

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

ANALISI DATI

PROCESSO DI MASCHIATURA PER DEFORMAZIONE PLASTICA



Relatori:

prof.ssa Flaviana Calignano

dott. Matteo Gottero

dott. Andrea Gugole

Alessandro Parpaiola

Candidato:

Alberto Micelisopo

Anno accademico 2020/2021

INDICE

Introduzione	1
Capitolo 1	
Maschiatura per deformazione plastica	3
Capitolo 2	
Organizzazione delle prove sperimentali	13
2.1 Maschi testati	13
2.2 Materiali lavorati nelle prove	15
2.3 Parametri di prova.....	18
2.4 Centro di lavoro utilizzato	19
2.5 Sensore utilizzato per la registrazione dati	20
Capitolo 3	
Analisi dei dati di prova	22
3.1 Analisi del momento flettente	23
3.2 Analisi del momento torcente.....	25
3.3 Analisi della spinta assiale	32
3.4 Segnali anomali riscontrati.....	37
3.4.1 Segnali incompleti	37
3.4.2 Segnali con offset	38
Capitolo 4	
Confronto tra maschi	40
4.1 Maschio MF02 vs MF01: effetto del rapporto di spoglia	42
4.2 Maschio MF07 vs MF07 modifica: effetto della rugosità superficiale del maschio	47
4.3 Maschio MF07 vs MF08: effetto del raggio di cresta del profilo del filetto	52
4.4 Confronto globale con i maschi dei concorrenti	57
Capitolo 5	
Conclusioni analisi	60
Capitolo 6	
Sviluppi futuri: analisi ANOVA	62
Bibliografia	67

Introduzione

In questa trattazione verrà discussa l'analisi condotta sui dati raccolti da una campagna prove di un processo di maschiatura per deformazione plastica.

Il lavoro è stato svolto presso l'azienda "FRATELLI VERGNANO SRL", situata a Chieri (TO) e tra le principali aziende di produzione di utensileria meccanica.

POLITICA AZIENDALE



L'obiettivo della Vergnano è la soddisfazione del cliente.
La qualità dei prodotti è frutto di anni di esperienza e di forti investimenti, sia in tecnologia e impianti che in risorse umane.
La realizzazione dei prodotti è ottenuta nel rispetto della sicurezza sul lavoro e della tutela dell'ambiente.
Al fine di acquisire uno strumento per il miglioramento continuo, l'azienda si è dotata di un sistema di assicurazione qualità, certificato ISO 9001.

L'obiettivo dell'azienda era quello di realizzare un maschio con prestazioni migliorate rispetto a quanto già proponeva sul mercato.

Per fare questo sono stati testati vari prototipi realizzati dalla Vergnano e anche alcuni maschi commercializzati dalle principali aziende concorrenti, così da avere un confronto con quanto la concorrenza propone sul mercato.

Le prove condotte avevano l'obiettivo di valutare le prestazioni dei maschi in una loro prima fase di vita in esercizio e non erano legate ad un'analisi di durata.

Le grandezze fisiche considerate nell'analisi sono state il momento torcente, la spinta assiale e il momento flettente del maschio riscontrati nel processo di maschiatura.

I maschi sono stati testati su diversi acciai da lavorare, dal momento che si è voluto valutare il comportamento degli utensili su un gruppo di possibili materiali da maschiare e non solamente su un particolare acciaio.

Infatti l'azienda deve rispondere in maniera adeguata a diverse possibili condizioni di lavoro del maschio e pertanto non si è focalizzata sull'ottimizzare il processo di maschiatura solamente su un determinato materiale.

Il compito di questa trattazione è stato quello di analizzare e valutare i dati ottenuti dalle prove.

Nel capitolo seguente verrà riportata una breve trattazione teorica del processo che si analizza (maschiatura per deformazione plastica), in modo da poter comprendere meglio l'analisi che è stata condotta.

Successivamente vi saranno i capitoli in cui si descrivono le condizioni nelle quali sono state eseguite le prove ed infine verrà illustrata l'analisi condotta sui dati.

Capitolo 1

Maschiatura per deformazione plastica

La maschiatura per deformazione è un processo di deformazione plastica a freddo utilizzato per la realizzazione delle filettature interne dei fori, in alternativa al processo di maschiatura ad asportazione [1].

Per comprendere come la maschiatura per deformazione si discosta dalla maschiatura ad asportazione è utile analizzare l'utensile di lavoro, comunemente detto maschio a rullare (Figura 1), e confrontarlo con un maschio ad asportazione (Figura 2).

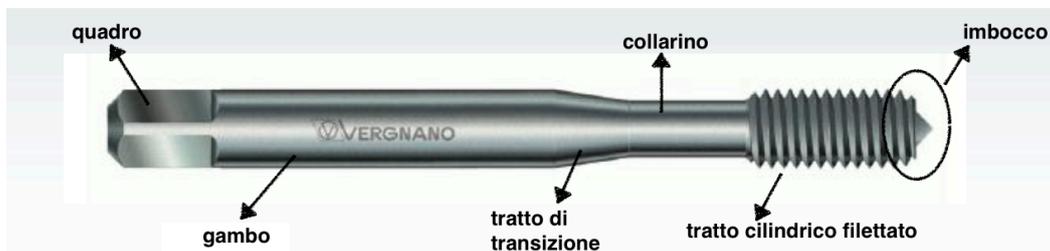


Figura 1 - Schema di un maschio a rullare



Figura 2 - Schema di un maschio per la maschiatura ad asportazione



Figura 3 - A sinistra sezione trasversale del tratto filettato di un maschio a rullare; a destra sezione trasversale del tratto filettato di un maschio ad asportazione

Dalle figure appena riportate si può notare come la principale differenza tra i due maschi sia l'assenza dei taglienti e delle scanalature per l'evacuazione del truciolo nel maschio a rullare.

La maschiatura per deformazione è un processo che deforma il materiale lavorato e non lo asporta, perciò non produce truciolo e i taglienti del maschio ad asportazione vengono sostituiti dai lobi (Figura 3).

Osservando Figura 3 (a sinistra) si nota come la forma circolare della sezione del maschio viene sostituita da una forma poligonale originata dalla presenza dei lobi (5 in Figura 3), sui quali ricade il compito di deformare plasticamente il materiale e realizzare la filettatura.

Sempre in Figura 3 è riportata l'indicazione di una "spoglia radiale" che viene realizzata nei tratti tra i vari lobi per ridurre la zona di contatto tra il maschio e il materiale lavorato, così da diminuire l'attrito che si genera nell'eseguire la maschiatura (questo aspetto è stato analizzato anche sulla base dei dati sperimentali osservati, capitolo 4.1).

Confrontando tra loro le precedenti Figura 1 e Figura 2 si può notare come le restanti parti dei maschi siano tra loro le medesime, si ha:

- il "quadro" e il "gambo" per l'accoppiamento del maschio con il mandrino della macchina di lavoro: il quadro assicura un accoppiamento rigido con il mandrino

mentre il codolo in genere risulta rinforzato per una maggiore resistenza, ovvero presenta un diametro maggiorato rispetto alla restante parte del maschio;

- un *“tratto di transizione”* tra il gambo rinforzato e il *“collarino”*, quest’ultimo si presenta con un diametro minore di quello del codolo e non è filettato;
- il *“tratto cilindrico filettato”*, le cui funzioni principali sono la guida del maschio nel foro da filettare e la rifinitura della filettatura realizzata in precedenza dal tratto di *“imbocco”*, infatti la principale parte del processo di deformazione (nella maschiatura per deformazione) o di asportazione (nella maschiatura ad asportazione) avviene nell’imbocco del maschio;
- il tratto di *“imbocco”*, che è quello su cui ricade principalmente il lavoro di deformazione o di asportazione del materiale; questo tratto presenta una spoglia (Figura 4), partendo dalla punta del maschio il diametro delle creste dei filetti cresce fino al valore che si riscontra poi nel tratto cilindrico filettato, il cui diametro è legato alla designazione del maschio (ad esempio M8): questo viene realizzato con lo scopo di poter eseguire una deformazione/asportazione graduale del materiale lavorato, nell’ottica di ridurre gli sforzi richiesti nel processo e di migliorare la qualità del filetto ottenuto.

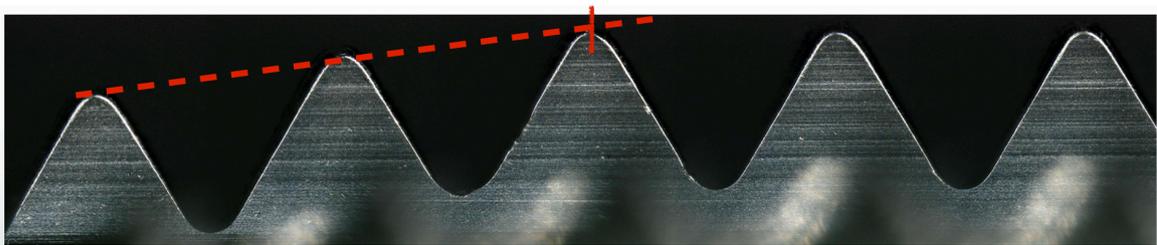


Figura 4 - Particolare del tratto di imbocco per un maschio a rullare

Si passa ora a descrivere il processo di deformazione che avviene nella realizzazione della filettatura interna dei fori.

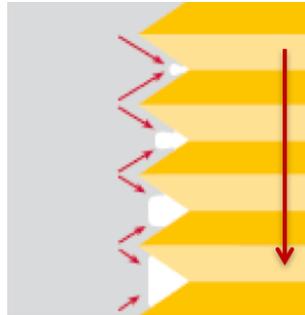


Figura 5 - Formazione dei filetti nel foro da filettare (in grigio il materiale del foro e in giallo il maschio a rullare)

Come si può notare da Figura 5 il materiale lavorato viene spinto progressivamente negli spazi tra le creste dei filetti del maschio e questo processo avviene principalmente nel tratto di imbocco, come detto in precedenza.

Poiché nella maschiatura per deformazione il materiale viene deformato plasticamente e non asportato esso manifesta un incrudimento dovuto alla deformazione plastica a freddo subita.

Questo porta ad una maggiore resistenza dei filetti alla trazione (sia statica che dinamica) rispetto ai filetti ottenuti per maschiatura ad asportazione [1].

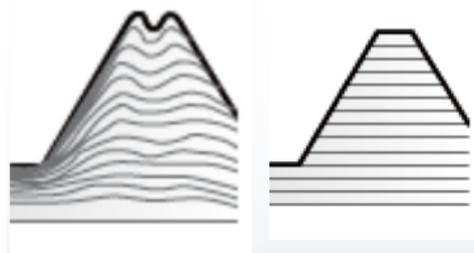


Figura 6 - A sinistra filetto ottenuto per maschiatura per deformazione (incrudimento e "piegatura" tipica sulla cresta del filetto); a destra filetto ottenuto per maschiatura ad asportazione (no incrudimento e profilo netto sulla cresta del filetto)

Come mostrato in Figura 6 (pagina precedente) la filettatura ottenuta da un processo di maschiatura per deformazione presenta un inconveniente: è la caratteristica “piegatura” che si osserva sulle creste dei filetti del materiale lavorato, non osservata invece se viene eseguita una maschiatura ad asportazione.

Tale “piegatura” è dovuta al fatto che il materiale viene spinto tra le creste dei filetti del maschio a rullare, come mostrato nella pagina precedente in Figura 5.

Questa “piegatura” talvolta non può essere accettata e ne sono esempi il settore dell’industria alimentare e medica, in quanto questa zona può costituire un ambiente favorevole per la formazione e l’annidamento di batteri, oppure il settore aereospaziale, per problemi di resistenza a fatica dal momento che queste sono zone di invito alla creazione e alla propagazione di cricche.

Poiché il profilo filettato del foro viene ottenuto tramite la spinta progressiva del materiale tra i filetti del maschio, nel processo di maschiatura per deformazione assume grande importanza il valore del diametro del preforo (realizzato nell’operazione di foratura che precede la maschiatura): questo valore influenza in maniera importante l’altezza del filetto che si ottiene sul materiale lavorato, come mostrato nelle figure successive.

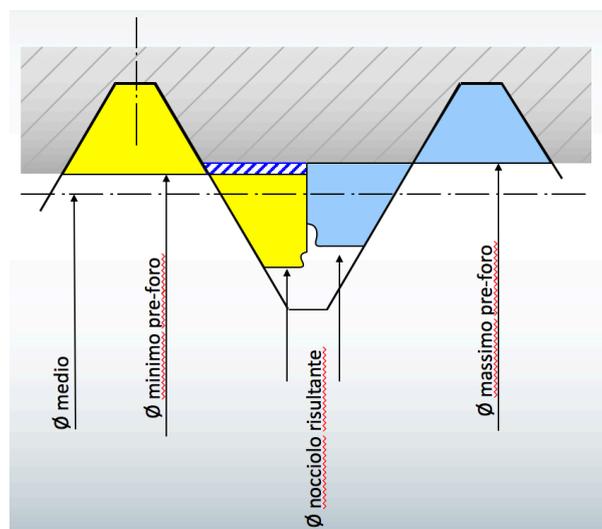


Figura 7 - Influenza del diametro di preforo sull’altezza del filetto realizzato nel materiale lavorato; in figura viene riportato il diametro di nocciolo risultante del foro, che è legato all’altezza del filetto ottenuto

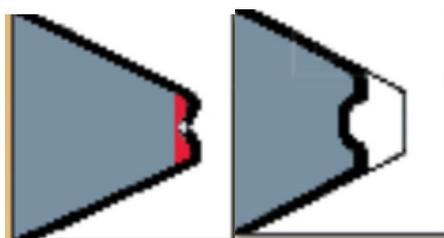


Figura 8 - A sinistra filetto ottenuto (in grigio) con un diametro di preforo troppo piccolo, in rosso è segnata la cresta ideale del filetto; a destra filetto ottenuto con un diametro di preforo troppo grande, la linea nera sottile segna il profilo ideale del filetto

Rispetto alla maschiatura per asportazione si può sottolineare come la maschiatura per deformazione richieda che l'operazione di foratura sia più precisa e che il valore del diametro di preforo sia maggiore.

Nella maschiatura per deformazione è necessario un uso adeguato di lubrorefrigerante (oli o loro emulsioni) soprattutto in veste di lubrificante: si cerca di ridurre l'attrito che si manifesta nel processo di maschiatura, con chiari benefici sugli sforzi richiesti per la lavorazione [2].

Il sistema di lubrificazione del maschio può essere esterno oppure interno: nel primo caso il lubrorefrigerante viene spruzzato dall'esterno sull'utensile durante la lavorazione mentre nel secondo caso il maschio presenta al suo interno dei fori di lubrificazione per il passaggio del fluido.

I fori di lubrificazione possono presentare un'uscita dal maschio puramente assiale oppure presentare anche delle uscite radiali (esempi riportati in Figura 9 nella pagina seguente).

Per entrambi i sistemi nelle zone ribassate tra i lobi (quelle legate alla "spoglia radiale" in Figura 3 a pagina 4) il maschio può presentare dei piccoli canalini per facilitare il passaggio del lubrorefrigerante nel raggiungere in quantità adeguata la zona di lavoro.

Questo è utile soprattutto nei casi di lubrificazione esterna dell'utensile con la richiesta di filettare fori profondi, in quanto vi è la necessità che il lubrificante possa arrivare in maniera adeguata nel tratto di imbocco del maschio anche quando questo sta filettando la parte più profonda del foro.

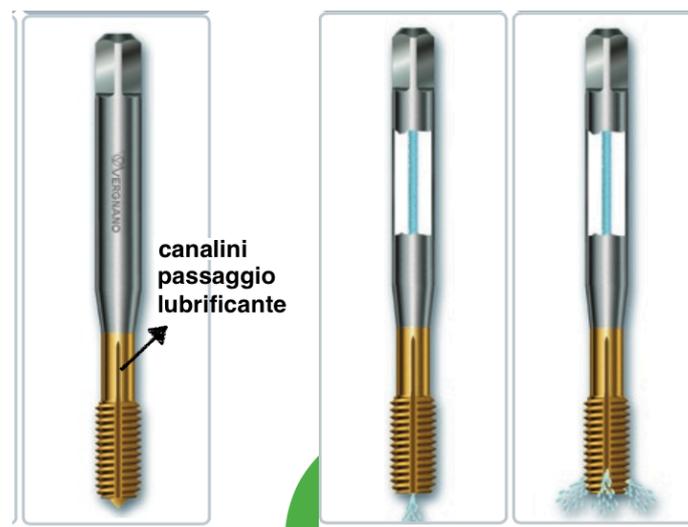


Figura 9 - A sinistra maschio con sistema di lubrificazione esterna (no fori di lubrificazione interni) con indicazione scanalatura per passaggio fluido; al centro sistema di lubrificazione interna con uscita fluido assiale; a destra sistema di lubrificazione interna con uscita fluido anche radiale; in tutti e 3 i maschi si può notare il rivestimento in TiN (zona colore oro)

In Figura 9 è inoltre visibile il rivestimento in nitruro di titanio (TiN) dei maschi: questi utensili vengono ricoperti con film protettivi allo scopo principale di ridurre gli attriti nella maschiatura ed aumentare la resistenza all'usura del maschio.

La grandezza fisica di maggiore interesse nella maschiatura (sia per deformazione che per asportazione) è il momento torcente.

L'obiettivo generale è diminuire il momento torcente richiesto nel processo così da ridurre le sollecitazioni e la potenza assorbita dal mandrino, ricordando che la potenza può essere espressa come:

$$P = \frac{M_t \cdot 2 \cdot \pi \cdot N}{60}$$

dove:

- P è la potenza espressa in [W];
- M_t è il momento torcente espresso in [Nm];
- N è la velocità di rotazione del mandrino espressa in [giri/min].

L'andamento tipico del momento torcente in un'operazione di maschiatura è riportato nell'immagine seguente.

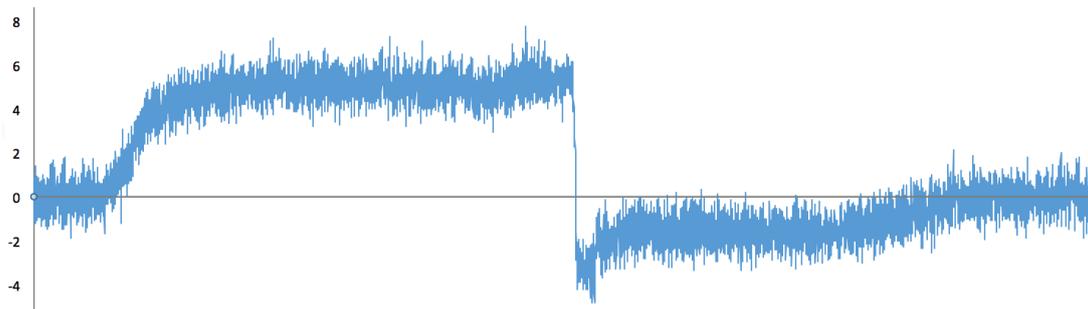


Figura 10 - Tipico andamento del momento torcente in un processo di maschiatura (il grafico riportato è stato registrato durante le prove)

Osservando Figura 10 si può notare come vi siano 4 tratti principali che caratterizzano il segnale **[2]**, **[3]** (verranno ripresi ed approfonditi nel capitolo 3.2):

- una crescita iniziale legata all'ingresso dell'imbocco del maschio nel foro da filettare;
- un tratto di plateau che corrisponde all'ingresso della restante parte filettata del maschio;
- un'inversione di segno legata all'inversione del verso di rotazione del maschio per estrarlo dal foro;
- un tratto finale di valori negativi in corrispondenza della corsa di uscita del maschio.

La maschiatura per deformazione è una valida alternativa al più classico processo di maschiatura per asportazione e negli ultimi anni si è sostituita in gran parte a quest'ultima, per via dei vantaggi che presenta [1].

Si possono sottolineare i seguenti aspetti:

- assenza di trucioli durante la lavorazione, di conseguenza maggiore affidabilità del processo (si evitano i problemi legati alla formazione dei trucioli¹) e non sono necessarie le operazioni per il loro smaltimento a valle della lavorazione;
- possibilità di filettare sia fori ciechi che passanti con un unico maschio, con un vantaggio nella riduzione dei tempi evitando un eventuale cambio utensile. Questo non è possibile con i maschi ad asportazione per un discorso legato alla direzione di evacuazione del truciolo, infatti non è possibile maschiare un foro cieco con un maschio che evacua i trucioli nel verso di avanzamento durante la discesa nel foro (trucioli evacuati verso la punta del maschio), poiché si accumulerebbero sul fondo del foro e non permetterebbero un ulteriore avanzamento del maschio;
- profondità di maschiatura elevata anche per fori ciechi, non essendoci possibile accumulo di trucioli sul fondo del foro; a differenza del punto precedente, l'accumulo ora considerato è legato alla possibilità della presenza di truciolo anche utilizzando un maschio ad asportazione con corretto verso di evacuazione del truciolo;
- maggiore vita utile dell'utensile, per via dell'assenza degli spigoli taglienti e la conseguente riaffilatura richiesta;
- maggiore resistenza alla rottura del maschio dovuta ad una sezione resistente più grande (non ci sono le scanalature per l'evacuazione del truciolo che

¹ Ad esempio danneggiamento del maschio dovuto all'intasamento dei trucioli nel foro per una loro non corretta evacuazione.

riducono la sezione trasversale del maschio, come visibile in Figura 3 a pagina 4);

- migliore finitura superficiale del filetto ottenuto dalla maschiatura, dal momento che viene lavorato per deformazione plastica e non per asportazione;
- maggiore resistenza alla trazione (sia statica che dinamica) della filettatura ottenuta sul pezzo lavorato, grazie all'incrudimento del materiale;
- maggiori velocità di rotazione del mandrino ammesse, con conseguente riduzione dei tempi ciclo.

Di contro vi sono alcune limitazioni nell'utilizzo della maschiatura per deformazione, legate al fatto che si lavora il materiale per deformazione plastica **[1]**:

- il materiale da lavorare deve presentare un allungamento a rottura non inferiore circa a 7÷10% e un carico di rottura alla trazione non superiore a circa 1200 MPa;
- occorre una buona lubrificazione per via dell'importante attrito che si genera durante la lavorazione (come illustrato in precedenza riguardo al discorso della lubrificazione e dei film protettivi applicati sui maschi);
- dimensioni maggiori e tolleranze più precise del diametro dei prefiori rispetto a quanto richiesto per la maschiatura ad asportazione, in quanto la dimensione del prefioro influenza in maniera più importante la forma finale dei filetti ottenuti (vedere Figura 7 e Figura 8 a pagina 7);
- lo spessore delle pareti del foro da filettare non deve essere eccessivamente piccolo, poiché durante la lavorazione il maschio a rullare esercita una notevole spinta in senso radiale che potrebbe portare al cedimento di pareti sottili;
- maggiore potenza richiesta sul mandrino rispetto a quanto invece necessario per la maschiatura ad asportazione e ciò è dovuto ad un maggiore momento torcente riscontrato nel processo.

Capitolo 2

Organizzazione delle prove sperimentali

2.1 Maschi testati

I maschi utilizzati sono 8, 5 prodotti dalla Vergnano e 3 commercializzati da aziende concorrenti (per la privacy aziendale sono identificate come concorrente 1, 2 e 3), e in questa trattazione verranno indicati tramite la nomenclatura “*MF0...*”.

Sono tutti M8 x 1.25 mm e vengono riportati nella tabella seguente insieme alle loro caratteristiche che sono state considerate in questo lavoro (verranno spiegate più in dettaglio nei rispettivi capitoli di confronto tra i maschi, capitoli da 4.1 a 4.4):

Tabella 1- Maschi testati e loro caratteristiche considerate

Utensile	Produttore	N° lobi	Angolo imbocco [°]	Rapporto spoglia	Raggio cresta filetto R1 [mm]	Rugosità Sa [μm]	Coating
MF01	Vergnano	5	9,00	0,160	0,120	0,108	AlCrN
MF02	Vergnano	5	9,00	0,104	0,120	0,108	TiN
MF03	Concorrente 1	5	10,33	0,172	0,110	0,150	TiCN
MF04	Concorrente 2	7	7,67	0,060	0,095	0,093	TiN
MF05	Concorrente 3	5	9,00	0,148	0,090	0,111	TiCN
MF07	Vergnano	5	9,00	0,160	0,128	0,150	AlCrN
MF07 modifica	Vergnano	5	9,00	0,160	0,128	0,108	AlCrN
MF08	Vergnano	5	9,00	0,160	0,113	0,150	AlCrN

Per quanto riguarda i maschi prodotti dalla Vergnano, l'MF02 corrisponde al maschio attualmente commercializzato dall'azienda mentre gli altri sono i vari prototipi testati per sostituire il maschio MF02.

È presente un *"MF07 modifica"* in quanto il maschio MF07 è stato successivamente modificato in una variante caratterizzata da una minore rugosità superficiale tramite un'ottimizzazione del processo di rettifica del maschio (vedere colonna "Rugosità Sa" in Tabella 1).

2.2 Materiali lavorati nelle prove

I materiali da maschiare scelti per i test sono 4 acciai.

Questa scelta è legata all'avere un range di acciai lavorabili che vadano da materiali più duri e difficili da lavorare (come l'X155) fino a materiali più teneri (quale l'S235).

Gli acciai scelti vengono riportati di seguito insieme alla loro composizione chimica e alle caratteristiche meccaniche di carico di snervamento, allungamento a rottura e durezza Brinell.

I valori riportati sono indicativi, in quanto non sono state effettuate analisi chimiche o meccaniche sui materiali utilizzati ma sono state consultate delle schede tecniche su Internet [4], [5], [6] e [7]. Gli acciai sono indicati secondo le denominazioni UNI.

— X155CrVMo121KU (qui abbreviato con X155), acciaio per lavorazioni a freddo

<i>Composizione chimica [%]</i>								
C	Si	Mn	V	Mo	Cr	P max	S max	
1,50 ÷ 1,60	0,10 ÷ 0,40	0,15 ÷ 0,45	0,90 ÷ 1,10	0,60 ÷ 0,80	11,0 ÷ 12,00	0,025	0,035	
R_{p0,2} [MPa] min			A₅ [%] min		HB max			X155
420			9		250			

— 16MnCr5, acciaio da cementazione

<i>Composizione chimica [%]</i>						
C	Si	Mn	Cr	P max	S max	
0,14 ÷ 0,19	0,10 ÷ 0,40	1,00 ÷ 1,30	0,80 ÷ 1,10	0,025	0,035	
R_{p0,2} [MPa] min		A₅ [%] min		HB max		16MnCr5
350		15		207		

– C45, generico acciaio da costruzione

<i>Composizione chimica [%]</i>							
C	Si	Mn	Cr max	Mo max	P max	S max	Ni max
0,45	0,10 ÷ 0,40	0,50 ÷ 0,80	0,40	0,10	0,025	0,035	0,40
R_{p0,2} [MPa] min			A₅ [%] min			HB max	
310			16			210	
C45							

– S235JR (qui abbreviato con S235), acciaio da costruzione

<i>Composizione chimica [%]</i>					
C max	Mn max	P max	S max	N max	Cu max
0,17	1,40	0,025	0,035	0,012	0,40
R_{p0,2} [MPa] min		A₅ [%] min		HB max	
235		15		140	
S235					

Gli acciai X155, C45 e S235 si presentano come blocchi rettangolari con presenti sulla faccia da lavorare 441 prefiori da maschiare mentre l'acciaio 16MnCr5 è un cilindro che presenta 120 prefiori sulla singola faccia. Ogni blocco di acciaio viene lavorato su due facce opposte. Nelle immagini seguenti sono visibili alcuni blocchi di lavoro.

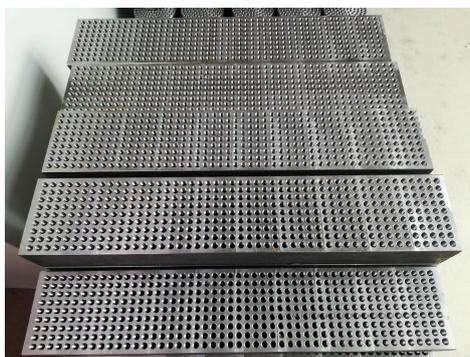


Figura 11 - Blocchi di lavoro degli acciai X155, C45 e S235



Figura 12 - Blocchi di lavoro dell'acciaio 16MnCr5

Una volta realizzate la foratura e successivamente la maschiatura dei fori presenti su una faccia di lavoro, il blocco di acciaio viene ribaltato e si lavora l'altra faccia.

Lavorate entrambe le facce del blocco, questo viene cambiato e si continua la maschiatura di nuovi fori fino a raggiungere il numero di prove totali voluto (la singola prova viene intesa come la maschiatura per deformazione di un foro).

Dal momento che le prove avevano lo scopo di valutare il comportamento dei maschi nella loro prima fase di vita in esercizio (vedere Introduzione), per i vari acciai è stato scelto di lavorare 5 facce.

Questa scelta porta a filettare non più di circa 2'000 fori² per ogni maschio testato su un determinato acciaio (una faccia di lavoro degli acciai presenta al massimo 441 prefori da maschiare) e ciò risulta essere un buon compromesso tra un campione abbastanza ampio di dati e un numero non eccessivo di prove da condurre.

Unica eccezione è l'acciaio X155 sul quale sono state lavorate solamente 2 facce di lavoro, in quanto tale materiale risulta essere il più difficile da lavorare (presenta i valori più elevati di $R_{p0,2}$ e HB) e perciò tende a presentare sui maschi un'usura più precoce rispetto agli altri acciai (questo fenomeno è stato riscontrato anche nelle prove, vedere in seguito capitolo 3.3).

² Se si volesse studiare una durata dei maschi occorrerebbe andare almeno oltre le 10'000 prove per ogni singolo maschio.

2.3 Parametri di prova

Su ogni singolo acciaio i dati siano stati raccolti testando un solo maschio per tipo e nuovo.

I fori da maschiare sono tutti ciechi e presentano una profondità utile di filettatura pari a 22,5 mm e un valore del diametro di preforo pari a 7,45 mm (legato al fatto che vengono testati maschi M8, vedere capitolo 2.1).

È stato scelto un sistema di lubrificazione esterna del maschio (capitolo 0) con l'utilizzo di una emulsione d'olio.

Per quanto riguarda la velocità di taglio (v_t) sono stati scelti 4 valori, ognuno per la lavorazione di un acciaio e il cui valore è ritenuto tipico nelle condizioni di processo in cui si è operato.

La velocità v_t considerata non è legata all'asportazione di materiale ma alla sua deformazione (è un processo di maschiatura per deformazione) e corrisponde alla velocità che si riscontra tangente al diametro esterno del maschio.

Il valore di v_t voluto viene ottenuto impostando sulla macchina di lavoro la velocità di rotazione del mandrino.

Tabella 2 – Valori di v_t scelti per i vari acciai

Acciaio	v_t [m/min]
X155	12
16MnCr5	20
C45	25
S235	35

Da Tabella 2 si può notare come la velocità scelta sia crescente con la diminuzione del valore di $R_{p0,2}$ del materiale (vedere valori $R_{p0,2}$ in capitolo 2.2).

2.4 Centro di lavoro utilizzato

Le prove sono state effettuate utilizzando il centro di lavoro verticale a controllo numerico Bridgeport [8] VMC 800 XP.

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva di alcune delle principali caratteristiche della macchina.

Tabella 3 – Caratteristiche principali centro di lavoro Bridgeport VMC 800 30

Bridgeport VMC 800 XP	
Assi controllati	3
Corsa asse X	800 mm
Corsa asse Y	510 mm
Corsa asse Z	500 mm
Lunghezza tavola	1000 mm
Larghezza tavola	490 mm
Velocità max mandrino	12000 rpm
Potenza motore mandrino	13 kW
Lunghezza x larghezza x altezza	2960 x 2168 x 2570 mm



Figura 13 – Centro di lavoro Bridgeport 800 XP utilizzato per le prove (il portellone di sicurezza è aperto per mostrare l'interno dove si può notare un blocco di acciaio 16MnCr5); a destra particolare della zona di lavoro. La presenza dei trucioli è dovuta all'operazione di foratura per realizzare i prefori da maschiare.

2.5 Sensore utilizzato per la registrazione dati

La registrazione dei dati rilevati nel processo di maschiatura è stata effettuata tramite il sensore wireless *Spike* [9] dell'azienda tedesca Pro-micron.

Di seguito viene riportata un'immagine illustrativa del sensore e delle relative grandezze fisiche che può misurare in un processo di lavoro.



Figura 14 – Sensore wireless Spike della Pro-micron, utilizzato nella rilevazione dei dati durante le prove; sono inoltre visibili le grandezze misurate dal sensore

Come si può notare dalla figura il sensore misura 5 grandezze:

- la spinta assiale registrata sul sensore (espressa in [N] e con valori positivi per indicare una compressione);
- il momento torcente riscontrato sul sensore (espresso in [Nm]);
- i momenti flettenti dell'utensile attorno ai 2 assi X e Y (espressi in [Nm] e le coordinate X e Y sono quelle del sensore e non della macchina di lavoro);
- la temperatura registrata sul sensore (espressa in [°C]) e questa è una grandezza che non deve essere collegata al processo indagato o all'utensile utilizzato, in quanto è un controllo di temperatura legato puramente al corretto funzionamento dei circuiti elettronici del sensore.

La precedente Figura 14 mostra come l'utensile³ viene inserito e bloccato nel sensore, che a sua volta verrà bloccato nel mandrino della macchina di lavoro (si può notare la zona in alto del sensore per l'accoppiamento con il mandrino).

Quindi le grandezze misurate di spinta assiale e di momento torcente sono quelle che in esercizio e senza il sensore si avrebbero nella zona di interfaccia tra l'utensile e il mandrino del centro di lavoro, mentre i momenti flettenti indicano la flessione nelle 2 direzioni dell'asse dell'utensile rispetto all'asse del mandrino.

La procedura di registrazione dati è stata impostata nel seguente modo: quando il sensore riscontra un momento torcente ≥ 2 Nm, registra i dati rilevati nell'arco di tempo che va da 0,5 s precedenti all'istante in cui si è attivato il "trigger" dei 2 Nm fino a 3,5 s successivi a questo "trigger" (per un totale di 4 s di processo registrati).

Dal momento che il periodo di campionamento è pari a 0,0004 s, vengono registrati 10'000 valori per ogni grandezza fisica che il sensore può rilevare.

Il "trigger" è stato impostato sul momento torcente a 2 Nm a seguito dell'esperienza nel processo da parte dell'azienda e corrisponde circa al valore che si può registrare all'inizio della maschiatura del foro.

I valori registrati sono trasmessi in maniera wireless su un computer di raccolta dati vicino alla postazione di prova (i dati vengono raccolti in file di formato ".txt").



Figura 15 - Schema comunicazione wireless tra sensore e computer con modem

³ In Figura 14 nella pagina precedente viene presentata una fresa ma nel caso considerato sarà un maschio a rullare.

Capitolo 3

Analisi dei dati di prova

Il sensore utilizzato fornisce i dati come di file di testo (.txt) e per effettuare l'analisi questi file sono stati aperti su Microsoft Excel. Ogni file di testo corrisponde ai dati acquisiti dal sensore nell'esecuzione di una singola prova (la maschiatura per deformazione di un singolo foro). Il file .txt aperto su Excel presenta diverse colonne di dati (Figura 17), ciascuna legata alle grandezze misurate durante la prova.

```
#SPIKE measurement file - Tool Measurement / Analyser 2016 (SPIKE@pro-micron GmbH)
#date: 01/07/2020 operator: Alessandro
#process: MB 6HX P180N
#tool: MF01
#material: X155
#tool gage: 188
#d = 8          z = 5
#ap =          ae =
#vc = 12       n = 477
#f =          vf =
#x =
#cooling: Flood
#unit type: metric
#note:
#BTkBlue Version: 13.5
#READ Version: READ 1.2 SW-Version: 0x0008
#SPIKE Version: SPIKE 1.2
#SW-Version: 0x0006
#SN-Nr.: 0xa2de
#cal tension: 2,873618
#cal torsion: 0,027606
#cal bending moment X: 0,023440
#cal bending moment Y: 0,022931
#lever arm: 60,0
#SPIKE position: vertical
#autoBM: 0,679741
#triggerchannel: Torsion [Nm] triggervalue: 2.000000
###
Tension;Torsion;Bending moment X;Bending moment Y;Time;Temperature
[N];[Nm];[Nm];[Nm];[s];[°C]
-17,816326;0,055121;0,149640;0,183448;100,238000;26,250000
-20,115326;-0,441696;-0,515680;-0,917240;100,238400;26,250000
8,628894;0,441696;-0,562568;-0,091724;100,238000;26,250000
-54,598742;1,498724;1,218890;0,183448;100,239200;26,250000
-100,576630;0,386484;0,703200;0,000000;100,239600;26,250000
-80,145078;-0,936604;-0,781708;-0,017240;100,240000;26,250000
```

Figura 16 – Esempio di file .txt con i dati rilevati e forniti sul computer dal sensore

	A	B	C	D	E	F	G
1	Tension	Torsion	Bending moment X	Bending moment Y	Time	Temperature	
2	[N]	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[s]	[°C]	
3	-68,966832	-0,1960026	0,009376	0,45219932	100,238	26,25	
4	28,73618	-0,6929106	-0,646944	-0,64848868	100,2384	26,25	
5	57,47236	0,1904814	-0,693824	0,17702732	100,2388	26,25	
6	-5,747236	1,2395094	1,087616	0,45219932	100,2392	26,25	
7	-51,725124	0,1352694	0,571936	0,26875132	100,2396	26,25	
8	-11,494472	-1,1898186	-0,412544	-0,64848868	100,24	26,25	
9	-28,73618	0,5217534	-0,271904	-0,05228268	100,2404	26,25	
10	-155,175372	0,1352694	0,196896	0,13116532	100,2408	26,25	
11	-91,955776	-1,3002426	-0,412544	0,03944132	100,2412	26,25	
12	201,15326	0,0800574	0,712576	-1,15297068	100,2416	26,25	
13	68,966832	-1,0793946	-1,78144	0,08530332	100,242	26,25	
14	-155,175372	0,0248454	0,993856	-0,18986868	100,2424	26,25	
15	51,725124	-0,3616386	-0,693824	0,22288932	100,2428	26,25	
16	-5,747236	0,0248454	-0,271904	0,77323332	100,2432	26,25	
17	-5,747236	-0,0855786	0,478176	0,54392332	100,2436	26,25	
18	-51,725124	-0,0855786	-0,834464	0,77323332	100,244	26,25	
19	80,461304	0,5217534	-0,084384	-0,09814468	100,2444	26,25	
20	17,241708	0,4113294	-0,412544	-0,14400668	100,2448	26,25	
21	34,483416	0,7978134	0,618816	0,63564732	100,2452	26,25	
22	17,241708	1,0738734	0,056256	-0,51090268	100,2456	26,25	
23	-63,219596	-0,7481226	-0,412544	-0,83193668	100,246	26,25	
24	68,966832	-0,0855786	0,478176	0,45219932	100,2464	26,25	
25	0	-1,0241826	-0,834464	-0,23573068	100,2468	26,25	
26	-11,494472	0,5769654	0,384416	0,49806132	100,2472	26,25	
27	-80,461304	-1,5210906	-0,084384	-0,09814468	100,2476	26,25	
28	17,241708	-0,5277266	0,009376	0,31661332	100,248	26,25	

Figura 17 – Esempio di file .txt fornito dal sensore una volta aperto su Excel

I valori misurati relativi all'indicazione del tempo e della temperatura non sono stati considerati mentre ci si è focalizzati sul momento torcente, sulla spinta assiale e sul momento flettente.

3.1 Analisi del momento flettente

Per quanto riguarda i due momenti flettenti (attorno a X e Y) registrati dal sensore, si è voluto analizzare i loro valori medi nelle singole prove.

Questi valori sono stati inseriti in un diagramma con sulle ascisse i valori medi del momento attorno a X e sulle ordinate quelli legati al momento attorno a Y (esempi riportati in Figura 18).

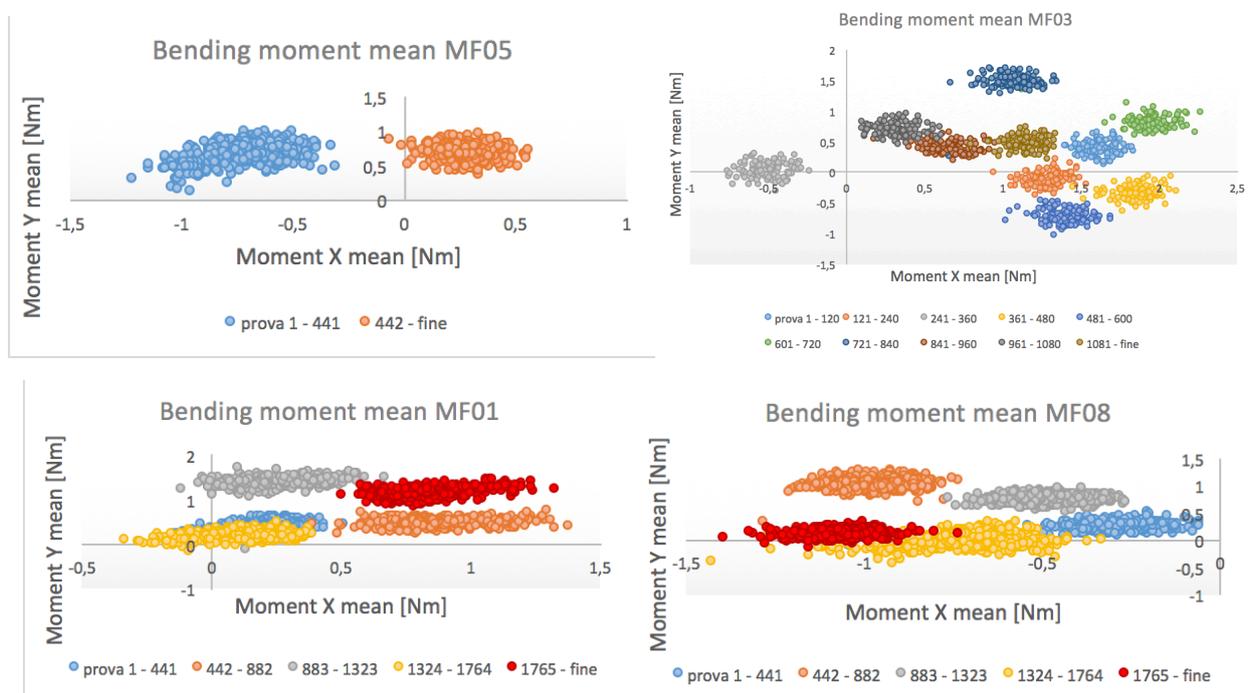


Figura 18 - Esempi di grafici legati al momento flettente ottenuti per i vari maschi testati (MF0...) sui diversi acciai lavorati: in alto acciaio X155 (a sinistra) e 16MnCr5 (a destra), in basso C45 (a sinistra) e S235 (a destra); in legenda nei grafici è visibile la suddivisione delle prove per facce di lavoro dei blocchi di acciaio (vedere capitolo 2.2)

I grafici sono ottenuti diagrammando i valori medi di ogni prova suddividendoli secondo maschio testato su determinato acciaio lavorato (ad esempio grafico dei valori medi per il maschio MF01 sull'acciaio X155, poi valori medi per MF02 su X155 e così via). Ogni singolo punto sul diagramma corrisponde alla coppia di valori medi registrati in una singola prova.

Si è voluto valutare se questi punti si accumulino in determinati quadranti del diagramma, sintomo che il maschio tende a flettere attorno a direzioni preferenziali durante la maschiatura, oppure se formino un cluster di punti attorno all'origine degli assi, caso in cui il maschio non ha direzioni preferenziali di flessione.

Tuttavia è stato notato come i dati registrati siano mascherati da un effetto legato al cambio della faccia di lavoro dell'acciaio in prova (dove sono presenti i fori da filettare).

I diagrammi mostrano diversi cluster di punti che si distinguono tra loro secondo le varie facce lavorate: per gli acciai X155, C45 e S235 i vari cluster sono formati ciascuno dalle 441 prove effettuate sulla singola faccia di lavoro e allo stesso modo l'acciaio 16MnCr5 presenta cluster composti da 120 punti (capitolo 2.2).

Quanto osservato indica che durante il cambio della faccia di lavoro viene introdotto un errore di perpendicolarità tra la faccia e il maschio (l'asse del maschio non risulta perfettamente parallelo all'asse dei fori), che introduce una flessione del maschio e influenza in maniera importante i risultati del momento flettente.

Pertanto non è possibile collegare la posizione dei punti nei vari quadranti ad una valutazione sulle direzioni preferenziali di flessione del maschio, in quanto questa posizione è da attribuire principalmente all'errore legato alle diverse facce di lavoro dei blocchi.

A seguito di quanto detto non è stata condotta un'ulteriore analisi del momento flettente ma ci si è concentrati sull'analizzare la spinta assiale e il momento torcente, che in genere risultano di maggiore interesse per un'analisi di un processo di maschiatura.

3.2 Analisi del momento torcente

L'andamento tipico del momento torcente in un processo di maschiatura può essere schematizzato come segue (Figura 19) e si possono distinguere i seguenti tratti [2], [3]:

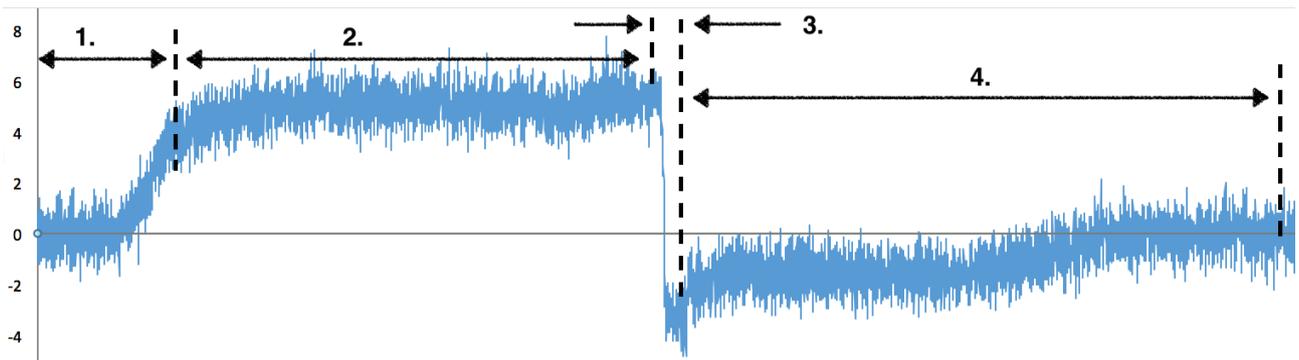


Figura 19 - Tipico andamento del momento torcente in un processo di maschiatura; il grafico riportato è un segnale registrato dal sensore durante le prove

1. una crescita iniziale dal valore nullo (maschio non ancora in contatto con il materiale da lavorare) fino ad un determinato valore che caratterizza un successivo tratto di quasi plateau del segnale. Tale crescita si ha in corrispondenza dell'entrata dell'imbocco del maschio nel foro da maschiare;
2. una zona di quasi plateau del segnale, che inizia quando tutto l'imbocco del maschio è entrato nel foro e comincia ad entrare anche la zona cilindrica filettata del maschio. Il tratto è stato definito di "quasi" plateau poiché in realtà presenta una leggera crescita dei valori con l'avanzare del processo: questa crescita è dovuta al maggiore attrito che si viene a generare per l'ingresso nel foro di una porzione di maschio sempre maggiore. Tuttavia in genere l'aumento dei valori non si riscontra in maniera marcata;

3. una zona di inversione del segno, cioè si passa da registrare valori positivi a rilevare valori negativi: quanto detto corrisponde all'inversione del verso di rotazione del maschio una volta che questo è arrivato al fondo del foro e deve invertire il verso della sua corsa per essere estratto;
4. un ultimo tratto in cui si hanno valori negativi, cioè il maschio sta ruotando in verso opposto ai precedenti tratti per uscire dal foro appena filettato. Questo momento torcente è da attribuire all'attrito che si riscontra nell'estrarre il maschio dal foro e non ad un lavoro di deformazione legato alla maschiatura, infatti la filettatura del foro viene realizzata nei primi due tratti analizzati (punti 1. e 2.).

In genere è di interesse analizzare l'impatto che il momento torcente ha sul mandrino in termini di sforzi massimi al fine di ridurre il valore, perciò la scelta effettuata è stata quella di analizzare i valori massimi registrati nelle prove (da Figura 19 nella pagina precedente si può notare come il massimo del segnale si riscontri quando il maschio è in prossimità del fondo del foro).

Quindi si è proceduto a diagrammare i massimi registrati per ogni prova, suddividendoli per maschio testato su determinato acciaio lavorato (ad esempio andamento dei massimi per il maschio MF01 sull'acciaio X155, poi andamento massimi per MF02 su X155 e così via).

I grafici così ottenuti presentavano una certa oscillazione dei valori (esempio in Figura 20).

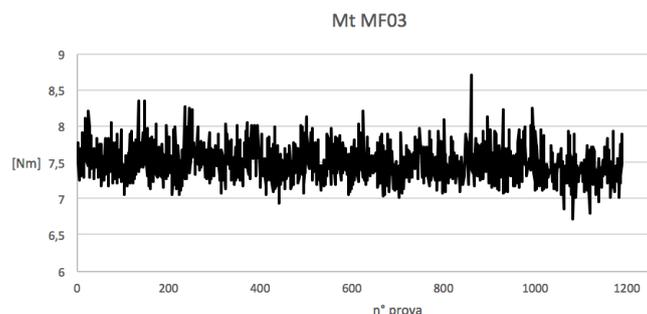


Figura 20 - Andamento dei massimi del momento torcente per il maschio MF01 che lavora l'acciaio 16MnCr5

Quanto osservato è riconducibile al fatto che per ogni prova è stato estratto il valore massimo: questi valori sono legati ad un singolo punto del segnale registrato e pertanto, valutando un insieme numeroso di prove, è prevedibile che vi sia una certa oscillazione di un valore puntuale, quale è il valore massimo.

Per eliminare la presenza dell'oscillazione è stato scelto di effettuare una media mobile dei valori massimi, in quanto è di maggiore interesse valutare un andamento medio estrapolato dall'insieme completo delle prove senza soffermarsi sull'analizzare le singole oscillazioni dei valori.

È stata ritenuta opportuna una media mobile ogni 30 prove, in quanto permette una riduzione dei dati da osservare (ogni 30 valori si prende un solo valore corrispondente alla media di questi) senza però modificare in maniera importante l'andamento che si può osservare dai valori grezzi (senza media mobile).

In Figura 21 è mostrato il risultato ottenuto applicando la media mobile ai valori riportati in Figura 20 nella pagina precedente.

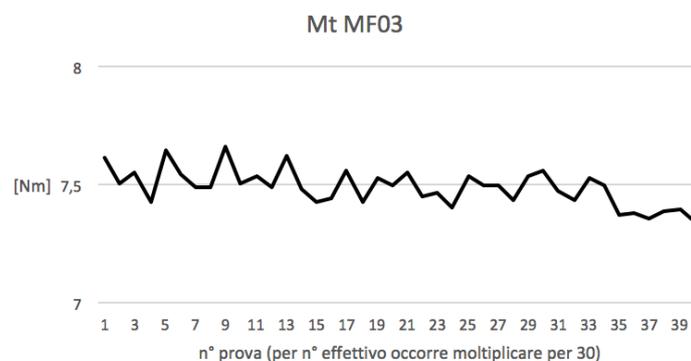


Figura 21 - Andamento della media mobile dei massimi del momento torcente per il maschio MF01 che lavora l'acciaio 16MnCr5

Una volta effettuata la media mobile si è potuto notare come per ogni grafico i punti si assestano in generale attorno ad un certo valore, nell'esempio in Figura 21 i punti si trovano tutti nell'intorno del valore di 7.5 Nm.

Un andamento simile si può notare anche nel grafico con i dati grezzi (senza media mobile), però risulta meno evidente per via della maggiore oscillazione dei valori. Quanto osservato può essere definito come un tratto di plateau del massimo valore di momento torcente riscontrabile ad inizio vita in esercizio di un maschio ed è il fenomeno che normalmente ci si aspetta.

Tuttavia sono state notate alcune particolarità:

- tutti i maschi testati (ad eccezione dell'MF08) sull'acciaio X155, dopo un primo tratto in cui le medie dei massimi si collocano nell'intorno di uno determinato valore, hanno presentato un aumento dei massimi registrati. Questo è sintomo di un probabile inizio di usura dell'utensile e per alcuni l'aumento dei massimi è stato contenuto (esempio maschio MF01 in Figura 22) mentre per altri è stato più marcato (esempio maschio MF02 in Figura 22). Il fenomeno osservato può essere ricondotto al fatto che l'acciaio X155 è quello più duro e difficile da lavorare tra gli acciai testati, quindi presenta sui maschi un inizio di usura più precoce rispetto a quanto si potrebbe vedere con gli altri materiali;

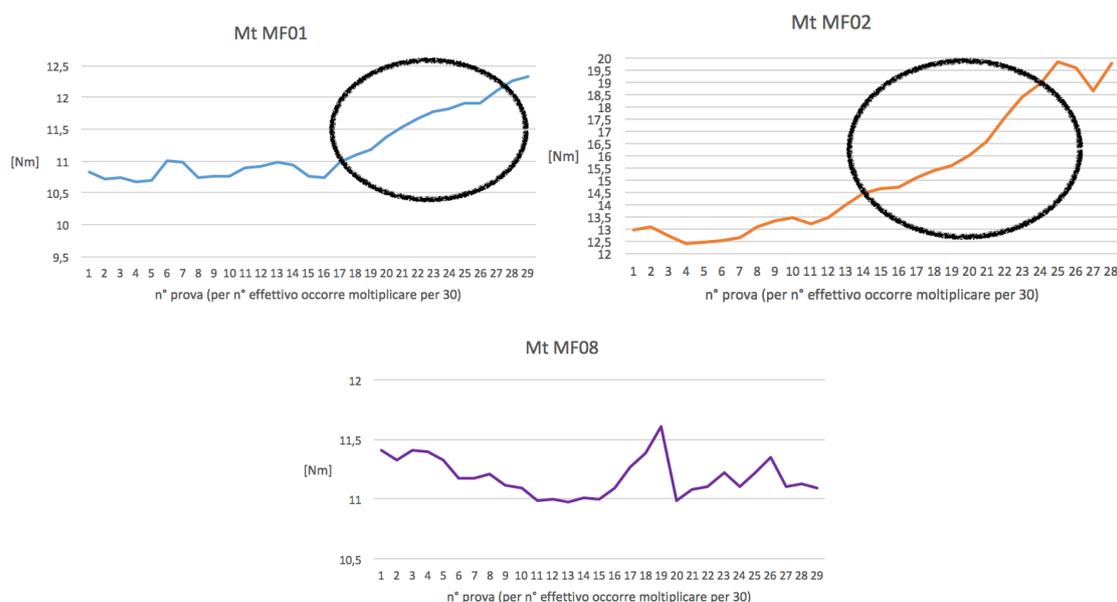


Figura 22 - Andamenti della media mobile dei massimi del momento torcente registrato sull'acciaio X155 per i maschi MF01, MF02 e MF08 (per i primi due maschi vi è anche l'indicazione della zona di crescita dei massimi)

- il maschio MF02 ha presentato sull'acciaio 16MnCr5 un primo tratto che si potrebbe definire di "rodaggio": i massimi registrati tendono a decrescere con l'avanzare delle prime prove, fino ad assestarsi attorno ad un certo valore (Figura 23).

Questo comportamento è già stato osservato in prove precedenti da parte dell'azienda, ricordando che il maschio MF02 è quello commercializzato dall'azienda;

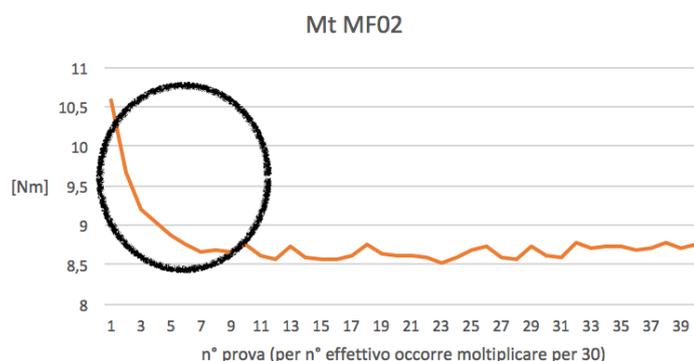


Figura 23 - Andamento della media mobile dei massimi del momento torcente registrato sul 16MnCr5 con il maschio MF02; vi è indicata la zona iniziale di "rodaggio" del maschio

- sull'acciaio C45 il maschio MF02 dopo circa 100 fori maschiati ha presentato un innalzamento (con forma simile a "scalino") dei valori registrati e il valore così raggiunto è stato mantenuto circa costante fino al termine delle prove (Figura 24).

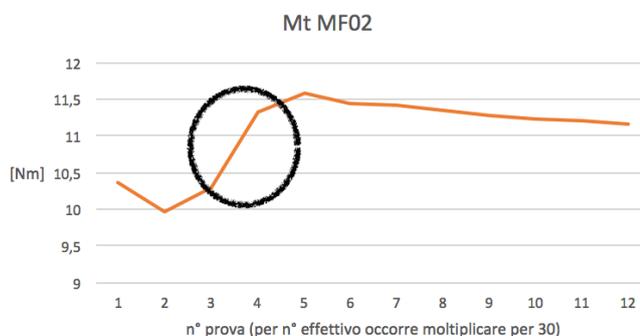


Figura 24 - Andamento della media mobile dei massimi del momento torcente per il maschio MF02 sul C45; vi è anche l'indicazione della zona della crescita a "scalino" dei massimi

Quanto osservato indica probabilmente una sorta di danneggiamento dell'utensile ma poiché sull'acciaio C45 tale comportamento è stato registrato solamente su questo maschio, il fenomeno potrebbe essere ricondotto ad un "danneggiamento occasionale" non avendo testato più MF02 uguali sul C45 (capitolo 2.3). Qualora si testassero più MF02 sul C45 e tutti presentassero lo stesso comportamento, si potrebbe dedurre come quanto osservato sia un fenomeno caratteristico del maschio quando lavora l'acciaio C45;

- il maschio MF05 sulle prove eseguite lavorando l'acciaio S235, dopo un primo tratto circa costante dei massimi, presenta un aumento esponenziale dei valori (Figura 25).

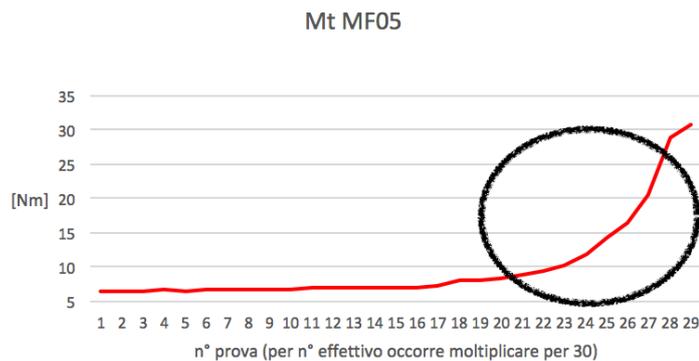


Figura 25 - Andamento della media mobile dei massimi del momento torcente per il maschio MF05 sull' S235; vi è anche l'indicazione della zona di crescita esponenziale dei massimi

Seguendo quanto detto nel punto precedente, questo comportamento potrebbe essere ricondotto ad un "danneggiamento occasionale", dal momento che sull'acciaio S235 il fenomeno si manifesta solo con il maschio MF05.

Per confrontare tra loro i maschi (capitoli 4.1 a 4.4) sono stati utilizzati i valori medi attorno a cui si assestano i massimi registrati del momento torcente, ovvero quanto è stato osservato a pagina 27 rispetto a Figura 21.

Perciò il valore di momento torcente considerato per ogni maschio su un determinato acciaio (da utilizzare nei confronti) risulta essere la media dei valori ottenuti dalla media mobile.

Per quanto riguarda le particolarità prima descritte, non sono stati considerati i dati legati ad una probabile usura (non sono indicativi per valutare il comportamento del maschio ad inizio vita in esercizio) e si è operato come segue:

- per le prove condotte sull'acciaio X155, la media per il confronto è stata valutata utilizzando i soli dati presenti nel tratto che precede l'inizio dell'aumento dei valori (zona di probabile inizio usura). Non è stato scelto di analizzare più nel dettaglio questo fenomeno in quanto sarebbe più appropriato condurre prove di durata e testare più maschi uguali, così da capire se l'usura riscontrata è veramente caratteristica di quel maschio oppure se quanto avvenuto può essere ricondotto ad un "danneggiamento occasionale" (vedere quanto detto nella pagina precedente riguardo il maschio MF02 sull'acciaio C45);
- per il caso in cui il maschio MF02 presenta una prima zona di "rodaggio", il valore medio è stato calcolato con i dati successivi a questo tratto iniziale;
- per le prove legate al maschio MF02 testato sull'acciaio C45, la media è stata calcolata con i valori presenti nel tratto che precede la crescita a "scalino" dei massimi. Ugualmente per le prove del maschio MF05 sull'acciaio S235, è stata considerata solamente la zona che precede l'aumento esponenziale dei valori registrati.

3.3 Analisi della spinta assiale

L'andamento tipico della spinta assiale in un processo di maschiatura può essere schematizzato come segue (Figura 26) e si possono distinguere i seguenti tratti [10]:

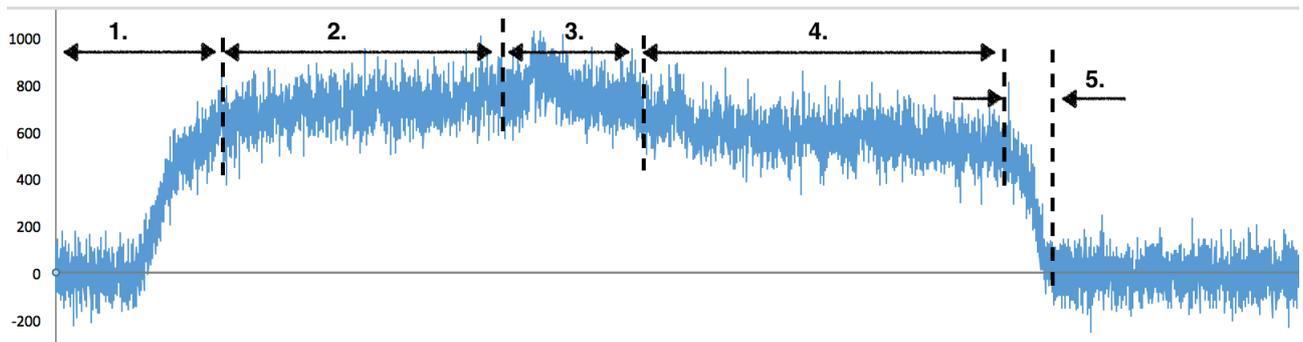


Figura 26 - Tipico andamento della spinta assiale in un processo di maschiatura; il grafico riportato è un segnale registrato dal sensore durante le prove

1. una crescita iniziale dal valore nullo (maschio non ancora in contatto con il pezzo da lavorare) fino ad uno stato di compressione (il sensore fornisce valori positivi di spinta assiale quando è di compressione). Questa crescita è legata all'ingresso dell'imbocco del maschio nel foro da filettare;
2. un primo tratto di compressione, con un valore circa costante, e legato al tratto di discesa del maschio nel foro;
3. una breve zona di flessione in cui il valore di compressione cresce (in corrispondenza del momento in cui il maschio raggiunge il fondo del foro) per poi diminuire, per via del cambio del verso di avanzamento del maschio (una volta arrivato al fondo del foro cambia verso di avanzamento per essere estratto);
4. un secondo tratto di compressione, ad un valore circa costante e simile a quello riscontrato al punto 2., che si ha in corrispondenza della corsa di ritorno del maschio dal foro;

5. una decrescita finale del valore di compressione fino al valore nullo, riscontrata durante la fuoriuscita dell'imbocco del maschio dal foro. Osservando l'intero segnale si può notare come durante tutto il processo vi sia sempre una spinta assiale di compressione verso il mandrino.

Alla pari del momento torcente anche la spinta assiale in genere viene analizzata in termini di valori massimi, con l'intento di ridurli.

Seguendo le stesse considerazioni espresse per il momento torcente (capitolo 3.2), sono stati considerati valori massimi di spinta assiale nelle varie prove ed è stata eseguita una media mobile di questi massimi (anche ora le prove sono state divise per maschio che lavora un determinato acciaio).

A differenza di quanto scelto per il momento torcente, in questo caso è stato ritenuto opportuno effettuare una media mobile ogni 20 prove (e non 30) per quanto descritto di seguito.

Nell'analizzare i grafici dei massimi della spinta assiale si è notato come sia visibile uno schema del segnale che si ripete per ogni faccia di lavoro dei blocchi di acciaio.

I massimi tendono a crescere durante la maschiatura dei primi fori della faccia, in seguito si stabilizzano attorno ad un determinato valore ed infine ridiscendono durante la maschiatura degli ultimi fori della faccia.

Tale schema si ripete per ogni faccia lavorata; un esempio di quanto detto è visibile in Figura 27 nella pagina seguente.

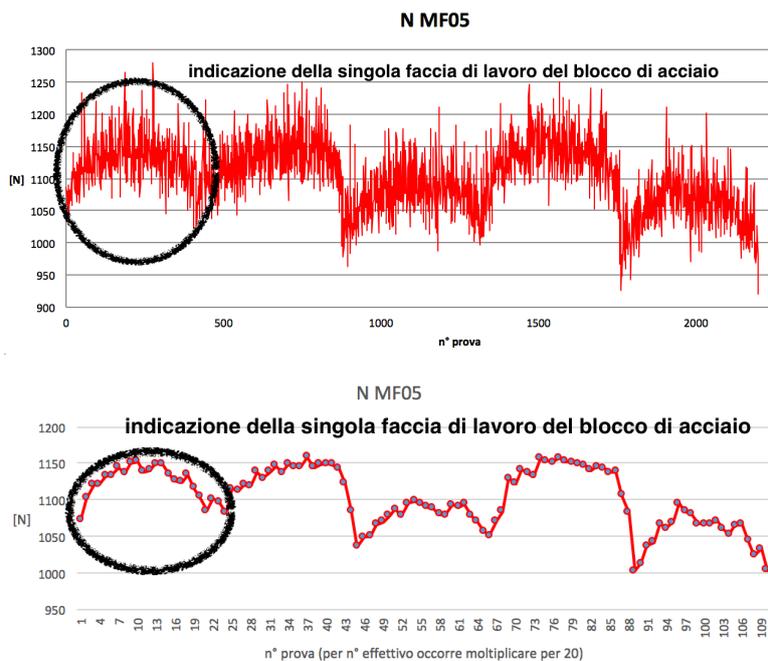


Figura 27 - Andamento dei massimi della spinta assiale per il maschio MF05 che lavora l'acciaio C45; in alto i dati estrapolati da tutte le singole prove, in basso il grafico ottenuto dopo aver effettuato la media mobile ogni 20 prove

Per continuare ad osservare dai grafici questo schema che si ripete è stato scelto di effettuare una media mobile ogni 20 prove, così da essere vicini ad un sottomultiplo del totale di fori da maschiare su ogni faccia, infatti per gli acciai X155, C45 e S235 vengono maschiati 441 fori per ogni faccia mentre per il 16MnCr5 i fori per faccia sono 120 (capitolo 2.2).

Se si eseguisse una media mobile scegliendo un valore molto diverso da un sottomultiplo dei fori presenti sulla singola faccia, verrebbero calcolati dei valori che all'interno di una stessa media considerano sia i dati ottenuti su una faccia di lavoro sia quelli legati ad un'altra faccia. Questo porterebbe a perdere l'indicazione del fenomeno osservato.

Quanto osservato è stato riportato al team di supporto e assistenza del sensore acquistato dalla azienda e lo stesso team ha indicato come anche loro avessero riscontrato questo fenomeno in alcune prove, da attribuire probabilmente ad un non

corretto fissaggio in macchina del blocco lavorato che potrebbe inclinarsi durante la maschiatura e quindi falsare il segnale misurato di spinta assiale.

L'indagine sulla causa non è stata approfondita in quanto sarebbe stato necessario eseguire dei test ad hoc per cercare di comprendere meglio questo comportamento (cosa non possibile da parte dell'azienda al momento delle prove).

Si è comunque potuto notare come questo fenomeno non influenzi in maniera marcata i dati raccolti: la massima differenza riscontrata tra i valori misurati in una singola faccia di lavoro⁴ si aggira intorno a 100 N, che corrisponde in generale a non più del 10% dei valori misurati.

Per confrontare tra loro i maschi (capitoli 4.1 a 4.4) è stato scelto di utilizzare la media di tutti i valori registrati per ogni maschio che lavora un determinato acciaio. Questa scelta porta ad utilizzare tutti i valori registrati (e non solo i maggiori o i minori di ogni faccia di lavoro) senza far perdere validità al confronto per via del fenomeno illustrato in precedenza: infatti lo schema legato alle facce di lavoro con cui si ripete il segnale di spinta assiale si riscontra in tutte le prove con influenza circa uguale. È stato osservato come le particolarità riscontrate nell'andamento dei massimi del momento torcente (legate a probabili fenomeni di usura, capitolo 3.2) si riscontrano anche nei massimi della spinta assiale.

In alcuni casi, alla pari di quanto mostrato dai dati del momento torcente, l'aumento dei valori è marcato (grafico in alto in Figura 28, si passa da circa 1150 N a 1300 N) mentre in altri casi non è molto evidente (grafico in basso in Figura 28, si passa da circa 1300 N a 1350 N).

⁴ Si intende la differenza tra i valori misurati dei primi/ultimi fori rispetto ai valori ottenuti dagli altri fori della faccia (vedere quanto detto riguardo Figura 27 a pagina 33).

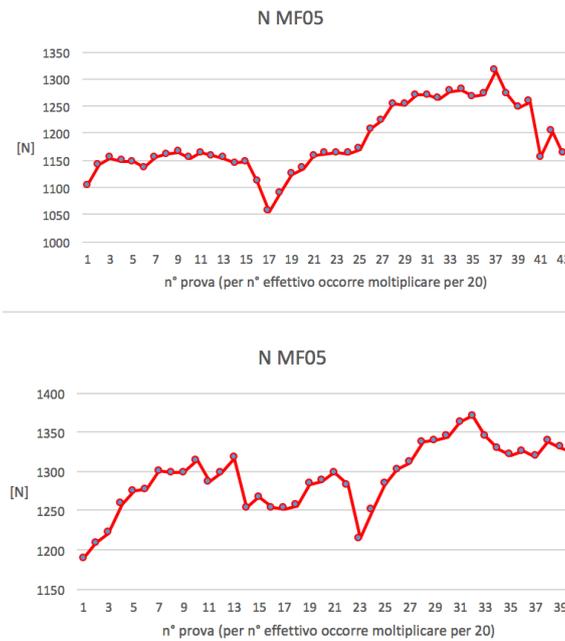


Figura 28 - In alto andamento della media mobile dei massimi della spinta assiale per il maschio MF05 che lavora l'acciaio S235, in basso il grafico relativo all'MF05 sull'X155

Per i casi legati alle particolarità riscontrate nel momento torcente, si è scelto di effettuare la media dei massimi di spinta assiale solamente tra i valori registrati nelle prove che precedono l'aumento visibile dai dati del momento torcente.

Questa scelta porta a calcolare una media che non viene influenzata da valori elevati di spinta assiale legati ad una sorta di danneggiamento del maschio (si ricorda che l'intento è stimare un valore indicativo della massima spinta assiale richiesta dai maschi ad inizio vita in esercizio e non valutare l'usura e la durata).

3.4 Segnali anomali riscontrati

Nell'analizzare i segnali di momento torcente e spinta assiale sono state riscontrate due anomalie: la registrazione di "segnali incompleti" e la presenza di "offset" in alcuni dei segnali acquisiti.

3.4.1 Segnali incompleti

I segnali incompleti si presentano come prove di durata molto breve (circa 0,5 s invece dei 4 s che il sensore registra in un corretto funzionamento) e mostrano un andamento del segnale che si discosta in maniera marcata da quanto ci si aspetta. Questo è visibile se si confronta l'esempio di un segnale incompleto del momento torcente (Figura 29) con un segnale completo (Figura 19 a pagina 25): sembra che sia stata registrata solamente la prima parte del segnale completo.

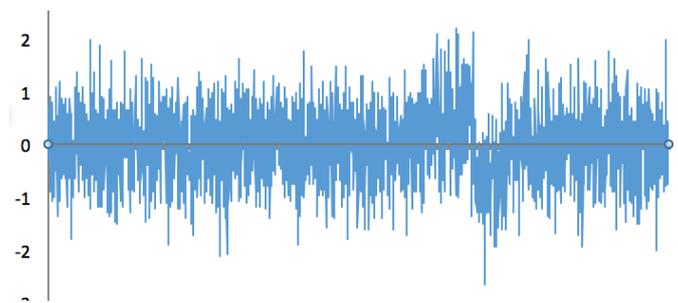


Figura 29 - Esempio di "segnale incompleto" del momento torcente

Quanto osservato è stato ricondotto a possibili problemi di connessione wireless tra il sensore e il computer di raccolta dati oppure a problemi di registrazione dati da parte del computer, causati da processi in "background" che rallentano il funzionamento del computer ed incidono sull'efficacia della registrazione.

Dal momento che queste prove risultano essere incomplete e non utili ad un'analisi del processo di maschiatura, sono state scartate.

3.4.2 Segnali con offset

È stato osservato come alcune prove presentassero un offset sui segnali di spinta assiale e di momento torcente: la prima parte del segnale, che dovrebbe presentare valori prossimi allo zero (maschio non ancora in contatto con il materiale da lavorare), era caratterizzata da valori diversi da zero.

Per valutare la causa di quanto osservato, si è analizzato il comportamento del sensore nella misurazione del segnale.

Sono stati applicati sul sensore degli sforzi, premendolo contro una superficie (per analizzare il segnale di spinta assiale) oppure torcendolo con la mano (per il segnale di momento torcente), e nel mentre sono state effettuate alcune prove di regolazione dello zero del segnale misurato.

La procedura di regolazione dello zero viene effettuata manualmente dall'operatore tramite il computer che raccoglie i dati provenienti dal sensore.

Si è notato come una non corretta regolazione portasse al fenomeno osservato: la presenza di un offset visibile chiaramente nella prima parte del segnale (è noto che in questo tratto il segnale deve presentare valori prossimi al valore nullo).

Di conseguenza l'offset sull'inizio del segnale falsava tutto il resto dell'acquisizione.

Sono stati osservati sia casi in cui il valore dell'offset era positivo sia casi in cui era negativo.

Si è proceduto alla correzione dell'offset, decidendo di calcolare la media dei primi 100 punti misurati e di correggere l'intero segnale con il valore di questa media: ad ogni valore registrato nella prova è stato sottratto il valore calcolato con la media.

I primi 100 punti corrispondono al primo centesimo del segnale misurato (ogni prova presenta 10'000 punti rilevati per ogni grandezza misurata, capitolo 2.5) e questo tratto deve presentare valori nulli in un segnale corretto.

Il risultato della correzione è visibile in un esempio nelle immagini seguenti.

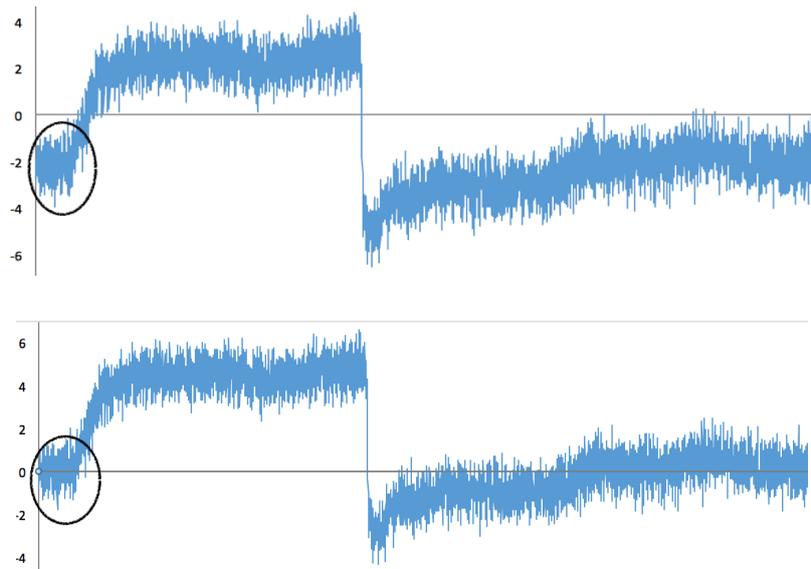


Figura 30 - Esempio di segnale registrato del momento torcente: con presenza di offset (figura in alto), dopo correzione offset (figura in basso)

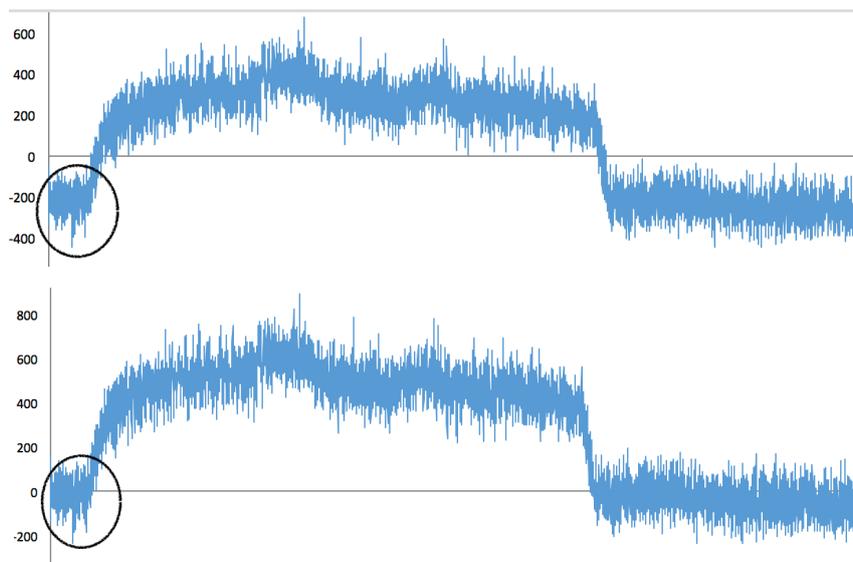


Figura 31 – Esempio di segnale registrato della spinta assiale: con presenza di offset (figura in alto), dopo correzione offset (figura in basso)

Capitolo 4

Confronto tra maschi

Calcolate le medie dei massimi di momento torcente e spinta assiale (come descritto nei capitoli 3.2 e 3.3) si è effettuato un confronto tra i maschi della Vergnano ed è stato possibile valutare come il momento torcente e la spinta assiale siano influenzati dai seguenti aspetti geometrici di un maschio a rullare:

- rapporto di spoglia (MF02 vs MF01);
- rugosità superficiale (MF07 vs MF07 modifica);
- raggio di cresta del profilo del filetto (MF07 vs MF08).

Si è potuto valutare come la caratteristica considerata incida sul momento torcente e sulla spinta assiale in quanto è stato effettuato un confronto tra maschi che differivano solamente per la variazione dell'aspetto geometrico considerato (vedere Tabella 4).

I confronti e la spiegazione degli aspetti geometrici considerati sono riportati in dettaglio nei capitoli successivi (da 4.1 a 4.3).

Tabella 4 – Caratteristiche maschi Vergnano

Utensile	Produttore	N° lobi	Angolo imbocco [°]	Rapporto spoglia	Raggio cresta filetto R1 [mm]	Rugosità Sa [μm]	Coating
MF01	Vergnano	5	9,00	0,160	0,120	0,108	AlCrN
MF02	Vergnano	5	9,00	0,104	0,120	0,108	TiN
MF07	Vergnano	5	9,00	0,160	0,128	0,150	AlCrN
MF07 modifica	Vergnano	5	9,00	0,160	0,128	0,108	AlCrN
MF08	Vergnano	5	9,00	0,160	0,113	0,150	AlCrN

Unica eccezione è rappresentata dal confronto tra MF02 e MF01, nel quale tra i due maschi non varia solamente il rapporto di spoglia ma anche la base chimica del rivestimento (colonna “Coating” in Tabella 4 nella pagina precedente).

È noto come il rivestimento di un maschio incida principalmente sulla durata (non considerata in questa analisi) e sull’attrito (che si lega ad una valutazione del momento torcente).

Nel caso dei maschi MF02 e MF01 si può considerare trascurabile il contributo della differenza del rivestimento sul momento torcente, in quanto i due rivestimenti presentano coefficienti di attrito simili in contatto con l’acciaio.

Infine è stata effettuata una valutazione globale considerando tutti i maschi testati (quindi anche quelli dei vari concorrenti), per valutare se vi fossero differenze marcate di prestazione tra i maschi della Vergnano e quelli della concorrenza (capitolo 4.4).

Questo è stato fatto anche nell’ottica di valutare se vi possano essere degli ulteriori aspetti del maschio, oltre a quelli indagati in questo lavoro (vedere pagina precedente), da analizzare con uno studio successivo.

4.1 Maschio MF02 vs MF01: effetto del rapporto di spoglia

Viene analizzata l'influenza del "rapporto di spoglia" sul momento torcente e sulla spinta assiale che è stata osservata nelle prove.

Il fattore "rapporto di spoglia" si collega a quanto detto nel capitolo 0 quando è stata illustrata la sezione trasversale tipica di un maschio a rullare (Figura 3 a pagina 4).

È stato introdotto il concetto di "spoglia radiale", applicata con l'obiettivo di ridurre la porzione di maschio in contatto con il materiale lavorato e di conseguenza ridurre l'attrito che si genera durante la maschiatura.

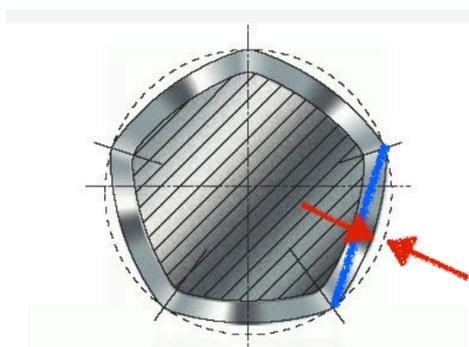


Figura 32 - Sezione trasversale di un maschio a 5 lobi con l'indicazione dei due tratti (in rosso e in blu) che vengono considerati nel definire il "rapporto di spoglia"

In Figura 32 è visibile come la spoglia radiale fa sì che la deformazione del processo di maschiatura sia prevalentemente a carico dell'estremità dei lobi e non anche dei tratti tondeggianti tra i lobi (in questi tratti viene applicata la spoglia).

Il rapporto di spoglia viene inteso come il rapporto tra la massima spoglia radiale (tratto indicato dalle frecce in rosso in Figura 32), che si riscontra nella mezzeria del segmento che unisce le punte di due lobi adiacenti (tratto in blu in Figura 32), e la metà di questo segmento.

Il segmento in blu in Figura 32 unisce tra loro le punte di due lobi adiacenti in maniera fittizia, dal momento che nella realtà questo tratto non è rappresentato da un segmento ma ha una forma tondeggiante.

Nelle pagine seguenti vengono riportate le tabelle con i risultati del confronto tra il maschio MF02 e quello MF01.

Non sono presenti dati inerenti a prove condotte sull'acciaio S235 in quanto il maschio MF02 non è stato testato su questo materiale, perciò non è stato possibile effettuare un confronto numerico tra MF02 e MF01 sull'S235.

L' MF02 non è stato provato sull'acciaio S235 poiché l'S235 è stato l'ultimo materiale inserito nei test e perciò si è scelto di non effettuare questo test nell'ottica di risparmiare prove.

Infatti il maschio MF02 risultava essere peggiore rispetto agli altri maschi già su tutti gli acciai precedentemente lavorati (X155, 16MnCr5 e C45).

Per ogni acciaio vi sono 2 tabelle, una legata al momento torcente (Mt) ed una alla spinta assiale (N).

Per queste grandezze vengono riportate le medie dei massimi dei due maschi a confronto (medie calcolate come descritto nei capitoli 3.2 e 3.3). Vengono riportati anche i valori del fattore geometrico considerato (in questo capitolo il rapporto di spoglia).

Le ultime due righe di ogni tabella mostrano rispettivamente la variazione percentuale e quella non percentuale tra i valori riportati nelle righe precedenti.

Qualora la variazione del momento torcente/spinta assiale sia negativa, queste ultime righe sono colorate in "verde", perché questo è sintomo di una diminuzione degli sforzi registrati e quindi risulta essere positivo, al contrario sono di colore "rosso" quando la variazione indica un aumento (vi sono pochi casi in cui compare il colore "giallo", che indica nessuna variazione).

La chiave di lettura delle tabelle che riportano i dati di prova sarà la stessa anche per gli altri confronti (capitoli 4.2 e 4.3).

X155

Tabella 5 – Confronto Mt MF02 vs MF01 su acciaio X155

MF02 vs MF01	<i>Mt [Nm]</i>	<i>rapporto spoglia</i>
MF02	12,7	0,104
MF01	10,8	0,160
(MF01-MF02)/MF02 %	-15%	54%
MF01-MF02	-1,9	0,056

Tabella 6 – Confronto N MF02 vs MF01 su acciaio X155

MF02 vs MF01	<i>N [N]</i>	<i>rapporto spoglia</i>
MF02	1324	0,104
MF01	1263	0,160
(MF01-MF02)/MF02 %	-5%	54%
MF01-MF02	-61	0,056

16MnCr5

Tabella 7 – Confronto Mt MF02 vs MF01 su acciaio 16MnCr5

MF02 vs MF01	<i>Mt [Nm]</i>	<i>rapporto spoglia</i>
MF02	8,7	0,104
MF01	7,0	0,16
(MF01-MF02)/MF02 %	-19%	54%
MF01-MF02	-1,7	0,056

Tabella 8 – Confronto N MF02 vs MF01 su acciaio 16MnCr5

MF02 vs MF01	<i>N [N]</i>	<i>rapporto spoglia</i>
MF02	1192	0,104
MF01	1104	0,160
(MF01-MF02)/MF02 %	-7%	54%
MF01-MF02	-88	0,056

C45

Tabella 9 – Confronto Mt MF02 vs MF01 su acciaio C45

MF02 vs MF01	<i>Mt [Nm]</i>	<i>rapporto spoglia</i>
MF02	11,3	0,104
MF01	8,8	0,160
(MF01-MF02)/MF02 %	-22%	54%
MF01-MF02	-2,5	0,056

Tabella 10 – Confronto N MF02 vs MF01 su acciaio C45

MF01 vs MF02	<i>N [N]</i>	<i>rapporto spoglia</i>
MF02	1012	0,104
MF01	1076	0,160
(MF01-MF02)/MF02 %	6%	54%
MF01-MF02	64	0,056

Osservando i dati riportati nelle tabelle precedenti si notano i seguenti aspetti:

- il Mt presenta un marcato miglioramento con l’aumento del rapporto di spoglia. Si può notare come vi sia una diminuzione percentuale non trascurabile, che corrisponde in termini non percentuali a diminuzioni del momento nell’intorno di 2 Nm;
- sembra che la diminuzione percentuale di Mt cresca con materiali che presentano un valore $R_{p0,2}$ più basso. Si ricorda che in ordine decrescente secondo $R_{p0,2}$ gli acciai si posizionano come: X155, 16MnCr5 e C45 (capitolo 2.2);
- per quanto riguarda la spinta assiale i dati non delineano una relazione univoca e distinta con il rapporto di spoglia. Non risulta esserci un “trend” comune tra gli acciai testati (vi è una diminuzione della spinta per l’X155 e per il 16MnCr5 mentre un aumento per il C45) ed inoltre le variazioni osservate non sono molto marcate, infatti si assestano circa tra 60 e 90 N, quantità che possono essere considerate non così rilevanti considerando i valori misurati. Stiamo

osservando le medie dei massimi della spinta assiale in un processo di maschiatura, quindi per poter affermare con una certa validità che le variazioni osservate siano realmente significative, ci si può attendere che queste assumano valori percentuali non inferiori a 10% (quanto detto è valido anche per il momento torcente e per i capitoli 4.2 e 4.3).

Dalle prove effettuate si può sottolineare come l'aumento del rapporto di spoglia porti ad una diminuzione dei massimi del Mt e questo conferma sperimentalmente quanto previsto con la riduzione della porzione di maschio in contatto con il materiale lavorato (di conseguenza minore attrito tra maschio e acciaio filettato).

La diminuzione percentuale di Mt sembra crescere con il diminuire del valore $R_{p0,2}$ dell'acciaio lavorato.

Il vantaggio di un rapporto di spoglia maggiore non si riscontra anche sulla spinta assiale, che sembra non risentire in maniera importante di una variazione legata a questo fattore.

4.2 Maschio MF07 vs MF07 modifica: effetto della rugosità superficiale del maschio

Viene analizzata l'influenza della rugosità superficiale del maschio sul momento torcente e sulla spinta assiale osservata dalle prove.

La rugosità misurata fa riferimento alla rugosità media di superficie S_a e non alla più classica rugosità media di profilo R_a ⁵.

È stato possibile calcolare la rugosità S_a in quanto è stato utilizzato uno strumento ottico per rilevare la superficie da analizzare e non il rugosimetro.

Di seguito vengono riportate due immagini di confronto tra i maschi testati, in cui è possibile notare la differente rugosità ottenuta in seguito a differenti processi di molatura.



Figura 33 - A sinistra maschio MF07 ($S_a = 150 \mu\text{m}$) mentre a destra maschio MF07 modifica ($S_a = 108 \mu\text{m}$); il colore grigio è legato al rivestimento AlCrN presente su entrambi i maschi

⁵ La rugosità R_a si riferisce ad un profilo 2D (la lunghezza del tratto analizzato e l'altezza delle asperità superficiali misurate) che si riesce ad acquisire con il rugosimetro mentre la rugosità S_a è riferita all'acquisizione 3D della superficie da analizzare (le due dimensioni dell'area misurata e l'altezza delle asperità superficiali). Entrambe sono rugosità medie, la R_a è mediata sulla lunghezza del tratto considerato mentre la S_a sull'area rilevata.

Vengono riportate le tabelle con i dati raccolti dalle prove.

X155

Tabella 11 – Confronto Mt MF07 vs MF07 modifica su acciaio X155

MF07 vs MF07 modifica	Mt [Nm]	Sa [μm]
MF07	11,9	0,150
MF07 m.	10,2	0,108
(MF07 m.-MF07)/MF07 %	-14%	-28%
MF07 m.-MF07	-1,7	-0,042

Tabella 12 – Confronto N MF07 vs MF07 modifica su acciaio X155

MF07 vs MF07 modifica	N [N]	Sa [μm]
MF07	1388	0,150
MF07 m.	1367	0,108
(MF07 m.-MF07)/MF07 %	-2%	-28%
MF07 m.-MF07	-21	-0,042

16MnCr5

Tabella 13 – Confronto Mt MF07 vs MF07 modifica su acciaio 16MnCr5

MF07 vs MF07 modifica	Mt [Nm]	Sa [μm]
MF07	7,6	0,150
MF07 m.	6,4	0,108
(MF07 m.-MF07)/MF07 %	-15%	-28%
MF07 m.-MF07	-1,2	-0,042

Tabella 14 – Confronto N MF07 vs MF07 modifica su acciaio 16MnCr5

MF07 vs MF07 modifica	N [N]	Sa [μm]
MF07	1080	0,150
MF07 m.	1129	0,108
(MF07 m.-MF07)/MF07 %	5%	-28%
MF07 m.-MF07	49	-0,042

C45

Tabella 15 – Confronto Mt MF07 vs MF07 modifica su acciaio C45

MF07 vs MF07 modifica	<i>Mt [Nm]</i>	<i>Sa [μm]</i>
<i>MF07</i>	8,8	0,150
<i>MF07 m.</i>	8,5	0,108
<i>(MF07 m.-MF07)/MF07 %</i>	-4%	-28%
<i>MF07 m.-MF07</i>	-0,3	-0,042

Tabella 16 – Confronto N MF07 vs MF07 modifica su acciaio C45

MF07 vs MF07 modifica	<i>N [N]</i>	<i>Sa [μm]</i>
<i>MF07</i>	1143	0,150
<i>MF07 m.</i>	1255	0,108
<i>(MF07 m.-MF07)/MF07 %</i>	10%	-28%
<i>MF07 m.-MF07</i>	112	-0,042

S235

Tabella 17 – Confronto Mt MF07 vs MF07 modifica su acciaio S235

MF07 vs MF07 modifica	<i>Mt [Nm]</i>	<i>Sa [μm]</i>
<i>MF07</i>	7,9	0,150
<i>MF07 m.</i>	6,7	0,108
<i>(MF07 m.-MF07)/MF07 %</i>	-15%	-28%
<i>MF07 m.-MF07</i>	-1,2	-0,042

Tabella 18 – Confronto N MF07 vs MF07 modifica su acciaio S235

MF07 vs MF07 modifica	<i>N [N]</i>	<i>Sa [μm]</i>
<i>MF07</i>	1170	0,150
<i>MF07 m.</i>	1124	0,108
<i>(MF07 m.-MF07)/MF07 %</i>	-4%	-28%
<i>MF07 m.-MF07</i>	-46	-0,042

Se si tralasciano le prove condotte sull'acciaio C45, dalle tabelle si nota come la riduzione della rugosità porti ad una riduzione del momento torcente mentre non risulta incidere sulla spinta assiale.

Questo comportamento rispecchia quanto ci si può attendere dalla sola diminuzione della rugosità superficiale del maschio, che determina un minore attrito durante la maschiatura.

I dati legati all'acciaio C45 si discostano invece da questo comportamento. Dal momento che le prove condotte con il maschio "MF07 modifica" sono state eseguite a distanza di tempo rispetto alle prove condotte con gli altri maschi (tra cui quindi l'MF07), durante le ultime prove (legate all'MF07 modifica) è stato testato nuovamente l'MF07 sul C45 per cercare di valutare l'anomalia riscontrata.

È stato notato come in queste prove i valori ottenuti con il maschio MF07 risultino maggiori di quelli ottenuti con la stessa tipologia di maschio durante la campagna prove condotta in precedenza (quando sono stati testati tutti i maschi ad eccezione dell'MF07 modifica).

Inoltre se il confronto "MF07 vs MF07 modifica" viene effettuato con i dati ottenuti nelle ultime prove si osserva quanto visto per gli altri acciai: una riduzione del momento torcente ed una variazione trascurabile della spinta assiale (tabelle seguenti).

Tabelle 19 – Confronto MF07 (campagna prove iniziale) vs MF07 b. (campagna prove condotta in seguito per testare MF07 modifica) su acciaio C45

MF07 vs MF07 blocco MF07 modifica	Mt [Nm]	Sa [μm]
MF07	8,8	0,150
MF07 b.	9,7	0,150
(MF07 b.-MF07)/MF07 %	10%	0%
MF07 b.-MF07	0,9	0

MF07 vs MF07 blocco MF07 modifica	N [N]	Sa [μm]
MF07	1143	0,150
MF07 b.	1241	0,150
(MF07 b.-MF07)/MF07 %	9%	0%
MF07 b.-MF07	98	0

Tabella 20 – Confronto MF07 vs MF07 modifica (entrambi legati alla campagna prove condotta in seguito per testare MF07 modifica) su acciaio C45

MF07 vs MF07 modifica su blocco MF07 modifica	Mt [Nm]	Sa [μm]
MF07	9,7	0,150
MF07 m.	8,5	0,108
(MF07 m.-MF07)/MF07 %	-12%	-28%
MF07 m.-MF07	-1,2	-0,042

MF07 vs MF07 modifica su blocco MF07 modifica	N [N]	Sa [μm]
MF07	1241	0,150
MF07 m.	1255	0,108
(MF07 m.-MF07)/MF07 %	1%	-28%
MF07 m.-MF07	14	-0,042

L'anomalia riscontrata sull'acciaio C45 non è stata ulteriormente indagata poiché le ultime prove sono state condotte verso il termine del lavoro svolto in questa trattazione ed inoltre il confronto "MF07 vs MF07 modifica" con i valori ottenuti nell'ultima campagna prove (Tabella 20) si allinea con quanto osservato sugli altri acciai.

Le prove effettuate hanno mostrato come una riduzione della rugosità porti ad una riduzione del momento torcente (in linea con quanto previsto perché si riduce l'attrito) mentre non influenza in maniera importante la spinta assiale.

Si può inoltre notare come la riduzione percentuale del momento torcente sia circa la stessa su tutti gli acciai testati (circa 14%) e risulti essere molto prossima a metà della riduzione percentuale della rugosità (28%).

4.3 Maschio MF07 vs MF08: effetto del raggio di cresta del profilo del filetto

Viene analizzata l'influenza del "raggio di cresta del profilo del filetto" (indicato con R1) sul momento torcente e sulla spinta assiale.

Il raggio R1 è un parametro che definisce il profilo del filetto sul maschio: si fissa un valore di R1 per la cresta del filetto e viene imposto che l'arco di circonferenza, risultante dalla scelta di R1, sia tangente ai due fianchi del profilo del filetto (in Figura 34 l'indicazione del raggio R1 è maggiorata rispetto alla realtà per una sua maggiore chiarezza visiva).

Il valore del raggio è mantenuto costante su tutta la filettatura del maschio, a partire dall'imbocco fino al seguente tratto cilindrico filettato.

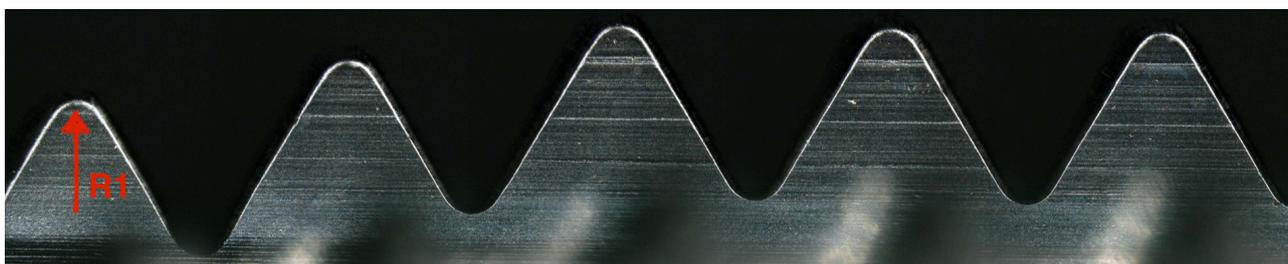


Figura 34 - Indicazione del raggio di cresta del profilo del filetto R1; in figura si può notare anche come i primi 3 denti formino l'imbocco del maschio (si può riconoscere il profilo troncoconico che delinano)

Nelle pagine seguenti vengono riportate le tabelle con i dati ottenuti dalle prove dei maschi MF07 e MF08 sugli acciai testati.

X155

Tabella 21 – Confronto Mt MF07 vs MF08 su acciaio X155

MF07 vs MF08	Mt [Nm]	R1 [mm]
MF07	11,9	0,128
MF08	11,2	0,113
(MF08-MF07)/MF07 %	-6%	-12%
MF08-MF07	-0,7	-0,015

Tabella 22 – Confronto N MF07 vs MF08 su acciaio X155

MF07 vs MF08	N [N]	R1 [mm]
MF07	1388	0,128
MF08	1281	0,113
(MF08-MF07)/MF07 %	-8%	-12%
MF08-MF07	-108	-0,015

16MnCr5

Tabella 23 – Confronto Mt MF07 vs MF08 su acciaio 16MnCr5

MF07 vs MF08	Mt [Nm]	R1 [mm]
MF07	7,9	0,128
MF08	7,9	0,113
(MF08-MF07)/MF07 %	0%	-12%
MF08-MF07	0,0	-0,015

Tabella 24 – Confronto N MF07 vs MF08 su acciaio 16MnCr5

MF07 vs MF08	N [N]	R1 [mm]
MF07	1170	0,128
MF08	1030	0,113
(MF08-MF07)/MF07 %	-12%	-12%
MF08-MF07	-140	-0,015

C45

Tabella 25 – Confronto Mt MF07 vs MF08 su acciaio C45

MF07 vs MF08	Mt [Nm]	R1 [mm]
MF07	8,8	0,128
MF08	9,3	0,113
(MF08-MF07)/MF07 %	6%	-12%
MF08-MF07	0,5	-0,015

Tabella 26 – Confronto N MF07 vs MF08 su acciaio C45

MF07 vs MF08	N [N]	R1 [mm]
MF07	1143	0,128
MF08	1020	0,113
(MF08-MF07)/MF07 %	-11%	-12%
MF08-MF07	-123	-0,015

S235

Tabella 27 – Confronto Mt MF07 vs MF08 su acciaio S235

MF07 vs MF08	Mt [Nm]	R1 [mm]
MF07	7,6	0,128
MF08	7,0	0,113
(MF08-MF07)/MF07 %	-7%	-12%
MF08-MF07	-0,5	-0,015

Tabella 28 – Confronto N MF07 vs MF08 su acciaio S235

MF07 vs MF08	N [N]	R1 [mm]
MF07	1080	0,128
MF08	978	0,113
(MF08-MF07)/MF07 %	-9%	-12%
MF08-MF07	-102	-0,015

Osservando i dati riportati nelle tabelle si notano i seguenti aspetti:

- la diminuzione del valore di R1 sembra portare ad una riduzione della spinta assiale su tutti gli acciai in prova, non estremamente marcata ma visibile. In termini non percentuali si osserva sempre una riduzione di almeno 100 N, quindi non trascurabile considerando i valori misurati (corrisponde a variazioni percentuali nell'intorno di 10%);
- i dati sembrano mostrare che ci sia un rapporto circa 1:1 tra la riduzione percentuale di R1 e quella della spinta assiale, soprattutto per gli acciai 16MnCr5 e C45. Quanto detto sembra essere avvalorato se si osservano i confronti “MF01 vs MF07” e “MF01 vs MF08” (di seguito riportati). Tra questi maschi non varia solamente il valore di R1 ma anche quello della rugosità superficiale (Tabella 4 a pagina 40) però come contributo alla variazione di spinta assiale si può considerare la sola variazione di R1 e non anche quella della rugosità superficiale (vedere risultati ottenuti nel capitolo 4.2).

X155

Tabella 29 – Confronto N MF01 vs MF07 e MF01 vs MF08 su acciaio X155

MF01 vs MF07	N [N]	R1 [mm]
MF01	1263	0,120
MF07	1388	0,128
(MF07-MF01)/MF01 %	10%	7%
MF07-MF01	126	0,008

MF01 vs MF08	N [N]	R1 [mm]
MF01	1263	0,120
MF08	1281	0,113
(MF08-MF01)/MF01 %	1%	-6%
MF08-MF01	18	-0,007

16MnCr5

Tabella 30 – Confronto N MF01 vs MF07 e MF01 vs MF08 su acciaio 16MnCr5

MF01 vs MF07	N [N]	R1 [mm]
MF01	1104	0,120
MF07	1170	0,128
(MF07-MF01)/MF01 %	6%	7%
MF07-MF01	66	0,008

MF01 vs MF08	N [N]	R1 [mm]
MF01	1104	0,120
MF08	1030	0,113
(MF08-MF01)/MF01 %	-7%	-6%
MF08-MF01	-74	-0,007

C45

Tabella 31 – Confronto N MF01 vs MF07 e MF01 vs MF08 su acciaio C45

MF01 vs MF07	N [N]	R1 [mm]
MF01	1076	0,120
MF07	1143	0,128
(MF07-MF01)/MF01 %	6%	7%
MF07-MF01	67	0,008

MF01 vs MF08	N [N]	R1 [mm]
MF01	1076	0,120
MF08	1020	0,113
(MF08-MF01)/MF01 %	-5%	-6%
MF08-MF01	-56	-0,007

S235

Tabella 32 – Confronto N MF01 vs MF07 e MF01 vs MF08 su acciaio C45

MF01 vs MF07	N [N]	R1 [mm]
MF01	1011	0,120
MF07	1080	0,128
(MF07-MF01)/MF01 %	7%	7%
MF07-MF01	69	0,008

MF01 vs MF08	N [N]	R1 [mm]
MF01	1011	0,120
MF08	978	0,113
(MF08-MF01)/MF01 %	-3%	-6%
MF08-MF01	-33	-0,007

- lo stesso comportamento non si osserva sul momento torcente. Su alcuni acciai si riscontra una sua diminuzione mentre su altri un suo aumento (o anche nessuna variazione). Inoltre valutando che le variazioni percentuali non sono elevate (oscillano tra +/- 7%), si può affermare come variare il valore di R1 non abbia mostrato una ben definita influenza sul momento torcente.

Quanto osservato sembra indicare che un profilo del filetto che si avvicina maggiormente ad un profilo rettangolare (valore R1 basso e quindi cresta del filetto poco tondeggiante ma più “a punta”) porti ad una spinta assiale minore durante la maschiatura.

4.4 Confronto globale con i maschi dei concorrenti

Dopo aver analizzato tra loro i prototipi realizzati dalla Vergnano, è stato di interesse valutare globalmente come i maschi offerti sul mercato dai concorrenti si comportassero rispetto a quanto osservato con i maschi della Vergnano.

Vengono riportati nella pagina successiva due grafici, uno per il momento torcente e uno per la spinta assiale, che riportano i valori medi ottenuti dai vari maschi (calcolati come illustrato nei capitoli 3.2 e 3.3); viene riportata anche una tabella riassuntiva dei parametri dei maschi.

Tabella 33 - Caratteristiche maschi testati

Utensile	Produttore	N° lobi	Angolo imbocco [°]	Rapporto spoglia	Raggio cresta filetto R1 [mm]	Rugosità Sa [μm]	Coating
MF01	Vergnano	5	9,00	0,160	0,120	0,108	AlCrN
MF02	Vergnano	5	9,00	0,104	0,120	0,108	TiN
MF03	Concorrente 1	5	10,33	0,172	0,110	0,150	TiCN
MF04	Concorrente 2	7	7,67	0,060	0,095	0,093	TiN
MF05	Concorrente 3	5	9,00	0,148	0,090	0,111	TiCN
MF07	Vergnano	5	9,00	0,160	0,128	0,150	AlCrN
MF07 modifica	Vergnano	5	9,00	0,160	0,128	0,108	AlCrN
MF08	Vergnano	5	9,00	0,160	0,113	0,150	AlCrN

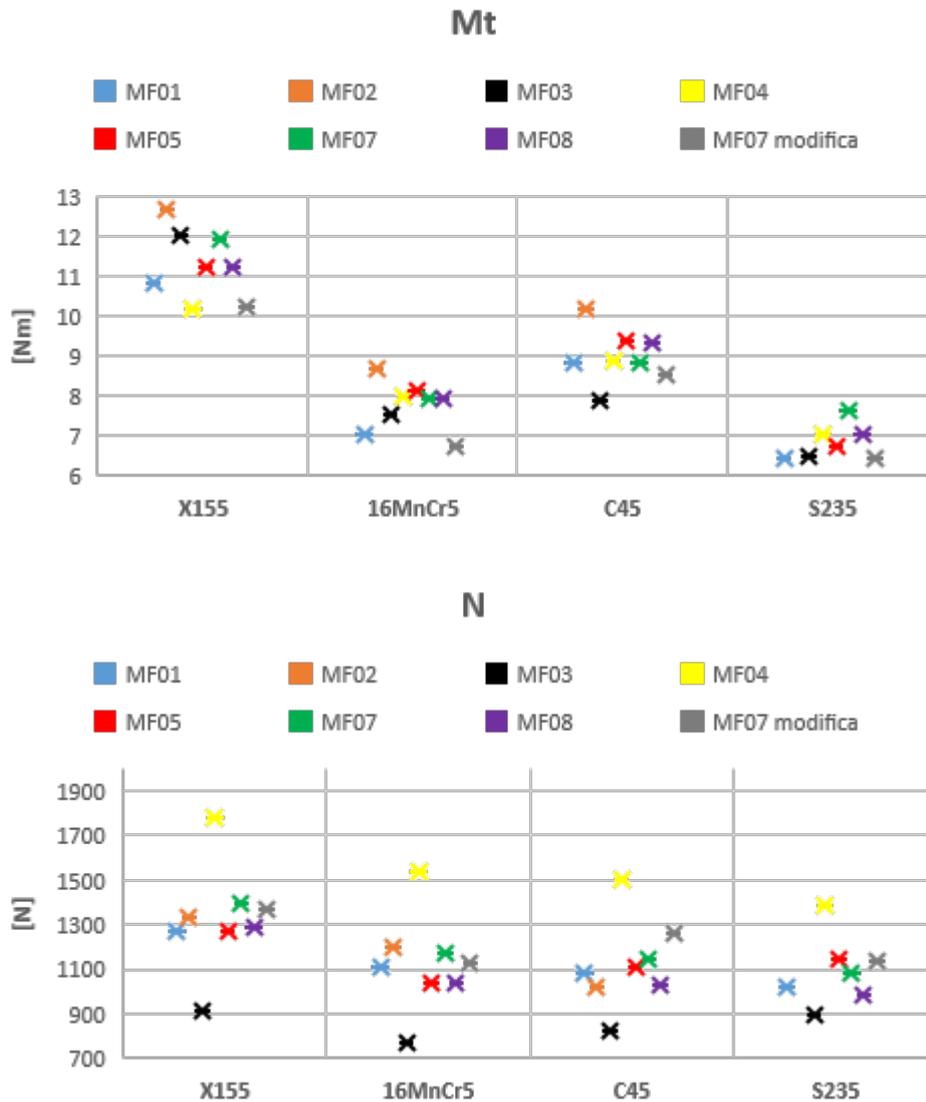


Figura 35 - Grafici dei valori medi dei massimi di momento torcente (Mt) e di spinta assiale (N) calcolati per i vari maschi sui diversi acciai testati; l'asse delle ascisse è suddiviso in 4 blocchi corrispondenti ai 4 acciai utilizzati nelle prove

Osservando i grafici riportati si nota come l'attuale maschio in commercio della Vergnano (MF02) presenti sempre valori maggiori di Mt rispetto ai prototipi della Vergnano, che invece si avvicinano maggiormente alle prestazioni dei maschi della concorrenza.

Questo indica che le direzioni intraprese nella modifica dell'utensile di partenza (MF02) sono valide.

Inoltre si nota come vi sia la marcata tendenza del maschio MF03 a presentare su tutti gli acciai i valori minori di spinta assiale mentre quelli maggiori li presenta l'MF04.

Osservando le caratteristiche riportate in Tabella 33 a pagina 57, può essere fatta la seguente considerazione: sembra che su quanto notato possa incidere il valore del fattore “*angolo di imbocco*” (l'angolo formato tra l'asse del maschio e il profilo troncoconico dell'imbocco).

Se si trascurano i fattori che non incidono in maniera marcata sulla spinta assiale (per quanto detto nei capitoli precedenti il rapporto di spoglia, il rivestimento e la rugosità), si può osservare come il maschio MF03 non possieda un valore di R1 così piccolo da giustificare quanto osservato ed inoltre è caratterizzato dall'angolo di imbocco maggiore tra i maschi in prova mentre l'MF04 ha quello minore.

Si potrebbe supporre quindi che un angolo di imbocco maggiore riduca la spinta assiale.

Tuttavia occorre considerare che il maschio MF04 ha l'angolo di imbocco minore ma è caratterizzato anche dall'aver 7 lobi mentre tutti gli altri maschi ne hanno 5, perciò potrebbe influire anche il n° di lobi su quanto osservato.

Di conseguenza quanto detto può essere il punto di partenza per uno studio successivo, in cui valutare sperimentalmente l'effetto dell'angolo di imbocco e del n° di lobi sulla spinta assiale.

Mettere in luce altri aspetti tramite il confronto tra tutti i maschi diventa difficile, dal momento che non si notano in maniera marcata altre particolari tendenze.

Inoltre occorre sottolineare come i maschi differiscono tra loro per più fattori (non solo per uno come nei capitoli 4.1 a 4.3) e questo può portare ad una non chiara attribuzione degli effetti alle varie caratteristiche considerate del maschio.

Capitolo 5

Conclusioni analisi

A seguito dell'analisi condotta si può riassumere quanto segue:

- è stato osservato come aumentare il rapporto di spoglia porti ad avere un momento torcente minore, in accordo con quanto previsto riducendo la porzione di maschio in contatto con il materiale lavorato (di conseguenza riducendo l'attrito). La riduzione percentuale del momento torcente sembra crescere con il diminuire del valore $R_{p_{0,2}}$ dell'acciaio maschiato. Non è stata osservata un'influenza marcata della variazione del rapporto di spoglia sulla spinta assiale (capitolo 4.1);
- la riduzione della rugosità superficiale ha portato ad una diminuzione del momento torcente, in linea con quanto atteso per via del minore attrito del maschio con l'acciaio lavorato. È stata osservata circa la stessa riduzione percentuale di momento torcente su tutti gli acciai testati. La minore rugosità non ha influenzato in maniera importante la spinta assiale (capitolo 4.2);
- si è notato come ottenendo sul maschio un profilo del filetto più simile a quello triangolare (riducendo il valore del raggio di cresta del profilo del filetto) si riscontrano una spinta assiale minore. Per gli acciai 16MnCr5 e C45 la diminuzione percentuale della spinta assiale sembra essere circa pari alla diminuzione percentuale del valore del raggio di cresta del filetto. Non è stata notata una determinata influenza del raggio sul momento torcente (capitolo 4.3);
- uno studio futuro potrebbe indagare l'effetto dell'angolo di imbocco e del n° di lobi sulla spinta assiale. Sembra che aumentando l'angolo di imbocco si riduca la spinta assiale (capitolo 4.4).

Si può infine sottolineare come l'utilizzo del sensore *Spike* della Pro-micron (capitolo 2.5) abbia permesso di indagare in maniera più approfondita le prestazioni dei maschi.

Tramite il sensore è stato possibile analizzare il momento torcente e la spinta assiale richiesti nel processo, a differenza di quanto permettono invece le prove di durata in cui generalmente queste grandezze non vengono misurate.

Capitolo 6

Sviluppi futuri: analisi ANOVA

Un possibile sviluppo futuro è la realizzazione di un piano sperimentale per valutare l'effetto del n° di lobi e dell'angolo di imbocco sulla spinta assiale durante la maschiatura.

Dal momento che l'analisi dati discussa in questa trattazione è legata ad una campagna prove già definita e iniziata da parte dell'azienda, viene ora proposto un approccio alternativo per la realizzazione di un piano sperimentale da analizzare tramite l'ANOVA⁶ e le Tavole di Yates.

Si può pensare ad un piano sperimentale fattoriale completo 2^2 , ovvero considerare 2 fattori (n° lobi e angolo imbocco) ciascuno a 2 livelli.

I livelli corrispondono ai valori che vengono assegnati ai fattori ed in genere sono identificati come livello basso (0) e livello alto (1).

È appropriato considerare solamente 2 livelli perché i diversi n° di lobi da valutare sono 2 (maschio a 5 lobi e a 7 lobi) mentre è di interesse analizzare se è conveniente avere un angolo di imbocco elevato o piccolo (sono sufficienti 2 valori).

Si considera che vi sia una relazione monotona tra il valore di angolo di imbocco e la spinta assiale.

Se non vi fosse una relazione monotona il valore ottimale di angolo di imbocco potrebbe essere all'interno del range definito dai valori considerati.

⁶ L'ANOVA (ANalysis Of VAriance) è un test statistico che permette di accettare/non accettare l'ipotesi che tutti i gruppi a confronto abbiano la stessa media. Questo porta a valutare se i fattori considerati e le loro interazioni siano statisticamente significativi. Il test viene effettuato tramite una analisi della varianza dei dati raccolti.

Il piano sperimentale 2² prevede 4 trattamenti, che corrisponde a testare 4 differenti maschi.

Il singolo piano sperimentale deve essere definito per un singolo acciaio in prova, quindi verranno definiti 4 piani sperimentali uguali da realizzare sui diversi materiali da lavorare. Come fatto in questo lavoro si può pensare di testare i maschi sugli acciai X155, 16MnCr5, C45 e S235.

Si dovranno realizzare 4 maschi che differiscono per i fattori considerati, secondo quanto riportato in Tabella 34 nella pagina seguente mentre le altre caratteristiche vengono mantenute uguali tra i maschi.

L'unica particolarità riguarda il rapporto di spoglia che non può essere definito con uguale valore per maschi con differente n° di lobi (cambia la lunghezza del tratto tra i lobi, Figura 32 a pag. 42). Come termine di confronto si potrebbe porre uguale valore per la riduzione percentuale dell'area della sezione del maschio dovuta alla spoglia.

Tabella 34 – Piano fattoriale 2² per valutare effetto n° lobi e angolo imbocco su spinta assiale

Utensile	n° lobi	angolo imbocco [°]
Maschio 1	5	7,67
Maschio 2	5	10,33
Maschio 3	7	7,67
Maschio 4	7	10,33

Per valutare se l'influenza dei fattori considerati sulla spinta assiale sia statisticamente significativa si può ricorrere all'ANOVA.

L'ANOVA verrà condotta analizzando i valori massimi di spinta assiale registrati nelle prove.

Volendo valutare anche l'influenza di una eventuale interazione tra i fattori occorre avere dei campioni di dati con ripetizione.

Tuttavia per poter effettuare a rigore l'ANOVA occorre che siano rispettate due ipotesi:

- le popolazioni da cui sono estratti i campioni seguono una distribuzione normale;
- la varianza delle popolazioni è omogenea.

In questo caso la popolazione è identificata da tutti i possibili massimi di spinta assiale legati ad un determinato maschio che lavora un particolare acciaio, mentre i campioni sono rappresentati dai valori ottenuti dalle prove.

Decidendo di utilizzare su ogni acciaio un solo maschio per tipo come fatto per questo lavoro (capitolo 2.3), per avere un campione con ripetizione e poter rispettare l'ipotesi di distribuzione normale della popolazione, occorre che il numero di prove con lo stesso maschio non sia eccessivo.

Se il numero fosse elevato interverrebbe l'influenza dell'usura e questo porterebbe a dover considerare anche il tempo come fattore da indagare.

Non si potrebbe più supporre la distribuzione normale della popolazione, in quanto i valori tenderebbero a crescere con l'avanzare delle prove per via dell'usura.

Considerando la particolarità riscontrata nei massimi di spinta assiale (schema segnale che si ripete con le varie facce di lavoro, capitolo 3.3), occorre lavorare una faccia per ogni blocco di acciaio e considerare solamente i valori che formano il tratto centrale dello schema (formano un plateau).

Altrimenti occorrerebbe considerare come un fattore da indagare anche la causa (esterna al processo di maschiatura) che fa crescere e poi decrescere i massimi registrati di spinta assiale.

A seguito di quanto detto per ogni acciaio si può pensare di lavorare una sola faccia dei blocchi.

Per stimare un modello di risposta del fenomeno si può ricorrere alle Tavole di Yates (non possibile se analizzassimo fattori con più di 2 livelli). Il modello fornisce

una previsione statistica di risposta del fenomeno (media dei massimi di spinta assiale) rispetto ai livelli che assumono i fattori (n° lobi e angolo imbocco).

È un modello di tipo additivo (Figura 36) che non rappresenta pertanto una “relazione fisica” tra i fattori e la risposta.

Comb.	Yates	I	A	B	AB	x_{ij}
00	(1)	1	-1	-1	1	x_{00}
10	a	1	1	-1	-1	x_{10}
01	b	1	-1	1	-1	x_{01}
11	ab	1	1	1	1	x_{11}
	$\Sigma/2^2$	$x_{..}$	\underline{a}	\underline{b}	\underline{ab}	

$$a_0 = -\underline{a} \quad a_1 = \underline{a} \quad b_0 = -\underline{b} \quad b_1 = \underline{b} \quad ab_{ii} = \underline{ab} \quad ab_{jj} = -\underline{ab}$$

$$x_{ij} = x_{..} + [a_0 \quad a_1](A) + [b_0 \quad b_1](B) + \begin{bmatrix} ab_{00} & ab_{01} \\ ab_{10} & ab_{11} \end{bmatrix} (AB)$$

Figura 36 – Tavola di Yates per piano sperimentale 2^2 ; in rosso è indicato il modello di risposta del fenomeno

Legenda dei simboli in Figura 36:

- le lettere maiuscole (A, B, ...) indicano i fattori considerati;
- le lettere minuscole (colonna “Yates”) indicano i livelli assunti dai fattori nelle prove. La presenza della lettera indica che il rispettivo fattore (indicato con la lettera maiuscola) è posto al livello 1 mentre se la lettera non è riportata il fattore assume livello 0 (vedere colonna “Comb.”);
- i valori x_{ij} indicano la media (media dei massimi di spinta assiale) delle prove condotte con il fattore A al livello “i” (0 o 1) e il fattore B al livello “j” (0 o 1);
- l’ultima riga della tabella corrisponde alla media della colonna x_{ij} , i cui valori sono moltiplicati per i rispettivi numeri (1 o -1) posti sulla colonna del dato calcolato (ad esempio $\underline{a} = \frac{-x_{00} + x_{10} - x_{01} + x_{11}}{4}$);

- dai valori calcolati nel punto precedente si ricavano i dati da inserire nel modello (ad esempio $x_{00} = x_{..} + a_0 + b_0 + ab_{00}$). Nel modello dovranno essere inseriti solamente i fattori che l'ANOVA ha indicato come significativi.

La corrispondenza dei fattori e livelli indicati in Figura 36 (pagina precedente) con i dati dei maschi può essere la seguente.

Tabelle 35 – Corrispondenza fattori e livelli in Figura 36 con dati maschi

Fattore A	livello 0	livello 1
n° lobi	5	7

Fattore B	livello 0	livello 1
angolo imbocco	7,67	10,33

Per i diversi acciai testati verranno analizzate diverse tavole di Yates, così da valutare per ogni acciaio quale è la combinazione di livelli dei fattori che minimizza la spinta assiale.

Bibliografia

[1] Utensili e attrezzature. Milano: Tecniche Nuove S.p.A., N. 5 ottobre 2020.

[2] G. FROMENTIN et al., An experimental study on the effects of lubrication in form tapping, in <<Tribology International>>, 43 (2010), pp. 1726-1734.

[3] A.L. DEMMERLING and D. SÖFFKER, Improved examination and test procedure of tapping torque tests according to ASTM D5619 using coated forming taps and water-mixed metalworking fluids, in <<Tribology International>>, 145 (2020), pp. 106-115.

[4] Trevigiana Metalli.

<http://trevigianametalli.it/wp-content/uploads/2017/02/scheda-tecnica-W-1.2379.pdf>

[5] Metallurgia Veneta.

<https://www.metallurgicaveneta.it/wp-content/uploads/2019/03/16MnCr5.pdf>

[6] Metallurgia Veneta.

<https://www.metallurgicaveneta.it/wp-content/uploads/2019/03/C45E.pdf>

[7] Metallurgia Veneta.

<https://www.metallurgicaveneta.it/wp-content/uploads/2019/03/S235JR.pdf>

[8] Hardinge. <https://www.hardinge.com/product-brand/bridgeport/>

[9] Pro-micron. <https://www.pro-micron.de/spike/?lang=en>

[10] R. PUZOVIĆ AND B. KOKOTOVIĆ, Prediction of thrust force and torque in tapping operations using computer simulation, in <<FME Transactions >>, 34 (2006), pp. 1-5.