	DoC [mm]	Speed [m/min]	Feed [mm/rev]	DoC [mm]	Speed [m/min]	Feed [mm/rev]	DoC [mm]
50	0,2	1,5	150	0,05	1,5	150	0,2	0,5
100	0,2	1,5	150	0,1	1,5	150	0,2	1
150	0,2	1,5	150	0,15	1,5	150	0,2	1,5
225	0,2	1,5	150	0,2	1,5	150	0,2	2
200	0,2	1,5	150	0,25	1,5	150	0,2	2,5
250	0,2	1,5	150	0,3	1,5	150	0,2	3

(Tabella 1 valori di velocità di taglio, avanzamento per giro e profondità di passata utilizzati nelle prove Una variabile Alla Volta)

Da queste prove tramite un dinamometro sono state rilevate le forze agenti sul tagliente divise come:

- Forza assiale ( $f_x$ ), forza diretta nella direzione assiale del pezzo, stessa direzione dell'avanzamento per giro (feed), espressa in [N]
- Forza radiale ( $f_y$ ), forza diretta nella direzione radiale del pezzo, espressa in [N]
- Forza di Taglio ( $f_z$ ), forza diretta nella direzione perpendicolare all'asse del pezzo, espressa in [N]



(Fig. 21 schema della posizione delle 3 forze rispetto alla posizione dell'utensile all'interno del tornio okuma LB 2000 EX II)

Da queste forze rilevate direttamente si è estrapolata la Forza normale ( $F_n$ ) in modo da studiare una singola risposta derivante dalle forze misurate [1] [25]. La forza normale è descritta dalla Formula (31).

$$(31) \quad F_n = \sqrt{(f_x^2 + f_y^2 + f_z^2)}$$

Le pressioni applicate sul tagliente [26] [27] sono descritte dalla Formula (32).

$$(32) \quad F_i = k_i * A_c$$

Dove:

$k_i$  è la pressione i-esima sul tagliente, espressa in [N/mm<sup>2</sup>]

$F_i$  è la forza i-esima sul tagliente, espressa in [N]

$A_c$  è l'area di contatto, espressa in [mm<sup>2</sup>]

L'area di contatto [26] è espressa dalla Formula (33).

$$(33) \quad A_c = t_c * w = (feed * \cos(\psi_s)) * \left( \frac{DoC}{\cos(\psi_s)} \right) = feed * DoC$$

Dove:

$A_c$  è l'area di contatto, espressa in [mm<sup>2</sup>]

$t_c$  è lo spessore del truciolo non tagliato

$w$  è la profondità di passata effettiva

$\psi_s$  è l'angolo del tagliente

$feed$  è l'avanzamento per giro, espresso in [mm/rev]

$Doc$  è la profondità di passata, espressa in [mm]

Sostituendo nella Formula (33) ed esplicitando il valore della pressione [26], si ottiene la Formula (34).

$$(34) \quad k_i = \frac{F_i}{(DoC * feed)}$$

Dove:

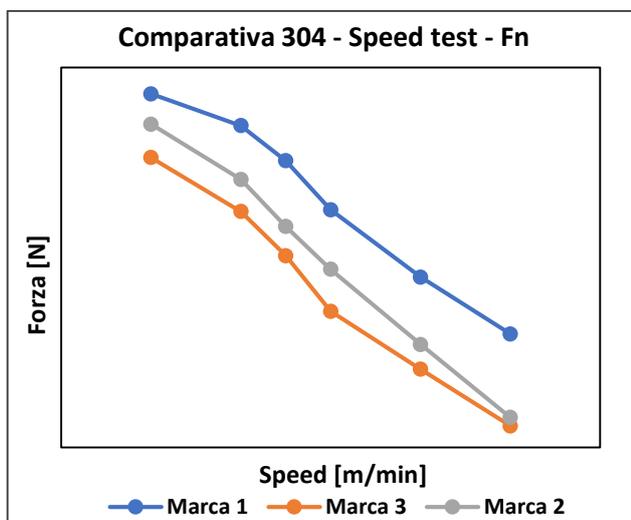
$k_i$  è la pressione i-esima sul tagliente, espressa in [N/mm<sup>2</sup>]

$F_i$  è la forza i-esima sul tagliente, espressa in [N]

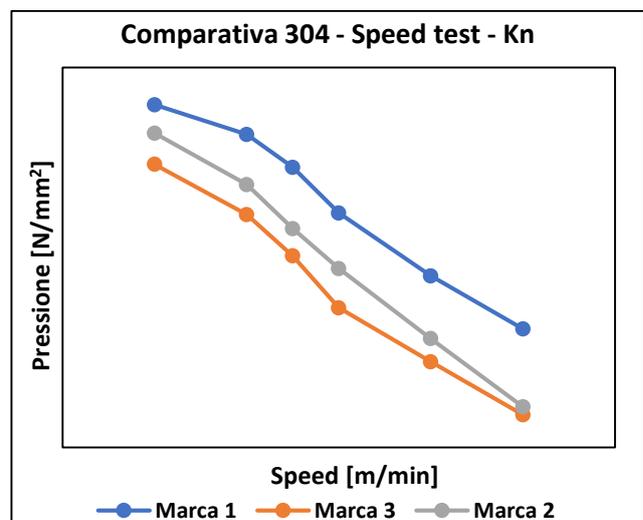
$feed$  è l'avanzamento per giro, espresso in [mm/rev]

$Doc$  è la profondità di passata, espressa in [mm]

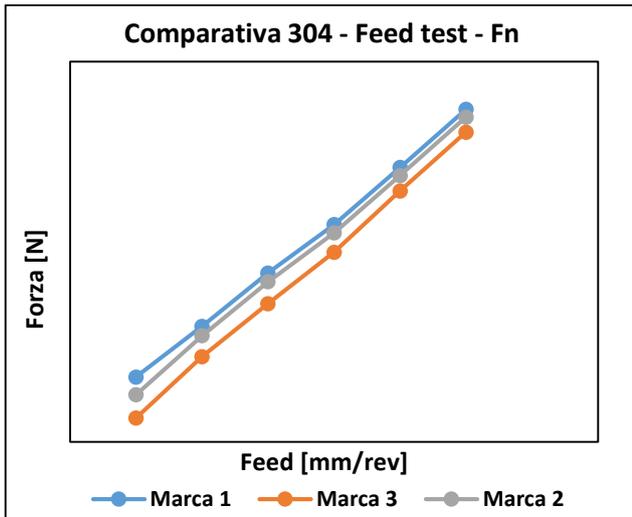
Da queste prove si studia l'andamento delle forze e delle pressioni normali in funzione dei parametri per i diversi materiali ottenendo i grafici sottostanti (Figura 22 – 27). I valori numerici delle forze e delle pressioni normali ottenute nelle prove viene omissso per motivi di segreto industriale.



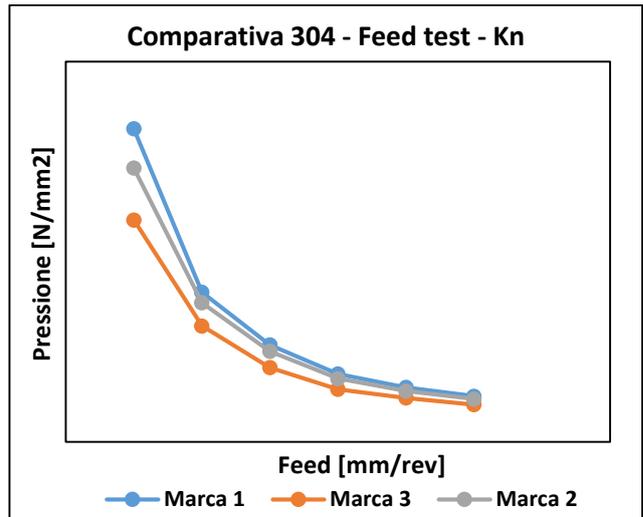
(Fig. 22 rappresentazione della Forza normale (Fn) per tutti i materiali nella prova a velocità di taglio (speed) variabile)



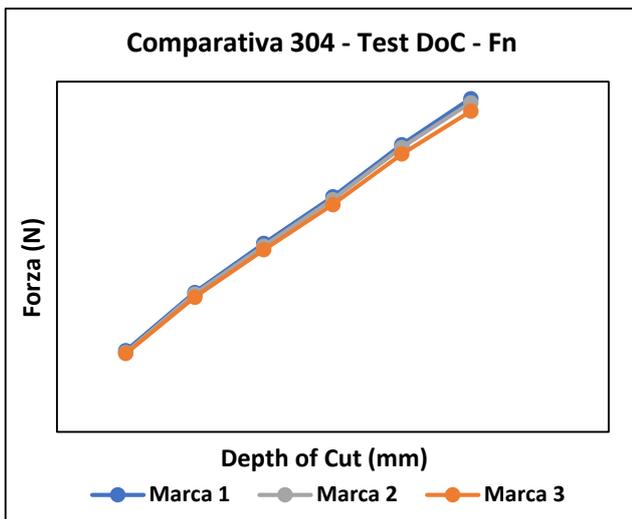
(Fig. 23 rappresentazione della Pressione normale (kn) per tutti i materiali nella prova a velocità di taglio (speed) variabile)



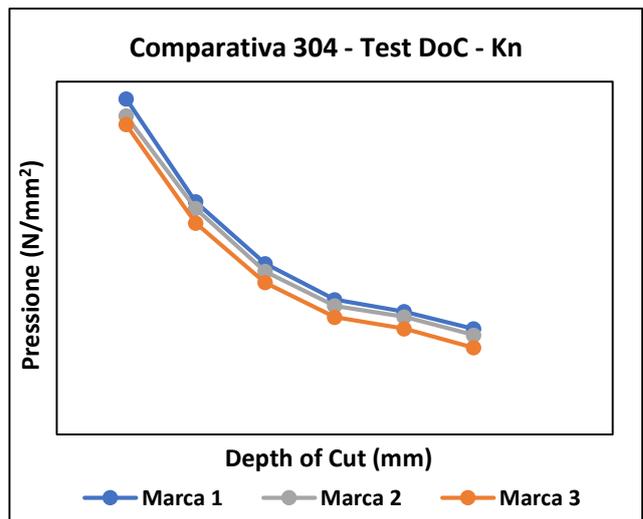
(Fig. 24 rappresentazione della Forza normale (Fn) per tutti i materiali nella prova ad avanzamento per giro (feed) variabile)



(Fig. 25 rappresentazione della Pressione normale (kn) per tutti i materiali nella prova ad avanzamento per giro (feed) variabile)



(Fig. 26 rappresentazione della Forza normale (Fn) per tutti i materiali nella prova a profondità di passata (DoC) variabile)



(Fig. 27 rappresentazione della Pressione normale (kn) per tutti i materiali nella prova a profondità di passata (DoC) variabile)

Dai grafici si può osservare come i valori dell'energia assorbita corrispondenti alla migliore condizione di taglio per i diversi campioni mostrano un'energia adsorbita leggermente inferiore rispetto alla lavorazione dell'Marca 1 (tra 2,5% - 3,67% per la velocità di taglio (speed), tra 3,62% - 10,27% per l'avanzamento per giro (feed) e tra 1,38% - 3,46% per la profondità di passata (DoC))

Un'estrapolazione puramente grafica viene eseguita per individuare i valori di taglio ottimali. In particolare, considerato che i valori ottimali sono quelli che permettono lo sviluppo di una energia minima sul tagliente, ci si concentra sui grafici ottenuti per la Pressione normale (kn). Dal punto di vista grafico, i punti che minimizzano l'energia sono i punti che corrispondono agli estremi superiori dell'intervallo di dati testati, che sono 250 [m/min] per la velocità di taglio (speed), 0.3 [mm/rev] per l'avanzamento per giro (feed) e 3 [mm] per la profondità di passata (DoC). Questi punti però, corrispondono a condizioni di tornitura molto onerosi per quanto riguarda l'usura utensile.

Tenendo conto della vita utensile, i punti ottimali vengono scelti nell'inizio del plateau per l'avanzamento per giro (feed), pari a circa 0.2 [mm/rev], e per la profondità di passata (DoC), pari a circa 0.2 [mm]. Per la velocità di taglio (speed), l'ottimale viene posto nella zona di flesso delle curve, a circa 150 [m/min].

## Modello Una Variabile Alla Volta

Successivamente si utilizzano i dati ottenuti nelle prove preliminari per studiare il comportamento del materiale e individuare un modello che sia in grado di descrivere l'andamento di una risposta (vita utensile, Forza normale (Fn), rugosità superficiale ecc) in funzione delle 3 variabili indipendenti di tornitura (considerate velocità di taglio (speed), avanzamento per giro (feed) e profondità di passata (DoC)).

Il modello viene sviluppato tramite una analisi di varianza (per studiare l'influenza delle singole variabili indipendenti sulla risposta) e una regressione lineare multipla (per definire un'equazione lineare che spieghi l'andamento della risposta in funzione delle variabili indipendenti).

Per poter applicare una regressione lineare occorre che la relazione tra le variabili indipendenti sia lineare. L'equazione di Taylor generalizzata [11] [12] è la formula che lega la vita utensile in tornitura del materiale ai parametri di velocità di taglio (speed), avanzamento per giro (feed) e profondità di passata (DoC). Può essere scritta secondo la Formula (35):

$$(35) \quad K_t = s * T^n * f^a * DoC^b$$

Dove:

s è la velocità di taglio [m/min]

f è l'avanzamento per giro in [mm/rev]

DoC è la profondità di passata in [mm]

T è il tempo per ottenere l'usura sul fianco critica (VB<sub>B</sub>), espresso in [min] [1] [2] [11] [12] [44]

K<sub>t</sub> è una costante

a, b, n sono valori dipendenti da processo, materiale della punta di taglio e del pezzo lavorato

Dalla Formula (35) è possibile ottenere la vita utensile in funzione delle variabili indipendenti di taglio attraverso i passaggi descritti dalle Formule (36) – (38):

$$(36) \quad T^n = K_T * s^{-1} * f^{-a} * DoC^{-b}$$

$$(37) \quad T = K_T' * s^{-\left(\frac{1}{n}\right)} * f^{-\left(\frac{a}{n}\right)} * DoC^{-\left(\frac{b}{n}\right)}$$

$$(38) \quad T = K * s^\alpha * f^\beta * DoC^\gamma$$

Dove:

K, α, β, γ sono delle nuove costanti sempre dipendenti dai materiali lavorati, della punta e dalle condizioni di processo

Utilizzando la formula di Taylor in forma generalizzata, si ipotizza una nuova formula con la stessa forma che possa dare come risultati altre risposte dipendenti dalle variabili di processo nella tornitura (ad esempio il la Forza normale, l'energia assorbita, la rugosità superficiale ecc) [1].

Considerati gli esperimenti preliminari svolti in precedenza, si è deciso di iniziare a sviluppare modelli per la Forza normale (Fn) e per la Pressione normale (kn). La formula della risposta assume la forma [1] [25] descritta dalla Formula (39).

$$(39) \quad R = C * s^n * f^m * DoC^l$$

Dove:

R è la risposta del materiale, in questo caso la Forza normale (Fn) in [N] o la Pressione normale (kn) in [N/mm<sup>2</sup>]

C è una costante che dipende dal materiale dell'utensile, dal materiale tornito e dai parametri di processo

s è la velocità di tornitura espressa in [m/min]

f è l'avanzamento per giro espresso in [mm/rev]

DoC è la profondità di passata espressa in [mm]

$n, m, l$  sono esponenti numerici costanti ma univoci per ogni materiale dipendenti dal materiale dell'utensile, dal materiale tornito e dai parametri di processo

La linearizzazione della Formula (39) viene fatta tramite l'utilizzo dei logaritmi [1], ottenendo la Formula (40).

$$(40) \quad \ln(R) = \ln(C) + n * \ln(s) + m * \ln(f) + l * \ln(DoC)$$

Dove:

$R$  è la risposta del materiale, in questo caso la Forza normale ( $F_n$ ) in [N] o la Pressione normale ( $k_n$ ) in [N/mm<sup>2</sup>]

$C$  è una costante che dipende dal materiale dell'utensile, dal materiale tornito e dai parametri di processo

$s$  è la velocità di tornitura espressa in [m/min]

$f$  è l'avanzamento per giro espresso in [mm/rev]

DoC è la profondità di passata espressa in [mm]

$n, m, l$  sono esponenti numerici costanti ma univoci per ogni materiale dipendenti dal materiale dell'utensile, dal materiale tornito e dai parametri di processo

Dalla Formula (40), la regressione [1] restituirà una equazione generale descritta dalla Formula (41).

$$(41) \quad \ln(R') = C' + n * \ln(s) + m * \ln(f) + l * \ln(DoC)$$

Dove:

$R'$  è la risposta del materiale modellizzata, in questo caso la Forza normale ( $F_n$ ) in [N] o la Pressione normale ( $k_n$ ) in [N/mm<sup>2</sup>]

$C'$  è una costante che dipende dal materiale dell'utensile, dal materiale tornito e dai parametri di processo e che tiene conto sia del valore di  $\ln(C)$  sia del valore dell'errore associato al modello

$s$  è la velocità di tornitura espressa in [m/min]

$f$  è l'avanzamento per giro espresso in [mm/rev]

DoC è la profondità di passata espressa in [mm]

$n, m, l$  sono esponenti numerici costanti ma univoci per ogni materiale dipendenti dal materiale dell'utensile, dal materiale tornito e dai parametri di processo

L'errore del modello rispetto ai dati sperimentali sarà misurato come i residui del modello rispetto ai valori sperimentali [1] [16] normalizzati sui valori sperimentali, in modo da osservare lo scarto percentuale., espresso dalla Formula (42).

$$(42) \quad \varepsilon = \frac{(\ln(R') - \ln(R))}{\ln(R)}$$

Dove:

$\varepsilon$  è l'errore dei valori ottenuti con il modello rispetto ai valori ottenuti sperimentalmente, normalizzato sui valori sperimentali ed espresso in [%]

$R'$  è la risposta del materiale modellizzata, in questo caso la Forza normale ( $F_n$ ) in [N] o la Pressione normale ( $k_n$ ) in [N/mm<sup>2</sup>]

$R$  è la risposta del materiale, in questo caso la Forza normale ( $F_n$ ) in [N] o la Pressione normale ( $k_n$ ) in [N/mm<sup>2</sup>]

Dalla Formula (40), si può inoltre notare come la Formula (34) applicata per Forze e pressioni normali, mostrata nella Formula (43), permetta l'individuazione di una semplice relazione tra le linearizzazioni, descritta dalla Formula (47). I passaggi sono mostrati dalle Formule (44) – (47).

$$(43) \quad k_n = \frac{F_n}{(DoC * feed)}$$

Linearizzando la Formula (43), si ottiene la Formula (44).

$$(44) \quad \ln(k_n) = \ln(F_n) - \ln(f) - \ln(DoC)$$

Dalla Formula (40) applicata alla Forza normale si ottiene la Formula (45).

$$(45) \quad \ln(F_n) = \ln(C) + n * \ln(s) + m * \ln(f) + l * \ln(DoC)$$

Sostituendo la Formula (45) nella Formula (44) si ottiene la Formula (46).

$$(46) \quad \ln(k_n) = \ln(C) + n * \ln(s) + m * \ln(f) + l * \ln(DoC) - \ln(f) - \ln(DoC)$$

Eseguendo i calcoli, si ottiene la Formula (47).

$$(47) \quad \ln(k_n) = \ln(C) + n * \ln(s) + (m - 1) * \ln(f) + (l - 1) * \ln(DoC)$$

Dove:

$F_n$  è la Forza normale misurata sul tagliente, espressa in [N]

$K_n$  è la Pressione normale sviluppata sul tagliente, espressa in [N/mm<sup>2</sup>]

$C$  è una costante che dipende dal materiale dell'utensile, dal materiale tornito e dai parametri di processo

$s$  è la velocità di taglio espressa in [m/min]

$f$  è l'avanzamento per giro espresso in [mm/rev]

$DoC$  è la profondità di passata espressa in [mm]

$n, m, l$  sono esponenti numerici costanti ma univoci per ogni materiale dipendenti dal materiale dell'utensile, dal materiale tornito e dai parametri di processo

Visto che quindi le due risposte del materiale sono collegate, in realtà lo sviluppo completo dei due modelli non sarebbe necessario in quanto esiste una semplice correlazione tra le due linearizzazioni.

Lo studio sulle Pressioni verrà comunque eseguito per assicurarsi l'effettiva presenza di questa correlazione e per studiare eventuali differenze nelle risposte e negli andamenti, in quanto la pressione ricavata dalle forze è correlato con l'energia e di conseguenza con la potenza di taglio. Questa correlazione [28] [29] è descritta dalla Formula (48).

$$(48) \quad H = U + (k * V)$$

Dove:

$H$  è l'entalpia, misurata in [J]

$U$  è l'energia interna, misurata in [J]

$k$  è la pressione, misurata in [N/m<sup>2</sup>]

$V$  è il volume, misurato in [m<sup>3</sup>]

Dalla Formula (48) si può ricavare come la pressione sia una misura di energia per unità di volume, come mostrato dalla Formula (49).

$$(49) \quad H = U + (k * V) = [J] \rightarrow k * V = [J] \rightarrow k = \left[ \frac{J}{m^3} \right]$$

## Sviluppo dei modelli di Regressione

Si utilizza il software Minitab 18 per eseguire l'analisi di varianza e la regressione lineare multipla sui dati ottenuti dalle prove. Il software restituisce le equazioni di regressione e le tabelle di analisi di varianza per le 3 marche analizzate. Il software Minitab 18 è progettato in modo da attribuire comunque un valore a tutte le variabili, anche se ritenute trascurabili dall'analisi di varianza.

I valori delle Forze, delle pressioni e dei coefficienti dei modelli di regressione ottenuti sono stati omessi per motivi di segreto industriale.

### Marca 1

#### Forza normale

L'analisi di varianza dei dati sperimentali per la Marca 1 è mostrata nella Figura 28.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	1,83964	0,61321	232,15	0
ln(speed)	1	0,00481	0,00481	1,82	0,199
ln(feed)	1	0,4809	0,4809	182,06	0
ln(DoC)	1	1,34989	1,34989	511,05	0
Error	14	0,03698	0,00264		
Lack-of-Fit	12	0,0347	0,00289	2,54	0,317
Pure Error	2	0,00228	0,00114		
Total	17	1,87661			

(Fig. 28 analisi di varianza per i dati riguardanti il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) per esperimento una variabile alla volta della Marca 1)

Si può notare dall'analisi di varianza come i valori riguardanti il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) sono i valori con un parametro P più basso e che quindi avranno una influenza maggiore sulla risposta, mentre il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) presenta un parametro P più alto e quindi avrà un'influenza minore sulla risposta [15]. Avendo un parametro  $P > 0.05$ , la variabile di velocità di taglio potrebbe essere trascurata [23] [24].

La tabella restituita dal software minitab 18 riguardante i coefficienti è presentata nella Figura 29.

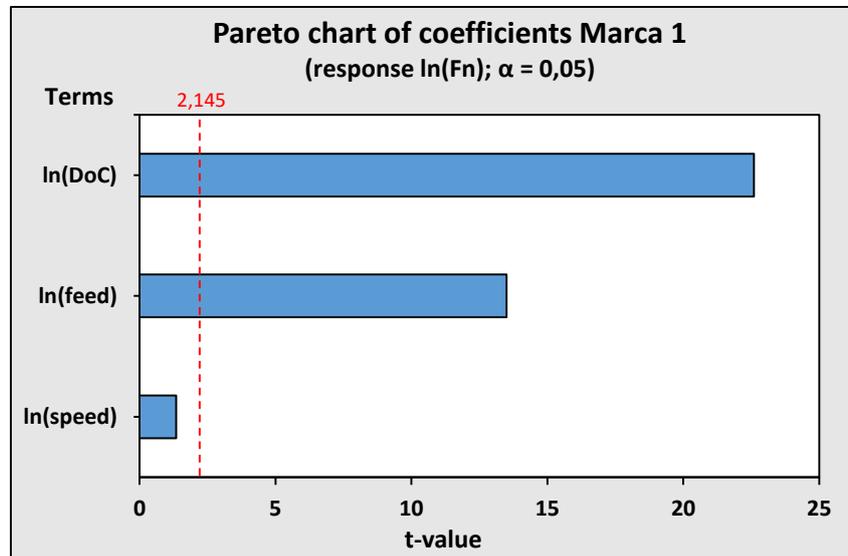
Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	C	$SE_C$	36,93	0	
ln(speed)	$-\alpha$	$SE_\alpha$	-1,35	0,199	1
ln(feed)	$\beta$	$SE_\beta$	13,49	0	1
ln(DoC)	$\gamma$	$SE_\gamma$	22,61	0	1

(Fig. 29 tabella dei coefficienti per il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) per la Marca 1)

Dalla tabella si estrapolano i t-value dei coefficienti riguardanti le variabili indipendenti in valore assoluto per costruire i grafici di Pareto. Il valore critico corrisponde al valore di T di student con livello di probabilità  $\alpha$

pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) e con gradi di libertà di errore pari a 14 (come mostrato dalla ANOVA), che restituisce un valore di 2,145 [20] [21] [22].

Il software Minitab 18 non restituisce il grafico di Pareto per una analisi di regressione quindi il grafico è ottenuto su software Excel utilizzando i dati forniti dalla tabella dei coefficienti. Il grafico è presentato nella Figura 30.



(Fig. 30 grafico di Pareto per il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) per la Marca 1)

Dal grafico di Pareto si osserva come il logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)) sia il termine più influente sulla risposta, seguito dal logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)) [19].

Il contributo del logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) è trascurabile sulla risposta in quanto non supera il valore critico della T di student (2,145) [19].

L'analisi di regressione eseguita dal software Minitab 18 restituisce la formula descritta nella Figura 31.

**Regression Equation**

$$\ln(Fn) = C - \alpha \ln(speed) + \beta \ln(feed) + \gamma \ln(DoC)$$

(Fig. 31 modello di regressione per il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) per la Marca 1)

Il valore del coefficiente per la velocità di taglio (ln(speed)) è negativo indicando un andamento di tipo inversamente proporzionale tra questa variabile e la risposta, mentre le altre variabili hanno un andamento direttamente proporzionale all'andamento della risposta [16].

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice  $R^2$  e  $R^2$  aggiustato definita dalla Figura 32.

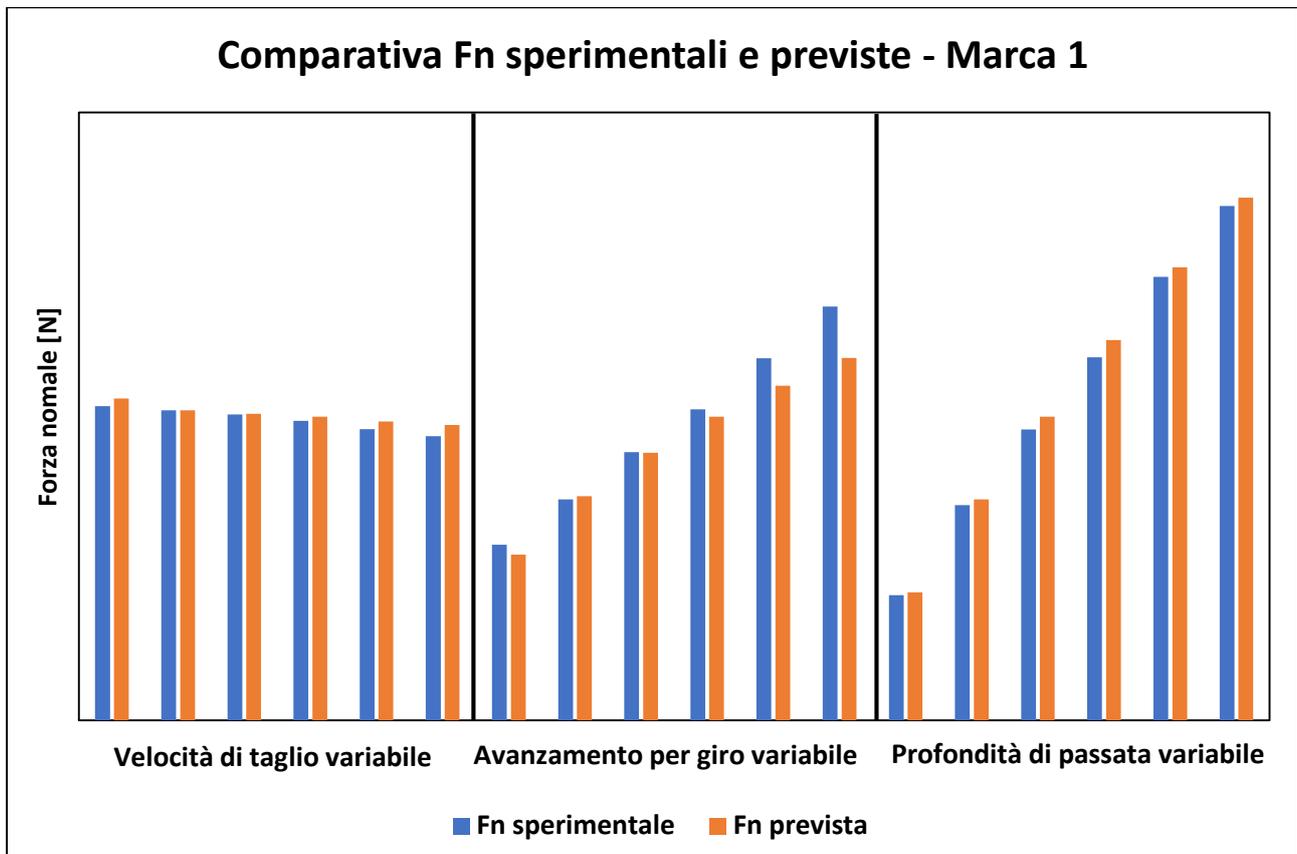
**Model Summary**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,051395	98,03%	97,61%	94,88%

(Fig. 32 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) della Marca 1)

I valori dei parametri  $R^2$  e  $R^2$  (definito nella figura soprastante come R-sq(adj)) sono maggiori del valore soglia posto al 95% (contando un 5% di errore) e quindi il modello è affidabile [16].

Usando il software Excel, si confrontano le risposte ottenute dagli esperimenti con le risposte ottenute applicando il modello di regressione. Si ottiene il seguente grafico (Figura 33)



(Fig. 33 mostra le differenze nei valori ottenuti tra il modello (Fn prevista) e il valore sperimentale ottenuto (Fn sperimentale) per la Marca 1 per i valori di Forza normale (Fn))

Il modello restituisce dei valori di Forza normale (Fn) che in generale rispecchiano i valori ottenuti nelle prove sperimentali, anche se sono presenti delle differenze.

In particolare, si nota come le differenze si concentrino nelle prove ad avanzamento per giro (feed) variabile, con un maggiore distacco tra la Forza normale (Fn) sperimentale e prevista concentrati nelle prove con valori di avanzamento per giro (feed) elevati.

Per le prove a velocità di taglio (speed) variabile, sono presenti delle ridotte discrepanze tra i valori di Forza normale (Fn) sperimentali e previsti per le prove a velocità di taglio (speed) elevate.

Nelle prove a profondità di passata (DoC) le discrepanze tra i valori di Forza normale (Fn) sperimentali e previsti sono basse e distribuite uniformemente su tutte le prove.

In tutte le prove con valori ridotti, pari a 50 [m/min] per la velocità di taglio (speed), 0,05 [mm/rev] per l'avanzamento per giro (speed) e 0,5 [mm] per la profondità di passata (DoC), si notano delle lievi differenze tra i valori di Forza normale (Fn) sperimentali e previsti.

L'errore medio rispetto ai valori sperimentali, calcolato prendendo il valore assoluto dell'errore tra valori previsti e sperimentali su ogni prova del set di esperimenti Una Variabile Alla Volta, è 3,25%

### Pressione normale

L'analisi di varianza per il modello relativo al logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) della Marca 1 è mostrata nella Figura 34.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	0,906202	0,302067	114,36	0
$\ln(\text{speed})$	1	0,004808	0,004808	1,82	0,199
$\ln(\text{feed})$	1	0,803141	0,803141	304,06	0
$\ln(\text{DoC})$	1	0,10232	0,10232	38,74	0
Error	14	0,03698	0,002641		
Lack-of-Fit	12	0,034704	0,002892	2,54	0,317
Pure Error	2	0,002276	0,001138		
Total	17	0,943182			

(Fig. 34 analisi di varianza per i dati una variabile alla volta per il modello relativo al logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) della Marca 1)

Dall'analisi di varianza risulta che il contributo del logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) sulla risposta è trascurabile, in quanto il suo P-value è maggiore del limite di probabilità  $\alpha$  posto a 0,05 [23] [24]. Tutti gli altri fattori sono influenti sulla risposta [15].

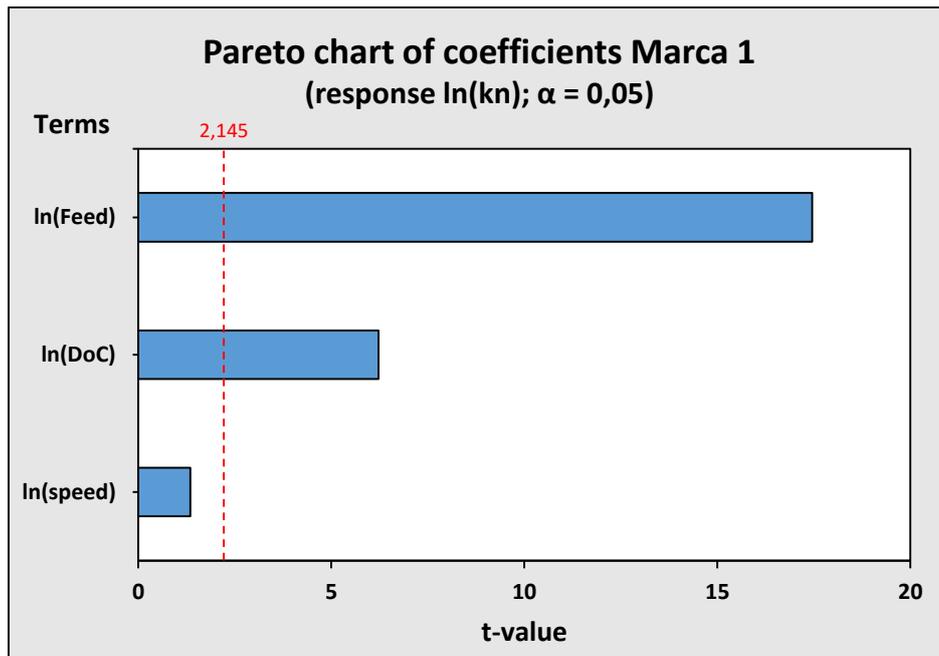
La tabella restituita dal software minitab 18 riguardante i coefficienti è presentata nella Figura 35.

Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	C	$SE_C$	36,93	0	
$\ln(\text{speed})$	$-\alpha$	$SE_\alpha$	-1,35	0,199	1
$\ln(\text{feed})$	$-b$	$SE_b$	-17,44	0	1
$\ln(\text{DoC})$	$-c$	$SE_c$	-6,22	0	1

(Fig. 35 tabella dei coefficienti per il modello relativo al logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) per la Marca 1)

Dalla tabella si estrapolano i t-value dei coefficienti riguardanti le variabili indipendenti in valore assoluto per costruire i grafici di Pareto. Il valore critico corrisponde al valore di T di student con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) e con gradi di libertà di errore pari a 14 (come mostrato dalla ANOVA), che restituisce un valore di 2,145 [20] [21] [22].

Il software Minitab 18 non restituisce il grafico di Pareto per una analisi di regressione quindi il grafico è ottenuto su software Excel utilizzando i dati forniti dalla tabella dei coefficienti. Il grafico è presentato nella Figura 36.



(Fig. 36 grafico di Pareto per il modello relativo al logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) per la Marca 1)

Dal grafico di Pareto si osserva come il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)) sia il termine più influente sulla risposta, seguito dal logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)) [19]. Il contributo del logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) è trascurabile sulla risposta in quanto non supera il valore critico della T di student (2,145) [19].

L'equazione di regressione del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) restituita del software Minitab 18 è descritta nella Figura 37.

**Regression Equation**

$$\ln(kn) = C - \alpha \ln(\text{speed}) - b \ln(\text{feed}) - c \ln(\text{DoC})$$

(Fig. 37 modello di regressione per il modello relativo al logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) per la Marca 1)

Come previsto, il coefficiente relativo al logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) resta invariato mentre i coefficienti del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)) e del logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)) sono diminuiti di una unità rispetto all'equazione di regressione relativa al logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)).

Si nota come il segno di tutti i coefficienti sia negativo, indicando quindi un andamento inversamente proporzionale del logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) rispetto al logaritmo naturale delle variabili indipendenti [16].

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> aggiustato definita dalla Figura 38.

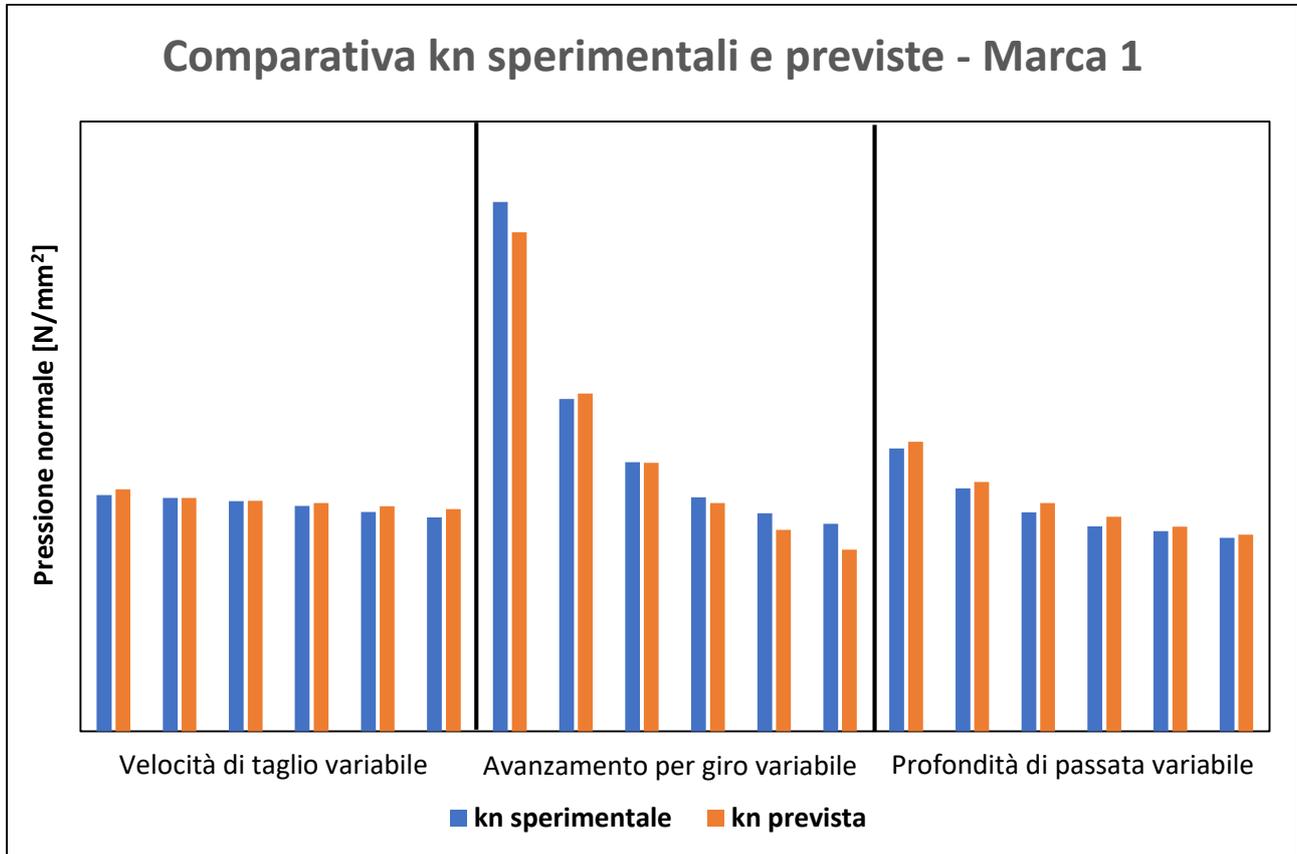
**Model Summary**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,051395	96,08%	95,24%	89,82%

(Fig. 38 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) della Marca 1)

Il modello ottenuto per le pressioni presenta una affidabilità (data dai coefficienti  $R^2$  e  $\bar{R}^2$ ) di poco maggiore al valore soglia del 95%, il che rende il modello comunque affidabile [16].

Usando il software Excel, si confrontano le risposte ottenute dagli esperimenti con le risposte ottenute applicando il modello di regressione. Si ottiene il seguente grafico (Figura 39)



(Fig. 39 mostra le differenze nei valori ottenuti tra il modello (kn prevista) e il valore sperimentale ottenuto (kn sperimentale) per la Marca 1 per i valori di Pressione normale (kn))

Il modello restituisce dei valori di Forza normale (Fn) che in generale rispecchiano i valori ottenuti nelle prove sperimentali, anche se sono presenti delle differenze.

In particolare, si nota come le differenze si concentrino nelle prove ad avanzamento per giro (feed) variabile, con un maggiore distacco tra la Forza normale (Fn) sperimentale e prevista concentrati nelle prove con valori di avanzamento per giro (feed) elevati.

Per le prove a velocità di taglio (speed) variabile, sono presenti delle ridotte discrepanze tra i valori di Forza normale (Fn) sperimentali e previsti per le prove a velocità di taglio (speed) elevate.

Nelle prove a profondità di passata (DoC) le discrepanze tra i valori di Forza normale (Fn) sperimentali e previsti sono basse e distribuite uniformemente su tutte le prove.

In tutte le prove con valori ridotti, pari a 50 [m/min] per la velocità di taglio (speed), 0,05 [mm/rev] per l'avanzamento per giro (speed) e 0,5 [mm] per la profondità di passata (DoC), si notano delle lievi differenze tra i valori di Forza normale (Fn) sperimentali e previsti.

L'errore medio rispetto ai valori sperimentali, calcolato prendendo il valore assoluto dell'errore tra valori previsti e sperimentali su ogni prova del set di esperimenti Una Variabile Alla Volta, è 3,25%

## Marca 2

### Forza normale

L'analisi di varianza dei dati sperimentali per la Marca 2 è mostrata nella Figura 40.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	1,9629	0,6543	305,96	0
ln(speed)	1	0,00707	0,00707	3,31	0,09
ln(feed)	1	0,58028	0,58028	271,34	0
ln(DoC)	1	1,37009	1,37009	640,67	0
Error	14	0,02994	0,00214		
Lack-of-Fit	12	0,0282	0,00235	2,71	0,301
Pure Error	2	0,00174	0,00087		
Total	17	1,99284			

(Fig. 40 analisi di varianza per i dati una variabile alla volta per il modello relativo al logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) della Marca 2)

Si può notare dall'analisi di varianza come i valori riguardanti il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) sono i valori con un parametro P più basso e che quindi avranno una influenza maggiore sulla risposta, mentre il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) presenta un parametro P più alto e quindi avrà un'influenza minore sulla risposta [15]. Avendo un parametro  $P > 0.05$ , la variabile legata alla velocità di taglio potrebbe essere trascurata [22] [23].

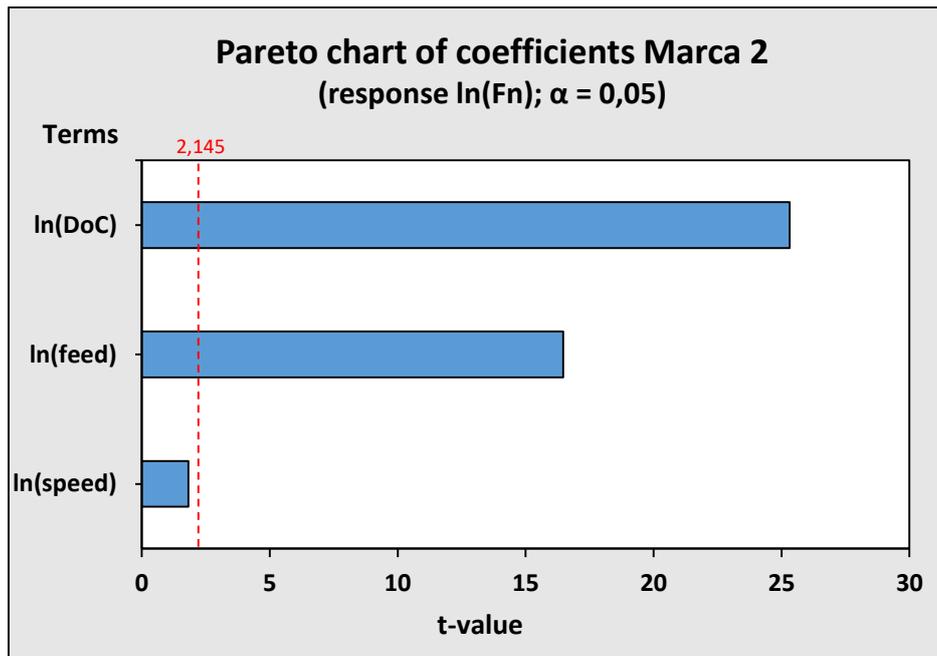
La tabella restituita dal software minitab 18 riguardante i coefficienti e il loro errore standard è presentata nella Figura 41.

Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	$C'$	$SE_{C'}$	41,61	0	
ln(speed)	$-\alpha'$	$SE_{\alpha'}$	-1,82	0,09	1
ln(feed)	$\beta'$	$SE_{\beta'}$	16,47	0	1
ln(DoC)	$\gamma'$	$SE_{\gamma'}$	25,31	0	1

(Fig. 41 tabella dei coefficienti per il modello relativo al logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) per la Marca 2)

Dalla tabella si estrapolano i t-value dei coefficienti riguardanti le variabili indipendenti in valore assoluto per costruire i grafici di Pareto. Il valore critico corrisponde al valore di T di student con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) e con gradi di libertà di errore pari a 14 (come mostrato dalla ANOVA), che restituisce un valore di 2,145 [20] [21] [22].

Il software Minitab 18 non restituisce il grafico di Pareto per una analisi di regressione quindi il grafico è ottenuto su software Excel utilizzando i dati forniti dalla tabella dei coefficienti. Il grafico è presentato nella Figura 42.



(Fig. 42 grafico di Pareto per il modello relativo al logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) per la Marca 2)

Dal grafico di Pareto si osserva come il logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)) sia il termine più influente sulla risposta, seguito dal logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)) [19]. Il contributo del logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) è trascurabile sulla risposta in quanto non supera il valore critico della T di student (2,145) [19].

L'equazione di regressione del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) restituita del software Minitab 18 è descritta nella Figura 43.

**Regression Equation**

$$\ln(Fn) = C' - \alpha' \ln(speed) + \beta' \ln(feed) + \gamma' \ln(DoC)$$

(Fig. 43 modello di regressione per il modello relativo al logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) per la Marca 2)

Il valore del coefficiente per la velocità di taglio (ln(speed)) è negativo indicando un andamento di tipo inversamente proporzionale tra questa variabile e la risposta, mentre le altre variabili hanno un andamento direttamente proporzionale all'andamento della risposta [16].

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice  $R^2$  e  $R^2$  aggiustato definita dalla Figura 44.

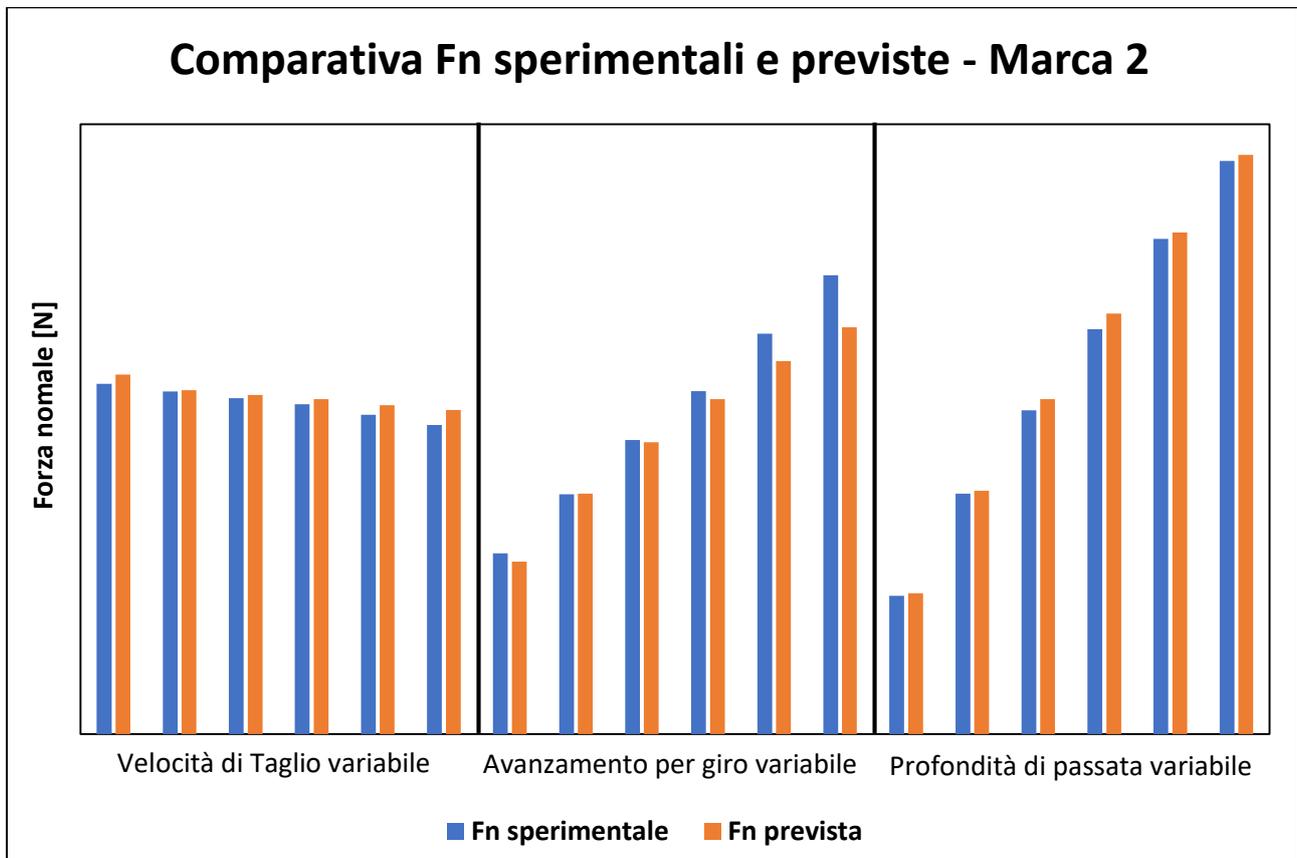
**Model Summary**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,046244	98,50%	98,18%	96,33%

(Fig. 44 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) per la Marca 2)

I valori dei parametri  $R^2$  e  $R^2$  (definito nella figura soprastante come R-sq(adj)) sono maggiori del valore soglia posto al 95% e quindi il modello è affidabile [16].

Usando il software Excel, si confrontano le risposte ottenute dagli esperimenti con le risposte ottenute applicando il modello di regressione. Si ottiene il seguente grafico (Figura 45)



(Fig. 45 mostra le differenze nei valori ottenuti tra il modello (Fn prevista) e il valore sperimentale ottenuto (Fn sperimentale) per la Marca 2 per i valori di Forza normale (Fn))

Il modello restituisce dei valori di Forza normale (Fn) che in generale rispecchiano i valori ottenuti nelle prove sperimentali, anche se sono presenti delle differenze.

In particolare, si nota come le differenze si concentrino nelle prove ad avanzamento per giro (feed) variabile, con un maggiore distacco tra la Forza normale (Fn) sperimentale e prevista concentrati nelle prove con valori di avanzamento per giro (feed) elevati.

Per le prove a velocità di taglio (speed) variabile, sono presenti delle ridotte discrepanze tra i valori di Forza normale (Fn) sperimentali e previsti per le prove a velocità di taglio (speed) elevate.

Nelle prove a profondità di passata (DoC) le discrepanze tra i valori di Forza normale (Fn) sperimentali e previsti sono basse e distribuite uniformemente su tutte le prove.

In tutte le prove con valori ridotti, pari a 50 [m/min] per la velocità di taglio (speed), 0,05 [mm/rev] per l'avanzamento per giro (speed) e 0,5 [mm] per la profondità di passata (DoC), si notano delle lievi differenze tra i valori di Forza normale (Fn) sperimentali e previsti.

L'errore medio rispetto ai valori sperimentali, calcolato prendendo il valore assoluto dell'errore tra valori previsti e sperimentali su ogni prova del set di esperimenti Una Variabile Alla Volta, è 2.90%

### Pressione normale

L'analisi di varianza restituita dal software Minitab 18 riguardante il modello relativo al logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) è mostrata nella Figura 46.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	0,784475	0,261492	122,28	0
$\ln(\text{speed})$	1	0,007071	0,007071	3,31	0,09
$\ln(\text{feed})$	1	0,685406	0,685406	320,5	0
$\ln(\text{DoC})$	1	0,096853	0,096853	45,29	0
Error	14	0,02994	0,002139		
Lack-of-Fit	12	0,028202	0,00235	2,71	0,301
Pure Error	2	0,001737	0,000869		
Total	17	0,814415			

(Fig. 46 analisi di varianza per i dati riguardanti il modello per il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) nell'esperimento una variabile alla volta della Marca 2)

Dall'analisi di varianza risulta che il contributo del logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) sulla risposta è trascurabile, in quanto il suo P-value è maggiore del limite di probabilità  $\alpha$  posto a 0,05 [23] [24], mentre gli altri fattori sono influenti sulla risposta [15].

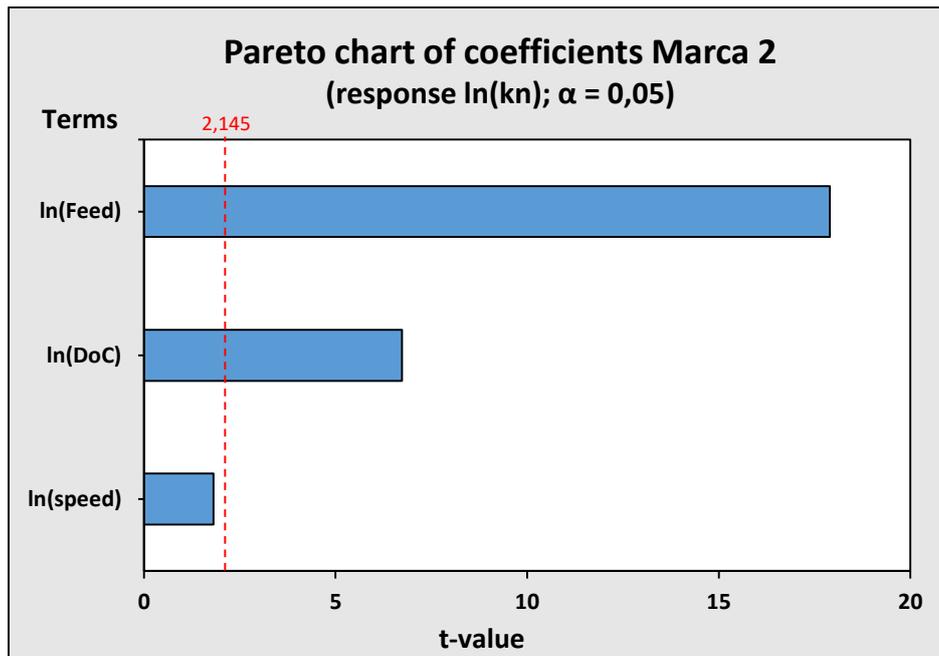
La tabella restituita dal software minitab 18 riguardante i coefficienti e il loro errore standard è presentata nella Figura 47.

Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	$C'$	$SE_{C'}$	41,61	0	
$\ln(\text{speed})$	$-\alpha'$	$SE_{\alpha'}$	-1,82	0,09	1
$\ln(\text{feed})$	$-b'$	$SE_{b'}$	-17,9	0	1
$\ln(\text{DoC})$	$-c'$	$SE_{c'}$	-6,73	0	1

(Fig. 47 tabella dei coefficienti per il modello relativo al logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) per la Marca 2)

Dalla tabella si estrapolano i t-value dei coefficienti riguardanti le variabili indipendenti in valore assoluto per costruire i grafici di Pareto. Il valore critico corrisponde al valore di T di student con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) e con gradi di libertà di errore pari a 14 (come mostrato dalla ANOVA), che restituisce un valore di 2,145 [20] [21] [22].

Il software Minitab 18 non restituisce il grafico di Pareto per una analisi di regressione quindi il grafico è ottenuto su software Excel utilizzando i dati forniti dalla tabella dei coefficienti. Il grafico è presentato nella Figura 48.



(Fig. 48 grafico di Pareto per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) per la Marca 2)

Dal grafico di Pareto si osserva come il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)) sia il termine più influente sulla risposta, seguito dal logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)) [19]. Il contributo del logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) è trascurabile sulla risposta in quanto non supera il valore critico della T di student (2,145) [19].

L'equazione di regressione del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) restituita del software Minitab 18 è descritta nella Figura 49.

**Regression Equation**

$$\ln(kn) = C' - \alpha' \ln(\text{speed}) - b' \ln(\text{feed}) - c' \ln(\text{DoC})$$

(Fig. 49 modello di regressione per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) per la Marca 2)

Come previsto, il coefficiente relativo al logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) resta invariato mentre i coefficienti del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)) e del logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)) sono diminuiti di una unità rispetto all'equazione di regressione relativa al logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)).

Si nota come il segno di tutti i coefficienti sia negativo, indicando quindi un andamento inversamente proporzionale del logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) rispetto al logaritmo naturale delle variabili indipendenti [16].

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> aggiustato definita dalla Figura 50.

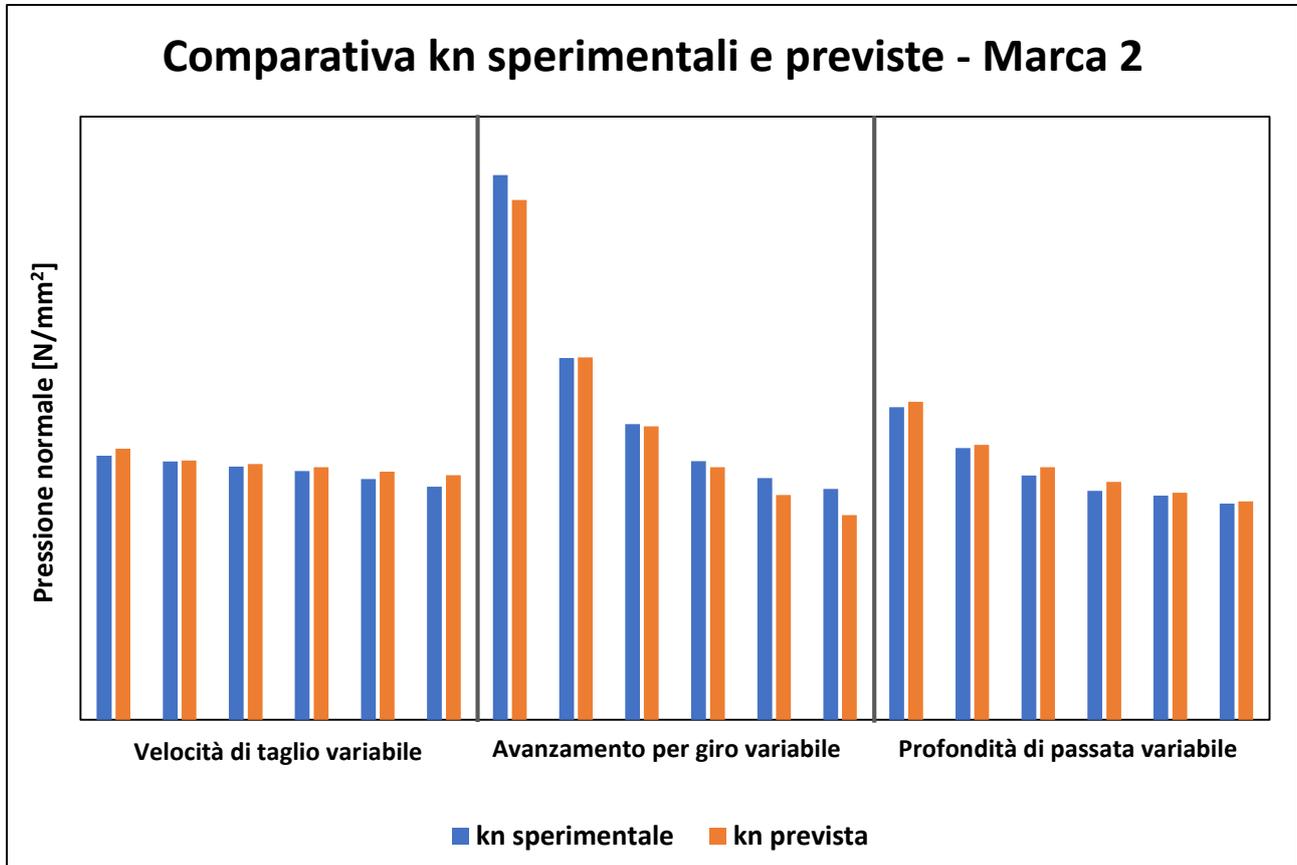
**Model Summary**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,046244	96,32%	95,54%	91,01%

(Fig. 50 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) della Marca 2)

Il modello ottenuto per le pressioni presenta una affidabilità (data dai coefficienti  $R^2$  e  $R^2$ ) di poco maggiore al valore soglia del 95%, il che rende il modello comunque affidabile [16].

Usando il software Excel, si confrontano le risposte ottenute dagli esperimenti con le risposte ottenute applicando il modello di regressione. Si ottiene il seguente grafico (Figura 51).



(Fig. 51 mostra le differenze nei valori ottenuti tra il modello (kn prevista) e il valore sperimentale ottenuto (kn sperimentale) per la Marca 2 per i valori di Pressione normale (kn))

Il modello restituisce dei valori di Forza normale ( $F_n$ ) che in generale rispecchiano i valori ottenuti nelle prove sperimentali, anche se sono presenti delle differenze.

In particolare, si nota come le differenze si concentrino nelle prove ad avanzamento per giro (feed) variabile, con un maggiore distacco tra la Forza normale ( $F_n$ ) sperimentale e prevista concentrati nelle prove con valori di avanzamento per giro (feed) elevati.

Per le prove a velocità di taglio (speed) variabile, sono presenti delle ridotte discrepanze tra i valori di Forza normale ( $F_n$ ) sperimentali e previsti per le prove a velocità di taglio (speed) elevate.

Nelle prove a profondità di passata (DoC) le discrepanze tra i valori di Forza normale ( $F_n$ ) sperimentali e previsti sono basse e distribuite uniformemente su tutte le prove.

In tutte le prove con valori ridotti, pari a 50 [m/min] per la velocità di taglio (speed), 0,05 [mm/rev] per l'avanzamento per giro (speed) e 0,5 [mm] per la profondità di passata (DoC), si notano delle lievi differenze tra i valori di Forza normale ( $F_n$ ) sperimentali e previsti.

L'errore medio rispetto ai valori sperimentali, calcolato prendendo il valore assoluto dell'errore tra valori previsti e sperimentali su ogni prova del set di esperimenti Una Variabile Alla Volta, è 2.90%

### Marca 3

#### Forza normale

L'analisi di varianza restituita dal software Minitab 18 riguardante il modello relativo al logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) è mostrata nella Figura 52.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	2,14367	0,71456	703,68	0
ln(speed)	1	0,00809	0,00809	7,96	0,014
ln(feed)	1	0,77986	0,77986	767,99	0
ln(DoC)	1	1,34879	1,34879	1328,27	0
Error	14	0,01422	0,00102		
Lack-of-Fit	12	0,01394	0,00116	8,36	0,112
Pure Error	2	0,00028	0,00014		
Total	17	2,15789			

(Fig. 52 analisi di varianza per i dati una variabile alla volta per il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) della Marca 3)

Si può notare dall'analisi di varianza come i valori riguardanti il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) sono i valori con un parametro P più basso e che quindi avranno una influenza maggiore sulla risposta, mentre il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) presenta un parametro P più alto e quindi avrà un'influenza minore sulla risposta [15]. Tutte le variabili indipendenti presentano un parametro  $P < 0.05$ , quindi tutte le variabili sono significative nello studio della risposta [23] [24].

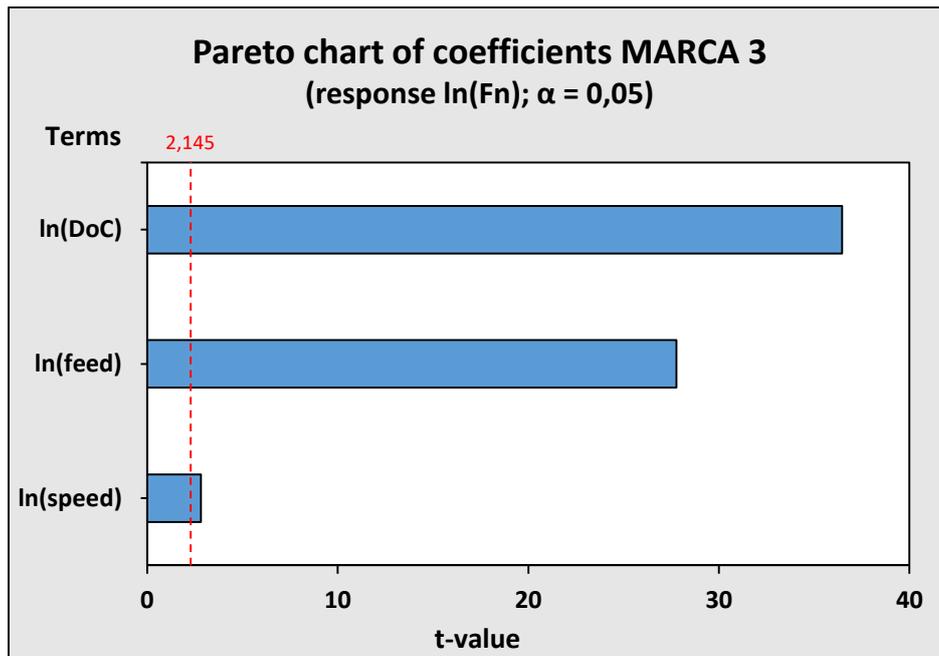
La tabella restituita dal software minitab 18 riguardante i coefficienti è presentata nella Figura 53.

Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	$C''$	$SE_C''$	61,34	0	
ln(speed)	$-\alpha''$	$SE_{\alpha}''$	-2,82	0,014	1
ln(feed)	$\beta''$	$SE_{\beta}''$	27,71	0	1
ln(DoC)	$\gamma''$	$SE_{\gamma}''$	36,45	0	1

(Fig. 53 tabella dei coefficienti per il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) per la Marca 3)

Dalla tabella si estrapolano i t-value dei coefficienti riguardanti le variabili indipendenti in valore assoluto per costruire i grafici di Pareto. Il valore critico corrisponde al valore di T di student con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) e con gradi di libertà di errore pari a 14 (come mostrato dalla ANOVA), che restituisce un valore di 2,145 [20] [21] [22].

Il software Minitab 18 non restituisce il grafico di Pareto per una analisi di regressione quindi il grafico è ottenuto su software Excel utilizzando i dati forniti dalla tabella dei coefficienti. Il grafico è presentato nella Figura 54.



(Fig. 54 grafico di Pareto per il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) per la Marca 3)

Dal grafico di Pareto si osserva come tutte le variabili testate siano influenti sulla risposta [19]. In particolare, il logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)) è il termine più influente sulla risposta, seguito dal logaritmo naturale dell'avanzamento per giro e infine dal logaritmo naturale della velocità di taglio [19]. Nonostante il t-value del coefficiente del logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) non sia trascurabile, l'influenza di questa variabile sulla risposta è molto bassa [19].

L'equazione di regressione del modello per il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) restituita del software Minitab 18 è descritta nella Figura 55.

**Regression Equation**

$$\ln(Fn) = C - \alpha \ln(speed) + \beta \ln(feed) + \gamma \ln(DoC)$$

(Fig. 55 modello di regressione per il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) per la Marca 3)

Il valore del coefficiente per il logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) è negativo indicando un andamento di tipo inversamente proporzionale tra questa variabile e la risposta, mentre le altre variabili hanno un andamento direttamente proporzionale all'andamento della risposta [16].

Il modello ottenuto dal software Minitab 18 ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> aggiustato definita dalla Figura 56.

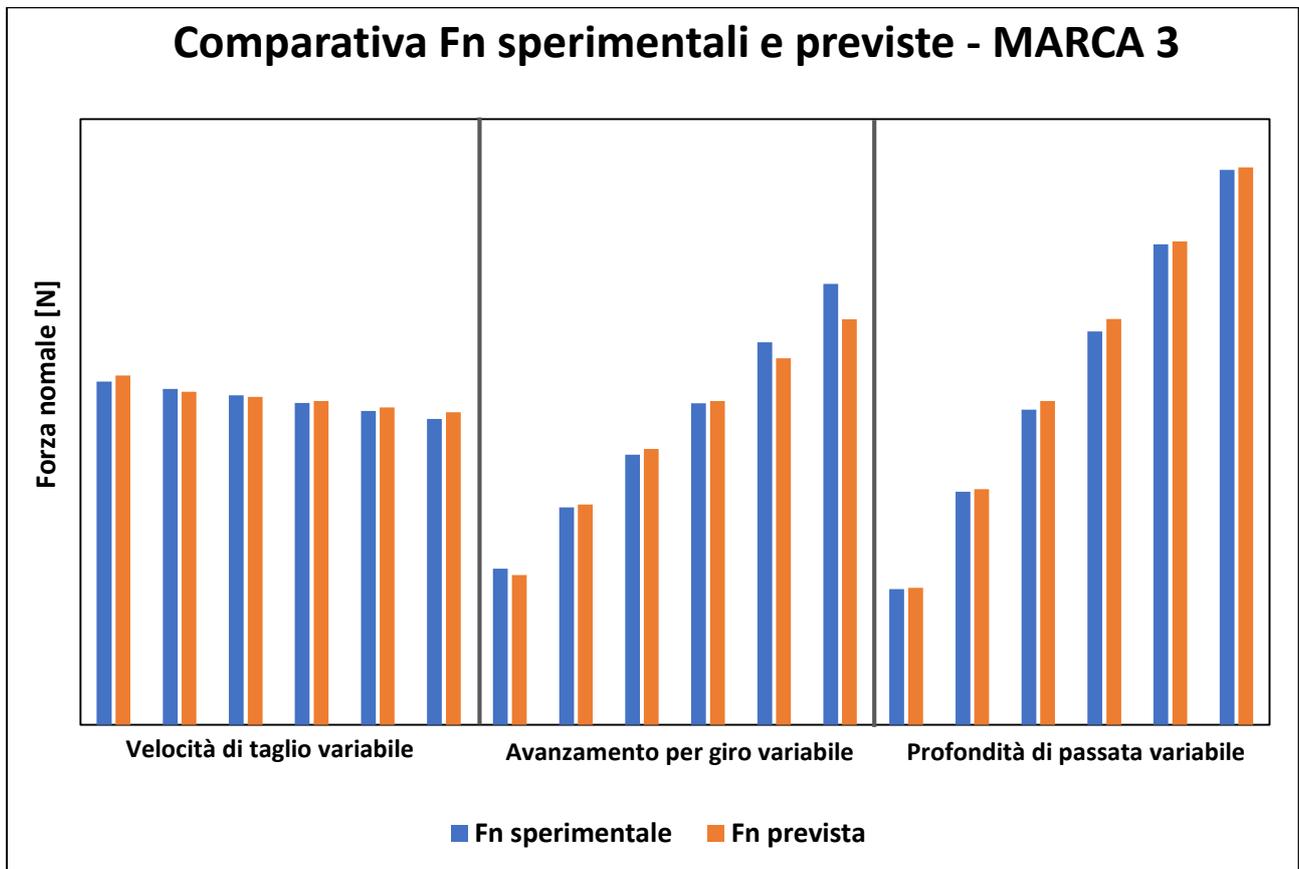
**Model Summary**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,031866	99,34%	99,20%	98,07%

(Fig. 56 sommario per affidabilità del modello per la Marca 3)

I valori dei parametri R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> (definito nella figura soprastante come R-sq(adj)) sono maggiori del valore soglia posto al 95% (contando un 5% di errore) e quindi il modello è affidabile [16].

Usando il software excel, si confrontano le risposte ottenute dagli esperimenti con le risposte ottenute applicando il modello di regressione. Si ottiene il seguente grafico (Figura 57).



(Fig. 57 mostra le differenze nei valori ottenuti tra il modello (Fn prevista) e il valore sperimentale ottenuto (Fn sperimentale) per la Marca 3 per i valori di Forza normale (Fn))

Il modello restituisce dei valori di Forza normale (Fn) che in generale rispecchiano i valori ottenuti nelle prove sperimentali, anche se sono presenti delle differenze.

In particolare, si nota come le differenze si concentrino nelle prove ad avanzamento per giro (feed) variabile, con un maggiore distacco tra la Forza normale (Fn) sperimentale e prevista concentrati nelle prove con valori di avanzamento per giro (feed) elevati.

Per le prove a velocità di taglio (speed) variabile, sono presenti delle ridotte discrepanze tra i valori di Forza normale (Fn) sperimentali e previsti per le prove a velocità di taglio (speed) elevate.

Nelle prove a profondità di passata (DoC) le discrepanze tra i valori di Forza normale (Fn) sperimentali e previsti sono basse e distribuite uniformemente su tutte le prove.

In tutte le prove con valori ridotti, pari a 50 [m/min] per la velocità di taglio (speed), 0,05 [mm/rev] per l'avanzamento per giro (speed) e 0,5 [mm] per la profondità di passata (DoC), si notano delle lievi differenze tra i valori di Forza normale (Fn) sperimentali e previsti.

L'errore medio rispetto ai valori sperimentali, calcolato prendendo il valore assoluto dell'errore tra valori previsti e sperimentali su ogni prova del set di esperimenti Una Variabile Alla Volta, è 2,03%

### Pressione normale

L'analisi di varianza restituita dal software Minitab 18 riguardante il modello relativo del logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) è mostrata nella Figura 58.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	0,605292	0,201764	198,69	0
$\ln(\text{speed})$	1	0,008087	0,008087	7,96	0,014
$\ln(\text{feed})$	1	0,499221	0,499221	491,63	0
$\ln(\text{DoC})$	1	0,102623	0,102623	101,06	0
Error	14	0,014216	0,001015		
Lack-of-Fit	12	0,013938	0,001162	8,36	0,112
Pure Error	2	0,000278	0,000139		
Total	17	0,619509			

(Fig. 58 analisi di varianza per i dati riguardanti il modello per il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) nell'esperimento una variabile alla volta della Marca 3)

Si può notare dall'analisi di varianza come i valori riguardanti il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) sono i valori con un parametro P più basso e che quindi avranno una influenza maggiore sulla risposta, mentre il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) presenta un parametro P più alto e quindi avrà un'influenza minore sulla risposta [15]. Tutte le variabili indipendenti presentano un parametro  $P < 0.05$ , quindi tutte le variabili sono significative nello studio della risposta [23] [24].

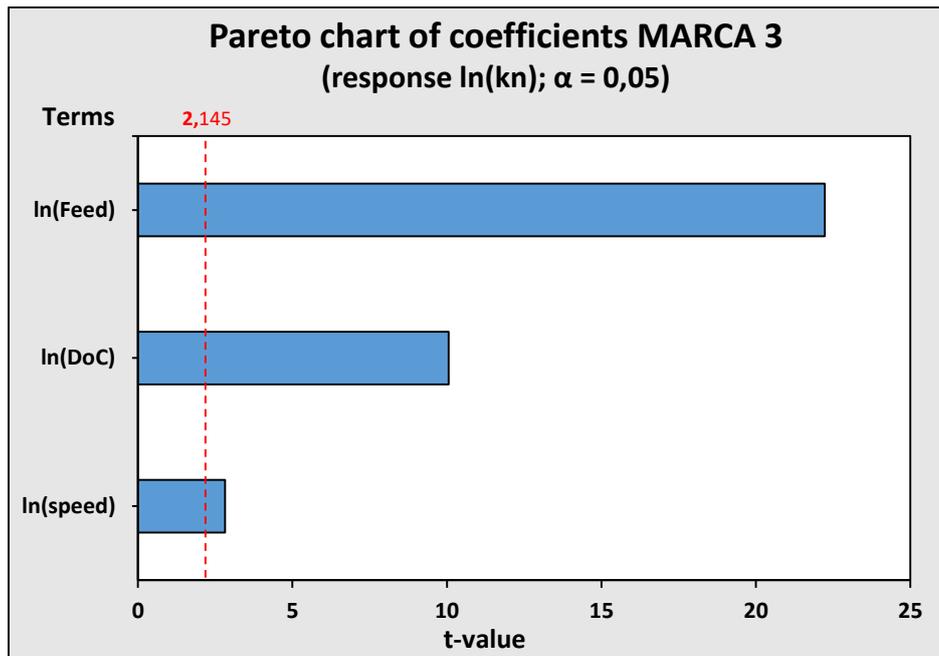
La tabella restituita dal software minitab 18 riguardante i coefficienti e il loro errore standard è presentata nella Figura 59.

Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	$C''$	$SE_{C''}$	61,34	0	
$\ln(\text{speed})$	$-\alpha''$	$SE_{\alpha''}$	-2,82	0,014	1
$\ln(\text{feed})$	$-b''$	$SE_{b''}$	-22,17	0	1
$\ln(\text{DoC})$	$-c''$	$SE_{c''}$	-10,05	0	1

(Fig. 59 tabella dei coefficienti per il modello relativo al logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) per la Marca 3)

Dalla tabella si estrapolano i t-value dei coefficienti riguardanti le variabili indipendenti in valore assoluto per costruire i grafici di Pareto. Il valore critico corrisponde al valore di T di student con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) e con gradi di libertà di errore pari a 14 (come mostrato dalla ANOVA), che restituisce un valore di 2,145 [20] [21] [22].

Il software Minitab 18 non restituisce il grafico di Pareto per una analisi di regressione quindi il grafico è ottenuto su software Excel utilizzando i dati forniti dalla tabella dei coefficienti. Il grafico è presentato nella Figura 60.



(Fig. 60 grafico di Pareto per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) per la Marca 3)

Dal grafico di Pareto si osserva come il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)) sia il termine più influente sulla risposta, seguito dal logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)) e per ultimo dal logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) [19].

Nonostante il t-value del coefficiente del logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) non sia trascurabile, l'influenza di questa variabile sulla risposta è molto bassa [19].

L'equazione di regressione del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) restituita dal software Minitab 18 è descritta nella Figura 61.

**Regression Equation**

$$\ln(kn) = C - \alpha \ln(speed) - b \ln(feed) - c \ln(DoC)$$

(Fig. 61 modello di regressione per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) per la Marca 3)

Come previsto, il coefficiente relativo al logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) resta invariato mentre i coefficienti del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)) e del logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)) sono diminuiti di una unità rispetto all'equazione di regressione relativa al logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) .

Si nota come il segno di tutti i coefficienti sia negativo, indicando quindi un andamento inversamente proporzionale del logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) rispetto al logaritmo naturale delle variabili indipendenti [16].

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> aggiustato definita dalla Figura 62.

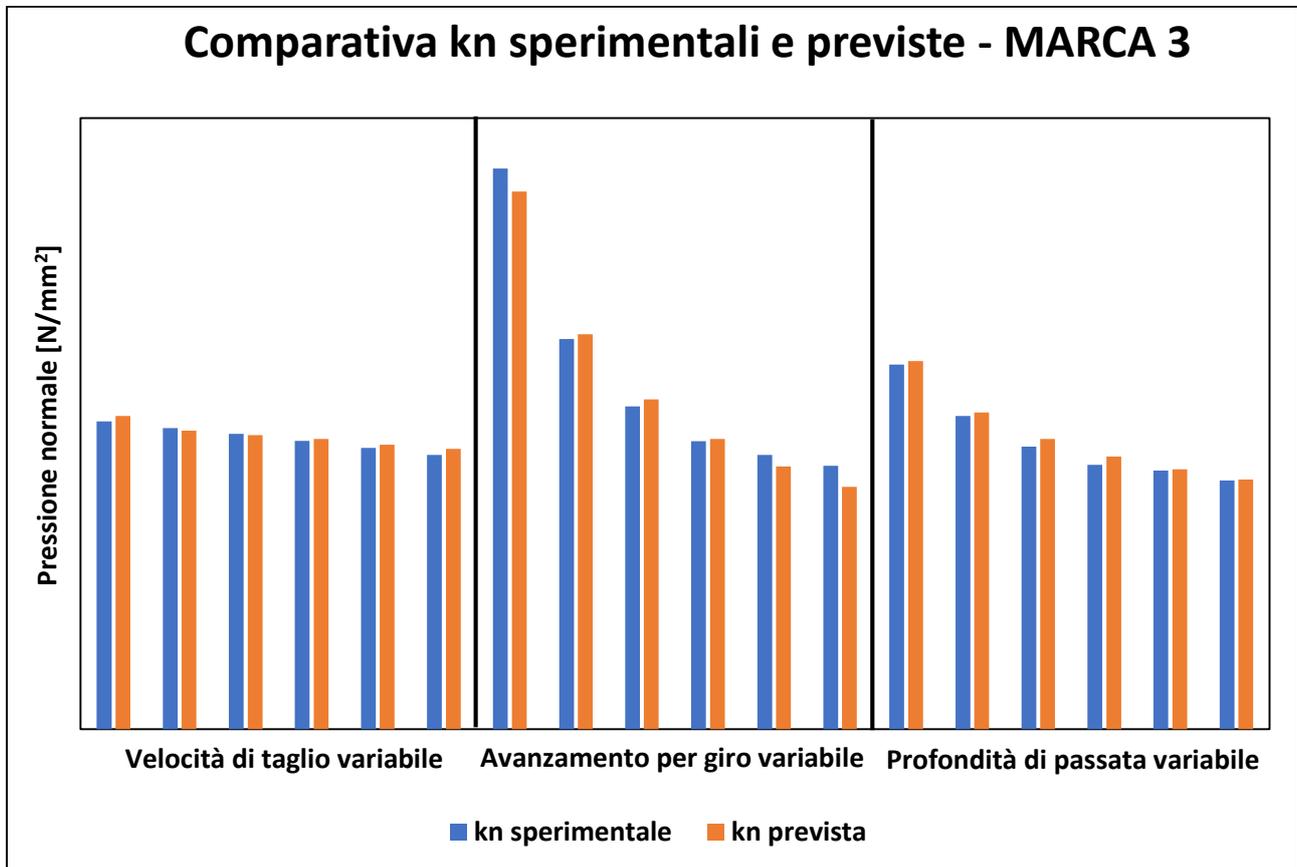
**Model Summary**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,031866	97,71%	97,21%	93,29%

(Fig. 62 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) della Marca 3)

Il modello ottenuto per le pressioni presenta una affidabilità (data dai coefficienti  $R^2$  e  $R^2$ ) di poco maggiore al valore soglia del 95%, il che rende il modello comunque affidabile [16].

Usando il software excel, si confrontano le risposte ottenute dagli esperimenti con le risposte ottenute applicando il modello di regressione. Si ottiene il seguente grafico (Figura 63)



(Fig. 63 mostra le differenze nei valori ottenuti tra il modello (kn prevista) e il valore sperimentale ottenuto (kn sperimentale) per la Marca 3 per i valori di Pressione normale (kn))

Il modello restituisce dei valori di Forza normale ( $F_n$ ) che in generale rispecchiano i valori ottenuti nelle prove sperimentali, anche se sono presenti delle differenze.

In particolare, si nota come le differenze si concentrino nelle prove ad avanzamento per giro (feed) variabile, con un maggiore distacco tra la Forza normale ( $F_n$ ) sperimentale e prevista concentrati nelle prove con valori di avanzamento per giro (feed) elevati.

Per le prove a velocità di taglio (speed) variabile, sono presenti delle ridotte discrepanze tra i valori di Forza normale ( $F_n$ ) sperimentali e previsti per le prove a velocità di taglio (speed) elevate.

Nelle prove a profondità di passata (DoC) le discrepanze tra i valori di Forza normale ( $F_n$ ) sperimentali e previsti sono basse e distribuite uniformemente su tutte le prove.

In tutte le prove con valori ridotti, pari a 50 [m/min] per la velocità di taglio (speed), 0,05 [mm/rev] per l'avanzamento per giro (speed) e 0,5 [mm] per la profondità di passata (DoC), si notano delle lievi differenze tra i valori di Forza normale ( $F_n$ ) sperimentali e previsti.

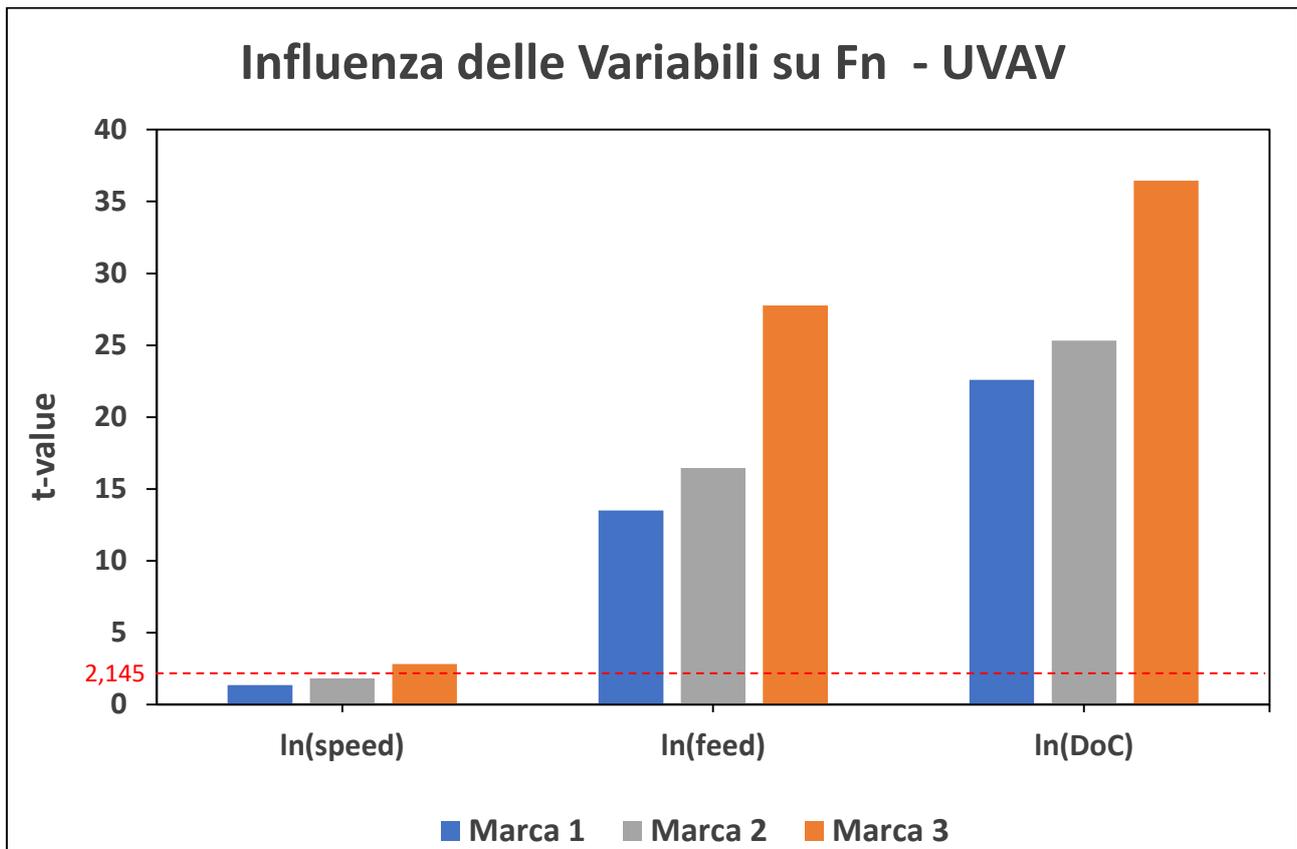
L'errore medio rispetto ai valori sperimentali, calcolato prendendo il valore assoluto dell'errore tra valori previsti e sperimentali su ogni prova del set di esperimenti Una Variabile Alla Volta, è 2.03%

## Discussione dei risultati

Per valutare le differenze delle influenze delle variabili indipendenti sulle risposte tra le varie marche si mettono a confronto i grafici di Pareto per il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) e per il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(k_n)$ ).

### Forza normale

Il grafico di confronto dei t-value riguardanti il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ), il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) dei 3 materiali per l'influenza sul logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) è presentato nella Figura 64.



(Fig. 64 Grafico di confronto dell'influenza del logaritmo naturale delle variabili indipendenti sulla risposta logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ))

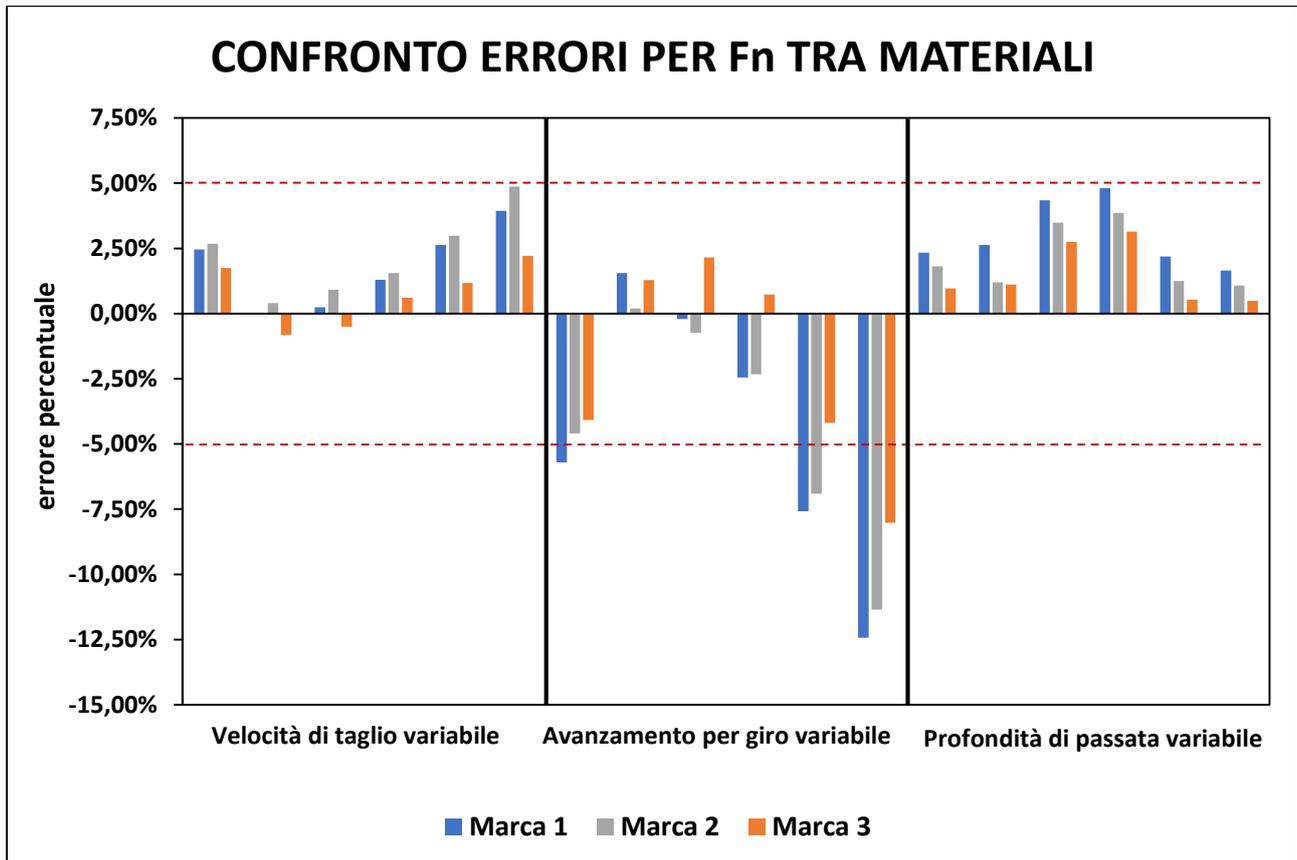
Dal grafico si può notare come l'influenza del logaritmo naturale delle variabili indipendenti sulla risposta aumenti passando dalla Marca 1 alla Marca 2, con un incremento del t-value del 22% per il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e un incremento del 12% per quanto riguarda il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ).

Il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ), per la Marca 1 e per la Marca 2, resta trascurabile come effetto sul logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ), anche se aumenta di importanza con un incremento del 35%.

La Marca 3 presenta un brusco aumento di t-value per tutte le variabili, in particolare l'incremento del t-value per il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) è del 61% rispetto allo stesso parametro per la Marca 1 e del 44% rispetto alla Marca 2, l'incremento del t-value del termine logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) è del 106% rispetto allo stesso parametro per la Marca 1 e del 69%

rispetto alla Marca 2 e infine l'incremento de t-value del termine logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) è del 109% rispetto allo stesso termine per la Marca 1 e del 55% rispetto alla Marca 2. Inoltre, dal grafico si vede come nella Marca 3 il t-value del termine logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) superi il valore critico della T di student (posta a 2,145 per tutti e 3 i modelli ottenuti) diventano quindi rilevante nella modellazione del logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ).

Il grafico riguardante gli errori percentuali tra la Forza normale misurata sperimentalmente ( $F_n$  sperimentale) e la Forza normale prevista dai modelli ( $F_n$  prevista) per i 3 materiali è mostrato nella Figura 65.



(Fig. 65 confronto degli errori tra la Forza normale misurata sperimentalmente ( $F_n$  sperimentale) e la Forza normale prevista dai modelli ottenuti ( $F_n$  prevista) per i 3 materiali testati)

Le linee rosse indicano la soglia di errore massima accettabile. Essendo l'analisi di regressione sviluppata con un intervallo di confidenza del 95%, la soglia è posta al  $\pm 5\%$  (in funzione se il modello sovrastima o sottostima il valore misurato).

In generale si nota come la Marca 1 presenti errori maggiori rispetto alla Marca 2 e alla Marca 3 e come l'errore sia in generale più basso per la Marca 3 su tutte le prove.

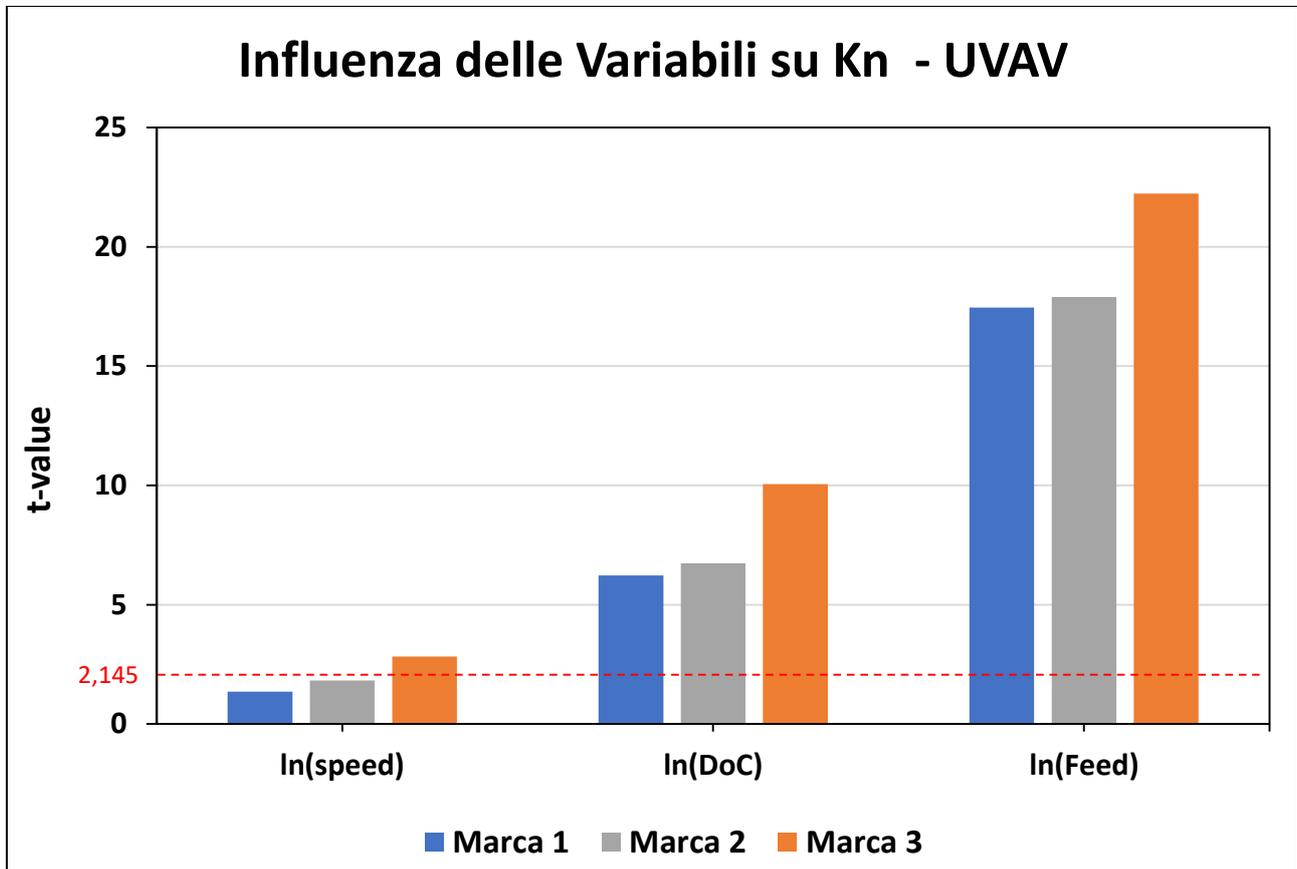
Gli errori che superano la soglia del  $\pm 5\%$  sono concentrati nelle prove a feed variabile per tutte e 3 le marche testate. In particolare, si nota che l'MARCA 1 presenta errori elevati per le prove a con avanzamento per giro (feed) pari a 0,05 [mm/rev], 0,25 [mm/rev] e 0,3 [mm/rev], la marca MARCA 2 presenta errori elevati per le prove con avanzamento per giro (feed) pari a 0,25 [mm/rev] e 0,3 [mm/rev] e la marca MARCA 3 presenta errori elevati per le prove con avanzamento per giro (feed) pari a 0,3 [mm/rev].

Nelle prove di velocità di taglio variabile, si nota come l'errore delle 3 marche presenti un andamento parabolico con minimo nella prova a velocità di taglio pari a 100 [m/min].

Nelle prove a profondità di passata (DoC) variabile, si nota come l'errore massimo si raggiunga per prove a profondità di passata (DoC) pari a 2 [mm]

## Pressione normale

Il grafico di confronto dei t-value riguardanti il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ), il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) dei 3 materiali per l'influenza sul logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(\text{kn})$ ) è presentato nella Figura 66.



(Fig. 66 Grafico di confronto dell'influenza del logaritmo naturale delle variabili indipendenti sulla risposta logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(\text{kn})$ ))

Dal grafico si può notare come l'influenza del logaritmo naturale delle variabili indipendenti sulla risposta aumenti passando dalla Marca 1 alla Marca 2, con un incremento del t-value del 3% per il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e un incremento del 8% per quanto riguarda il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ). Il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ), per la Marca 1 e la Marca 2, resta trascurabile come effetto sul logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(\text{Fn})$ ), anche se aumenta di importanza con un incremento del 35%.

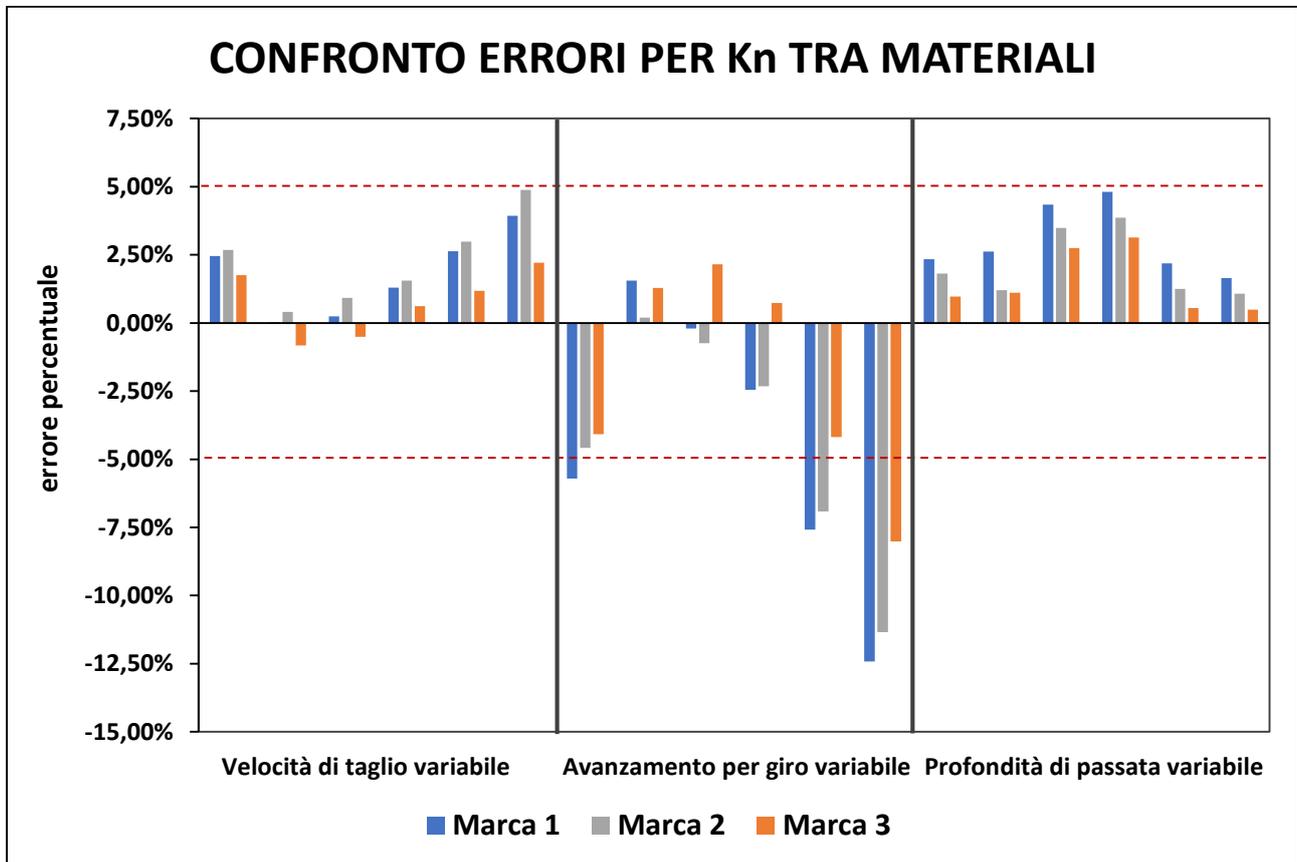
La Marca 3 presenta un aumento di t-value per tutte le variabili, in particolare l'incremento del t-value per il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) è del 62% rispetto allo stesso parametro per la Marca 1 e del 49% rispetto alla Marca 2, l'incremento del t-value del termine logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) è del 27% rispetto allo stesso parametro per la Marca 1 e del 24% rispetto alla Marca 2 e infine l'incremento di t-value del termine logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) è del 109% rispetto allo stesso termine per la Marca 1 e del 55% rispetto alla Marca 2.

Inoltre, dal grafico si vede come nella Marca 3 il t-value del termine logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) superi il valore critico della T di student (posta a 2,145 per tutti e 3 i modelli ottenuti) diventano quindi rilevante nella modellazione del logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(\text{kn})$ ).

Infine si nota come il termine più influente sulla risposta logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(\text{kn})$ ) sia il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) a differenza della modellazione per il logaritmo

naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) dove il parametro più influente è il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(D_oC)$ ).

Il grafico riguardante gli errori percentuali tra la Pressione normale misurata sperimentalmente ( $k_n$  sperimentale) e la Pressione normale prevista dai modelli ( $k_n$  prevista) per i 3 materiali è mostrato nella Figura 67.



(Fig. 67 confronto degli errori tra la Pressione normale misurata sperimentalmente ( $k_n$  sperimentale) e la Pressione normale prevista dai modelli ( $k_n$  prevista) ottenuti per i 3 materiali testati)

Le linee rosse indicano la soglia di errore massima accettabile. Essendo l'analisi di regressione sviluppata con un intervallo di confidenza del 95%, la soglia è posta al  $\pm 5\%$  (in funzione se il modello sovrastima o sottostima il valore misurato).

Dal grafico si nota come gli errori siano identici agli errori misurati per lo studio della Forza Normale ( $F_n$ ). Questo è dovuto alla relazione che lega le due risposte.

## Valori minimi prove Una Variabile Alla Volta

I modelli ottenuti sia per il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) che per il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(k_n)$ ) possono essere riassunti dalla Formula (50).

$$(50) \quad \ln(R) = C + n * \ln(speed) + m * \ln(feed) + l * \ln(DoC)$$

Dove:

R è la risposta del materiale intesa sia come Forza normale ( $F_n$ ), espressa in [N], che come Pressione normale ( $k_n$ ), espressa in [N/mm<sup>2</sup>]

Speed è la velocità di taglio espressa in [m/min]

Feed è l'avanzamento per giro espresso in [mm/rev]

DoC è la profondità di passata espressa in [mm]

C, n, m, l sono coefficienti specifici del materiale e del processo di lavorazione

## Studio delle derivate

Per lo studio dei valori minimi, si utilizza lo studio della derivata prima. La derivata prima restituisce informazioni sulla monotonia della funzione (cioè se una funzione è monotona crescente o decrescente) tramite lo studio del segno della derivata prima e restituisce la possibilità di identificare i punti critici della funzione ponendo la derivata prima uguale a zero. Per identificare se i punti critici rilevati dalla derivata prima sono massimi, minimi o altri tipi di punti critici si può utilizzare la derivata seconda della funzione per comprendere la curvatura nell'intorno del punto critico rilevato dallo studio della derivata prima.

La derivata parziale viene eseguita sul logaritmo naturale della risposta rispetto ai logaritmi naturali delle singole componenti, come descritto nella Formula (51).

$$(51) \quad \frac{\delta \ln(R)}{\delta \ln(speed) \delta \ln(feed) \delta \ln(DoC)}$$

Prima di procedere con lo studio della derivata prima, occorre individuare il dominio della derivata prima, cioè individuare l'insieme dei punti in cui la funzione è derivabile. Considerando i termini per cui la funzione viene derivata e il tipo di funzione restituita dai modelli di regressione, la funzione sarà derivabile in tutto l'insieme dei valori compresi negli intervalli delle singole variabili indipendenti. Questi intervalli saranno presi in termini logaritmici e valgono:

- Per il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(speed)$ ), il dominio sarà compreso tra il logaritmo naturale di 50 [m/min] pari a 3,912023 e il logaritmo naturale di 250 [m/min] pari a 5,521461, estremi compresi
- Per il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(feed)$ ), il dominio sarà compreso tra il logaritmo naturale di 0,05 [mm/rev] pari a -2,99573 e il logaritmo naturale di 0,3 [m/min] pari a -1,20397, estremi compresi
- Per il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(DoC)$ ), il dominio sarà compreso tra il logaritmo naturale di 0,5 [mm] pari a -0,39615 e il logaritmo naturale di 3 [mm] pari a 1,098612, estremi compresi

La derivata prima del logaritmo naturale della risposta ( $\ln(R)$ ) in funzione del logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(speed)$ ) è data dalla Formula (52).

$$(52) \quad \frac{\delta \ln(R)}{\delta \ln(speed)} = \frac{\delta}{\delta \ln(speed)} (C + n * \ln(speed) + m * \ln(feed) + l * \ln(DoC)) = n$$

La derivata prima del logaritmo naturale della risposta ( $\ln(R)$ ) in funzione del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) è data dalla Formula (53).

$$(53) \quad \frac{\delta \ln(R)}{\delta \ln(\text{feed})} = \frac{\delta}{\delta \ln(\text{feed})} (C + n * \ln(\text{speed}) + m * \ln(\text{feed}) + l * \ln(\text{DoC})) = m$$

La derivata prima del logaritmo naturale della risposta ( $\ln(R)$ ) in funzione del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) è data dalla Formula (54).

$$(54) \quad \frac{\delta \ln(R)}{\delta \ln(\text{DoC})} = \frac{\delta}{\delta \ln(\text{DoC})} (C + n * \ln(\text{speed}) + m * \ln(\text{feed}) + l * \ln(\text{DoC})) = l$$

Ponendo le derivate prime mostrate nelle Formule (52) – (54) pari a zero per identificare i punti critici nelle curve, si ottengono le Formule (55) – (57).

$$(55) \quad \frac{\delta \ln(R)}{\delta \ln(\text{speed})} = 0 = n$$

$$(56) \quad \frac{\delta \ln(R)}{\delta \ln(\text{feed})} = 0 = m$$

$$(57) \quad \frac{\delta \ln(R)}{\delta \ln(\text{DoC})} = 0 = l$$

Tutte le derivate presentano una risposta del tipo “zero uguale ad una costante diversa da zero”. Questo risultato riferisce che non esistono punti critici nel dominio della derivata.

I punti “minimi” verranno quindi considerati come i valori che minimizzano la risposta nell'intervallo dei valori, che corrisponderanno al valore più basso dei dati testati per le variabili che hanno una dipendenza direttamente proporzionale alla risposta e al valore più alto per le variabili che hanno una dipendenza inversamente proporzionale alla risposta.

I valori che minimizzano la risposta sono uguali per tutti i materiali testati (Marca 1, Marca 2 e Marca 3) e sono:

- Per la velocità di taglio, 250 [m/min] per minimizzare sia il logaritmo della Forza normale che per minimizzare il logaritmo della Pressione normale
- Per l'avanzamento per giro, 0,05 [mm/rev] per minimizzare il logaritmo della Forza normale e 0,3 [mm/rev] per minimizzare il logaritmo della Pressione normale
- Per la profondità di passata, 0,5 [mm] per minimizzare il logaritmo della Forza normale e 3 [mm] per minimizzare il logaritmo della Pressione normale

## Studio della Desiderabilità

Il software Minitab 18 presenta una funzione che permette di ottenere l'ottimizzazione dei dati chiamata “response optimizer”. Tra le varie funzionalità del response optimizer è presente anche la funzione di ricerca del punto ottimale, settabile tramite impostazioni iniziali della funzione. Settando la funzione sul termine Minimize, si imposta la ricerca della tripla di valori delle variabili indipendenti che minimizzano la risposta [30] [31].

Il programma restituisce i valori del logaritmo naturale delle variabili indipendenti che minimizzano la risposta, intesa sia come il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) che il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ).

Per l'individuazione dei parametri ottimali della risposta, il software utilizza un design statistico basato sulle funzioni di desiderabilità [30] [31]. Questa funziona ricerca la combinazione di parametri che

simultaneamente esaudiscono il requisito richiesto. La desiderabilità è sempre espressa tra 0 e 1, dove 1 indica che la risposta sarà completamente accettata o desiderabile, mentre 0 indica che la risposta non è accettata [30] [31].

Esistono due tipi di desiderabilità:

- Individuale [30] [31], nel quale si studia come i parametri ottimizzano una singola risposta
- Composita o Complessiva [30] [31], nel quale si studia come i parametri ottimizzano complessivamente un insieme di risposte

Per risolvere la funzione di desiderabilità composita, si impone una funzione da studiare, in questo caso da minimizzare [30] definita dalla Formula (58).

$$(58) \quad F(x) = -DF$$

Dove:

$F(x)$  è la funzione risposta, in questo caso il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) e il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) in funzione dei logaritmi naturali dei parametri di taglio

$DF$  è la funzione di desiderabilità composita

La funzione di desiderabilità composita ( $DF$ ) [30], viene definita dalla Formula (59).

$$(59) \quad DF = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\left( \frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j} \right)}$$

Dove:

$DF$  è la funzione di desiderabilità composita

$d_i$  è la desiderabilità individuale dell' $i$ -esima risposta

$w_i$  è il peso della desiderabilità individuale dell' $i$ -esima risposta nello studio

Per minimizzare la risposta, si ha che le singole desiderabilità [30] possono variare in funzione dei valori della risposta, come mostrato dalle Formule (60) – (62).

$$(60) \quad d_i = 1 \text{ se } Y_i \leq L_i$$

$$(61) \quad d_i = \left[ \frac{H_i - Y_i}{H_i - L_i} \right] \text{ se } L_i \leq Y_i \leq H_i$$

$$(62) \quad d_i = 0 \text{ se } Y_i \geq H_i$$

Dove:

$Y_i$  è la risposta  $i$ -esima

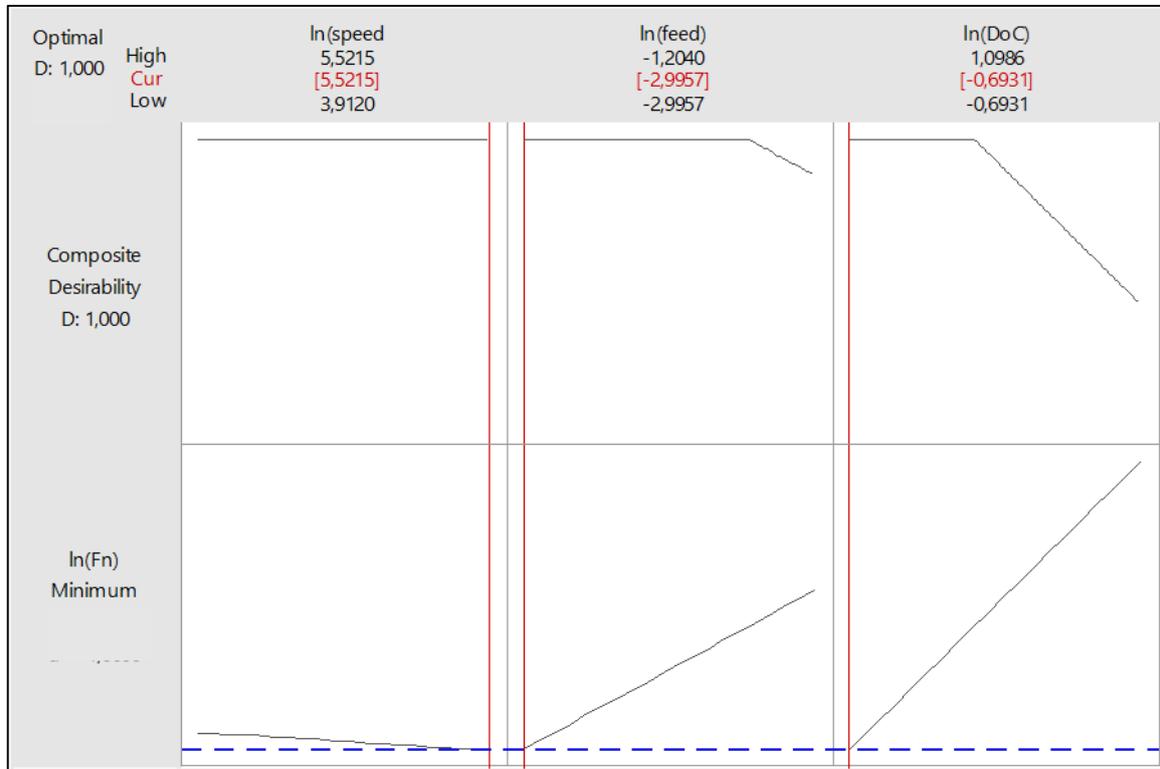
$L_i$  è il valore minimo dell'intervallo di valori assunto dalla risposta  $i$ -esima  $Y_i$

$H_i$  è il valore massimo dell'intervallo di valori assunto dalla risposta  $i$ -esima  $Y_i$

I grafici di desiderabilità per i valori minimi per il logaritmo della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) e per il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) in funzione dei logaritmi naturali delle variabili di processo sono presentati e commentati di seguito.

## Forza Normale

Il grafico restituito dal software Minitab 18 riguardante i valori dei logaritmi naturali della velocità di taglio, dell'avanzamento per giro e della profondità di passata che minimizzano i valori del logaritmo naturale della Forza normale sono presentati nella figura 68.



(Fig. 68 Rappresentazione grafica dei punti che minimizzano la risposta logaritmo naturale delle Forze normali  $\ln(Fn)$ , massimizzando la desiderabilità composta [30][31])

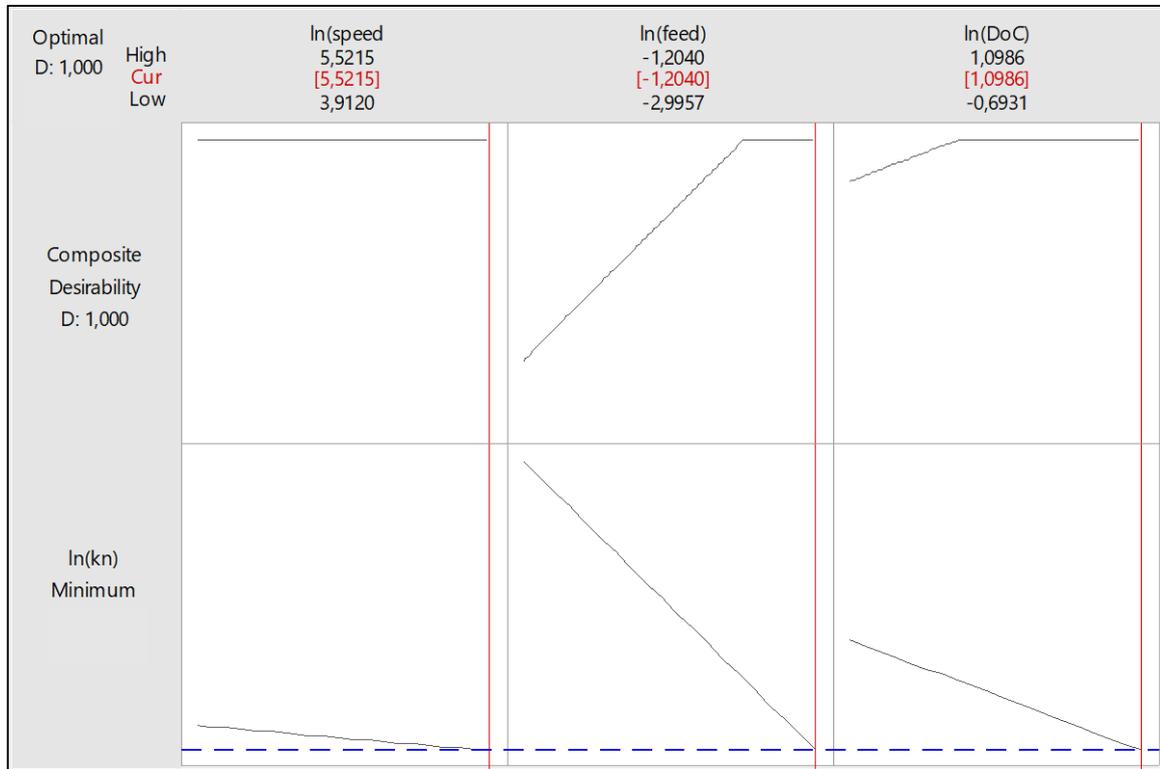
Il grafico di ottimizzazione è uguale per tutte le marche testate. I valori di logaritmo di forza normale che corrispondono al minimo sono stati oscurati per motivo di segreto industriale.

Le influenze dei singoli parametri sulla desiderabilità composta sono mostrate nel primo set di grafici in alto. In particolare, si nota come i valori che massimizzano la desiderabilità variano a seconda dell'influenza del parametro sulla risposta. Queste variazioni sono mostrate graficamente dall'ampiezza del plateau che ogni variabile presenta nei grafici di influenza sulla desiderabilità composta (grafici in alto). In particolare, si nota come il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(DoC)$ ) presenta il plateau più ristretto, in quanto è la variabile che maggiormente impatta sull'andamento del logaritmo naturale delle forze normali ( $\ln(Fn)$ ), mentre il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(speed)$ ) invece ha un plateau su tutto l'intervallo di dati in quanto è un parametro poco influente sulla risposta.

Il punto che minimizza la risposta, indicato per ogni variabile dal punto di intersezione tra la linea rossa e l'andamento del logaritmo naturale della variabile indipendente nei grafici in basso, intercetta il minimo dei dati testati per quanto riguarda il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(DoC)$ ) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(feed)$ ) e il massimo dell'intervallo di valori testato per il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(speed)$ ). Si nota anche come tutte le linee rosse intersecano la linea di importanza sulla desiderabilità complessiva della risposta in una zona di plateau, dando infatti una desiderabilità complessiva di 1, che è il miglior valore possibile e rende accettabile il punto osservato.

### Pressione normale

Il grafico restituito dal software Minitab 18 riguardante i valori dei logaritmi naturali della velocità di taglio, dell'avanzamento per giro e della profondità di passata che minimizzano i valori del logaritmo naturale della Pressione normale sono presentati nella figura 69.



(fig. 69 Rappresentazione grafica dei punti che minimizzano la risposta logaritmo naturale delle Pressioni normali  $\ln(kn)$ , massimizzando la desiderabilità composta [30][31])

Il grafico di ottimizzazione è uguale per tutte le marche testate. I valori di logaritmo di forza normale che corrispondono al minimo sono stati oscurati per motivo di segreto industriale.

Le influenze dei singoli parametri sulla desiderabilità composta sono mostrate nel primo set di grafici in alto. In particolare, si nota come il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) presenta il plateau più ristretto, in quanto è la variabile che maggiormente impatta sull'andamento del logaritmo naturale delle Pressioni normali ( $\ln(kn)$ ), mentre il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) invece ha un plateau su tutto l'intervallo di dati in quanto è un parametro poco influente sulla risposta.

Il punto che minimizza la risposta, indicato per ogni variabile dal punto di intersezione tra la linea rossa e l'andamento del logaritmo naturale della variabile indipendente nei grafici in basso, intercetta il massimo dei dati testati per il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ), il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ). Si nota anche come tutte le linee rosse intersecano la linea di importanza sulla desiderabilità complessiva della risposta in una zona di plateau, dando infatti una desiderabilità complessiva di 1, che è il miglior valore possibile e rende accettabile il punto osservato.

In conclusione, i valori che minimizzano le risposte sono uguali utilizzando il metodo dello studio delle derivate e utilizzando il metodo dello studio della desiderabilità complessiva.

## Conclusioni

Nonostante dal punto di vista matematico il logaritmo naturale delle pressioni normali ( $\ln(kn)$ ) sia correlato in maniera molto stretta con il logaritmo naturale delle Forze normali ( $\ln(Fn)$ ), si nota come le influenze sulla risposta dei singoli parametri siano diverse.

In particolare, si nota come per le Forze normali il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(DoC)$ ) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(feed)$ ) siano rispettivamente i fattori più importanti sulla risposta, dando un contributo che è direttamente proporzionale alla risposta.

Per il logaritmo delle Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) si ha invece un ordine di importanza invertito, con il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(feed)$ ) più importante del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(DoC)$ ), con un contributo delle variabili che è inversamente proporzionale alla risposta.

Per i vari materiali, sia nei modelli riguardanti il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) che quelli riguardanti il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ), il contributo del logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(speed)$ ) è trascurabile tranne che nel caso della Marca 3, dove comunque ha un contributo minimo.

I vari modelli sono in grado di spiegare una percentuale elevata dei dati forniti, in particolare si ha che per quanto riguarda il modello per il logaritmo naturale delle Forze normali ( $\ln(Fn)$ ) l'affidabilità, data dall'indice  $R^2_{adj}$ , è 97,61% per la Marca 1, 98,18% per la Marca 2 e 99,20% per la Marca 3, mentre per i modelli riguardanti il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) l'affidabilità, data dall'indice  $R^2_{adj}$ , è 95,24% per la Marca 1, 95,54% per la Marca 2 e 97,21% per la Marca 3.

L'errore sul valore di Forza normale e Pressione normale derivato dai modelli logaritmici è identico, a causa della relazione che sussiste tra questi due modelli e in particolare vale 3,25% per la Marca 1, 2,90% per la Marca 2 e 2,03% per la Marca 3.

Dalla modellazione si ottengono dei valori minimi di Forza normale per i 3 materiali che corrispondono ai punti più bassi del range di valori testati per quanto riguarda l'avanzamento per giro ( $feed$ ) pari a 0,05 [mm/rev], e la profondità di passata ( $DoC$ ) pari a 0,5 [mm], mentre il valore della velocità di taglio ( $speed$ ), dando un contributo inversamente proporzionale alla risposta, corrisponde al massimo dell'intervallo testato pari a 250 [m/min].

I valori minimi di Pressione normale corrispondono invece al massimo del range dei valori testati, corrispondenti a 250 [m/min] per la velocità di taglio, a 0,3 [mm/rev] per l'avanzamento per giro e a 3 [mm] per la profondità di passata.

# Modellazione Design of Experiments (DoE)

## Teoria del Design of Experiments

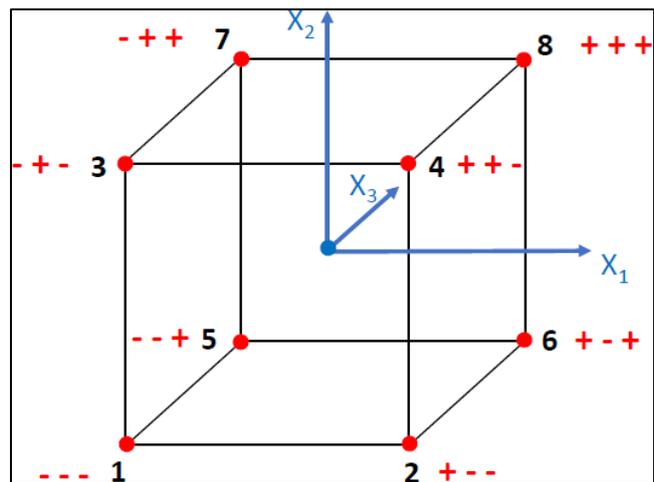
Il Design of Experiment (DoE) consiste nell'estrapolare il maggior numero di dati con il minor numero di prove sperimentali possibili. A differenza del metodo "una variabile alla volta" usato precedentemente, il DoE permette di avere una descrizione più dettagliata dell'intera area di studio in quanto prende in considerazione le interazioni tra le variabili indipendenti con un numero decisamente minore di esperimenti [1] [19] [32]. In particolare, esistono diversi tipi di design of experiment possibili, in funzione di cosa si sta cercando nell'intervallo dei dati analizzati [19] [32].

L'obiettivo del protocollo è quello sia di caratterizzare il comportamento del materiale durante lavorazioni meccaniche sia di identificare i valori che minimizzano le forze e massimizzano la vita utensile, andando quindi a ridurre i costi delle lavorazioni.

In generale per identificare l'ottimo di una zona di dati si utilizza una variazione degli stessi in maniera più complessa che in un esperimento "una variabile alla volta", facendo variare contemporaneamente i valori delle variabili indipendenti per studiarne la risposta. Questo metodo è definito modello fattoriale [19]. Il modello fattoriale più utilizzato è il modello  $2^k$  dove  $k$  è il numero di variabili indipendenti e 2 indica i valori minimi e massimi, codificati come +1 e -1 o semplicemente + e - utilizzati come limiti del campo di analisi del modello [19]. Il modello  $2^k$  è rappresentato dalle Figure 70 - 71.

	a	b	c
<i>N run</i>	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

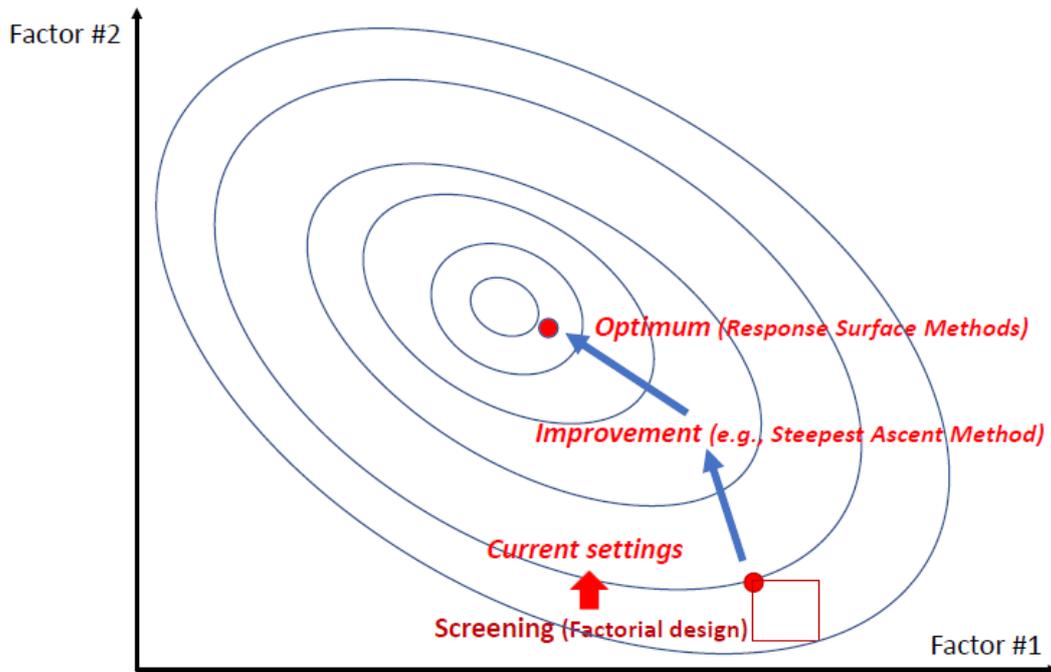
(Fig. 70 descrizione di un modello  $2^3$  dal punto di vista dei valori massimi e minimi con rappresentati anche il numero di prove che devono essere eseguite [19])



(Fig. 71 rappresentazione grafica del modello  $2^3$  con rappresentati gli assi relativi alla direzione di variazione delle 3 variabili indipendenti  $x_1$   $x_2$  e  $x_3$  e dove si posiziona ogni prova nello spazio dei valori [19])

Se l'intervallo di dati è ristretto non è detto che l'ottimale si trovi esattamente in quella zona, quindi più esperimenti dovrebbero essere eseguiti per spostarsi verso la zona richiesta. Questo metodo è definito metodo "steepest ascent". Infine, una volta trovata la zona in cui si presenta l'ottimale, una serie più complessa di esperimenti possono essere eseguiti per identificare il valore ottimale. Quest'ultimo metodo viene definito response surface [32].

Graficamente questi tre metodi applicati in step successivi sono mostrati nella Figura 72.



(Fig. 72 rappresentazione grafica ricerca valore ottimale in un design fattoriale con 2 variabili indipendenti)

Esistono due macrocategorie di modelli che possono essere applicati nelle varie fasi della ricerca dell'ottimale che sono:

1. **Modelli di primo ordine** [19]: sono modelli che presentano una formula lineare in cui tutti i parametri (intesi come le variabili indipendenti che influenzano la risposta) sono di ordine uno o inferiore. In generale questo tipo di modelli vengono utilizzati per studiare l'importanza delle variabili indipendenti all'interno della risposta e per questo vengono definiti "modelli di screening". Esistono due tipi di modelli di primo ordine lineare.
  - A. **modello di primo ordine semplice** [19], in cui la modellazione viene eseguita basandosi solo sul contributo che le variabili indipendenti hanno sulla risposta. Descritto dalla Formula (63).

$$(63) \quad y = b_0 + \sum_{i=1}^k (b_i * x_i) + \varepsilon$$

Dove:

$x_i$  sono i valori delle variabili indipendenti i-esime

$y$  è il valore della risposta prevista dal modello

$b_i$  sono i coefficienti i-esimi che moltiplicano i valori delle variabili indipendenti

$k$  è il numero di variabili indipendenti

$\varepsilon$  è l'errore residuale del modello

$b_0$  è una costante

- B. **modello di interazione** [19], in cui oltre allo studio del contributo delle singole variabili indipendenti si studia anche il contributo delle interazioni tra le variabili indipendenti sulla risposta. Descritto dalla Formula (64).

$$(64) \quad y = b_0 + \sum_{i=1}^k (b_i * x_i) + \sum_{i,j=1; i \neq j}^k (b_{ij} * x_i * x_j) + \varepsilon$$

Dove:

$x_i$  sono i valori delle variabili indipendenti i-esime

$y$  è il valore della risposta prevista dal modello

$k$  è il numero di variabili indipendenti

$b_i$  sono i coefficienti i-esimi che moltiplicano i valori delle variabili indipendenti

$b_{ij}$  sono i coefficienti di interazione tra le variabili indipendenti

$\varepsilon$  è l'errore residuale del modello

$b_0$  è una costante

2. **Modelli di secondo ordine** [19] sono modelli che presentano una formula quadratica in quanto partecipano anche le interazioni quadratiche delle variabili indipendenti dette "termini quadratici". Questo tipo di modello serve per dare una descrizione più approfondita e completa dell'area dei valori studiata e viene solitamente utilizzata nei modelli di "response surface". Descritti dalla Formula (65).

$$(65) \quad y = b_0 + \sum_{i=1}^k (b_i * x_i) + \sum_{i,j=1; i \neq j}^k (b_{ij} * x_i * x_j) + \sum_{i=1}^k (b_{ii} * x_i^2) + \varepsilon$$

Dove:

$x_i$  sono i valori delle variabili indipendenti i-esime

$y$  è il valore della risposta prevista dal modello

$k$  è il numero di variabili indipendenti

$b_i$  sono i coefficienti i-esimi che moltiplicano i valori delle variabili indipendenti

$b_{ij}$  sono i coefficienti di interazione tra le variabili indipendenti

$b_{ii}$  sono i coefficienti dei parametri quadratici

$\varepsilon$  è l'errore residuale del modello

$b_0$  è una costante

Per il protocollo, alcuni di questi passaggi possono essere evitati. Questo perché l'intervallo di valori può essere scelto in modo da racchiudere i parametri solitamente utilizzati in ambito industriale per la tornitura in sgrossatura. Eseguendo questa semplificazione, l'unico passaggio che occorre eseguire è l'utilizzo del metodo response surface per identificare un modello di secondo ordine che permetta di dare una buona descrizione dello spazio dei valori utilizzati e che permetta anche di identificare le triple dei logaritmi naturali della velocità di taglio, dell'avanzamento per giro e della profondità di passata che minimizzano i logaritmi naturali delle Forze e delle Pressioni normali [1].

Scelta della tipologia di Design of experiment

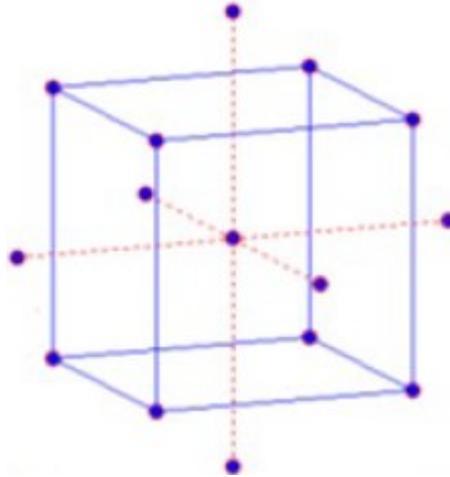
Il design di response surface presenta varie sottocategorie di modelli che possono essere applicati in ambiti diversi con caratteristiche diverse. Esistono dei modelli di ottenibili dal design di response surface che si basano sui modelli fattoriali  $2^k$  [19] [33] [34]. Tra i più importanti troviamo il Central Composite Design [33] [34].

### **Central Composite design** [33]

Questo tipo di design è basato attorno ad un modello fattoriale  $2^k$  in cui però vengono presi dei punti in più rispetto al modello base. Il numero e il valore dei punti aggiuntivi si modifica con il tipo di sotto design utilizzato. Il central composite design si divide in 3 sottocategorie [32] [33]

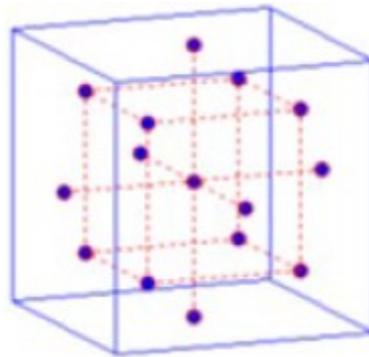
1. **Central Composite design Circumscribed** (CCC) [33] [35]: tipo di design che espande il modello  $2^k$  con un numero predefinito di punti aggiuntivi esterni e centrali all'intervallo di valori minimi e massimi (-1; +1). I punti esterni servono a dare una migliore rappresentazione dello spazio dei dati al modello

mentre i punti centrali servono a minimizzare l'errore. Questo tipo di Design è molto preciso ma richiede la conoscenza dei punti esterni. Rappresentazione grafica mostrata nella Figura 73.



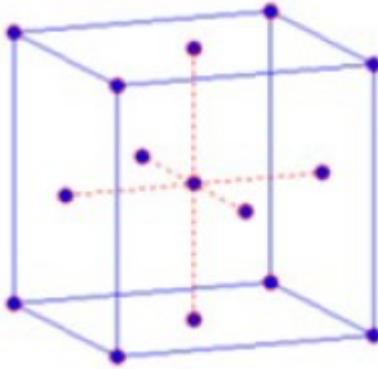
(Fig. 73 rappresentazione grafica del modello CCC nello spazio dei valori [32])

2. Central Composite Design Inscribed (CCI) [33] [35]: tipo di design che presenta dei punti aggiuntivi all'interno dell'intervallo  $(-1; +1)$  del modello  $2^k$ . I valori aggiuntivi richiesti sono sia punti centrali (per minimizzare l'errore) sia punti aggiuntivi per dare una spiegazione migliore dell'intervallo compreso. Da un'ottima rappresentazione dell'intervallo compreso tra i punti aggiuntivi ma meno precisa su tutto l'intervallo iniziale  $(-1; +1)$ . Rappresentazione grafica mostrata nella Figura 74.



(Fig. 74 rappresentazione grafica del modello CCI nello spazio dei valori [32])

3. Central Composite Design Face-Centered (CCF) [33] [35]: tipo di design che presenta dei punti aggiuntivi sia centrali che corrispondenti agli estremi dell'intervallo di partenza, cioè corrispondenti agli estremi dell'intervallo  $(-1; +1)$ . Questo modello dà una buona caratterizzazione del processo ma non dà una buona stima dei valori quadratici. Rappresentazione grafica mostrata nella Figura 75.



(Fig. 75 rappresentazione grafica del modello CCF nello spazio dei valori [32])

Considerati i vari sotto modelli del metodo di response surface con base il modello fattoriale  $2^k$ , il design scelto è il Central Composite Design Circumscribed in quanto è il tipo di design che da una descrizione più accurata dello spazio dei dati. Inoltre, scegliendo opportunamente l'intervallo  $(-1; +1)$  è possibile avere uno spazio dei dati che sarà molto simile allo spazio dei dati studiati nell'esperimento una variabile alla volta, permettendo quindi una comparazione dei modelli ottenuti nei due esperimenti per identificare quale descrizione è la più accurata [1].

La tabella dei valori codificati per un modello CCC in 3 variabili indipendenti è rappresentata nella Figura 76, dove i valori evidenziati in rosso sono i dati codificati tipici di un esperimento  $2^k$  con 3 variabili indipendenti, i punti evidenziati in blu rappresentano i punti aggiuntivi esterni all'intervallo del modello fattoriale e i punti evidenziati in nero rappresentano i punti centrali [32]

m	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$
1	-1.0000	-1.0000	-1.0000	1	1	1	1	1	1
1	-1.0000	-1.0000	1.0000	1	1	1	1	-1	-1
1	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	1	1	-1	1	-1
1	-1.0000	1.0000	1.0000	1	1	1	-1	-1	1
1	1.0000	-1.0000	-1.0000	1	1	1	-1	-1	1
1	1.0000	-1.0000	1.0000	1	1	1	-1	1	-1
1	1.0000	1.0000	-1.0000	1	1	1	1	-1	-1
1	1.0000	1.0000	1.0000	1	1	1	1	1	1
1	-1.6818	0	0	2.82843	0	0	0	0	0
1	1.6818	0	0	2.82843	0	0	0	0	0
1	0	-1.6818	0	0	2.82843	0	0	0	0
1	0	1.6818	0	0	2.82843	0	0	0	0
1	0	0	-1.6818	0	0	2.82843	0	0	0
1	0	0	1.6818	0	0	2.82843	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(Fig. 76 tabella dei valori codificati affidati alle variabili indipendenti in un modello CCC [32])

## Teoria dello sviluppo dei modelli di regressione

### Analisi di Varianza [15] [19]

Per identificare l'importanza delle variabili indipendenti si utilizza l'analisi di varianza sfruttando quella che viene definita "l'analisi dei contrasti multipli" [15] [19]. I contrasti sono combinazioni lineari delle medie dei fattori, definiti dalla Formula (66).

$$(66) \quad C = \sum_{j=1}^p (c_j * \bar{x}_j)$$

Dove:

C è il contrasto

$c_j$  è il coefficiente del j-esimo gruppo di valori della combinazione lineare, nel caso di un modello CCC corrisponde al valore della codifica

$\bar{x}_j$  è la media del j-esimo gruppo di dati

p è il numero di gruppi di fattori presenti

Per definizione di contrasto la somma di tutti i coefficienti deve essere 0 [15] [19] secondo la Formula (67).

$$(67) \quad \sum_{j=1}^p (c_j) = 0$$

In un sistema di p fattori, sono possibili p-1 contrasti indipendenti, ognuno con un grado di libertà pari a 1. La devianza di ogni contrasto ( $SS_C$ ) [15] [19] è descritta dalla Formula (68).

$$(68) \quad SS_C = \frac{\left(\sum_{j=1}^p (c_j * \bar{x}_j)\right)^2}{n * \left(\sum_{j=1}^p (c_j^2)\right)}$$

Dove:

$SS_C$  è la devianza

$c_j$  è il coefficiente del j-esimo gruppo di valori della combinazione lineare, nel caso di un modello CCC corrisponde al valore della codifica

$\bar{x}_j$  è la media del j-esimo gruppo di dati

p è il numero di gruppi di fattori presenti

n è il numero di osservazioni

Essendo che per ogni contrasto i gradi di libertà ( $df_C$ ) sono uguali a 1 [19], si avrà che le medie dei quadrati ( $MS_C$ ) riguardanti i contrasti saranno uguali alle devianze come descritto dalla Formula (69).

$$(69) \quad MS_C = \frac{SS_C}{df_C} = \frac{SS_C}{1} = SS_C$$

Analogamente all'analisi di varianza per una variabile alla volta, il fattore F viene calcolato come rapporto tra la media dei quadrati del contrasto ( $MS_C$ ) e la media dei quadrati degli errori ( $MS_W$ ) [19], dove la media dei quadrati degli errori ( $MS_W$  o  $MS_E$ ) [19] è descritta dalla Formula (70).

$$(70) \quad MS_W = MS_E = \frac{SS_W}{df_W} = \frac{\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}{n - p}$$

Dove:

$p$  è il numero di gruppi di fattori presenti

$n_j$  è il numero di osservazioni e quindi la numerosità di ogni gruppo

$X_j$  è la media del gruppo  $j$ -esimo

$X_{ij}$  è il singolo valore

$n$  è il numero di osservazioni

Quindi il parametro  $F$  [19] assume la forma descritta nella Formula (71).

$$(71) \quad F = \frac{MS_C}{MS_W}$$

Da cui si ricava un valore di  $F$  di Fisher-Snedecor che vale  $F_{1,(n-p)}$  tabulato, dove 1 e  $n-p$  sono i gradi di libertà annessi alle medie dei quadrati [15] [19].

Infine, si ricava la probabilità  $P$  per cui si verifica o si nega l'ipotesi  $H_0$  analogamente al caso a una variabile alla volta, con  $\alpha$  uguale a 0.05 [15] [19].

### Regressione lineare [16]

Per ottenere un modello che preveda la risposta in funzione delle variabili indipendenti dopo aver applicato un design di tipo CCC, che prevede l'utilizzo di un modello con i termini quadratici, si può comunque applicare una regressione lineare multipla. La regressione lineare multipla può essere utilizzata perché anche se il modello quadratico non è lineare nelle variabili, è lineare nei parametri ( $\beta$ ). La non linearità nelle variabili può essere semplicemente risolta con un cambio di variabili [16].

Avendo quindi una linearità nel modello, la regressione lineare multipla può essere applicata analogamente al caso Una Variabile Alla Volta, con la differenza che più variabili saranno presenti nel modello finale, in quanto le interazioni e i termini quadratici vengono considerati nel design CCC.

## Response Surface sperimentale per lo studio delle forze

Essendo il design scelto un'espansione di un modello fattoriale  $2^k$ , la codifica delle variabili nei valori -1, 0 e 1 [1] [19] viene eseguita utilizzando la Formula (72).

$$(72) \quad \text{variabile codificata} = \frac{(\text{valore non codificato} - \text{valore "0"})}{(\text{valore "1"} - \text{valore "0"})}$$

Dove, il valore 1 e il valore 0 sono due valori non codificati in questo caso definiti a priori, considerati rispettivamente come il valore più alto dell'intervallo da testare e il valore centrale dell'intervallo da testare.

Nel CCC si devono considerare due punti aggiuntivi codificati [35] definiti dalla Formula (73).

$$(73) \quad \pm\alpha = N^{\left(\frac{1}{4}\right)} = 2^{\left(\frac{k}{4}\right)} = 2^{\left(\frac{3}{4}\right)} = \pm 1.682$$

Dove:

N è il tipo di design fattoriale ( $2^k$ ) adottato

K è il numero di variabili indipendenti

Come mostrato dalla Formula (73), si vede che i punti  $\pm\alpha$  sono maggiori dei punti  $\pm 1$  dell'intervallo di un design sperimentale fattoriale ma, visto che i valori che sono stati testati per le variabili indipendenti sono già in un intervallo molto ampio e comprensivo dei valori solitamente adottati in sgrossatura nell'ambito industriale, si è deciso di adottare dei valori  $\pm\alpha$  che si avvicinino il più possibile all'intervallo di dati testati dalle prove "Una Variabile Alla Volta" (UVAV).

Per fare questo si è lavorato sul punto centrale (valore 0) e sul limite alto dell'intervallo di partenza (valore 1) in modo da ottenere dei valori il più vicino possibile ai valori limite delle prove UVAV.

Tenendo conto della linearizzazione [1] che viene applicata alla risposta, data dalla Formula (40), i valori forniti alla Formula (72) sono in termini logaritmici.

I valori che verranno utilizzati per il DoE con relativa codifica e valore dato da linearizzazione logaritmica sono mostrati nella Tabella 2.

speed			feed			DoC		
valore prove +50			valore prove + 0,1			valore medio + 0,75		
codice	valori	ln(valore)	codice	valore	ln(valore)	codice	valore	ln(valore)
-1,68179	92,46347	4,526814	-1,68179	0,10113	-2,29135	-1,68179	0,960561	-0,04024
-1	112,5	4,722953	-1	0,133333	-2,0149	-1	1,225	0,202941
0	150	5,010635	0	0,2	-1,60944	0	1,75	0,559616
1	200	5,298317	1	0,3	-1,20397	1	2,5	0,916291
1,681793	243,3393	5,494457	1,681793	0,39553	-0,92753	1,681793	3,18824	1,159469

(Tabella 2, valori di velocità di taglio, avanzamento per giro e profondità di passata utilizzati nelle prove di Design of Experiments)

I valori codificati 0 e 1 sono scelti in maniera arbitraria mentre gli altri valori sono ricavati tramite la Formula (74).

$$(74) \quad \text{variabile non codificata} = (\text{valore codificato} * (\text{valore "1"} - \text{valore "0"})) + \text{valore "0"}$$

In particolare, i valori codificati come 0 sono i valori che sono stati utilizzati come fissi nelle prove una variabile alla volta (tranne nel caso del DoC dove si è preso il valore medio dei vari DoC testati nella prova a DoC

variabile) e i valori codificati come 1 sono stati scelti in modo che utilizzando la formula sovrastante si ottengano dei valori tali da comprendere un'area più ampia possibile dei valori testati nell'esperimento "Una Variabile Alla Volta" (UVAV).

Il numero di prove in un CCC è standard [32] [35] e viene calcolato nella Formula (75).

$$(75) \quad 2^k + 2k + n_0 = 2^3 + (2 * 3) + (2 * 3) = 20$$

Dove:

$2^k$  è il numero di punti del modello fattoriale scelto e corrisponde a 8 esperimenti

$2k$  è il numero di punti assiali e corrisponde a 6 esperimenti aggiuntivi

$n_0$  è il numero di punti centrali per valutare l'errore e corrisponde a 2k e quindi a ulteriori 6 esperimenti per un totale di 20 esperimenti che dovranno essere eseguiti per avere un modello.

L'ordine generale delle prove tipico del Design Central Composite Circumscribed (CCC) [33] è dato dalla Figura 77.

CCC (CCI)			
Rep	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	-1	-1	-1
1	+1	-1	-1
1	-1	+1	-1
1	+1	+1	-1
1	-1	-1	+1
1	+1	-1	+1
1	-1	+1	+1
1	+1	+1	+1
1	-1.682	0	0
1	1.682	0	0
1	0	-1.682	0
1	0	1.682	0
1	0	0	-1.682
1	0	0	1.682
6	0	0	0
<b>Total Runs = 20</b>			

(Fig. 77 ordine dei valori codificati delle prove da eseguire per ottenere un modello CCC [33])

Per ridurre l'errore legato all'ordine delle prove, si aggiunge una randomizzazione degli esperimenti (dato dall'ordine casuale delle righe della tabella sovrastante) [32] [33] [35] ottenendo la tabella di esperimenti da eseguire, mostrata dalla Figura 78.

numero prove		codificati			non codificati			non codificati logaritmici		
StdOrder	RunOrder	X1	X2	X3	speed	feed	DoC	ln(speed)	ln(feed)	ln(DoC)
15	1	0	0	0	150	0,2	1,75	5,010635	-1,60944	0,559616
1	2	-1	-1	-1	113	0,133	1,225	4,727388	-2,01741	0,202941
11	3	0	-1,68179	0	150	0,1	1,75	5,010635	-2,30259	0,559616
2	4	1	-1	-1	200	0,133	1,225	5,298317	-2,01741	0,202941
20	5	0	0	0	150	0,2	1,75	5,010635	-1,60944	0,559616
18	6	0	0	0	150	0,2	1,75	5,010635	-1,60944	0,559616
4	7	1	1	-1	200	0,3	1,225	5,298317	-1,20397	0,202941
9	8	-1,68179	0	0	92	0,2	1,75	4,521789	-1,60944	0,559616
17	9	0	0	0	150	0,2	1,75	5,010635	-1,60944	0,559616
19	10	0	0	0	150	0,2	1,75	5,010635	-1,60944	0,559616
6	11	1	-1	1	200	0,133	2,5	5,298317	-2,01741	0,916291
3	12	-1	1	-1	113	0,3	1,225	4,727388	-1,20397	0,202941
13	13	0	0	-1,68179	150	0,2	0,96	5,010635	-1,60944	-0,04082
10	14	1,681793	0	0	243	0,2	1,75	5,493061	-1,60944	0,559616
16	15	0	0	0	150	0,2	1,75	5,010635	-1,60944	0,559616
8	16	1	1	1	200	0,3	2,5	5,298317	-1,20397	0,916291
7	17	-1	1	1	113	0,3	2,5	4,727388	-1,20397	0,916291
14	18	0	0	1,681793	150	0,2	3,2	5,010635	-1,60944	1,163151
12	19	0	1,681793	0	150	0,4	1,75	5,010635	-0,91629	0,559616
5	20	-1	-1	1	113	0,133	2,5	4,727388	-2,01741	0,916291

(Fig. 78, ordine delle prove eseguite e il valore numerico delle variabili indipendenti associate ad ogni prova)

Dove stdorder definisce l'ordine seguendo la tabella sovrastante e runorder è l'effettivo ordine degli esperimenti eseguiti dopo randomizzazione.

## Modellizzazione dei dati sperimentali

Il software Minitab 18 esegue lo studio del logaritmo naturale dei valori delle 3 variabile indipendenti e della risposta espressa come logaritmo della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) e come logaritmo della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) sfruttando il design of experiment CCC.

L'importanza delle singole componenti e le equazioni caratteristiche del materiale vengono riportate di seguito per tutti i materiali.

### Marca 1

#### Forza normale

L'analisi di varianza dei dati sperimentali per la Marca 1 riguardanti il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) è mostrata nella Figura 79.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	2,12593	0,23621	653	0
Linear	3	2,10929	0,7031	1943,67	0
$\ln(\text{speed})$	1	0,00884	0,00884	24,44	0,001
$\ln(\text{feed})$	1	1,00312	1,00312	2773,05	0
$\ln(\text{DoC})$	1	1,09742	1,09742	3033,75	0
Square	3	0,0176	0,00587	16,21	0
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{speed})$	1	0,00229	0,00229	6,33	0,031
$\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$	1	0,0146	0,0146	40,35	0
$\ln(\text{DoC})*\ln(\text{DoC})$	1	0,00338	0,00338	9,33	0,012
2-Way Interaction	3	0,0002	0,00007	0,19	0,904
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{feed})$	1	0	0	0	0,948
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{DoC})$	1	0,00001	0,00001	0,02	0,878
$\ln(\text{feed})*\ln(\text{DoC})$	1	0,00019	0,00019	0,53	0,484
Error	10	0,00362	0,00036		
Lack-of-Fit	5	0,00196	0,00039	1,18	0,429
Pure Error	5	0,00166	0,00033		
Total	19	2,12955			

(Fig. 79 analisi di varianza per i dati riguardanti il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) per Design of Experiment CCC della Marca 1)

Per i valori riguardanti i termini lineari, si nota come il logaritmo naturale delle variabili di taglio hanno una influenza elevata sulla risposta. Il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ), presenta un valore di P-value leggermente diverso da 0, indicando un'influenza più bassa rispetto agli altri termini lineari.

Per i valori relativi ai termini quadratici, dall'analisi di varianza risulta come tutti i termini quadratici siano importanti sulla risposta, ma con importanze diverse legate al valore del p-value. In particolare, si nota come il termine quadratico legato al logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})*\ln(\text{speed})$ ) e il termine quadratico legato alla profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})*\ln(\text{DoC})$ ) presentano un P-value maggiore di 0 ma inferiore a 0,05 indicando una bassa importanza sulla risposta. Il termine quadratico legato al logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$ ) presenta un P-value pari a 0 per cui avrà un'importanza più alta rispetto agli altri termini quadratici.

Avendo un parametro  $P > 0.05$ , i termini relativi alle interazioni tra i logaritmi naturali delle variabili potrebbero essere trascurati [23] [24].

La tabella restituita dal software minitab 18 riguardante i coefficienti è presentata nella Figura 80.

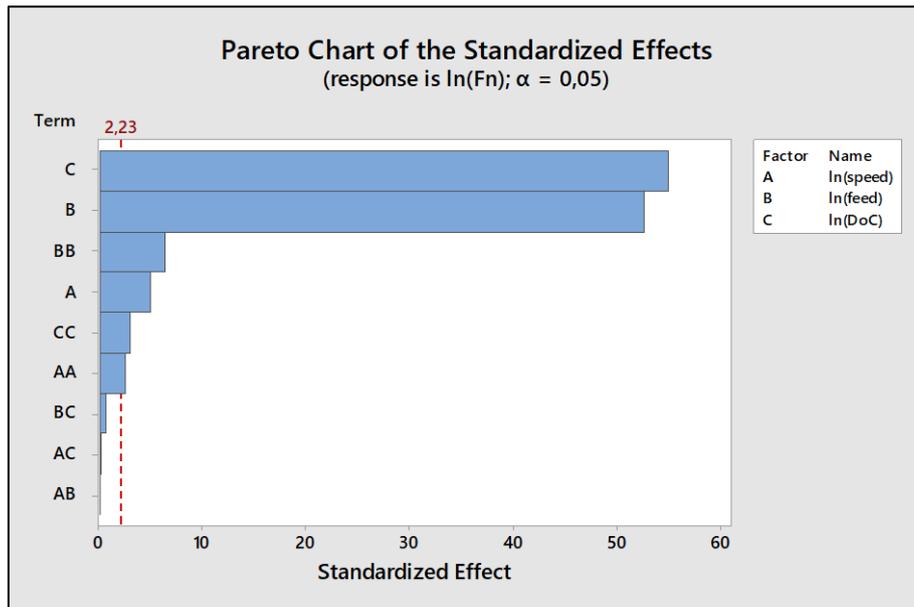
Coded Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	C	$SE_C$	883,09	0	
ln(speed)	$-\alpha$	$SE_\alpha$	-4,94	0,001	1
ln(feed)	$\beta$	$SE_\beta$	52,66	0	1
ln(DoC)	$\gamma$	$SE_\gamma$	55,08	0	1
ln(speed)*ln(speed)	$\alpha\alpha$	$SE_{\alpha\alpha}$	2,52	0,031	1,02
ln(feed)*ln(feed)	$\beta\beta$	$SE_{\beta\beta}$	6,35	0	1,02
ln(DoC)*ln(DoC)	$\gamma\gamma$	$SE_{\gamma\gamma}$	3,06	0,012	1,02
ln(speed)*ln(feed)	$\alpha\beta$	$SE_{\alpha\beta}$	0,07	0,948	1
ln(speed)*ln(DoC)	$-\alpha\gamma$	$SE_{\alpha\gamma}$	-0,16	0,878	1
ln(feed)*ln(DoC)	$\beta\gamma$	$SE_{\beta\gamma}$	0,73	0,484	1

(Fig. 80 tabella dei coefficienti per il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) per la Marca 1)

Dalla tabella si estrapolano i t-value dei coefficienti riguardanti le variabili indipendenti in valore assoluto per costruire i grafici di Pareto. Il valore critico corrisponde al valore di T di student con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) e con gradi di libertà di errore pari a 14 (come mostrato dalla ANOVA), che restituisce un valore di 2,228 (approssimato dal software a 2,23) [20] [21] [22].

I coefficienti mostrati nella tabella sono codificati per ridurre la multicollinearità tra i termini studiati dall'analisi di varianza, intesa come la relazione tra variabili predittive che potrebbero aumentare la varianza dei coefficienti di regressione causando una instabilità nella creazione dei coefficienti. La multicollinearità viene mostrata dai coefficienti VIF (Variance Inflation Factor), se hanno un valore pari a 1, le variabili non sono correlate, mentre se i VIF superano 1 si ha correlazione. Se il valore dei coefficienti VIF è maggiore di 5, i coefficienti di regressione delle variabili altamente correlate non sono più stimabili con certezza [36] [43]. La codifica dei coefficienti è relativa al tipo di codifica che è stata utilizzata per ottenere i valori delle variabili da usare nelle varie prove del Design of Experiments [35].

Per uno studio di response surface, il software Minitab 18 restituisce il grafico di Pareto per i T-value (definiti dal software come standardized Effect) estrapolati dalla tabella dei coefficienti. Il grafico di Pareto è presentato nella Figura 81.



(Fig. 81 grafico di Pareto che descrive l'importanza delle singole variabili sulla risposta per la Marca 1)

Dal grafico si può notare come i parametri più impattanti sulla risposta siano il logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)). Il logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) ha un'importanza molto inferiore delle altre due legate alle variabili indipendenti di processo sulla risposta (quarto in ordine di importanza).

Si può notare come tutti gli effetti quadratici delle variabili indipendenti siano parametri influenti nella risposta. In particolare, si nota come il termine relativo alla componente quadratica del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)\*ln(feed)) abbia una influenza maggiore di quella riguardante il logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) e sia il terzo in ordine di importanza.

Infine, si nota come tutti gli effetti di interazione siano al di sotto del valore critico per essere considerati influenti sulla risposta e quindi potrebbero essere trascurati.

Il modello di regressione ottenuto per il Central Composite design Circumscribed è illustrato nella Figura 82.

**Regression Equation in Uncoded Units**

$$\begin{aligned} \ln(Fn) = & C - \alpha \ln(\text{speed}) + \beta \ln(\text{feed}) + \gamma \ln(\text{DoC}) + \alpha\alpha \ln(\text{speed})*\ln(\text{speed}) \\ & + \beta\beta \ln(\text{feed})*\ln(\text{feed}) + \gamma\gamma \ln(\text{DoC})*\ln(\text{DoC}) + \alpha\beta \ln(\text{speed})*\ln(\text{feed}) \\ & - \alpha\gamma \ln(\text{speed})*\ln(\text{DoC}) + \beta\gamma \ln(\text{feed})*\ln(\text{DoC}) \end{aligned}$$

(Fig. 82 modello di regressione ottenuto per i dati studiati nel CCC applicato all'Marca 1)

Si nota come il coefficiente del logaritmo della velocità di taglio (ln(speed)) indichi un andamento inversamente proporzionale della risposta rispetto a questo parametro. Un altro parametro con tendenza inversamente proporzionale è il contributo dell'interazione tra il logaritmo naturale della velocità di taglio e quello della profondità di passata (ln(speed)\*ln(DoC)).

Tutti gli altri coefficienti indicano una tendenza direttamente proporzionale della risposta con la variazione delle variabili.

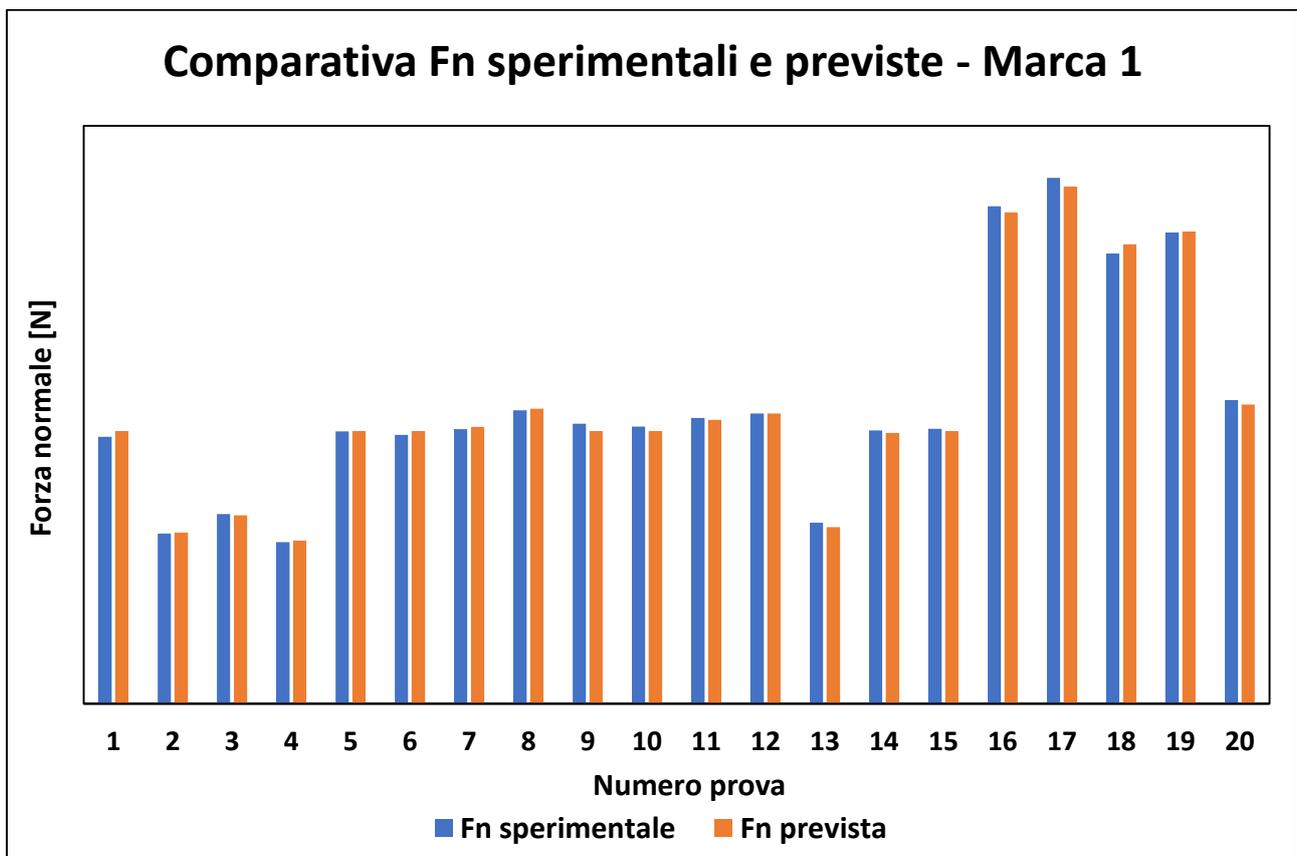
Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice  $R^2$  e  $R^2$  aggiustato definita dalla Figura 83.

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,019019	99,83%	99,68%	99,19%

(Fig. 83 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) della Marca 1)

I valori dei parametri  $R^2$  e  $R^2$  (definito nella figura soprastante come R-sq(adj)) sono maggiori del valore soglia posto al 95% (contando un 5% di errore) e quindi il modello è affidabile [17].

Usando il software Excel, si confrontano le risposte ottenute dagli esperimenti con le risposte ottenute applicando il modello di Response Surface, tutto riportato in termini di Forza normale (Fn). Si ottiene il seguente grafico (Figura 84).



(Fig. 84 mostra le differenze nei valori ottenuti tra il modello (Fn prevista) e il valore sperimentale ottenuto (Fn sperimentale) per la Marca 1 per i valori di Forza normale (Fn))

Dal grafico si nota come il modello presentato restituisca valori di Forza normale (Fn prevista) molto vicini ai termini misurati sperimentalmente (Fn sperimentale).

Alcune prove presentano una differenza maggiore tra i valori di Forza normale prevista e sperimentale, queste prove sono le prove associate ai punti centrali del modello (intese con le prove svolte con i valori centrali nell'intervallo dei dati scelti per i logaritmi naturali delle variabili indipendenti) e le prove che presentano in generale valori del logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)) alti e valori del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)) bassi.

L'errore medio, misurato come media dei singoli errori sulle prove espressi in valore assoluto, vale 1,145%.

## Pressione normale

L'analisi di varianza dei dati sperimentali per la Marca 1 riguardanti il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) è mostrata nella Figura 85.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,360972	0,040108	110,88	0
Linear	3	0,342476	0,114159	315,59	0
$\ln(\text{speed})$	1	0,00884	0,00884	24,44	0,001
$\ln(\text{feed})$	1	0,259549	0,259549	717,51	0
$\ln(\text{DoC})$	1	0,074078	0,074078	204,78	0
Square	3	0,017596	0,005865	16,21	0
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{speed})$	1	0,002288	0,002288	6,33	0,031
$\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$	1	0,014597	0,014597	40,35	0
$\ln(\text{DoC})*\ln(\text{DoC})$	1	0,003376	0,003376	9,33	0,012
2-Way Interaction	3	0,000201	0,000067	0,19	0,904
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{feed})$	1	0,000002	0,000002	0	0,948
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{DoC})$	1	0,000009	0,000009	0,02	0,878
$\ln(\text{feed})*\ln(\text{DoC})$	1	0,000191	0,000191	0,53	0,484
Error	10	0,003617	0,000362		
Lack-of-Fit	5	0,00196	0,000392	1,18	0,429
Pure Error	5	0,001658	0,000332		
Total	19	0,364589			

(Fig. 85 analisi di varianza per i dati riguardanti il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) per Design of Experiment CCC della Marca 1)

Per i valori riguardanti i termini lineari, si nota come il logaritmo naturale delle variabili di taglio hanno una influenza elevata sulla risposta. Il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ), presenta un valore di P-value leggermente diverso da 0, indicando un'influenza più bassa rispetto agli altri termini lineari.

Per i valori relativi ai termini quadratici, dall'analisi di varianza risulta come tutti i termini quadratici siano importanti sulla risposta, ma con importanze diverse legate al valore del p-value. In particolare, si nota come il termine quadratico legato al logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})*\ln(\text{speed})$ ) e il termine quadratico legato alla profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})*\ln(\text{DoC})$ ) presentano un p-value maggiore di 0 ma inferiore a 0,05 indicando una bassa importanza sulla risposta. Il termine quadratico legato al logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$ ) presenta un P-value pari a 0 per cui avrà un'importanza più alta rispetto agli altri termini quadratici.

Avendo un parametro  $P > 0.05$ , i termini relativi alle interazioni tra i logaritmi naturali delle variabili potrebbero essere trascurati [23] [24].

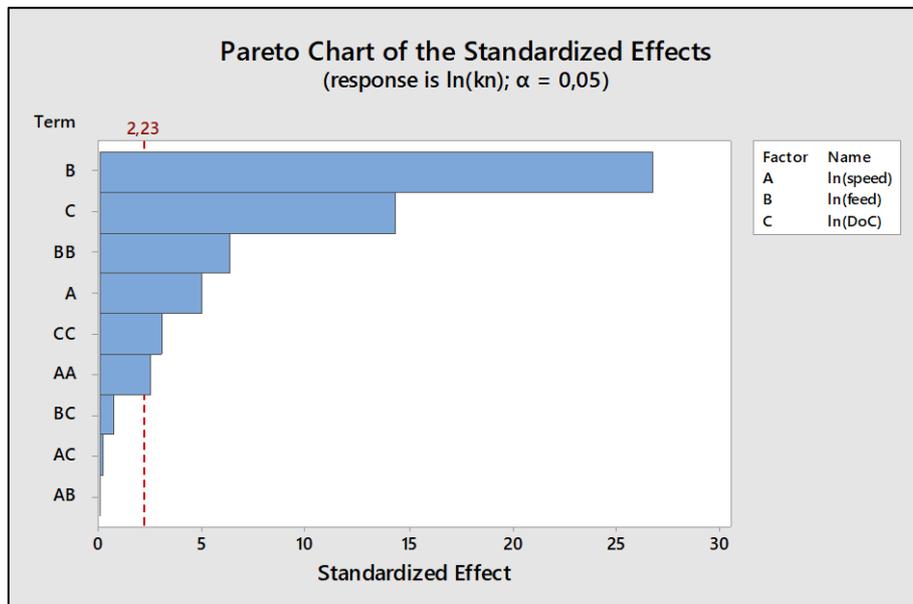
La tabella restituita dal software Minitab 18 riguardante i coefficienti è presentata nella Figura 86.

Coded Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	C	SE <sub>C</sub>	1018,17	0	
ln(speed)	- $\alpha$	SE <sub><math>\alpha</math></sub>	-4,94	0,001	1
ln(feed)	- $\delta$	SE <sub><math>\beta</math></sub>	-26,79	0	1
ln(DoC)	- $\epsilon$	SE <sub><math>\gamma</math></sub>	-14,31	0	1
ln(speed)*ln(speed)	$\alpha\alpha$	SE <sub><math>\alpha\alpha</math></sub>	2,52	0,031	1,02
ln(feed)*ln(feed)	$\beta\beta$	SE <sub><math>\beta\beta</math></sub>	6,35	0	1,02
ln(DoC)*ln(DoC)	$\gamma\gamma$	SE <sub><math>\gamma\gamma</math></sub>	3,06	0,012	1,02
ln(speed)*ln(feed)	$\alpha\beta$	SE <sub><math>\alpha\beta</math></sub>	0,07	0,948	1
ln(speed)*ln(DoC)	- $\alpha\gamma$	SE <sub><math>\alpha\gamma</math></sub>	-0,16	0,878	1
ln(feed)*ln(DoC)	$\beta\gamma$	SE <sub><math>\beta\gamma</math></sub>	0,73	0,484	1

(Fig. 86 tabella dei coefficienti per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) per la Marca 1)

Dalla tabella si estrapolano i t-value dei coefficienti riguardanti le variabili indipendenti in valore assoluto per costruire i grafici di Pareto. Il valore critico corrisponde al valore di T di student con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) e con gradi di libertà di errore pari a 14 (come mostrato dalla ANOVA), che restituisce un valore di 2,228 (approssimato dal software a 2,23) [20] [21] [22]. I valori di VIF sono uguali a 1 per tutti i coefficienti ad eccezione dei parametri quadratici, che mostrano una leggera correlazione con le variabili indipendenti, ma comunque hanno un valore molto al di sotto del limite (pari a 5) [36] [43].

Per uno studio di response surface, il software Minitab 18 restituisce il grafico di Pareto per i T-value (definiti dal software come standardized Effect) estrapolati dalla tabella dei coefficienti. Il grafico di Pareto è presentato nella Figura 87.



(Fig. 87 grafico di Pareto che descrive l'importanza delle singole variabili sulla risposta per la Marca 1)

Dal grafico si può notare come i parametri più impattanti sulla risposta siano rispettivamente il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)) e il logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)). Il logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) ha un'importanza molto inferiore rispetto agli altri termini lineari (quarto in ordine di importanza).

Si può notare come tutti gli effetti quadratici delle variabili indipendenti siano parametri influenti nella risposta. In particolare, si nota come il termine relativo alla componente quadratica del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed})$ ) abbia una influenza maggiore di quella riguardante il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) e sia il terzo in ordine di importanza.

Infine, si nota come tutti gli effetti di interazione siano al di sotto del valore critico per essere considerati influenti sulla risposta e quindi potrebbero essere trascurati.

Il modello di regressione ottenuto per il Central Composite design Circumscribed è illustrato nella Figura 88

**Regression Equation in Uncoded Units**

$$\ln(kn) = C - \alpha \ln(\text{speed}) + b \ln(\text{feed}) - c \ln(\text{DoC}) + \alpha\alpha \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{speed}) + \beta\beta \ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed}) + \gamma\gamma \ln(\text{DoC}) \cdot \ln(\text{DoC}) + \alpha\beta \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{feed}) - \alpha\gamma \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{DoC}) + \beta\gamma \ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{DoC})$$

(Fig. 88 modello di regressione ottenuto per i dati studiati nel CCC applicato alla Marca 1)

Si nota come il coefficiente del logaritmo della velocità di taglio indichi un andamento inversamente proporzionale della risposta rispetto a questo parametro, insieme al coefficiente del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ). Un altro parametro con tendenza inversamente proporzionale è il contributo dell'interazione tra il logaritmo naturale della velocità di taglio e quello della profondità di passata.

Tutti gli altri coefficienti indicano un andamento direttamente proporzionale della risposta rispetto alle variabili.

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice  $R^2$  e  $R^2$  aggiustato definita dalla Figura 89.

**Model Summary**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,019019	99,01%	98,11%	95,28%

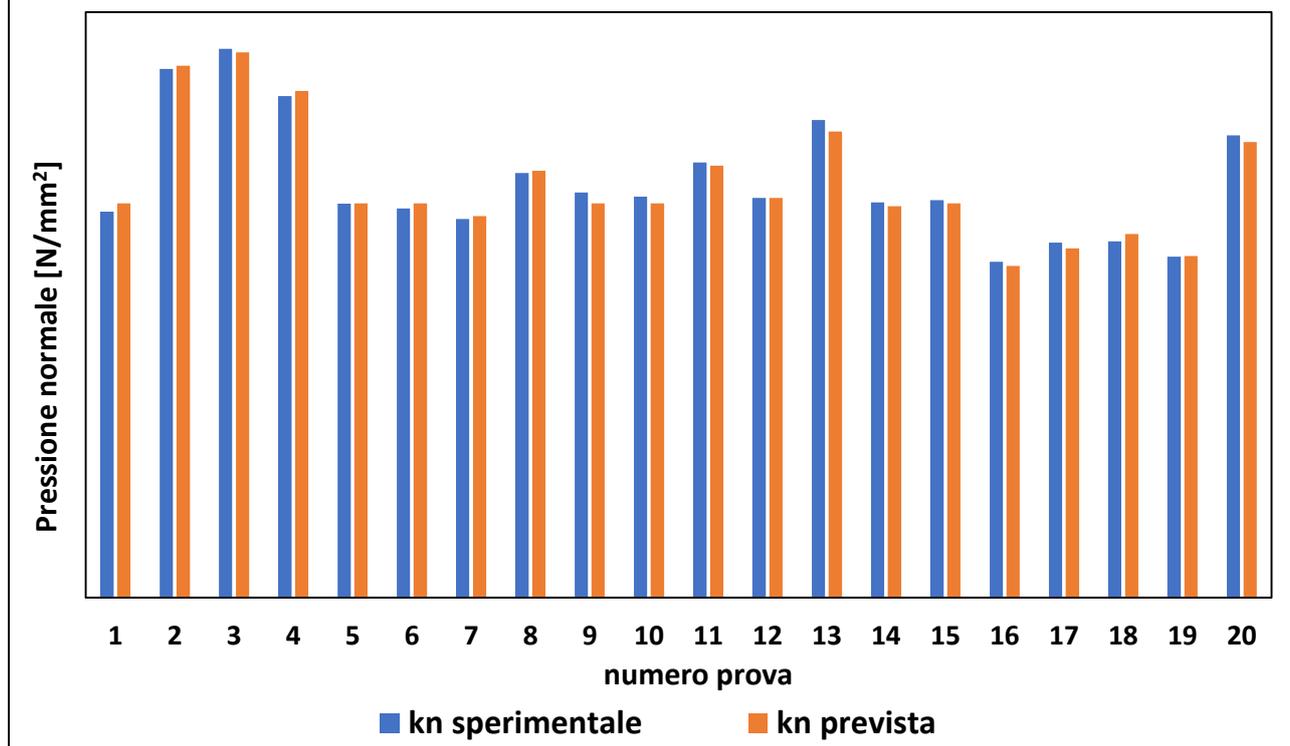
(Fig. 89 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) della Marca 1)

I valori dei parametri  $R^2$  e  $R^2$  (definito nella figura soprastante come R-sq(adj)) sono maggiori del valore soglia posto al 95% (contando un 5% di errore) e quindi il modello è affidabile [17].

Usando il software Excel, si confrontano le risposte ottenute dagli esperimenti con le risposte ottenute applicando il modello di Response Surface, tutto riportato in termini di Pressione normale ( $kn$ ).

Si ottiene il seguente grafico (Figura 90).

## Comparativa kn sperimentali e previste - Marca 1



(Fig. 90 mostra le differenze nei valori ottenuti tra il modello (kn prevista) e il valore sperimentale ottenuto (kn sperimentale) per la Marca 1 per i valori di Pressione normale (kn))

Dal grafico si nota come il modello presentato restituisca valori di Pressione normale (kn prevista) molto vicini ai termini misurati sperimentalmente (kn sperimentale).

Alcune prove presentano una differenza maggiore tra i valori di Pressione normale prevista e sperimentale, queste prove sono le prove associate ai punti centrali del modello (intese con le prove svolte con i valori centrali nell'intervallo dei dati scelti per i logaritmi naturali delle variabili indipendenti) e le prove che presentano in generale valori del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) alti e valori del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) bassi.

L'errore medio, misurato come media dei singoli errori sulle prove espressi in valore assoluto, vale 1,145%.

## Marca 2

### Forza normale

L'analisi di varianza dei dati sperimentali per la Marca 2 riguardanti il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) è mostrata nella Figura 91.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	2,12061	0,23562	698,42	0
Linear	3	2,10596	0,70199	2080,8	0
In(speed)	1	0,00983	0,00983	29,14	0
In(feed)	1	0,99874	0,99874	2960,44	0
In(DoC)	1	1,09747	1,09747	3253,07	0
Square	3	0,01464	0,00488	14,46	0,001
In(speed)*In(speed)	1	0,00184	0,00184	5,46	0,042
In(feed)*In(feed)	1	0,01311	0,01311	38,85	0
In(DoC)*In(DoC)	1	0,00155	0,00155	4,6	0,058
2-Way Interaction	3	0,00037	0,00012	0,36	0,782
In(speed)*In(feed)	1	0,00007	0,00007	0,21	0,653
In(speed)*In(DoC)	1	0,00025	0,00025	0,75	0,406
In(feed)*In(DoC)	1	0,00004	0,00004	0,12	0,735
Error	10	0,00337	0,00034		
Lack-of-Fit	5	0,00171	0,00034	1,03	0,487
Pure Error	5	0,00166	0,00033		
Total	19	2,12398			

(Fig. 91 analisi di varianza per i dati riguardanti il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) per Design of Experiment CCC della Marca 2)

Per i valori riguardanti i termini lineari, si nota come i logaritmi naturali delle variabili di taglio abbiano una influenza elevata sulla risposta.

Per i valori relativi ai termini quadratici, dall'analisi di varianza risulta come il termine quadratico del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC}) * \ln(\text{DoC})$ ) presenti un P-value maggiore del valore soglia del livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 e quindi potrebbe essere trascurato. Il termine quadratico del logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed}) * \ln(\text{speed})$ ) presenta un P-value elevato, comunque entro i limiti del valore soglia (0,05), indicando una bassa influenza sulla risposta. Il termine quadratico del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) * \ln(\text{feed})$ ) presenta un valore P-value pari a 0 indicando una influenza elevata sulla risposta.

Avendo un parametro  $P > 0.05$ , i termini relativi alle interazioni tra i logaritmi naturali delle variabili potrebbero essere trascurati [23] [24].

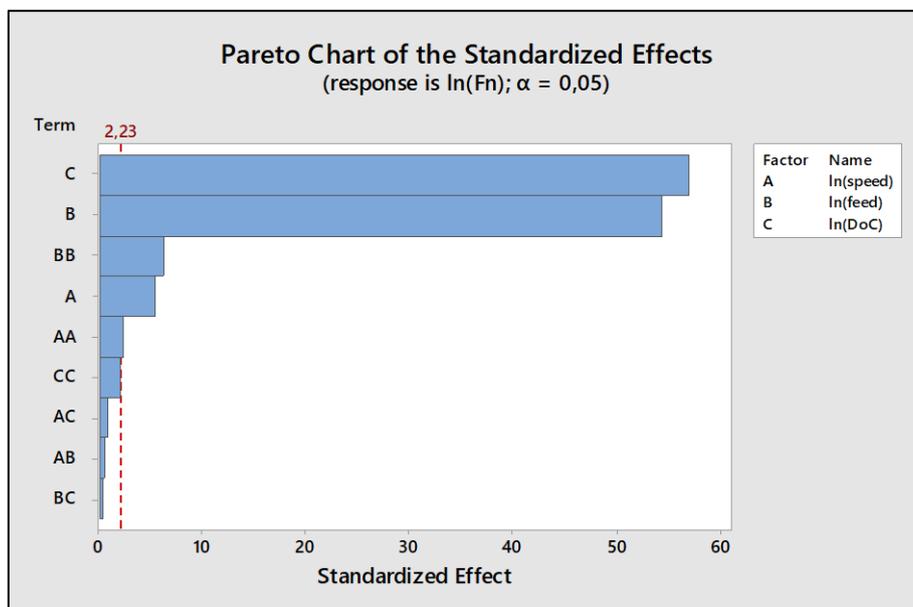
La tabella restituita dal software minitab 18 riguardante i coefficienti è presentata nella Figura 92.

Coded Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	$C'$	$SE_{C'}$	913,51	0	
$\ln(\text{speed})$	$-\alpha'$	$SE_{\alpha'}$	-5,4	0	1
$\ln(\text{feed})$	$\beta'$	$SE_{\beta'}$	54,41	0	1
$\ln(\text{DoC})$	$\gamma'$	$SE_{\gamma'}$	57,04	0	1
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{speed})$	$\alpha\alpha'$	$SE_{\alpha\alpha'}$	2,34	0,042	1,02
$\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$	$\beta\beta'$	$SE_{\beta\beta'}$	6,23	0	1,02
$\ln(\text{DoC})*\ln(\text{DoC})$	$\gamma\gamma'$	$SE_{\gamma\gamma'}$	2,14	0,058	1,02
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{feed})$	$-\alpha\beta'$	$SE_{\alpha\beta'}$	-0,46	0,653	1
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{DoC})$	$\alpha\gamma'$	$SE_{\alpha\gamma'}$	0,87	0,406	1
$\ln(\text{feed})*\ln(\text{DoC})$	$\beta\gamma'$	$SE_{\beta\gamma'}$	0,35	0,735	1

(Fig. 92 tabella dei coefficienti per il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) per la Marca 2)

Dalla tabella si estrapolano i t-value dei coefficienti riguardanti le variabili indipendenti in valore assoluto per costruire i grafici di Pareto. Il valore critico corrisponde al valore di T di student con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) e con gradi di libertà di errore pari a 14 (come mostrato dalla ANOVA), che restituisce un valore di 2,228 (approssimato dal software a 2,23) [20] [21] [22]. I valori di VIF sono uguali a 1 per tutti i coefficienti ad eccezione dei parametri quadratici, che mostrano una leggera correlazione con le variabili indipendenti, ma comunque hanno un valore molto al di sotto del limite (pari a 5) [36] [43].

Per uno studio di response surface, il software Minitab 18 restituisce il grafico di Pareto per i T-value (definiti dal software come standardized Effect) estrapolati dalla tabella dei coefficienti. Il grafico di Pareto è presentato nella Figura 93.



(Fig. 93 grafico di Pareto che descrive l'importanza delle singole variabili sulla risposta per la Marca 2)

Dal grafico si può notare come i parametri più impattanti sulla risposta siano il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) ( $\ln(\text{DoC})$ ) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ). Il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) ha un'importanza molto inferiore delle altre due legate alle variabili indipendenti di processo sulla risposta (quarto in ordine di importanza).

Per i termini quadratici, l'unico parametro potenzialmente trascurabile riguarda il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) ( $\ln(\text{DoC}) \cdot \ln(\text{DoC})$ ). Il termine relativo alla componente quadratica del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed})$ ) ha una influenza maggiore (terzo in ordine di importanza) di quella riguardante il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ).

Infine, si nota come tutti gli effetti di interazione siano al di sotto del valore critico per essere considerati influenti sulla risposta e quindi potrebbero essere trascurati.

Il modello di regressione ottenuto per il Central Composite design Circumscribed è illustrato nella Figura 94.

**Regression Equation in Uncoded Units**

$$\begin{aligned} \ln(F_n) = & C' - \alpha' \ln(\text{speed}) + \beta' \ln(\text{feed}) + \gamma' \ln(\text{DoC}) + \alpha\alpha' \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{speed}) \\ & + \beta\beta' \ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed}) + \gamma\gamma' \ln(\text{DoC}) \cdot \ln(\text{DoC}) - \alpha\beta' \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{feed}) \\ & + \alpha\gamma' \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{DoC}) + \beta\gamma' \ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{DoC}) \end{aligned}$$

(Fig. 94 modello di regressione ottenuto per i dati studiati nel CCC applicato alla Marca 2)

Si nota come il coefficiente del logaritmo della velocità di taglio indichi un andamento inversamente proporzionale nella risposta rispetto a questo parametro. Un altro parametro con tendenza inversamente proporzionale è il contributo dell'interazione tra il logaritmo naturale della velocità di taglio e quello dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{feed})$ ). Tutti gli altri coefficienti indicano una tendenza direttamente proporzionale della risposta con la variazione delle variabili.

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice  $R^2$  e  $R^2$  aggiustato definita dalla Figura 95.

**Model Summary**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,018368	99,84%	99,70%	99,28%

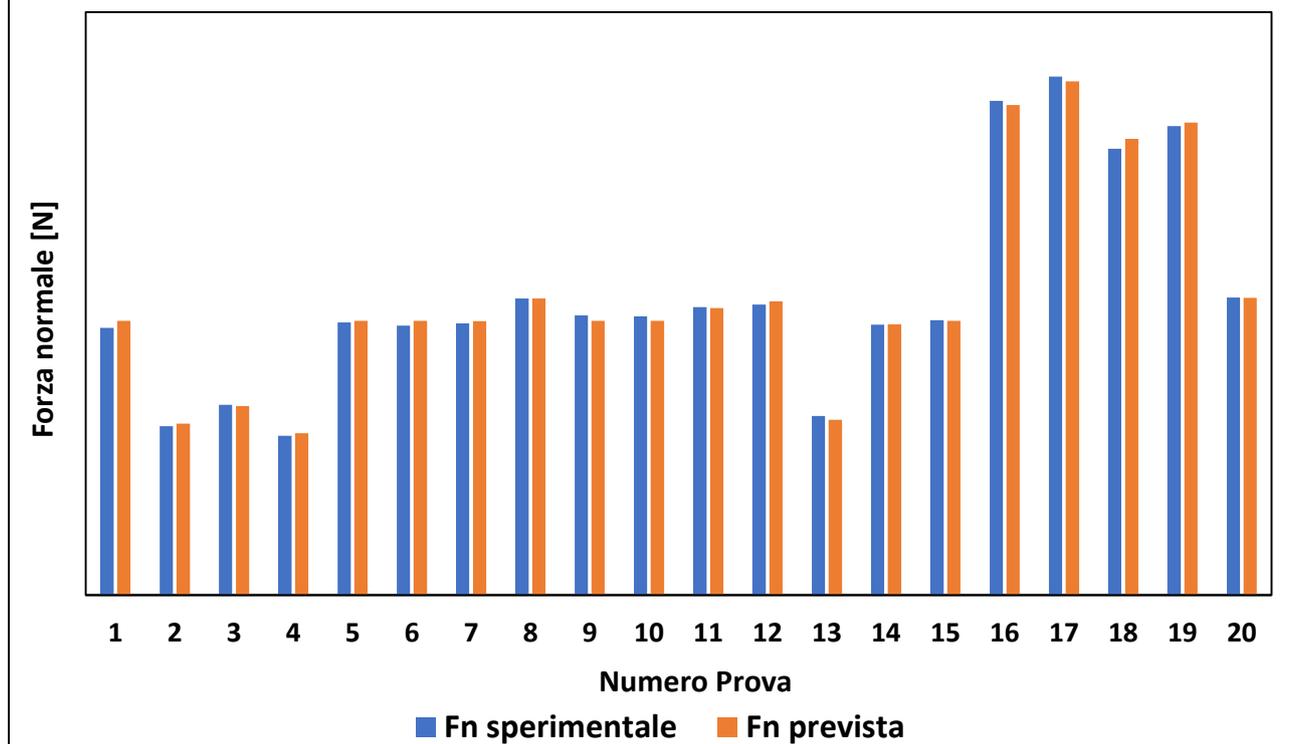
(Fig. 95 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) della Marca 2)

I valori dei parametri  $R^2$  e  $R^2$  (definito nella figura soprastante come  $R\text{-sq}(\text{adj})$ ) sono maggiori del valore soglia posto al 95% (contando un 5% di errore) e quindi il modello è affidabile [17].

Usando il software Excel, si confrontano le risposte ottenute dagli esperimenti con le risposte ottenute applicando il modello di Response Surface, tutto riportato in termini di Forza normale ( $F_n$ ).

Si ottiene il seguente grafico (Figura 96)

## Comparativa Fn sperimentali e previste - Marca 2



(Fig. 96 mostra le differenze nei valori ottenuti tra il modello (Fn prevista) e il valore sperimentale ottenuto (Fn sperimentale) per la Marca 2 per i valori di Forza normale (Fn))

Dal grafico si nota come il modello presentato restituisca valori di Forza normale (Fn prevista) molto vicini ai termini misurati sperimentalmente (Fn sperimentale).

Alcune prove presentano una differenza maggiore tra i valori di Forza normale prevista e sperimentale, queste prove sono le prove associate ai punti centrali del modello (intese con le prove svolte con i valori centrali nell'intervallo dei dati scelti per i logaritmi naturali delle variabili indipendenti) e le prove che presentano in generale valori del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) e valori del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) bassi.

L'errore medio, misurato come media dei singoli errori sulle prove espressi in valore assoluto, vale 1,084 %.

## Pressione normale

L'analisi di varianza dei dati sperimentali per la Marca 2 riguardanti il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) è mostrata nella Figura 97.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,361288	0,040143	118,99	0
Linear	3	0,345684	0,115228	341,55	0
$\ln(\text{speed})$	1	0,009829	0,009829	29,14	0
$\ln(\text{feed})$	1	0,26178	0,26178	775,96	0
$\ln(\text{DoC})$	1	0,074065	0,074065	219,54	0
Square	3	0,014639	0,00488	14,46	0,001
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{speed})$	1	0,001841	0,001841	5,46	0,042
$\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$	1	0,013108	0,013108	38,85	0
$\ln(\text{DoC})*\ln(\text{DoC})$	1	0,001552	0,001552	4,6	0,058
2-Way Interaction	3	0,000367	0,000122	0,36	0,782
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{feed})$	1	0,000072	0,000072	0,21	0,653
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{DoC})$	1	0,000254	0,000254	0,75	0,406
$\ln(\text{feed})*\ln(\text{DoC})$	1	0,000041	0,000041	0,12	0,735
Error	10	0,003374	0,000337		
Lack-of-Fit	5	0,001713	0,000343	1,03	0,487
Pure Error	5	0,00166	0,000332		
Total	19	0,364662			

(Fig. 97 analisi di varianza per i dati riguardanti il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) per Design of Experiment CCC della Marca 2)

Per i valori riguardanti i termini lineari, si nota come il logaritmo naturale delle variabili di taglio hanno una influenza elevata sulla risposta. Il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ), presenta un valore di P-value leggermente diverso da 0, indicando un'influenza più bassa rispetto agli altri termini lineari.

Per i valori relativi ai termini quadratici, dall'analisi di varianza risulta come tutti i termini quadratici siano importanti sulla risposta, ma con importanze diverse legate al valore del P-value. In particolare, si nota come il termine quadratico legato al logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})*\ln(\text{speed})$ ) e il termine quadratico legato alla profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})*\ln(\text{DoC})$ ) presentano un P-value maggiore di 0 ma inferiore a 0,05 indicando una bassa importanza sulla risposta. Il termine quadratico legato al logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$ ) presenta un P-value pari a 0 per cui avrà un'importanza più alta rispetto agli altri termini quadratici.

Avendo un parametro  $P > 0.05$ , i termini relativi alle interazioni tra i logaritmi naturali delle variabili potrebbero essere trascurati [23] [24].

La tabella restituita dal software Minitab 18 riguardante i coefficienti è presentata nella Figura 98.

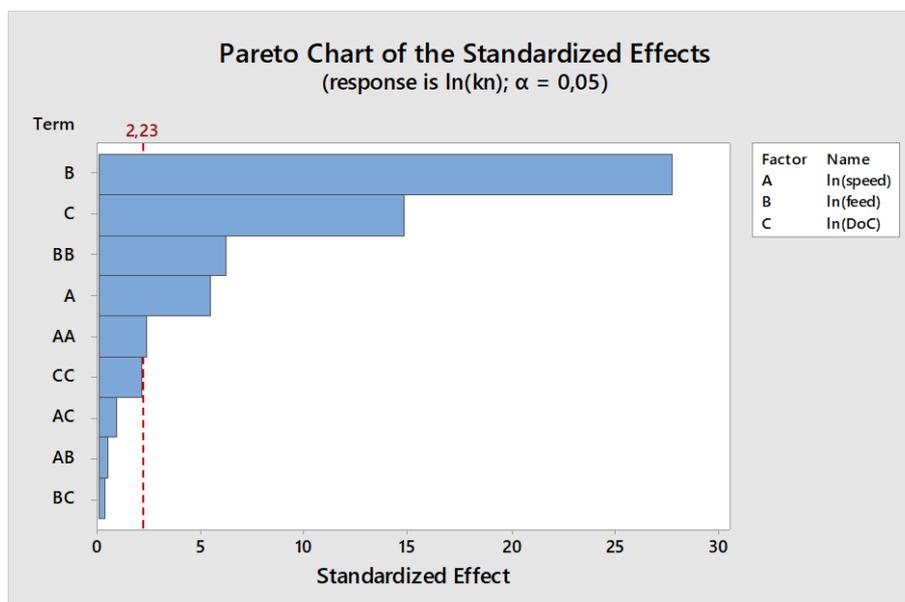
Coded Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	C'	SE <sub>C'</sub>	1053,38	0	
ln(speed)	- $\alpha'$	SE <sub><math>\alpha'</math></sub>	-5,4	0	1
ln(feed)	- $\delta'$	SE <sub><math>\delta'</math></sub>	-27,86	0	1
ln(DoC)	- $\varepsilon'$	SE <sub><math>\varepsilon'</math></sub>	-14,82	0	1
ln(speed)*ln(speed)	$\alpha\alpha'$	SE <sub><math>\alpha\alpha'</math></sub>	2,34	0,042	1,02
ln(feed)*ln(feed)	$\beta\beta'$	SE <sub><math>\beta\beta'</math></sub>	6,23	0	1,02
ln(DoC)*ln(DoC)	$\gamma\gamma'$	SE <sub><math>\gamma\gamma'</math></sub>	2,14	0,058	1,02
ln(speed)*ln(feed)	- $\alpha\beta'$	SE <sub><math>\alpha\beta'</math></sub>	-0,46	0,653	1
ln(speed)*ln(DoC)	$\alpha\gamma'$	SE <sub><math>\alpha\gamma'</math></sub>	0,87	0,406	1
ln(feed)*ln(DoC)	$\beta\gamma'$	SE <sub><math>\beta\gamma'</math></sub>	0,35	0,735	1

(Fig. 98 tabella dei coefficienti per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) per la Marca 2)

Dalla tabella si estrapolano i t-value dei coefficienti riguardanti le variabili indipendenti in valore assoluto per costruire i grafici di Pareto. Il valore critico corrisponde al valore di T di student con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) e con gradi di libertà di errore pari a 14 (come mostrato dalla ANOVA), che restituisce un valore di 2,228 (approssimato dal software a 2,23) [20] [21] [22].

I valori di VIF sono uguali a 1 per tutti i coefficienti ad eccezione dei parametri quadratici, che mostrano una leggera correlazione con le variabili indipendenti, ma comunque hanno un valore molto al di sotto del limite (pari a 5) [36] [43].

Per uno studio di response surface, il software Minitab 18 restituisce il grafico di Pareto per i T-value (definiti dal software come standardized Effect) estrapolati dalla tabella dei coefficienti. Il grafico di Pareto è presentato nella Figura 99.



(Fig. 99 grafico di Pareto che descrive l'importanza delle singole variabili sul logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) per la Marca 2)

Dal grafico si può notare come i parametri più impattanti sulla risposta siano rispettivamente il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)) e il logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)). Il

logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) ha un'importanza molto inferiore rispetto agli altri termini lineari (quarto in ordine di importanza).

Per gli effetti quadratici sulla risposta, dal grafico risulta che il termine quadratico del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC}) * \ln(\text{DoC})$ ) è di poco al di sotto del valore limite (2,23), andando a perdere di importanza sulla risposta. Il termine quadratico del logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed}) * \ln(\text{speed})$ ) è di poco al di sopra del valore limite 2,23 indicando una bassissima influenza sulla risposta. In controtendenza rispetto agli altri termini quadratici, si nota come il termine relativo alla componente quadratica del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) * \ln(\text{feed})$ ) abbia una influenza maggiore di quella riguardante il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) e sia il terzo in ordine di importanza.

Infine, si nota come tutti gli effetti di interazione siano al di sotto del valore critico per essere considerati influenti sulla risposta e quindi potrebbero essere trascurati.

Il modello di regressione ottenuto per il Central Composite design Circumscribed è illustrato nella Figura 100.

**Regression Equation in Uncoded Units**

$$\begin{aligned} \ln(F_n) = & C' - \alpha' \ln(\text{speed}) + b' \ln(\text{feed}) - c' \ln(\text{DoC}) + \alpha\alpha' \ln(\text{speed}) * \ln(\text{speed}) \\ & + \beta\beta' \ln(\text{feed}) * \ln(\text{feed}) + \gamma\gamma' \ln(\text{DoC}) * \ln(\text{DoC}) - \alpha\beta' \ln(\text{speed}) * \ln(\text{feed}) \\ & + \alpha\gamma' \ln(\text{speed}) * \ln(\text{DoC}) + \beta\gamma' \ln(\text{feed}) * \ln(\text{DoC}) \end{aligned}$$

(Fig. 100 modello di regressione ottenuto per i dati studiati nel CCC applicato alla Marca 2)

Si nota come il coefficiente del logaritmo della velocità di taglio indichi un andamento inversamente proporzionale della risposta rispetto a questo parametro, insieme al coefficiente del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ). Un altro parametro con tendenza inversamente proporzionale è il contributo dell'interazione tra il logaritmo naturale della velocità di taglio e quello dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{speed}) * \ln(\text{feed})$ ).

Tutti gli altri coefficienti indicano un andamento direttamente proporzionale della risposta rispetto alle variabili.

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice  $R^2$  e  $R^2$  aggiustato definita dalla Figura 101.

**Model Summary**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,018368	99,07%	98,24%	95,80%

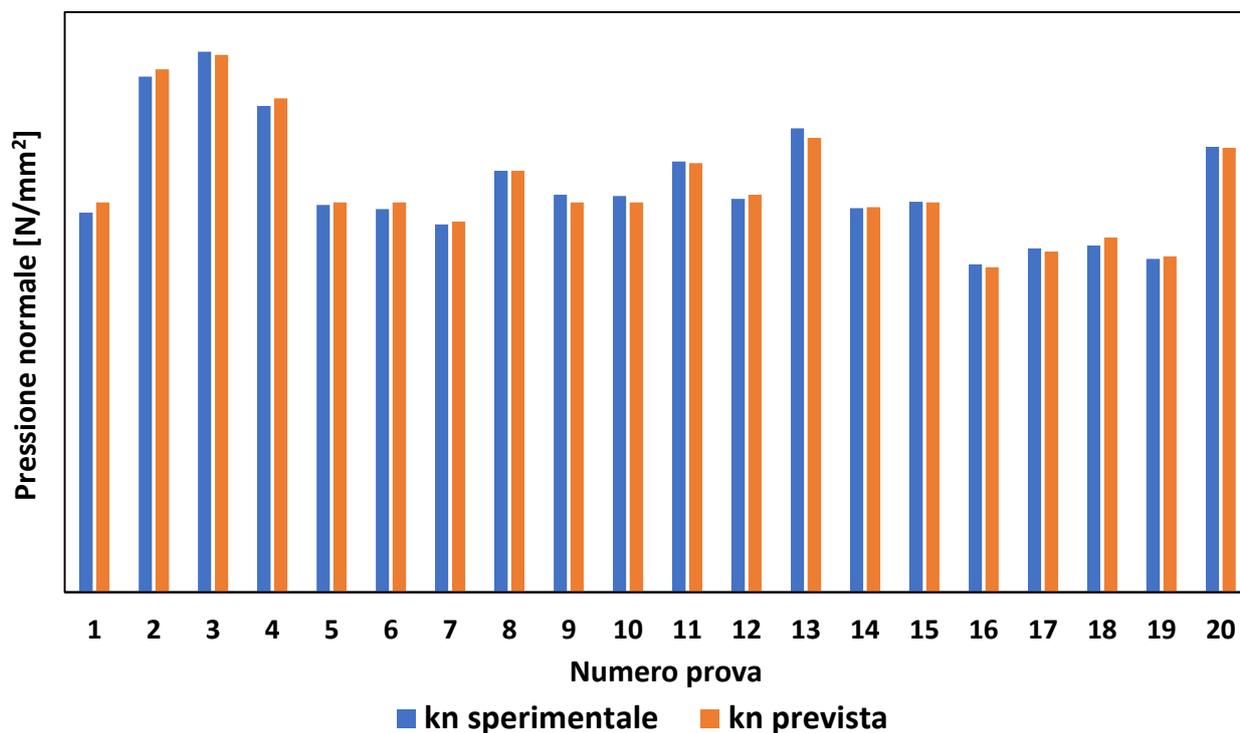
(Fig. 101 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(\text{kn})$ ) della Marca 2)

I valori dei parametri  $R^2$  e  $R^2$  (definito nella figura soprastante come  $R\text{-sq}(\text{adj})$ ) sono maggiori del valore soglia posto al 95% (contando un 5% di errore) e quindi il modello è affidabile [17].

Usando il software Excel, si confrontano le risposte ottenute dagli esperimenti con le risposte ottenute applicando il modello di Response Surface, tutto riportato in termini di Pressione normale (kn).

Si ottiene il seguente grafico (Figura 102).

## Comparativa kn sperimentali e previste - Marca 2



(Fig. 102 mostra le differenze nei valori ottenuti tra il modello (kn prevista) e il valore sperimentale ottenuto (kn sperimentale) per la Marca 2 per i valori di Pressione normale (kn))

Dal grafico si nota come il modello presentato restituisca valori di Pressione normale (kn prevista) molto vicini ai termini misurati sperimentalmente (kn sperimentale).

Alcune prove presentano una differenza maggiore tra i valori di Pressione normale prevista e sperimentale, queste prove sono le prove associate ai punti centrali del modello (intese con le prove svolte con i valori centrali nell'intervallo dei dati scelti per i logaritmi naturali delle variabili indipendenti) e le prove che presentano in generale valori del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) e valori del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) bassi.

L'errore medio, misurato come media dei singoli errori sulle prove espressi in valore assoluto, vale 1,084 %.

### Marca 3

#### Forza normale

L'analisi di varianza dei dati sperimentali per la Marca 3 riguardanti il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) è mostrata nella Figura 103.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	2,09763	0,23307	1279,64	0
Linear	3	2,08302	0,69434	3812,19	0
$\ln(\text{speed})$	1	0,01232	0,01232	67,63	0
$\ln(\text{feed})$	1	0,9841	0,9841	5403,04	0
$\ln(\text{DoC})$	1	1,0867	1,0867	5966,36	0
Square	3	0,01441	0,0048	26,36	0
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{speed})$	1	0,00045	0,00045	2,47	0,147
$\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$	1	0,01415	0,01415	77,68	0
$\ln(\text{DoC})*\ln(\text{DoC})$	1	0,00074	0,00074	4,06	0,072
2-Way Interaction	3	0,00078	0,00026	1,44	0,29
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{feed})$	1	0	0	0	0,986
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{DoC})$	1	0,00004	0,00004	0,21	0,66
$\ln(\text{feed})*\ln(\text{DoC})$	1	0,00075	0,00075	4,1	0,07
Error	10	0,00182	0,00018		
Lack-of-Fit	5	0,00117	0,00023	1,8	0,267
Pure Error	5	0,00065	0,00013		
Total	19	2,09945			

(Fig. 103 analisi di varianza per i dati riguardanti il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) per Design of Experiment CCC della Marca 3)

Per i valori riguardanti i termini lineari, si nota come i logaritmi naturali delle variabili di taglio abbiano una influenza elevata sulla risposta.

Per i valori relativi ai termini quadratici, dall'analisi di varianza risulta che l'unico termine con una influenza sulla risposta sia il termine quadratico del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$ ), mentre gli altri termini quadratici presentano un P-value superiore del livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 e quindi potrebbero essere trascurati.

Avendo un parametro  $P > 0.05$ , i termini relativi alle interazioni tra i logaritmi naturali delle variabili potrebbero essere trascurati [23] [24].

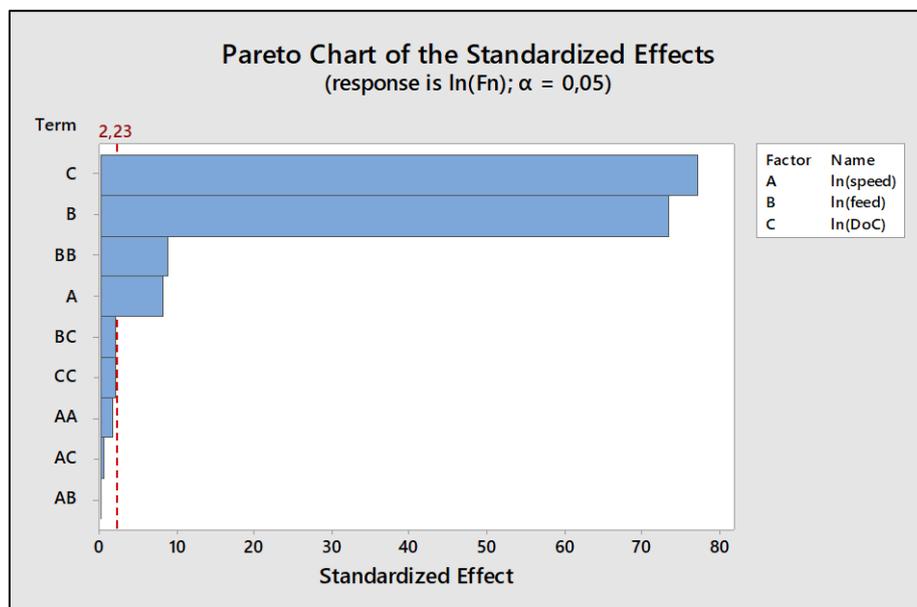
La tabella restituita dal software minitab 18 riguardante i coefficienti è presentata nella Figura 104.

Coded Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	C"	SE <sub>C</sub> "	1245,23	0	
ln(speed)	-α"	SE <sub>α</sub> "	-8,22	0	1
ln(feed)	β"	SE <sub>β</sub> "	73,51	0	1
ln(DoC)	γ"	SE <sub>γ</sub> "	77,24	0	1
ln(speed)*ln(speed)	αα"	SE <sub>αα</sub> "	1,57	0,147	1,02
ln(feed)*ln(feed)	ββ"	SE <sub>ββ</sub> "	8,81	0	1,02
ln(DoC)*ln(DoC)	γγ"	SE <sub>γγ</sub> "	2,01	0,072	1,02
ln(speed)*ln(feed)	αβ"	SE <sub>αβ</sub> "	0,02	0,986	1
ln(speed)*ln(DoC)	αγ"	SE <sub>αγ</sub> "	0,45	0,66	1
ln(feed)*ln(DoC)	βγ"	SE <sub>βγ</sub> "	2,02	0,07	1

(Fig. 104 tabella dei coefficienti per il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) per la Marca 3)

Dalla tabella si estrapolano i t-value dei coefficienti riguardanti le variabili indipendenti in valore assoluto per costruire i grafici di Pareto. Il valore critico corrisponde al valore di T di student con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) e con gradi di libertà di errore pari a 14 (come mostrato dalla ANOVA), che restituisce un valore di 2,228 (approssimato dal software a 2,23) [20] [21] [22]. I valori di VIF sono uguali a 1 per tutti i coefficienti ad eccezione dei parametri quadratici, che mostrano una leggera correlazione con le variabili indipendenti, ma comunque hanno un valore molto al di sotto del limite (pari a 5) [36] [43].

Per uno studio di response surface, il software Minitab 18 restituisce il grafico di Pareto per i T-value (definiti dal software come standardized Effect) estrapolati dalla tabella dei coefficienti. Il grafico di Pareto è presentato nella Figura 105.



(Fig. 105 grafico di Pareto che descrive l'importanza delle singole variabili sulla risposta per la Marca 3)

Dal grafico si può notare come i parametri più impattanti sulla risposta siano il logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)). Il logaritmo naturale della velocità di taglio (ln(speed)) ha un'importanza molto inferiore delle altre due legate alle variabili indipendenti di processo sulla risposta (quarto in ordine di importanza).

Per i termini quadratici, l'unico parametro che impatta sulla risposta riguarda il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed})$ ) e risulta essere terzo in ordine di importanza. Infine, si nota come tutti gli effetti di interazione siano al di sotto del valore critico per essere considerati influenti sulla risposta e quindi potrebbero essere trascurati.

Il modello di regressione ottenuto per il Central Composite design Circumscribed è illustrato nella Figura 106.

**Regression Equation in Uncoded Units**

$$\ln(F_n) = C - \alpha \ln(\text{speed}) + \beta \ln(\text{feed}) + \gamma \ln(\text{DoC}) + \alpha\alpha \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{speed}) + \beta\beta \ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed}) + \gamma\gamma \ln(\text{DoC}) \cdot \ln(\text{DoC}) + \alpha\beta \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{feed}) + \alpha\gamma \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{DoC}) + \beta\gamma \ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{DoC})$$

(Fig. 106 modello di regressione ottenuto per i dati studiati nel CCC applicato alla Marca 3)

Si nota come l'unico coefficiente che riferisce un andamento inversamente proporzionale con la risposta è il coefficiente del logaritmo della velocità di taglio. Tutti gli altri coefficienti indicano una tendenza direttamente proporzionale della risposta con la variazione delle variabili.

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice  $R^2$  e  $R^2$  aggiustato definita dalla Figura 107.

**Model Summary**

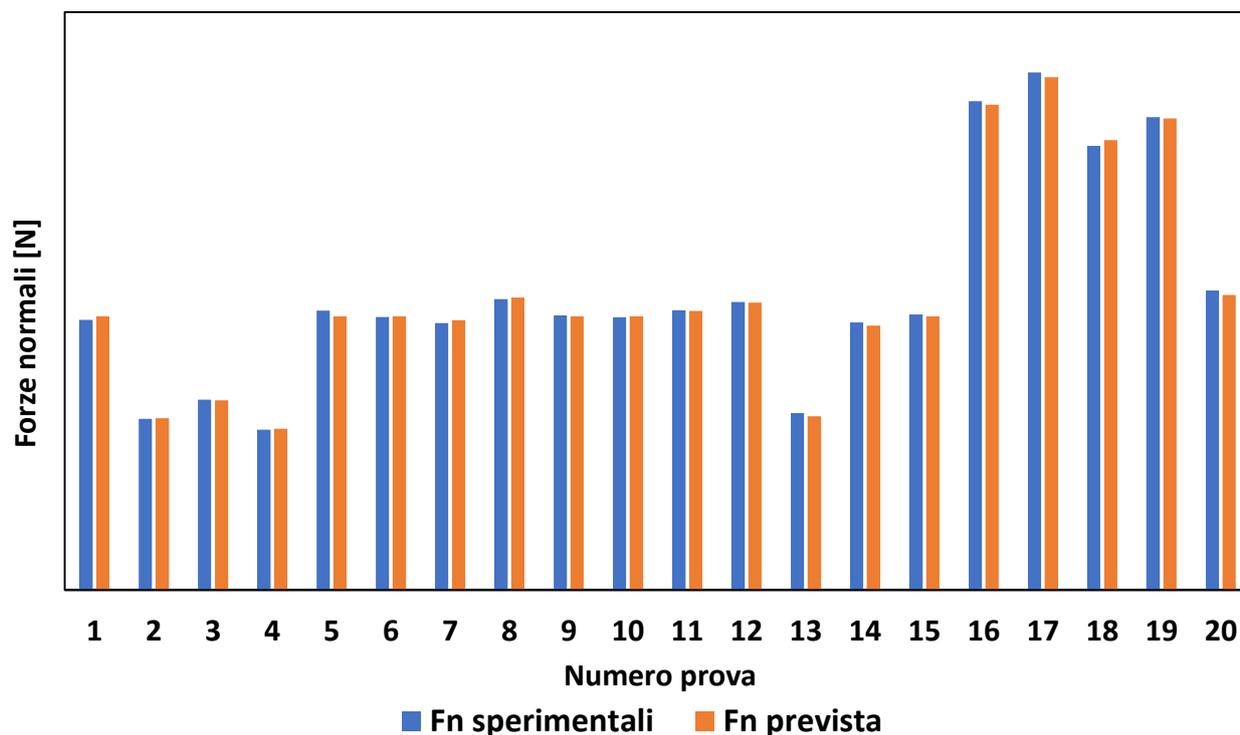
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,013496	99,91%	99,84%	99,53%

(Fig. 107 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) della Marca 3)

I valori dei parametri  $R^2$  e  $R^2$  (definito nella figura soprastante come R-sq(adj)) sono maggiori del valore soglia posto al 95% (contando un 5% di errore) e quindi il modello è affidabile [17].

Usando il software Excel, si confrontano le risposte ottenute dagli esperimenti con le risposte ottenute applicando il modello di Response Surface, tutto riportato in termini di Forza normale ( $F_n$ ). Si ottiene il seguente grafico (Figura 108).

### Comparativa Fn sperimentali e previste - Marca 3



(Fig. 108 mostra le differenze nei valori ottenuti tra il modello (Fn prevista) e il valore sperimentale ottenuto (Fn sperimentale) per la Marca 3 per i valori di Forza normale (Fn))

Dal grafico si nota come il modello presentato restituisca valori di Forza normale (Fn prevista) molto vicini ai termini misurati sperimentalmente (Fn sperimentale).

Alcune prove presentano una differenza maggiore tra i valori di Forza normale prevista e sperimentale, queste prove sono le prove associate ai punti centrali del modello (intese con le prove svolte con i valori centrali nell'intervallo dei dati scelti per i logaritmi naturali delle variabili indipendenti) e le prove che presentano in generale valori del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) e valori del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) bassi.

L'errore medio, misurato come media dei singoli errori sulle prove espressi in valore assoluto, vale 0,801 %.

### Pressione normale

L'analisi di varianza dei dati sperimentali per la Marca 3 riguardanti il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) è mostrata nella Figura 109.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0,374498	0,041611	228,46	0
Linear	3	0,358588	0,119529	656,26	0
$\ln(\text{speed})$	1	0,012318	0,012318	67,63	0
$\ln(\text{feed})$	1	0,269361	0,269361	1478,89	0
$\ln(\text{DoC})$	1	0,076896	0,076896	422,19	0
Square	3	0,014406	0,004802	26,36	0
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{speed})$	1	0,000449	0,000449	2,47	0,147
$\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$	1	0,014148	0,014148	77,68	0
$\ln(\text{DoC})*\ln(\text{DoC})$	1	0,000739	0,000739	4,06	0,072
2-Way Interaction	3	0,000784	0,000261	1,44	0,29
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{feed})$	1	0	0	0	0,986
$\ln(\text{speed})*\ln(\text{DoC})$	1	0,000037	0,000037	0,21	0,66
$\ln(\text{feed})*\ln(\text{DoC})$	1	0,000747	0,000747	4,1	0,07
Error	10	0,001821	0,000182		
Lack-of-Fit	5	0,001171	0,000234	1,8	0,267
Pure Error	5	0,000651	0,00013		
Total	19	0,376319			

(Fig. 109 analisi di varianza per i dati riguardanti il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) per Design of Experiment CCC della Marca 3)

Per i valori riguardanti i termini lineari, si nota come il logaritmo naturale delle variabili di taglio hanno una influenza elevata sulla risposta.

Per i valori relativi ai termini quadratici, dall'analisi di varianza risulta che l'unico termine con una influenza sulla risposta sia il termine quadratico del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$ ), mentre gli altri termini quadratici presentano un P-value superiore del livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 e quindi potrebbero essere trascurati.

Avendo un parametro  $P > 0.05$ , i termini relativi alle interazioni tra i logaritmi naturali delle variabili potrebbero essere trascurati [23] [24].

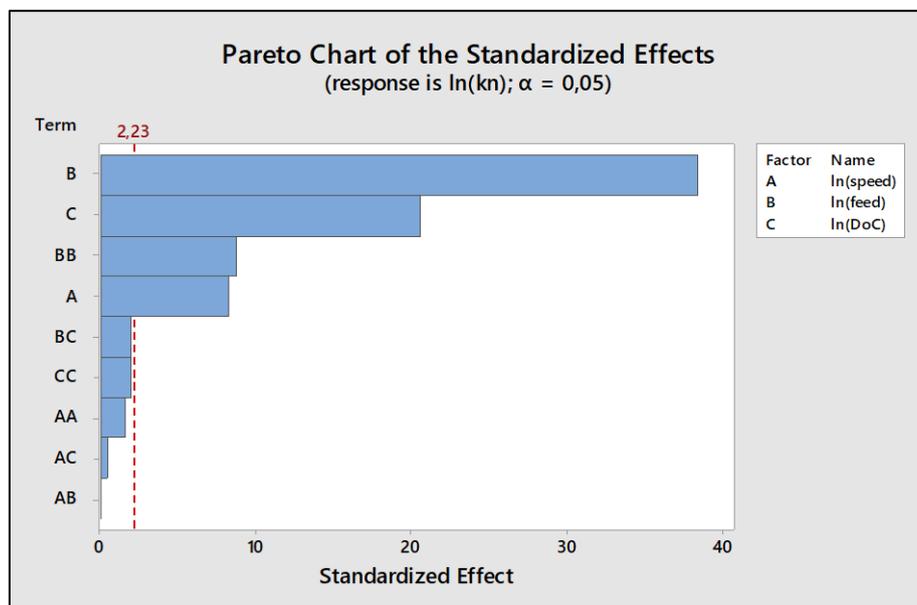
La tabella restituita dal software Minitab 18 riguardante i coefficienti è presentata nella Figura 110.

Coded Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	C"	SE <sub>C</sub> "	1435,59	0	
ln(speed)	-α"	SE <sub>α</sub> "	-8,22	0	1
ln(feed)	-δ"	SE <sub>δ</sub> "	-38,46	0	1
ln(DoC)	-ε"	SE <sub>ε</sub> "	-20,55	0	1
ln(speed)*ln(speed)	αα"	SE <sub>αα</sub> "	1,57	0,147	1,02
ln(feed)*ln(feed)	ββ"	SE <sub>ββ</sub> "	8,81	0	1,02
ln(DoC)*ln(DoC)	γγ"	SE <sub>γγ</sub> "	2,01	0,072	1,02
ln(speed)*ln(feed)	αβ"	SE <sub>αβ</sub> "	0,02	0,986	1
ln(speed)*ln(DoC)	αγ"	SE <sub>αγ</sub> "	0,45	0,66	1
ln(feed)*ln(DoC)	βγ"	SE <sub>βγ</sub> "	2,02	0,07	1

(Fig. 110 tabella dei coefficienti per il logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) per la Marca 3)

Dalla tabella si estrapolano i t-value dei coefficienti riguardanti le variabili indipendenti in valore assoluto per costruire i grafici di Pareto. Il valore critico corrisponde al valore di T di student con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) e con gradi di libertà di errore pari a 14 (come mostrato dalla ANOVA), che restituisce un valore di 2,228 (approssimato dal software a 2,23) [20] [21] [22]. I valori di VIF sono uguali a 1 per tutti i coefficienti ad eccezione dei parametri quadratici, che mostrano una leggera correlazione con le variabili indipendenti, ma comunque hanno un valore molto al di sotto del limite (pari a 5) [36] [43].

Per uno studio di response surface, il software Minitab 18 restituisce il grafico di Pareto per i T-value (definiti dal software come standardized Effect) estrapolati dalla tabella dei coefficienti. Il grafico di Pareto è presentato nella figura sottostante:



(Fig. 111 grafico di Pareto che descrive l'importanza delle singole variabili sul logaritmo naturale della Pressione normale (ln(kn)) per la Marca 3)

Dal grafico si può notare come i parametri più impattanti sulla risposta siano rispettivamente il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro (ln(feed)) e il logaritmo naturale della profondità di passata (ln(DoC)). Il

logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) ha un'importanza molto inferiore rispetto agli altri termini lineari (quarto in ordine di importanza).

Per i termini quadratici, l'unico parametro che impatta sulla risposta riguarda il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed})$ ) e risulta essere terzo in ordine di importanza.

Infine, si nota come tutti gli effetti di interazione siano al di sotto del valore critico per essere considerati influenti sulla risposta e quindi potrebbero essere trascurati.

Il modello di regressione ottenuto per il Central Composite design Circumscribed è illustrato nella Figura 112.

**Regression Equation in Uncoded Units**

$$\ln(F_n) = C - \alpha \ln(\text{speed}) + b \ln(\text{feed}) - c \ln(\text{DoC}) + \alpha\alpha \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{speed}) + \beta\beta \ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed}) + \gamma\gamma \ln(\text{DoC}) \cdot \ln(\text{DoC}) + \alpha\beta \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{feed}) + \alpha\gamma \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{DoC}) + \beta\gamma \ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{DoC})$$

(Fig. 112 modello di regressione ottenuto per i dati studiati nel CCC applicato alla Marca 3)

Si nota come il coefficiente del logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) indichi un andamento inversamente proporzionale della risposta rispetto a questo parametro, insieme al coefficiente del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ).

Tutti gli altri coefficienti indicano un andamento direttamente proporzionale della risposta rispetto alle variabili.

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice  $R^2$  e  $R^2$  aggiustato definita dalla Figura 113.

**Model Summary**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,013496	99,52%	99,08%	97,37%

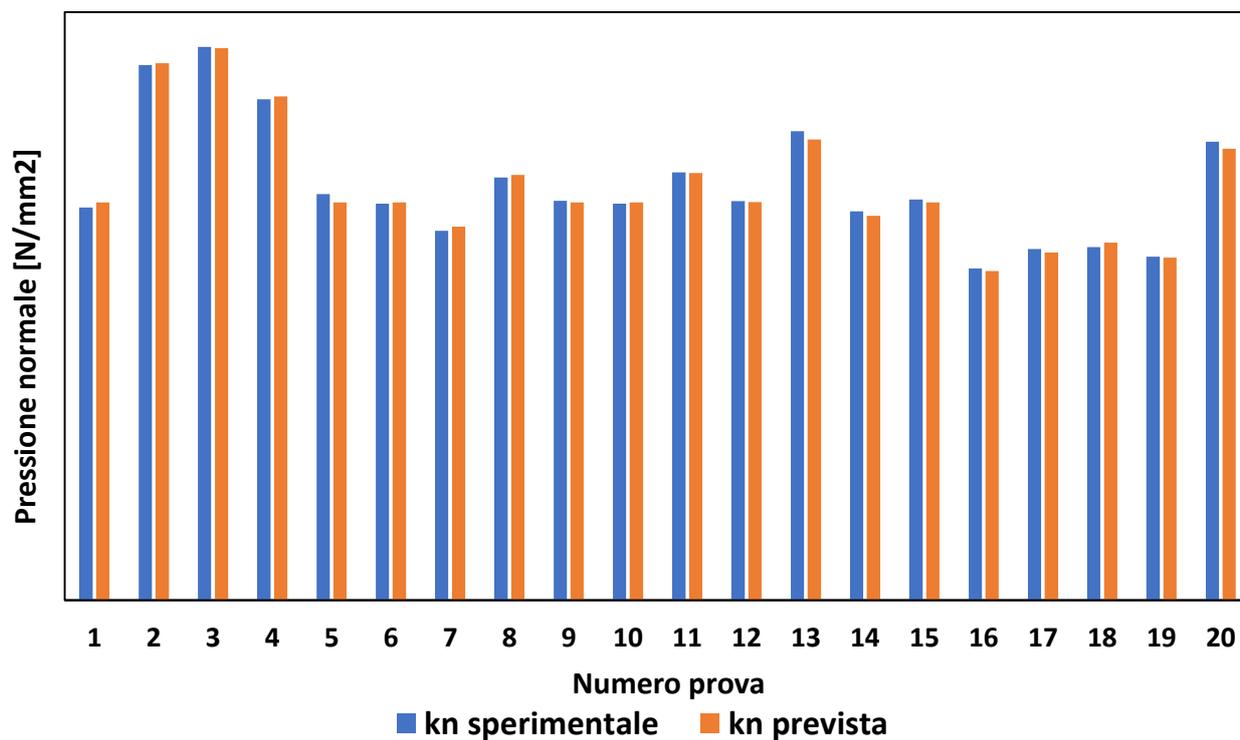
(Fig. 113 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) della Marca 3)

I valori dei parametri  $R^2$  e  $R^2$  (definito nella figura soprastante come  $R\text{-sq}(\text{adj})$ ) sono maggiori del valore soglia posto al 95% (contando un 5% di errore) e quindi il modello è affidabile [17].

Usando il software Excel, si confrontano le risposte ottenute dagli esperimenti con le risposte ottenute applicando il modello di Response Surface, tutto riportato in termini di Pressione normale ( $kn$ ).

Si ottiene il seguente grafico (Figura 114).

### Comparativa kn sperimentali e previste - Marca 3



(Fig. 114 mostra le differenze nei valori ottenuti tra il modello (kn prevista) e il valore sperimentale ottenuto (kn sperimentale) per la Marca 3 per i valori di Pressione normale (kn))

Dal grafico si nota come il modello presentato restituisca valori di Pressione normale (kn prevista) molto vicini ai termini misurati sperimentalmente (kn sperimentale).

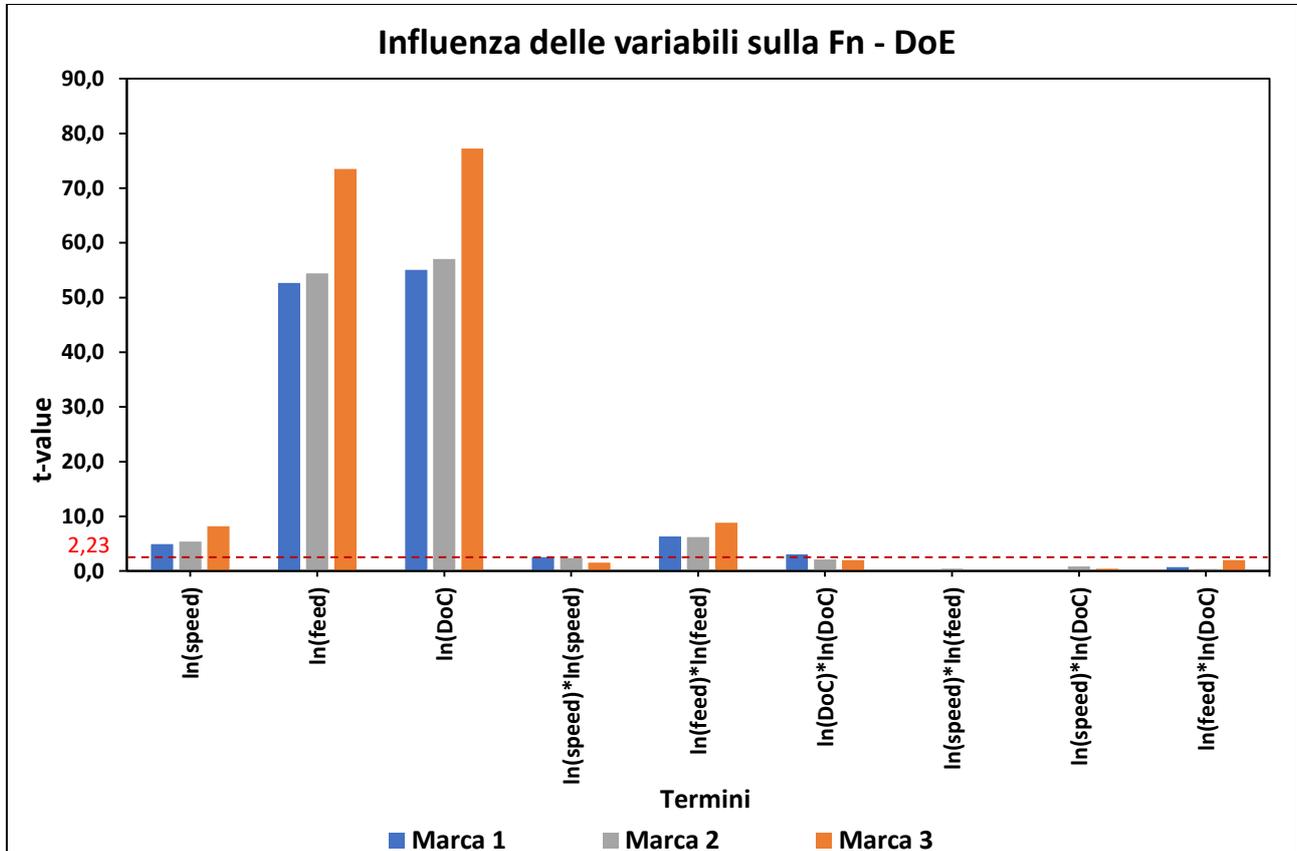
Alcune prove presentano una differenza maggiore tra i valori di Pressione normale prevista e sperimentale, queste prove sono le prove associate ai punti centrali del modello (intese con le prove svolte con i valori centrali nell'intervallo dei dati scelti per i logaritmi naturali delle variabili indipendenti) e le prove che presentano in generale valori del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) e valori del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) bassi.

L'errore medio, misurato come media dei singoli errori sulle prove espressi in valore assoluto, vale 0,801 %.

## Discussione dei risultati

### Forza normale

In generale, i tre modelli presentano un'influenza sulla risposta data della Figura 115.



(Fig. 115 rappresentazione di tutti i t-value di tutti i fattori dei modelli per i 3 materiali)

Si può notare come in tutti i modelli, i fattori più importanti siano sempre il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) ( $\ln(\text{doc})$ ) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) seguiti dall'effetto quadratico del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$ ) e infine dal logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ).

Tutti gli altri parametri quadratici sono al limite del valore minimo per l'importanza sulla risposta e tendono a perdere di significatività passando da Marca 1 all'Marca 3 (probabilmente collegabile con la maggiore lavorabilità data dall'incremento degli elementi leganti nelle leghe LX e LH).

I termini di interazione tra le variabili indipendenti sono sempre trascurabili sulla risposta, cosa che riconferma l'indipendenza delle variabili stesse.

Dal grafico si nota come i parametri più importanti aumentino di importanza passando dalla Marca 1 alla Marca 3.

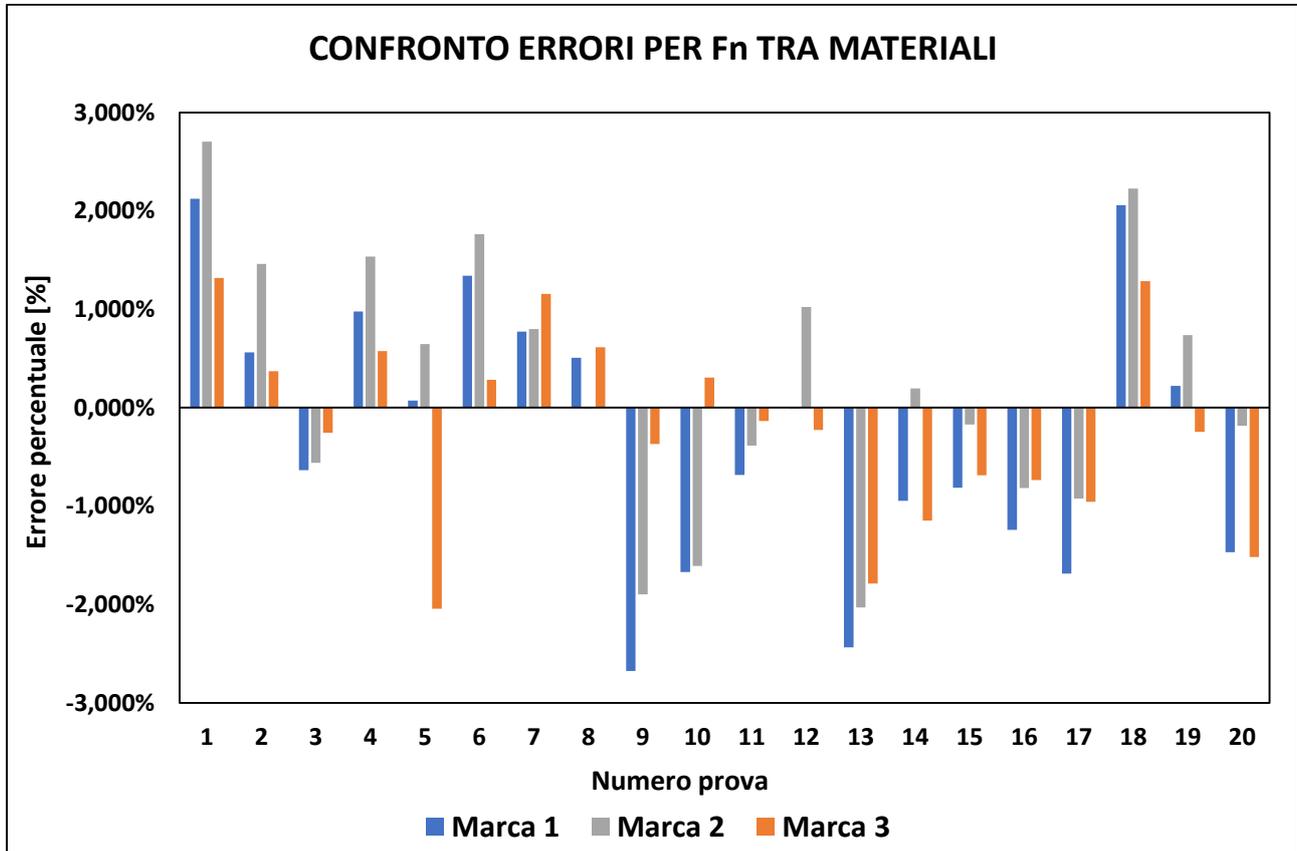
In particolare, l'influenza del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) aumenta di importanza del 4% passando dalla Marca 1 alla Marca 2 e del 35% passando dalla Marca 2 alla Marca 3, con un incremento sulla Marca 1 pari al 40% .

Il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) aumenta del 3% passando dalla Marca 1 alla Marca 2 e del 35% passando dalla Marca 2 alla Marca 3, con un incremento sulla Marca 1 pari al 40%.

Il termine quadratico del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})*\ln(\text{feed})$ ) diminuisce di importanza del 2% passando dalla Marca 1 alla Marca 2 e aumenta del 41% passando dalla Marca 2 alla Marca 3 con un incremento rispetto alla Marca 1 pari a 39%.

Infine, per quanto riguarda il contributo del logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ), l'incremento di importanza è del 9% passando dalla Marca 1 alla Marca 2 e del 52% passando dalla Marca 2 alla Marca 3, con un incremento del 66% rispetto alla Marca 1.

Il grafico riguardante gli errori percentuali tra la Forza normale misurata sperimentalmente ( $F_n$  sperimentale) e la Forza normale prevista dai modelli ( $F_n$  prevista) per i 3 materiali è mostrato nella Figura 116.



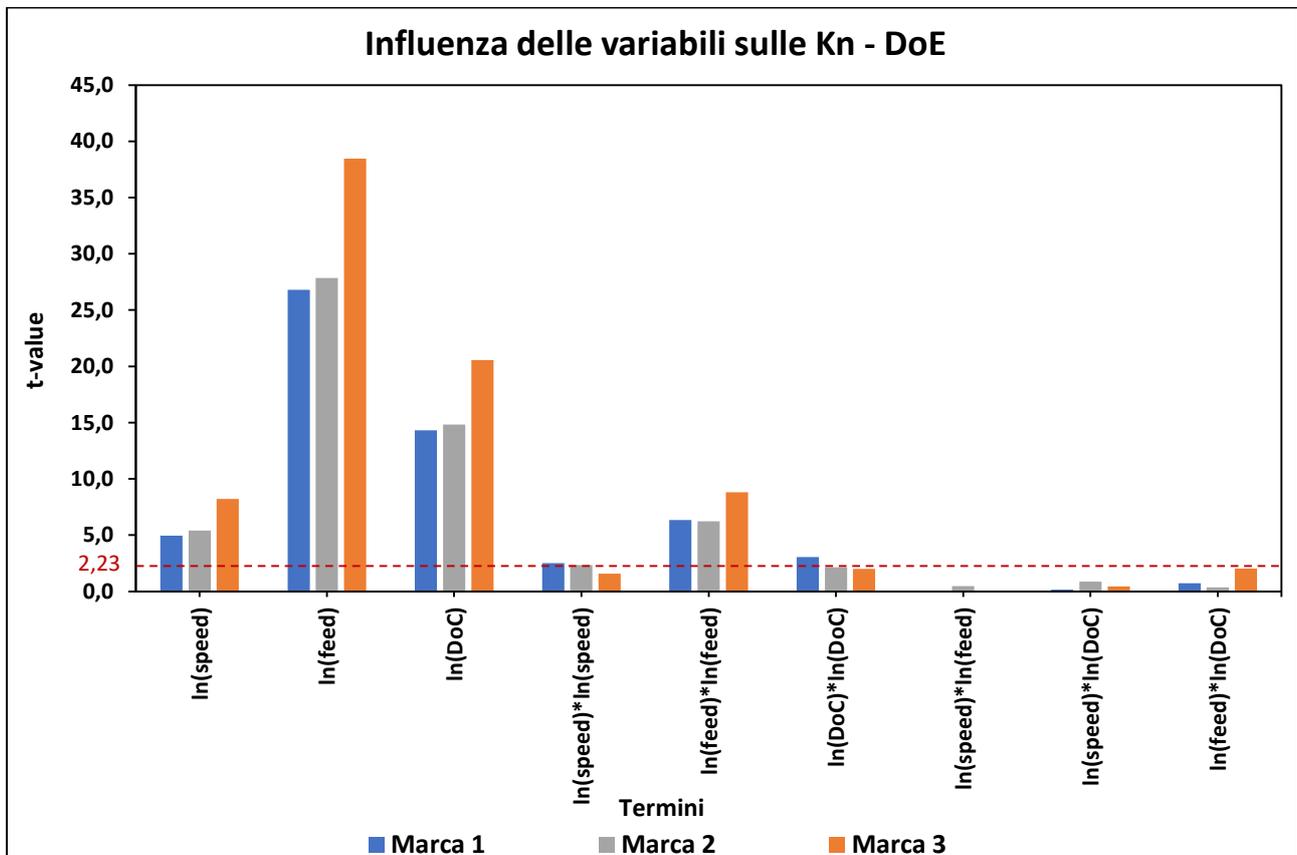
(Fig. 116 confronto degli errori tra la Forza normale misurata sperimentalmente ( $F_n$  sperimentale) e la Forza normale prevista dai modelli ottenuti ( $F_n$  prevista) per i 3 materiali testati)

Dal grafico si nota come tutti i modelli presentino degli errori rispetto ai dati sperimentali all'interno della soglia di errore massima posta a  $\pm 5\%$ .

La distribuzione degli errori è in generale casuale, con gli errori maggiori concentrati in situazioni per cui i logaritmi naturali dell'avanzamento per giro e della profondità di passata presentano valori bassi, intesi come i valori corrispondenti al centro e al minimo dell'intervallo di valori testati.

## Pressione Normale

In generale, i tre modelli presentano un'influenza sulla risposta data della figura sottostante



(fig rappresentazione di tutti i t-value di tutti i fattori dei modelli per i 3 materiali)

Si può notare come in tutti i modelli, i fattori più importanti siano sempre il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) ( $\ln(\text{doc})$ ) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) seguiti dall'effetto quadratico del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed})$ ) e infine dal logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ).

Tutti gli altri parametri quadratici sono al limite del valore minimo per l'importanza sulla risposta e tendono a perdere di significatività passando da Marca 1 all'Marca 3 (probabilmente collegabile con la maggiore lavorabilità data dall'incremento degli elementi leganti nelle leghe LX e LH).

I termini di interazione tra le variabili indipendenti sono sempre trascurabili sulla risposta, cosa che riconferma l'indipendenza delle variabili stesse.

Dal grafico si nota come i parametri più importanti aumentino di importanza passando dalla Marca 1 alla Marca 3.

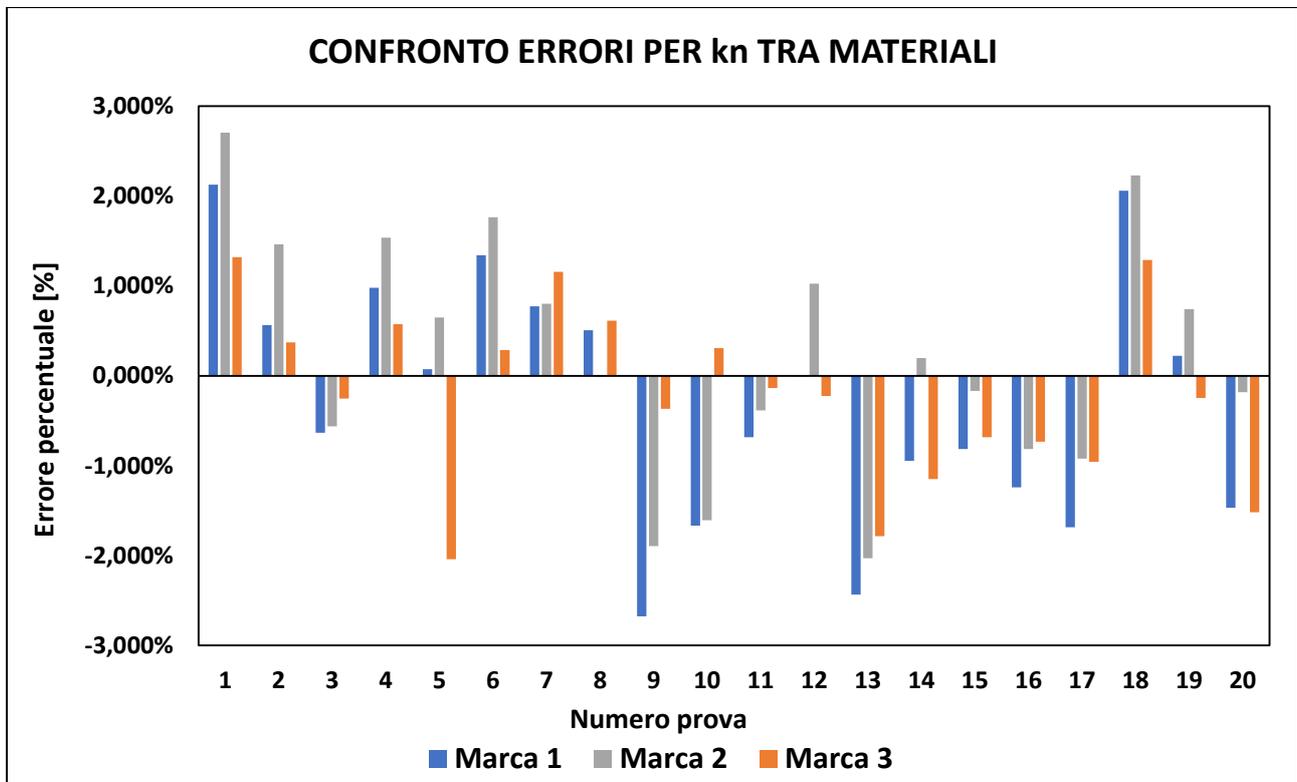
In particolare, l'influenza del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) aumenta di importanza del 4% passando dalla Marca 1 alla Marca 2 e del 38% passando dalla Marca 2 alla Marca 3, con un incremento sulla Marca 1 pari a 44%.

Il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) aumenta del 4% passando dalla Marca 1 alla Marca 2 e del 39% passando dalla Marca 2 alla Marca 3, con un incremento sulla Marca 1 pari a 44%.

Il termine quadratico del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed})$ ) diminuisce del 2% passando dalla Marca 1 alla Marca 2 e aumenta del 41% passando dalla Marca 2 alla Marca 3 con un incremento rispetto alla Marca 1 pari a 39%.

Infine, per quanto riguarda il contributo del logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ), l'incremento di importanza è del 9% passando dalla Marca 1 alla Marca 2 e del 52% passando dalla Marca 2 alla Marca 3, con un incremento del 66% rispetto alla Marca 1.

Il grafico riguardante gli errori percentuali tra la Pressione normale misurata sperimentalmente (kn sperimentale) e la Pressione normale prevista dai modelli (kn prevista) per i 3 materiali è mostrato nella Figura 117.



(Fig. 117 confronto degli errori tra la Forza normale misurata sperimentalmente (Fn sperimentale) e la Forza normale prevista dai modelli ottenuti (Fn prevista) per i 3 materiali testati)

Dal grafico si nota come tutti i modelli presentino degli errori rispetto ai dati sperimentali all'interno della soglia di errore massima posta a  $\pm 5\%$ .

La distribuzione degli errori è in generale casuale, con gli errori maggiori concentrati in situazioni per cui i logaritmi naturali dell'avanzamento per giro e della profondità di passata presentano valori bassi, intesi come i valori corrispondenti al centro e al minimo dell'intervallo di valori testati.

Gli errori misurati sono uguali a quelli ottenuti per i modelli relativi al logaritmo naturale della Forza normale. Questo può essere spiegato dalla relazione che esiste tra le due grandezze *(citazione alla formula che le lega)*

## Validazione del modello ottenuto

Per assicurarsi dell'effettiva validità dell'approccio scelto per il valore dei parametri da testare, e di conseguenza della validità del modello che si otterrà, varie alternative vengono testate.

I modelli ottenuti tramite software Minitab 18 sono:

1. un modello che restituisce il logaritmo naturale del valore di Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) in funzione delle variabili codificate (definito MODELLO 1)
2. un modello che restituisce un valore di Forza normale ( $F_n$ ) in funzione dei valori non codificati (definito MODELLO 2)
3. un modello, quello mostrato precedentemente, che restituisce un valore logaritmico di Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) in funzione di valori logaritmici non codificati delle variabili indipendenti (definito MODELLO 3).

Per i vari materiali testati, si va ad analizzare l'errore che il modello presenta rispetto ai valori sperimentali misurati. Nel caso del modello 2 i valori di riferimento saranno le forze normali misurate nell'esperimento, mentre nel caso dei modelli 1 e 3 i valori di riferimento saranno dati dal logaritmo naturale della forza normale misurata nell'esperimento.

I modelli sono tutti ottenuti a seguito di una analisi di varianza e regressione lineare multipla eseguita sui dati di velocità di taglio (speed), avanzamento per giro (feed) e profondità di passata (DoC) utilizzati nell'esperimento di Design of Experiments (DoE) per ottenere una risposta in termini di Forza normale ( $F_n$ ).

I valori dei coefficienti delle equazioni sono parametrizzati per motivi di segreto industriale. In particolare, si è usata la stessa parametrizzazione usata precedentemente per le formule del modello 3 sui tre materiali.

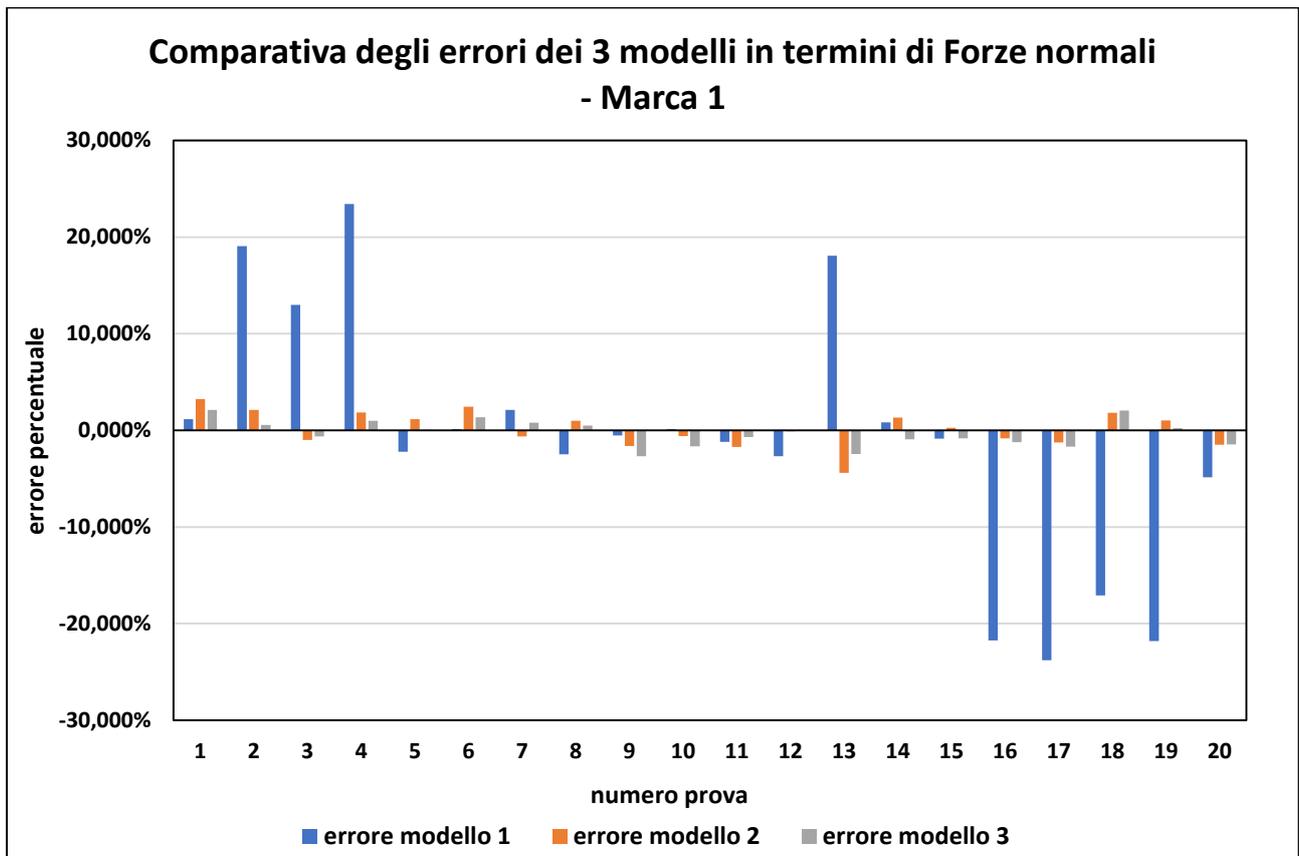
### Marca 1

I 3 modelli ottenuti sono espressi nella seguente tabella (Figure 118 – 120)

	<b>Regression Equation in Uncoded Units</b>
MODELLO 1	$\ln(Fn) = C_1 - a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{11} X_1 * X_1 + a_{22} X_2 * X_2 + a_{33} X_3 * X_3 + a_{12} X_1 * X_2 - a_{13} X_1 * X_3 + a_{23} X_2 * X_3$
	(Fig. 118 MODELLO 1 ottenuto studiando il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) in funzione del valore codificato delle variabili indipendenti)
MODELLO 2	$F_n = C_1' - a_1' \text{ speed} - a_2' \text{ feed} + a_3' \text{ DoC} + a_{11}' \text{ speed} * \text{speed} + a_{22}' \text{ feed} * \text{feed} - a_{33}' \text{ DoC} * \text{DoC} - a_{12}' \text{ speed} * \text{feed} - a_{13}' \text{ speed} * \text{DoC} + a_{23}' \text{ feed} * \text{DoC}$
	(Fig. 119 MODELLO 2 ottenuto studiando la Forza normale ( $F_n$ ) ottenuta in funzione delle variabili indipendenti)
MODELLO 3	$\ln(Fn) = C - \alpha \ln(\text{speed}) + \beta \ln(\text{feed}) + \gamma \ln(\text{DoC}) + \alpha\alpha \ln(\text{speed}) * \ln(\text{speed}) + \beta\beta \ln(\text{feed}) * \ln(\text{feed}) + \gamma\gamma \ln(\text{DoC}) * \ln(\text{DoC}) + \alpha\beta \ln(\text{speed}) * \ln(\text{feed}) - \alpha\gamma \ln(\text{speed}) * \ln(\text{DoC}) + \beta\gamma \ln(\text{feed}) * \ln(\text{DoC})$
	(Fig. 120 MODELLO 3 ottenuto studiando il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) in funzione del logaritmo naturale delle variabili indipendenti)

Le risposte date dal modello 3 e dal modello 1 vengono successivamente elevate a potenza in modo da misurare l'errore sulla forza normale prevista dai modelli.

Gli errori delle Forze normali previste rispetto alle Forze normali misurate sperimentalmente vengono descritti nella Figura 121.



(Fig. 121 comparativa degli errori tra i 3 modelli in termini di Forze normali per l'Marca 1)

Dalla distribuzione degli errori sulle prove si nota come i modelli 2 e 3 abbiano circa lo stesso comportamento, mentre il modello 1 restituisce degli errori molto alti in circa metà delle prove effettuate.

L'errore medio (calcolato tramite media sui singoli errori nelle prove espressi in valore assoluto) vale 8,853% per il modello 1, 1,493% per il modello 2 e 1,145% per il modello 3.

L'errore medio dato dal Modello 3 è il più basso. Il modello che restituisce il logaritmo naturale della Forza normale in funzione del logaritmo naturale delle variabili è il più affidabile.

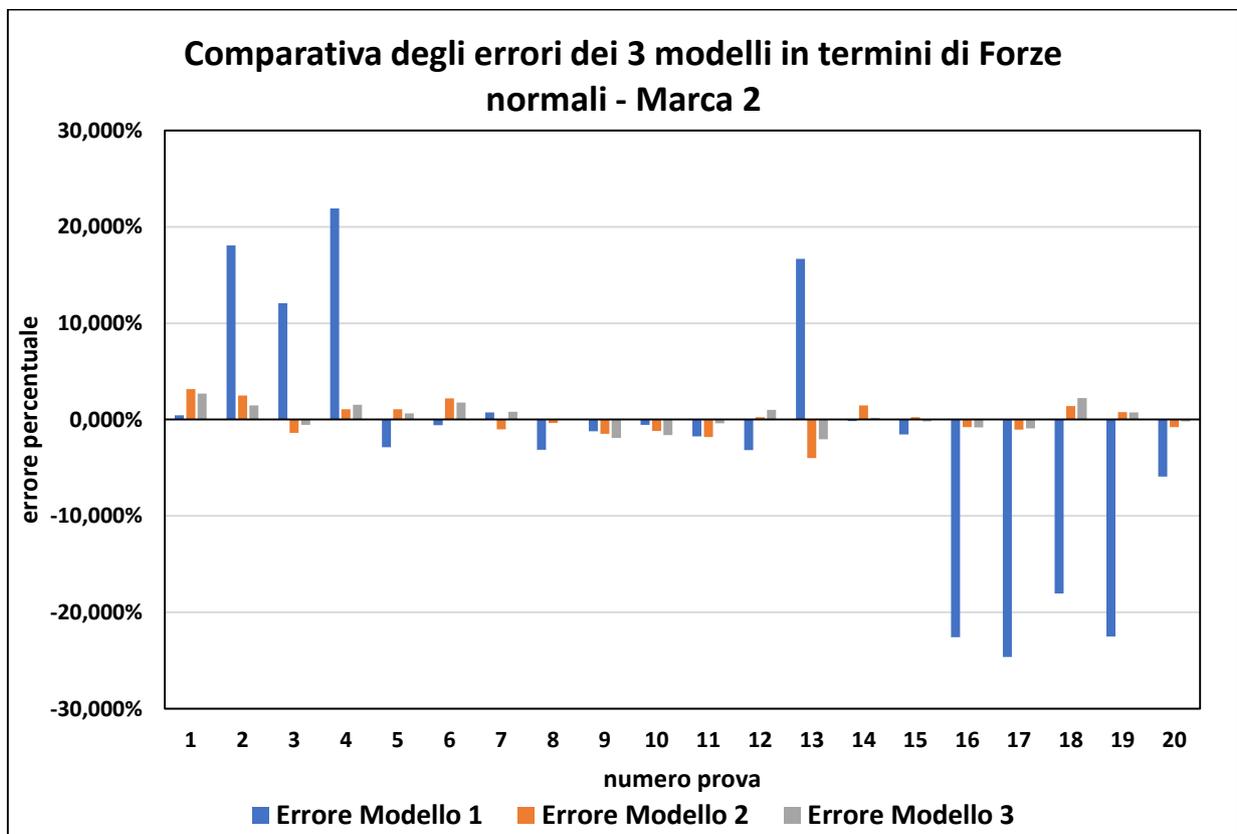
Marca 2

I 3 modelli ottenuti sono espressi nella seguente tabella (Figura 122-124).

<b>Regression Equation in Uncoded Units</b>	
MODELLO 1	$\ln(Fn) = C_2 - b_1 X1 + b_2 X2 + b_3 X3 + b_{11} X1*X1 + b_{22} X2*X2 + b_{33} X3*X3 - b_{12} X1*X2 + b_{13} X1*X3 + b_{23} X2*X3$ <p>(Fig. 122 MODELLO 1 ottenuto studiando il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) in funzione del valore codificato delle variabili indipendenti)</p>
<b>Regression Equation in Uncoded Units</b>	
MODELLO 2	$Fn = C_2' - b_1' \text{ speed} + b_2' \text{ feed} + b_3' \text{ DoC} + b_{11}' \text{ speed*speed} + b_{22}' \text{ feed*feed} - b_{33}' \text{ DoC*DoC} - b_{12}' \text{ speed*feed} - b_{13}' \text{ speed*DoC} + b_{23}' \text{ feed*DoC}$ <p>(Fig. 123 MODELLO 2 ottenuto studiando la Forza normale (Fn) ottenuta in funzione delle variabili indipendenti)</p>
<b>Regression Equation in Uncoded Units</b>	
MODELLO 3	$\ln(Fn) = C' - \alpha' \ln(\text{speed}) + \beta' \ln(\text{feed}) + \gamma' \ln(\text{DoC}) + \alpha\alpha' \ln(\text{speed})*\ln(\text{speed}) + \beta\beta' \ln(\text{feed})*\ln(\text{feed}) + \gamma\gamma' \ln(\text{DoC})*\ln(\text{DoC}) - \alpha\beta' \ln(\text{speed})*\ln(\text{feed}) + \alpha\gamma' \ln(\text{speed})*\ln(\text{DoC}) + \beta\gamma' \ln(\text{feed})*\ln(\text{DoC})$ <p>(Fig. 124 MODELLO 3 ottenuto studiando il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) in funzione del logaritmo naturale delle variabili indipendenti)</p>

Le risposte date dal modello 3 e dal modello 1 vengono successivamente elevate a potenza in modo da misurare l'errore sulla forza normale prevista dai modelli.

Gli errori delle Forze normali previste rispetto alle Forze normali misurate sperimentalmente vengono descritti nella Figura 125.



(Fig. 125 comparativa degli errori tra i 3 modelli in termini di Forze normali per l'Marca 2)

Dalla distribuzione degli errori sulle prove si nota come i modelli 2 e 3 abbiano circa lo stesso comportamento, mentre il modello 1 restituisce degli errori molto alti in circa metà delle prove effettuate.

L'errore medio (calcolato tramite media sui singoli errori nelle prove espressi in valore assoluto) vale 8,925% per il modello 1, 1,401% per il modello 2 e 1,084% per il modello 3.

L'errore medio dato dal Modello 3 è il più basso. Il modello che restituisce il logaritmo naturale della Forza normale in funzione del logaritmo naturale delle variabili è il più affidabile.

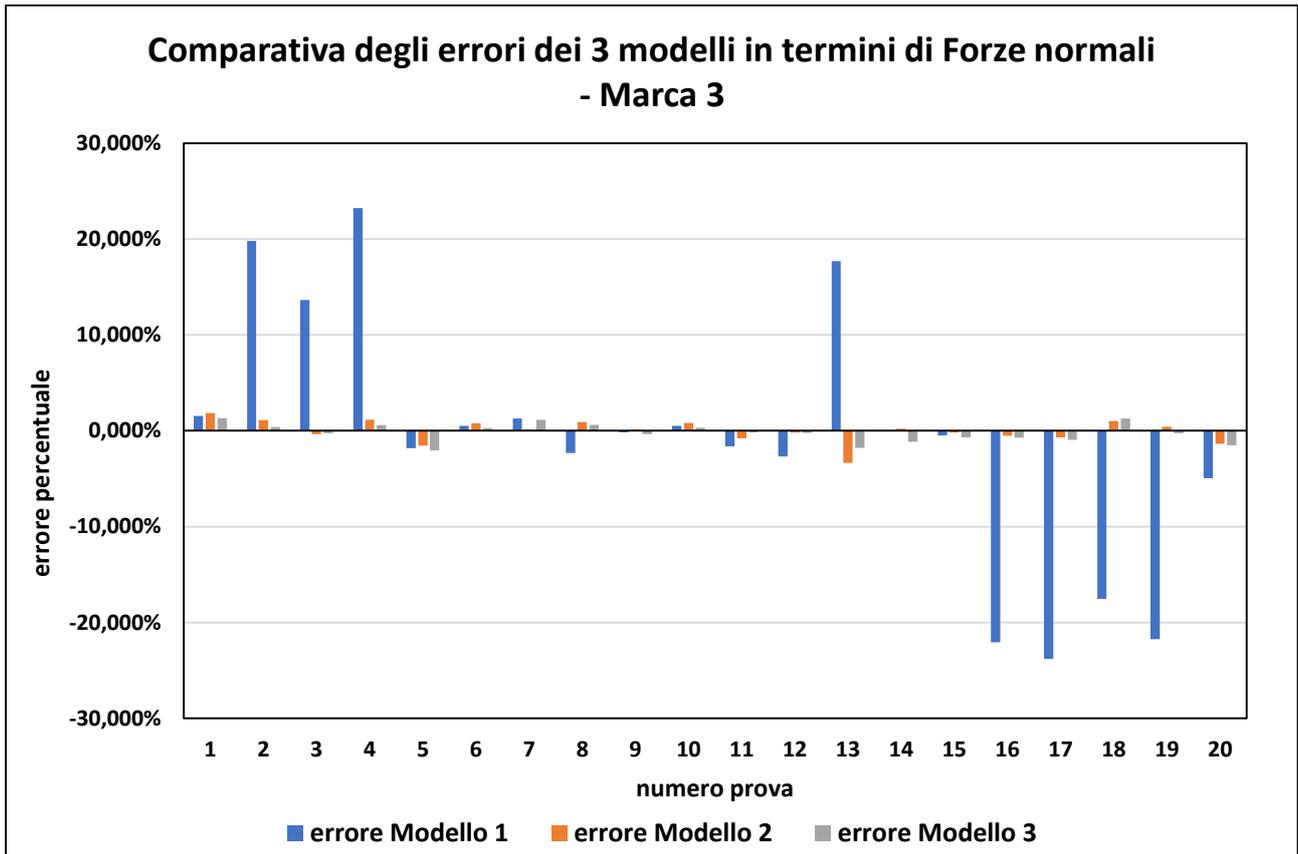
### Marca 3

I 3 modelli ottenuti sono espressi nella seguente tabella (Figura 126 - 128).

<b>Regression Equation in Uncoded Units</b>	
MODELLO 1	$\ln(Fn) = C_3 - c_1 X1 + c_2 X2 + c_3 X3 + c_{11} X1*X1 + c_{22} X2*X2 + c_{33} X3*X3 + c_{12} X1*X2 + c_{13} X1*X3 + c_{23} X2*X3$ <p>(Fig. 126 MODELLO 1 ottenuto studiando il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) in funzione del valore codificato delle variabili indipendenti)</p>
<b>Regression Equation in Uncoded Units</b>	
MODELLO 2	$Fn = C_3' - c_1' \text{ speed} - c_2' \text{ feed} + c_3' \text{ DoC} + c_{11}' \text{ speed*speed} + c_{22}' \text{ feed*feed} - c_{33}' \text{ DoC*DoC} - c_{12}' \text{ speed*feed} - c_{13}' \text{ speed*DoC} + c_{23}' \text{ feed*DoC}$ <p>(Fig. 127 MODELLO 2 ottenuto studiando il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) ottenuta in funzione delle variabili indipendenti)</p>
<b>Regression Equation in Uncoded Units</b>	
MODELLO 3	$\ln(Fn) = C'' - \alpha'' \ln(\text{speed}) + \beta'' \ln(\text{feed}) + \gamma'' \ln(\text{DoC}) + \alpha\alpha'' \ln(\text{speed})*\ln(\text{speed}) + \beta\beta'' \ln(\text{feed})*\ln(\text{feed}) + \gamma\gamma'' \ln(\text{DoC})*\ln(\text{DoC}) + \alpha\beta'' \ln(\text{speed})*\ln(\text{feed}) + \alpha\gamma'' \ln(\text{speed})*\ln(\text{DoC}) + \beta\gamma'' \ln(\text{feed})*\ln(\text{DoC})$ <p>(Fig. 128 MODELLO 3 ottenuto studiando il logaritmo naturale della Forza normale (ln(Fn)) in funzione del logaritmo naturale delle variabili indipendenti)</p>

Le risposte date dal modello 3 e dal modello 1 vengono successivamente elevate a potenza in modo da misurare l'errore sulla Forza normale prevista dai modelli.

Gli errori delle Forze normali previste rispetto alle Forze normali misurate sperimentalmente vengono descritti nella Figura 129.



(Fig. 129 comparativa degli errori tra i 3 modelli in termini di Forze normali per l'Marca 3)

Dalla distribuzione degli errori sulle prove si nota come i modelli 2 e 3 abbiano circa lo stesso comportamento, mentre il modello 1 restituisce degli errori molto alti in circa metà delle prove effettuate.

L'errore medio (calcolato tramite media sui singoli errori nelle prove espressi in valore assoluto) vale 8,873% per il modello 1, 0,875% per il modello 2 e 0,801% per il modello 3.

L'errore medio dato dal Modello 3 è il più basso. Il modello che restituisce il logaritmo naturale della Forza normale in funzione del logaritmo naturale delle variabili è il più affidabile.

In conclusione, dallo studio degli errori su tutti e 3 i materiali testati, si vede che il Modello 3 (che restituisce il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) in funzione dei logaritmi delle variabili indipendenti) è sempre il modello con l'errore percentuale più basso e quindi sarà il modello studiato per valutare l'influenza dei parametri sulla risposta.

Considerata la relazione tra la Forza normale e la Pressione normale discussa in precedenza, si ha che gli errori per le due tipologie di modelli sono uguali, per cui si considera lo studio sugli errori appena eseguito valido anche per la Pressione normale.

## Calcolo dei punti minimi per il modello DoE

I modelli ottenuti per il logaritmo naturale della Forza normale e per il logaritmo naturale della Pressione normale hanno la forma generale descritta dalla Formula (76).

$$(76) \quad \ln(R) = C + b_1 \ln(\text{speed}) + b_2 \ln(\text{feed}) + b_3 \ln(\text{DoC}) + b_{11}(\ln(\text{speed}) * \ln(\text{speed})) + \\ b_{22}(\ln(\text{feed}) * \ln(\text{feed})) + b_{33}(\ln(\text{DoC}) * \ln(\text{DoC})) + b_{12}(\ln(\text{speed}) * \ln(\text{feed})) + \\ b_{13}(\ln(\text{speed}) * \ln(\text{DoC})) + b_{23}(\ln(\text{feed}) * \ln(\text{DoC}))$$

Dove:

R è la risposta del materiale intesa sia come Forza normale (Fn), espressa in [N], che come Pressione normale (kn), espressa in [N/mm<sup>2</sup>]

Speed è la velocità di taglio espressa in [m/min]

Feed è l'avanzamento per giro espresso in [mm/rev]

DoC è la profondità di passata espressa in [mm]

C, b<sub>i</sub> sono coefficienti specifici del materiale e del processo di lavorazione

## Metodo di Cramer

Per lo studio dei valori minimi, si utilizza lo studio della derivata prima. La derivata prima restituisce informazioni sulla monotonia della funzione (cioè se una funzione è monotona crescente o decrescente) tramite lo studio del segno della derivata prima e restituisce la possibilità di identificare i punti critici della funzione ponendo la derivata prima uguale a zero. Per identificare se i punti critici rilevati dalla derivata prima sono massimi, minimi o altri tipi di punti critici si può utilizzare la derivata seconda della funzione per comprendere la curvatura nell'intorno del punto critico rilevato dallo studio della derivata prima.

La derivata parziale viene eseguita sul logaritmo naturale della risposta rispetto ai logaritmi naturali delle singole componenti, come descritto nella Formula (77).

$$(77) \quad \frac{\delta \ln(R)}{\delta \ln(\text{speed}) \delta \ln(\text{feed}) \delta \ln(\text{DoC})}$$

Prima di procedere con lo studio della derivata prima, occorre individuare il dominio della derivata prima, cioè individuare l'insieme dei punti in cui la funzione è derivabile. Considerando i termini per cui la funzione viene derivata e il tipo di funzione restituita dai modelli di regressione, la funzione sarà derivabile in tutto l'insieme dei valori compresi negli intervalli delle singole variabili indipendenti. Questi intervalli saranno presi in termini logaritmici e valgono:

- Per il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ), il dominio sarà compreso tra il logaritmo naturale di 92 [m/min] pari a 4,5218 e il logaritmo naturale di 243 [m/min] pari a 5,4931, estremi compresi
- Per il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ), il dominio sarà compreso tra il logaritmo naturale di 0,1 [mm/rev] pari a -2,303 e il logaritmo naturale di 0,4 [m/min] pari a -0,916, estremi compresi
- Per il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ), il dominio sarà compreso tra il logaritmo naturale di 0,96 [mm] pari a -0,041 e il logaritmo naturale di 3,2 [mm] pari a 1,1632, estremi compresi

La derivata prima del logaritmo naturale della risposta rispetto ai logaritmi naturali delle variabili indipendenti è mostrata nella Formula (78).

$$(78) \quad \begin{cases} \frac{\delta \ln(R)}{\delta \ln(speed)} = b_1 + 2b_{11} \ln(speed) + b_{12} \ln(feed) + b_{13} \ln(DoC) = 0 \\ \frac{\delta \ln(R)}{\delta \ln(feed)} = b_2 + 2b_{22} \ln(feed) + b_{12} \ln(speed) + b_{23} \ln(DoC) = 0 \\ \frac{\delta \ln(R)}{\delta \ln(DoC)} = b_3 + 2b_{33} \ln(DoC) + b_{13} \ln(speed) + b_{23} \ln(feed) = 0 \end{cases}$$

Da cui si ottiene un sistema di 3 equazioni in 3 incognite lineare rispetto ai logaritmi naturali delle variabili indipendenti. Riarrangiando i termini in modo da avere lo stesso ordine delle incognite ed esplicitando rispetto ad un termine noto si ottiene il sistema di equazioni mostrato nella Formula (79).

$$(79) \quad \begin{cases} 2b_{11} \ln(speed) + b_{12} \ln(feed) + b_{13} \ln(DoC) = -b_1 \\ b_{12} \ln(speed) + 2b_{22} \ln(feed) + b_{23} \ln(DoC) = -b_2 \\ b_{13} \ln(speed) + b_{23} \ln(feed) + 2b_{33} \ln(DoC) = -b_3 \end{cases}$$

Tradotto in termini matriciali, il sistema di 3 equazioni i 3 incognite mostrato nella Formula (79) assume la forma riportata nella Formula (80).

$$(80) \quad \begin{pmatrix} \ln(speed) \\ \ln(feed) \\ \ln(DoC) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{12} & 2b_{22} & b_{23} \\ b_{13} & b_{23} & 2b_{33} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}$$

Il determinante (D) della matrice dei coefficienti [37] è descritto dalla Formula (81).

$$(81) \quad D = \begin{vmatrix} 2b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{12} & 2b_{22} & b_{23} \\ b_{13} & b_{23} & 2b_{33} \end{vmatrix}$$

Il determinante svolto in termini lineari [37] corrisponde alle Formule (82) – (83).

$$(82) \quad D = (2b_1 2b_2 2b_3) + (b_{12} b_{23} b_{13}) + (b_{12} b_{23} b_{13}) - (b_{13} 2b_{22} b_{13}) - (b_{12} b_{12} 2b_{33}) - (2b_{11} b_{13} b_{13})$$

$$(83) \quad D = 6(b_1 b_2 b_3) + 2(b_{12} b_{23} b_{13}) - 2(b_{11} b_{23}^2) - 2(b_{22} b_{13}^2) - 2(b_{33} b_{12}^2)$$

La regola di Cramer per un sistema di 3 equazioni in 3 incognite, prevede che per trovare il valore che risolve il sistema bisogna sostituire i termini costanti nella colonna della matrice corrispondente ai coefficienti correlati con la variabile indipendente che vuole essere calcolata, per poi calcolare il determinante della matrice ottenuta. Per trovare il valore della variabile indipendente che risolve il sistema di equazioni si esegue il rapporto tra il determinante della matrice con la colonna dei coefficienti della variabile indipendente studiata sostituita con la colonna dei termini costanti ( $D_{\ln(speed)}$ ,  $D_{\ln(feed)}$ ,  $D_{\ln(DoC)}$ ) e la matrice della matrice dei coefficienti originale (D) [37].

Si ha che quindi i valori critici che dei logaritmi delle variabili indipendenti sono ricavati di seguito.

### Logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(speed)$ )

La matrice dei coefficienti modificata con la colonna dei termini noti è descritta dalla formula sottostante

$$(84) \quad D_{\ln(speed)} = \begin{vmatrix} -b_1 & b_{12} & b_{13} \\ -b_2 & 2b_{22} & b_{23} \\ -b_3 & b_{23} & 2b_{33} \end{vmatrix}$$

Espressa in termini lineari la Formula (84) viene descritta dalla Formula (85).

$$(85) \quad D_{\ln(speed)} = b_1(b_{23}^2 - 4b_{22}b_{33}) + b_2(2b_{12}b_{33} - b_{13}b_{23}) + b_3(2b_{13}b_{22} - b_{12}b_{23})$$

Il valore critico del logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(speed)$ ) è descritto dalla Formula (86).

$$(86) \quad \ln(speed)_{crit} = \frac{D_{\ln(speed)}}{D}$$

### Logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(feed)$ )

La matrice dei coefficienti modificata con la colonna dei termini noti è descritta dalla Formula (87).

$$(87) \quad D_{\ln(feed)} = \begin{vmatrix} 2b_{11} & -b_1 & b_{13} \\ b_{12} & -b_2 & b_{23} \\ b_{13} & -b_3 & 2b_{33} \end{vmatrix}$$

Espressa in termini lineari Formula (87) viene descritta dalla Formula (88).

$$(88) \quad D_{\ln(feed)} = b_1(2b_{12}b_{33} - b_{13}b_{23}) + b_2(b_{13}^2 - 4b_{11}b_{33}) + b_3(2b_{23}b_{11} - b_{12}b_{13})$$

Il valore critico del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(feed)$ ) è descritto dalla Formula (89).

$$(89) \quad \ln(feed)_{crit} = \frac{D_{\ln(feed)}}{D}$$

### Logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(DoC)$ )

La matrice dei coefficienti modificata con la colonna dei termini noti è descritta dalla (90).

$$(90) \quad D_{\ln(DoC)} = \begin{vmatrix} 2b_{11} & b_{12} & -b_1 \\ b_{12} & 2b_{22} & -b_2 \\ b_{13} & b_{23} & -b_3 \end{vmatrix}$$

Espressa in termini lineari la Formula (90) viene descritta dalla Formula (91).

$$(91) \quad D_{\ln(DoC)} = b_1(2b_{13}b_{22} - b_{12}b_{23}) + b_2(2b_{23}b_{11} - b_{13}b_{13}) + b_3(b_{12}^2 - 4b_{22}b_{11})$$

Il valore critico del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(DoC)$ ) è descritto dalla Formula (92).

$$(92) \quad \ln(DoC)_{crit} = \frac{D_{\ln(DoC)}}{D}$$

Risolvendo le equazioni per tutte le marche per le Forze normali si ottiene che:

- La velocità di taglio critica tale da minimizzare le Forze normali tende all'infinito, valori ben oltre i valori utilizzabili fisicamente nelle operazioni di tornitura
- L'avanzamento per giro critico tale da minimizzare le Forze normali tende a zero, così come la profondità di passata critica

Risolvendo le equazioni per le pressioni normali invece si ottengono valori delle variabili indipendenti che tendono all'infinito.

Dalla risoluzione delle equazioni si ottengono dei valori che seguono l'andamento delle variabili indipendenti rispetto alla risposta, in quanto tutte le variabili indipendenti che hanno un andamento inversamente proporzionale presentano valori critici tendenti all'infinito mentre le variabili direttamente proporzionali presentano valori critici tendenti a zero. Questi valori non sono accettabili in quanto non tengono conto degli intervalli di valori testati e in generale sono valori che non hanno significato dal punto di vista fisico.

### Studio della Desiderabilità

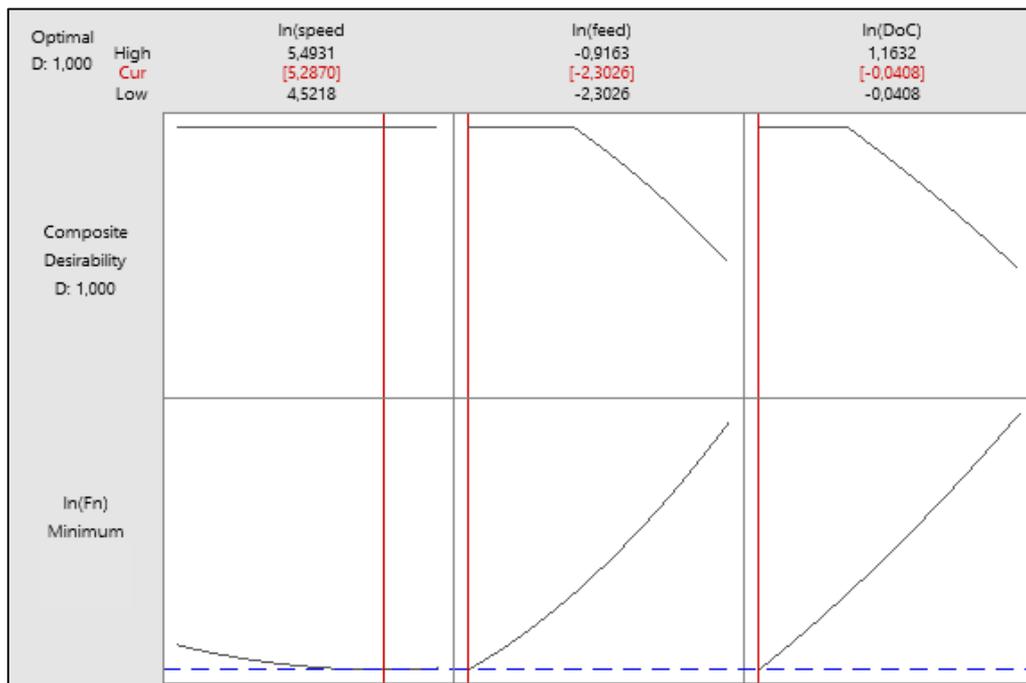
Si utilizza quindi il software Minitab e lo studio della desiderabilità per ottenere i valori ottimali delle variabili indipendenti che minimizzano le risposte.

Il software Minitab 18 tramite la funzione response optimizer restituisce i seguenti grafici per la Forza normale e per la Pressione normale per le varie marche

#### Marca 1

#### Forza Normale

Il grafico restituito dal software Minitab 18 riguardante i valori dei logaritmi naturali della velocità di taglio, dell'avanzamento per giro e della profondità di passata che minimizzano i valori del logaritmo naturale della Forza normale sono presentati nella Figura 130.



(Fig. 130 Rappresentazione grafica dei punti che minimizzano la risposta logaritmo naturale delle Forza normale  $\ln(Fn)$ , massimizzando la desiderabilità composta [30] [31])

Le influenze dei singoli parametri sulla desiderabilità composta sono mostrate nel primo set di grafici in alto. In particolare, si nota come i valori che massimizzano la desiderabilità variano a seconda dell'influenza del parametro sulla risposta. Queste variazioni sono mostrate graficamente dall'ampiezza del plateau che ogni variabile presenta nei grafici di influenza sulla desiderabilità composta (grafici in alto). In particolare, si nota come il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(DoC)$ ) presenta il plateau più ristretto, in quanto è la variabile che maggiormente impatta sull'andamento del logaritmo naturale delle forze normali ( $\ln(Fn)$ ), mentre il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(speed)$ ) invece ha un plateau su tutto l'intervallo di dati in quanto è un parametro poco influente sulla risposta.

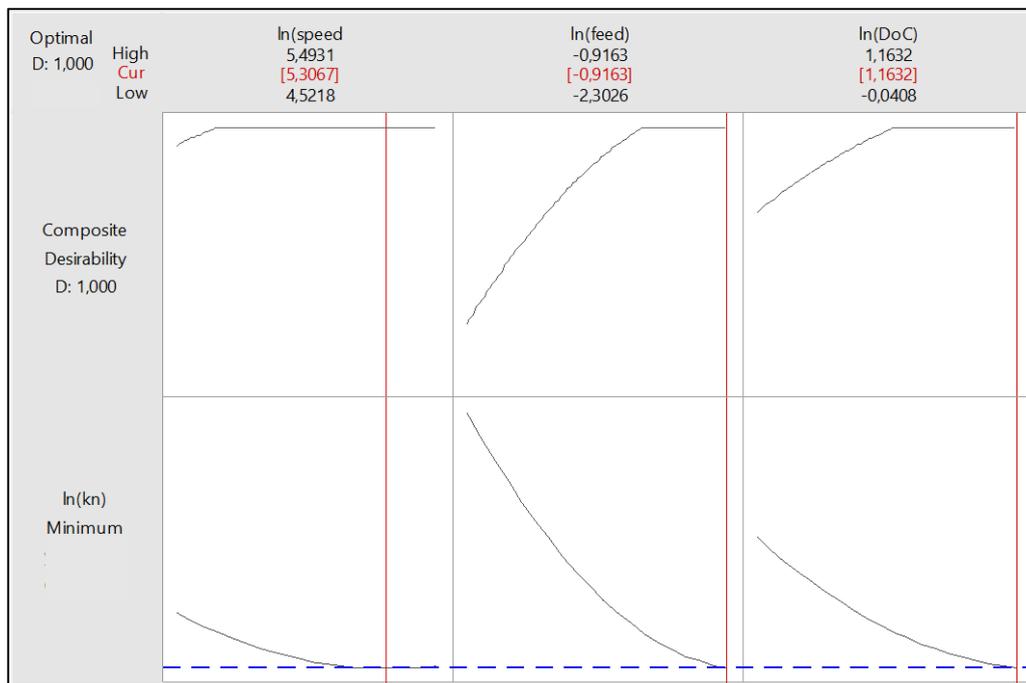
Il punto che minimizza la risposta, indicato per ogni variabile dal punto di intersezione tra la linea rossa e l'andamento del logaritmo naturale della variabile indipendente nei grafici in basso, intercetta il minimo dei dati testati per quanto riguarda il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il massimo dell'intervallo di valori testato per il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ). Si nota anche come tutte le linee rosse intersecano la linea di importanza sulla desiderabilità complessiva della risposta in una zona di plateau, dando infatti una desiderabilità complessiva di 1, che è il miglior valore possibile e rende accettabile il punto osservato.

I valori che minimizzano le Forze normali sono:

- Per la velocità di taglio (speed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale 5,287 che corrisponde ad un valore di velocità di taglio pari a 197,75 [m/min]
- Per l'avanzamento per giro (feed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale -2,303 che corrisponde ad un valore di avanzamento per giro pari a 0,1 [mm/rev], valore che corrisponde al minimo dell'intervallo di dati testati.
- Per la profondità di passata (DoC), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale -0,041 che corrisponde ad un valore di profondità di passata pari a 0,96 [mm], valore che corrisponde al minimo dell'intervallo di dati testati.

### Pressione Normale

Il grafico restituito dal software Minitab 18 riguardante i valori dei logaritmi naturali della velocità di taglio, dell'avanzamento per giro e della profondità di passata che minimizzano i valori del logaritmo naturale della Pressione normale sono presentati nella Figura 131.



(Fig. 131 Rappresentazione grafica dei punti che minimizzano la risposta logaritmo naturale della Pressione normale  $\ln(kn)$ , massimizzando la desiderabilità composta [30] [31])

Il grafico di ottimizzazione è uguale per tutte le marche testate. I valori di logaritmo di forza normale che corrispondono al minimo sono stati oscurati per motivo di segreto industriale.

Le influenze dei singoli parametri sulla desiderabilità composta sono mostrate nel primo set di grafici in alto. In particolare, si nota come il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) presenta il plateau più ristretto, in quanto è la variabile che maggiormente impatta sull'andamento del logaritmo naturale delle

Pressioni normali ( $\ln(kn)$ ), mentre il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) invece ha un plateau su tutto l'intervallo di dati in quanto è un parametro poco influente sulla risposta.

Il punto che minimizza la risposta, indicato per ogni variabile dal punto di intersezione tra la linea rossa e l'andamento del logaritmo naturale della variabile indipendente nei grafici in basso, intercetta il massimo dei dati testati per il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ), il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ). Si nota anche come tutte le linee rosse intersecano la linea di importanza sulla desiderabilità complessiva della risposta in una zona di plateau, dando infatti una desiderabilità complessiva di 1, che è il miglior valore possibile e rende accettabile il punto osservato.

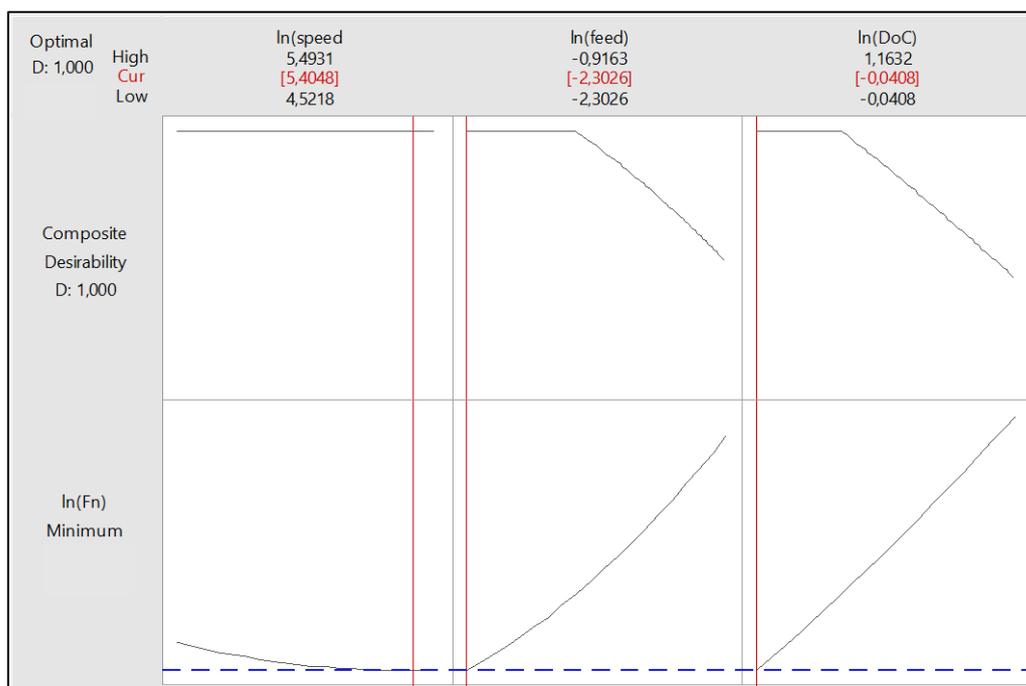
I valori che minimizzano le Pressioni normali sono:

- Per la velocità di taglio (speed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale 5,3067 che corrisponde ad un valore di velocità di taglio pari a 201,68 [m/min]
- Per l'avanzamento per giro (feed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale -0,916 che corrisponde ad un valore di avanzamento per giro pari a 0,4 [mm/rev], valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati.
- Per la profondità di passata (DoC), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale 1,1632 che corrisponde ad un valore di profondità di passata pari a 3,2 [mm], valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati.

## Marca 2

### Forza Normale

Il grafico restituito dal software Minitab 18 riguardante i valori dei logaritmi naturali della velocità di taglio, dell'avanzamento per giro e della profondità di passata che minimizzano i valori del logaritmo naturale della Forza normale sono presentati nella Figura 132



(Fig. 132 Rappresentazione grafica dei punti che minimizzano la risposta logaritmo naturale delle Forza normale  $\ln(Fn)$ , massimizzando la desiderabilità composta [30] [31])

Le influenze dei singoli parametri sulla desiderabilità composta sono mostrate nel primo set di grafici in alto. In particolare, si nota come i valori che massimizzano la desiderabilità variano a seconda dell'influenza del

parametro sulla risposta. Queste variazioni sono mostrate graficamente dall'ampiezza del plateau che ogni variabile presenta nei grafici di influenza sulla desiderabilità composta (grafici in alto). In particolare, si nota come il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) presenta il plateau più ristretto, in quanto è la variabile che maggiormente impatta sull'andamento del logaritmo naturale delle forze normali ( $\ln(\text{Fn})$ ), mentre il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) invece ha un plateau su tutto l'intervallo di dati in quanto è un parametro poco influente sulla risposta.

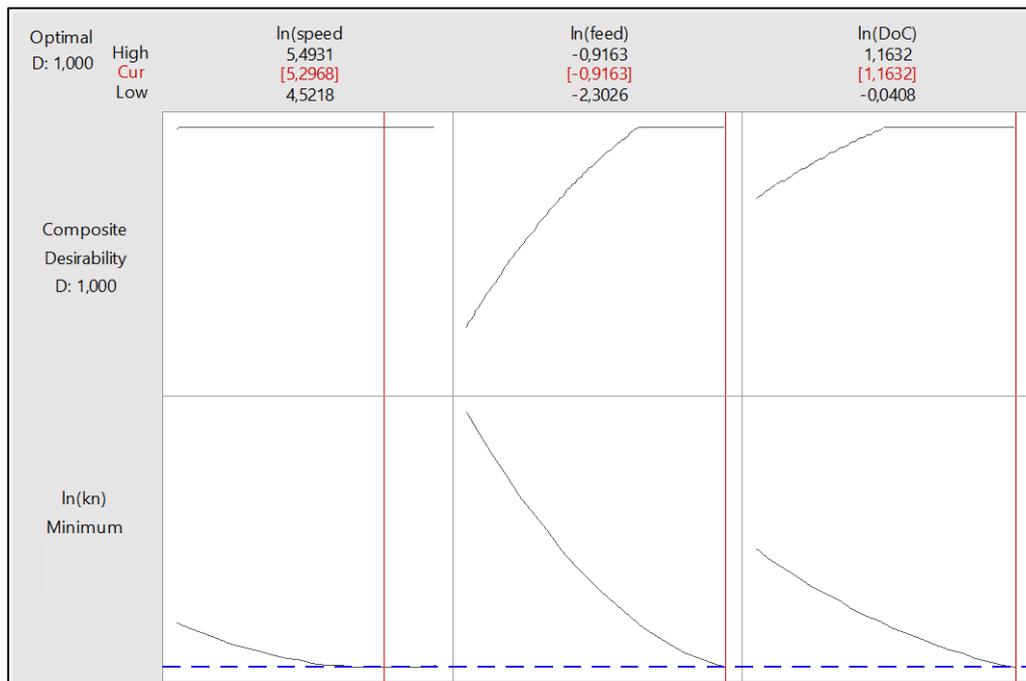
Il punto che minimizza la risposta, indicato per ogni variabile dal punto di intersezione tra la linea rossa e l'andamento del logaritmo naturale della variabile indipendente nei grafici in basso, intercetta il minimo dei dati testati per quanto riguarda il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il massimo dell'intervallo di valori testato per il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ). Si nota anche come tutte le linee rosse intersecano la linea di importanza sulla desiderabilità complessiva della risposta in una zona di plateau, dando infatti una desiderabilità complessiva di 1, che è il miglior valore possibile e rende accettabile il punto osservato.

I valori che minimizzano le Forze normali sono:

- Per la velocità di taglio (speed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale 5,4048 che corrisponde ad un valore di velocità di taglio pari a 222,47 [m/min]
- Per l'avanzamento per giro (feed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale -2,303 che corrisponde ad un valore di avanzamento per giro pari a 0,1 [mm/rev], valore che corrisponde al minimo dell'intervallo di dati testati.
- Per la profondità di passata (DoC), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale -0,041 che corrisponde ad un valore di profondità di passata pari a 0,96 [mm], valore che corrisponde al minimo dell'intervallo di dati testati.

#### Pressione Normale

Il grafico restituito dal software Minitab 18 riguardante i valori dei logaritmi naturali della velocità di taglio, dell'avanzamento per giro e della profondità di passata che minimizzano i valori del logaritmo naturale della Pressione normale sono presentati nella Figura 133.



(Fig. 133 Rappresentazione grafica dei punti che minimizzano la risposta logaritmo naturale della Pressione normale  $\ln(\text{kn})$ , massimizzando la desiderabilità composta [30] [31])

Le influenze dei singoli parametri sulla desiderabilità composta sono mostrate nel primo set di grafici in alto. In particolare, si nota come il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) presenta il plateau più ristretto, in quanto è la variabile che maggiormente impatta sull'andamento del logaritmo naturale delle Pressioni normali ( $\ln(\text{kn})$ ), mentre il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) invece ha un plateau su tutto l'intervallo di dati in quanto è un parametro poco influente sulla risposta.

Il punto che minimizza la risposta, indicato per ogni variabile dal punto di intersezione tra la linea rossa e l'andamento del logaritmo naturale della variabile indipendente nei grafici in basso, intercetta il massimo dei dati testati per il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ), il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ). Si nota anche come tutte le linee rosse intersecano la linea di importanza sulla desiderabilità complessiva della risposta in una zona di plateau, dando infatti una desiderabilità complessiva di 1, che è il miglior valore possibile e rende accettabile il punto osservato.

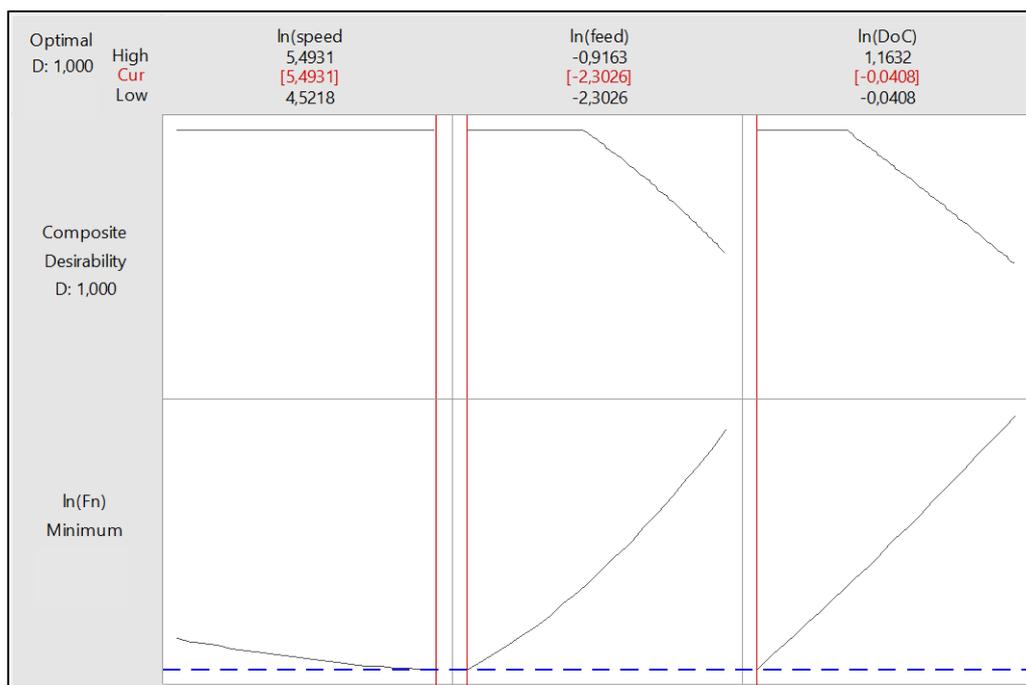
I valori che minimizzano le Pressioni normali sono:

- Per la velocità di taglio (speed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale 5,2968 che corrisponde ad un valore di velocità di taglio pari a 199,7 [m/min]
- Per l'avanzamento per giro (feed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale -0,916 che corrisponde ad un valore di avanzamento per giro pari a 0,4 [mm/rev], valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati.
- Per la profondità di passata (DoC), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale 1,1632 che corrisponde ad un valore di profondità di passata pari a 3,2 [mm], valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati.

### Marca 3

### Forza Normale

Il grafico restituito dal software Minitab 18 riguardante i valori dei logaritmi naturali della velocità di taglio, dell'avanzamento per giro e della profondità di passata che minimizzano i valori del logaritmo naturale della Forza normale sono presentati nella Figura 134.



(Fig. 134 Rappresentazione grafica dei punti che minimizzano la risposta logaritmo naturale delle Forza normale  $\ln(\text{Fn})$ , massimizzando la desiderabilità composta [30] [31])

Le influenze dei singoli parametri sulla desiderabilità composta sono mostrate nel primo set di grafici in alto. In particolare, si nota come i valori che massimizzano la desiderabilità variano a seconda dell'influenza del parametro sulla risposta. Queste variazioni sono mostrate graficamente dall'ampiezza del plateau che ogni variabile presenta nei grafici di influenza sulla desiderabilità composta (grafici in alto). In particolare, si nota come il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) presenta il plateau più ristretto, in quanto è la variabile che maggiormente impatta sull'andamento del logaritmo naturale delle forze normali ( $\ln(\text{Fn})$ ), mentre il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) invece ha un plateau su tutto l'intervallo di dati in quanto è un parametro poco influente sulla risposta.

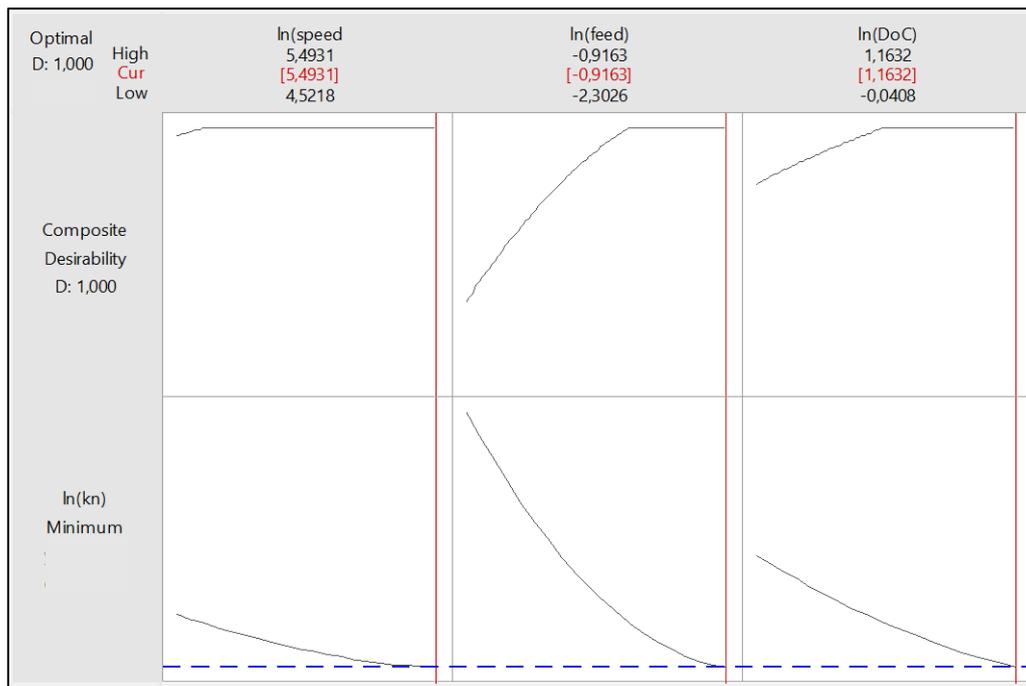
Il punto che minimizza la risposta, indicato per ogni variabile dal punto di intersezione tra la linea rossa e l'andamento del logaritmo naturale della variabile indipendente nei grafici in basso, intercetta il minimo dei dati testati per quanto riguarda il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il massimo dell'intervallo di valori testato per il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ). Si nota anche come tutte le linee rosse intersecano la linea di importanza sulla desiderabilità complessiva della risposta in una zona di plateau, dando infatti una desiderabilità complessiva di 1, che è il miglior valore possibile e rende accettabile il punto osservato.

I valori che minimizzano le Forze normali sono:

- Per la velocità di taglio (speed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale 5,4931 che corrisponde ad un valore di velocità di taglio pari a 243 [m/min], valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati.
- Per l'avanzamento per giro (feed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale -2,303 che corrisponde ad un valore di avanzamento per giro pari a 0,1 [mm/rev], valore che corrisponde al minimo dell'intervallo di dati testati.
- Per la profondità di passata (DoC), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale -0,041 che corrisponde ad un valore di profondità di passata pari a 0,96 [mm], valore che corrisponde al minimo dell'intervallo di dati testati.

#### Pressione Normale

Il grafico restituito dal software Minitab 18 riguardante i valori dei logaritmi naturali della velocità di taglio, dell'avanzamento per giro e della profondità di passata che minimizzano i valori del logaritmo naturale della Pressione normale sono presentati nella Figura 135.



(Fig. 135 Rappresentazione grafica dei punti che minimizzano la risposta logaritmo naturale della Pressione normale  $\ln(kn)$ , massimizzando la desiderabilità composta [30] [31])

Le influenze dei singoli parametri sulla desiderabilità composta sono mostrate nel primo set di grafici in alto. In particolare, si nota come il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) presenta il plateau più ristretto, in quanto è la variabile che maggiormente impatta sull'andamento del logaritmo naturale delle Pressioni normali ( $\ln(kn)$ ), mentre il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) invece ha un plateau su tutto l'intervallo di dati in quanto è un parametro poco influente sulla risposta.

Il punto che minimizza la risposta, indicato per ogni variabile dal punto di intersezione tra la linea rossa e l'andamento del logaritmo naturale della variabile indipendente nei grafici in basso, intercetta il massimo dei dati testati per il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ), il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ). Si nota anche come tutte le linee rosse intersecano la linea di importanza sulla desiderabilità complessiva della risposta in una zona di plateau, dando infatti una desiderabilità complessiva di 1, che è il miglior valore possibile e rende accettabile il punto osservato.

I valori che minimizzano le Pressioni normali sono:

- Per la velocità di taglio (speed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale 5,4931 che corrisponde ad un valore di velocità di taglio pari a 243 [m/min], valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati.
- Per l'avanzamento per giro (feed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale -0,916 che corrisponde ad un valore di avanzamento per giro pari a 0,4 [mm/rev], valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati.
- Per la profondità di passata (DoC), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale 1,1632 che corrisponde ad un valore di profondità di passata pari a 3,2 [mm], valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati.

## Conclusioni

Nonostante dal punto di vista matematico il logaritmo naturale delle pressioni normali ( $\ln(kn)$ ) sia correlato in maniera molto stretta con il logaritmo naturale delle Forze normali ( $\ln(Fn)$ ), si nota come le influenze sulla risposta dei singoli parametri siano diverse.

In particolare, si nota come per le Forze normali il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(DoC)$ ) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(feed)$ ) siano rispettivamente i fattori più importanti sulla risposta, dando un contributo che è direttamente proporzionale alla risposta.

Per il logaritmo delle Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) si ha invece un ordine di importanza invertito, con il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(feed)$ ) più importante del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(DoC)$ ), con un contributo delle variabili che è inversamente proporzionale alla risposta.

Per i vari materiali, sia nei modelli riguardanti il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) che quelli riguardanti il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ), il contributo del logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(speed)$ ) ha un contributo non trascurabile ma minore del contributo quadratico del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(feed)*\ln(feed)$ ).

I contributi quadratici legati al logaritmo naturale della velocità di taglio e della profondità di passata hanno influenza bassa sulla Marca 1 e perdono di importanza passando dalla Marca 1 alla Marca 3.

Per tutti i modelli sviluppati su tutti i materiali testati, i contributi delle interazioni tra i logaritmi naturali delle variabili indipendenti potrebbero essere trascurati.

I vari modelli sono in grado di spiegare una percentuale elevata dei dati forniti, in particolare si ha che per quanto riguarda il modello per il logaritmo naturale delle Forze normali ( $\ln(Fn)$ ) l'affidabilità, data dall'indice  $R^2_{adj}$ , è 99,19% per la Marca 1, 99,28% per la Marca 2 e 99,53% per la Marca 3, mentre per i modelli riguardanti il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) l'affidabilità, data dall'indice  $R^2_{adj}$ , è 95,28% per la Marca 1, 95,80% per la Marca 2 e 97,37% per la Marca 3.

L'errore sul valore di Forza normale e Pressione normale derivato dai modelli logaritmici è identico, a causa della relazione che sussiste tra questi due modelli e in particolare vale 1,145% per la Marca 1, 1,084% per la Marca 2 e 0,801% per la Marca 3.

Dalla modellazione si ottengono dei valori minimi di Forza normale per i 3 materiali, a seguito di analisi della desiderabilità, che corrispondono ai punti più bassi del range di valori testati per quanto riguarda l'avanzamento per giro ( $feed$ ) pari a 0,1 [mm/rev], e la profondità di passata ( $DoC$ ) pari a 0,96 [mm], mentre il valore della velocità di taglio ( $speed$ ), varia a seconda delle marche, passando da 197,75 [m/min] per la Marca 1 a 222,47 [m/min] per la Marca 2 e infine a 243,01 [m/min] per la Marca 3 (valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati).

I valori minimi di Pressione normale, a seguito di analisi della desiderabilità, corrispondono sempre al massimo del range dei valori testati per quanto riguarda i valori di avanzamento per giro e profondità di passata, con valori rispettivi di 0,4[mm/rev] e 3,2 [mm], mentre per i valori di velocità di taglio si ha che per la Marca 1 il valore critico vale 201,68 [m/min], per la Marca 2 vale 199,7 [m/min] e per la Marca 3 vale 243 [m/min] (che corrisponde al massimo dell'intervallo dei dati testato)

## Confronto tra i modelli Una Variabile Alla Volta e di Design of Experiments

Considerando la relazione presente tra il logaritmo naturale delle pressioni normali ( $\ln(kn)$ ) e il logaritmo naturale delle forze normali ( $\ln(Fn)$ ), il confronto tra i modelli verrà eseguito in termini di Forza normale, ma i risultati potranno essere estesi anche alle pressioni normali grazie alla relazione che lega le due variabili di pendenti.

I modelli ottenuti dalle due prove sperimentali (una variabile alla volta e design of experiment) restituiscono due modelli differenti che non è possibile comparare se non per metodi grafici. In particolare, si è studiato l'andamento dei due modelli sulla risposta generando dei grafici tridimensionali in cui sull'asse z si posiziona la risposta (espressa come  $F_n$ ) e sul piano x-y si posizionano due delle tre variabili indipendenti testate. Basandoci sulla comparativa dei grafici di Pareto per l'importanza delle variabili, si è scelto di studiare i grafici con asse x-y dati dalla profondità di passata (DoC) e dall'avanzamento per giro (feed).

La velocità di taglio viene tenuta fissa al valore "0", pari a 150 [m/min], in quanto essendo la variabile che influenza di meno tutti i modelli presentati, si è scelto di studiare l'andamento della risposta in funzione delle variabili che la influenzano maggiormente.

Nella seguente tabella sono riportati i grafici di superficie che si ricavano impostando la risposta in funzione delle variabili indipendenti più importanti utilizzando i modelli ottenuti dalle prove Una Variabile Alla Volta (UVAV) e i modelli ottenuti dalle prove di Design of Experiments (DoE).

In particolare, l'andamento della curva di superficie dei modelli ottenuti dalle prove Una Variabile Alla Volta sono descritti dalla Figura 136 per il modello riguardante la Marca 1, dalla Figura 138 per il modello riguardante la Marca 2 e dalla Figura 140 per il modello riguardante la Marca 3. La Figura 137 illustra la curva di superficie ottenuta per il modello sviluppato dalle prove di Design of Experiments per la Marca 1, la Figura 139 illustra la curva di superficie del modello ottenuto dalle prove DoE della Marca 2 e la Figura 141 illustra l'andamento della curva di superficie del modello ottenuto dalle prove DoE della Marca 3.

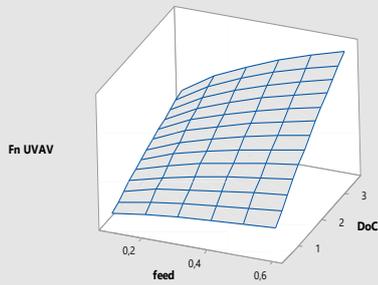
materiale

### Una Variabile Alla Volta (UVAV)

### Design of Experiments (DoE)

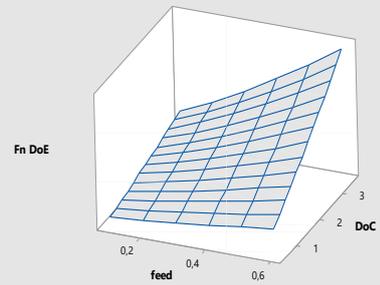
**Marca 1**

Marca 1 UVAV surface plot Fn-feed-DoC at constant speed=150 [m/min]



(Fig. 136 grafico di superficie del modello UVAV per Marca 1 con velocità di taglio pari a 150 [m/min])

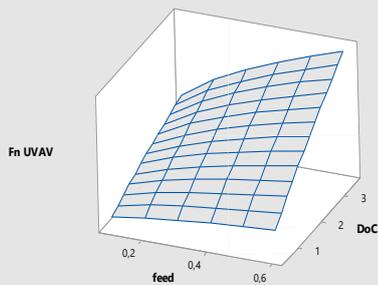
Marca 1 DoE surface plot Fn-feed-DoC at constant speed=150 [m/min]



(Fig. 137 grafico di superficie del modello CCC per Marca 1 con velocità di taglio pari a 150 [m/min])

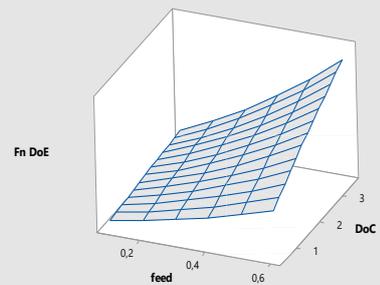
**Marca 2**

Marca 2 UVAV surface plot Fn-feed-DoC at constant speed=150 [m/min]



(Fig. 138 grafico di superficie del modello UVAV per Marca 2 con velocità di taglio pari a 150 [m/min])

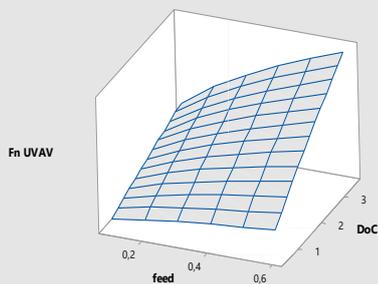
Marca 2 DoE surface plot Fn-feed-DoC at constant speed=150 [m/min]



(Fig. 139 grafico di superficie del modello CCC per Marca 2 con velocità di taglio pari a 150 [m/min])

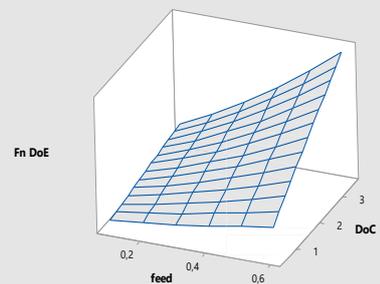
**Marca 3**

Marca 3 UVAV surface plot Fn-feed-DoC at constant speed=150 [m/min]



(Fig. 140 grafico di superficie del modello UVAV per Marca 3 con velocità di taglio pari a 150 [m/min])

Marca 3 DoE surface plot Fn-feed-DoC at constant speed=150 [m/min]



(Fig. 141 grafico di superficie del modello CCC per Marca 3 con velocità di taglio pari a 150 [m/min])

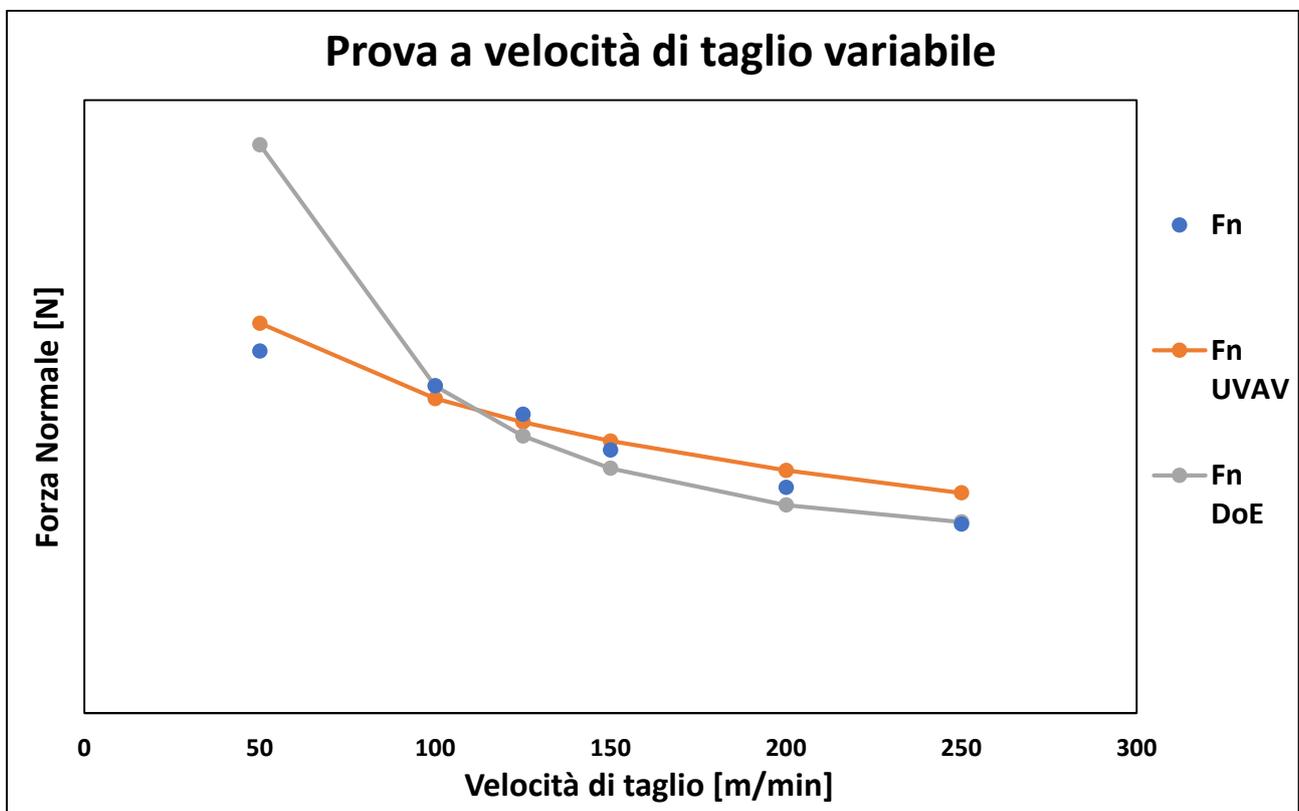
Come si nota dai grafici, i due modelli restituiscono una superficie con una diversa concavità, in quanto gli effetti quadratici legati al logaritmo naturale dell'avanzamento per giro rendono esponenziale l'andamento legato a questa variabile.

Dalla forma delle curve si può anche notare come la ricerca di un valore minimo tramite studi di funzione dia la zona con avanzamento per giro e profondità di passata minima, corrispondente ai minimi dei valori testati.

Per confrontare ulteriormente le due tipologie di modelli, sono stati utilizzati i dati delle prove una variabile alla volta per ottenere i grafici della risposta sperimentale e modellizzata secondo regressione lineare multipla e design CCC. L'intervallo dei dati una variabile alla volta è stato scelto in quanto base per lo sviluppo di entrambi le tipologie di modelli.

### Prove a velocità di taglio variabile

Il grafico ottenuto mettendo a confronto i dati sperimentali ottenuti nelle prove Una Variabile Alla Volta con modelli di regressione ottenuti dai dati Una variabile Alla Volta (UVAV) e dai dati di Design of Experiments (DoE) nelle prove a velocità di taglio (Speed) variabile è riportato di seguito (Figura 142).



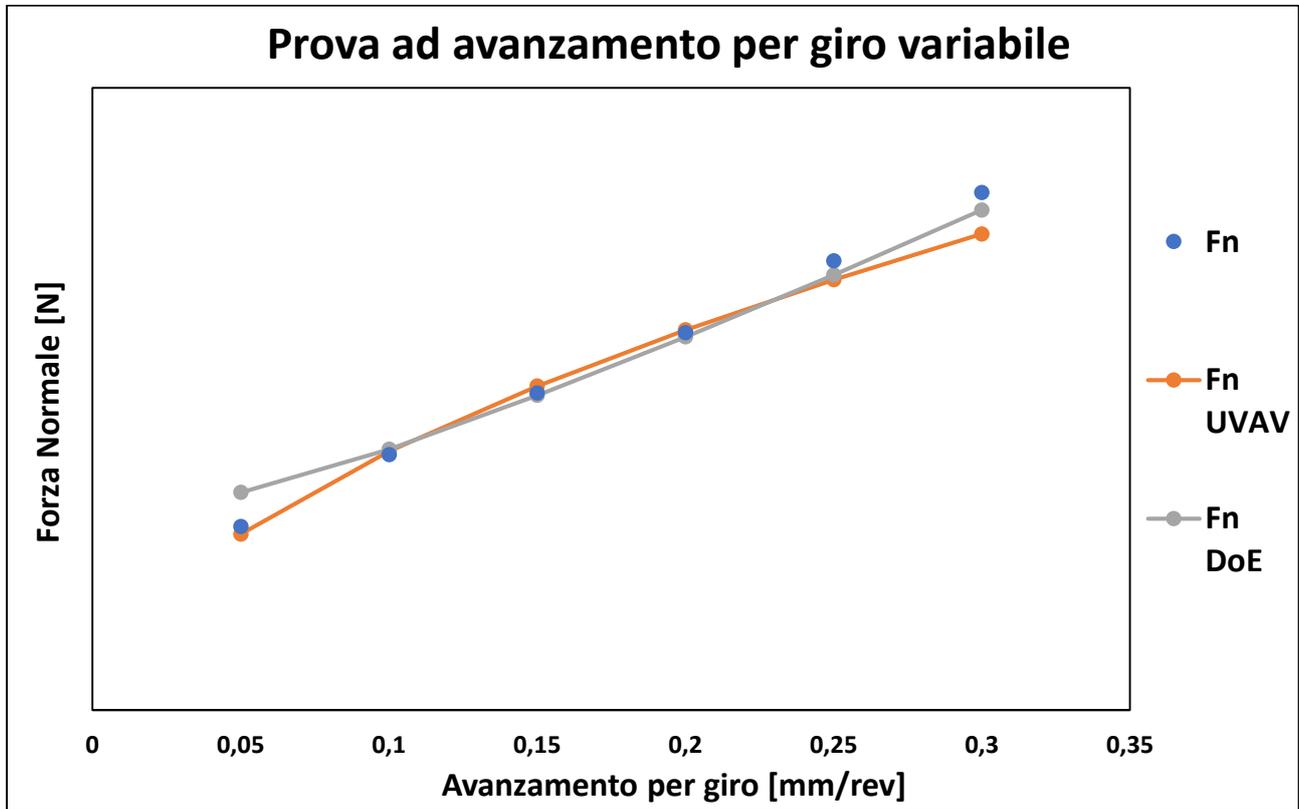
(Fig. 142 Confronto tra i valori sperimentali e i valori previsti dai modelli di UVAV e DoE per le prove a velocità di taglio variabile)

Tutte le marche presentano un andamento simile, in particolare questo grafico è preso dalla Marca 3 ma le osservazioni che verranno fatte su questo grafico possono essere estese a tutte le altre Marche.

Dal grafico si può notare come il modello UVAV rispecchia in generale l'andamento dei dati, mentre il modello DoE presenta delle problematiche nella parte iniziale, tra 50 e 100 [m/min] a causa del fatto che l'intervallo impostato per le prove di Design of Experiments (DoE) aveva come punto più basso di velocità di taglio (speed) 92 [m/min], quindi si può supporre che il modello DoE non sia in grado di prevedere con elevata certezza valori di Forza normale (Fn) al di fuori del proprio intervallo. Si vede però come all'interno dei dati testati, l'aderenza ai valori previsti dal modello DoE sia maggiore rispetto a quella dei dati previsti dal modello UVAV.

## Prove ad avanzamento per giro variabile

Il grafico ottenuto mettendo a confronto i dati sperimentali ottenuti nelle prove Una Variabile Alla Volta con modelli di regressione ottenuti dai dati Una variabile Alla Volta (UVAV) e dai dati di Design of Experiments (DoE) nelle prove ad avanzamento per giro (feed) variabile è riportato di seguito (Figura 143).



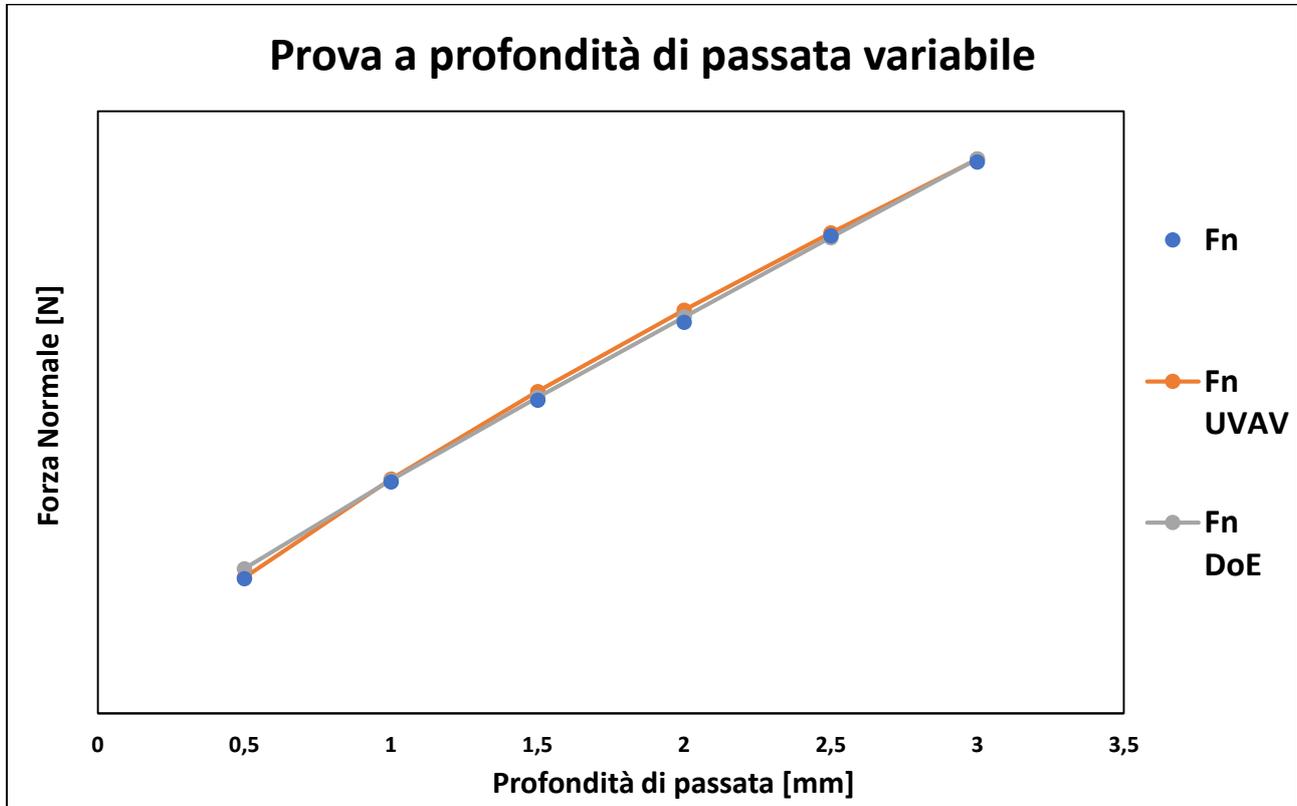
(Fig. 143 Confronto tra i valori sperimentali e i valori previsti dai modelli di UVAV e DoE per le prove ad avanzamento per giro variabile)

Tutte le marche presentano un andamento simile, in particolare questo grafico è preso dalla Marca 3 ma le osservazioni che verranno fatte su questo grafico possono essere estese a tutte le altre Marche.

Dal grafico si può notare come il modello UVAV rispecchia in generale l'andamento dei dati, mentre il modello DoE presenta delle problematiche nella parte iniziale, tra 0,05 e 0,1 [mm/rev] a causa del fatto che l'intervallo impostato per le prove di Design of Experiments (DoE) aveva come punto più basso di avanzamento per giro (feed) 0,1 [mm/rev], quindi si può supporre che il modello DoE non sia in grado di prevedere con elevata certezza valori di Forza normale (Fn) al di fuori del proprio intervallo. Si vede però come all'interno dei dati testati, l'aderenza ai valori previsti dal modello DoE sia maggiore rispetto a quella dei dati previsti dal modello UVAV.

## Prove a profondità di passata variabile

Il grafico ottenuto mettendo a confronto i dati sperimentali ottenuti nelle prove Una Variabile Alla Volta con modelli di regressione ottenuti dai dati Una variabile Alla Volta (UVAV) e dai dati di Design of Experiments (DoE) nelle prove a profondità di passata (DoC) variabile è riportato di seguito (Figura 144).



(Fig. 144 Confronto tra i valori sperimentali e i valori previsti dai modelli di UVAV e DoE per le prove ad avanzamento per giro variabile)

Tutte le marche presentano un andamento simile, in particolare questo grafico è preso dalla Marca 3 ma le osservazioni che verranno fatte su questo grafico possono essere estese a tutte le altre Marche.

Dal grafico si può notare come il modello UVAV rispecchia in generale l'andamento dei dati, mentre il modello DoE presenta delle problematiche nella parte iniziale, tra 0,5 e 1 [mm] a causa del fatto che l'intervallo impostato per le prove di Design of Experiments (DoE) aveva come punto più basso di profondità di passata 0,96 [mm], quindi si può supporre che il modello DoE non sia in grado di prevedere con elevata certezza valori di Forza normale (Fn) al di fuori del proprio intervallo. Si vede però come all'interno dei dati testati, l'aderenza ai valori previsti dal modello DoE sia maggiore rispetto a quella dei dati previsti dal modello UVAV.

## Analisi dei Residuali

Un ulteriore studio che viene applicato ai modelli di regressione ottenuti è lo studio dei grafici di probabilità (probability plot). Questi grafici si basano sullo studio dei residuali del modello rispetto ai dati sperimentali e ne studia la distribuzione. Affinchè un modello sia affidabile, è necessario che i residuali si distribuiscano in modo da seguire una legge normale o Gaussiana. Se i residuali non seguono una distribuzione normale, allora non è possibile assumere per veri i risultati di significatività dei termini del modello e quindi risulta un modello non attendibile [17].

Minitab costruisce i grafici basandosi sul tipo di dati ricevuti e crea una funzione di distribuzione cumulativa stimata (CDF) tramite la creazione di un grafico in cui vengono posti i valori di ogni osservazione (anche ripetuti) in funzione della loro probabilità cumulativa stimata. [38]

La funzione di distribuzione cumulativa è una funzione che calcola la probabilità che una variabile assuma un valore minore o uguale a  $x$  [41].

In generale la funzione di distribuzione cumulativa è descritta dalla Formula (93).

$$(93) \quad F(x) = P[X \leq x] = \alpha$$

Dove:

$F(x)$  è la funzione di distribuzione cumulativa

$x$  è il valore limite considerato dalla funzione di distribuzione cumulativa

$P$  è la probabilità che la variabile assuma un valore inferiore a  $x$

$X$  è la variabile indipendente

$\alpha$  è il valore di probabilità restituito dalla funzione di distribuzione cumulativa

Per una distribuzione di valori continui [41] la Formula (93) assume la forma descritta dalla Formula (94).

$$(94) \quad F(x) = \int_{-\infty}^x f(\mu) d\mu$$

Dove:

$F(x)$  è la funzione di distribuzione cumulativa

$x$  è il valore limite considerato dalla funzione di distribuzione cumulativa

$f(\mu)$  è la funzione continua studiata dalla distribuzione

$\mu$  è la variabile indipendente studiata

Per una distribuzione di valori discreti [41] la Formula (93) assume la forma descritta dalla Formula (95).

$$(95) \quad F(x) = \sum_{-\infty}^x f(i)$$

Dove:

$F(x)$  è la funzione di distribuzione cumulativa

$x$  è il valore limite considerato dalla funzione di distribuzione cumulativa

$f(i)$  è la funzione discreta studiata dalla distribuzione

$i$  è la variabile indipendente studiata

Per una distribuzione normale, si ha che la probabilità restituita dalla funzione di distribuzione cumulativa può essere modificata leggermente grazie alla simmetria legata alla forma della curva Gaussiana, in modo da considerare solo i valori compresi in una metà della curva [41]. Si ha quindi che la Formula (93) assume la forma descritta dalla Formula (96).

$$(96) \quad F(x) = P[0 \leq a \leq |x|]$$

Dove:

$F(x)$  è la funzione di distribuzione cumulativa

$x$  è il valore limite considerato dalla funzione di distribuzione cumulativa

$P$  è la probabilità che la variabile assuma un valore inferiore a  $x$

$a$  è il valore della variabile indipendente

I dati utilizzati sull'asse delle ascisse sono i valori dei residuali del modello. I grafici di probabilità utilizzati per il confronto riguardano in particolare la distribuzione dei residuali tra i valori sperimentali e quelli previsti dal modello [18]. I residuali si calcolano come descritto dalla Formula (97).

$$(97) \quad e_i = y - \hat{y}$$

Dove:

$e_i$  sono i residuali

$y$  è il valore misurato sperimentalmente

$\hat{y}$  è il valore previsto dal modello

I valori posti sull'asse delle ordinate sono numeri da 0 a 100 che rappresentano i percentili. I percentili sono un termine statistico che indica in percentuale quanto della distribuzione è minore o uguale al valore preso in considerazione [38].

Il grafico rappresenta la distribuzione dei valori studiati, nel caso specifico i residuali, tramite dei punti che rappresentano i percentili stimati per le probabilità corrispondenti di un insieme di dati ordinato.

La probabilità ( $P$ ) stimata dei dati di seguire una distribuzione normale viene calcolata tramite il rango di mediana di Benard [38], descritta dalla Formula (98).

$$(98) \quad P = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}$$

Dove:

$P$  è la probabilità stimata

$i$  è il numero dell'osservazione considerata,  $i$  va da 1 a  $n$

$n$  è il numero delle osservazioni totali

I valori dei percentili associati alla probabilità di seguire una distribuzione gaussiana dei residuali [38] sono calcolati secondo la Formula (99).

$$(99) \quad \hat{x}_p = \hat{\mu} + (z_p * \hat{\sigma})$$

Dove:

$\hat{x}_p$  è la stima dei percentili associati alla probabilità dei residuali di seguire una distribuzione gaussiana

$\hat{\mu}$  è la stima della media dei residuali

$z_p$  è l'inverso della funzione di distribuzione cumulativa stimata (CDF) per la distribuzione normale

$\hat{\sigma}$  è la stima della deviazione standard dei residuali

La varianza associata ai percentili [38] viene calcolata come descritto dalla Formula (100).

$$(100) \quad Var(\hat{x}_p) = Var(\hat{\mu}) + z_p^2 * Var(\hat{\sigma}) + 2 * z_p * Cov(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$$

Dove:

$\hat{x}_p$  è la stima dei percentili associati alla probabilità dei residuali di seguire una distribuzione gaussiana

$\hat{\mu}$  è la stima della media dei residuali

$z_p$  è l'inverso della funzione di distribuzione cumulativa stimata (CDF) per la distribuzione normale

$\hat{\sigma}$  è la stima della deviazione standard dei residuali

$\text{Var}(\hat{x}_p)$  è la varianza della stima della media dei residuali

$\text{Var}(\hat{\sigma})$  è la varianza della stima della deviazione standard dei residuali

$\text{Cov}(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$  è la covarianza associata la stima della media dei residuali e alla stima della deviazione standard dei residuali

L'errore standard dei percentili si ricava tramite la radice quadrata della varianza [38].

I punti vanno a posizionarsi nel grafico secondo varie forme in funzione se i residuali seguono una distribuzione gaussiana oppure no.

Per rendere la visione della distribuzione gaussiana più chiara dal punto di vista grafico, si ricavano una linea retta, definita linea centrale, e due linee laterali simmetriche che definiscono l'intervallo di confidenza del grafico, definiti limiti di confidenza per percentili [38].

La linea centrale [38] è descritta matematicamente dalla Formula (101).

$$(101) \quad \Phi^{-1}(P)$$

Dove:

P è la probabilità stimata

$\Phi^{-1}(P)$  è l'inverso della funzione di distribuzione cumulativa stimata (CDF) per una distribuzione normale standard

Alla linea centrale sono associati i limiti di confidenza dei percentili che per una distribuzione gaussiana [38] sono descritti dalle formule (102) – (103).

$$(102) \quad x_{pL} = \hat{x}_p - z_p * \sqrt{\text{Var}(\hat{x}_p)}$$

$$(103) \quad x_{pU} = \hat{x}_p + z_p * \sqrt{\text{Var}(\hat{x}_p)}$$

Dove:

$x_{pL}$  è il limite di confidenza inferiore dei percentili

$x_{pU}$  è il limite di confidenza superiore dei percentili

$\hat{x}_p$  è la stima dei percentili associati alla probabilità dei residuali di seguire una distribuzione normale

$z_p$  è l'inverso della funzione di distribuzione cumulativa stimata (CDF) per la distribuzione normale

Una volta ottenuti i punti e le linee sul grafico basati sui dati forniti, il grafico restituisce alcune informazioni riguardanti i dati stessi e la loro distribuzione [39] che sono:

- La media (Mean) dei dati forniti
- La deviazione standard (StDev) dei dati forniti
- Il numero (N) di dati forniti
- Il test statistico di Anderson - Darling (AD) per indicare la bontà della previsione dei dati. Questo termine misura le deviazioni tra la linea centrale e i punti riguardanti i dati caricati. Dipende dal tipo di distribuzione che si utilizza per studiare i dati.

Il test di Anderson - Darling [42] è descritto dalla Formula (104).

$$(104) \quad AD^2 = N - S$$

Il termine S è descritto dalla Formula (105)

$$(105) \quad S = \sum_{i=1}^N \left( \frac{(2i-1)}{N} * [\ln(F(Y_i)) + \ln(1 - F(Y_{N+1-i}))] \right)$$

Dove:

AD è il risultato del test di Anderson – Darling

N è il numero totale di dati forniti

S è una funzione dei dati forniti

$Y_i$  sono i dati forniti i-esimi, con i che va da 1 a N

$F(Y_i)$  è la risposta

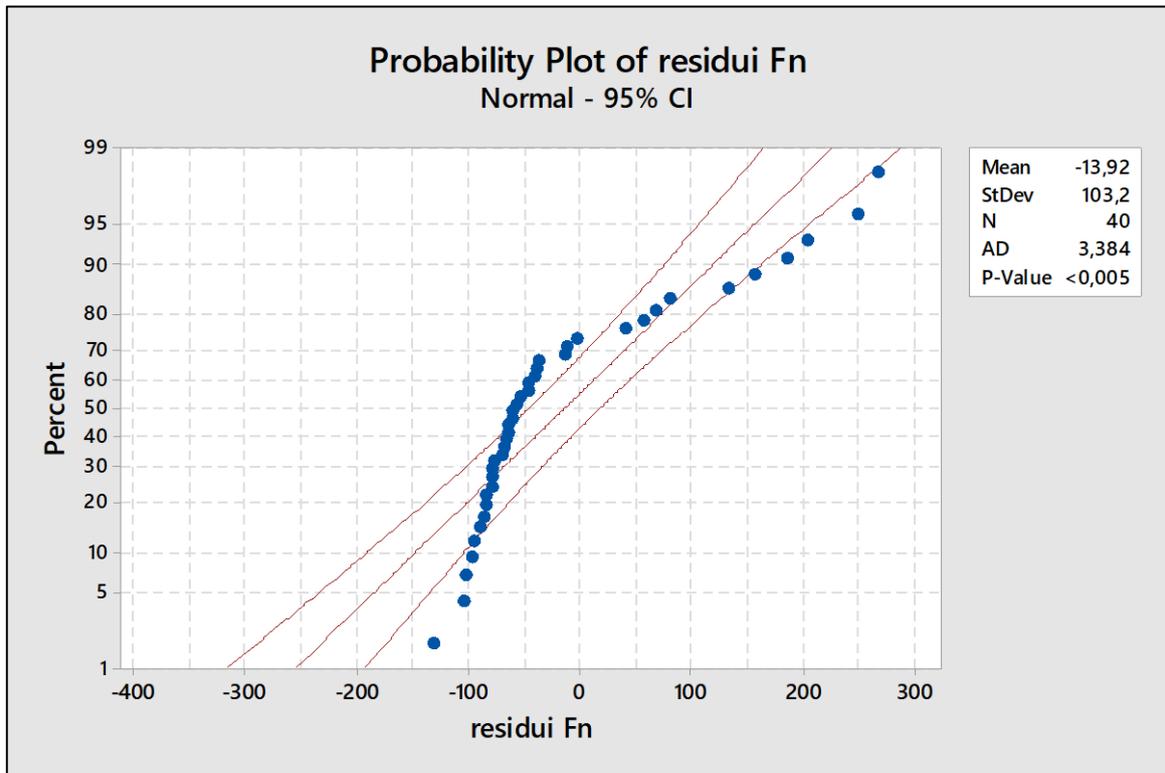
Dal punto di vista prettamente grafico, la distribuzione dei punti sulla linea centrale, all'interno dei limiti di confidenza dei percentili su tutto l'intervallo identifica dei residuali che seguono una distribuzione normale [38] [39] [40]. Se la distribuzione dei residuali segue una distribuzione normale, le assunzioni sull'importanza dei termini date dal modello da cui derivano i residuali sono affidabili. Se la distribuzione dei punti esce dai limiti di confidenza, la distribuzione non segue una Gaussiana e le assunzioni del modello che ha generato i residuali non sono affidabili [38] [39] [40].

- Il valore P che indica se l'ipotesi nulla  $H_0$  può essere accettata oppure deve essere scartata. Si basa sul test statistico di Anderson - Darling (AD) [39]. L'ipotesi nulla ( $H_0$ ) da validare definisce che la distribuzione dei residuali segue un andamento Gaussiano, con un livello di confidenza ( $\alpha$ ) solitamente pari al 5%. Il livello di confidenza definisce la possibilità di scartare l'ipotesi nulla quando in realtà i residuali seguono una distribuzione Gaussiana [39].  
Se il valore P è minore del livello di confidenza (posto a 0,05 nel caso di questo lavoro), allora l'ipotesi non può essere accettata e quindi i dati non hanno una distribuzione Gaussiana.  
Se il valore P è maggiore del valore dell'intervallo di confidenza (0,05 per questo lavoro) allora non ci sono le condizioni per rifiutare l'ipotesi, quindi la distribuzione dei residuali ha il 95% di probabilità di seguire una distribuzione gaussiana [39].

Per tutte le Marche, vengono studiate le distribuzioni dei residuali dei modelli UVAV e del modello di Response surface rispetto ai valori di Forza normale ottenuti sia nelle rispettive prove sia fornendo i dati di Forza Normale delle prove UVAV nel modello ottenuto per il Response surface e viceversa.

## Modelli Una Variabile Alla Volta

Un esempio dei grafici dei residui ottenuti per i modelli UVAV calcolati con un livello di confidenza pari al 5% è riportato di seguito (Figura 145).



(Fig. 145 Grafico dei residui dei modelli UVAV espressi rispetto alla Forza normale)

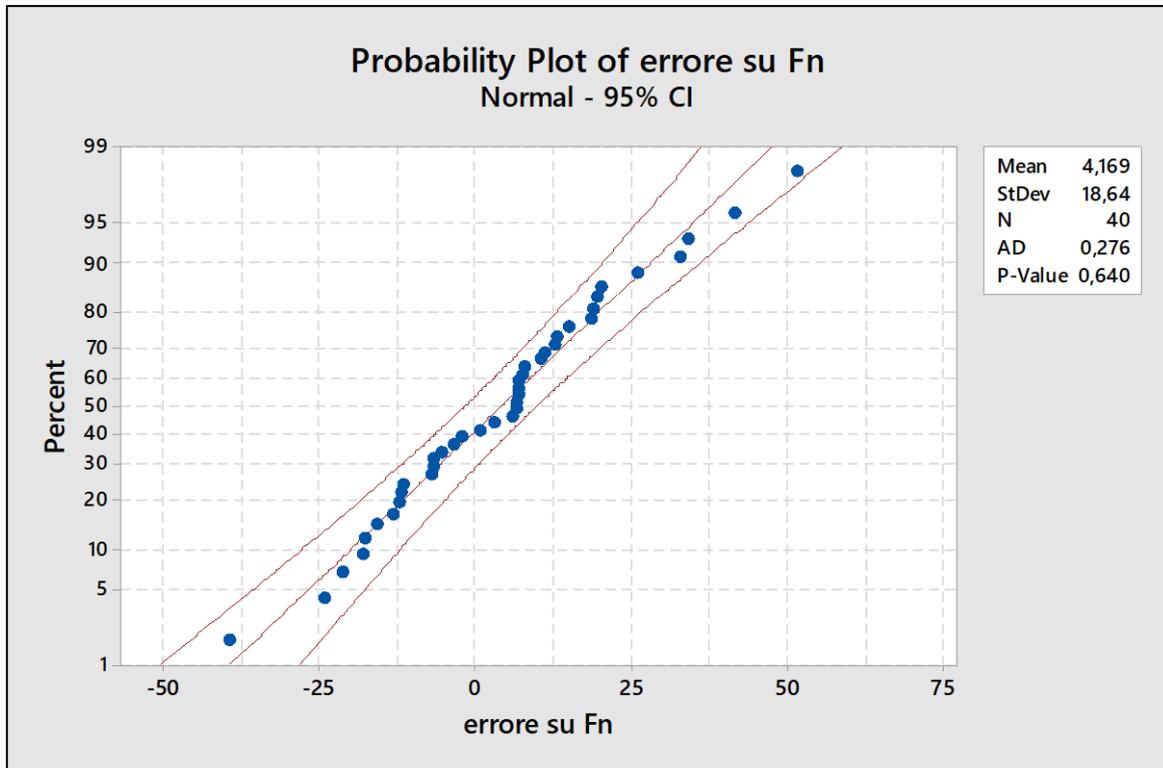
Il grafico mostra come per i modelli relativi alle prove Una Variabile Alla Volta (UVAV), l'andamento dei residui non segue mai una distribuzione Gaussiana in quanto i punti non si dispongono lungo la linea retta [39].

Inoltre, il valore P ottenuto tramite test di Anderson – Darling sui residui è inferiore al valore del livello di confidenza ( $\alpha$ ) adottato pari al 5% (0,05) quindi l'ipotesi che i dati seguono una distribuzione Gaussiana deve essere scartata [39].

I risultati mostrati nel grafico sono identici per tutti i residui calcolati, sia con i dati delle prove Una Variabile Alla Volta (UVAV), sia per i dati delle prove di Design of Experiments (DoE) per tutte le Marche testate.

## Modelli Design of Experiments

Un esempio dei grafici dei residuali ottenuti per i modelli di Response Surface riguardanti i residuali rispetto ai dati utilizzati per le prove di Design of Experiments, calcolato con un livello di confidenza ( $\alpha$ ) del 5% è riportato di seguito (Figura 146).



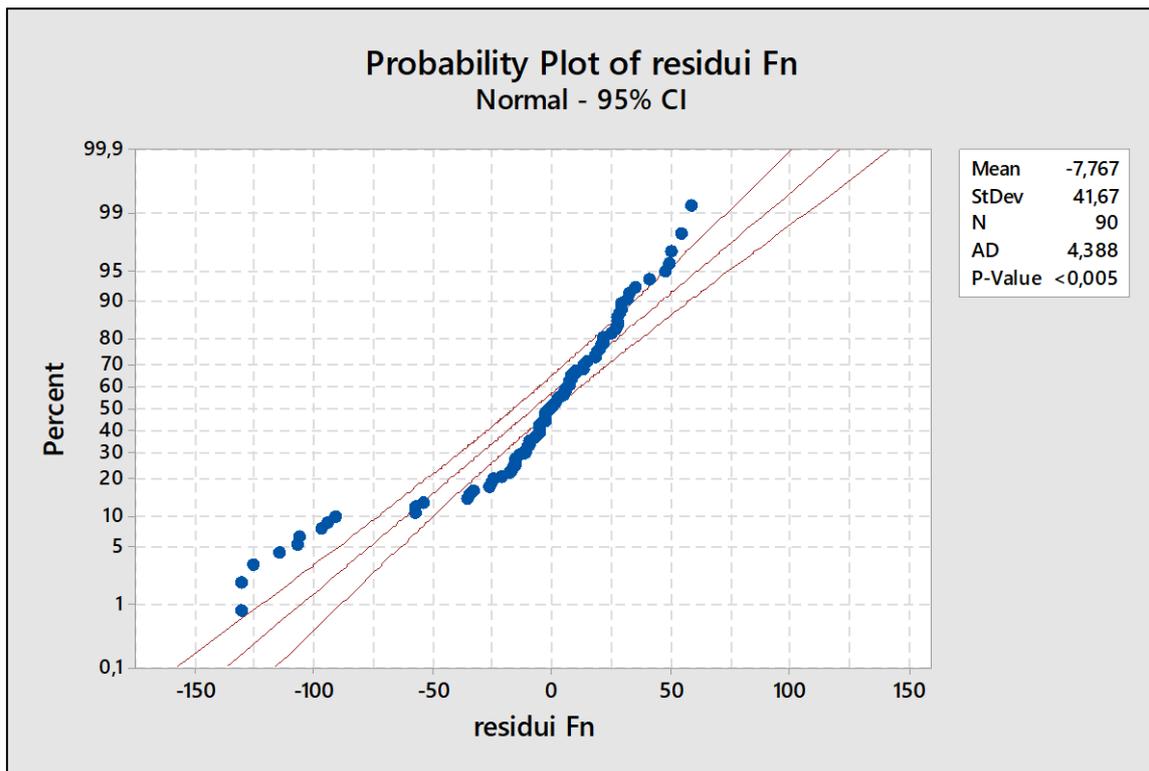
(Fig. 146 Grafico dei residuali dei modelli di Response Surface espressi rispetto alla Forza normale ottenuta nelle prove DoE)

Il grafico mostra come per i modelli relativi alle prove di Design of Experiments (DoE), l'andamento dei residuali segue una distribuzione Gaussiana in quanto i punti si dispongono lungo la linea retta all'interno dell'intervallo di confidenza [39].

Inoltre, il valore P ottenuto tramite test di Anderson – Darling sui residuali è maggiore al valore del livello di confidenza ( $\alpha$ ) adottato pari al 5% (0,05) quindi l'ipotesi che i dati seguono una distribuzione Gaussiana non può essere scartata [39].

I risultati mostrati nel grafico sono identici per tutti i residuali calcolati rispetto ai dati ottenuti nelle prove di Design of Experiments per tutte le Marche testate.

Un esempio dei grafici dei residuali ottenuti per i modelli di Response Surface riguardanti i residuali rispetto ai dati utilizzati per le prove Una Variabile Alla Volta (UVAV), calcolati con un livello di confidenza ( $\alpha$ ) del 5% è riportato di seguito (Figura 147).



(Fig. 147 Grafico dei residui dei modelli di Response Surface espressi rispetto alla Forza normale ottenuta nelle prove UVAV)

Il grafico mostra come per i modelli relativi alle prove Design of Experiments (DoE), l'andamento dei residui relativi ai valori di Forza normale ottenuti nelle prove Una Variabile Alla Volta non segue una distribuzione Gaussiana in quanto molti dei punti non si dispongono all'interno dell'intervallo di confidenza, in particolare nelle zone di estremo [39].

Inoltre, il valore P ottenuto tramite test di Anderson – Darling sui residui è inferiore al valore del livello di confidenza ( $\alpha$ ) adottato pari al 5% (0,05) quindi l'ipotesi che i dati seguono una distribuzione Gaussiana deve essere scartata [39].

I risultati mostrati nel grafico sono identici per tutti i residui calcolati con i dati delle prove Una Variabile Alla Volta (UVAV) per tutte le Marche testate.

L'andamento dei residui segue lo stesso andamento anche per le Pressioni normali, a causa della relazione che le lega alle Forze normali quindi l'analisi dei residui viene mostrata solo per le Forze normali.

## Conclusioni

Dall'analisi dei residui si nota come solo i residui delle prove di Design of Experiments, calcolati rispetto ai modelli di Response Surface rispetto ai dati raccolti nelle prove di Design of Experiments, presentino una distribuzione tale da rendere le assunzioni relative ai valori dei coefficienti dei modelli valide [39] [40].

## Sviluppo di un nuovo modello

L'importanza di alcuni dei termini quadratici nel modello DoE, in particolare il contributo quadratico relativo al logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed})$ ) e il comportamento dei residuali ottenuto nelle prove di Design of Experiments (DoE) rispetto ai dati ottenuti nelle stesse prove, vengono usati come presupposto per testare un nuovo modello riguardante le prove Una Variabile Alla Volta (UVAV) che tenga conto anche dei contributi quadratici e di correlazione tra le variabili indipendenti. Il contributo di Interazione si suppone non verrà considerato data la natura stessa delle prove Una Variabile Alla Volta, ma viene introdotta comunque per assicurarsi dell'effettiva assenza di queste correlazioni.

I modelli di regressione ottenuti dai dati delle prove Una Variabile Alla volta (UVAV) sono riportati di seguito per le singole marche.

### Marca 1

L'equazione di regressione del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) restituita del software Minitab 18 è descritta nella Figura 148.

#### Regression Equation

$$\ln(Fn) = C + \alpha \ln(\text{speed}) + \beta \ln(\text{feed}) + \gamma \ln(\text{DoC}) - \alpha\alpha \ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{speed}) \\ + \beta\beta \ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed}) - \gamma\gamma \ln(\text{DoC}) \cdot \ln(\text{DoC})$$

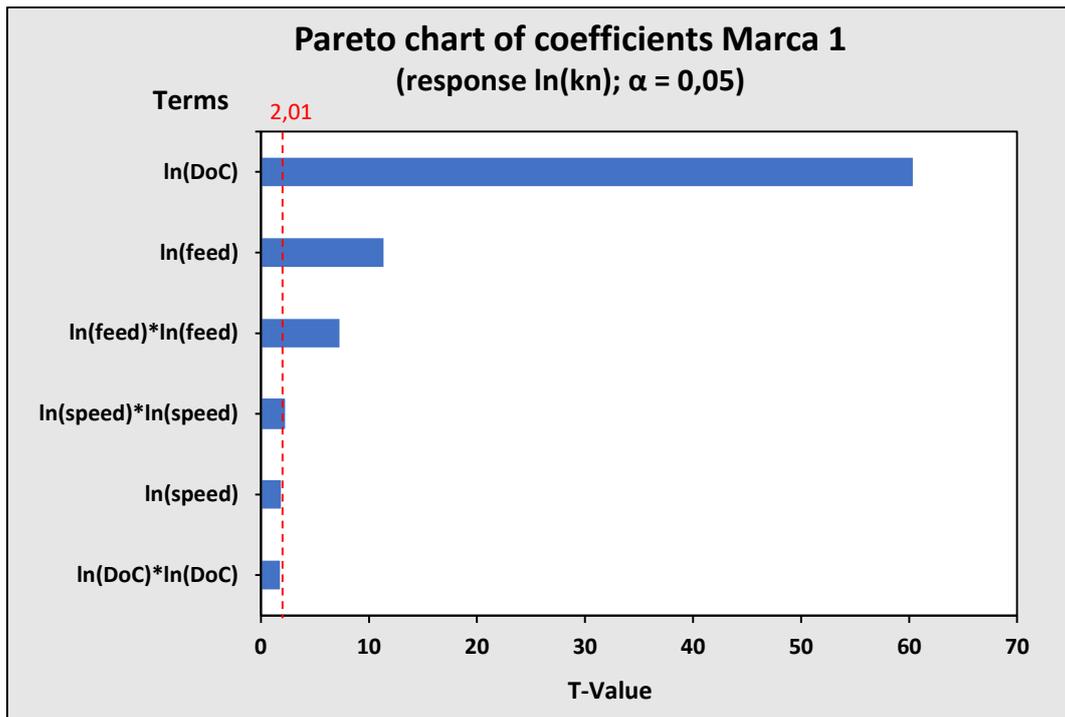
(Fig. 148 Modello di regressione per la Marca 1 riguardante i dati Una Variabile Alla Volta con termini quadratici)

Si nota come il coefficiente quadratico del logaritmo della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed}) \cdot \ln(\text{speed})$ ) indichi un andamento inversamente proporzionale della risposta rispetto a questo parametro, insieme al coefficiente quadratico del logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC}) \cdot \ln(\text{DoC})$ ).

Tutti gli altri coefficienti indicano un andamento direttamente proporzionale della risposta rispetto alle variabili.

Dall'analisi di varianza risulta un numero di gradi di libertà di errore pari a 47, quindi il valore limite per il valore T con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) è pari a 2,0117 approssimato a 2,01.

Il grafico di Pareto risultante è mostrato nel grafico sottostante (Figura 149).



(Fig. 149 grafico di Pareto per il modello relativo al logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) per la Marca 1)

Dal grafico si può notare come i parametri più impattanti sulla risposta siano il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ). Il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) ha un valore T inferiore al valore critico di 2,01 e quindi potrebbe essere trascurata.

Per i termini quadratici, l'unico parametro potenzialmente trascurabile riguarda il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC}) * \ln(\text{DoC})$ ). Il termine relativo alla componente quadratica del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) * \ln(\text{feed})$ ) è terzo in ordine di importanza, mentre il termine relativo alla componente quadratica della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed}) * \ln(\text{speed})$ ) è di poco sopra il valore critico di 2,01.

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice  $R^2$  e  $R^2$  aggiustato definita dalla Figura 150.

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,029342	99,21%	99,11%	98,72%

(Fig. 150 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) della Marca 1)

I valori dei parametri  $R^2$  e  $R^2$  (definito nella figura soprastante come  $R\text{-sq}(\text{adj})$ ) sono maggiori del valore soglia posto al 95% (contando un 5% di errore) e quindi il modello è affidabile [17].

L'errore medio (calcolato tramite media sui singoli errori nelle prove espressi in valore assoluto) vale 2,114%.

## Marca 2

L'equazione di regressione del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) restituita dal software Minitab 18 è descritta nella Figura 151.

**Regression Equation**

$$\ln(Fn) = C' + \alpha' \ln(\text{speed}) + \beta' \ln(\text{feed}) + \gamma' \ln(\text{DoC}) - \alpha\alpha' \ln(\text{speed}) * \ln(\text{speed}) + \beta\beta' \ln(\text{feed}) * \ln(\text{feed}) - \gamma\gamma' \ln(\text{DoC}) * \ln(\text{DoC})$$

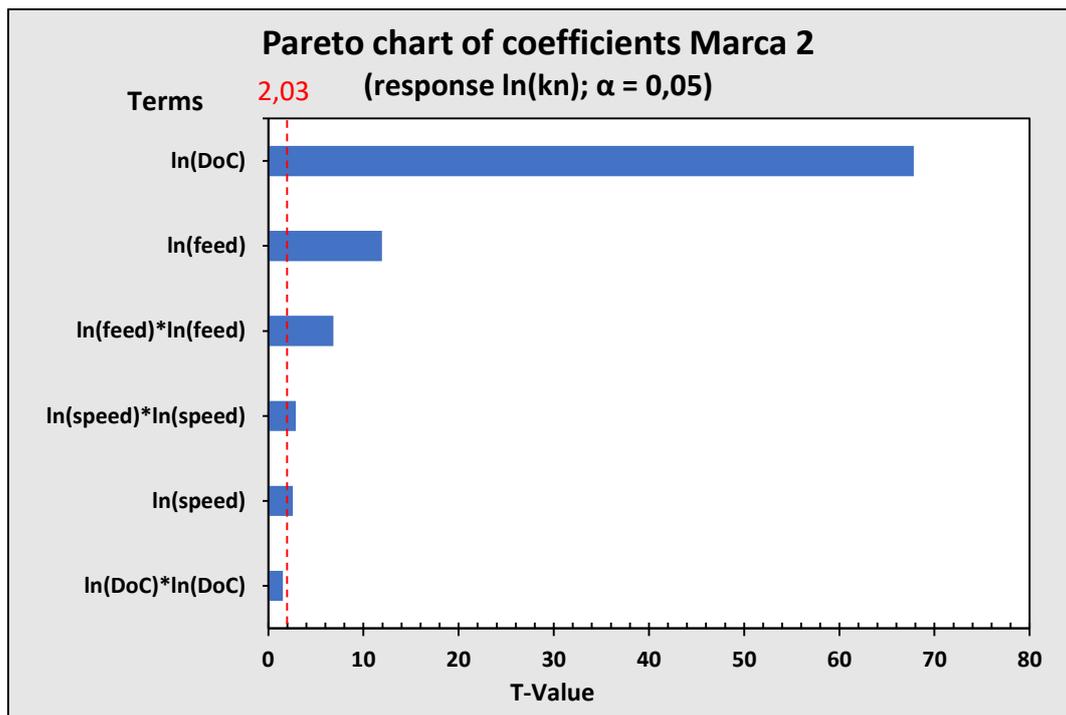
(Fig. 151 Modello di regressione per la Marca 2 riguardante i dati Una Variabile Alla Volta con termini quadratici)

Si nota come il coefficiente quadratico del logaritmo della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed}) * \ln(\text{speed})$ ) indichi un andamento inversamente proporzionale della risposta rispetto a questo parametro.

Tutti gli altri coefficienti indicano un andamento direttamente proporzionale della risposta rispetto alle variabili.

Dall'analisi di varianza risulta un numero di gradi di libertà di errore pari a 35, quindi il valore limite per il valore T con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) è pari a 2,0301 approssimato a 2,03.

Il grafico di Pareto risultante è mostrato nel grafico sottostante (Figura 152).



(Fig. 152 grafico di Pareto per il modello relativo al logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(kn)$ ) per la Marca 2)

Dal grafico si può notare come i parametri più impattanti sulla risposta siano il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ). Il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) ha un valore T superiore al valore critico di 2,03, anche se di poco. Per i termini quadratici, l'unico parametro potenzialmente trascurabile riguarda il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC}) * \ln(\text{DoC})$ ). Il termine relativo alla componente quadratica del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) * \ln(\text{feed})$ ) è terzo in ordine di importanza, mentre il termine relativo alla componente quadratica della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed}) * \ln(\text{speed})$ ) è di poco sopra il valore critico di 2,03.

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice  $R^2$  e  $R^2$  aggiustato definita dalla Figura 153.

<b>Model Summary</b>			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,025959	99,56%	99,48%	99,41%

(Fig. 153 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(F_n)$ ) della Marca 2)

I valori dei parametri  $R^2$  e  $R^2$  (definito nella figura soprastante come R-sq(adj)) sono maggiori del valore soglia posto al 95% (contando un 5% di errore) e quindi il modello è affidabile [17].

L'errore medio (calcolato tramite media sui singoli errori nelle prove espressi in valore assoluto) vale 1,975%.

### Marca 3

L'equazione di regressione del modello per il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) restituita del software Minitab 18 è descritta nella Figura 154.

**Regression Equation**

$$\ln(Fn) = C'' + \alpha'' \ln(\text{speed}) + \beta'' \ln(\text{feed}) + \gamma'' \ln(\text{DoC}) - \alpha\alpha'' \ln(\text{speed}) * \ln(\text{speed}) + \beta\beta'' \ln(\text{feed}) * \ln(\text{feed}) - \gamma\gamma'' \ln(\text{DoC}) * \ln(\text{DoC})$$

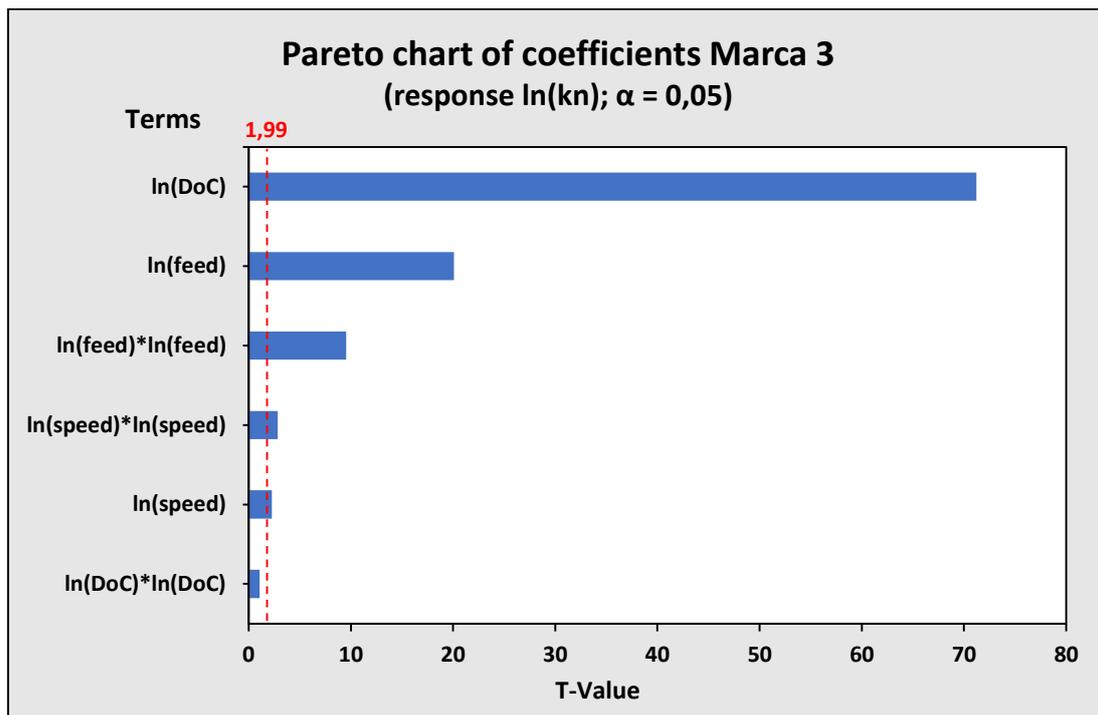
(Fig. 154 Modello di regressione per la Marca 3 riguardante i dati Una Variabile Alla Volta con termini quadratici)

Si nota come il coefficiente quadratico del logaritmo della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed}) * \ln(\text{speed})$ ) indichi un andamento inversamente proporzionale della risposta rispetto a questo parametro.

Tutti gli altri coefficienti indicano un andamento direttamente proporzionale della risposta rispetto alle variabili.

Dall'analisi di varianza risulta un numero di gradi di libertà di errore pari a 83, quindi il valore limite per il valore T con livello di probabilità  $\alpha$  pari a 0,05 (livello di confidenza del 95%) è pari a 1,989 approssimato a 1,99.

Il grafico di Pareto risultante è mostrato nel grafico sottostante (Figura 155).



(Fig. 155 grafico di Pareto per il modello relativo al logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(kn)$ ) per la Marca 3)

Dal grafico si può notare come i parametri più impattanti sulla risposta siano il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ) e il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ). Il logaritmo naturale della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed})$ ) ha un valore T superiore al valore critico di 1,99, anche se di poco. Per i termini quadratici, l'unico parametro potenzialmente trascurabile riguarda il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC}) * \ln(\text{DoC})$ ). Il termine relativo alla componente quadratica del logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) * \ln(\text{feed})$ ) è terzo in ordine di importanza, mentre il termine relativo alla componente quadratica della velocità di taglio ( $\ln(\text{speed}) * \ln(\text{speed})$ ) è di poco sopra il valore critico di 1,99.

Il modello ottenuto ha una affidabilità data dai valori percentuali dell'indice  $R^2$  e  $R^2$  aggiustato definita dalla Figura 156.

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,025009	99,42%	99,38%	99,28%

(Fig. 156 sommario per affidabilità del modello per il logaritmo naturale della Forza normale ( $\ln(Fn)$ ) della Marca 3)

I valori dei parametri  $R^2$  e  $R^2$  (definito nella figura soprastante come  $R\text{-sq}(\text{adj})$ ) sono maggiori del valore soglia posto al 95% (contando un 5% di errore) e quindi il modello è affidabile [17].

L'errore medio (calcolato tramite media sui singoli errori nelle prove espressi in valore assoluto) vale 1,916%.

In conclusione, i nuovi modelli riguardanti le prove UVAV assumono la forma di modelli di secondo ordine analoghi ai modelli di regressione ottenuti dalle prove di Design of Experiments ad eccezione delle interazioni che non possono essere calcolate a causa del tipo di prove da cui vengono estratti i modelli.

Tutti i modelli presentano dei valori di  $R^2_{\text{adj}}$  superiori a 95%, percentuale di affidabilità posta come limite e sono quindi modelli affidabili.

I nuovi modelli ottenuti per le prove Una Variabile Alla Volta vanno ad impattare anche i modelli riguardanti il logaritmo naturale della Pressione normale ( $\ln(kn)$ ) seguendo l'interazione che lega questa variabile con il logaritmo naturale delle Forza normale ( $\ln(Fn)$ ), per cui l'unica differenza nella formulazione dei due modelli sarà legata alla differenza di una unità nei coefficienti che legano il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed})$ ) e il logaritmo naturale della profondità di passata ( $\ln(\text{DoC})$ ).

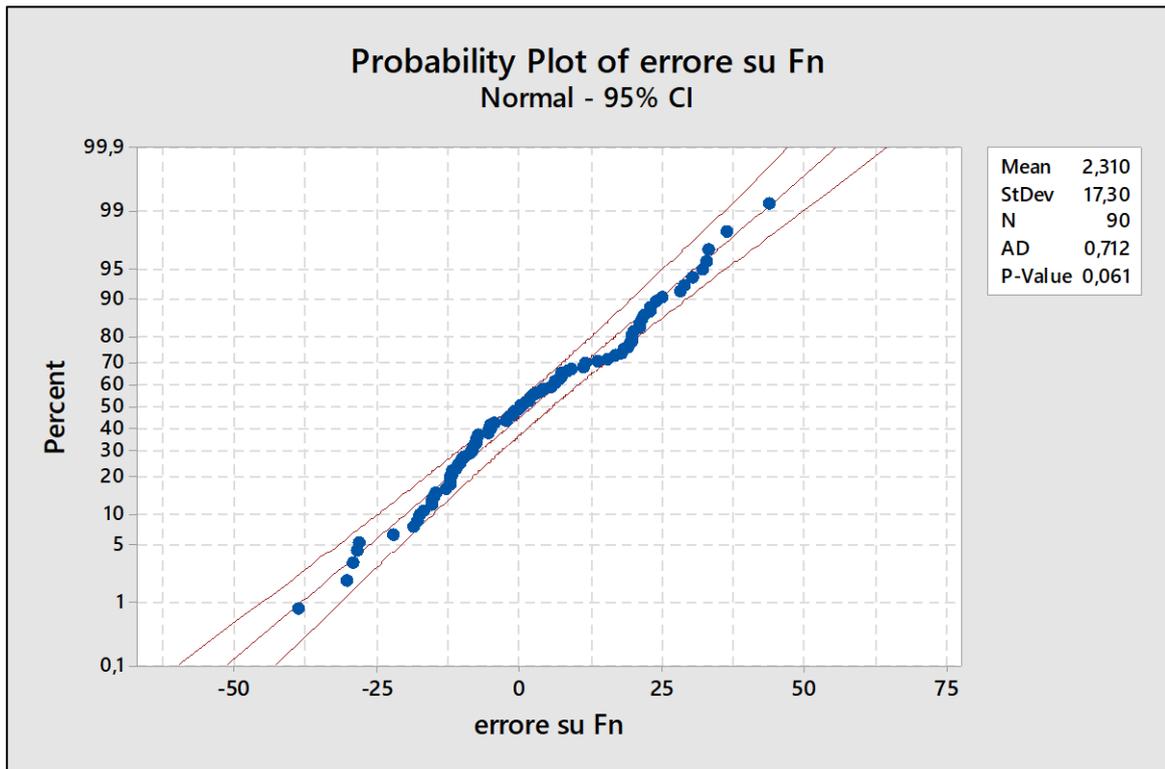
Inoltre, grazie alle prove precedenti, è possibile anticipare la variazione di importanza tra il logaritmo naturale dell'avanzamento per giro che diventerà il termine più influente sulla risposta seguito dal logaritmo naturale della profondità di passata che diventerà secondo in ordine di importanza.

## Analisi dei Residuali

Le distribuzioni dei residui per i nuovi modelli riguardanti sia i dati raccolti nelle prove Una Variabile Alla Volta (UVAV) sia i dati raccolti nelle prove di Design of Experiments (DoE) sono riassunti nei grafici sottostanti

### Dati Una Variabile Alla Volta

La distribuzione dei residui ottenuta utilizzando i dati delle prove Una Variabile Alla Volta nei nuovi modelli è riportata nella Figura 157.



(Fig. 157 Grafico dei residui dei nuovi modelli UVAV espressi rispetto alla Forza normale per i dati delle prove Una Variabile Alla Volta)

Il grafico soprastante riguarda in particolare l'analisi dei residui della Marca 3 ma viene utilizzato come esempio generale per tutte le analisi dei residui delle varie marche riguardanti i dati delle prove Una Variabile Alla Volta (UVAV).

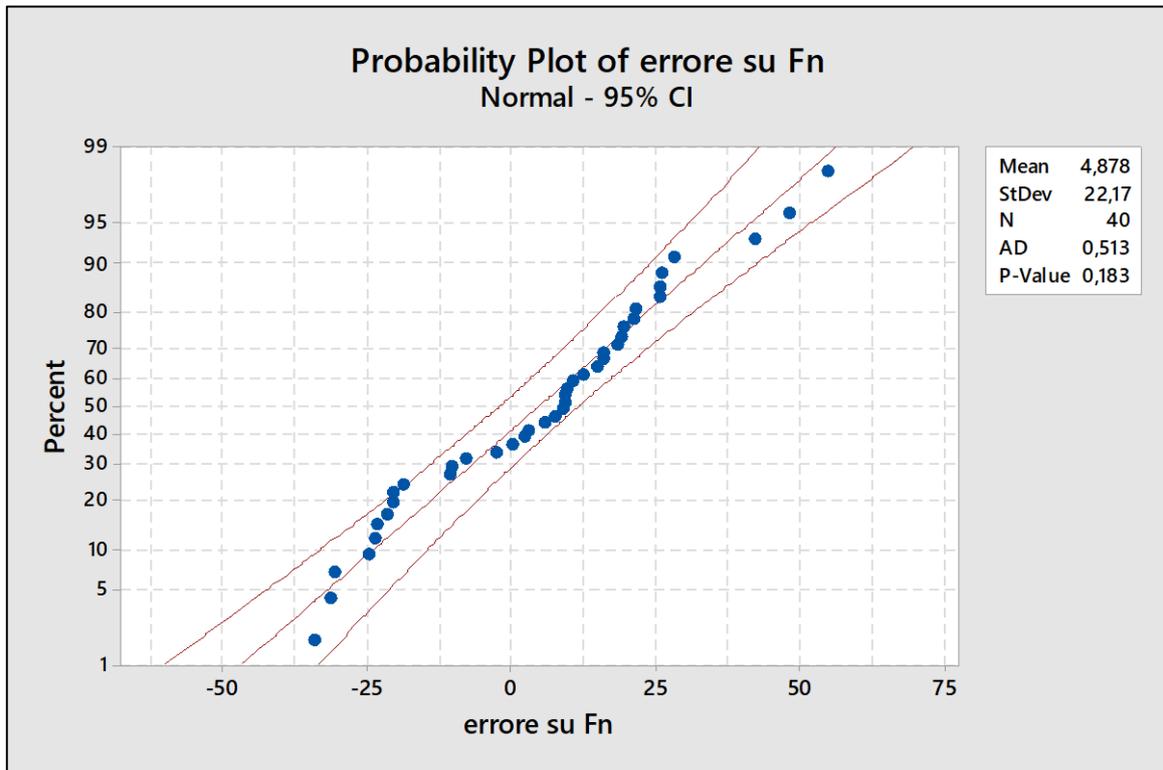
Dal grafico si vede come l'andamento dei residui segue una distribuzione Gaussiana in quanto i punti si dispongono lungo la linea retta all'interno dell'intervallo di confidenza [39].

Inoltre, il valore P ottenuto tramite test di Anderson – Darling sui residui è maggiore al valore del livello di confidenza ( $\alpha$ ) adottato pari al 5% (0,05) quindi l'ipotesi che i dati seguono una distribuzione Gaussiana non può essere scartata [39].

I risultati mostrati nel grafico sono identici per tutti i residui calcolati rispetto ai dati ottenuti nelle prove Una Variabile Alla Volta per tutte le Marche testate.

## Dati Design of Experiments

La distribuzione dei residui ottenuta utilizzando i dati delle prove di Design of Experiments nei nuovi modelli è riportata nella Figura 158.



(Fig. 158 Grafico dei residui dei nuovi modelli UVAV espressi rispetto alla Forza normale per i dati delle prove di Design of Experiment)

Il grafico soprastante riguarda in particolare l'analisi dei residui della Marca 3 ma viene utilizzato come esempio generale per tutte le analisi dei residui delle varie marche riguardanti i dati delle prove Una Variabile Alla Volta (UVAV).

Dal grafico si vede come l'andamento dei residui segue una distribuzione Gaussiana in quanto i punti si dispongono lungo la linea retta all'interno dell'intervallo di confidenza [39].

Inoltre, il valore P ottenuto tramite test di Anderson – Darling sui residui è maggiore al valore del livello di confidenza ( $\alpha$ ) adottato pari al 5% (0,05) quindi l'ipotesi che i dati seguono una distribuzione Gaussiana non può essere scartata [39].

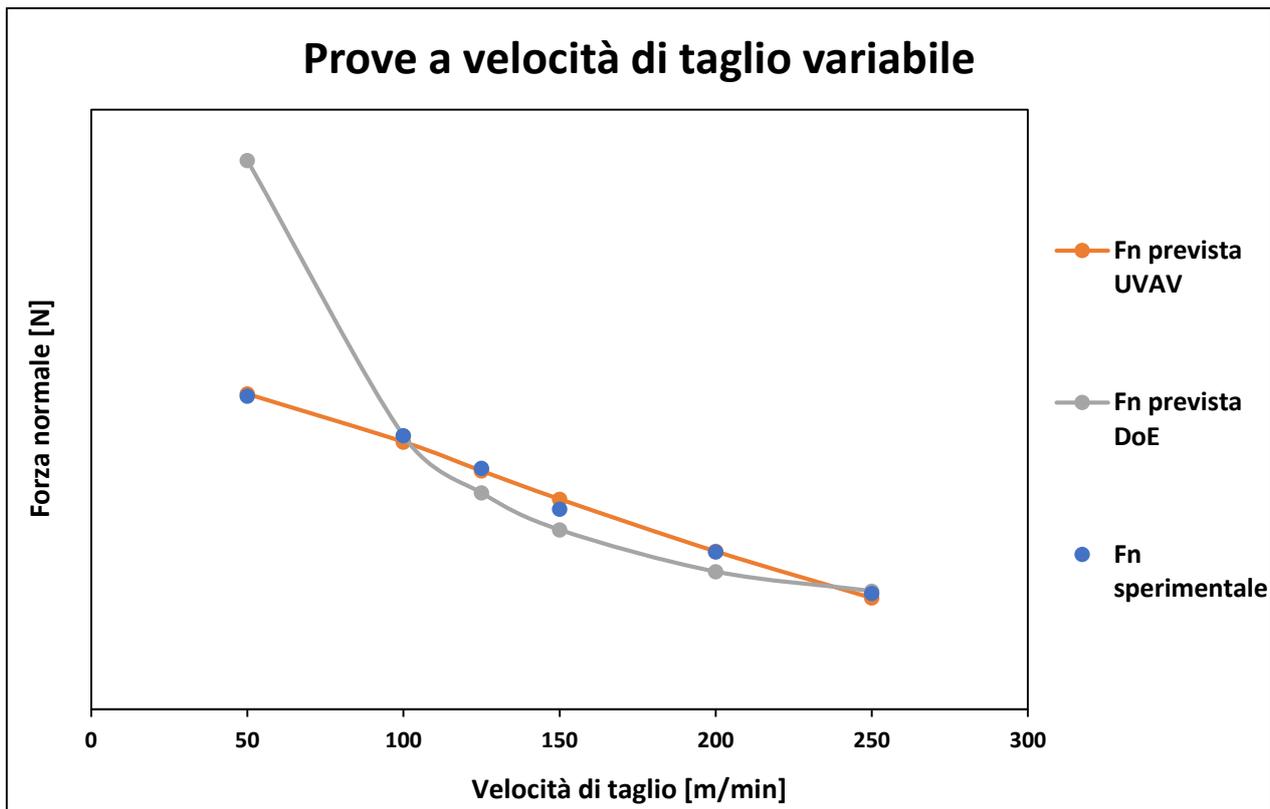
I risultati mostrati nel grafico sono identici per tutti i residui calcolati rispetto ai dati ottenuti nelle prove di Design of Experiments per tutte le Marche testate.

## Confronto tra modelli

Confrontando graficamente i valori sperimentali di Forza normale con i valori previsti dai modelli DoE e dai nuovi modelli UVAV si ottengono i seguenti grafici.

### Prove a velocità di taglio variabile

Il grafico ottenuto mettendo a confronto i dati sperimentali ottenuti nelle prove Una Variabile Alla Volta con modelli di regressione ottenuti dai dati Una variabile Alla Volta (UVAV) aggiunti dei contributi di secondo ordine e dai dati di Design of Experiments (DoE) nelle prove a velocità di taglio (Speed) variabile è riportato di seguito (Figura 159).



(Fig. 159 Confronto tra i valori sperimentali e i valori previsti dai modelli di UVAV e DoE per le prove a velocità di taglio variabile)

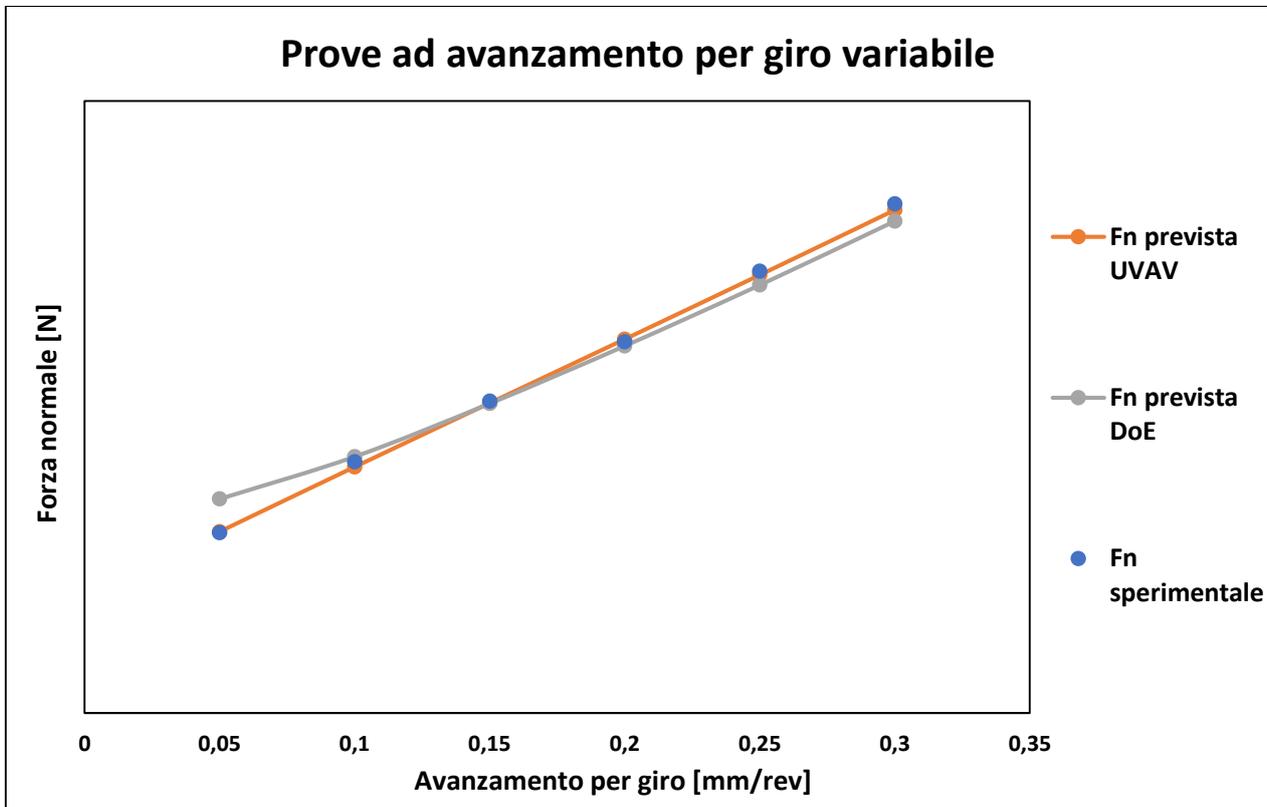
Tutte le marche presentano un andamento simile, in particolare questo grafico è preso dalla Marca 3 ma le osservazioni che verranno fatte su questo grafico possono essere estese a tutte le altre Marche.

Dal grafico si può notare come il modello UVAV rispecchia l'andamento dei dati, mentre il modello DoE presenta delle problematiche nella parte iniziale, tra 50 e 100 [m/min] a causa del fatto che l'intervallo impostato per le prove di Design of Experiments (DoE) aveva come punto più basso di velocità di taglio (speed) 92 [m/min], quindi si può supporre che il modello DoE non sia in grado di prevedere con elevata certezza valori di Forza normale (Fn) al di fuori del proprio intervallo.

Si vede come all'interno dei dati testati dal modello DoE, l'andamento della curva sia coerente con l'andamento dei dati anche se il modello UVAV con contributi di secondo ordine ha un'aderenza maggiore ai dati sperimentali.

## Prove ad avanzamento per giro variabile

Il grafico ottenuto mettendo a confronto i dati sperimentali ottenuti nelle prove Una Variabile Alla Volta con modelli di regressione ottenuti dai dati Una variabile Alla Volta (UVAV) aggiunti dei contributi di secondo ordine e dai dati di Design of Experiments (DoE) nelle prove ad avanzamento per giro (feed) variabile è riportato di seguito (Figura 160).



(Fig. 160 Confronto tra i valori sperimentali e i valori previsti dai modelli di UVAV e DoE per le prove ad avanzamento per giro variabile)

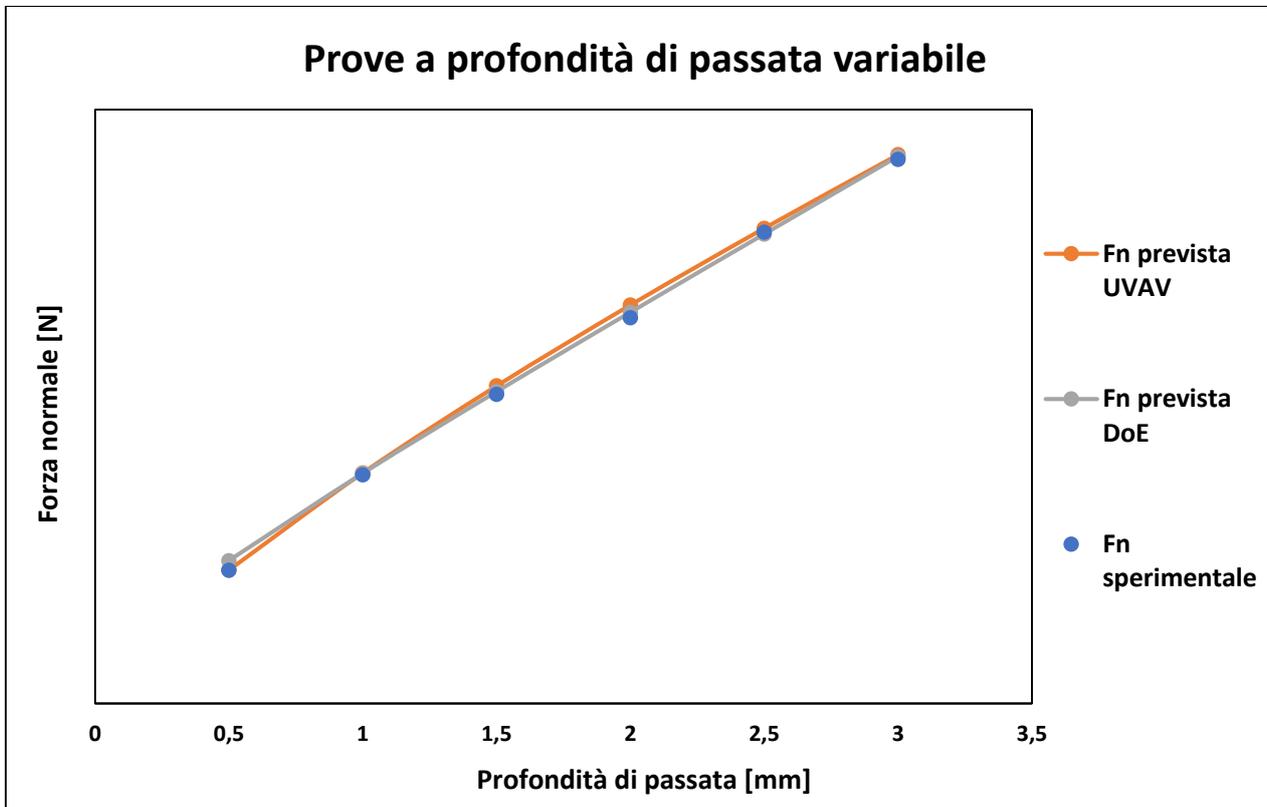
Tutte le marche presentano un andamento simile, in particolare questo grafico è preso dalla Marca 3 ma le osservazioni che verranno fatte su questo grafico possono essere estese a tutte le altre Marche.

Dal grafico si può notare come il modello UVAV rispecchia in generale l'andamento dei dati, mentre il modello DoE presenta delle problematiche nella parte iniziale, tra 0,05 e 0,1 [mm/rev] a causa del fatto che l'intervallo impostato per le prove di Design of Experiments (DoE) aveva come punto più basso di avanzamento per giro (feed) 0,1 [mm/rev], quindi si può supporre che il modello DoE non sia in grado di prevedere con elevata certezza valori di Forza normale (Fn) al di fuori del proprio intervallo.

Si vede come all'interno dei dati testati dal modello DoE, l'andamento della curva sia coerente con l'andamento dei dati anche se il modello UVAV con contributi di secondo ordine ha un'aderenza maggiore ai dati sperimentali.

## Prove a profondità di passata variabile

Il grafico ottenuto mettendo a confronto i dati sperimentali ottenuti nelle prove Una Variabile Alla Volta con modelli di regressione ottenuti dai dati Una variabile Alla Volta (UVAV) aggiunti dei contributi di secondo ordine e dai dati di Design of Experiments (DoE) nelle prove a profondità di passata (DoC) variabile è riportato di seguito (Figura 161).



(Fig. 161 Confronto tra i valori sperimentali e i valori previsti dai modelli di UVAV e DoE per le prove ad avanzamento per giro variabile)

Tutte le marche presentano un andamento simile, in particolare questo grafico è preso dalla Marca 3 ma le osservazioni che verranno fatte su questo grafico possono essere estese a tutte le altre Marche.

Dal grafico si può notare come il modello UVAV rispecchia in generale l'andamento dei dati, mentre il modello DoE presenta delle problematiche nella parte iniziale, tra 0,5 e 1 [mm] a causa del fatto che l'intervallo impostato per le prove di Design of Experiments (DoE) aveva come punto più basso di profondità di passata 0,96 [mm], quindi si può supporre che il modello DoE non sia in grado di prevedere con elevata certezza valori di Forza normale (Fn) al di fuori del proprio intervallo.

Entrambi i modelli presentano una aderenza elevata ai dati sperimentali.

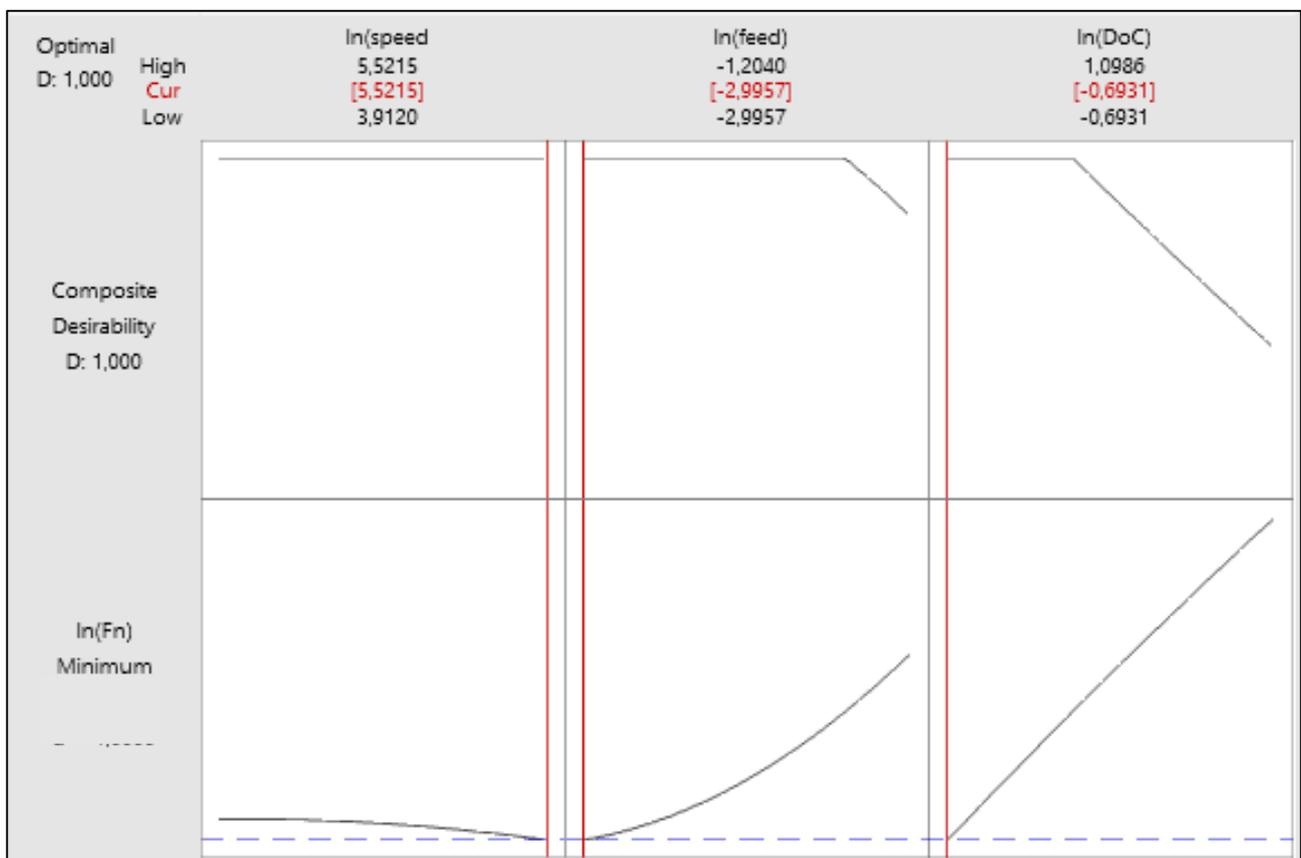
## Valori critici per minimizzare la risposta

Utilizzando lo studio delle derivate prime per le varie marche si ottengono valori non compatibili con i parametri di tornitura, con valori che tendono a zero o all'infinito come nel caso dello studio dei parametri che minimizzano la risposta per i modelli ottenuti con i dati delle prove di Design of Experiments.

Si utilizza l'analisi della desiderabilità effettuata sul software Minitab per ottenere i valori che minimizzano le forze e le pressioni normali.

## Forza Normale

Il grafico restituito dal software Minitab a seguito di analisi della desiderabilità composta è riportato di seguito (Figura 162).



(Fig. 162 Rappresentazione grafica dei punti che minimizzano la risposta logaritmo naturale delle Forza normale  $\ln(Fn)$ , massimizzando la desiderabilità composta [30] [31])

Tutti i grafici ottenuti per le varie marche sono uguali quindi si usa un grafico solo come esempio dell'andamento per tutte le marche

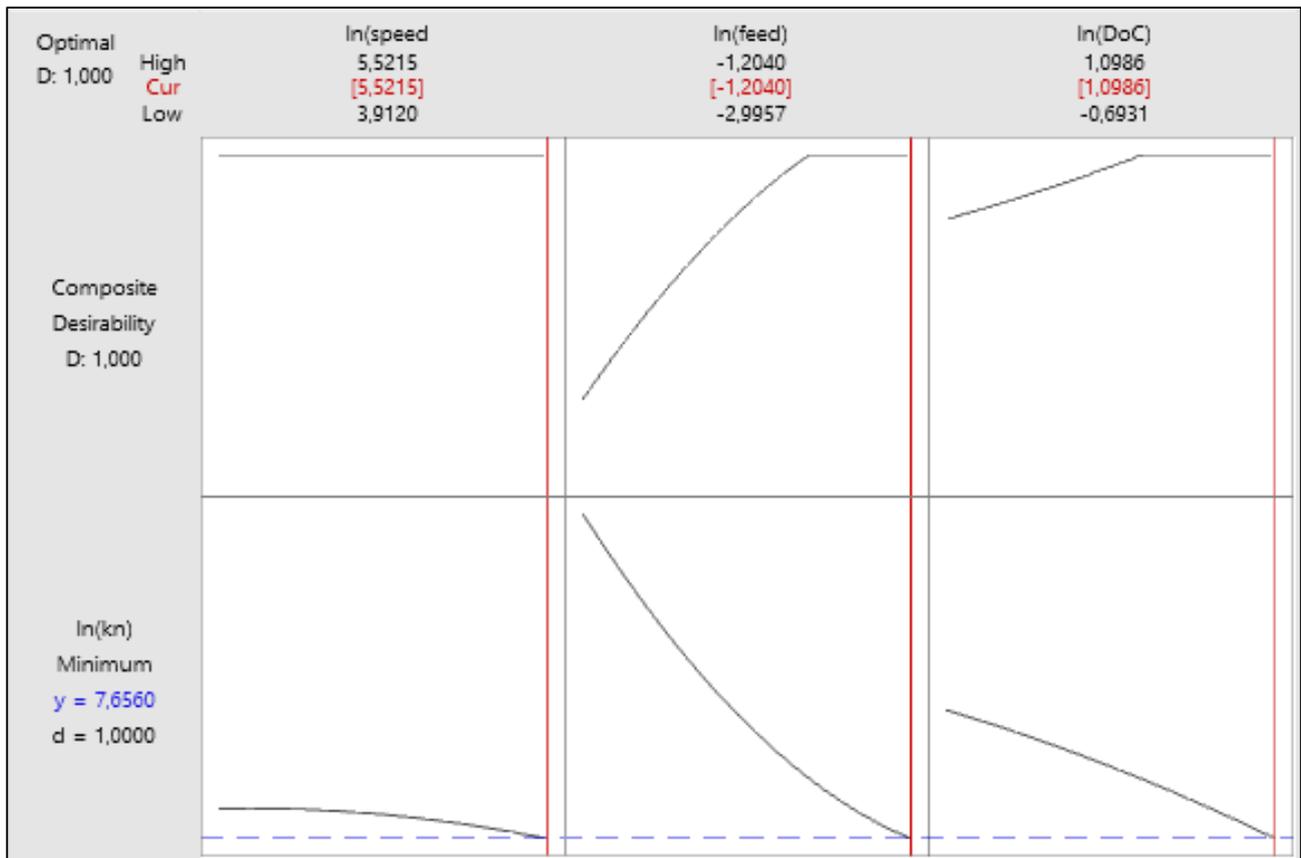
I valori che minimizzano le Forze normali sono:

- Per la velocità di taglio (speed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale 5,5215 che corrisponde ad un valore di velocità di taglio pari a 250 [m/min], valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati.
- Per l'avanzamento per giro (feed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale -2,9957 che corrisponde ad un valore di avanzamento per giro pari a 0,05 [mm/rev], valore che corrisponde al minimo dell'intervallo di dati testati.

- Per la profondità di passata (DoC), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale -0,6931 che corrisponde ad un valore di profondità di passata pari a 0,5 [mm], valore che corrisponde al minimo dell'intervallo di dati testati.

## Pressione normale

Il grafico restituito dal software Minitab a seguito di analisi della desiderabilità composta è riportato di seguito (Figura 163).



(Fig. 163 Rappresentazione grafica dei punti che minimizzano la risposta logaritmo naturale delle Forza normale  $\ln(F_n)$ , massimizzando la desiderabilità composta [30] [31])

Tutti i grafici ottenuti per le varie marche sono uguali quindi si usa un grafico solo come esempio dell'andamento per tutte le marche.

I valori che minimizzano le Pressioni normali sono:

- Per la velocità di taglio (speed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale 5,5215 che corrisponde ad un valore di velocità di taglio pari a 250 [m/min], valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati.
- Per l'avanzamento per giro (feed), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale -1,2040 che corrisponde ad un valore di avanzamento per giro pari a 0,3 [mm/rev], valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati.
- Per la profondità di passata (DoC), il valore del logaritmo naturale che minimizza la risposta vale 1,0936 che corrisponde ad un valore di profondità di passata pari a 3 [mm], valore che corrisponde al massimo dell'intervallo di dati testati.

Per concludere, il nuovo modello ottenuto dalle prove Una Variabile Alla Volta presenta valori critici, ottenuti tramite studio della desiderabilità, che corrispondono ai limiti dell'intervallo di dati testato, lo stesso andamento che seguivano gli altri modelli.

Come per i modelli ottenuti dalle prove di Design of Experiments, anche in questo caso una analisi dei dati tramite studio delle derivate non restituisce dei valori accettabili, in quanto escono dal limite dei valori testati e non sono fisicamente applicabili ad operazioni di lavorazione meccanica.

## Conclusioni sullo sviluppo di modelli per lo studio di Forze e Pressioni normali

Dai confronti grafici eseguiti tra i due modelli, si può assumere come in generale i modelli di regressione ricavati dai dati Una Variabile Alla Volta (UVAV) rispecchiano l'andamento assoluto dei dati sperimentali mentre i modelli di regressione ricavati dalle prove di Design of Experiments (DoE) sono più affidabili dal punto di vista della vicinanza ai dati sperimentali.

Il problema principale è legato al fatto che i modelli di regressione DoE non sono in grado di rispecchiare i dati sperimentali al di fuori del range di valori testati nelle prove di Design of Experiments, in quanto il tipo di design scelto (Central Composite design Circumscribed) serve per trovare l'ottimale all'interno di una zona di dati e non per studiare l'intero spazio dei dati [19] [32] [33] [34].

In conclusione, in assenza di dipendenza dalla correlazione tra le variabili indipendenti testate (velocità di taglio, avanzamento per giro e profondità di passata), si può affermare che per effettuare estrapolazioni del comportamento del materiale all'esterno dei dati testati, un modello di regressione ricavato da prove Una Variabile Alla Volta è più affidabile di un modello di regressione ricavato da prove di Design of Experiments, mentre se l'obiettivo è ottenere un modello più fedele ai dati testati, il modello di regressione ottenuto da prove di Design of Experiments è più affidabile.

Sulla base delle analisi dei residuali, si nota come i residuali dei modelli UVAV, ottenuti dai dati delle prove Una Variabile Alla Volta con regressione lineare multipla in cui si tiene conto solo dei termini di primo ordine, non presentano una distribuzione gaussiana dei residuali quindi le informazioni riguardanti i coefficienti ottenuti dalla regressione non possono essere accettati. Questo ha richiesto la riscrittura dei modelli UVAV con l'inserimento dei termini di secondo ordine, in quanto si è visto dallo studio dei modelli DoE, ottenuti dai dati delle prove di Design of Experiments, come il termine di secondo ordine legato al logaritmo naturale dell'avanzamento per giro ( $\ln(\text{feed}) \cdot \ln(\text{feed})$ ) è un termine influente sulla risposta di tutte le Marche.

I nuovi modelli di regressione UVAV presentano un errore medio espresso dalla media degli errori sui singoli dati in valore assoluto inferiore rispetto ai vecchi modelli UVAV, in quanto per la Marca 1 l'errore medio passa da 3,25% a 2,114%, per la Marca 2 l'errore passa da 2,90% a 1,975% e infine la Marca 3 ha un errore che passa da 2,03% a 1,916%.

Inoltre, si vede come i nuovi modelli di regressione sviluppati basandosi sui dati ottenuti nelle prove Una Variabile Alla Volta (UVAV) abbiano una distribuzione dei residuali Gaussiana sia sui dati relativi alle prove Una Variabile Alla Volta sia sui dati relativi alle prove di Design of Experiment. Questo rende i nuovi modelli UVAV più affidabili rispetto ai vecchi modelli ottenuti dai dati Una Variabile Alla Volta.

La normalità dei residuali su tutti i dati di tutte le prove testate segna anche un miglioramento rispetto ai modelli di regressione ottenuti dai dati di Design of Experiments.

Dal confronto grafico tra i modelli utilizzati e i dati sperimentali, risulta come i nuovi modelli di regressione UVAV abbiano una maggiore aderenza con i dati sperimentali rispetto ai modelli ricavati dai dati di Design of Experiments. Questo può essere attribuito all'aggiunta del contributo quadratico delle variabili indipendenti e al fatto che le interazioni tra le variabili sono sempre trascurabili per i materiali testati.

Dal punto di vista dei punti critici di velocità di taglio, avanzamento per giro e profondità di passata tali da minimizzare la forza normale o la pressione normale applicata sull'utensile, i valori ottenuti per tutti i modelli sia derivati dalle prove Una Variabile Alla volta, sia derivati dalle prove di Design of Experiments, presentano tutti la problematica di essere valori posti al limite degli intervalli testati, in condizioni per cui le operazioni di tornitura in sgrossatura non sarebbero efficaci in quanto andrebbero a causare una usura utensile molto elevata. Per questo è necessario ampliare lo studio anche alle condizioni di usura utensile, in modo da trovare parametri che permettano uno sviluppo di forze o pressioni normali basse sull'utensile, ma che contemporaneamente permettano una lavorazione che non sia troppo dispendiosa in termini di usura utensile.

I nuovi modelli ottenuti dei dati delle prove Una Variabile Alla Volta seguono quella che può essere definita come una formula di Taylor espansa, in quanto deve tenere conto anche di un ulteriore termine fornito dai termini quadratici adesso considerati.

In particolare, si può dire che il nuovo modello assume in generale la forma mostrata dalla Formula (106).

$$(106) \quad \ln(R) = K + b_1 \ln(s) + b_2 \ln(f) + b_3 \ln(DoC) + b_{11}(\ln(s))^2 + b_{22}(\ln(f))^2 + b_{33}(\ln(DoC))^2$$

Dove:

R è la risposta del materiale, in questo caso la Forza normale (Fn) in [N] o la Pressione normale (kn) in [N/mm<sup>2</sup>]

K è una costante che dipende dal materiale dell'utensile, dal materiale tornito e dai parametri di processo

s è la velocità di taglio espressa in [m/min]

f è l'avanzamento per giro espresso in [mm/rev]

DoC è la profondità di passata espressa in [mm]

b<sub>i</sub> sono i coefficienti di regressione

Da questa formula si possono esplicitare i termini relativi alle variabili indipendenti di processo secondo i passaggi matematici mostrati nelle Formule (107) – (108).

$$(107) \quad R = \exp[K + b_1 \ln(s) + b_2 \ln(f) + b_3 \ln(DoC) + b_{11}(\ln(s))^2 + b_{22}(\ln(f))^2 + b_{33}(\ln(DoC))^2]$$

$$(108) \quad R = \exp[K + b_1 \ln(s) + b_2 \ln(f) + b_3 \ln(DoC)] * \exp[b_{11}(\ln(s))^2 + b_{22}(\ln(f))^2 + b_{33}(\ln(DoC))^2]$$

Si può dire che il primo esponenziale nella Formula (108) corrisponde all'equazione basata sulla relazione di Taylor espansa utilizzata come base per lo sviluppo dei modelli, per cui si può riscrivere la Formula (108) nella Formula (109).

$$(109) \quad R = Taylor * \exp[b_{11}(\ln(s))^2 + b_{22}(\ln(f))^2 + b_{33}(\ln(DoC))^2]$$

Dove l'equazione basata sull'equazione di Taylor in forma espansa è descritta dalla Formula (110).

$$(110) \quad Taylor = Cost * s^{b_1} * f^{b_2} * DoC^{b_3}$$

Dove:

Cost è una costante che dipende dal materiale dell'utensile, dal materiale tornito e dai parametri di processo.

Gli esponenziali dei termini quadratici nella Formula (109) possono essere riscritti come mostrato nelle Formule (111) – (113).

$$(111) \quad \exp[b_{11}(\ln(s))^2] = \exp[b_{11} * \ln(s) * \ln(s)] = \exp[\ln(s)^{(b_{11} \ln(s))}] = s^{(b_{11} \ln(s))}$$

$$(112) \quad \exp[b_{22}(\ln(f))^2] = \exp[b_{22} * \ln(f) * \ln(f)] = \exp[\ln(f)^{(b_{22} \ln(f))}] = f^{(b_{22} \ln(f))}$$

$$(113) \quad \exp[b_{33}(\ln(DoC))^2] = \exp[b_{33} * \ln(DoC) * \ln(DoC)] = \exp[\ln(DoC)^{(b_{33} \ln(DoC))}] = DoC^{(b_{33} \ln(DoC))}$$

Sostituendo i risultati delle Formule (111) – (113) nella Formula (109) si ottiene la Formula (114).

$$(114) \quad R = Taylor * (s^{(b_{11} \ln(s))} * f^{(b_{22} \ln(f))} * DoC^{(b_{33} \ln(DoC))})$$

Dalla Formula (112) si può osservare come, se i termini quadratici non hanno importanza, i coefficienti di regressione b<sub>11</sub>, b<sub>22</sub> e b<sub>33</sub> avranno valori molto piccoli, il che rende gli esponenziali tendenti a 1 andando quindi a rendere il termine aggiuntivo trascurabile rispetto al termine basato sull'equazione di Taylor.

# Usura Utensile

## Parte Teorica

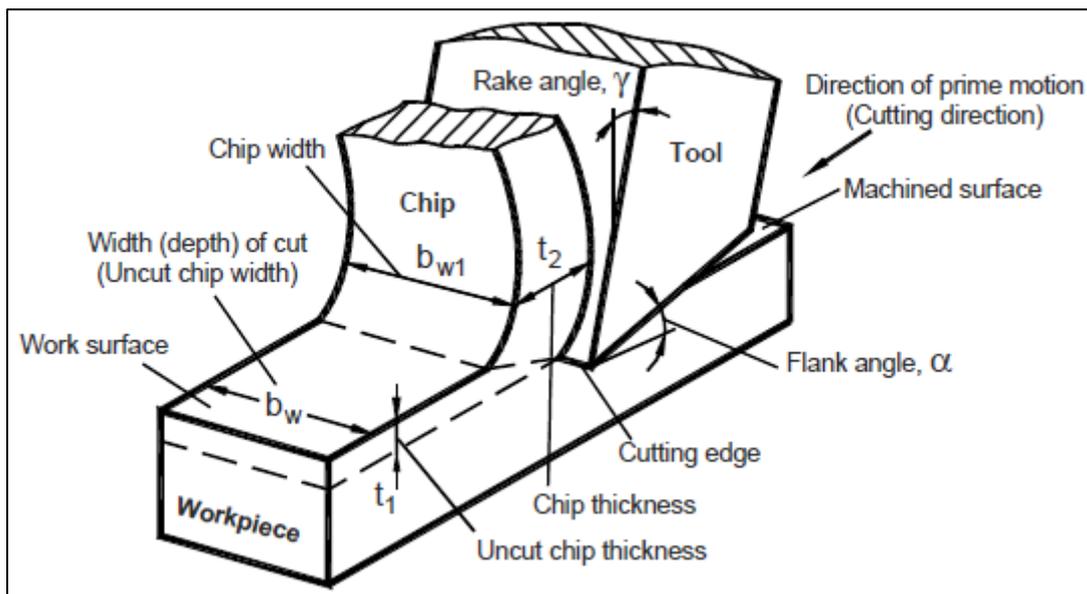
Nelle operazioni di taglio per asportazione di truciolo, è possibile utilizzare vari utensili che variano per geometria.

La geometria dell'utensile da taglio è importante perché influisce direttamente su:

- Direzione di espulsione del truciolo, importante perché regola la rottura del truciolo e la direzione in cui i trucioli vengono espulsi [44]
- Produttività, in quanto angoli diversi permettono di utilizzare avanzamenti per giro maggiori e quindi di incrementare la produttività della macchina (particolarmente importante in fresatura) [44]
- Vita utensile, in quanto la geometria stessa influenza l'entità e la direzione delle forze di taglio, la velocità di movimento all'interfaccia utensile-materiale, la temperatura all'interfaccia tra il materiale e il tagliente dello strumento, ecc... [44]
- Qualità della lavorazione, intesa come la finitura superficiale del materiale e gli stress residui lasciati sul materiale [44].

Nelle operazioni di tornitura, la geometria dell'utensile è fissata, in quanto il tipo di utensile utilizzato è definito come utensile da taglio a punta singola che agisce con un'operazione di taglio ortogonale bidimensionale [44].

Uno schema del taglio ortogonale bidimensionale [44] è dato dalla Figura 164.



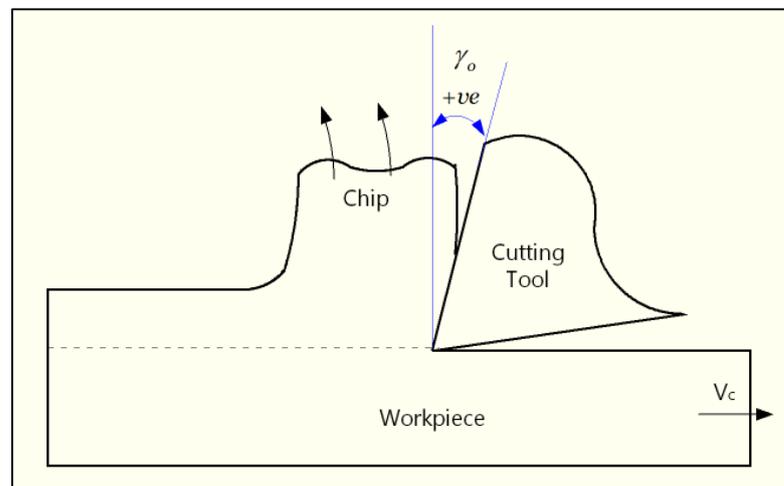
(Fig. 164 schema di taglio ortogonale bidimensionale [44])

Nello schema riportato nella figura soprastante sono rappresentate le componenti principali che influenzano le operazioni di taglio ortogonale bidimensionale [44]. Le componenti sono:

- 1) Superficie di lavoro (work surface) è intesa come la superficie del materiale che deve essere lavorata [44]
- 2) Superficie lavorata (machined surface) è intesa come la superficie del materiale che è stata lavorata [44]
- 3) Superficie di transizione, intesa come la superficie che viene lavorata dal tagliente maggiore, posizionata sempre tra la superficie di lavoro e la superficie lavorata [44]
- 4) Tagliente (cutting edge) è inteso come la parte dell'utensile che effettua il taglio sul materiale [44]
- 5) Spessore del truciolo (chip thickness) è inteso come lo spessore della porzione di materiale tagliato che forma il truciolo [44]

- 6) Larghezza del truciolo (chip width) è intesa come la larghezza della porzione di materiale tagliato che forma il truciolo [44]
- 7) Spessore del truciolo non tagliato (uncut chip width) è inteso come lo spessore della zona di materiale che deve essere lavorata e che formerà il truciolo [44]
- 8) Larghezza del truciolo non tagliato (uncut chip thickness) è intesa come la larghezza della zona di materiale che deve essere lavorata e che formerà il truciolo [44]
- 9) Angolo del fianco (flank angle), descritto dalla lettera  $\alpha$ , è inteso come l'angolo che separa la faccia laterale dell'utensile dal materiale in lavorazione. Quando questo angolo è pari a 0, la faccia laterale è in contatto con il materiale, cosa che genera un elevato attrito. All'aumento dell'angolo del fianco, sia ha un aumento del raggio di taglio del tagliente, cosa che diminuisce le componenti delle forze di attrito e di deformazione sul fianco e quindi diminuisce il calore generato e aumenta la vita utensile. Inoltre, l'aumento di dimensione aumenta la quantità di materiale che deve essere rimosso per raggiungere la stessa entità di usura. Il lato negativo è che ad un incremento di angolo si associa una diminuzione di resistenza meccanica nella zona adiacente al tagliente insieme ad una diminuzione della dissipazione del calore dell'utensile. Esiste un angolo specifico per ogni utensile, studiato per massimizzare la vita utensile [44].
- 10) Angolo di spoglia (rake angle), descritto dalla lettera  $\gamma$ , è inteso come l'angolo tra la perpendicolare alla superficie di lavoro e la faccia di spoglia, faccia sulla quale scorrono i trucioli. l'angolo può essere:
  - Positivo, con riduzione delle forze di taglio e delle temperature di contatto tra utensile e truciolo ma le forze normali applicate sulla punta tendono a causarne la flessione, diminuendo la capacità di taglio e causando scheggiature. Altro punto negativo è lo spostamento della zona di massima temperatura data dall'attrito tra l'utensile e il truciolo verso il tagliente, diminuendone la vita utile [44].

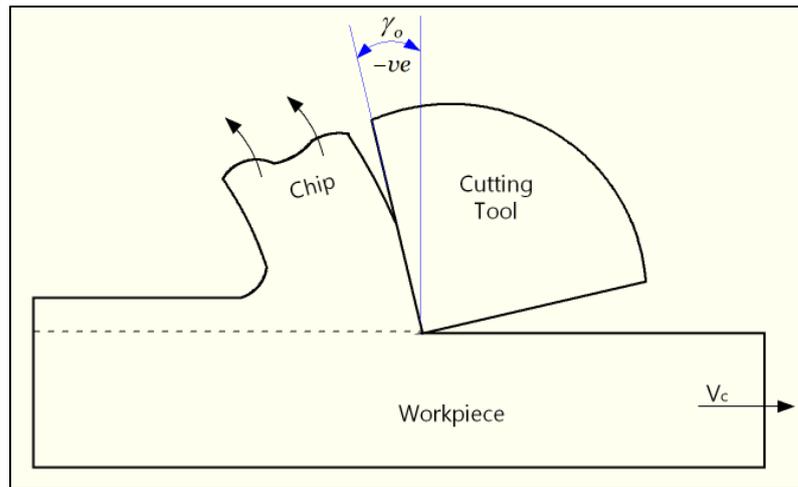
Uno schema di angolo di soglia positivo è fornito nella Figura 165.



(Fig. 165 angolo di soglia positivo [45])

- Negativo, presenta un aumento delle forze di taglio e delle temperature di contatto tra truciolo e utensile, ma le forze applicate sulla punta mettono il tagliente in uno stato di compressione, a cui i materiali che lo compongono sono molto resistenti, anche se le forze normali sono più alte rispetto al caso ad angolo positivo. A causa dell'angolo, la zona di massima temperatura causata dall'attrito tra il truciolo e l'utensile si sposta lontano dal tagliente [44].

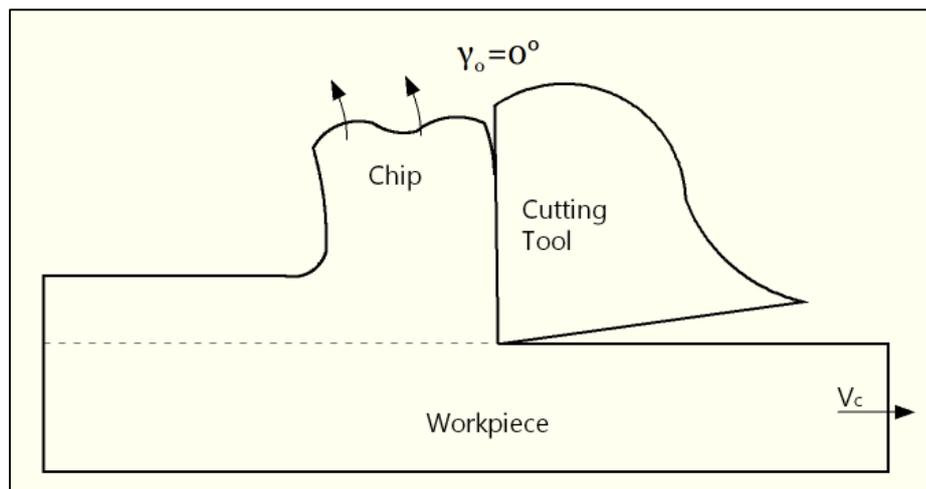
Uno schema di angolo di soglia negativo è fornito nella Figura 166.



(Fig. 166 angolo di soglia positivo [45])

- Nullo, presenta una facilità maggiore di produzione rispetto ad altri angoli e possono essere riaffilati. Presentano una Forza normale sviluppata sull'utensile più alta di angoli negativi e più bassa di angoli positivi [44].

Uno schema di angolo di soglia neutro è fornito nella Figura 167.



(Fig. 167 angolo di soglia positivo [45])

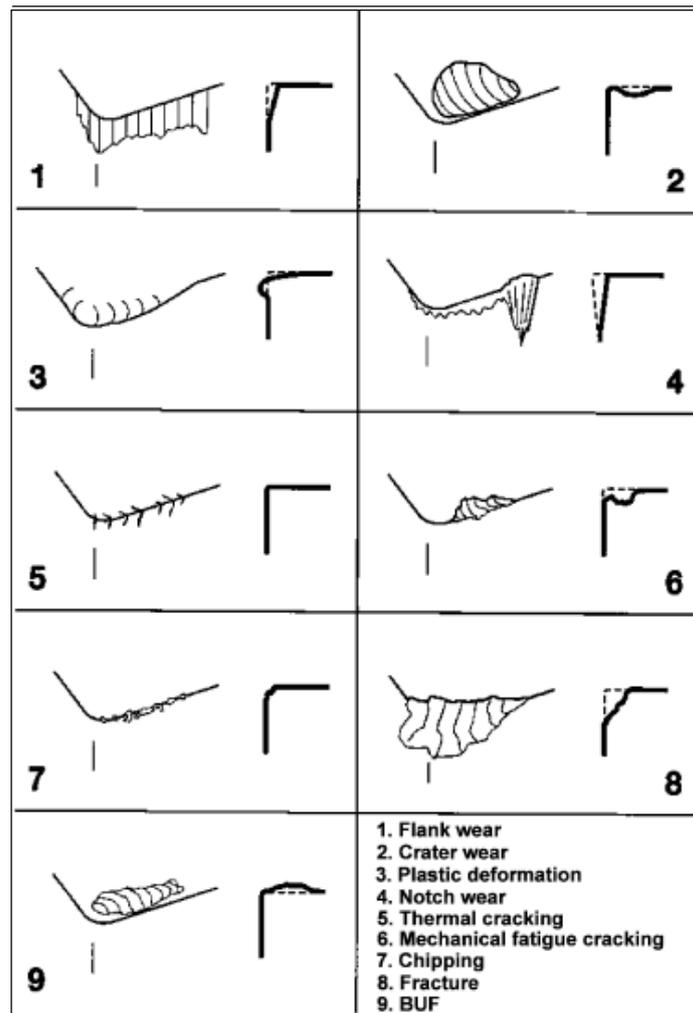
Gli utensili, a causa degli stress a cui sono sottoposti durante le operazioni di taglio, vanno incontro a rottura. La rottura dell'utensile può avvenire per due cause principali [46]

- Frattura per deformazione plastica dell'utensile, causata da una durezza non sufficiente dello stesso, il che provoca la perdita del tagliente. In questo caso la perdita di affilatura è dovuta all'arrotondamento del tagliente a causa degli sforzi generati dalla rimozione di materiale alle temperature di lavorazione, il che causa deformazione plastica del tagliente, se la durezza dello stesso non è sufficiente a mantenere la forma iniziale dell'utensile. Esiste una condizione di "stabilità di forma" dipendente dalla durezza del materiale lavorato, dalla durezza dell'utensile, dalla temperatura e dalla velocità di deformazione per cui l'utensile non va incontro a deformazione plastica [46].
- Frattura fragile dell'utensile, dovuta ad un eccessivo carico applicato al tagliente, oppure a sforzi improvvisi, ecc... Cariche eccessivi o improvvisi possono essere generati durante azioni di taglio intermittenti, rapida interruzione dell'operazione di taglio, taglio durante vibrazioni del pezzo ecc...

Le condizioni di frattura fragile sono evitabili intervenendo sui parametri di lavorazione (velocità di taglio, avanzamento per giro, profondità di passata, ecc...) [46]

La rottura dell'utensile, nella maggior parte dei casi, avviene in maniera progressiva, a causa di danni che si accumulano sul tagliente e che con il tempo causano una rottura, spesso antecedente a quella che dovrebbe essere l'effettiva vita utensile [44] [46].

Tutti i vari meccanismi che causano l'usura provocano dei danni sull'utensile che con il tempo ne causano la frattura. I tipi principali di danni che si sviluppano sul tagliente [44] [47] sono illustrati nella Figura 168.



(Fig. 168 schema delle tipologie di usura utensile principali [44])

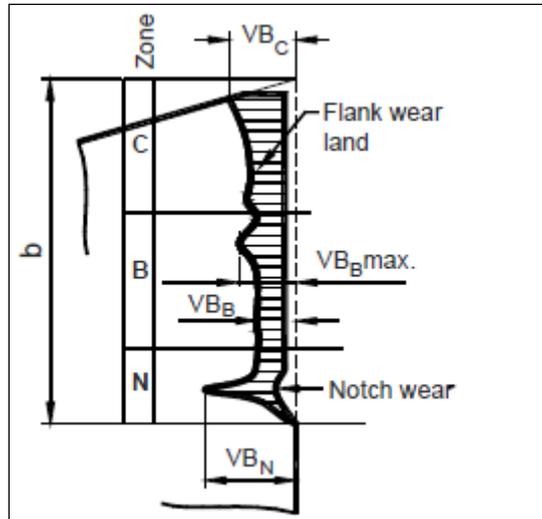
Dall'immagine soprastante si vede come le tipologie principali di usura sono 9. In particolare, due forme di usura sono le più comuni e di conseguenza le più misurate, che sono l'usura sul fianco (flank wear), descritta nella Figura 168 dal numero 1 e l'usura da crateri (crater wear) descritta nella Figura 168 dal numero 2 [44]. L'usura sul fianco (flank wear) è la più usata come indicazione dell'avanzamento dell'usura [44] [47].

Per misurare l'usura, si divide il tagliente maggiore in 4 sezioni, che sono:

- Regione C, che indica la zona ricurva al vertice del tagliente [44]
- Regione B, che indica la zona rettilinea che resta alla fine della Regione C [44]
- Regione A, che indica il quarto della regione di tagliente usurato, che presenta una lunghezza totale definita "b", più lontano dall'angolo dell'utensile da taglio [44]

- Regione N, che indica la zona che si estende oltre l'area di contatto utensile-materiale (sempre lungo il tagliente di estensione maggiore) ed è la zona in cui si verifica oltre che l'usura sul fianco anche l'usura di tacca (notch wear) descritto nella figura soprastante dal numero 4 [44]

Uno schema delle regioni e del tipo di usura che può essere misurata in esse [44] è mostrato nella Figura 169.

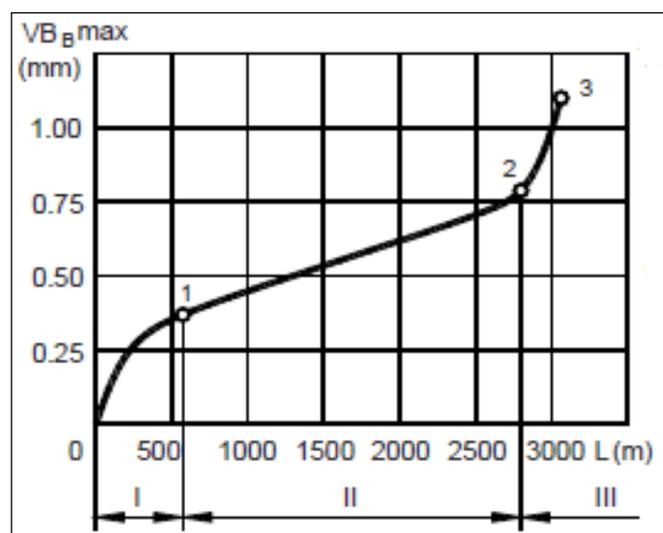


(Fig. 169 schema delle regioni di usura sul fianco principali [44])

In ogni regione è possibile identificare una profondità di usura sul fianco diversa, tranne che nella regione A. In particolare, l'ampiezza dell'usura sul fianco viene misurata nella Regione B e viene indicata con il termine  $VB_B$  espressa in [mm] [44] [47]. In particolare, si tiene conto del danneggiamento con profondità maggiore nella regione B indicato come  $VB_B \text{ max.}$  per indicare lo stato di usura utensile [44].

L'usura sul fianco viene generalmente misurata tramite l'utilizzo di un microscopio o di uno strumento simile ad un profilometro [44]

L'evoluzione dell'usura utensile, espressa come usura sul fianco ( $VB_B$ ) in funzione della lunghezza di taglio totale ( $L_m$ ) espressa in [m] [44] segue un andamento descritto dalla Figura 170.



(Fig. 170 andamento dell'usura sul fianco massima in funzione della lunghezza totale di taglio [44])

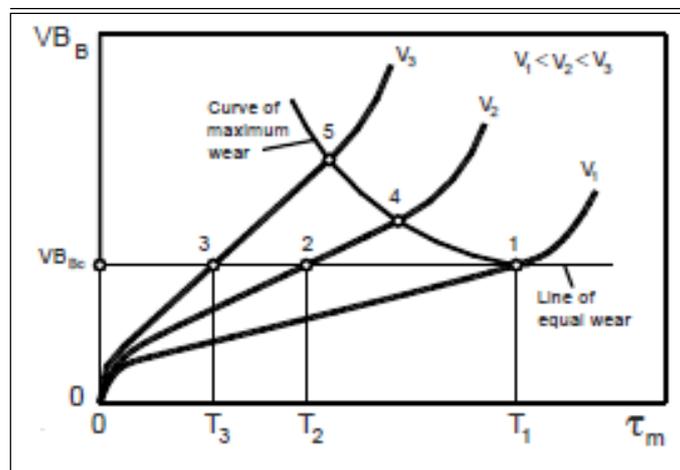
Come mostrato dal grafico soprastante, l'andamento della curva può essere diviso in tre zone, che corrispondono a 3 condizioni di usura diverse.

La prima zona (zona I), definita zona di usura primaria o iniziale, riguarda l'usura che si sviluppa sul fianco dell'utensile subito dopo la messa in utilizzo dello stesso. Dal grafico si vede come si abbia un aumento rapido dell'usura in funzione della lunghezza totale di taglio ( $L_m$ ) per poi giungere in una condizione più stazionaria. Questo comportamento può essere spiegato dall'usura accelerata degli strati più superficiali dell'utensile a causa di danni riportati durante la produzione o durante la riaffilatura degli stessi per poi arrivare agli strati sottostanti non danneggiati [44].

La seconda zona (Zona II), definita zona dell'usura in stato stazionario, corrisponde ad un aumento rettilineo e costante dell'usura rispetto alla lunghezza totale di materiale asportato. La zona II corrisponde alle condizioni di usura tipiche di utilizzo durante le operazioni di asportazione di truciolo [44].

La terza zona (Zona III), definita come zona di usura accelerata, corrisponde ad una zona in cui la profondità dell'usura sul fianco è talmente elevata da causare un cedimento strutturale del tagliente. In questa zona si un innalzamento delle forze e della temperatura unita ad una vibrazione elevata dell'utensile [44].

Si può studiare l'evoluzione dell'usura utensile (sempre espressa come  $VB_B$ ) anche in funzione del tempo di taglio ( $\tau_m$ ) [44], mostrato nel grafico sottostante (Figura 171).



(Fig. 171 andamento dell'usura sul fianco massima in funzione del tempo di taglio per diverse velocità di taglio [44])

Dal grafico si può notare come con il cambiamento della velocità di taglio le curve di usura utensile si muovano verso tempi di taglio maggiori a parità usura sul fianco, questo poiché la velocità di taglio è il parametro più influente sull'usura utensile [44] [46]. Dalle curve si vede come velocità sia direttamente proporzionale al tasso di usura, in quanto la velocità maggiore (indicata nel grafico come  $V_3$ ) presenta la curva di usura che va incontro ad un valore di usura sul fianco maggiore nel minor tempo [44].

In particolare, nel grafico viene preso il valore critico di usura sul fianco che può essere tollerata prima di entrare nella zona di usura accelerata (zona III del grafico precedente) definito come  $VB_{BC}$  per la curva di usura a velocità di taglio inferiore e si può notare come, aumentando la velocità di taglio, il valore critico venga raggiunto in tempi inferiori [44].

Dalle curve di usura a varie velocità di taglio, si vede come il valore di usura sul fianco critica prima di entrare nella zona di usura accelerata aumenti con il valore della velocità di taglio stessa, ma il valore di  $VB_{BC}$  viene scelto in funzione del tipo di lavorazione applicata sul materiale, delle condizioni della macchina e dalla qualità richiesta dal processo, ottenendo quindi un valore univoco per tutte le velocità di taglio evidenziato nella linea ad usura eguale (line of equal wear) [44]. Quando possibile però, si cerca di utilizzare il valore di usura sul fianco che separa la zona a usura in stato stazionario dalla zona ad usura accelerata, in modo da ridurre i cambi di utensile e gli sprechi ad essi associati e aumentare la produttività, specialmente per macchine a controllo numerico [44].

I valori dell'usura sul fianco critica  $VB_{BC}$  sono compresi tra 0,15 e 1 [mm] in funzione del tipo di utensile e del tipo di lavorazione che viene eseguita sul materiale [44] e sono mostrati nella Figura 172.

Tool material		HSS	Cemented carbides	Carbides coated	Ceramics	
Operation	(mm)				Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Roughing	VB <sub>B</sub>	0.35–1.0	0.3–0.5	0.3–0.5	0.25–0.3	0.25–0.5
Finishing	VB <sub>B</sub>	0.2–0.3	0.1–0.25	0.1–0.25	0.1–0.2	0.1–0.2

(Fig. 172 Valori critici dell'usura sul fianco in funzione del materiale dell'utensile e del tipo di lavorazione eseguita [44])

Dalla tabella sottostante si vede come il valore dell'usura sul fianco critica diminuisce con l'aumentare della qualità superficiale della lavorazione. In particolare, si può notare come i carburi rivestiti, categoria della quale fanno parte le punte da taglio utilizzate per gli esperimenti fatti in questa trattazione hanno un intervallo in grossatura (roughing) pari a 0,3-0,5 [mm] per quanto riguarda il valore critico di usura sul fianco.

Come definito precedentemente nella trattazione, l'equazione di Taylor espansa correla l'usura utensile con le principali componenti della tornitura [44] ed è espressa dalla Formula (35).

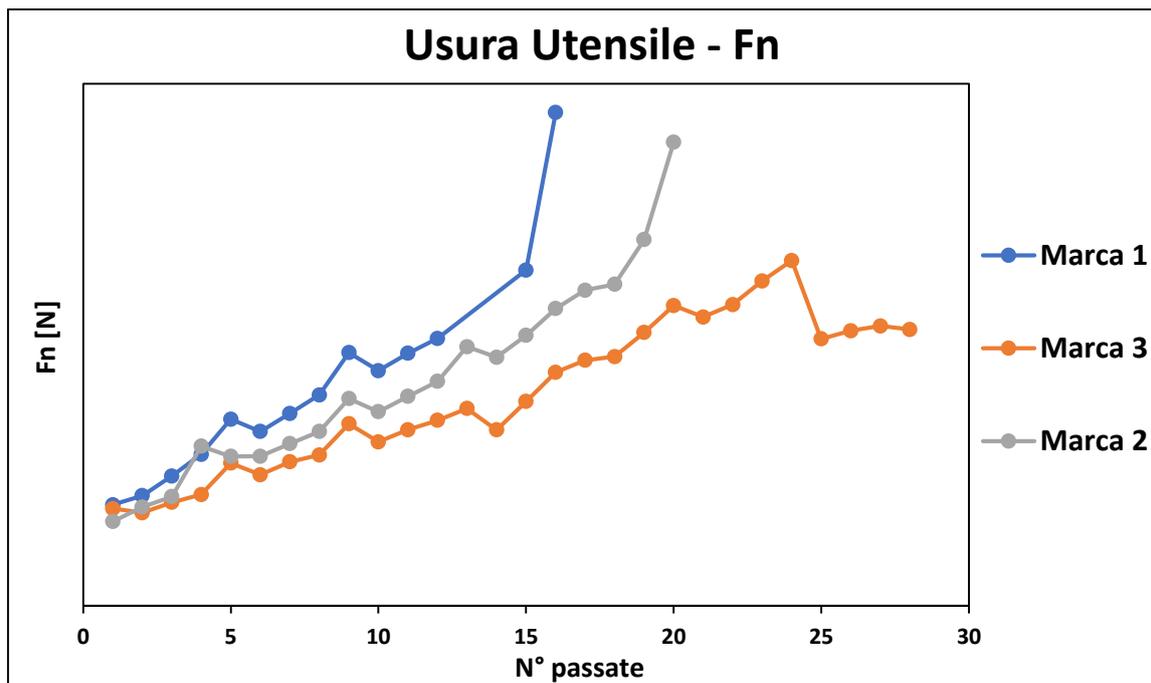
## Parte sperimentale

Gli esperimenti di usura utensile sono stati svolti durante prove di sgrossatura a parametri costanti di velocità di taglio (speed) pari a 180 [m/min], di avanzamento per giro (feed) pari a 0,4 [mm/rev] e di profondità di passata (DoC) pari a 2,5 [mm], su provini della stessa dimensione di quelli utilizzati per le prove di studio delle Forze e delle Pressioni normali.

A causa della necessità di dover fermare la prova dopo ogni passata per studiare l'entità dell'usura sul fianco in modo da poterne studiare l'andamento delle prove, lo studio dell'usura sul fianco non può essere utilizzato in quanto il progetto su cui è basata questa trattazione necessita di avere risultati che possano essere applicati ad una elevata quantità di campioni e di conseguenza di prove, cosa che rende lo studio dell'usura sul fianco non praticabile a causa delle tempistiche troppo elevate richieste per lo studio. Di conseguenza, lo studio delle Forze normali generate durante la tornitura dei provini verrà utilizzata come indicazione dell'andamento dell'usura, in quanto all'aumentare dell'usura dell'utensile tenderanno ad aumentare le forze che l'utensile sviluppa a contatto con la superficie del materiale lavorato [44] [46].

Il fine prova, verrà indicato tramite indicazioni acustiche della macchina, tramite osservazione delle tolleranze dimensionali sui pezzi e sulla rugosità e dall'esperienza dell'operatore del tornio, in quanto sono le caratteristiche principalmente osservate in una realtà industriale.

Dalle prove di usura effettuate sulle 3 marche, si ottiene il seguente grafico (Figura 173) ottenuto dalla media delle varie prove eseguite per le singole marche.



(Fig. 173 Andamento delle Forze normali durante le prove di Usura Utensile per tutte le Marche testate)

Dal grafico si nota come l'andamento delle Forze normali in funzione del numero di passate eseguite sui vari pezzi prima della fine della prova segue in generale l'andamento dell'usura sul fianco in funzione del tempo di taglio totale. In particolare, è possibile osservare la presenza di una zona assimilabile alla zona II del grafico precedente e una zona assimilabile alla zona III del grafico precedente, zone particolarmente visibili per la Marca 1 e per la Marca 2. La Marca 3 presenta invece una curva meno netta, probabilmente a causa della maggiore lavorabilità (già mostrata nelle prove di studio delle Forze e delle Pressioni normali)

A seguito del mancato utilizzo dell'usura sul fianco e del termine  $VB_B$  come termine utilizzabile per descrivere l'andamento dell'usura utensile, si è pensato di utilizzare il termine "Volume asportato per utensile" in cui si studia la quantità totale di materiale che l'utensile rimuove prima di arrivare a "rottura", cioè prima di

arrivare in una condizione in cui si ha un rumore elevato proveniente dal tornio, una superficie molto rugosa e con delle tolleranze dimensionali non costanti lungo il pezzo ed in generale elevate.

Il volume asportato per singola passata viene definito come il volume asportato per passare da un diametro ad un diametro minore nel provino, descritto dalla Formula (115).

$$(115) \quad Vol. \text{ asportato} = \pi * L * r_{in}^2 - \pi * L * r_{fin}^2 = \pi * L * (r_{in}^2 - r_{fin}^2)$$

Dove:

Vol. asportato è il volume asportato per giro, espresso in [mm<sup>3</sup>]

L è la lunghezza del provino tornito, espressa in [mm]

DoC è la profondità di passata, espressa in [mm]

r<sub>in</sub> è il raggio del provino all'inizio della passata, espresso in [mm]

r<sub>fin</sub> è il raggio del provino alla fine della passata, espresso in [mm]

Dalla Formula (115) si ottiene tramite svolgimento della parentesi, la Formula (116).

$$(116) \quad Vol. \text{ asportato} = \pi * L * (r_{in} - r_{fin}) * (r_{in} + r_{fin})$$

Da cui si può ricavare che la differenza di raggio è la profondità di passata (in quanto è stata definita sul raggio da tornire) e che il raggio finale è il raggio iniziale a cui viene sottratta la profondità di passata, ottenendo la Formula (117).

$$(117) \quad Vol. \text{ asportato} = \pi * L * DoC * (r_i + r_i - DoC) = \pi * L * DoC * (D_i - DoC)$$

Dove:

Vol. asportato è il volume asportato per giro, espresso in [mm<sup>3</sup>]

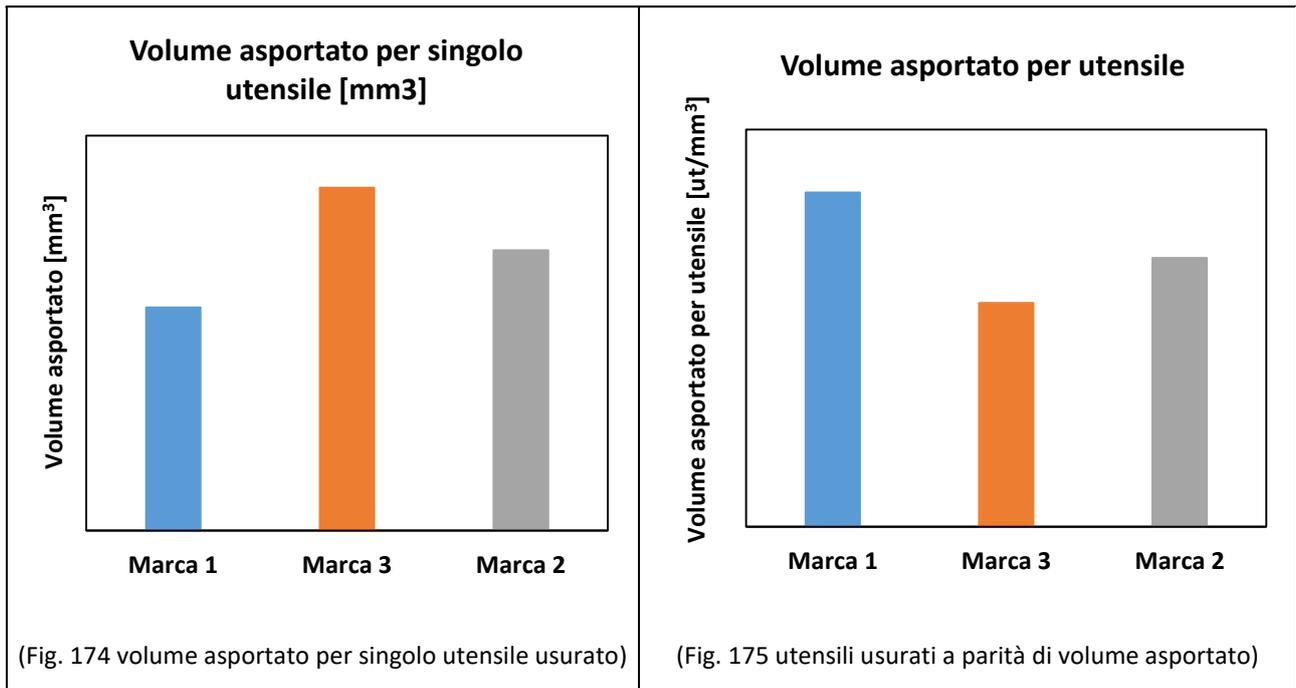
L è la lunghezza del provino tornito, espressa in [mm]

DoC è la profondità di passata, espressa in [mm]

D<sub>i</sub> è il diametro del provino all'inizio della passata, espresso in [mm]

Il valore "Utensile su volume asportato", espresso in [ut/mm<sup>3</sup>], è ottenuto facendo il reciproco del volume asportato totale (ottenuto sommando i valori di volume asportato dopo ogni passata fino a "rottura" dell'utensile) dopo che l'utensile viene definito a fine vita.

Lo studio del volume asportato medio per un utensile usurato e la media degli utensili usurati a parità di volume asportato sono riportati nei grafici sottostanti.



Come si vede dai grafici, si ha un aumento di performance passando dalla Marca 1 alla Marca 3 mostrato dal fatto che il volume totale asportato per utensile usurato aumenta e conseguentemente dal fatto che il volume per utensile diminuisce (in quanto è il reciproco del volume asportato totale).

Per concludere, lo studio dell'usura utensile tramite lo studio dell'usura sul fianco è stato reputato uno studio non applicabile al protocollo in quanto non si presta per un'applicazione industriale volta allo studio della lavorabilità in tempi rapidi su un numero elevato di provini e materiali. Si è optato per lo studio delle forze normali ( $F_n$ ) in funzione del numero di passate effettuate con un singolo utensile in quanto, a seguito di usura utensile, le forze tendono ad aumentare [44] seguendo (come mostrato del grafico soprastante) un andamento molto simile a quello nei grafici di usura sul fianco in funzione del tempo di taglio. Per definire quando l'utensile può considerarsi usurato si utilizzano le indicazioni acustiche e di perdita di tolleranze dimensionali sul pezzo tornito.

Lo studio dei modelli di regressione e dei valori di velocità di taglio, avanzamento per giro e profondità di passata che minimizzano l'usura utensile sono ancora in fase di sviluppo.

## Sviluppo del Protocollo

Definite le prove che verranno eseguite per studiare il comportamento dei materiali durante le prove di lavorabilità al tornio, si può descrivere come il protocollo di caratterizzazione generale andrà a svilupparsi. Il protocollo verrà suddiviso in categorie principali descritte nel seguente modo

### 1. Caratterizzazione metallografica

- Studio delle inclusioni e della struttura interna
- Prove meccaniche (trazioni e durezza)
- Analisi chimica completa

### 2. Esperimenti di lavorabilità

- Forze e pressioni sviluppate sul tagliente:
  - A) esperimenti una variabile alla volta con più punti nei parametri fissi
  - B) Design di response surface del tipo Central Composite Design Circumscribed (CCC)
- Usura utensile in funzione del reciproco del volume asportato (tagliente su volume asportato):
  - A) Esperimento una variabile alla volta
  - B) Design di response surface del tipo Central Composite Design Circumscribed (CCC)

### 3. Post processing dei dati

- Ottenimento di un modello per le forze e la pressione sull'utensile
- Ottenimento di un modello per l'usura utensile
- Identificazione dei valori delle variabili indipendenti che minimizzano la forza sul tagliente e massimizzano la vita utensile

Mentre la parte riguardante gli esperimenti di lavorabilità e il post processing dei dati è stata studiata nelle parti precedenti della trattazione, la parte riguardante la caratterizzazione metallografica è utilizzata seguendo normative internazionali che verranno indicate di seguito.

## Caratterizzazione metallografica

### Micropurezza

Lo studio delle inclusioni non metalliche viene eseguito tramite l'analisi su campione lucidato del materiale da osservare tramite l'utilizzo di un microscopio ottico. Viene eseguita secondo la ASTM E45-18a o la DIN 50602

La ASTM E45 prevede 2 tipologie di test che possono essere usati per valutare il panorama inclusionale del materiale, che sono:

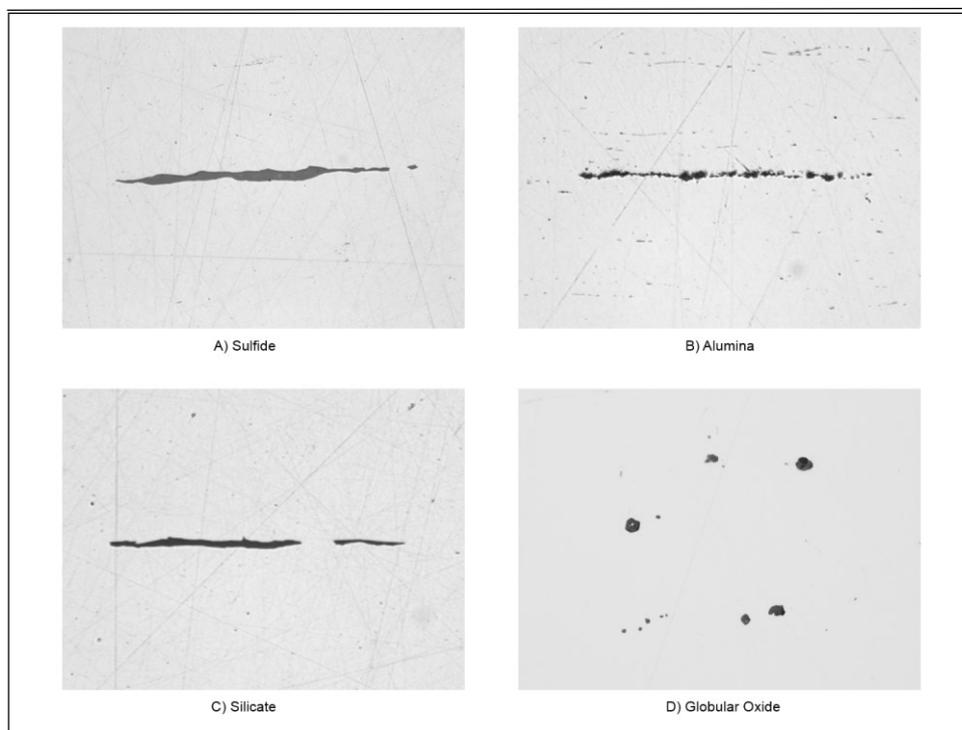
- Metodo A, studio del campo peggiore e prevede valutare l'indice massimo per tutti i tipi di inclusione non metallica (solfuri, alluminati, silicati e ossidi globulari) e della dimensione [48]
- Metodo D, studio di tutte le inclusioni in un'area normalizzata a 160 mm<sup>2</sup> valutandone morfologia, dimensione e distribuzione [48]

La DIN 50602 prevede 3 tipologie di test che vengono utilizzati per valutare la dimensione delle inclusioni, che sono

- Metodo M, permette di studiare la dimensione massima per ogni tipo di inclusione presente [49]
- Metodo K, in cui viene fissato un valore minimo di dimensione dell'inclusione, sotto il quale non vengono considerate [49]
- Metodo JK, fornisce la micropurezza come media dei gradi delle inclusioni trovate sul campione tramite una espressione in cui si moltiplicano i gradi trovati per le singole inclusioni e le si dividono per il numero totale di inclusioni trovate [49]

Esistono 4 tipi di inclusioni non metalliche che possono essere osservate tramite l'utilizzo di un microscopio ottico, che sono

- Solfuri, solitamente solfuri di Manganese, presenti in grandi quantità nelle leghe di acciaio inossidabile ad alta lavorabilità, in quanto lo zolfo viene utilizzato per formare composti a bassa resistenza meccanica in grado di rompere il truciolo e ridurre l'attrito tra truciolo e utensile [2], per le normative riguardanti la micropurezza questo tipo di inclusioni analizzate tramite microscopio ottico, appaiono come strutture allungate di colore grigio chiaro [48] [49] come mostrato nella Figura 176 nel riquadro A.
- Alluminati, composti non metallici a base di Alluminio, per le normative riguardanti la micropurezza questo tipo di inclusioni analizzate tramite microscopio ottico, appaiono come strutture globulari allineate di colore nero [48] [49] come mostrato nella Figura 176 nel riquadro B.
- Silicati, composti non metallici a base di Silicio, per le normative riguardanti la micropurezza questo tipo di inclusioni analizzate tramite microscopio ottico, appaiono come strutture allungate di colore nero [48] [49] come mostrato nella Figura 176 nel riquadro C.
- Ossidi globulari, per le normative riguardanti la micropurezza questo tipo di inclusioni analizzate tramite microscopio ottico, appaiono come strutture globulari singole di colore nero [48] [49] come mostrato nella Figura 176 nel riquadro D.



(Fig. 176 inclusioni non metalliche tipiche degli acciai [50])

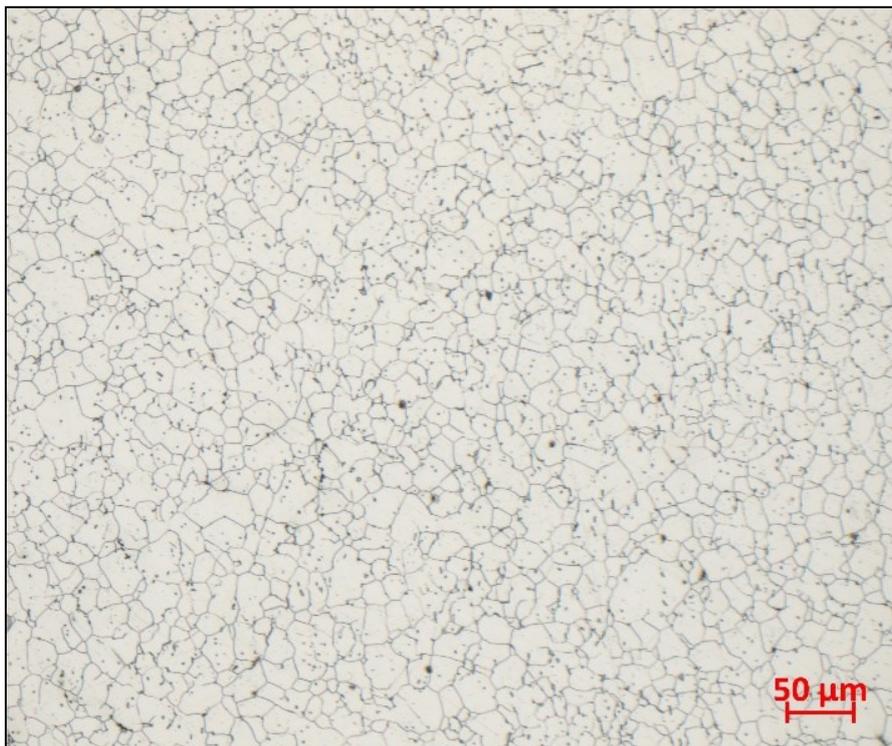
## Studio della microstruttura

Lo studio della microstruttura viene eseguita a seguito di attacco acido in modo da evidenziare i bordi di grano. Viene eseguita seguendo la ASTM E112 [51].

La ASTM E112 prevede vari metodi per identificare la dimensione grano, che sono:

- Metodo del confronto, in cui si confronta il grano ottenuto con delle figure schematiche standardizzate che descrivono vari gradi di dimensione grano [51]
- Procedura planimetrica (o di Jeffrey), in cui si somma il numero di grani contati all'interno di un cerchio di area  $5000 \text{ mm}^2$  dando il valore 1 ai grani interamente inscritti al cerchio e un valore pari a  $\frac{1}{2}$  ai grani intersecanti il bordo del cerchio. Il numero di grani minimo presenti nel cerchio deve essere 50. La somma dei grani è inserita in una equazione che tiene conto dell'area e restituirà un numero che sarà pari al grado che la dimensione grano avrà per il campione considerato [51].
- Metodo delle intercette lineari (o metodo di Lynn), in cui si conta il numero di bordi grano intercettato da una retta lunga a sufficienza per intercettare un numero di grani pari ad almeno 50. In funzione del numero di grani intercettati dalla retta, si avrà il numero di grado corrispondente alla dimensione grano del campione [51].
- Metodo delle intercette circolari, usati nel caso in cui i grani del materiale non siano equiassici. L'identificazione della dimensione grano è analoga al metodo con le intercette lineari [51].

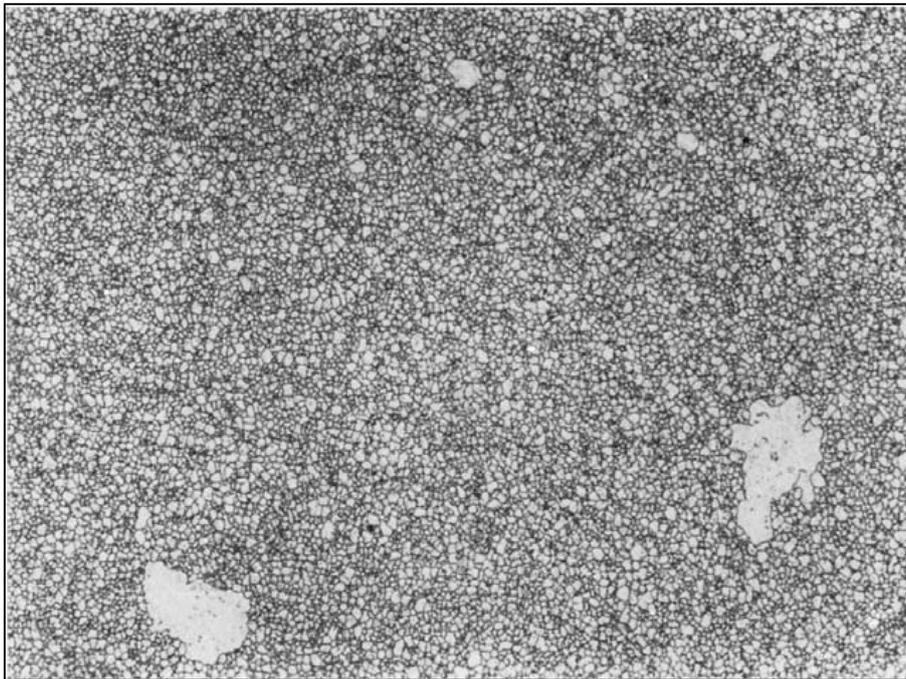
Un esempio di grano austenitico classificabile con grado 9 secondo la ASTM E112 è fornito nella Figura 177.



(Fig. 177 grano austenitico di un AISI 304, cortesia della Cogne Acciai Speciali s.p.a.)

Per caratterizzare un campione che presenta dei grani adiacenti con dimensioni molto diverse tra loro (definiti grani Duplex a causa della presenza di almeno due dimensioni grano distinte) si utilizza la norma ASTM E1181 [52], che stabilisce che nelle strutture in cui è possibile stabilire la presenza di due o più popolazioni diverse di dimensioni grano si devono valutare i gradi da attribuire alle singole popolazioni utilizzando la ASTM E112 [51] mentre per i grani più grossolani si deve utilizzare la norma ASTM E930 [53], che valuta la dimensione dei grani grossolani attraverso dei rapporti di forma e permettendo di attribuire un grado.

Un esempio di struttura duplex è riportato di seguito (Figura 178).



(Fig. 178 esempio di una struttura Duplex [53])

La tabella relativa ai gradi attribuibili ai grani più grossolani in funzione dell'ingrandimento e del rapporto di forma è riportato nella Figura 179.

			Grain Size versus Magnification		
<b>A</b>				-3.0 at 25x	3.0 at 200x
				-1.0 at 50x	5.0 at 400x
				1.0 at 100x	6.0 at 500x
<b>B</b>				-2.5 at 25x	3.5 at 200x
				-0.5 at 50x	5.5 at 400x
				1.5 at 100x	6.5 at 500x
<b>C</b>				-2.0 at 25x	4.0 at 200x
				0.0 at 50x	6.0 at 400x
				2.0 at 100x	7.0 at 500x
<b>D</b>				-1.5 at 25x	4.5 at 200x
				0.5 at 50x	6.5 at 400x
				2.5 at 100x	7.5 at 500x
<b>E</b>				-1.0 at 25x	5.0 at 200x
				1.0 at 50x	7.0 at 400x
				3.0 at 100x	8.0 at 500x

(Fig. 179 schema per valutare il grado di grani grossolani basato in funzione del fattore di forma e dell'ingrandimento [53])

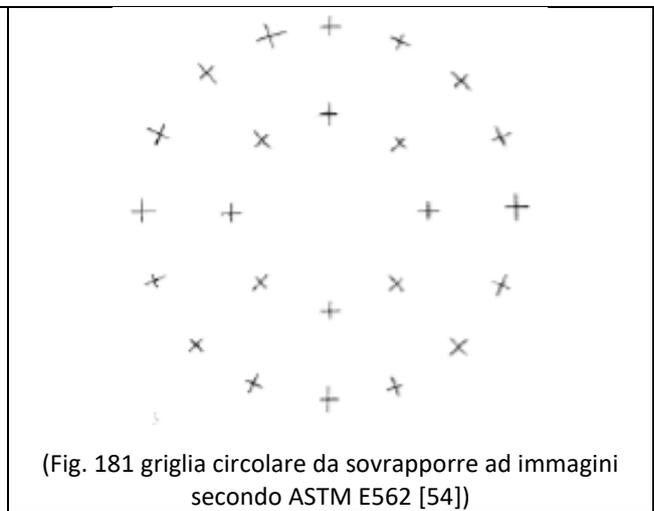
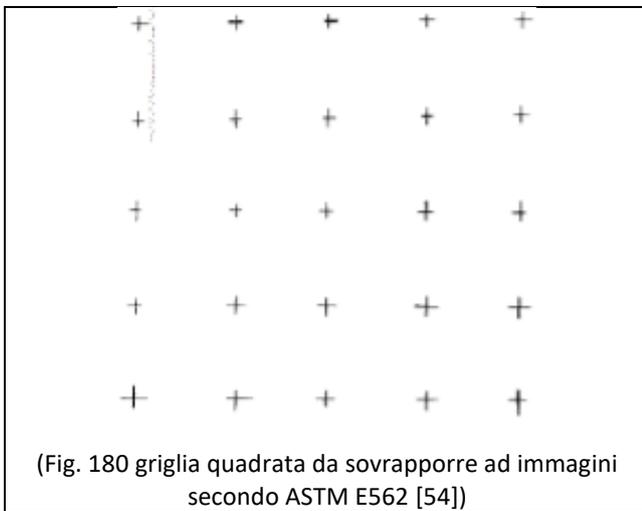
## Studio della percentuale di Ferrite

Questo studio viene eseguito per valutare la presenza di ferrite  $\alpha$  a causa della presenza di elementi ferritizzanti (quali il Cr) in acciai inossidabili con matrice non ferritica (ad esempio acciai austenitici) o acciai inossidabili con duplice matrice (ad esempio acciai duplex) e a causa della presenza di S che riduce le quantità di Mn atomico presente nell'acciaio (elemento austenitizzante) [2].

Lo studio della ferrite viene eseguito seguendo la ASTM E562 [54], in cui si utilizza una griglia di punti posti lungo una linea o lungo delle curve sovrapposta a varie immagini prese da microscopio ottico che mostrano diversi campi ottici del campione da analizzare (campione sottoposto ad attacco chimico in modo da evidenziare la struttura).

La griglia viene utilizzata per contare il numero di punti che cadono sulla struttura che deve essere studiata, in modo da poter dare una indicazione media della presenza su tutto il campione. La media è definita in percentuale dai punti che cadono sulla struttura studiata rispetto a tutti i punti presenti [54].

Le griglie utilizzate secondo la ASTM E562 [54] sono riportate nelle Figure 180 - 181.



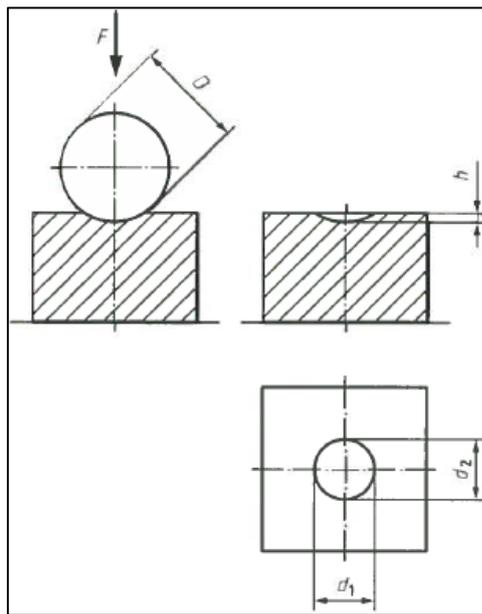
## Prove Meccaniche

Durezza: le prove di durezza si dividono in varie categorie in funzione del tipo di indentatore che viene utilizzato. Le prove di durezza più utilizzate sono

1. Durezza Brinnell in cui si usa un indentatore sferico di 10 mm di diametro in carburo di Tungsteno che viene applicato sulla superficie con una pressione e un tempo predefiniti. Per ottenere il valore di durezza si misura il diametro dell'indentatura lasciata sul materiale.

Studiata secondo la ASTM E 10 [55] oppure secondo la UNI EN ISO 6506-1 [56] per le procedure riguardanti la prova e la UNI EN ISO 6506-2 [57] per le procedure riguardanti la taratura e la manutenzione degli strumenti di misura.

Uno schema della punta e della misura dell'indentazione sono descritte nella Figura 182.

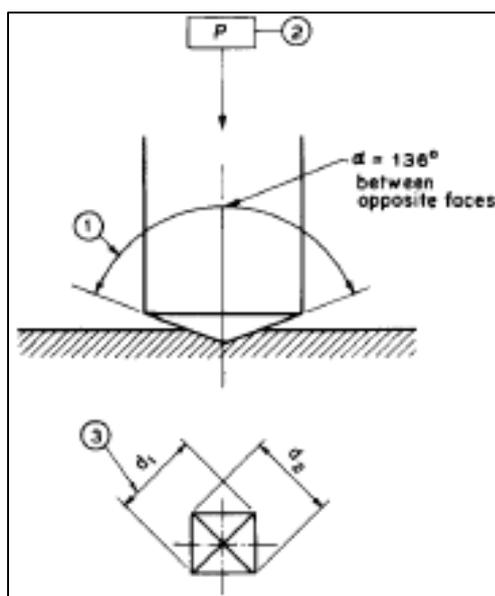


(Fig. 182 schema dell'indentatore e delle misure per le prove di Durezza Brinnell [56])

2. Durezza Vickers in cui un indentatore piramidale in diamante viene applicato sulla superficie per un tempo e un carico definiti. Per ricavare il valore di durezza si misurano le dimensioni delle diagonali della sezione impressa dall'indentatore.

In funzione dei carichi applicati, le prove di durezza Vickers possono dividersi in prove di durezza, normate secondo l'ASTM E 92 [58] per una forza di carico che va da 9,807 (esclusa) a 1176,68 [N], e prove di microdurezza, normate secondo l'ASTM E 384 [59] per una forza che va da  $9,807 \cdot 10^3$  a 9,807 (inclusa) [N]. Per quanto riguarda le normative UNI EN ISO, i test Vickers sono raggruppati all'interno di una normativa unica, la UNI EN ISO 6507-1 [60] per quanto riguarda le normative legate allo svolgimento delle prove e la UNI EN ISO 6507-2 [61] per quanto riguarda la taratura e la manutenzione degli strumenti di misura.

Uno schema della punta e della misura dell'indentazione sono descritte nella Figura 183.

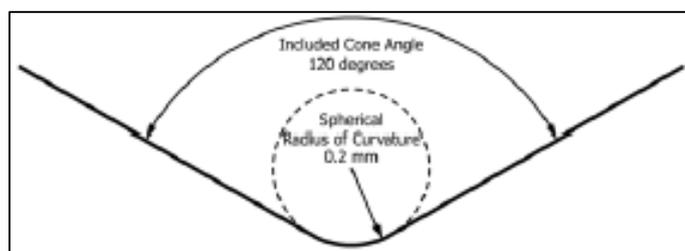


(Fig. 183 schema dell'indentatore e delle misure per le prove di durezza Vickers [58])

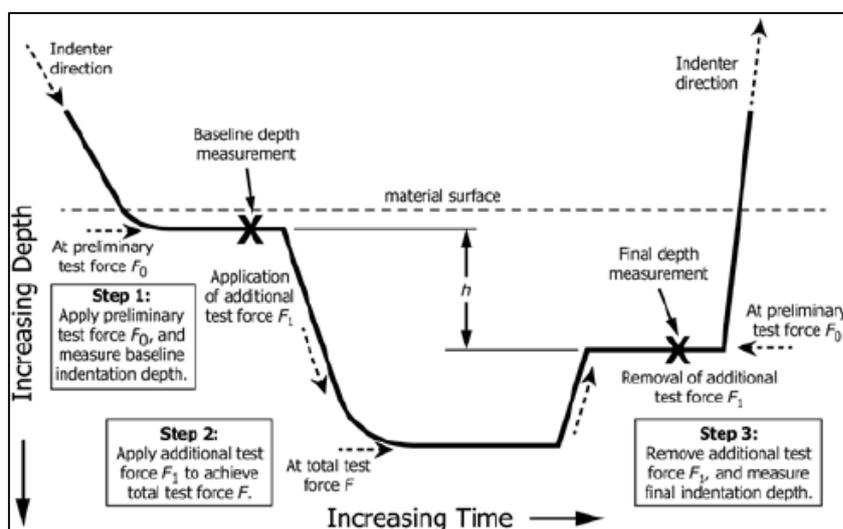
3. Durezza Rockwell, in cui un indentatore sferico di 1/16" o 1/8" in acciaio da utensili o in diamante viene applicato sulla superficie per un tempo e carico definiti. Per ottenere il valore di durezza si misura la profondità della traccia che l'indentatore lascia sulla superficie del campione.

Prove eseguite seguendo la ASTM E 18 [62] oppure la UNI EN ISO 6508-1 [63] per quanto riguarda le procedure di esecuzione della prova e la UNI EN ISO 6508-2 [64] per le procedure di taratura e manutenzione degli strumenti di misura.

Uno schema della punta e della misura dell'indentazione sono descritte nelle Figure 184 - 185.



(Fig. 184 schema dell'indentatore per le prove di durezza Rockwell [62])

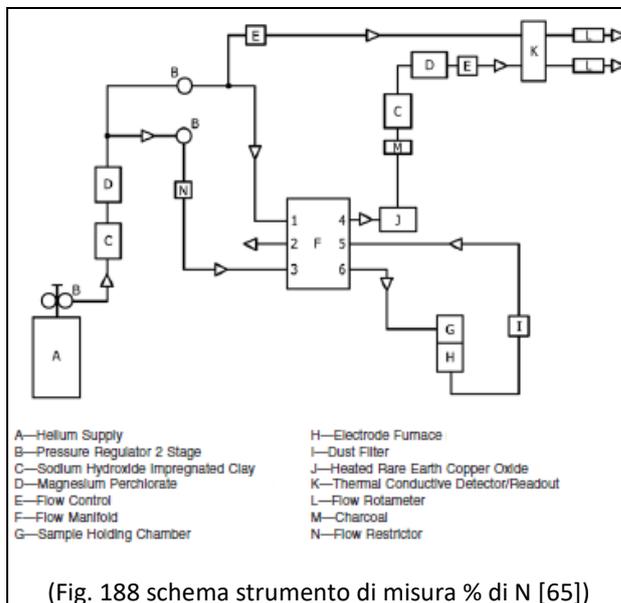


(Fig. 185 schema della prova di durezza Rockwell [62])

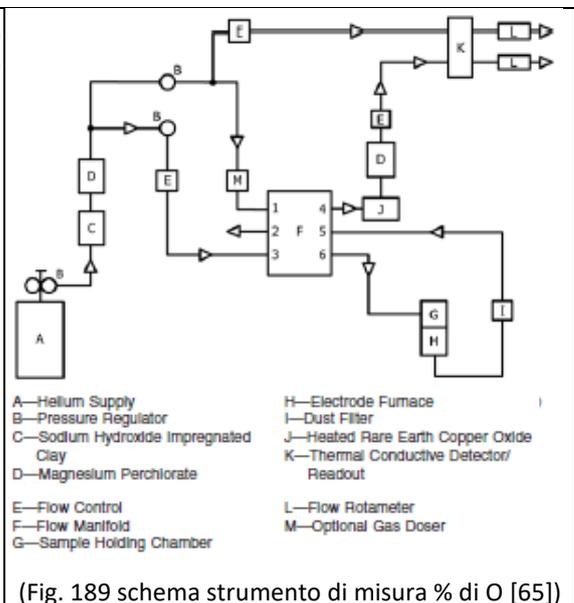


0,005%, massimo che può essere ampliato se il laboratorio esegue una convalida del metodo utilizzato per testare percentuali di ossigeno al di fuori del range suggerito da norma utilizzando materiali di riferimento [65].

Lo schema dei dispositivi di misura è riportato nelle Figure 188 - 189.



(Fig. 188 schema strumento di misura % di N [65])



(Fig. 189 schema strumento di misura % di O [65])

- Spettrometria di emissione ottica per l'identificazione degli altri elementi di interesse secondo la ASTM E1086 [66] per gli acciai inossidabili austenitici o la ASTM E415 [67] per le altre tipologie di acciaio. Il processo consiste nello studio dell'energia radiante emessa dai vari elementi dopo evaporazione causata da una scarica elettrica rilasciata da un elettrodo posto sopra la superficie di studio [66] [67]. Nella camera in cui si innesca la scarica non deve essere presente l'aria per evitare che assorba energia e che dia risultati errati [67].

## Esperimenti di lavorabilità

Gli esperimenti riguardanti l'ottenimento dei dati relativi ai Valori di Forza normale, Pressione normale e Usura Utensile verranno eseguiti sia con esperimenti una Variabile alla Volta sia con esperimenti di Design of Experiments in forma di design di response surface, in modo da raccogliere tutti i dati possibili riguardanti i materiali.

Si è deciso di eseguire sia le prove una variabile alla volta sia le prove di Response surface perché, almeno sulla caratterizzazione, si desidera avere più dati possibili per la descrizione del comportamento. Inoltre, anche se dalle prove preliminari si è visto come un modello basato su dati raccolti in prove Una Variabile Alla Volta in cui si considerano gli effetti di secondo ordine delle variabili indipendenti è molto affidabile nella descrizione del comportamento dei materiali, non si può escludere a priori l'importanza delle interazioni tra variabili, quindi le prove di Design of Experiments permettono lo studio delle interazioni e del comportamento generale del materiale con un numero molto ristretto di prove.

Nel caso, a seguito di un numero maggiore di caratterizzazioni, risultasse che uno tra i 2 metodi (una variabile alla volta o il design di response surface) fornisca informazioni poco precise o richiedesse un tempo macchina troppo elevato per la quantità di informazioni restituite, si procederà alla riduzione del protocollo alla singola tipologia sperimentale più completa nella caratterizzazione del comportamento del materiale.

I valori attribuiti alla velocità di taglio (s), all'avanzamento per giro (f) e alla profondità di passata (DoC) in ogni prova sono descritti di seguito.

### Prove Una Variabile Alla Volta

#### *Forza e Pressione normale*

Le prove UVAV verranno eseguite per identificare la zona dei valori delle variabili indipendenti in cui è presente l'ottimale. Per assicurarsi di avere maggiori informazioni riguardanti la risposta del materiale verranno eseguite più prove con parametri fissi diversi per studiare il contributo delle interazioni tra velocità di taglio (Speed), avanzamento per giro (Feed) e profondità di passata (DoC), riportati nella Tabella 3.

Velocità di taglio variabile			Avanzamento per giro variabile			Profondità di passata variabile		
Parametro variabile	Parametri fissi		Parametro variabile	Parametri fissi		Parametro variabile	Parametri fissi	
Speed [m/min]	Feed [mm/rev]	DoC [mm]	Feed [mm/rev]	Speed [m/min]	DoC [mm]	DoC [mm]	Speed [m/min]	Feed [mm/rev]
50	0,1	1	0,05	75	1	0,5	75	0,1
100	0,2	2	0,1	150	2	1	150	0,2
150	0,3	3	0,15	225	3	1,5	225	0,3
200			0,2			2		
250			0,25			2,5		
300			0,3			3		

(Tabella 3 valori dei parametri di Velocità di Taglio, avanzamento per giro e profondità di passata da adottare per le prove Una Variabile Alla Volta)

## Usura Utensile

L'usura utensile sarà riportata in termini di Volume asportato per utensile. I valori delle variabili durante le prove sono riportati di seguito (Tabella 4).

Velocità di taglio variabile		
Speed [m/min]	Feed [mm/rev]	DoC [mm]
75	0,2	2
125	0,2	2
175	0,2	2
225	0,2	2

Avanzamento per giro variabile		
Speed [m/min]	Feed [mm/rev]	DoC [mm]
150	0,1	2
150	0,2	2
150	0,3	2

Profondità di passata variabile		
Speed [m/min]	Feed [mm/rev]	DoC [mm]
150	0,2	1
150	0,2	2
150	0,2	3

(Tabella 4 valori dei parametri di Velocità di Taglio, avanzamento per giro e profondità di passata da adottare per le prove di Usura Utensile)

## Prove di Design of Experiments

I valori testati, in versione codificata, sono descritti nella Tabella 5.

StdOrder	RunOrder	Speed	Feed	DoC
14	1	0	0	1,681793
15	2	0	0	0
5	3	-1	-1	1
16	4	0	0	0
17	5	0	0	0
8	6	1	1	1
12	7	0	1,681793	0
11	8	0	-1,68179	0
1	9	-1	-1	-1
3	10	-1	1	-1
2	11	1	-1	-1
18	12	0	0	0
4	13	1	1	-1
6	14	1	-1	1
19	15	0	0	0
10	16	1,681793	0	0
7	17	-1	1	1
13	18	0	0	-1,68179
20	19	0	0	0
9	20	-1,68179	0	0

(Tabella 5 valori dei parametri di Velocità di Taglio, avanzamento per giro e profondità di passata da adottare per le prove di Design of Experiments)

I valori vengono tenuti in versione codificata per rendere la tabella soprastante più generale possibile, in quanto sia per le forze sia per l'usura utensile le prove seguiranno questo schema. Ogni variabile

indipendente verrà testata contemporaneamente facendo variare i valori in un intervallo simile a quello dell'esperimento una variabile alla volta.

Ogni prova avrà valori di velocità di taglio (Speed), avanzamento per giro (Feed) e profondità di passata (DoC) diversi, per un totale di 20 prove sia per la prova riguardante le forze sul tagliente sia per la prova di usura utensile.

La randomizzazione degli esperimenti è mostrata dal fatto che la colonna dell'ordine delle prove eseguite (RunOrder) e la colonna dell'ordine delle prove come dovrebbero essere eseguite seguendo la teoria del Design of Experiments (StdOrder) sono diverse.

## Post processing dei dati

Viene eseguita una Analisi di Varianza per identificare i contributi delle singole variabili alla risposta e poi si esegue una Regressione Lineare Multipla per ottenere una equazione che permetta di prevedere il comportamento del materiale senza necessità di ulteriori esperimenti. Questo processo viene applicato per tutte le prove (sia per lo studio delle forze e delle pressioni sviluppate sul tagliente sia per l'usura utensile dato dalla tornitura del materiale).

Successivamente si confrontano gli errori percentuali dei modelli ottenuti per le due modalità di esperimenti eseguiti e si identifica quale è il più preciso nella descrizione del materiale testato.

Infine, utilizzando i modelli migliori si identificano i valori di velocità di taglio, avanzamento per giro e profondità di passata che permettono di minimizzare le forze sull'utensile e massimizzare la vita utensile (espressa come utensile su volume asportato) attraverso una interpolazione grafica che permetta di trovare l'ottimale.

## Lavori futuri

Il prossimo passo nella ricerca consisterà nello sviluppare i modelli di regressione per l'usura utensile, espressa come volume asportato per utensile, sia attraverso prove Una Variabile Alla Volta sia attraverso prove di Design of Experiments, e di trovare i valori che la minimizzino.

Successivamente si procederà ad interpolare le curve ottenute dai modelli di regressione sviluppati per modellizzare le Forze normali e quelli per modellizzare l'usura utensile in modo da trovare i valori di velocità di taglio, avanzamento per giro e profondità di passata che siano ottimali per la tornitura del materiale.

Contemporaneamente, si intende raccogliere un numero elevato di dati eseguendo prove di studio delle forze e delle pressioni normali e di usura utensile su una quantità maggiore di campioni delle marche usate in questo studio, in modo da ottenere delle curve che siano in grado di evidenziare l'andamento generale delle marche in maniera più univoca.

Insieme alla raccolta dati, è in via di sviluppo un sistema informatico che permetta una automazione maggiore nella trascrizione dei valori di forze estratti dal dinamometro, in modo da ridurre gli errori legati al fattore umano a causa dell'elevato numero di dati che vengono prodotti durante le prove.

Successivamente, si intende estendere il protocollo ad altre tipologie di lavorazione per asportazione di truciolo (quale la tornitura interna, la foratura e l'alesatura per citare alcuni esempi) in modo da poter ottimizzare molte delle operazioni che i materiali subiscono durante i processi di lavorazione.

Infine, si intende estendere il protocollo anche ad altre classi di acciai sia austenitici che appartenenti ad altre famiglie di acciai inossidabili.

## Ringraziamenti

Ringrazio la Cogne Acciai Speciali s.p.a. per l'opportunità offertami. In particolare, ringrazio Alessandro Misul, direttore del settore Qualità ed Innovazione, per aver accettato la mia richiesta di tesi in azienda e per avermi inserito in un progetto importante e molto stimolante.

Ringrazio Federico Fiou e Phillippe Brunier, ISPP (innovazione Sviluppo Processo e Prodotto) e membri del gruppo di lavoro in cui sono stato inserito, per avermi aiutato tutte le volte che avevo delle perplessità, per avermi sempre spronato ad imparare dai miei errori senza mai farmi pesare il fatto di avere sbagliato e per avermi insegnato tanto in questi pochi mesi.

Ringrazio Elena Balducci, Responsabile Tecnico di Prodotto della linea Barre, membro del gruppo di lavoro assegnato allo sviluppo del protocollo e tutor aziendale assegnata a questo progetto, per avermi fatto da guida in azienda e per aver sempre trovato il tempo per rispondere ai miei dubbi.

Ringrazio Giampaolo Spagnoli, responsabile dei Laboratori, per il tempo dedicatomi nonostante i suoi molti impegni e la chiarezza con cui ha risposto alle mie domande.

Ringrazio Alessandro Zago, responsabile del Laboratorio Metallografico, per l'estrema disponibilità, la gentilezza e le innumerevoli conoscenze che è riuscito a trasmettermi.

Ringrazio i metallurgisti del laboratorio metallografico Giorgio Baudana, Eugenio Pinatel, Danilo Lussana, Anna Savino e Francesco Rao, per avermi permesso in questi mesi di vedere ed imparare moltissime cose sulla metallografia e per la pazienza dimostrata.

Ringrazio i metallografi del laboratorio metallografico, Sofia Daidone, Federico Monti, Federico de Marco, Nickolas Avati, Simone Sulis, Carlo Biazetti e Fabio Frison per avermi mostrato con pazienza le normative tecniche e le tipologie di esami che vengono eseguiti sulle varie classi di acciai e, più importante, per la compagnia e l'ambiente che mi hanno fatto trovare.

Ringrazio Patrick Badiluzzo, metallografo, per la sua amicizia e la capacità di scherzare in qualsiasi situazione.

Infine, ma non certo per importanza, voglio ringraziare le mie amiche e compagne di avventura Giulia, Gaia Beatrice ed Eleonora che sono state con me per gran parte della mia esperienza universitaria, per il loro sostegno, la loro vivacità, il loro spirito e senza le quali non avrei mai potuto arrivare a questo punto.

## Bibliografia

- [1] I. A. Choudhury, *Machinability Studies of High Strength Materials and the Development of a Data Base System*, Dublin: Dublin City University, 1995.
- [2] A. Y. Helmi, *Machining of stainless steels and super alloys*, John Wiley & Sons, Ltd., 2016.
- [3] N. Ånmark, A. Karasev e P. G. Jönsson, «The Effect of Different Non-Metallic Inclusions on the Machinability of Steels» *Materials*, vol. 8, pp. 751-783, 2015.
- [4] OKUMA, «Serie LB EX II LB2000 EX II,» OKUMA, 2021. [Online]. Available: <https://www.okuma.eu/it/prodotti/tecnologia/tornitura/serie-lb-ex-ii-3/lb2000-ex-ii/>. [Consultato il giorno 12 Novembre 2021].
- [5] Sandvik Coromant, «DNMG 15 06 08 - MR 2035» 2020. [Online]. Available: 2. <https://www.sandvik.coromant.com/it->
- [6] H. SERT, A. CAN, K. HABALI e F. OKAY, «Wear Behavior of PVD TiAlN, CVD TiN Coated and Cermet Cutting Tools» *Tribology in industry*, vol. 27, n. 3 & 4, pp. 1-9, 2005.
- [7] Blaser Swisslube AG, Scheda tecnica Blasocut 2000 Universal, Blaser Swisslube AG
- [8] DIAEDGE, «Cutting Power for Turning» 2021. [Online]. Available: [http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical\\_information/tec\\_turning\\_tools/tec\\_turning\\_insert/tec\\_turning\\_formula/tec\\_turning\\_cutting\\_power\\_formula](http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical_information/tec_turning_tools/tec_turning_insert/tec_turning_formula/tec_turning_cutting_power_formula). [Consultato il giorno 15 Novembre 2021].
- [9] R. Nur, «Calculating the Power Demand in Turning of AISI 316L Stainless Steel Through the Cutting Forces Data» *journal INTEK*, vol. 3, n. 1, pp. 43-49, 2016.
- [10] KISTLER, Multicomponent Dynamometer, -10 ... 10 kN, Cover Plate 90x105 mm, Type 9129AA, KISTLER, 2018.
- [11] M. Tecnica, «DURATA E CURVA DI USURA DEL UTENSILE,» 2018. [Online]. Available: <https://meccanicatecnica.altervista.org/durata-e-curva-di-usura-del-utensile/>. [Consultato il giorno 15 Novembre 2021]
- [12] Santosh, M. R. Ahmed, M. Lokesh e L. H. Manjunath, «INVESTIGATION OF MACHINABILITY CHARACTERISTICS ON C45 STEEL ALLOY WHILE TURNING WITH UNTREATED AND CRYOTREATED M2 HSS CUTTING TOOLS» *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 14, n. 1, pp. 1-11, 2019.
- [13] A. Spanò, Corso interno Cogne Acciai Speciali - Statistica Matematica, Cogne Acciai Speciali s. p. a., 2016.
- [14] A. Spanò, Corso Interno Cogne Acciai Speciali - Statistica Inferenziale, Cogne Acciai Speciali s. p. a., 2016.
- [15] A. Spanò, Corso interno Cogne Acciai Speciali - Analisi di Varianza, Cogne Acciai Speciali s. p. a., 2016.
- [16] A. Spanò, Corso interno Cogne Acciai Speciali - Analisi di Regressione, Cogne Acciai Speciali s. p. a., 2016.
- [17] R. Nau, «Mathematics of simple regression» 2020. [Online]. Available: <https://people.duke.edu/~rnau/mathreg.htm>. [Consultato il giorno 14 Novembre 2021].
- [18] Minitab, «Methods and formulas for Multiple Regression» 2019. [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab-express/1/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/how-to/multiple-regression/methods-and-formulas/methods-and-formulas/> . [Consultato il giorno 14 Novembre 2021].

- [19] I. Losito, «Disegno sperimentale\_parte A.pdf,» 2021. [Online]. Available: [http://www.ba.ipcf.cnr.it/~losito/LezioniChemiometria/13.%20Disegno%20sperimentale\\_parte%20A.pdf](http://www.ba.ipcf.cnr.it/~losito/LezioniChemiometria/13.%20Disegno%20sperimentale_parte%20A.pdf). [Consultato il giorno 13 Novembre 2021]
- [20] B. B. Gerstman, «t Table» 2016. [Online]. Available: <https://www.sjsu.edu/faculty/gerstman/StatPrimer/t-table.pdf>. [Consultato il giorno 10 Novembre 2021].
- [21] J. Jones, «Student's T Critical Values» 1996. [Online]. Available: <https://people.richland.edu/james/lecture/m170/tbl-t.html>. [Consultato il giorno 10 Novembre 2021].
- [22] NIST SEMATECH, «Critical Values of the Student's t Distribution» 2013. [Online]. Available: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3672.htm>. [Consultato il giorno 10 Novembre 2021].
- [23] Statistics Online Computational resource, «F Distribution Tables» 2021. [Online]. Available: [https://socr.umich.edu/Applets/F\\_Table.html#FTable0.05](https://socr.umich.edu/Applets/F_Table.html#FTable0.05). [Consultato il giorno 10 Novembre 2021].
- [24] Purdue University, «Critical Values of the F-Distribution:  $\alpha = 0.05$ » 2010. [Online]. Available: [https://www.stat.purdue.edu/~lfindsen/stat511/F\\_alpha\\_05.pdf](https://www.stat.purdue.edu/~lfindsen/stat511/F_alpha_05.pdf). [Consultato il giorno 10 Novembre 2021].
- [25] M. S. Alajmi e A. M. Almeshal, «Modeling of Cutting Force in the Turning of AISI 4340 Using Gaussian Process Regression Algorithm» Applied Science, vol. 11, n. 9, pp. 4055-4066, 2021.
- [26] I. Thamrin, «Analysis of the effect of the cutting speed on specific cutting energy in turning process» IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 620, n. 012117, pp. 1-10, 2020
- [27] T. C. Bera, H. Manikandan, A. Bansal e D. Nema, «A Method to Determine Cutting Force Coefficients in Turning Using Mechanistic Approach» International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, vol. 6, n. 99-103, p. 2, 2018.
- [28] S.B.A. Invent, «Solids and Liquids: Internal Energy and Enthalpy» 2020. [Online]. Available: <https://sbainvent.com/thermodynamics/solids-and-liquids-internal-energy-and-enthalpy/>. [Consultato il giorno 25 11 2021].
- [29] K. Hurley e J. Shamieh, «Enthalpy» 2020. [Online]. Available: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Thermodynamics/Energies\\_and\\_Potentials/Enthalpy](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Thermodynamics/Energies_and_Potentials/Enthalpy). [Consultato il giorno 25 11 2021].
- [30] S. Padhan, L. Dash, S. K. Behera e S. R. Das, Modeling and Optimization of Power Consumption for Economic Analysis, Energy-Saving Carbon Footprint Analysis, and Sustainability Assessment in Finish Hard Turning Under Graphene Nanoparticle-Assisted Minimum Quantity Lubrication, Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020
- [31] Minitab, «Minitab 18 Support Response Optimization» 2019. [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/using-fitted-models/supporting-topics/response-optimization/what-are-individual-desirability-and-composite-desirability/>. [Consultato il giorno 24 11 2021].
- [32] I. Losito, «Disegno sperimentale\_parte B.pdf» 2021. [Online]. Available: [http://www.ba.ipcf.cnr.it/~losito/LezioniChemiometria/14.%20Disegno%20sperimentale\\_parte%20B.pdf](http://www.ba.ipcf.cnr.it/~losito/LezioniChemiometria/14.%20Disegno%20sperimentale_parte%20B.pdf). [Consultato il giorno 15 Novembre 2021].
- [33] NIST/SEMATECH, «5.3.3.6. Response surface designs» 2013. [Online]. Available: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri336.htm>. [Consultato il giorno 27 11 2021].

- [34] A. Spanò, Corso interno Cogne Acciai Speciali - Design of Experiments, Cogne Acciai Speciali s.p.a., 2016.
- [35] S. Bhattacharya, «Central Composite Design for Response Surface Methodology and Its Application in Pharmacy» 2021. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/74955>. [Consultato il giorno 24 Novembre 2021].
- [36] Minitab, «Coefficients table for Analyze Response Surface Design» 2019. [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/response-surface/analyze-response-surface-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/coefficients-table/>. [Consultato il giorno 27 Novembre 2021].
- [37] J. Abramson, «9.8: Solving Systems with Cramer's Rule» 2021. [Online]. Available: [https://math.libretexts.org/Bookshelves/Precalculus/Precalculus\\_\(OpenStax\)/09%3A\\_Systems\\_of\\_Equations\\_and\\_Inequalities/9.08%3A\\_Solving\\_Systems\\_with\\_Cramer's\\_Rule](https://math.libretexts.org/Bookshelves/Precalculus/Precalculus_(OpenStax)/09%3A_Systems_of_Equations_and_Inequalities/9.08%3A_Solving_Systems_with_Cramer's_Rule). [Consultato il giorno 27 Novembre 2021].
- [38] Minitab LLC, «Methods and formulas for probability plot in Individual Distribution Identification» 2019. [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/quality-tools/how-to/individual-distribution-identification/methods-and-formulas/probability-plot/#confidence-limits-for-percentiles>. [Consultato il giorno 05 Dicembre 2021]
- [39] Minitab LLC, «Goodness of fit for individual distribution identification» 2019. [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/quality-tools/how-to/individual-distribution-identification/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/goodness-of-fit/>. [Consultato il giorno 05 Dicembre 2021].
- [40] Minitab LLC, «Residual plots for Fitted Line Plot» 2020. [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/19/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fitted-line-plot/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/residual-plots/>. [Consultato il giorno 05 Dicembre 2021].
- [41] NIST SEMATECH, «1.3.6.2. Related Distributions» 2013. [Online]. Available: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda362.htm#CDF>. [Consultato il giorno 05 Dicembre 2021].
- [42] Nist SEMATECH, «1.3.5.14. Anderson-Darling Test» 2013. [Online]. Available: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35e.htm>. [Consultato il giorno 5 Dicembre 2021].
- [43] Minitab LLC, «Multicollinearity in regression» 2019. [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab-express/1/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/supporting-topics/model-assumptions/multicollinearity-in-regression/>. [Consultato il giorno 15 Gennaio 2022].
- [44] V. Astakhov e J. P. Davim, «Tools (Geometry and Material) and Tool Wear» in *Machining Fundamentals and Recent Advances*, Springer, 2008, pp. 29-57.
- [45] Minaprem, «Concept of Positive Rake, Negative Rake and Zero Rake Angle» 2022. [Online]. Available: <http://www.minaprem.com/machining/cutter/geometry/concept-of-positive-rake-negative-rake-and-zero-rake-angle/>. [Consultato il giorno 10 Gennaio 2022].
- [46] A. Bhattacharyya e I. Ham, «Analysis of Tool Wear Part I: Theoretical Models of Flank Wear» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 91, n. 3, pp. 790-796, 1969.
- [47] International Organization for Standardization, *ISO 3685: Tool-life testing with single point turning tools*, International Organization for Standardization, 1993.

- [48] American Society for Testing and Materials, *ASTM E45 - 18a Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel*, American Society for Testing and Materials, 2019.
- [49] German institute for standardisation, *DIN 50602 Microscopic examination of special steels using standard diagrams to assess the content of non-metallic inclusions*, German institute for standardisation, 1985.
- [50] OLYMPUS CORPORATION, «Nonmetallic Inclusion Analysis in Steel» 2021. [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/en/nonmetallic-inclusion-analysis-in-steel/>. [Consultato il giorno 17 Gennaio 2022].
- [51] American Society for Testing and Materials, *ASTM E112 - Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, American Society for Testing and Materials, 2021.
- [52] American Society for Testing and Materials, *ASTM E1181 - Standard Test Methods for Characterizing Duplex Grain Sizes*, American Society for Testing and Materials, 2016.
- [53] American Society for Testing and Materials, *ASTM E930 - Standard Test Methods for Estimating the Largest Grain Observed in a Metallographic Section (ALA Grain Size)*, American Society for Testing and Materials, 2019.
- [54] American Society for Testing and Materials, *ASTM E562 - Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count*, American Society for Testing and Materials, 2019.
- [55] American Society for Testing and Materials, *ASTM E10 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*, American Society for Testing and Materials, 2018.
- [56] Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 6506-01 Metallic Materials - Brinell Hardness Test - Part 1: Test Method*, Ente Italiano di Normazione, 2015.
- [57] Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 6506-02 Metallic Materials - Brinell Hardness Test - Part 2: Verification and calibration of testing machines*, Ente Italiano di Normazione, 2019.
- [58] American Society for Testing and Materials, *ASTM E92 - Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*, American Society for Testing and Materials, 2016.
- [59] American Society for Testing and Materials, *ASTM E384 - Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*, American Society for Testing and Materials, 2017.
- [60] Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 6507-01 Metallic Materials - Vickers Hardness Test - Part 1: Test Method*, Ente Italiano di Normazione, 2018.
- [61] Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 6507-02 Metallic Materials - Vickers Hardness Test - Part 2: Verification and calibration of testing machines*, Ente Italiano di Normazione, 2018.
- [62] American Society for Testing and Materials, *ASTM E18 - Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*, American Society for Testing and Materials, 2020.
- [63] Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 6508-01 Metallic Materials - Rockwell Hardness Test - Part 1: Test Method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)*, Ente Italiano di Normazione, 2016.
- [64] Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 6508-02 Metallic Materials - Rockwell Hardness Test - Part 2: verification and calibration of testing machines (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)*, Ente Italiano di Normazione, 2015.
- [65] American Society for Testing and Materials, *ASTM E1019 - Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Inert Gas Fusion Techniques*, American Society for Testing and Materials, 2018.

- [66] American Society for Testing and Materials, *ASTM E1086 - Standard Test Method for Analysis of Austenitic Stainless Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*, American Society for Testing and Materials, 2016.
- [67] American Society for Testing and Materials, *ASTM E415 - Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*, American Society for Testing and Materials, 2021.