

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Laurea Magistrale

in

INGEGNERIA DEI MATERIALI

Tesi di Laurea

***OTTIMIZZAZIONE DI UN PROCESSO DI MASCHIATURA A
RULLARE: USURA E LUBRIFICAZIONE***

Relatore: Chiar.^{mo} Prof. Manuele Dabalà

Correlatore: Ing. Giovanni M. Bizzotto

Correlatore: Ing. Katya Brunelli

Laureando: Ferraro Stefano

ANNO ACCADEMICO 2012 – 2013

Indice

Sommario	1
Capitolo 1	3
La filettatura interna per deformazione	
1.1 Introduzione.....	3
1.2 Materiali lavorabili a rullatura.....	4
1.3 La geometria dei maschi a rullare.....	5
1.4 La realizzazione del filetto mediante deformazione plastica.....	7
1.4.1 Proprietà di un filetto ottenuto tramite deformazione e differenze con uno prodotto a taglio.....	10
1.4.2 Influenza sul processo della dimensione del preforo	12
Capitolo 2	15
Processo produttivo del morsetto	
2.1 Descrizione del prodotto.....	15
2.2 Acquisizione della materia prima.....	16
2.3 Processo di formatura	19
2.4 Processo di filettatura.	21
2.5 Fase di stacco e disoleatura	26
2.6 Trattamento termico	27
2.7 Trattamento superficiale.....	28
2.8 Il controllo qualità e collaudo del morsetto	28
2.9 APPROFONDIMENTO SPERIMENTALE I: Valutazione dell'incrudimento del materiale del filetto causato dalla maschiatura a rullare.....	30
2.9.1 Il test di durezza Vickers per microindentazione	31
2.9.2 La preparazione dei campioni	34

2.9.3	Misure di durezza tramite microindendazione	36
2.9.4	Analisi metallografica dei campioni.....	41
Capitolo 3	45
La lubrificazione		
3.1.	Introduzione alla lubrificazione	45
3.1.1.	La lubrificazione EP	51
3.1.2.	La lubrificazione untuosa	53
3.2.	La lubrificazione nel processo di maschiatura a rullare.....	56
3.2.1.	Studio ed analisi del fluido lubrificante usato nel processo standard.....	58
Capitolo 4	67
La filettatura Metrica ISO		
4.1.	Definizione	67
4.2.	Caratteristiche geometriche della filettatura Metrica ISO	67
4.3.	Il sistema di tolleranza ISO per le filettature	70
4.3.1.	Tolleranze dimensionali nella maschiatura a rullare	74
4.3.2.	Effetto del rivestimento sulle dimensioni del filetto	75
4.3.3.	Controllo della conformità di una filettatura tramite tampone filettato.....	77
4.3.4.	APPROFONDIMENTO SPERIMENTALE II: Controllo della conformità di una filettatura mediante confronto diretto.....	82

Capitolo 5.....	91
PARTE SPERIMENTALE: Studio dell'usura dei maschi a rullare	
5.1 Studio e definizione delle condizioni standard del processo produttivo	91
5.1.1 Modalità di raccolta dati.....	91
5.1.1.1 Determinazione della durata degli utensili	91
5.1.1.2 Analisi dell'usura.....	95
5.1.1.3 Valutazione dell'area di asportazione del rivestimento	96
5.1.1.4 Modello per la valutazione della velocità di usura	97
5.1.1.5 Analisi qualitativa dei fenomeni tribo-ossidativi.....	99
5.1.1.6 Tavola comparativa dei fenomeni tribo-ossidativi.....	102
5.1.2 Caratteristiche del processo standard di filettatura (GRUPPO STANDARD).....	108
5.1.3 Determinazione della durata degli utensili nelle condizioni standard del processo.....	112
5.1.4 Studio dei fenomeni di usura nelle condizioni standard del processo	112
5.2 GRUPPO A	115
5.2.1 Analisi della durata.....	116
5.2.2 Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi.....	117
5.2.3 Descrizione dei meccanismi di usura	122
5.3 Ipotesi proposte per l'ottimizzazione del processo.....	134
5.4 GRUPPO B.....	148
5.4.1 Analisi della durata.....	149
5.4.2 Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi.....	150
5.4.3 Descrizione dei meccanismi di usura	153

5.5	GRUPPO C.....	161
5.5.1	Analisi della durata.....	162
5.5.2	Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi.....	163
5.5.3	Descrizione dei meccanismi di usura	166
5.6	GRUPPO D.....	168
5.6.1	Analisi della durata.....	170
5.6.2	Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi.....	170
5.6.3	Descrizione dei meccanismi di usura	174
5.7	GRUPPO E.....	179
5.7.1	Analisi della durata.....	181
5.7.2	Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi.....	182
5.7.3	Descrizione dei meccanismi di usura	185
5.8	Confronto della modalità di progressione dell'usura sul lobo critico per le diverse tipologie di utensili sperimentate	189
5.9	GRUPPO F.....	194
5.9.1	Analisi della durata.....	198
5.9.2	Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi.....	198
5.9.3	Descrizione dei meccanismi di usura	202
5.10	GRUPPO G.....	206
5.10.1	Analisi della durata	208
5.10.2	Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi	208
5.10.3	Descrizione dei meccanismi di usura.....	212

5.11	Influenza sulla modalità di propagazione dell'usura sul lobo critico per le diverse formulazioni di lubrificante sperimentate	216
5.12	GRUPPO H	218
5.12.1	Analisi della durata	218
5.12.2	Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi	219
5.12.3	Descrizione dei meccanismi di usura.....	224
	Considerazioni ed indicazioni conclusive	229
	Appendice.....	235
	L'azienda: Mevis S.p.A	
	Storia e sviluppo aziendale	235
	Le caratteristiche della produzione	237
	Riferimenti bibliografici.....	239

Sommario

L'attività di tesi svolta presso Mevis S.p.A. ha affrontato problematiche legate al miglioramento dell'efficienza di un particolare sistema produttivo di elevato interesse per l'azienda.

Nello specifico è stato attivato un progetto interessando diversi ambiti aziendali con l'obiettivo di migliorare la resa (in termini di durata) degli utensili che realizzano la filettatura nella produzione dei vari codici "morsetto" realizzati da Mevis S.p.A. per un gruppo industriale di dimensione internazionale leader sul panorama europeo nella produzione di sistemi di distribuzione dell'energia elettrica e nell'automazione.

L'azienda dispone di un impianto dedicato esclusivamente alla produzione di questi componenti metallici, progettato in maniera tale da garantire una produttività annua che si aggira sul centinaio di milioni di pezzi.

Caratteristiche del sistema produttivo e dei pezzi realizzati saranno ampiamente trattati nei capitoli successivi.

Il parametro di riferimento principale alla base dello studio svolto sarà la frequenza di sostituzione degli utensili (nella fattispecie dei maschi a rullare) e quindi, indirettamente, l'efficienza produttiva.

Ottenere, infatti, un aumento della durata degli utensili porta indubbiamente a vantaggi nella produttività riducendo i tempi passivi dovuti alla sostituzione degli stessi.

Comporta, inoltre, un minore consumo di utensili con conseguenti riduzione dei costi di produzione.

Si pensi, infatti, che il solo impianto sotto studio necessita la sostituzione di circa 100 maschi a rullare al mese e che il costo sul mercato di questi utensili si aggira sui 20 ÷ 30 € al pezzo.

Senza voler ricadere su considerazioni strettamente economiche, è evidente come un aumento della durata degli utensili, anche di pochi punti percentuali, grazie a variate condizioni di lavorazione, porterebbe a indiscutibili vantaggi economici per l'azienda stessa.

Al fine di poter garantire un'adeguata lettura dei risultati ottenuti la prima parte del lavoro è stata dedicata alla definizione delle caratteristiche standard del processo produttivo in uso, delle sue peculiarità, degli aspetti principali e della durata tipica degli utensili in tali condizioni.

Questo studio preliminare ha permesso, inoltre, di determinare le variabili del processo e di decidere quali tra queste considerare come costanti e assodate (e in tal senso mantenute, poi, il più possibile invariate durante l'intera campagna di raccolta dati), e quali, invece, risultassero essere suscettibili di variazioni e/o modifiche al fine di aumentare la vita degli utensili.

L'attenzione è stata posta, in particolar modo, su tutte quelle variabili legate alle condizioni tribologiche del processo, quali la natura dei materiali coinvolti, le caratteristiche fondamentali degli utensili tra cui geometria ed eventuali rivestimenti superficiali, le tipologie e le modalità di impiego dei lubrificanti.

Si sono, inoltre, osservati e descritti i fenomeni di usura responsabili della durata limitata dei maschi a rullare.

In tutte le varie prove condotte si è cercato, per quanto possibile, di modificare le condizioni di processo un'unica variabile alla volta, in modo tale da poter quantificare disgiuntamente i benefici o peggioramenti adottati dalla singola variazione.

Questo metodo può portare, alla fine della sperimentazione, a stilare una lista di soluzioni che applicate singolarmente possono portare ad un aumento di produttività del processo.

Non bisogna, però, cadere nell'errore di ritenere che l'applicazione contemporanea di due o più soluzioni (compatibili tra loro) comporti necessariamente un miglioramento legato alla sovrapposizione degli effetti benefici apportati dalla singola variazione.

Questo perché i fenomeni tribologici sono caratterizzati da notevole complessità e possono interagire tra loro con meccanismi sinergici (nel migliore dei casi), ma anche competitivi e antagonisti. L'effetto derivante dall'adozione contemporanea di più soluzioni dovrà essere a sua volta adeguatamente verificato sperimentalmente.

Nella determinazione delle variazioni da apportare al sistema si è sempre, per quanto possibile, cercato di operare una scelta motivata da osservazioni e analisi precedenti rifuggendo, invece, a metodologie del tipo "try and error".

Si è, inoltre, cercato di affiancare all'osservazione diretta dei fenomeni di usura la realizzazione di un modello in grado di descrivere il comportamento del sistema e le sue reazioni di fronte alle variazioni applicate.

Un tale modello sarebbe, infatti, in grado di prevedere sulla base della conoscenza delle variabili in gioco, la durata plausibile degli utensili, anche in ottica di realizzare un'attività di controllo della produzione più efficace.

Ulteriore attenzione è stata posta alla descrizione del comportamento e dell'efficacia del fluido lubrificante, anche in virtù del recente passaggio dell'impianto all'uso di un nuovo prodotto lubrificante.

Obiettivo base resta, tuttavia, l'aumento della vita utile degli utensili usati nella fase di filettatura a rullare.

La filettatura interna per deformazione

1.1 Introduzione

La maschiatura per deformazione, detta anche maschiatura a rullare, è un processo classificato secondo DIN 8583-5 nei procedimenti di deformazione a pressione a freddo, ed è utilizzato nella produzione di filettature interne in modo alternativo alla filettatura tramite asportazione di truciolo.

L'adozione di questa tecnica, in sostituzione alla più tradizionale filettatura per taglio, sta avendo un andamento via via crescente nei settori di produzione di massa (quello automotive per la maggiore) visti i numerosi benefici che essa è in grado di apportare in campo industriale.

I vantaggi ottenuti sono in primo luogo economici, avendo questa lavorazione un minor costo unitario e una maggiore produttività. Ciò deriva dal fatto che la deformazione permette l'uso di velocità periferiche comprese tra i 20 e i 90 m/min, sensibilmente maggiori (generalmente il doppio) rispetto a quelle solitamente permesse nella maschiatura a taglio.

Offre, inoltre, la possibilità di ottenere un filetto completo in un'unica passata a differenza dei processi di fresatura a filettare.

Altri vantaggi economici derivano dalla prolungata vita dell'utensile che permette di filettare un numero considerevole di fori prima che l'usura del maschio porti il pezzo lavorato al di fuori del campo di tolleranza accettato.

Ciò perché, come sarà descritto più in dettaglio in seguito, i lobi dei maschi a rullare hanno molta più superficie disponibile per produrre il filetto che non viene tagliato, ma formato e per tanto resistono meglio ad usura.

La differenza di progettazione e funzione porta la vita dei maschi a rullare ad essere circa 15 volte quella di un maschio a tagliare a parità di parametri al contorno.

La filettatura a rullare, realizzando una sagomatura a pressione, non genera trucioli e ciò permette, oltre ad un notevole risparmio in materiale, un aumento della pulizia della zona di lavoro, l'assenza di sistemi di evacuazione degli sfridi e minori limitazioni sulla massima lunghezza filettata realizzabile, sempre confrontandola con le altre possibili tecniche di maschiatura.

Con questo metodo si possono, infatti, filettare senza problemi anche fori profondi più di quattro volte il loro diametro, usando lo stesso utensile indifferentemente si tratti di fori ciechi o passanti.

Ulteriori vantaggi derivano dalla possibilità di realizzare filettature di qualità superficiale elevata e prestazioni notevolmente migliorate rispetto al processo per taglio.

Di conseguenza a tutto ciò, la maschiatura a rullare, vista la maggiore competitività, dovrebbe virtualmente sostituire ed eliminare la filettatura per asportazione di truciolo in tutte le produzioni di massa in cui risulta applicabile.

È un processo, tuttavia, ancora poco conosciuto e diffuso e la maggior parte delle industrie utilizza ancora macchine a controllo numerico dotate di maschi a tagliare, meno efficienti e duraturi.

1.2 Materiali lavorabili a rullatura

Il campo di applicabilità del processo di filettatura per deformazione è relativamente ampio e permette la lavorazione di materiali metallici sia ferrosi che non.

Si ha, tuttavia, un insieme di materiali lavorabili ridotto a circa il 65% rispetto al processo “classico” per taglio, vista la necessità di avere dei materiali caratterizzati dal possedere un comportamento plastico a freddo (il processo è eseguito a temperatura ambiente) sufficientemente buono da permettere la formatura del filetto.

Tipicamente si richiede al materiale di possedere una durezza (espressa in gradi

Brinell) inferiore ai 200 MPa, una resistenza meccanica non superiore agli 800 MPa ed un allungamento a rottura compreso tra il 10 e il 40%.

In realtà, con opportune considerazioni sulla velocità periferica, sulla geometria e sul tipo di utensile, sul sistema di lubrificazione e sulla macchina utensile adoperata, si è dimostrato che questa tecnica di filettatura è applicabile a quasi tutte le classi di acciai (anche inossidabili e fortemente legati con utensili speciali e velocità ridotte), alle ghise sferoidali (GJS con $\sigma_s < 500$

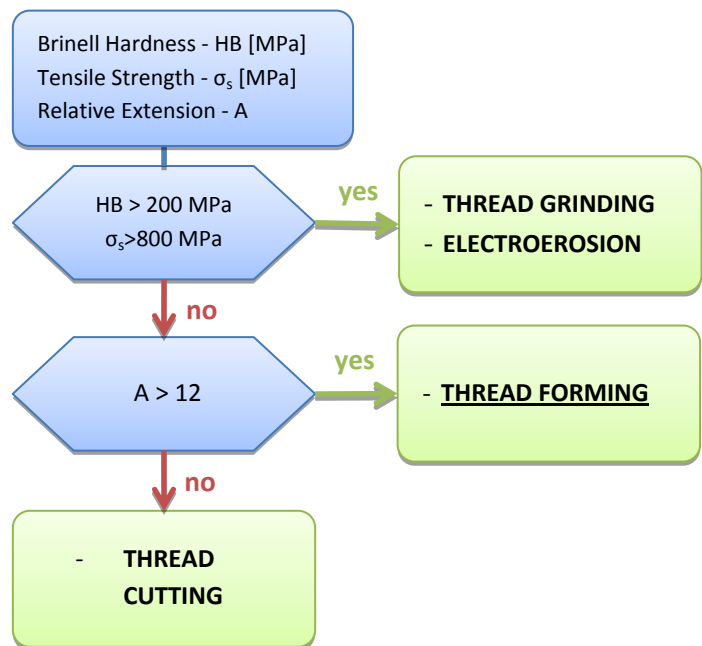


Fig. 1.1: Algoritmo per la determinazione del metodo di filettatura in base alle proprietà meccaniche del materiale lavorato.

MPa), alle leghe di alluminio, al rame e alle sue leghe (bronzi e ottoni quando sufficientemente duttili), alle leghe di titanio e a quelle a base nichel.

1.3 La geometria dei maschi a rullare

Il maschio a rullare è caratterizzato da una geometria particolare atta alla realizzazione del processo di deformazione.

Longitudinalmente la zona operativa è suddivisa in due porzioni: un tratto di

imbocco ad andamento conico (denominato nel caso specifico della maschiatura a rullare “avvicinamento”) che permette di sviluppare la deformazione con una certa gradualità, e un tratto di guida cilindrico che va a calibrare la madrevite appena creata, rifinandone la superficie e permettendo, in aggiunta, un ottimo allineamento del maschio nel foro.

La forma dell’imbocco conico (descritta secondo DIN 2175 dalla lunghezza dell’imbocco in numero di filetti) è un parametro fondamentale in quando determina la gradualità con cui viene deformato il materiale.

Imbocchi rapidi (lunghezza minore di 3 filetti) realizzano deformazioni gravose concentrando la maggior parte del lavoro di deformazione nei primi momenti.

Ciò porta rapidamente il filetto a raggiungere le dimensioni finali e, quindi, permette teoricamente di ridurre la corsa dell’utensile con una conseguente riduzione dei tempi di lavorazione.

D’altra parte, questa pratica comporta indubbiamente una riduzione della vita degli utensili che vengono sottoposti a stati tensionali elevati.

Imbocchi più gradualsi permettono, invece, di realizzare il processo con velocità di deformazione più blande a parità di velocità periferica, dando vita a stati tensionali più contenuti. Ciò può aumentare la vita dell’utensile, ma allo stesso tempo prolunga la durata del processo, aumenta la corsa necessaria e di conseguenza gli attriti in gioco e il riscaldamento del sistema che ne deriva.

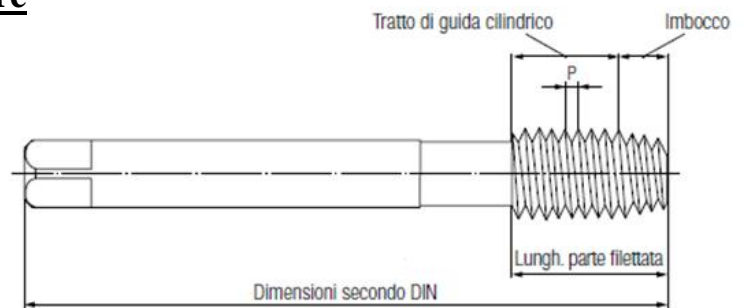


Fig. 1.2: Geometria caratteristica dei maschi a rullare.

FORMA D'IMBOCCO	LUNGHEZZA [n° filetti]
A	6÷8
B	3.5÷5
C	2÷3
D	3.5÷5
E	1.5÷2
F	1÷1.5

Tabella I: Forme e lunghezze d'imbocco per maschi a rullare secondo DIN 2175.

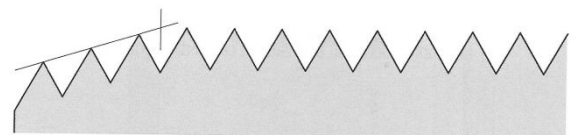


Fig. 1.3: Forma C (lunghezza d'imbocco di 2÷3 filetti).

Osservando la sezione trasversale dell'utensile questo mostra, invece, un profilo poligonale caratterizzato da lobi con profilo arrotondato privo di angoli di taglio.

La sezione resistente è molto ampia, vista l'assenza delle scanalature necessarie all'evacuazione del truciolo tipicamente realizzate nei maschi a tagliare in corrispondenza dell'angolo di taglio. Ciò conferisce all'utensile una notevole stabilità, che si traduce in un'elevata sicurezza del processo produttivo.

Tuttavia, la maggior parte delle versioni di maschi a rullare sono dotate di canalini di lubrificazione longitudinali, tali da permettere un maggiore afflusso di liquido lubro-refrigerante sulla superficie lavorata e, nel caso di fori ciechi, la fuoriuscita di eventuale aria o lubrificante intrappolati.

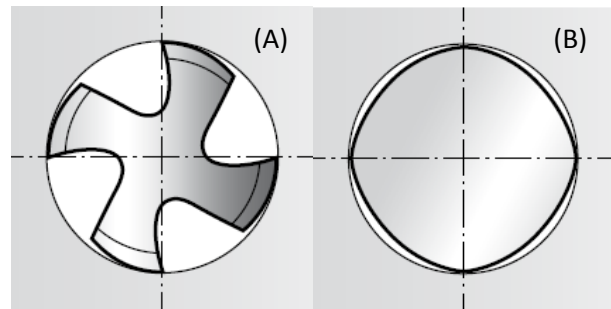


Fig. 1.4: Sezione trasversali tipiche di un maschio a tagliare (A) e di un maschio a rullare (B).

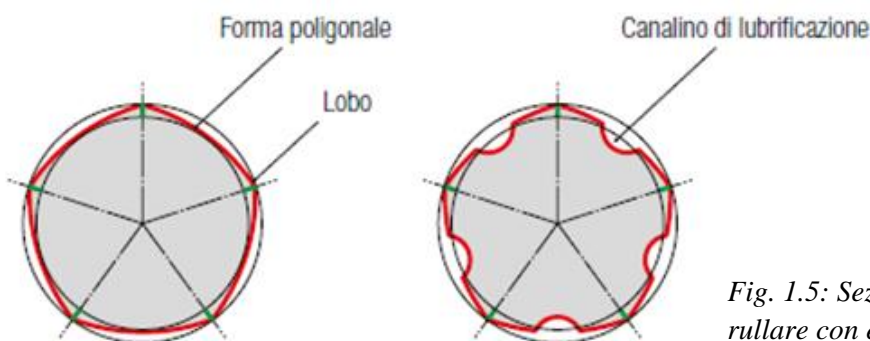


Fig. 1.5: Sezioni trasversali di maschi a rullare con e senza canalini di lubrificazione.

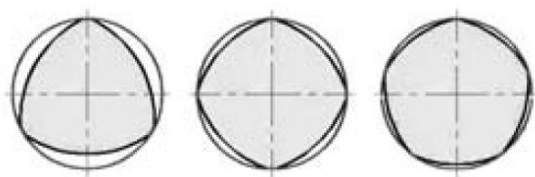


Fig. 1.6: Sezioni caratterizzate da forme poligonali rispettivamente a 3, 4 e 5 lobi.

È stato dimostrato da numerose esperienze come la geometria delle scanalature di pressione (lobi) sia una variabile fondamentale nel processo, in quanto, da essa dipende l'attrito sviluppato nel corso della lavorazione, la velocità e il comportamento a deformazione del materiale.

Ne deriva che la forma poligonale e il numero di lobi negli utensili possono essere ottimizzati in relazione al materiale da lavorare.

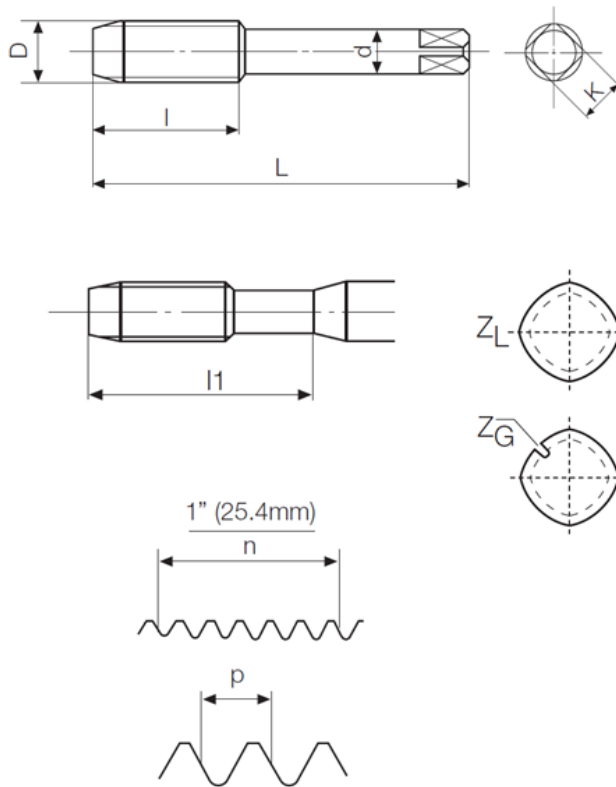


Fig. 1.7: Parametri geometrici nei maschi a deformazione a freddo secondo DIN 2174:

D = diametro nominale

d = diametro del gambo

L = lunghezza totale

l = lunghezza della zona filettata

ll = lunghezza utile

k = sezione quadro

p = passo

n = filetti per pollice

Z_L = numero di lobi

Z_G = numero di canalini

1.4 La realizzazione del filetto mediante deformazione

La maschiatura a rullare, come già accennato in precedenza, permette la realizzazione di una filettatura interna su un foro punzonato senza comportare alcuna perdita di materiale.

Ciò può essere realizzato sagomando a pressione il filetto sul pezzo in lavorazione tramite un utensile dotato di una superficie efficace elicoidale.

La sezione elicoidale del filetto del maschio, realizzata seguendo la forma poligonale del maschio stesso, viene condotta all'interno del preforo con un avanzamento sincrono adeguato e proporzionale al passo del filetto stesso.

Il profilo del filetto viene gradualmente impresso sul pezzo in lavorazione, in una sorta di forgiatura progressiva a stadi, in cui, ad ogni rotazione, si ha un incremento della deformazione permanente a partire dalla regione di avvicinamento della sezione del filetto.

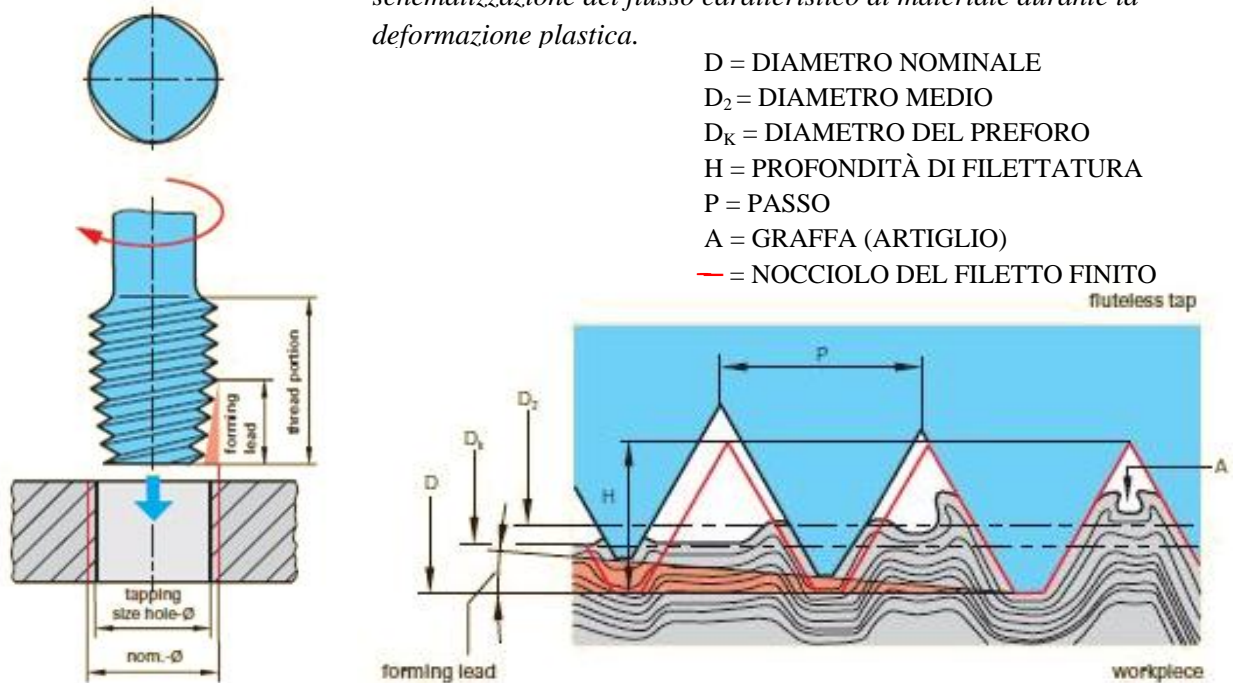
La tensione sviluppata dal processo supera il limite di deformazione del materiale nella zona da filettare, generando una deformazione plastica dello stesso.

Si sviluppa un flusso nel quale il materiale si muove radialmente scorrendo lungo il profilo del filetto a partire dalla base libera del dente.

Grazie a questo processo di scorrimento si genera il diametro di nocciolo della madre vite (fondo del filetto), mentre all'apice del filetto si creano delle tasche sagomate (graffe) caratteristiche del processo.

Il flusso di materiale che si genera è del tutto analogo a quello che si otterrebbe realizzando una deformazione piana pressando un set di indentatori cuneiformi paralleli sulla superficie del materiale.

Fig. 1.8: Principio di funzionamento della maschiatura a rullare e schematizzazione del flusso caratteristico di materiale durante la deformazione plastica.



Il processo può essere schematicamente suddiviso in varie fasi utilizzando come variabile il momento torcente richiesto al mandrino nei vari istanti.

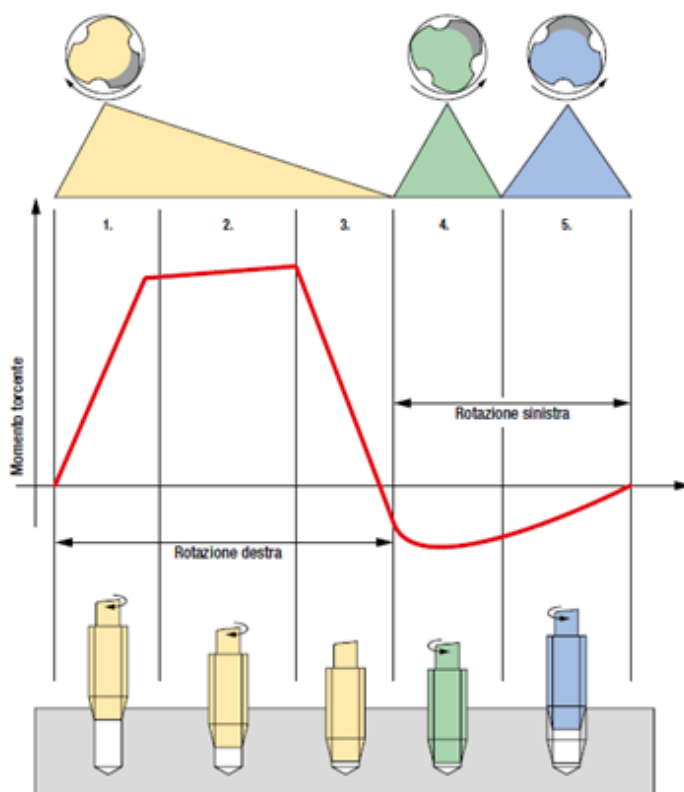


Fig. 1.9: Diagramma schematico dell'andamento del momento torcente nel processo di maschiatura rullata:

1. Prima deformazione operata dal maschio a rullare fino al completo contatto di tutti i lobi d'imbocco;
2. Massimo sforzo richiesto in presenza dell'imbocco completamente inserito;
3. Decelerazione del mandrino macchina fino all'arresto;
4. Inizio del movimento di ritorno del mandrino;
5. Attrito radente tra maschio a rullare e pezzo.

Come facilmente individuabile in figura, ha luogo una prima fase a coppia crescente durante la quale l'imbocco di forma conica entra in contatto con la superficie del preforo, i lobi ingranano l'uno dopo l'altro mediante avanzamento radiale e iniziano a produrre la deformazione.

Una volta che il maschio è penetrato nel pezzo per tutta la lunghezza dell'imbocco, il tratto di guida cilindrico inizia a lisciare la superficie della filettatura e funge da guida assiale al proseguimento del processo.

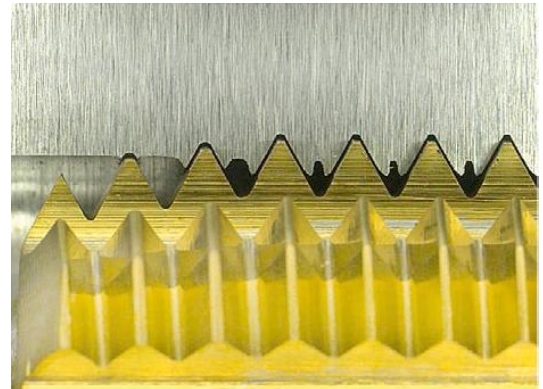


Fig. 1.10: Sezione di una filettatura in formazione mediante maschiatura a rullare.

In corrispondenza della massima penetrazione, la deformazione data dall'imbocco e dal tratto cilindrico comporterà la massima richiesta di momento torcente al mandrino.

Seguiranno una fase di decelerazione necessaria ad arrestare il mandrino e ad invertirne la rotazione durante la corsa di ritorno.

La coppia richiesta al mandrino durante questa fase è attribuibile essenzialmente allo sviluppo di attrito radente tra maschio e superficie lavorata del pezzo.

Da queste considerazioni si possono trarre informazioni sulle forze in gioco che derivano per tanto unicamente da 2 contributi:

- la deformazione plastica del materiale;
- l'attrito radente risultante dallo scorrimento relativo delle superfici;

Dal punto di vista del valore massimo richiesto, il momento torcente necessario all'operazione varia in relazione al materiale da lavorare, alle dimensioni della filettatura, alle condizioni di lubrificazione, al diametro del preforo,

alla geometria dell'utensile e alla tipologia di materiale con cui è realizzato il maschio e l'eventuale rivestimento superficiale di quest'ultimo.

Si può facilmente dimostrare come questo valore sia sempre maggiore rispetto alla coppia richiesta, a parità di condizioni, ad una filettatura a tagliare.

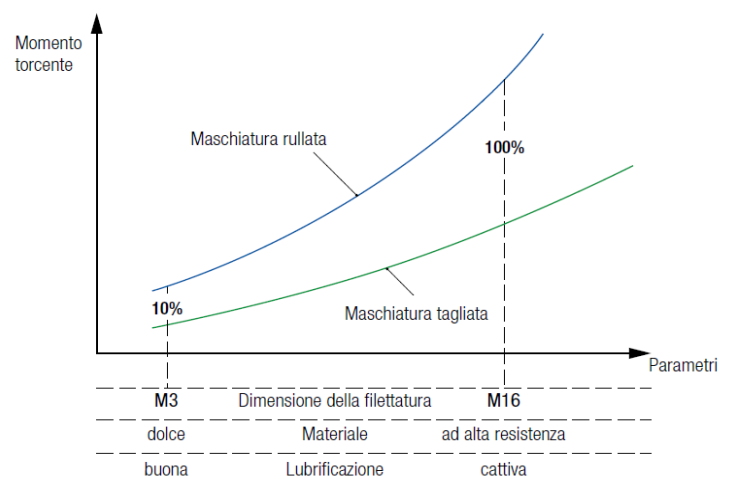


Fig. 1.11: Differenza di momento torcente richiesto in condizioni diverse da un processo di maschiatura a rullare e da uno per asportazione di truciolo.

1.4.1 Proprietà di un filetto ottenuto tramite deformazioni e differenze con uno prodotto a taglio

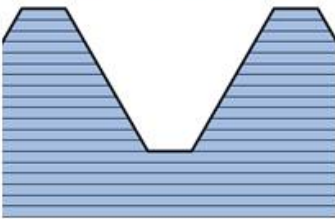


Fig. 1.12: Andamento delle fibre in una filettatura tagliata.

Tra i vantaggi derivanti dalla sostituzione della maschiatura a taglio con un processo di deformazione plastica a freddo, oltre a quelli di natura economica già visti, si ha un netto incremento delle prestazioni meccaniche ottenibili nel filetto prodotto.

In un filetto realizzato mediante tecniche di asportazione di truciolo le massime sollecitazioni ammissibili, generalmente misurate tramite una prova di carico a trazione, sono, infatti, pregiudicate dal taglio delle fibre del materiale sui fianchi del filetto, proprio nella zona in cui va a concentrarsi la sollecitazione.

Questa tipologia di lavorazione, inoltre, genera frequentemente errori sull'angolo del dorso e sul passo del filetto, tali da provocare distribuzioni tensionali non favorevoli con ovvia riduzione della resistenza del filetto.

Al contrario, un filetto lavorato per deformazione presenta fibre "non recise" (corso ininterrotto della fase) e la resistenza della madrevite allo strappo che ne consegue risulta anche fino al 20% superiore.

Questo perché il materiale subisce fenomeni di incrudimento nel corso della deformazione a freddo.

Da un punto di vista micro strutturale, se si vanno ad analizzare le linee di flusso del materiale, si vede come queste risultano essere fortemente allungate e compresse alla base e sul fianco di ogni dente.

In prossimità del picco e all'interno del nocciolo invece, i grani risultano essere sempre allungati, ma orientati parallelamente alla direzione di deformazione, come risultato della forze compressive sui fianchi necessarie a riempire il picco.

Non si producono, inoltre, differenze riguardanti l'angolo di dorso poiché il materiale si deforma a stretto contatto (non sono presenti giochi) con il fianco dell'utensile.

Gli incrudimenti che si generano sulla struttura del materiale in corrispondenza dei fianchi e, soprattutto, del fondo del filetto influiscono, inoltre, favorevolmente sulla resistenza a fatica da parte

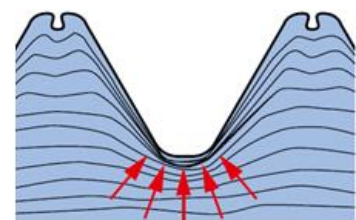


Fig. 1.13: Andamento delle fibre in una filettatura rullata.

di componenti dinamicamente sollecitati soggetti a condizioni di carico variabile, raddoppiandola rispetto a quella tipicamente ottenibile da parte dei filetti tagliati.

Altro contributo all'aumento di resistenza ai fenomeni di fatica è la presenza di stress residui di compressione in direzione tangenziale e radiale.

Lungo la terza dimensione si sviluppa, invece, in relazione al regime di lubrificazione usato, uno stato tensionale che risulta essere generalmente prossimo a zero.

Mediante prove di microdurezza si può, inoltre, dimostrare come il processo di deformazione, pur non generando delle trasformazioni metallurgiche, provochi un aumento di durezza del materiale.

Avviene inoltre, una notevole riduzione della tessitura superficiale, che a partire da quella generata in seguito a processi di laminazione a caldo e ricristallizzazione, assume un aspetto quasi isotropico.

L'evenienza per cui il nocciolo non si plasmia completamente e si generi sull'apice dei filetti la caratteristica graffa a forma di artiglio non influenza in alcun modo il carico ammissibile, ma può causare problemi nei processi di avvitamento automatico o nella pulizia del filetto.

In particolar modo, si può dimostrare come il grado di formazione dell'artiglio dipenda dalle dimensioni iniziali del preforo, con artigli meno pronunciati tanto minore sarà il diametro del foro di partenza.

Per quanto riguarda la coppia di serraggio con la quale si può andare a sollecitare la filettatura prodotta in modo tale da garantire un assemblaggio funzionale, non si hanno differenze notevoli tra il comportamento di una filettatura rullata e di una ottenuta tramite asportazione poiché la coppia dipende essenzialmente dall'attrito che si sviluppa all'interfaccia.

La determinazione della forza d'attrito generata è in questo caso fondamentale: sovrastimare i coefficienti d'attrito può generare stati tensionali eccessivi tali da provocare il cedimento della vite e/o il danneggiamento del foro. Una sottostima determinerebbe invece, l'incapacità di garantire la tenuta dell'assemblato.

È possibile, inoltre, ottenere, tramite deformazione a freddo, una profondità di filettatura superiore a quella raggiungibile con un utensile ad asportazione di truciolo, anche se i risultati ottenuti sono notevolmente influenzati dalla qualità della lubrorefrigerazione e dalla lunghezza d'ingombro dell'utensile usato.

Anche l'assenza di truciolo contribuisce ad aumentare la lunghezza massima di filettatura realizzabile.

È, tuttavia, sempre consigliato realizzare questo tipo di lavorazione su fori di profondità minori di 1,2 volte il diametro, rispettando tipicamente un limite massimo che corrisponde ad una profondità di 17,5 mm.

Ciò lo rende un processo particolarmente attuabile su fori ottenuti per punzonatura, a patto che le pareti del foro (che tipicamente subiscono un processo di imbutitura tale da generare una sorta di colletto) siano sufficientemente spesse da non variare la loro geometria nel corso del processo. Il passo di filettatura realizzabile è, infine, limitato dalle caratteristiche del materiale lavorato e ha un limite massimo di 3,5 mm.

Da ultimo, la caratterizzazione morfologica del filetto risulta essere uno degli aspetti più importanti per garantire le successive prestazioni funzionali e il corretto contatto con la vite. I due elementi più importanti sono l'ampiezza dell'angolo del picco del filetto e la rettilineità del fianco dello stesso.

Il primo dipende essenzialmente dalle proprietà del preforo (vedi paragrafo successivo) e dai meccanismi di usura che si sviluppano nel corso della lavorazione ed è tipicamente migliore nel caso della maschiatura a rullare, che non presenta gli stessi errori tipici di quella a taglio.

Anche nel secondo caso, la qualità dei filetti ottenuti per taglio è tipicamente inferiore, in quanto gli angoli di taglio tipici dei maschi "tradizionali" durante la corsa di ritorno possono entrare in contatto con i fianchi danneggiandoli. Al contrario i maschi a rullare essendone privi durante la corsa di ritorno manifestano unicamente fenomeni di attrito.

Sono in grado di realizzare, inoltre, delle superfici caratterizzate da una rugosità inferiore.

1.4.2 Influenza sul processo della dimensione del preforo

Una differenza fondamentale tra i processi di maschiatura per taglio e quelli per deformazione è la dimensione del foro che deve essere realizzato sul pezzo prima della creazione del filetto.

Nella filettatura interna tramite asportazione di truciolo, infatti, il diametro del preforo dovrà corrispondere come minimo al diametro misurato sulle creste del filetto dopo lavorazione.

Simbolo di filettatura M	Diametro di prefabbricazione [mm]		
	min.	max.	consigliato
3	2,79	2,82	2,80
4	3,69	3,73	3,70
5	4,64	4,68	4,65
6	5,55	5,60	5,60
8	7,41	7,48	7,45
10	9,28	9,37	9,35
12	11,1	11,2	11,25
16	15,0	15,1	15,10

Nella maschiatura per asportazione di truciolo che realizzi una filettatura metrica ISO con un angolo di pressione di 60° (angolo del fianco) il diametro del preforo è calcolato con la seguente formula:

$$d_p = d - P \quad [mm]$$

Viceversa, nella filettatura a rullare le creste del filetto sono realizzate dal flusso plastico che si genera durante la deformazione della superficie del preforo, pertanto il diametro del foro utilizzato sarà maggiore e avrà un valore intermedio tra quello della cresta e del fondo del filetto.

In questo caso il diametro del preforo sarà dato dalla formula:

$$d_p = d - \frac{f_p \cdot P}{2} \quad [mm] \quad \text{dove: } f_p = \begin{array}{ll} 0,7 & (P < 0,7) \\ 0,8 & (P < 2,0) \\ 0,9 & (P \geq 2,0) \end{array}$$

Questa dimensione dipende soprattutto dalla duttilità del materiale, dalla geometria del pezzo in lavorazione e dalla profondità di innesto voluta, e risulta essere fondamentale per ottenere una data geometria finale del filetto e per definire le forze in gioco durante la lavorazione.

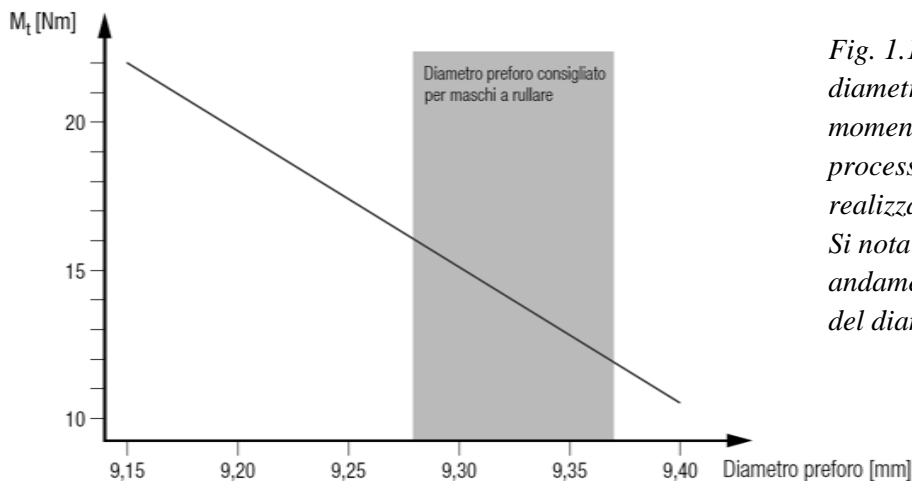


Fig. 1.14: Influenza del diametro del preforo sul momento torcente richiesto al processo di deformazione nella realizzazione di un filetto M10. Si nota una crescita ad andamento lineare al diminuire del diametro dello stesso.

Nel caso di diametri troppo piccoli del preforo, infatti, il materiale del pezzo è deformato in modo eccessivo, non si formano i caratteristici artigli all'apice del profilo la cui altezza risulta eccessiva e tale da produrre forze in grado di causare la rottura dell'utensile.

Al contrario, la realizzazione di prefori sovradimensionati porterebbe ad un insufficiente deformazione del nocciolo con conseguente scarsa sagomatura del filetto e formazione di graffe di dimensioni elevate.

Da queste considerazioni deriva che la tolleranza con cui è realizzabile il diametro del preforo è estremamente limitata, in quanto influisce direttamente sul diametro del nocciolo della madre vite che si intende realizzare.

Nei casi di applicazione con materiali con comportamento a deformazione particolare può essere, quindi, necessario deviare dalle dimensioni del preforo raccomandate tipicamente dai produttori degli utensili e determinarle accuratamente mediante prove appropriate.

Non va dimenticato, inoltre, come ogni imprecisione o rugosità presente sulla superficie del preforo si riprodurrà, poi in maniera speculare sul diametro del nocciolo creato per deformazione.

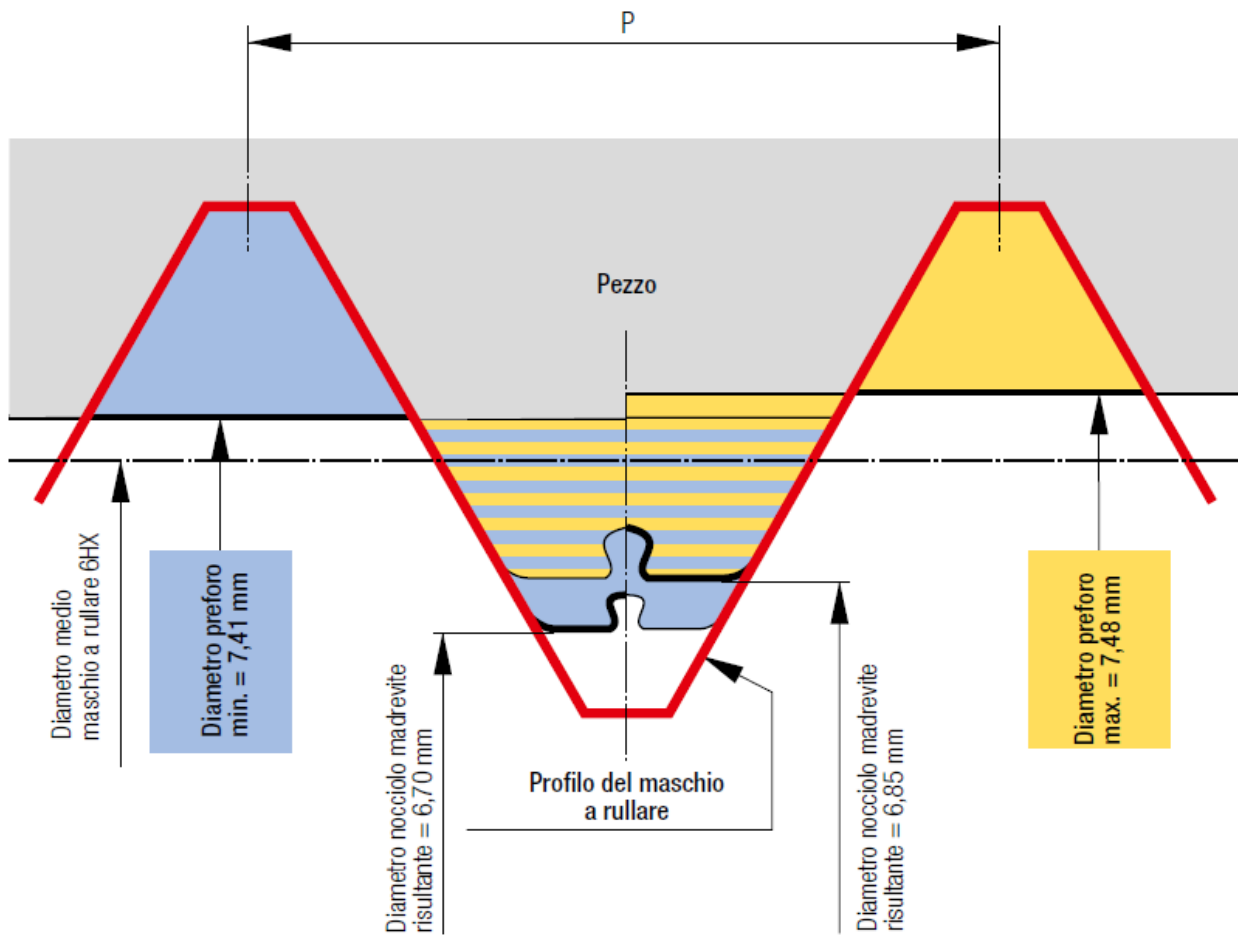


Fig. 1.15: Influenza del diametro del preforo sullo sviluppo del diametro del nocciolo della madrevite. L'esempio è stato ottenuto con un maschio M8-6HX su acciaio inox 316 in condizioni lubro-refrigerate alla velocità di taglio pari a $V_c = 6,4$ m/min.

Il processo produttivo del morsetto

2.1 Descrizione del prodotto

Il morsetto (detto anche morsetto fermacavo) è un dispositivo meccanico per il collegamento elettrico ad un terminale (ad esempio un quadro elettrico) di uno o più cavi. Tipicamente, l'estremità del cavo elettrico, privata dell'isolante, viene inserita nel apposito alloggiamento del morsetto dove un sistema meccanico diretto o indiretto (rispettivamente a vite o a piastra), realizzato in materiale

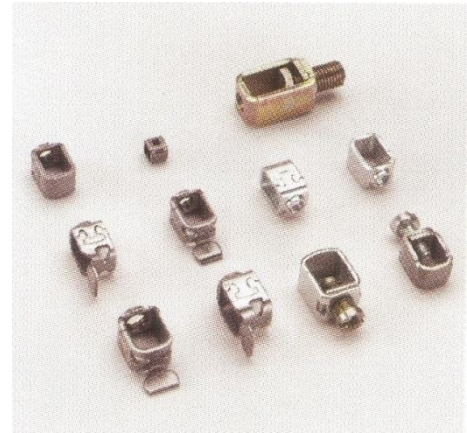


Fig. 2.1: Tipologie di morsetti fermacavo prodotti da Mevis S.p.A.

metallico e conduttivo, provvede al blocco meccanico del terminale del cavo comprimendo i trefoli dei conduttori e alla chiusura del contatto elettrico tra il cavo e il resto del dispositivo.

Per motivi di sicurezza, i morsetti sono tipicamente rivestiti di materiale isolante e congegnati in modo che, a blocco serrato, non siano possibili contatti accidentali con il meccanismo di blocco, che in condizioni di lavoro si trova a essere sotto tensione.

In particolar modo le varie tipologie di morsetti prodotti da Mevis sono destinate ad applicazioni elettriche ad elevata potenza dove si possono raggiungere correnti elettriche di elevato amperaggio.

Tuttavia la relativa semplicità di realizzazione e la povertà del materiale con cui sono realizzati li porta ad essere prodotti a ridotto valore aggiunto e dal prezzo unitario estremamente basso.

Ne consegue, facilmente, come l'azienda possa ricavare degli utili considerevoli da questo codice solo producendolo in grandi quantità, sfruttando un sistema produttivo che risulti veloce ed efficiente, ma, allo stesso tempo, sia in grado di contenere il più possibile i costi produttivi.

Mevis è riuscita ad acquisire a livello europeo importanti quote del mercato di tale tipologia di particolare metallico riuscendo a mettere a punto un processo di realizzazione del morsetto in grado di assicurare un elevatissima produttività (si arrivano a toccare i 400 pezzi al minuto prodotti in un singolo impianto), garantendo, nonostante ciò, un'elevata qualità del prodotto e una produzione contenuta di sfridi e pezzi scarti.

Il prodotto in questione viene prodotto con un processo di fabbricazione integrato che può essere schematizzato nel modo seguente:



2.2 Acquisizione della materia prima

I vari codice morsetto sono realizzati in acciaio C45E (designazione numerica 1.1191 secondo UNI 10083-1) acquistato dall'azienda sotto forma di nastro di spessore pari a 1,5 mm e larghezza 36 mm arrotolato in coils dal peso complessivo di circa 1225 Kg l'uno.

Il materiale è fornito dopo aver subito un trattamento di ricottura globulare e un successivo processo di laminazione a freddo di finitura.

I lotti di materia prima sono suddivisi al loro interno in colli (sotto forma di rotoli su bancali) e per ognuno di essi un sistema di doppia etichettatura (un'etichetta identificativa è posta dal fornitore, mentre un'altra dai responsabili gestione delle materie prime dell'azienda) garantisce la rintracciabilità del materiale di ogni singolo rotolo.

Ogni rotolo è realizzato con il materiale proveniente da una singola colata.

Ciò garantisce costanza nella composizione chimica e nelle proprietà meccaniche di tutti i colli provenienti dalla stessa colata.

Il fornitore riporta nella bolla di accompagnamento del materiale la composizione chimica della colata (secondo UNI EN 10132-3) e le caratteristiche di resistenza meccanica R_m e allungamento L_{080mm} , oltre alle tolleranze dimensionali e di rettilineità con cui è stato realizzato il nastro.

Nel caso specifico dello studio svolto nel corso di questa tesi, nella logica di ridurre il più possibile le variabili in gioco si è stabilito, in accordo con il sistema di gestione delle materie prime, di uniformare il più possibile la materia prima usata nella produzione del codice sotto esame al fine di poter garantire una ripetibilità e costanza delle condizioni operative "al contorno".

In particolar modo, ciò è stato possibile mediante il rifornimento di nastro metallico da un unico fornitore (che esegue la laminazione e i trattamenti termici finali), il quale a sua volta utilizza acciaio proveniente da un'unica acciaieria. Lungo l'intera filiera un adeguato sistema di codifica permette la rintracciabilità del materiale fino alla colata di partenza.

Si è cercato di ridurre, inoltre, al minimo il numero di colate di provenienza del materiale mediante l'acquisizione di lotti di materia prima di grandi dimensioni (superiori alle 10 tonnellate).

Per ogni sperimentazione, di conseguenza, si è ritenuto fondamentale prendere nota da quale colata provenisse il lotto di materiale lavorato, anche al fine di poter osservare, in seguito, se a piccole variazioni di composizione della materia prima potessero corrispondere differenze di comportamento degli utensili dovuti, per esempio, a mutate condizioni tribologiche.

Uno degli aspetti considerati più critici da questo punto di vista è stato il contenuto percentuale di Cr sulla massa totale: questo elemento, pur migliorando le caratteristiche di temprabilità del

materiale, presenta anche un'elevata affinità verso il carbonio col quale può formare carburi misti molto stabili.

La loro presenza (soprattutto se formano una fase finemente dispersa) ha l'effetto di migliorare le caratteristiche meccaniche di resistenza dell'acciaio rendendo più gravoso il lavoro richiesto agli utensili.

Essendo, inoltre, molto duri e resistenti all'usura tendono ad aumentare le caratteristiche di abrasività del materiale nei confronti degli utensili.

L'analisi delle composizioni chimiche delle colate ha, tuttavia, evidenziato come la procedura messa in atto nell'acquisizione della MP sia risultata efficace in quanto ha permesso di svolgere le varie prove lavorando materiali con range composizionali notevolmente più stretti rispetto ai limiti composizionali di fornitura imposti dalla norma UNI EN 10132-3.

LIMITI UNI EN 10132-3			NUMERO DI COLATA										
%massa	min	max	8005	8000	9023	7118	9022	0570	2747	0587	MIN	MAX	MEDIO
C	0,420	0,500	0,461	0,443	0,453	0,456	0,456	0,446	0,452	0,455	0,443	0,461	0,453
Mn	0,500	0,800	0,660	0,640	0,640	0,620	0,650	0,640	0,680	0,630	0,620	0,680	0,645
Si	-	0,400	0,210	0,213	0,245	0,216	0,246	0,235	0,211	0,216	0,210	0,246	0,224
P	-	0,035	0,013	0,012	0,011	0,008	0,016	0,014	0,011	0,014	0,008	0,016	0,012
S	-	0,035	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001
Cr	-	0,400	0,066	0,096	0,075	0,063	0,095	0,096	0,100	0,071	0,063	0,100	0,083
Ni	-	0,100	0,044	0,052	0,047	0,067	0,054	0,050	0,042	0,042	0,042	0,067	0,050
Mo	-	0,400	0,013	0,016	0,013	0,016	0,013	0,006	0,020	0,012	0,006	0,020	0,014
Cu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Al	-	-	0,004	0,004	0,005	0,004	0,006	0,005	0,006	0,005	0,004	0,006	0,005
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			

Tabella III: Composizione chimica dell'acciaio C45E utilizzato nella produzione dei codici "morsetto" durante l'intero corso della sperimentazione.

Sono riportati in grassetto i limiti composizionali imposti dalla norma. Il contenuto percentuale in Cu, Al, V non figura nella norma tuttavia è riportato nel certificato di accompagnamento della colata e i loro limiti sono desumibili da altre norme(UNI EN 10020).

In particolar modo: - V < 0,050%
- Cu < 0,400%

È, inoltre, normalmente inserito lo 0,015÷0,035% di Al per disossidare a fondo l'acciaio e controllare la grossezza del grano.

COMPOSIZIONE CHIMICA MATERIA PRIMA

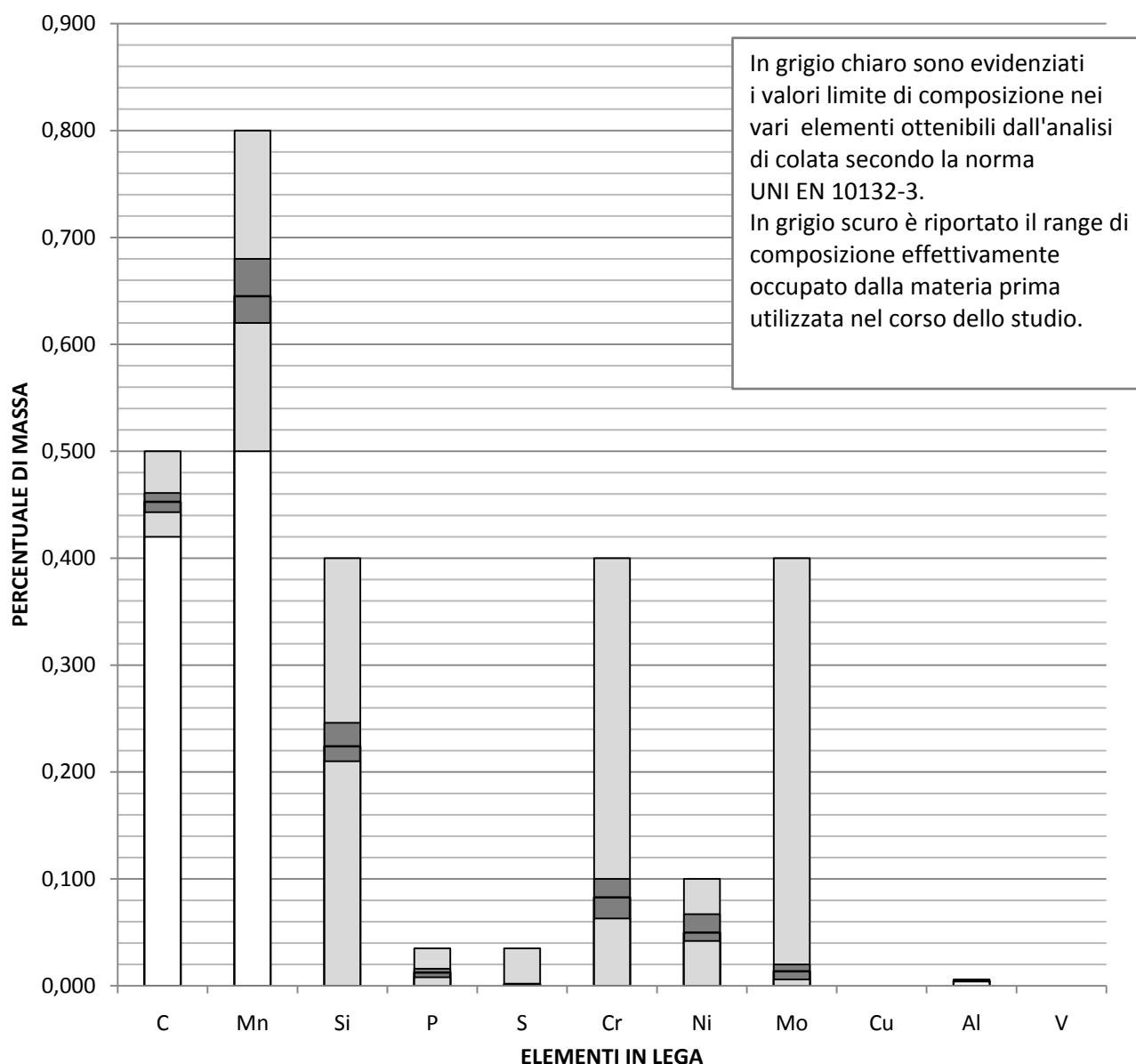


Fig. 2.2: Grafico sul confronto tra i limiti composizionali stabiliti dalla norma UNI EN 10132-3 e il range di composizione della MP effettivamente lavorata.

Ridotta è anche la variabilità per quanto riguarda le proprietà meccaniche del nastro lavorato, fondamentale per mantenere il più possibile costanti le sollecitazioni in gioco nel processo.

PROPRIETÀ MECCANICHE	NUMERO DI COLATA									MIN	MAX	MEDIO
	LIMITI UNI EN 10132-3	8005	8000	9023	7118	9022	0570	2747	0587			
R_m [N/mm ²]	<580	447,5	455,0	457,5	445,0	465,0	485,0	0,455	0,455	445,0	485,0	458,1
L_0 80mm	>18	33,5	30,5	32,5	33,0	31,5	22,0	32,5	31,5	22,0	33,5	30,9

Tabella IV: Confronto tra le proprietà meccaniche limite stabilite dalla norma sulla fornitura e quelle della MP effettivamente lavorata.

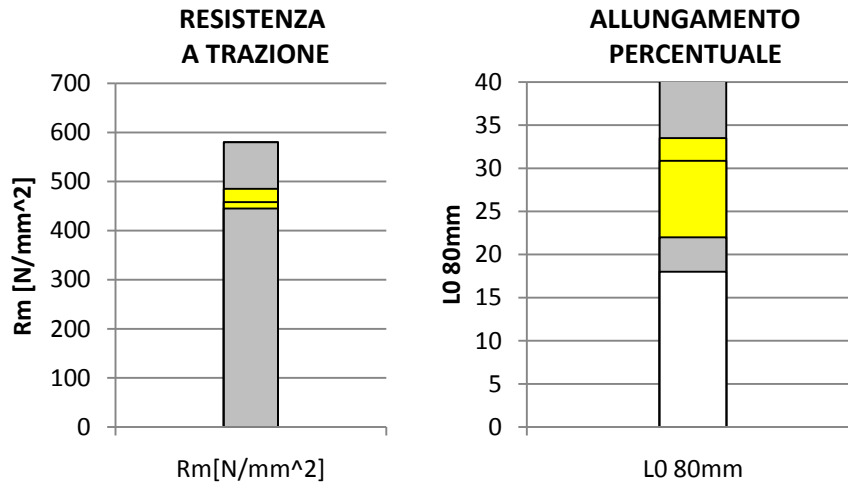


Fig. 2.3: Grafico sul confronto tra le proprietà meccaniche limite stabilite dalla norma UNI EN 10132-3 (in grigio) e il range in cui si sono situate quelle del materiale effettivamente lavorato (in giallo).

Si può notare come le proprietà meccaniche ricadano perfettamente all'interno delle caratteristiche meccaniche richieste al materiale per poter essere filettato tramite rullatura.

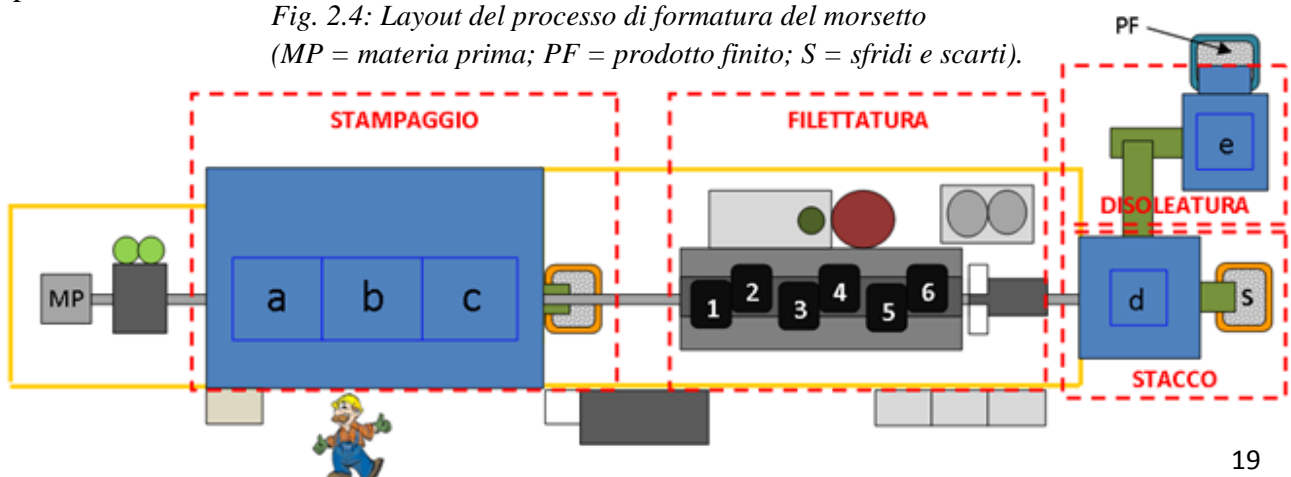
Si usa il C45 in quanto è un acciaio che si presta facilmente ad essere lavorato e deformato a freddo nello stato ricotto, ma, che in seguito a processi di bonifica, permette di realizzare componenti meccanici dotati di durezza elevata e buona tenacità.

Questo acciaio non possiede un'elevata temprabilità, anche se ciò non genera problemi nella produzione del prodotto in questione, in quanto le piccole dimensioni e i piccoli spessori in gioco permettono di far avvenire la trasformazione martensitica su tutto il materiale senza generare problemi di eccessive distorsioni o di rotture dovute all'operazione di tempra.

2.3 Processo di formatura

La formatura dei vari morsetti avviene in un impianto dedicato (908.02) in grado di conferire al prodotto la sua forma finale in una serie di operazioni sequenziali all'interno di un unico ciclo produttivo.

Fig. 2.4: Layout del processo di formatura del morsetto (MP = materia prima; PF = prodotto finito; S = sfridi e scarti).



Il processo inizia con il caricamento da parte dell'operatore del rotolo di nastro di acciaio sull'opportuna rastrelliera.

Il nastro progressivamente srotolato rifornisce una pressa meccanica da 100 t che esegue la formatura del particolare metallico.

L'uso di stampi progressivi permette la realizzazione di pezzi di geometria complessa mantenendo, nonostante ciò, un elevato regime di produzione.

Il meccanismo a biella manovella permette, infatti, alla pressa di realizzare fino a 200 battute al minuto con una produttività di 400 pz/min.

Il numero di pezzi prodotto doppio rispetto al numero di battute deriva dal fatto che gli stampi realizzano una lavorazione "simmetrica" del nastro che all'uscita dall'ultima stazione presenterà dei morsetti completamente formati, ma ancora uniti ad un nastro guida centrale lungo il quale sono distribuiti a zig-zag.

Secondo il classico funzionamento degli stampi progressivi (detti anche stampi a passo), ad ogni battuta dello stampo una serie di punzoni realizza contemporaneamente le diverse operazioni sul nastro.

Nella fase di risalita della parte superiore dello stampo il nastro contenente i morsetti "in realizzazione" viene fatto avanzare di un passo in modo da far eseguire su una data porzione di nastro l'operazione successiva.

La correttezza di avanzamento e la perfetta centratura del nastro in ogni stazione è controllata da una serie di sensori magnetici e tramite dei fori guida praticati sulla striscia centrale.

Lo stampo in particolar modo è suddiviso in tre stazioni: nella prima (**a**) avvengono le operazioni di tranciatura e punzonatura del nastro, nella seconda (**b**) si realizza il colletto in corrispondenza del preforo mediante un'operazione di imbutitura e nella terza (**c**) le operazioni di piegatura che realizzano il corpo cavo del morsetto.

La suddivisione dello stampo in stazioni separate permette una maggiore facilità nel setup della pressa e numerosi vantaggi legati alla possibilità di svolgere operazioni di manutenzione e affilatura solo sulla specifica stazione che effettivamente le necessita e la possibilità di modificare la geometria del prodotto senza sostituire l'intero stampo.

Non bisogna dimenticare che ciò permette, inoltre, di maneggiare stampi meno ingombranti e, soprattutto, meno pesanti.

Vista la notevole laboriosità della fase di avvio della produzione (visto che tutte le operazioni sono realizzate, come accennato, con i morsetti collegati ad un'unica striscia metallica), tra pressa e rastrelliera è situato un sistema automatizzato di saldatura che permette al termine di un

rotolo di MP di saldare l'estremità finale del nastro con quella iniziale del nastro successivo limitando notevolmente la fermata dell'impianto produttivo al cambio rotolo.

La regione termicamente alterata dall'operazione di saldatura viene identificata mediante verniciatura spray, riconosciuta all'imbocco della pressa da un sensore ottico e i pezzi provenienti da tale spezzone sono successivamente scartati in automatico alla fine della produzione con un dispositivo meccanico che, inserendosi nel nastro trasportatore, li devia ad un contenitore per la raccolta degli scarti.

Terminata la formatura la strisciata avanza fino a raggiungere la stazione indipendente di filettatura, scivolando al di sopra di una slitta guida che sfrutta la forma della strisciata per farla avanzare in modo rettilineo.

2.4 Processo di filettatura

La realizzazione del filetto sulla superficie interna del colletto avviene per mezzo di 6 unità di maschiatura Bihler GSE4.2 (nello schema del layout numeri da **1** a **6**) indipendenti dalla pressa e collegate ad un proprio sistema di controllo elettronico e di avanzamento della strisciata.

Il sistema di controllo le rende strumenti particolarmente versatili in quanto l'operatore può inserire per via elettronica i parametri di realizzazione del processo quali la velocità di taglio e l'altezza di filettatura.

Queste unità, inoltre, sono caratterizzate dall'avere una struttura compatta che permette di posizionarle l'una accanto all'altra (disposizione a coppie) permettendo la filettatura contemporanea di 6 morsetti.

L'operazione viene realizzata usando maschi a rullare con tutti i benefici che comporta l'adozione di questa tecnologia.

Un'opportuna e complessa sequenza nella realizzazione dei filetti sulla strisciata, in aggiunta alla corretta disposizione geometrica delle unità di maschiatura, fa sì che, nonostante la distanza tra un morsetto e l'altro nel nastro sia ben inferiore alla distanza di ingombro delle singole unità di maschiatura, tutti i morsetti siano filettati all'uscita dalla filettatrice numero 6.

Tutte le filettatrici operano sincronicamente con pause tra un'operazione e la successiva di durata dettata dalla velocità della pressa a monte e dai tempi necessari all'avanzamento della strisciata stessa.

Le unità sono posizionate in posizione verticale e sono dotate di un dispositivo di sollevamento che facilita l'accesso all'attrezzatura e la sostituzione dei maschi. La regolazione della posizione è possibile sui tre assi. Lungo l'asse verticale (asse di avanzamento degli utensili) la distanza tra il maschio a rullare e il particolare da lavorare è stata fissata a 0.3 mm.

Fig. 2.5: Rappresentazione schematica della posizione delle filettatrici Bihler e della corrispondente sequenza di filettatura.

È rappresentato lo spezzone del nastro lavorato in corrispondenza delle filettatrici.

In grigio sono riportati i morsetti non ancora filettati, in bianco i morsetti in corso di lavorazione, mentre i morsetti colorati corrispondono a quelli filettati dall'unità di maschiatura indicata dal numero.

Al termine di ogni fase la strisciata viene fatta avanzare di un passo di lunghezza corrispondente al tratto di strisciata contenente 6 morsetti (circa 11 cm).

Tale quota, pur risultando estremamente ridotta (i costruttori di filettatrici solitamente consigliano di mantenere delle distanze di sicurezza maggiori di 0,5 mm), risulta necessaria per poter ridurre al minimo i tempi passivi di avanzamento e ritorno dell'utensile vista l'elevata frequenza produttiva richiesta al processo.

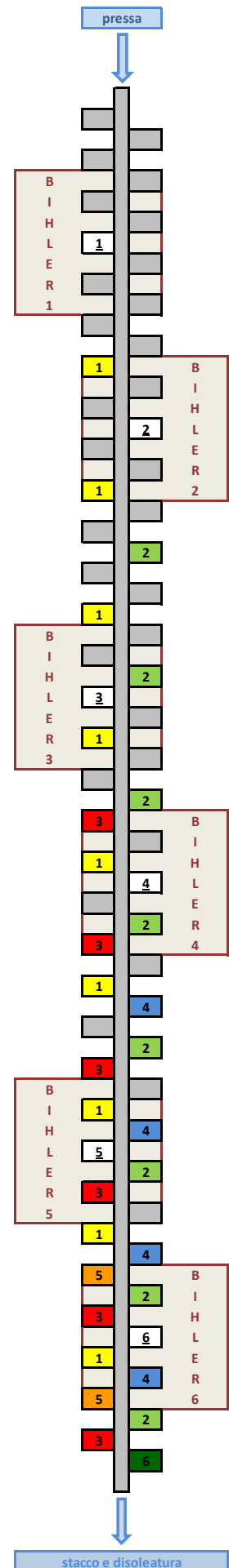
Anche la corsa dell'utensile (< 8 mm) è limitata, sempre con lo scopo di poter mantenere elevata la cadenza produttiva, senza dover ricorrere all'uso di velocità di taglio troppo elevate e per evitare che l'utensile urti la superficie inferiore del morsetto stesso.

Il suo valore, tuttavia, non è fisso, in quanto, per la modalità di funzionamento stesso delle filettatrici ad accumulo di energia inerziale, si possono avere leggere variazioni di corsa dovute a variazioni dell'energia assorbita dalla deformazione.

Le filettatrici, infatti, permettono di impostare il parametro "angolo di lavoro del motore" e non l'effettiva corsa eseguita dal mandrino.

La sicurezza del processo è garantita dalla costanza delle caratteristiche del prodotto realizzato e degli utensili utilizzati, e da un piano di taratura periodica della quota di azzeramento di ogni singola filettatrice.

Questa operazione svolta dagli operatori con l'uso di uno spessimetro risulta necessaria, in quanto, nonostante l'elevata rigidità dell'attrezzatura, l'elevata frequenza con cui questa opera può generare nel tempo leggere variazioni sulla posizione verticale della filettatrice.



L'uso di filettatrici tarate risulta importante, non solo nella produzione stessa in modo da evitare contatti accidentali tra utensili e prodotti nelle fasi di avanzamento, ma, ancor di più nella raccolta dati, in quanto assicura che le 6 filettatrici operino con parametri del tutto analoghi.

Infatti, sebbene l'unità sia comandata da un servomotore senza spazzole con velocità a variazione continua in marcia avanti, il mandrino (l'organo che trasferisce il moto rotatorio dall'albero motore alla pinza porta-utensili) è caratterizzato nel suo moto da fasi di accelerazione e di decelerazione a causa dei fenomeni ineliminabili d'inerzia.

Variazioni nella quota di partenza si tradurranno, pertanto, in variazioni della velocità raggiunta dall'utensile nell'istante in cui i suoi lobi entreranno in contatto con il materiale da deformare con conseguenti variazioni della velocità di deformazione plastica e delle caratteristiche del sistema tribologico.

Di conseguenza anche questa variabile dovrà essere limitata il più possibile al fine di avere una maggiore ripetitività dei risultati ricavati dall'analisi dei maschi a rullare.

La realizzazione della geometria del filetto necessita la sincronizzazione del moto di avanzamento e di quello di rotazione del mandrino. Questo nelle filettatrici in uso avviene per mezzo di un sistema a patrona-madrevite caratterizzato da un passo uguale a quello del filetto che si intende realizzare.

La patrona è unita saldamente al mandrino tramite una chiavetta, mentre la madrevite è accoppiata solidamente alla struttura della filettatrice, in modo tale da resistere agli sforzi torsionali che si sviluppano durante l'operazione.

Al moto rotatorio dell'albero motore corrisponde, per tanto, anche uno spostamento assiale di patrona e mandrino che avviene secondo la relazione:

$$\text{rotazione} = 2\pi \leftarrow \rightarrow \text{avanzamento} = P$$

Il morsetto viene guidato in posizione al di sotto delle filettatrici dal trascinamento in avanti del nastro (passi di lunghezza pari alla lunghezza del nastro contenente 6 morsetti) da un dispositivo di traino posizionato a valle dell'ultima filettatrice.

Il corretto posizionamento del singolo morsetto è garantito, in primo luogo da un complesso sistema di sensori magnetici di posizione, e, secondariamente, anche dal sistema stesso di bloccaggio del morsetto durante la fase di filettatura.

Nell'istante immediatamente precedente alla discesa del mandrino, infatti, il sistema si assicura che il passo sia stato effettuato con precisione mediante un pistoncino verticale (posizionato al centro di ogni coppia di filettatrici) che entra nei fori guida della striscia di trascinamento.

Ogni morsetto viene, inoltre, bloccato lateralmente per mezzo di un pistoncino di geometria opportuna.

L'anima del pistoncino, di forma tale da non interferire con l'operazione di maschiatura, entra all'interno della cava del morsetto e grazie al gioco dimensionale minimo ne impedisce la torsione. Contemporaneamente le spalle del pistoncino premono il morsetto (che in questa fase è ancora unito alla strisciata) contro la slitta guida garantendo un perfetto centraggio del particolare.

Ciò assicura che la posizione del preforo sia coassiale con il maschio e che non ci siano movimenti del morsetto durante la rullatura del colletto tali da poterne compromettere la qualità. Le filettatrici sono dotate, infine, di un sistema di lubrificazione a getto continuo in grado di irrorare abbondantemente le superfici di lavoro.

Il flusso è realizzato mediante un sistema di ugelli posizionati con tubi flessibili in corrispondenza della zona di lavorazione.

Ciò permette di eseguire la rullatura nelle condizioni ottimali di "bagno d'olio" che garantisce notevole asportazione del calore dalle superfici e pulizia dell'utensile dalla presenza di eventuali particolato lavato via dal getto d'olio.

La presenza del bagno d'olio dovrebbe permettere di avvicinarsi, nelle prime fasi di lavorazione, ad una condizione preferibile di lubrificazione idrodinamica anche se, come sarà descritto più approfonditamente nel capitolo relativo, le elevatissime pressioni in gioco (superiori alla tensione di snervamento del materiale lavorato) tendono ad allontanare il lubrificante dalle superfici di contatto generando condizioni di lubrificazione mista o limite.

L'olio viene raccolto in una vasca alla base delle filettatrici contenente circa 200 litri di lubrificante, filtrato per mezzo di un sistema di filtri magnetici e filtri a cartuccia e re-immesso nel circuito da una pompa rotativa che realizza una portata di circa 40 l/min.

Lo scopo della filtrazione dell'olio è evidente in un processo di lavorazione nel quale si voglia massimizzare la durata di un utensile come il caso in esame. La produttività dell'impianto risulta, infatti, legata qualitativamente e quantitativamente alla qualità della filtrazione del lubrificante.

Particelle di sfrido metallico, trasportate dal flusso di lubrificante all'interfaccia utensile-superficie lavorata, peggiorano fortemente le condizioni tribologiche del sistema.

Sono, infatti, particelle abrasive incrudite (e di conseguenza di durezza aumentata) dalle forti pressioni sviluppate dal processo di deformazione.

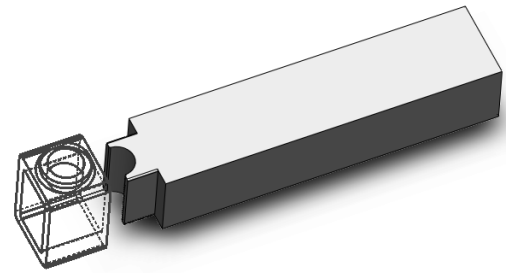


Fig. 2.6: Rappresentazione schematica del pistoncino di bloccaggio del morsetto.

Pur essendo il processo di maschiatura a rullare un processo di deformazione plastica e non di asportazione, si può generare truciolo metallico in corrispondenza delle area di contatto utensile-superficie con particolari meccanismi che saranno descritti in seguito.

Altra fonte di inquinamento da truciolo metallico è la strisciata stessa che trasporta particelle metalliche residue delle operazioni di tranciatura.

Il problema era evidenziato, prima dell'inserimento nel circuito di lubrificazione dei sistemi di filtrazione, dalla formazione di ammassi di truciolo metallico nei punti morti del circuito che periodicamente dovevano essere rimossi dagli operatori.

Per evitare questo fenomeno l'impianto è dotato di un filtro magnetico in serie in grado di catturare e rimuovere gran parte del particolato metallico trasportato dal lubrificante.

È presente, inoltre, da un paio d'anni, un sistema filtrante Diedron Clean Tower EFFE4.

Questo è un filtro di tipo meccanico suddiviso in più aree, che interpone al passaggio del liquido, prima un sacco prefiltrante in tessuto di propilene in grado di catturare il particolato che sfugge al filtro magnetico fino a carature di $20 \div 30 \mu\text{m}$, e, poi, una superficie porosa filtrante sotto forma di cartucce realizzate in carta polimerizzata con rating di filtrazione di $5\mu\text{m}$. Questa combinazione non migliora la qualità finale di filtrazione, ma consente un uso più razionale e quindi più economico del filtro.

Il lubrificante, attraversando questa superficie porosa, rilascia il particolato che si accumula formando uno strato di materiale d'asportazione.

Ciò causa una progressiva chiusura dei passaggi degli elementi filtranti, causando un aumento di perdita di carico e quindi della pressione interna del cilindro metallico contenente il filtro.

La pressione può essere in ogni istante monitorata grazie alla presenza di un manometro posto sul cilindro.

Pressioni superiori a $1,5 \div 1,8$ bar sono sintomatiche di eccessivo accumulo di particolato sui filtri che per tanto andranno sostituiti. Pressioni prossime a 0 bar possono indicare malfunzionamento dell'impianto o presenza di lacerazioni sugli elementi filtranti.

L'impianto Clean Tower è stato collegato in by-pass al circuito di lubrificazione in prossimità della vasca di prelievo della pompa centrifuga del circuito preesistente. Tale modalità prevista come provvisoria (in attesa di collegare solidalmente il sistema filtrante al circuito con un



Fig. 2.7: Sistema filtrante Diedron Clean Tower

allacciamento in serie) sfrutta un particolare espediente per assicurare un'efficace filtrazione dell'olio.

Il tubo di aspirazione è inserito, infatti, nella vasca in un punto il più possibile vicino alla zona di caduta del lubrificante sporco, mentre la tubazione di mandata è posizionata nel punto il più possibile vicino alla zona di prelievo dell'olio pulito.

La differenza di portata tra il circuito di lubrificazione (40 l/min) e del by-pass di filtrazione (140 l/min) dovrebbe ottenere il duplice vantaggio di apportare sempre liquido pulito al punto di utilizzo e di creare una turbolenza che trascina con sé sedimenti di materiale d'asportazione (anche precedenti all'allacciamento del filtro), mantenendo così sempre pulita la vasca.

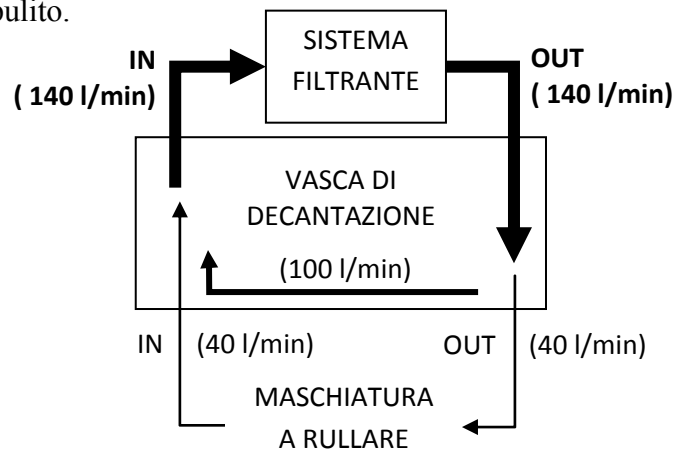


Fig. 2.8: Schematizzazione del collegamento in by-pass del sistema filtrante Diedron Clean Tower EFFE4.

2.5 Fase di stacco e disoleatura

Dopo la fase di maschiatura la strisciata entra in una piccola pressa (20t) (**d** in figura 3.4) dotata di uno stampo di tranciatura in grado di separare dalla strisciata contemporaneamente i 6 morsetti corrispondenti al "passo".

Dalla pressa finale partono due nastri trasportatori: uno parallelo al nastro che raccoglie gli sfridi di lavorazione e un secondo nastro trasportatore perpendicolare al primo che conduce i morsetti alla fase di disoleatura.

Quest'ultima avviene mediante un impianto di centrifugazione (**e**) che permette di disoleare efficacemente i pezzi (nonostante dopo la filettatura sia presente un impianto di aspirazione che asporta parte dell'olio residuo rimasto sui pezzi).

L'operazione di disoleatura per via meccanica è una fase fondamentale in quanto permette, da un lato, di recuperare parte dell'olio usato nelle operazioni di formatura e, dall'altro, evita che l'olio venga successivamente bruciato nel forno di tempra. Ciò comporta vantaggi economici non indifferenti dal punto di vista del recupero dell'olio e della mancata necessità di operare una fase di lavaggio precedentemente al trattamento termico.

I morsetti vengono quindi immagazzinati temporaneamente in attesa della fase di tempra.

2.6 Trattamento termico

Al termine della fase di formatura i morsetti subiscono un trattamento termico di tempra bainitica (austempering) con lo scopo di conferire al materiale una durezza finale compresa tra i 34 e i 39 HRC.

Le fasi in cui si suddivide il trattamento termico sono:

- 1) Riscaldamento ad una temperatura superiore a quella di austenitizzazione (850°C per il C45E) e permanenza per un periodo di tempo sufficiente ad ottenere l'equilibrio strutturale;
- 2) Raffreddamento iniziale sufficientemente rapido per evitare trasformazioni nel campo ferritico o perlitico;
- 3) Sosta isoterma ad una T_{iso} poco superiore alla temperatura M_s di durata sufficiente a completare la trasformazione bainitica;
- 4) Raffreddamento fino a T_{amb} a velocità moderata per evitare eccessivi gradienti termici sui pezzi.

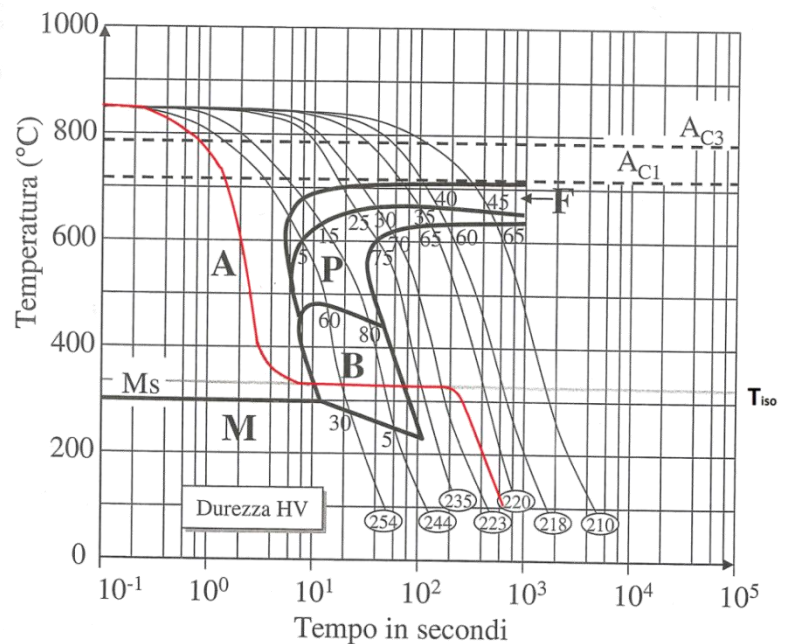


Fig. 2.9: Rappresentazione dell'andamento di un processo di tempra bainitica (curva rossa) in corrispondenza del diagramma CCT del C45E.

Il trattamento termico specifico eseguito sui morsetti è realizzato distribuendoli sul nastro trasportatore di un forno continuo, dove vengono mantenuti in un atmosfera di 900°C per 18 minuti in modo da far raggiungere al materiale l'equilibrio strutturale.

Dopo di che i morsetti sono fatti precipitare in un bagno di sali (nitrito di sodio + nitrato di potassio) mantenuto alla T di 380°C per un periodo di tempo necessario al completamento della trasformazione bainitica (15 minuti circa).

In uscita i morsetti vengono lavati e passivati in una lavatrice contenente acqua calda (45°C) per ridurre al minimo le incrostazioni saline e asciugati da getti d'aria calda.

La produttività oraria dell'intero processo di trattamento termico è di circa 250 Kg/ora.

Il trattamento termico di tempra bainitica comporta numerosi vantaggi tra cui l'ottenimento di pezzi duri e sufficientemente tenaci nonostante l'assenza di un processo di rinvenimento.

I pezzi, inoltre, non presentano fenomeni di fragilità al rinvenimento e manifestano variazioni dimensionali estremamente ridotte rispetto a trattamenti di bonifica.

2.7 Trattamento superficiale

I morsetti una volta temprati, vista la scarsa resistenza a corrosione del C45E, subiscono un processo di rivestimento ad opera di un'azienda esterna.

Il trattamento superficiale è, nello specifico, una zincatura bianca trivalente (CrIII) tale da creare un rivestimento dello spessore minimo di 8µm.

Al trattamento superficiale seguono una fase di passivazione e una di deidrogenazione.

Vengono, quindi, imballati, evitando che si abbia in alcun modo il mescolamento tra morsetti provenienti da ordini di produzione diversi.

2.8 Il controllo qualità e collaudo del morsetto

Il controllo qualità del morsetto avviene in due momenti principali: in fase di produzione e in fase di collaudo dopo il trattamento termico.

Il controllo in fase produttiva viene effettuato dagli operatori che conducono il processo produttivo (guardia-macchina). Questi con una cadenza oraria prelevano dal nastro trasportatore un gruppo di 6 morsetti ricavati da un'unica battuta di stacco.

In tal modo, oltre ad avere un campione di misura sufficientemente numeroso dal punto di vista statistico per determinare la qualità della fase di stampaggio, si ha un morsetto filettato per ogni filettatrice.

Gli operatori in questa fase valutano esclusivamente la conformità dimensionale del prodotto assicurandosi che le quote fondamentali ricadano all'interno dei rispettivi range di tolleranza.

Per fare ciò vengono usati strumenti quali calibri, proiettori di profili, tamponi passa/non passa di geometria appropriata.

Tutte le quote vengono, poi, registrate su un opportuno modulo che permette di verificare la tendenza nel tempo ad avere un certo scostamento dimensionale.

L'analisi di questi andamenti permette di mettere in atto un'efficace manutenzione predittiva riducendo al minimo la produzione di pezzi scarti.

Per quanto riguarda il controllo della filettatura rullata si usano dei calibri a tampone filettato PASSA M5x0,8 6G in accordo alla norma UNI 5870-71.

Se il controllo della bontà del filetto fallisce su uno solo dei morsetti analizzati (non si riesce ad avvitarlo completamente il calibro nel filetto o questa operazione richiede uno sforzo eccessivo), si ripete la prova con ulteriori gruppi di morsetti per accertarsi che la non conformità non derivi da un caso fortuito.

Se la presenza di filettature non conformi viene confermata da queste ulteriori analisi, viene interrotta la produzione e, sempre in ottica di attuare una manutenzione preventiva, vengono sostituiti tutti e 6 i maschi a rullare (anche se solo uno ha raggiunto un'usura di gravità tale da produrre un filetto fuori tolleranza). Vengono, inoltre, scartati tutti i morsetti contenuti nella tramoggia in uscita dalla centrifuga e corrispondenti all'ultimo periodo di lavoro.

La sostituzione contemporanea di tutti gli utensili a rullare può essere giustificata dalle seguenti considerazioni:

- i maschi a rullare hanno dimostrato una uniformità di comportamento, per cui sotto determinate condizioni di lavoro, tendono a manifestare durate poste all'interno di intervalli relativamente stretti di pezzi totali prodotti a fine vita.
- Maggiore facilità nella raccolta dati della durata degli utensili (un dato e non sei) e certezza di avere sempre in azione contemporaneamente utensili che hanno prodotto lo stesso numero di pezzi e quindi, verosimilmente, ad un livello di usura simile.
- Ridotto numero di fermate e controlli per le stesse ragioni sopra descritte.
- Minori scarti, in quanto si riduce il mescolamento di pezzi prodotti da utensili a diversi stadi di usura.

La fase di collaudo viene eseguita, invece, dagli operatori del reparto controllo qualità alla fine del trattamento di tempra su campioni prelevati per ogni lotto produttivo (frequenza di controllo inferiore rispetto alla produzione).

In questa fase è eseguita una verifica sulla bontà del trattamento termico ricorrendo a misure sulla durezza raggiunta e assicurandosi che queste ricadano nel range stabilito.

Gli stessi operatori eseguono nuovi controlli dimensionali (le stesse quote valutate in produzione) per verificare che la tempra ed eventuali gradienti termici non abbiano generato distorsioni geometriche nei morsetti.

L'ultima verifica condotta è una prova di resistenza meccanica della filettatura stessa. Questa prova (detta anche di tenuta) va a valutare la capacità della filettatura di resistere alle tensioni in gioco durante l'avvitamento di una vite delle stesse dimensioni di quella che sarà accoppiata al morsetto da parte dell'utilizzatore finale.

In questa prova viene inserita all'interno del morsetto una spina di diametro 6,9 mm in acciaio con durezza $62 \div 65$ HRC e serrata con una vite M5 rullata.

Il campione risulta conforme se durante la viene misurata una coppia di serraggio minima di 5,1 Nm.

La prova di tenuta viene ripetuta, poi, con le stesse caratteristiche sostituendo la spina con una barra a sezione rettangolare di dimensioni $8,5 \times 3$.

La conformità alla prova di resistenza meccanica risulta essere un'ulteriore conferma alla bontà del trattamento termico eseguito.

2.9 Valutazione dell'incrudimento del materiale del filetto causato dalla maschiatura a rullare

Riprendendo brevemente quanto già descritto nel paragrafo relativo alla filettatura per deformazione l'azione del maschio a rullare sulla superficie del preforo genera dei flussi di materiale tali da portare alla formazione del filetto.

La deformazione plastica a freddo causa un incrudimento del materiale con la formazione di grani allungati e di una fibratura ad andamento continuo che

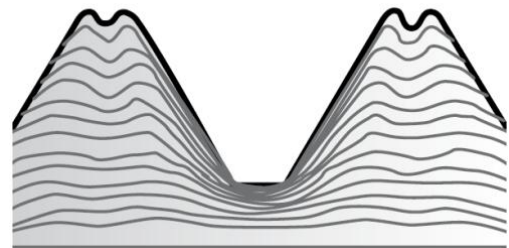


Fig 2.10: Rappresentazione generica dell'andamento delle fibre in una filettatura rullata.

rispecchia la geometria del profilo generato e che risulta generalmente più addensata sul fondo e sui fianchi del filetto stesso.

Per fornire una descrizione maggiormente quantitativa dei fenomeni di incrudimento che si realizzano durante la filettatura, si è determinato l'andamento della durezza sul profilo del filetto. Si è già descritto come questo parametro tenda a variare durante la realizzazione della filettatura per rullatura, pur in assenza di trasformazioni metallurgiche del materiale.

Inoltre, essendo la durezza una grandezza correlata empiricamente con la resistenza a trazione di un materiale metallico, la sua misurazione permette di ottenere informazioni importanti sull'effettiva resistenza opposta dal materiale alla deformazione.

Queste considerazioni sono importanti se si considera che il C45E di cui è realizzato il morsetto è un materiale che manifesta evidenti fenomeni di incrudimento quando viene deformato, e che, per tanto, il valore di resistenza a trazione misurato dal fornitore sul nastro d'acciaio potrebbe differire anche di molto rispetto a quello effettivo del materiale che costituisce il colpetto da filettare, avendo questo subito precedentemente un'operazione di tranciatura e una di imbutitura.

La conoscenza della reale resistenza meccanica del materiale che viene lavorato è fondamentale nella scelta dei parametri di lavorazione adottati nella successiva filettatura, tra cui, in primis, la scelta di una velocità periferica dell'utensile che deve risultare compatibile con quella consigliata dai produttori di maschi a rullare per una data resistenza offerta dal materiale alla deformazione stessa.

La volontà di misurare le proprietà meccaniche del materiale, che costituisce il colletto del morsetto prima e dopo la filettatura, ci ha indotti ad eseguire sul materiale un test di durezza tramite microindentazione Vickers.

Tale scelta è legata alle dimensioni ridotte del particolare da misurare e alla necessità di operare molte misure in un area estremamente ridotta in modo tale da poter ricavare un numero di dati sufficienti ad avere una certa rilevanza statistica e ad ottenere una mappatura delle proprietà del materiale.

2.9.1 Il test di durezza Vickers per microindentazione

Il test di durezza Vickers per i materiali metallici è definito dalla norma ISO 6507-1.

La norma distingue, innanzitutto, tre diversi range di carico assegnando ad ognuno di essi una corrispettiva designazione alla modalità di prova:

Ranges of test force, F N	Hardness symbol	Designation
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Vickers hardness test
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 to < HV 5	Low-force Vickers hardness test
$0,098 07 \leq F < 1,961$	HV 0,01 to < HV 0,2	Vickers microhardness test

Tabella V: Designazione della prova di durezza Vickers a seconda del carico applicato.

La tendenza attualmente diffusa è, tuttavia, quella di sostituire la denominazione “test di microdurezza” con la meno equivocabile definizione “test di durezza per microindentazione (MHT)”, per tanto è questa la terminologia che sarà adottata nel proseguo.

Il principio di funzionamento della prova Vickers si basa sull'uso di un penetratore in diamante di forma piramidale regolare a base quadrata con uno angolo al vertice di 136° , il quale, mediante un'opportuna attrezzatura integrata nel durometro, viene premuto ortogonalmente alla superficie del campione sotto l'azione di un certo carico definito dalla norma stessa.

Hardness test ^a		Low-force hardness test		Microhardness test	
Hardness symbol	Nominal value of the test force <i>F</i> N	Hardness symbol	Nominal value of the test force <i>F</i> N	Hardness symbol	Nominal value of the test force <i>F</i> N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,098 07
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,196 1
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,245 2
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,490 3
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,980 7

^a Nominal test forces greater than 980,7 N may be applied.

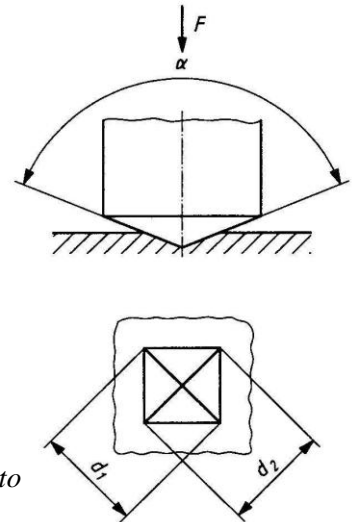


Tabella VI: Carichi tipici delle prove di durezza Vickers.

Fig. 2.11: Principio di funzionamento del test di durezza Vickers

Alla rimozione del carico e del penetratore, si misura la lunghezza delle diagonali dell'impronta lasciata sulla superficie del pezzo per mezzo di un'adeguata strumentazione ottica.

La durezza Vickers risulta proporzionale al rapporto ottenuto dividendo il carico di prova per l'area dell'impronta, che a sua volta viene assunta essere approssimativamente una piramide regolare a base quadrata, con un angolo al vertice uguale a quello del penetratore.

La relazione che lega le varie grandezze del test risulta essere:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \approx 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

dove:

HV = durezza Vickers

0,102 = costante derivante dalla conversione da Kg a N

F = carico applicato (in Newton)

136° = angolo al vertice dell'impronta

d = media aritmetica delle due diagonali dell'impronta (in millimetri)

La misura di durezza Vickers si esprime da norma con la seguente designazione:

es.: 540 HV 20 /25

dove:

540 = durezza Vickers rilevata

HV = simbolo della durezza Vickers

20 = valore approssimato del carico applicato (in Kgf)

/25 = durata di applicazione del carico, se essa non rientra nel range standard (da 10 s a 15 s)

Il test deve essere eseguito su una superficie liscia ed esente da strati ossidati, impurità depositate e lubrificanti, e, quindi, opportunamente preparata. Questo permette di misurare con maggiore accuratezza le diagonali dell'impronta. Si deve, inoltre, evitare qualsiasi variazione della durezza superficiale causata da eccessivo riscaldamento o incrudimento durante la fase preparatoria dei provini.

Ciò è ancor più vero nella prova di microindentazione a causa delle piccole dimensioni delle diagonali e della ridotta profondità dell'impronta generata. In questo caso si richiede l'uso di provini adeguatamente lucidati.

La norma pone, inoltre, dei limiti allo spessore dei campioni, che deve essere pari come minimo a 1,5 volte la diagonale maggiore dell'impronta, in modo tale da non generare deformazioni visibili sulla faccia opposta del campione analizzato.

La procedura per eseguire correttamente il test prevede che la prova venga eseguita a temperatura ambiente, dai 10°C ai 35 °C, che il provino sia posto su di un supporto rigido e rimanga assolutamente immobile per tutta la durata della prova, mentre è altresì importante che durante il test la macchina sia protetta dalle vibrazioni. Il penetratore deve scendere fino a toccare la superficie del pezzo; a questo punto la macchina inizia ad applicare la forza: il carico massimo deve essere raggiunto in un tempo che va dai 2 s agli 8 s.

Nel caso di test di durezza a basso carico e nei test di durezza tramite microindentazione, il tempo impiegato per applicare la totalità del carico è, invece, di 10 s. Il carico massimo deve essere poi mantenuto per un periodo di tempo che va dai 10 s ai 15 s.

Altre considerazioni importanti riguardano le posizioni delle impronte sul provino. Infatti, al fine di non falsare le misure di durezza in un dato punto a causa dell'incrudimento generato sul provino da un'impronta precedente, la norma stabilisce, nel caso dell'acciaio, che la distanza tra i centri di due impronte adiacenti debba essere al minimo pari a 3 volte la lunghezza della diagonale media dell'impronta di area maggiore.

Allo stesso modo la distanza tra il centro di un'impronta ed i margini del campione deve essere come minimo 2,5 volte la diagonale media dell'impronta.

Durometro, penetratore e sistema di misura delle diagonali sono definiti nella norma ISO 6507-2 dove sono contenute, tra l'altro, dettagliatamente le modalità di verifica e taratura degli stessi.

2.9.2 La preparazione dei campioni

Nella preparazione dei campioni al test di microindentazione Vickers e alle analisi metallografiche si è seguita la procedura qui riportata.

Viste le piccole dimensioni del prodotto finito su cui si trova il filetto da analizzare e per rendere più maneggevoli i campioni nelle successive operazioni di preparazione e misurazione, si è scelto di inglobare gli stessi in dei cilindretti di materiale plastico.

Al fine di garantire un'ottima adesione della resina al campione ed evitare problemi nelle successive fasi di preparazione i morsetti sono stati lavati in una vasca ad ultrasuoni KKS mod USW-H15/300 contenente una soluzione del prodotto ROLLKEMIK RFC-120 (per pulizia e lucidatura di materiali metallici) in concentrazione di 15÷30 g/l in acqua di rete.

Il lavaggio è stato eseguito con la soluzione ad una temperatura di 38÷40°C per due minuti con ultrasuoni a frequenza di 27 MHz a cui sono seguiti altri due minuti a 80 MHz.

I campioni sono stati quindi sciacquati con acqua demineralizzata e asciugati immediatamente con un soffio di aria calda (asciugacapelli), essendo il C45 un materiale che manifesta fenomeni di corrosione in tempi brevi anche in condizioni ambientali non aggressive.

A questo punto, usando una pressa inglobatrice Impetech, i morsetti sono stati inglobati a coppie aventi caratteristiche uguali sia per quanto riguarda il materiale che le condizioni di lavorazione subite, provenendo dallo stesso spezzone di nastro lavorato.

I campioni sono stati posizionati sul piano del pistone con un orientamento tale da poter ottenere, in seguito ad un'adeguata asportazione del materiale, la sezione del colletto filettato corrispondente al diametro massimo del preforo in modo tale da ottenere il profilo del filetto parallelamente alla superficie di osservazione.

Nella realizzazione dei provini si sono usati due tipi di resine termoplastiche: la prima, epossidica di colore nero, è stata disposta a formare uno strato spesso circa un centimetro sulle facce dei provini che saranno soggette a preparazione; la seconda, fenolica di colore verde, è stata usata di fatto come riempitivo.

Questa scelta è dovuta principalmente al fatto che la resina in superficie deve essere caratterizzata da una durezza elevata per ottenere risultati migliori durante la levigatura e la lucidatura dei provini (in termini di uniformità di preparazione la durezza deve essere il più simile possibile a quella del materiale inglobato).

Avendo, tuttavia, la resina epossidica un prezzo elevato, dopo aver creato uno spessore superficiale sufficiente, si è completato l'inglobamento con una resina meno dura e meno costosa.

L'inglobatrice è stata impostata per applicare una temperatura di 150°C ed una pressione di 3 bar sul provino in preparazione, per un tempo di 13 minuti, al quale è seguito un ciclo di raffreddamento a pressione costante della durata di 11 minuti.

Una volta raffreddati i campioni si è proceduto con l'arrotondamento degli spigoli dei cilindretti in modo tale da assicurare la perfetta planarità delle due facce nelle operazioni successive.

Successivamente con l'uso di una rettificatrice a CNC dotata di un adeguato sistema di lubrorefrigerazione sono stati asportati 4 mm di materiale dalla faccia superiore in modo tale da mantenere uno spessore di 0,5 mm rispetto alla quota prevista di osservazione.

Questo spessore è stato asportato, infatti, mediante operazioni di levigatura e lucidatura in modo tale da eliminare lo strato eventualmente incrudito dall'operazione di rettifica e da non introdurre, invece, ulteriori alterazioni al materiale che verrà osservato.

Le operazioni di levigatura e di lucidatura sono state eseguite per mezzo di una lucidatrice automatica Buehler.

Dopo aver nuovamente arrotondato gli spigoli della faccia superiore (spianata dall'operazione di rettifica), in modo da avere una migliore interazione tra provini e carta abrasiva e un miglior accesso del lubrorefrigerante usato all'interfaccia, si è proceduto alla levigatura per mezzo di carte abrasive in carburo di silicio di granulometria decrescente.

Al termine di ogni ciclo la superficie di studio del provino è stata osservata ad occhio nudo per individuare eventuali anomalie nella preparazione; nel caso in cui se ne riscontrasse la presenza, si è ripetuto il ciclo stesso fino a scomparsa delle stesse.

Ad ogni cambio di carta abrasiva si è avuta l'accortezza di lavare adeguatamente il provino e l'attrezzatura, per eliminare eventuali depositi di particelle abrasi che avrebbero potuto inquinare le carte successive generando rigature indesiderate sui campioni.

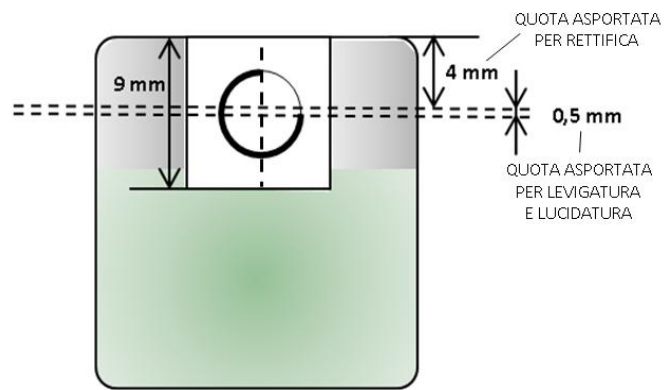


Fig. 2.12: Schematizzazione della posizione dei vari costituenti all'interno dei campioni e della fasi di preparazione (in bianco il morsetto e la relativa filettatura).



Fig. 2.13: Fotografia di un campione dopo le operazioni di rettifica e lucidatura.

Le operazioni di lucidatura sono state invece eseguite per mezzo di panni contenenti una sospensione diamantata anche in questo caso di granulometria decrescente.

LEVIGATURA				
ABRASIVO	carta p180	carta p320	carta p600	carta p1200
LUBRIFICANTE	acqua	acqua	acqua	acqua
DURATA [s]	120	120	120	60
CARICO [N]	20	15	10	10
VEL. ROT. [min^{-1}]	300	250	200	150

LUCIDATURA			
ABRASIVO	panno 6 μm	panno 3 μm	panno 1 μm
LUBRIFICANTE	sosp. diam. 6 μm	sosp. diam. 3 μm	sosp. diam. 1 μm
DURATA [s]	180	180	180
CARICO [N]	20	15	10
VEL. ROT. [min^{-1}]	200	150	150

Tabella VII: Parametri utilizzati nelle operazioni di levigatura e lucidatura.

Terminato l'ultimo passaggio (sospensione diamantata da 3 μm) la superficie del metallo lucidata è stata lavata, prima con acqua demineralizzata, e in seguito con alcool. I provini sono stati, quindi, asciugati con un flusso di aria calda in modo tale da evitare la formazione di aloni ed eliminare ogni traccia di umidità dalla superficie.

2.9.3 Misure di durezza tramite microindentazione

Nella realizzazione dei test di durezza tramite microindentazione è stato utilizzato un micro durometro Futuretech con penetratore Vickers in grado di applicare carichi in un range tra 10gf e 1kgf.

È un sistema dotato di due obiettivi (10x e 50x da moltiplicare per l'ingrandimento dato dall'oculare 10x) con sistema di misura delle diagonali delle impronte implementato e il calcolo del valore della durezza Vickers in automatico.

L'attività di misura è iniziata eseguendo alcune prove con carico variabile, da 10gf a 100gf, per individuare il carico idoneo ad ottenere impronte di dimensioni tali da permettere la realizzazione della mappatura.

Le dimensioni ottimali dovrebbero essere tali da permettere una certa facilità di misura delle diagonali con l'ingrandimento utilizzato per il particolare test (500x), ma, allo stesso tempo, sufficientemente piccole da permettere l'esecuzione del numero di misure necessarie a realizzare una mappatura dettagliata, ma realizzata con una buona base statistica.

Si deve, infatti, tener conto che l'area in cui verranno effettuate le misure è molto ristretta e che, a causa dei fenomeni di incrudimento, la norma stabilisce le distanze minime da tenere da impronta e impronta.

I risultati forniti da queste prove hanno portato a scartare tutti i carichi maggiori di 10 gf restituendo questi impronte di dimensioni eccessive ai fini della sperimentazione.

Il carico di 10 gf consente, invece, di ottenere un numero di valori di durezza sul profilo del filetto sufficienti alla realizzazione della mappa.

La durezza Vickers come le altre modalità di misura di durezza è indipendente dal carico applicato nella misurazione, tuttavia, se si va a considerare la precisione dei dati ottenuti, si deve ricordare che questa diminuisce al diminuire della dimensione dell'impronta che si va a misurare.

Ciò è dovuto al fatto che più diminuisce il carico impiegato nella realizzazione dell'impronta, tanto più, a piccole variazioni delle dimensioni delle diagonali misurate, corrisponde una maggiore variazione della misura di durezza fornita dal test.

Ne deriva che gli errori acquisiscono un maggior peso relativo rispetto alla dimensioni assolute dell'impronta.

Si deve, inoltre, considerare che il valore di durezza è calcolato tramite un'equazione che riporta a denominatore il quadrato della diagonale media misurata (d^2) e, di conseguenza, anche i relativi errori.

L'uso del carico minimo applicabile dallo strumento porta, quindi, ad ottenere la minore precisione ottenibile dalla particolare attrezzatura utilizzata.

Gli errori sono ulteriormente aggravati dal fatto che, nello svolgimento della prova di microindentazione Vickers, la misurazione delle diagonali è un parametro dipendente dall'operatore il cui possibile affaticamento visivo (ogni singola misura necessita di tempi nell'ordine del minuto) contribuisce all'incertezza della misurazione eseguita.

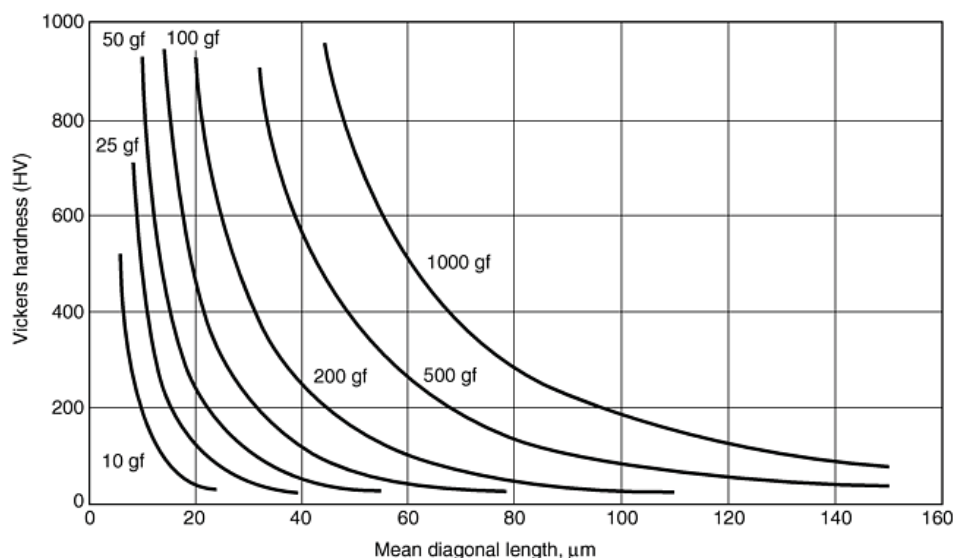


Fig. 2.14: Relazione esistente tra lunghezza della diagonale media e durezza Vickers al variare del carico applicato.

Queste considerazioni possono essere accettate solo in virtù della volontà di realizzare descrizione semiquantitativa del fenomeno di incrudimento subito dal materiale durante l'operazione di filettatura per deformazione.

Ciò ci esenta dal dover effettuare considerazioni aggiuntive sulla valutazione degli errori e dell'incertezza di cui sono affette le misurazioni eseguite.

I risultati ottenuti saranno, infatti, sfruttati per realizzare una mappa che descrive l'andamento della microdurezza sul profilo del filetto alla quale sarà affiancata un'analisi metallografica del campione stesso.

Si sono analizzati 2 campioni, il primo ricavato da un morsetto che ha subito unicamente operazioni di tranciatura e imbutitura e il secondo, invece, con il colletto filettato per rullatura.

Entrambi i morsetti provengono dal medesimo tratto di nastro di acciaio in modo da assicurare uniformità delle caratteristiche del materiale base.

Ciò permette di ottenere informazioni sui singoli incrementi alla durezza dovuti a fenomeni di incrudimento durante le operazioni di formatura del colletto (tranciatura e imbutitura) rispetto ai contributi dovuti alla filettatura stessa.

Per quanto riguarda il campione non filettato si è deciso di operare 3 serie di misure (10 valori ognuna) ad una distanza costante dalla superficie interna del preforo.

Per ottenere un valore di confronto con le proprietà del materiale prima delle operazioni di formatura è stata effettuata una quarta serie di misure anche sul tratto lineare della parete del morsetto che verosimilmente non subisce alcuna deformazione durante lo stampaggio.

REGIONE (distanza dalla superficie)	MISURAZIONI MICRODUREZZA (HV 0,01)										HV 0,01 MEDIA
superficie colletto (+30 μm)	231,7	243,7	254,2	246,1	239,9	238,9	237,3	238,9	236,7	226,1	239,4
bulk colletto (+150 μm)	250,1	242,4	248,1	246,6	244,9	247,2	251,6	228,4	246,1	193,6	239,9
bulk colletto (+500 μm)	233,5	246,1	244,1	229,4	236,4	258,4	256,3	229,7	251,0	234,3	241,9
bulk nastro laminato (+500 μm)	164,7	175,4	176,8	182,6	122,9	192,1	182,3	192,1	164,8	163,6	171,7

Tabella VIII: Valori di microdurezza misurati nel campione 00_b_dx.

Da queste misurazioni si evince come le operazioni di imbutitura generino un aumento di durezza di circa 70 HV 0,01 del materiale che forma il colletto rispetto al materiale base e che il fenomeno dell'incrudimento è pressoché uniforme su tutta la sezione del colletto.

Per quanto riguarda il campione filettato si è deciso, invece, di suddividere il profilo del filetto in diverse regioni "significative" di dimensioni sufficienti da poter accogliere al loro interno cinque misure ravvicinate (rispettando la distanza minima prevista dalla norma ISO 6507-1 tra

impronta-impronta ed impronta-superficie), cioè un numero di misure sufficienti a rendere il test valido statisticamente.

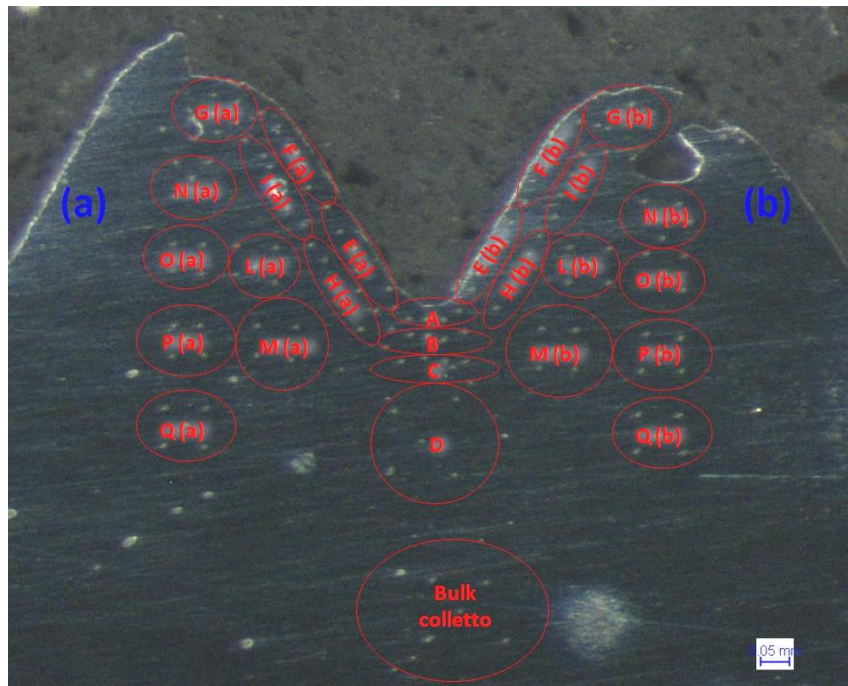


Fig. 2.15: Mappa delle regioni in cui è stato suddiviso il profilo del filetto.

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella sottostante:

REGIONE	MISURAZIONI MICRODUREZZA (HV 0,01)					HV 0,01 MEDIA
A	283,6	290,1	266,9	299,0	274,1	282,7
B	251,9	238,7	244,1	234,9	253,6	244,6
C	249,2	266,2	244,4	237,8	229,4	245,4
D	253,9	238,1	221,2	240,8	211,6	233,1
D (a)	268,5	251,9	247,2	263,4	244,3	255,1
D (b)	264,6	258,1	277,1	256,0	263,7	263,9
E (a)	252,1	262,8	321,8	286,5	324,0	289,4
E (b)	282,6	308,7	292,3	252,1	259,0	278,9
F (a)	320,2	307,9	306,7	294,5	279,1	301,7
F (b)	276,1	274,1	279,8	285,8	263,4	275,8
H (a)	237,3	217,6	222,7	240,2	257,5	235,1
H (b)	218,6	226,4	246,4	235,4	256,3	236,6
I (a)	224,7	251,3	250,1	254,2	255,4	247,1
I (b)	261,2	264,3	269,8	246,1	263,7	261,0
L (a)	218,3	237,3	241,9	258,4	231,2	237,4
L (b)	237,5	261,8	253,6	255,4	243,0	250,3
M (a)	245,8	22,7	245,5	264,3	235,5	202,8
M (b)	250,7	263,1	256,9	237,8	246,1	250,9

N (a)	233,5	229,4	220,7	243,3	209,4	227,3
N (b)	245,2	265,9	241,9	260,0	255,7	253,7
O (a)	234,3	235,1	248,7	235,4	238,6	238,4
O (b)	258,1	261,2	236,2	254,5	235,9	249,2
P (a)	217,6	263,1	227,1	251,6	241,3	240,1
P (b)	246,9	238,9	224,9	235,4	251,9	239,6
Q (a)	243,3	252,7	245,0	221,0	245,8	241,6
Q (b)	238,9	245,6	230,6	240,8	244,9	240,2
bulk colletto	221,0	237,0	233,5	184,7	228,9	221,0
bulk nastro laminato	158,8	149,2	176,6	160,3	161,6	161,3

Tabella IX: Valori di microdurezza HV 0,01 misurati all'interno delle regioni in cui è stato suddiviso il profilo del filetto e valore medio corrispondente.

Tali valori di durezza, trasformati in valori di resistenza a trazione in maniera approssimata usando le scale di conversione stabilite dalle norme, sono risultati compatibili con la velocità periferica impressa agli utensili dalle unità di maschiatura consigliata dai vari produttori.

Riportando i valori di durezza HV media calcolata in corrispondenza della regione per cui quel valore è stato ottenuto è possibile realizzare una mappa della microdurezza in corrispondenza del filetto.

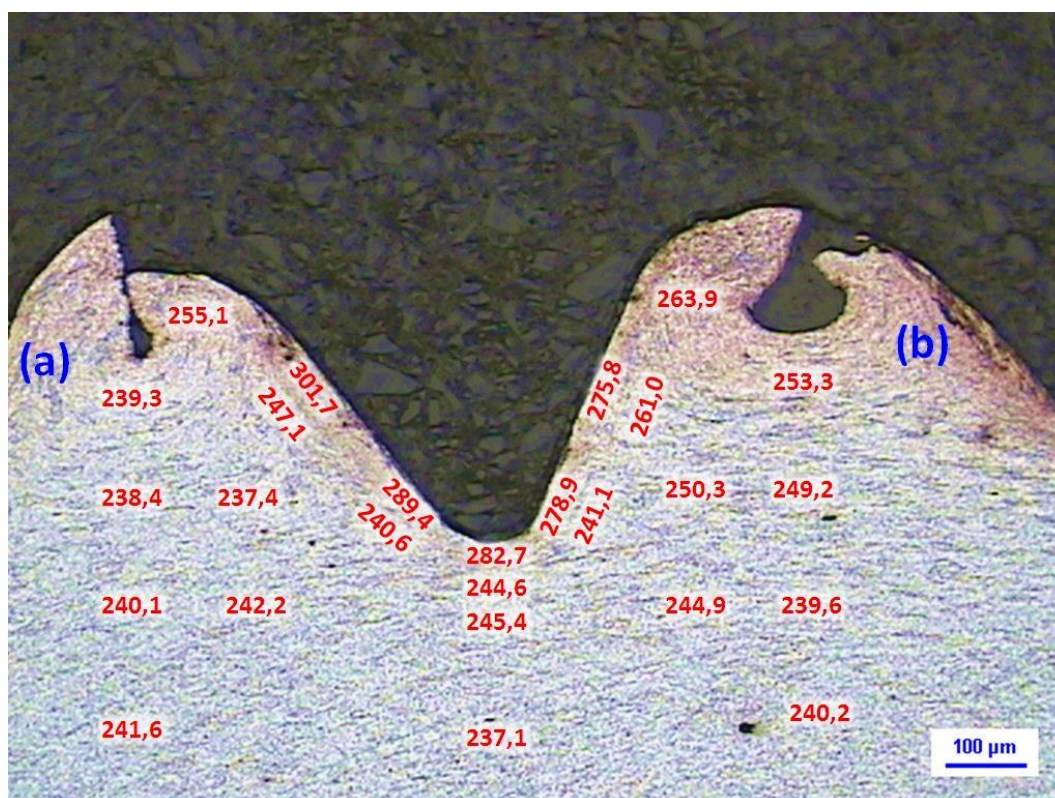


Fig. 2.16: Mappa di microdurezza ottenuta sui filetti 2 e 3 del campione 01_a_dx..

L'immagine di base è stata ottenuta a 100× e con una saturazione del colore del 200% per evidenziare la differente densità di fibratura.

La seguente mappa conferma le ipotesi relative ai fenomeni di incrudimento del materiale durante l'operazione di filettatura a rullare.

I valori di durezza misurati rispecchiano, infatti, l'andamento della densità delle dislocazioni individuato in seguito mediante analisi metallografica: i valori più alti di durezza si ritrovano nei punti in cui le fibre vengono addensate dai flussi di materiale sviluppati, mentre nelle regioni rimanenti la durezza del materiale rimane pressoché invariata rispetto a quella misurata sul colletto non filettato e per tanto legata ai meccanismi di incrudimento avutisi durante l'imbutitura.

Gli incrementi di durezza maggiori sono presenti sulla superficie del filetto con valori massimi raggiunti sul fianco destro (superficie obliqua a sinistra) e sul fondo del filetto.

Ciò è dovuto, nel primo caso, alla pressione esercitata dall'utensile durante l'avanzamento e, nel secondo, alla maggiore densità delle fibre ad opera dell'indentazione del profilo poligonale del maschio a rullare.

2.9.4 Analisi metallografica dei campioni

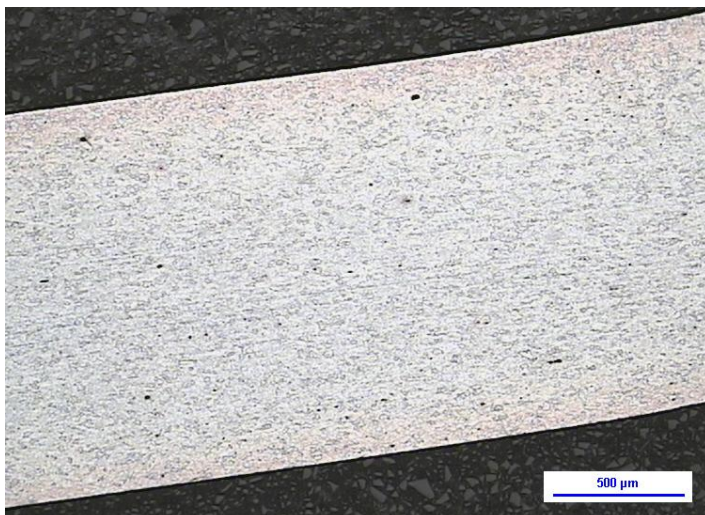
A sostegno delle osservazioni effettuate al microdurometro si è deciso di affiancare un'analisi metallografica dei provini in questione.

A tal fine si è proceduto con un'ulteriore fase di lucidatura in modo tale da eliminare le impronte lasciate dal micro-indentatore e l'eventuale strato incrudito dallo stesso.

È seguito un attacco acido della superficie metallica con una soluzione di Nital (HNO_3 al 2 %) per un tempo di circa 5 secondi.

Dopo il lavaggio e l'asciugatura dei provini, operazioni necessarie ad interrompere l'effetto del reagente, i campioni sono stati analizzati al microscopio metallografico.

1) CAMPIONE NON FILETTATO



Il tratto rettilineo, come già accennato, non subisce alcuna deformazione durante la formatura del morsetto e per tanto rappresenta le condizioni del nastro laminato nelle condizioni di fornitura e può essere utilizzato come riferimento nelle osservazioni successive per valutare le variazioni

Fig. 2.17: Parete del morsetto non deformata (campione 00_b_dx, ingrandimento 50×).

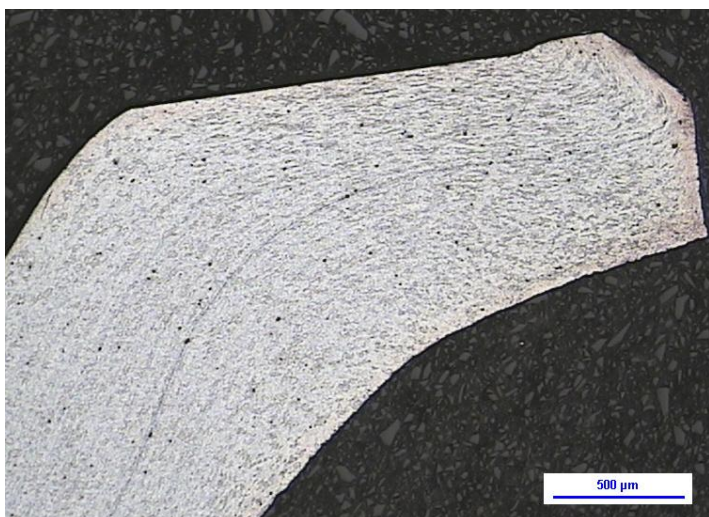


Fig. 2.18: Colletto del morsetto dopo imbutitura (campione 00_b_dx, ingrandimento 50×).

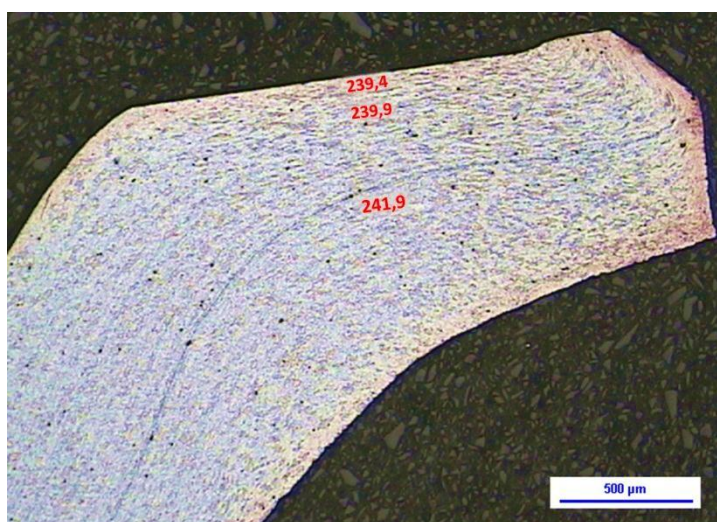


Fig. 2.19 : Mappa di microdurezza realizzata sul colletto non filettato del morsetto (campione 00_b_dx ingrandimento 50× e saturazione colore 200%).

delle proprietà del materiale subite durante la lavorazione.

In esso l'attacco acido mette in evidenza fibre rettilinee e parallele alla direzione di laminazione e un sottile strato superficiale incrudito dal contatto con i rulli.

Se si va ad osservare, invece, la sezione del colletto del morsetto non filettato si nota come le fibre del materiale vengano curvate dal processo di imbutitura (le fibre che seguono l'andamento geometrico delle pieghe del morsetto) e che lo stesso processo causa un incrudimento del materiale evidenziato da una maggiore densità delle fibre stesse rispetto al tratto rettilineo del morsetto.

Questa considerazione è avvalorata dall'analisi di microdurezza eseguita in precedenza sulle varie regioni del morsetto.

Dalle micrografie è, inoltre, evidente come le zone maggiormente incrudite

siano risultate più sensibili all'attacco acido (colorazione più intensa che risulta ancora più evidente aumentando la saturazione del colore dell'immagine).

All'estimità del colletto risulta evidente, inoltre, la deformazione subita dal materiale nell'operazione di tranciatura (punzonatura) del preforo.

In questa regione le fibre sono notevolmente addensate e piegate e il materiale risulta essere fortemente sensibile all'attacco acido.

2) CAMPIONE FILETTATO

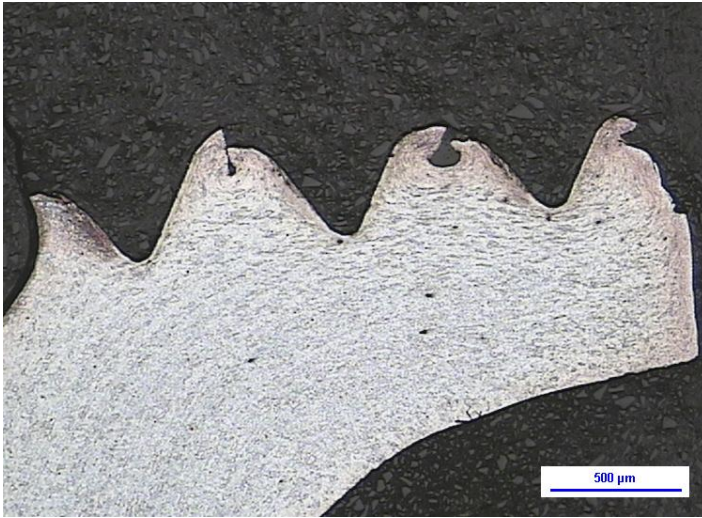


Fig. 2.20: Colletto del morsetto dopo la filettatura interna tramite rullatura (campione 01_a_dx, ingrandimento 50×)

L'osservazione al microscopio metallografico del colletto dopo aver subito l'operazione di filettatura a rullare conferma tutte le considerazioni sul filetto rullato fatte nel capitolo relativo:

- la geometria del filetto presenta sulla cresta la caratteristica tasca sagomata (graffa) derivante dall'incontro dei due flussi di materiali che scorrono sui fianchi del filetto del maschio.

- le fibre del materiale non sono tagliate dal processo, ma seguono le linee di flusso del materiale e ciò è particolarmente evidente nella zona dell'artiglio.

Le fibre del materiale sono, inoltre, fortemente addensate sul fondo e sui fianchi del filetto.

Si osserva, ancora una volta tuttavia, come il fianco rivolto nella direzione di avanzamento del maschio (fianco destro di ogni dente) manifesti un maggiore incrudimento rispetto a quello sinistro.

Il fenomeno può essere attribuito alle maggiori pressioni che si sviluppano sul fianco che si oppone alla direzione di penetrazione dell'utensile.

Questo fenomeno è ancora più evidente a maggiori ingrandimenti:

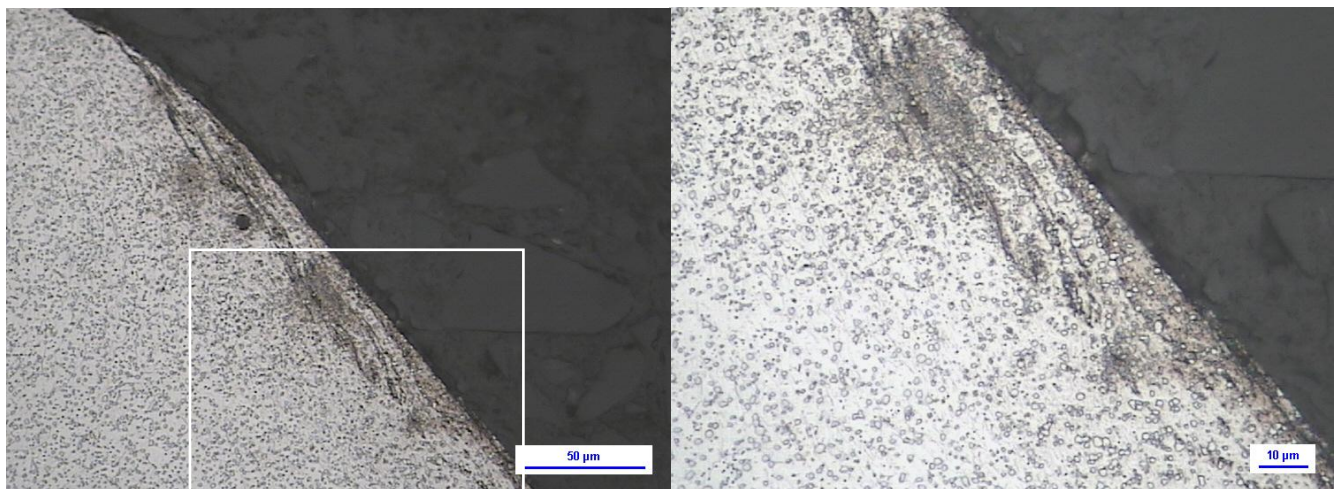


Fig. 2.21: Fianco destro del 2 filetto del campione 01_a_dx a ingrandimenti di 500× e 1000×.

Da queste micrografie si evidenzia come il fianco destro manifesti una deformazione estremamente spinta tale da modificare profondamente la microstruttura del materiale in prossimità alla superficie di contatto con l'utensile.

Si generano, infatti, delle particolari bande di deformazione parallele al fianco del filetto che si sviluppano seguendo la linea dei carburi e dello spessore di pochi μm .

La stessa regione (F (a) nella mappa) manifesta il valore di durezza massima riscontrata dai test di microindentazione, maggiore della durezza misurata nella corrispondente regione simmetrica posta sul fianco sinistro del dente (F (b) nella mappa).

Nella regione danneggiata si arrivano a superare i 300 HV valore di durezza che convertito in resistenza a trazione (secondo norma ISO 18265) equivale a superare i 965 MPa al di sopra del limite di resistenza a trazione del C45E.

L'ulteriore osservazione a conferma della descrizione fatta al fenomeno deriva dall'osservazione dei meccanismi di usura manifestatesi nei maschi a rullare (spiegati in maniera dettagliata nel capitolo relativo).

In seguito all'affioramento dell'acciaio rapido, in corrispondenza dei lobi usurati e danneggiati da scheggiatura, si genera un trasferimento di materiale (C45) dai morsetti ai maschi.

Questo "materiale di riporto" manifesta una caratteristica struttura a lamelle sovrapposte dove lo spessore delle singole lamelle è compatibile con quello delle strutture parallele formatesi sul fianco destro del filetto del morsetto.

Inoltre, si nota, come sui maschi stessi l'usura tipicamente sia più grave sul fianco di avanzamento, cioè su quello che effettivamente interagisce con il fianco in questione della madre vite in formazione.

Particelle di usura lamellari di C45 sono state ritrovate anche come sfrido di lavorazione e tendono ad accumularsi a bordo macchina dove vengono trasportate dal flusso d'olio mescolandosi con quelle provenienti dal processo di tranciatura.

La lubrificazione

3.1 Introduzione alla lubrificazione

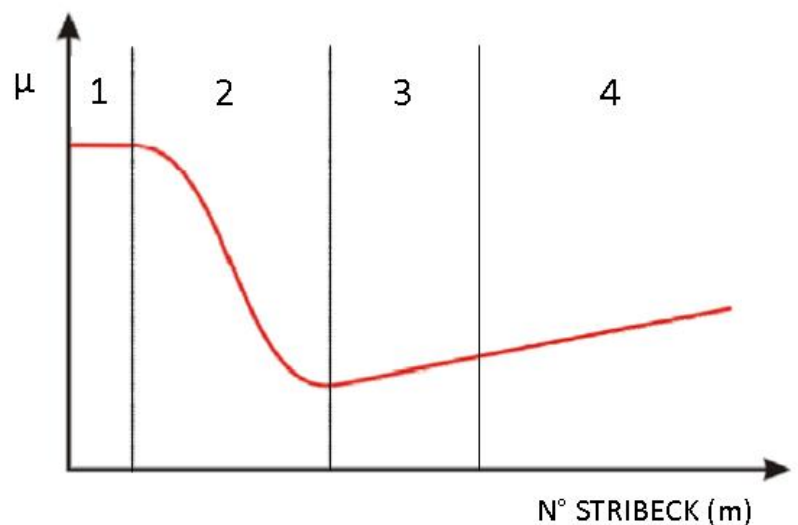
Le condizioni di lubrificazione in un processo di deformazione gravosa quale la maschiatura a rullare sono estremamente importanti.

Inutile ricordare come l'interposizione di un lubrificante, nel nostro caso specifico in fase liquida, tra le superfici in scorrimento reciproco (utensile e preforo) comporti una serie di effetti benefici sulla lavorazione, quali la riduzione dell'attrito e con esso delle forze e delle potenze in gioco, la riduzione dell'usura, il miglioramento dei flussi di materiale, la riduzione della temperatura del sistema sia grazie alla minore dissipazione di energia che alla migliore asportazione del calore.

Senza entrare in eccessive considerazioni dal punto di vista teorico, può essere tuttavia interessante descrivere brevemente il modello teorico utilizzato per trattare la lubrificazione nel corso del lavoro svolto.

Un qualsiasi sistema tribologico lubrificato può essere ricondotto e descritto attraverso quello che è noto in letteratura come "diagramma di Stribeck".

Fig 3.1: Andamento tipico della Curva di Stribeck.



Questo diagramma riporta il coefficiente d'attrito μ del sistema in funzione di un parametro detto, per l'appunto, Numero di Stribeck m definito come:

$$m = (\eta \cdot v) / P$$

dove:

- η = viscosità del lubrificante
- v = velocità relativa di strisciamento (o di taglio)
- P = pressione (carico unitario).

Il Numero di Stribeck, per tanto, aumenta all'aumentare della velocità relativa tra le due superfici e della viscosità del lubrificante e al diminuire del carico unitario a cui è sottoposto il sistema lubrificato.

L'andamento del coefficiente d'attrito rispetto ad m è riconducibile sempre ad un unico modello, in cui, a parità di carico unitario, una diminuzione di viscosità o di velocità farà inizialmente diminuire il coefficiente d'attrito, finché raggiunto un valore minimo, si instaurano condizioni di lubrificazione non più fluida (presenza di punti di contatto tra le asperità della superficie), tali da incrementare il coefficiente d'attrito fino a raggiungere i valori massimi possibili (strisciamento a secco $m = 0$).

Questo grafico è, inoltre, in grado di correlare le condizioni operative in cui opera un sistema lubrificato con lo specifico regime di lubrificazione che si viene a generare.

Ciò può essere descritto anche relazionando la curva di Stribeck con lo spessore del meato di lubrificante h che si può generare ad ogni specifico m e confrontando quest'ultimo con la rugosità delle superfici contrapposte.

Si utilizza a tal fine il cosiddetto *fattore lambda* λ dato dal rapporto tra lo spessore minimo del lubrificante tra i due corpi e la rugosità R dei due materiali a contatto

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2}}$$

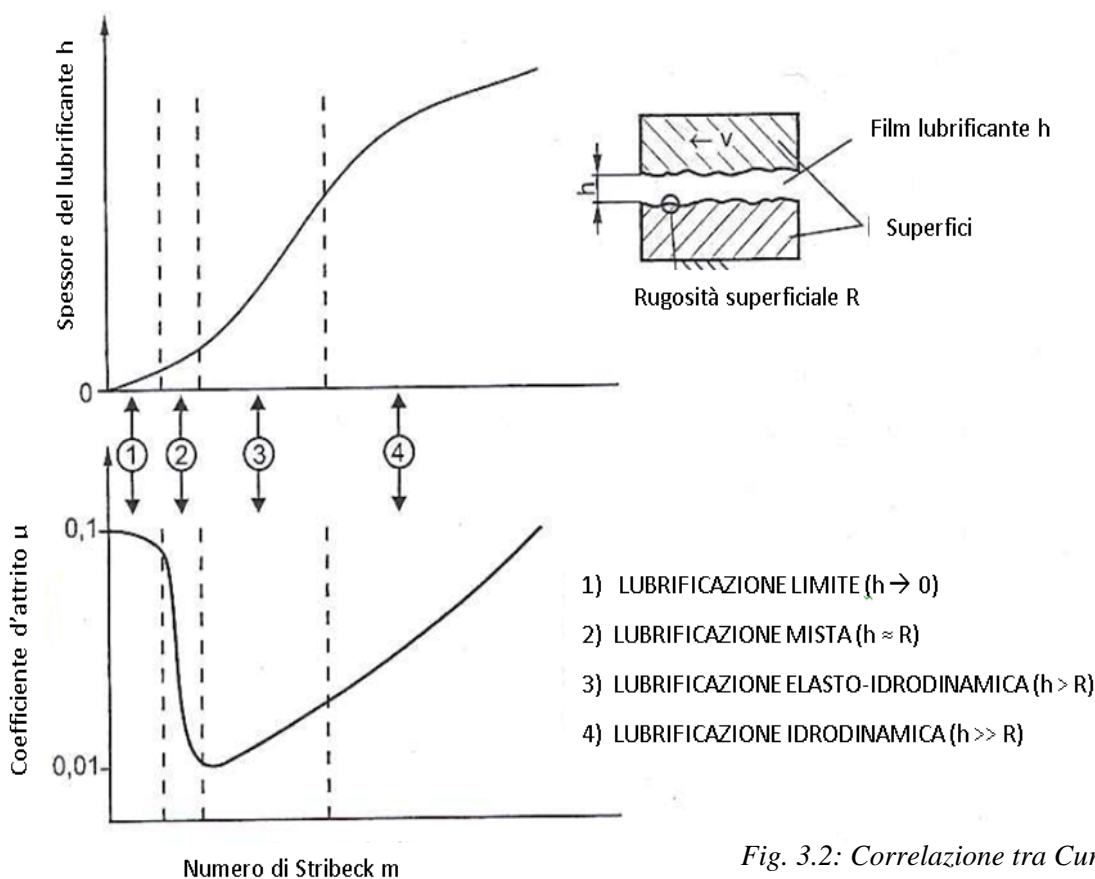


Fig. 3.2: Correlazione tra Curva di Stribeck e spessore del film lubrificante.

Si identificano 4 regimi di lubrificazione:

- 1) LUBRIFICAZIONE LIMITE (boundary lubrication): in questo regime il carico è supportato interamente dall'area reale di contatto tra le superfici, infatti, la quantità di lubrificante presente all'interfaccia non è in grado di supportare carichi significativi.

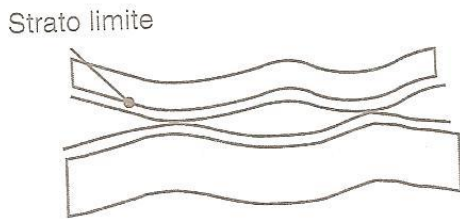


Fig. 3.3: Rappresentazione delle condizioni di lubrificazione limite.

La pressione che si sviluppa nei punti di contatto genera deformazioni plastiche delle asperità con conseguente incrudimento e surriscaldamento locale

che porta alla distruzione degli strati di ossidi o di sostanze adsorbite e alla manifestazione dei vari meccanismi di usura severa.

In questo regime la presenza del lubrificante normalmente si manifesta con la formazione sulle superfici del cosiddetto *strato limite*, cioè uno strato di spessore molecolare di fluido lubrificante che aderisce alle pareti in scorrimento reciproco e, in tal modo, previene il contatto diretto metallo-metallo riducendo i fenomeni di attrito e di usura.

Come sarà ampiamente trattato in seguito, risulta fondamentale la capacità dello strato limite di aderire alla superficie anche nelle condizioni operative più gravose.

Tale regime si realizza nelle condizioni di lubrificazione meno efficace (alto P, basse η e v) e presenta i valori massimi del coefficiente d'attrito. Ciò non implica, però, necessariamente il manifestarsi dei fenomeni di usura più intensi.

- 2) LUBRIFICAZIONE MISTA: è un regime di lubrificazione in cui parte del carico è ancora supportato dai punti di contatto tra le superfici, ma la restante parte è sostenuta dal liquido lubrificante intrappolato e pressurizzato in sacche formate dagli avvallamenti tra le due superfici.

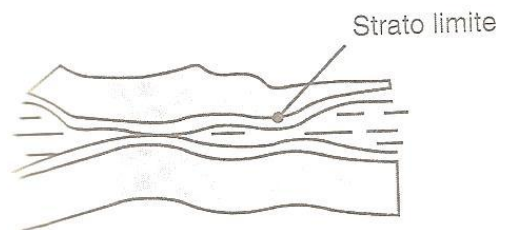


Fig. 3.4: Rappresentazione delle condizioni di lubrificazione mista.

Lo spessore del film lubrificante è, in questo caso,

confrontabile con il valore di rugosità superficiale, tuttavia, non è sufficiente per permettere la formazione di un film continuo.

Con le stesse modalità della lubrificazione limite si viene a creare uno strato limite di molecole di lubrificante adese alle superfici.

Il coefficiente d'attrito in tale regime assume valori molto variabili (dal valore massimo fino a quello minimo) a seconda delle specifiche condizioni realizzate.

3) LUBRIFICAZIONE ELASTO-IDRODINAMICA

(EHD, lubrificazione fluida con meato sottile): si realizza quando le condizioni sono tali da garantire un film continuo di lubrificante di spessore sufficiente ad evitare che le asperità tra le superfici vengano in contatto ($h = 3 \div 10 R$).

In tale regime le pressioni in gioco sono maggiori

rispetto al successivo regime puramente idrodinamico e localmente possono arrivare in alcuni casi all'ordine dei GPa, cioè tali da causare la deformazione elastica e plastica delle superfici di contatto.

In condizioni EHD risulta fondamentale la dipendenza della pressione dalla viscosità del lubrificante e dalla deformazione superficiale che si realizza.

4) LUBRIFICAZIONE IDRODINAMICA (lubrificazione fluida a meato spesso):

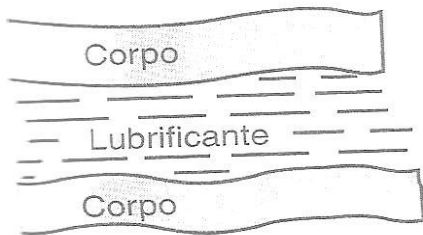


Fig. 3.6: Rappresentazione delle condizioni di lubrificazione idrodinamica.

tutte quelle condizioni operative in cui le superfici sono separate da un film liquido di spessore almeno un ordine di grandezza superiore a quello della rugosità superficiale.

Molti autori comprendono al suo interno anche il regime EHD.

Il lubrificante è in grado di esercitare una spinta tale da mantenere la completa separazione tra le

superfici grazie al moto relativo tra i due corpi a contatto.

La spinta idrodinamica è generata dal moto relativo tra le due superfici, di conseguenza cresce all'aumentare della velocità di strisciamento e della viscosità del fluido realizzando condizioni di usura praticamente assente.

L'attrito se pur molto basso, diversamente da quanto si potrebbe pensare tende, invece, a crescere all'aumentare dello spessore, della viscosità e della velocità relativa a causa dell'intervento di fenomeni dissipativi di natura viscosa.

Questo regime non deve essere confuso con la lubrificazione idrostatica che presenta caratteristiche tribologiche uguali, ma in cui il meato è realizzato immettendo forzatamente (con l'ausilio di un circuito idraulico e una pompa) il lubrificante tra le superfici.

In tal caso è la pressione generata dalla pompa a sostenere i carichi all'interno del processo.

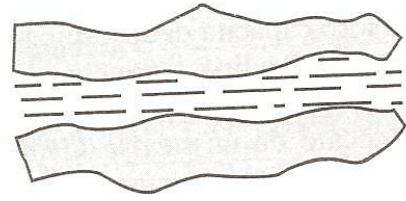


Fig. 3.5: Rappresentazione delle condizioni di lubrificazione EHD.

Da queste considerazioni si possono trarre le conclusioni secondo cui le condizioni di lubrificazione limite sono le peggiori nelle quali un sistema lubrificato può venirsi a trovare.

Si può pensare, per tanto, di migliorare il comportamento tribologico del sistema variandone i parametri esterni (cioè diminuendo il carico unitario o aumentando la velocità relativa), oppure modificando le caratteristiche dell'olio interposto tra le superfici.

Ciò è possibile additivando il lubrificante con sostanze in grado spostare il regime di lubrificazione verso condizioni operative migliori.

Il tutto può essere seguito e descritto attraverso la variazione imposta alla curva di Stribeck del sistema:

- aumentando la viscosità dell'olio le condizioni operative traslano verso le regioni a numero di Stribeck più elevato (verso la parte destra della curva) e di conseguenza entrano in regimi di lubrificazione migliori (ad esempio la lubrificazione mista) abbassando il valore del coefficiente d'attrito.
- inserendo opportuni additivi nell'olio si modifica la forma della curva di Stribeck abbassando il valore di μ , a parità di m . Effetti tipici sono riportati nel grafico seguente.

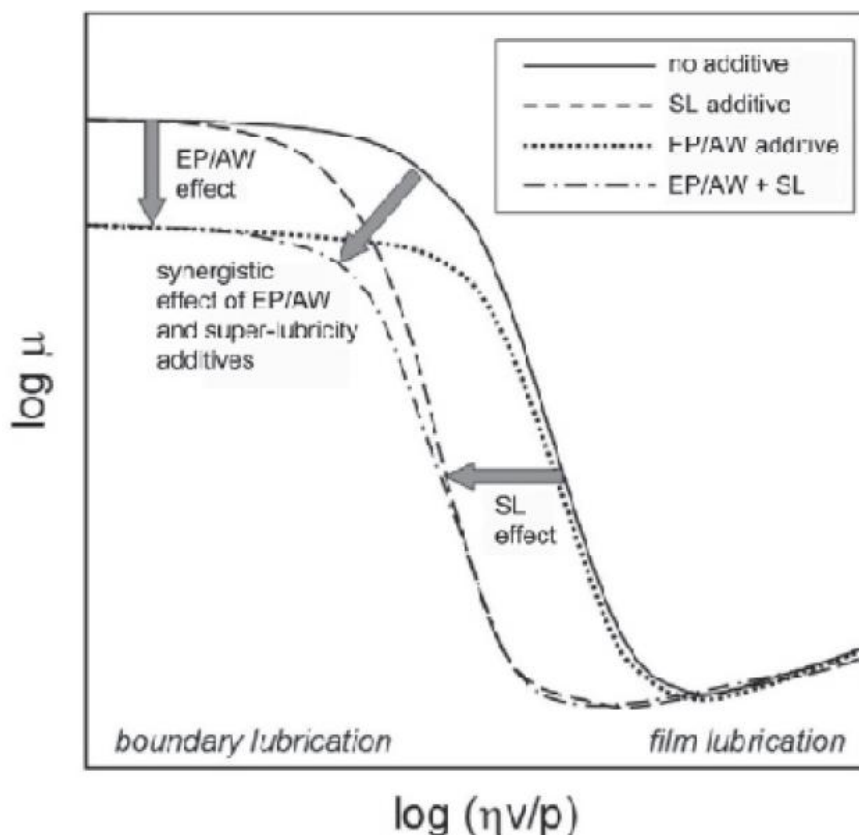


Fig. 3.7: Effetto dell'aggiunta di additivi per la resistenza ai carichi sulla curva di Stribeck di un sistema lubrificato.

Si nota come:

- gli additivi EP/AW abbassano la curva;
- gli additivi SL la spostano verso sinistra.

Ne deriva che a parità di viscosità, pressione e velocità relativa si ha un minore attrito e una minore usura dei componenti.

Esistono, in particolar modo, due diversi tipi di additivazione cui normalmente ricorrono i formulatori di lubrificanti al fine di migliorare le prestazioni dei propri prodotti che si trovano a

lavorare in condizioni di lubrificazione limite: la prima è volta a realizzare una lubrificazione di tipo EP (da *extreme pressure*), mentre la seconda una lubrificazione di tipo untuosa.

Pur essendo tale classificazione estremamente semplificata, racchiude in sé comportamenti complessi ed eterogenei.

I singoli additivi possono agire, infatti, con più di un meccanismo di azione specifico e nella maggior parte dei casi sono le condizioni operative presenti a determinare l'innescò di un meccanismo piuttosto che di un altro.

In realtà qualunque sia la tipologia di additivo aggiunto al lubrificante per aumentarne la resistenza ai carichi il suo scopo primario risulta quello di favorire la formazione dello strato limite.

Ciò può avvenire per mezzo di tre fenomeni specifici che possono avvenire singolarmente o sequenzialmente:

- **ADSORBIMENTO FISICO:** è un fenomeno superficiale reversibile causato da sole forze di natura fisica e porta all'aumento di concentrazione sulla superficie esterna di un solido di quella particolare sostanza che entra in contatto con la superficie stessa.
- **ADSORBIMENTO CHIMICO (o chemiadsorbimento):** è un fenomeno irreversibile causato da forze chimiche e fisiche che da luogo a reazioni chimiche tra adsorbito e superficie dell'adsorbente che conducono alla formazione, nel caso degli additivi per lubrificanti, di nuovi composti tra metallo e molecola organica dell'additivo.
- **REAZIONE CHIMICA:** è un fenomeno che prevede la decomposizione più o meno spinta dell'additivo (cosa che non succede nel chemiadsorbimento) e/o la liberazione degli elementi attivi della molecola di additivo che reagiscono successivamente allo stato elementare con i metalli per dare vita a vari composti di natura lubrificante.

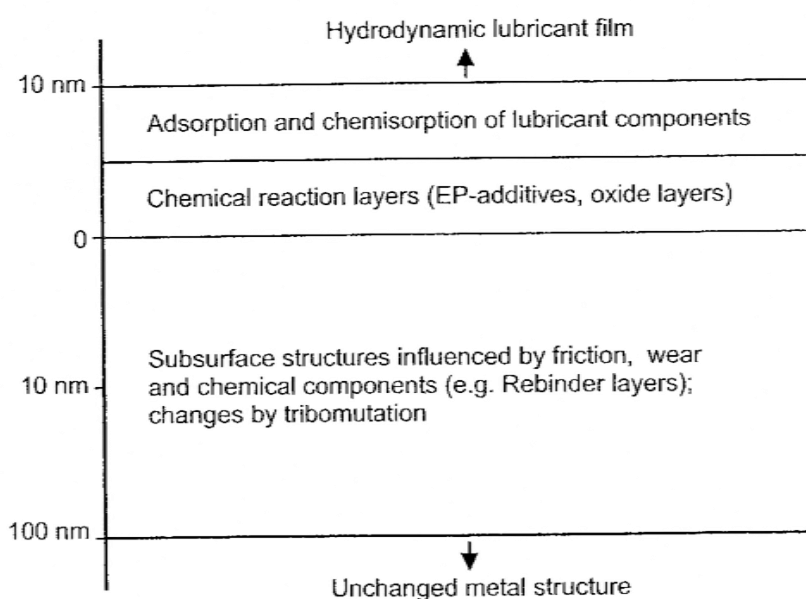


Fig. 3.8: Stratificazione tipicamente sviluppata sulla superficie metallica in presenza di contatto lubrificato.

3.1.1 La lubrificazione EP

Le condizioni di lubrificazione EP vengono realizzate aggiungendo l'olio con sostanze che possono essere additivi EP propriamente detti, oppure con additivi antiusura AW (da *anti-wear*).

La distinzione teorica tra queste due tipologie è, in realtà, piuttosto labile.

In particolar modo la prassi tende a definire AW quegli additivi che danno le migliori prestazioni in termini di riduzione dell'usura per prove a bassi carichi, basse temperature e tempi lunghi.

In questa categoria sono solitamente comprese sostanze come il tricresilfosfato (DCP) e ditiofosfato di zinco (ZnDTP) che aderiscono alla superficie e si decompongono generando sostanze che fondono a temperatura relativamente bassa. Facendo ciò riempiono e livellano, per successiva solidificazione, i solchi sulle superfici metalliche e, di conseguenza, migliorano il contatto tra gli organi in movimento.

Vengono, invece, detti EP gli additivi che manifestano miglior comportamento in condizioni di maggiore sollecitazione in prove di durata solitamente inferiore. Essi possono causare, però, una maggiore usura, in quanto sono maggiormente reattivi con la superficie metallica.

Il principio di funzionamento di questi additivi è, tuttavia, analogo, infatti, anch'essi sfruttano la propria struttura polare per formare strati adsorbiti fisicamente o chimicamente sulla superficie del metallo.

Ciò garantisce loro, tra l'altro, di essere immediatamente disponibili alle reazioni successive anche nel caso si andasse ad instaurare un regime di lubrificazione mista o limite in cui la quantità di lubrificante effettivamente disponibile all'interfaccia è estremamente scarsa.

Infatti, quando le condizioni di lubrificazione idrodinamica vengono a mancare, hanno luogo ripetuti contatti tra le asperità delle superfici metalliche in scorrimento reciproco che si deformano o asportano tra loro. Ciò genera un forte attrito e, di conseguenza, una notevole dissipazione di energia sotto forma di calore, il quale innalza la temperatura fino a valori tali da permettere la reazione degli additivi con la superficie metallica.

Lo sviluppo di calore è, il più delle volte notevolmente localizzato e di durata temporale molto breve, tanto che in letteratura si parla di "*flash temperature*".

Questo termine descrive il fatto che localmente si raggiungono temperature talmente elevate da poter realizzare microsaldature tra le superfici o in presenza di lubrificanti additivati reazioni quale la decomposizione termica della molecola degli additivi EP.

Solo in questo modo possono essere liberati gli *elementi attivi* in essi contenuti permettendo la reazione chimica vera e propria del composto con la superficie metallica.

Si viene, per tanto, a formare sulla superficie metallica nuda (gli eventuali strati di ossido o film precedentemente formati o adsorbiti vengono distrutti dalla duplice azione meccanica e termica)

un velo a base di sali inorganici la cui composizione è strettamente correlata all'elemento attivo rilasciato dall'additivo e alla presenza o meno di ossigeno nell'interfaccia.

Questi layer superficiali consentono una migliore distribuzione dei carichi, in quanto, deformandosi, possono levigare le asperità superficiali e abbassare il coefficiente d'attrito.

La scarsa affinità chimica con la superficie metallica contrapposta impedisce, inoltre, la realizzazione di quei fenomeni di saldatura che avvengono tra superfici in scorrimento sotto condizioni di estreme pressioni.

Questi composti, se pur altofondenti, hanno solitamente un punto di fusione inferiore a quello del metallo da cui derivano, per cui si instaura un particolare meccanismo di protezione che impedisce l'innalzamento della temperatura fino a valori compromettenti per il metallo.

Infatti, se la temperatura tende ad innalzarsi a causa di una qualche forma di sovraccarico e surriscaldamento, questa causerà per prima cosa la fusione del composto inorganico precedentemente formatosi che viene, così, asportato.

Lo stesso calore, però, favorisce nuovamente la reazione chimica tra additivo contenuto nell'olio e la superficie metallica messa a nudo riformando la pellicola distrutta.

Si genera dunque una sorta di automatismo nel quale l'alternarsi di fusione del composto già formato e ricostruzione dello stesso, funge da stabilizzatore della temperatura, mantenendo in generale le condizioni accettabili.

Le sostanze più comunemente utilizzate come additivi EP sono molecole organiche di varia natura contenenti elementi attivi quali fosforo, zolfo e cloro, singolarmente o in varie combinazioni che permettono di estendere l'intervallo di temperatura alla quale l'additivazione EP svolge il proprio compito.

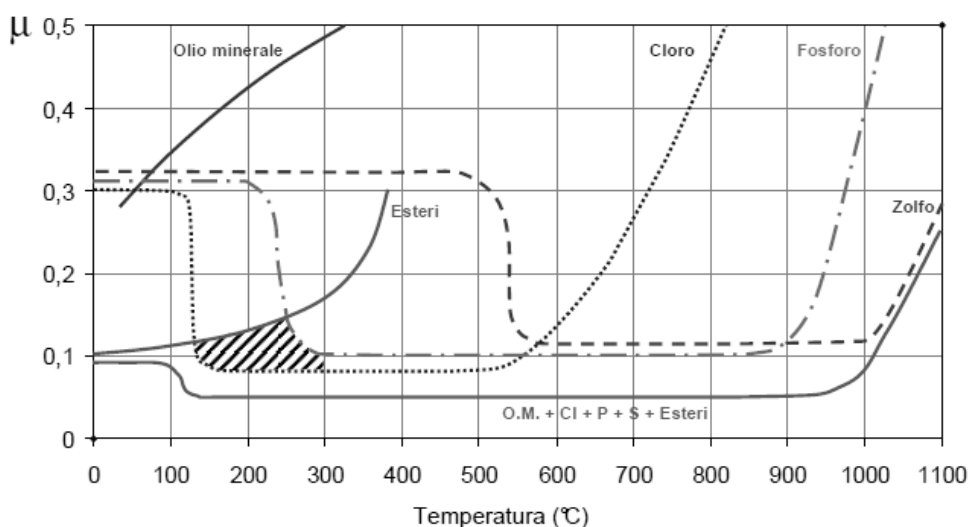


Fig. 3.9: Intervalli d'azione dei diversi elementi attivi presenti all'interno degli additivi EP.

Si nota, inoltre, a bassa temperatura, l'effetto sinergico derivante dall'uso combinato di additivi EP (a base S, Cl, P) ed untuosanti (esteri) su una base minerale.

3.1.2 La lubrificazione untuosa

Se si vanno ad analizzare le condizioni che si instaurano in un regime di lubrificazione limite è evidente che non sono sempre così gravose da necessitare di una lubrificazione di tipo EP.

Le interazioni tra le superfici possono essere, infatti, più favorevoli (si pensi al caso in cui sull'utensile il rivestimento sottile sia ancora presente ed integro), ma, nonostante ciò, la presenza del lubrificante può non essere comunque in grado di impedire che le superfici opposte vengano ancora in contatto.

Si genereranno di conseguenza altri problemi, quali forti aumenti dell'attrito o il fenomeno dello *stick-slip* che a causa del suo andamento discontinuo porta ad una lubrificazione irregolare con la possibilità di generare, talvolta, vibrazioni e condizioni alquanto severe di usura.

In questi casi si può ricorrere alla cosiddetta lubrificazione untuosa mediante l'interposizione tra le superfici di sostanze ad effetto superlubrificante (SL) dette comunemente additivi untuosanti o *friction modifier* (FM).

Il termine "untuosità" va, infatti, ad indicare una diminuzione dell'attrito maggiore di quella che si potrebbe prevedere sulla base della sola viscosità quando si confrontano diversi lubrificanti sotto identiche condizioni di prova.

Le sostanze a carattere untuosante sono generalmente accumulate da una particolare tipologia di struttura chimica che permette loro di ancorarsi sulle superfici metalliche prevenendo il contatto metallo-metallo.

Questa configurazione è suddivisibile in due componenti fondamentali: un raggruppamento chimico con proprietà energetiche più pronunciate rispetto al resto della molecola e con spiccate caratteristiche di polarità solitamente posto ad un'estremità, e una lunga catena apolare che, invece, conferisce alla sostanza sufficiente oleo-solubilità e che si allinea con gli altri requisiti generali richiesti al lubrificante.

I meccanismi di ancoraggio permessi dalla presenza dei gruppi chimici polari all'estremità del composto sono sostanzialmente due:

- Adsorbimento fisico: sfrutta l'attrazione tra la sede di polarità e la superficie metallica formando legami deboli. Genera, inoltre, una struttura per cui al di là dello strato ancorato sulla superficie metallica seguono strati disposti in modo meno ordinato e meno concentrato in cui, tuttavia, le molecole tendono ad orientare spontaneamente la parte carica di polarità verso una parte simile di una molecola adiacente.

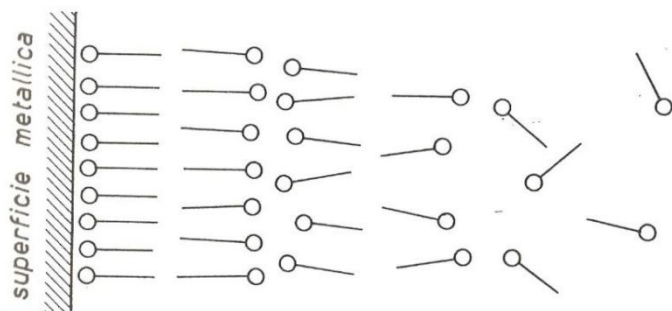


Fig. 3.10: Rappresentazione schematica dell'ancoramento ad una superficie metallica di sostanze con caratteristiche polari.

- Chemiasorbimento in cui la testa polare si coordina con gli ossidi sulla superficie del metallo generando saponi.

Ciò si ottiene impiegando acidi organici che risultano oleo-solubili e che posseggano, come sede di polarità, un raggruppamento acido.

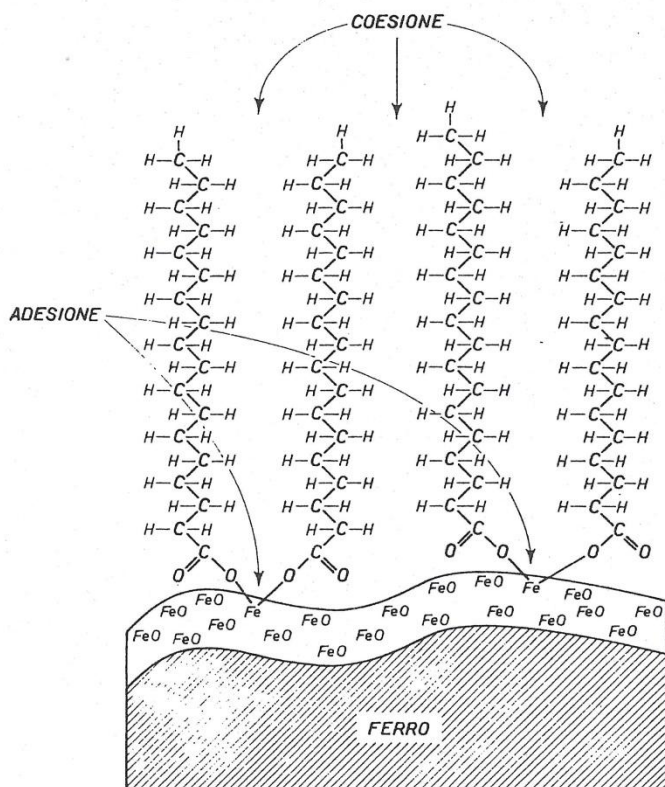


Fig. 3.11: Rappresentazione schematica del fenomeno del chemiasorbimento di acido stearico su una superficie ferrosa.

Si nota la localizzazione dell'adesione dell'untuosante sulla superficie metallica e i fenomeni di coesione tra code apolari.

Il secondo meccanismo è favorito dalla presenza di temperature elevate che, al contrario, disturbano il primo meccanismo, stimolando maggiormente la solubilità del composto nell'olio rispetto alla polarità del raggruppamento chimico.

I composti a base estere sono, in tal senso, una sintesi dei due meccanismi descritti.

In condizioni normali, infatti, non presentano gruppi acidi liberi realizzando un adsorbimento di tipo fisico, mentre, in presenza di temperature relativamente elevate, si decompongono in un prodotto inerte ed in un composto acido che reagisce con la superficie formando un sapone.

In tal modo si ottiene l'indubbio vantaggio di avere caratteristiche acide del composto che si manifestano unicamente dove e quando sono necessarie.

Per questo motivo gli esteri sono solitamente usati come additivi untuosanti nella formulazione degli oli a base minerale esplicando la loro funzione soprattutto per temperature inferiori a 300°C.

Le variabili che possono influire sui due tipi di ancoramento alle superfici sono: l'entità delle forze di adesione alla superficie, i fenomeni di coesione tra le molecole, l'orientamento delle molecole nei riguardi della superficie, la distanza delle molecole tra loro e la possibilità che tra le molecole di untuosante si interpongano altre sostanze.

L'effetto pratico delle sostanze untuosanti è quello di agire come "spacer" che formando un film visco-elastico adsorbito sulla superficie è in grado di:

- diminuire il coefficiente d'attrito tra due superfici in moto relativo;
- diminuire la temperatura locale (impedendo il contatto metallo-metallo) e le temperature medie sia della massa dell'olio che delle parti meccaniche;
- contenere fenomeni di usura adesiva;
- conferire all'olio migliori proprietà bagnanti;
- conferire all'olio migliori capacità aggraffanti;
- diminuire fenomeni di lubrificazione discontinua e con essa vibrazioni e rumorosità del processo.

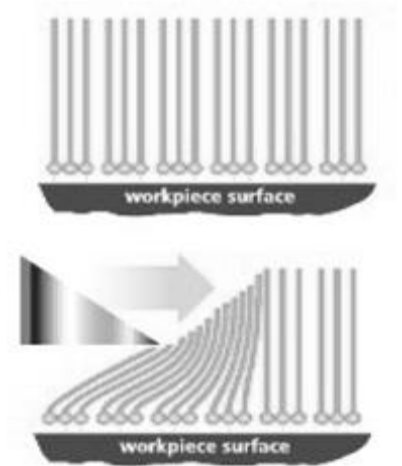


Fig. 3.12: Meccanismo d'azione degli additivi SL.

Generalmente l'impiego di untuosanti non influisce con l'utilizzo di additivi di tipo EP, infatti, al manifestarsi di condizioni di carico gravose gli additivi EP subentrano agli SL sulla superficie assumendo il compito di proteggerla dal danneggiamento.

Tuttavia, se questi additivi sono tali da avere campi d'azione simili, il fatto che entrambi agiscano adsorbendosi alla superficie potrebbe dar vita a fenomeni di tipo competitivo.

Ciò dovrà evitato valutato attentamente in sede di formulazione di un dato lubrificante.

3.2 La lubrificazione nel processo di maschiatura a rullare

Il regime di lubrificazione in cui va ad operare la maschiatura a rullare è particolarmente importante, in quanto, essendo un processo caratterizzato da intensa deformazione plastica del pezzo lavorato, l'area reale di contatto con l'utensile tende all'area nominale.

La presenza del lubrificante ha, quindi, il compito di ridurre significativamente l'attrito limitando la potenza richiesta al processo (anche del 10÷30%), inoltre, aumenta la lavorabilità del materiale, evitando che il flusso si accumuli sui fianchi del filetto.

Asportando parte del calore prodotto, ne riduce la quantità da smaltire per diffusione attraverso il corpo del maschio o del pezzo lavorato.

Il meccanismo preciso con cui si realizza la lubrificazione mista o limite nel caso di contatto plastico non è stato ancora del tutto chiarito dal punto di vista teorico.

La deformazione della superficie del preforo operata dall'utensile a rullare avviene, infatti, in presenza di carichi superficiali superiori alla tensione di snervamento del materiale lavorato.

Tale pressione è necessaria all'apice dei lobi del profilo attivo dei maschi per penetrare la superficie del preforo deformandola, ma, allo stesso tempo, l'azione è tale da spremere fuori la maggior parte del lubrificante dall'interfaccia.

L'elevata pressione, tuttavia, aiuta il lubrificante a bagnare adeguatamente le superfici e a creare uno strato estremamente sottile (in alcuni casi monomolecolare) adsorbito fisicamente sulla superficie in corrispondenza dei lobi che favorisce lo scorrimento reciproco delle superfici in moto.

In corrispondenza delle facce del profilo poligonale e del fondo dei filetti, invece, la geometria è tale da formare degli interstizi tra le superfici del filetto in formazione e del maschio a rullare.

In tali regioni il lubrificante rimane intrappolato in sacche fortemente pressurizzate in grado di esercitare una forma di lubrificazione plasto-idrodinamica a livello locale che contribuiscono a ridurre ulteriormente il coefficiente d'attrito del sistema.

In un processo di filettatura per deformazione al fluido lubro-refrigerante viene richiesta, di conseguenza, un'ottima capacità di resistere ai carichi imposti in modo tale da ridurre il coefficiente d'attrito e prevenire saldature tra le parti in scorrimento e, di conseguenza, ridurre l'usura.

I lubrificanti da preferire in questa operazione sono, di conseguenza, oli lubrificanti additivati pesantemente con additivi EP quali cloroparaffine o a base solfurea oppure con untuosanti a base di acido oleico, mentre altri fluidi solitamente usati nelle lavorazioni tramite taglio potrebbero dar vita a grippaggi e lacerazioni del filetto. Nella lavorazione di materiali più dolci quali

alluminio e rame possono essere utilizzati anche fluidi lubro-refrigeranti a base acquosa arricchiti con grafite purché siano sufficientemente concentrati.

Un errore frequentemente riscontrato nell'applicazione del lubrificante è quello di lubrificare unicamente il maschio e non la superficie del preforo che, per tanto, risulta essere ancora asciutta nelle fasi iniziali della lavorazione. Il primo filetto che si va a formare tenderà, però, a pulire dall'olio il maschio facendolo lavorare "a secco" nella parte più profonda del foro.

Ne deriva che, per realizzare le migliori condizioni tribologiche possibili, è necessario inondare di lubrificante completamente il foro da filettare prima di iniziare l'operazione.

Molto importante ai fini dei fenomeni di usura, di riduzione dell'attrito e di aumento della durata degli utensili risulta essere anche la rugosità superficiale di quest'ultimi.

È stato dimostrato, infatti, che maschi rifiniti tramite rettifica presentano dei tipici segni di lavorazione più o meno fitti che, se pur microscopici, vanno a peggiorare le condizioni di attrito aumentando il momento torcente richiesto al processo.

Danno vita, inoltre, a fenomeni di lavoro ridondante di deformazione, allo sviluppo di calore, ad usura dei punti di pressione e alla formazione di materiale di riporto sui fianchi dei denti in seguito al generarsi di saldature a freddo.

Al contrario, utensili che presentino morfologie più lisce, in quanto sottoposti, ad esempio, a trattamenti successivi di polishing e super-polishing, possiedono una vita maggiore, permettono velocità di taglio superiori e producono un incremento dell'accuratezza dimensionale di lavorazione.

Questa topografia superficiale migliorata risulta vantaggiosa non solo per gli utensili lucidi (nitruati o carbocementati), ma, soprattutto, per quelli ricoperti con rivestimenti sottili per i quali i produttori stanno sviluppando la tendenza realizzare una fase di lucidatura precedentemente e successivamente ad ogni fase di deposizione del rivestimento (anche intermedia nel caso di rivestimenti multistrato o a gradiente).

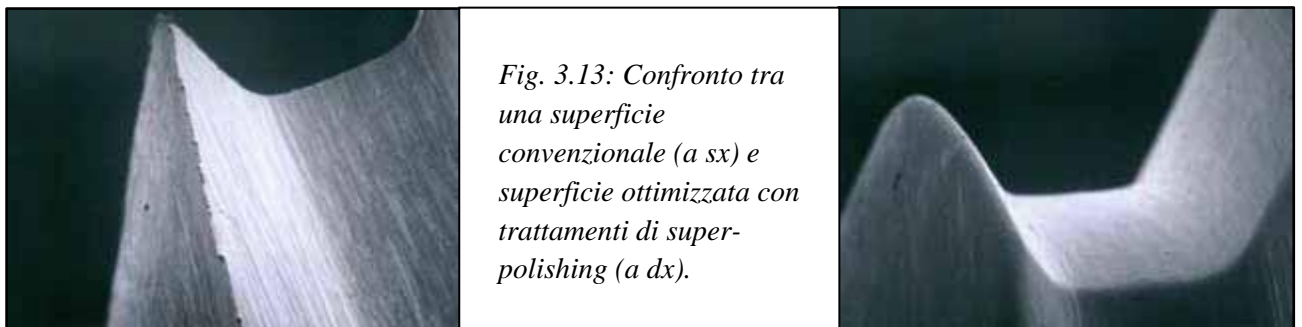


Fig. 3.13: Confronto tra una superficie convenzionale (a sx) e superficie ottimizzata con trattamenti di super-polishing (a dx).

3.2.1 Studio ed analisi del fluido lubrificante usato nel processo standard

Il processo di maschiatura sotto esame, come precedentemente descritto, sfrutta una lubrificazione in bagno d'olio al fine di migliorare il più possibile le condizioni tribologiche del sistema.

In particolar modo, l'impianto in questione è stato convertito circa due anni fa' sostituendo l'olio di origine minerale additivato con cloro paraffine in uso (usato ancora in altri impianti dell'azienda) con il prodotto HAROLBIO 5 della Bellini s.r.l. in virtù di una politica aziendale volta al miglioramento delle condizioni di lavoro degli operatori e alla riduzione dell'inquinamento ambientale.

Questo prodotto, commercializzato dalla Bellini s.r.l. a partire dal 2007, è costituito, infatti, da una miscela di oli naturali, raffinati con un metodo esclusivo e arricchiti con additivi antiossidanti, antiruggine e passivatori metallici.

La sua base vegetale diretta lo rende qualcosa di completamente innovativo sul mercato internazionale dei lubrificanti.

Negli anni passati, infatti, molti produttori di lubrificanti hanno tentato di distinguersi sul mercato proponendo prodotti "naturali".

Questa scelta è spinta dalla volontà di utilizzare materie prime rinnovabili, svincolandosi dalla necessità di doversi rifornire di olio fossile presso le grandi compagnie petrolifere che sempre più, invece, esercitano una politica commerciale aggressiva spinta a favorire le proprie divisioni lubrificanti interne e ad ostacolare i piccoli produttori indipendenti.

Altre motivazioni sono chiaramente legate alla volontà di questi produttori di proporre sul mercato prodotti maggiormente rispettosi dell'ambiente seguendo il concetto di "green economy". Oltre ad essere caratterizzati da una notevole biodegradabilità, questi prodotti sono in grado di migliorare le condizioni igienico-sanitarie sull'ambiente di lavoro per gli utilizzatori essendo formulazioni prive di componenti tossici o irritanti e, allo stesso tempo, riducono la formazione di fumi e vapori nocivi durante la lavorazione.

Numerosi test, in cui gli effetti derivanti dal passaggio ad oli naturali sono stati monitorati anche a livello di patologie manifestate dagli utilizzatori, hanno dimostrato la riduzione di disturbi a carico dell'apparato respiratorio, sia di natura allergica che irritativa, la riduzione di dermatiti e altri disturbi della cute dovute al contatto con i lubrificanti, nonché la riduzione nell'ambiente di lavoro di idrocarburi policiclici aromatici (IPA) potenzialmente cancerogeni e mutageni.

Ultima motivazione che può spiegare il tentativo compiuto da molti nel sostituire gli oli minerali con i corrispettivi naturali deriva dal fatto che, mentre negli anni passati le richieste di prestazioni degli utilizzatori finali erano facilmente soddisfatte dalla tecnologia formulativa tradizionale basata sull'additivazione di oli a base idrocarburica, nei primi anni del nuovo millennio molti produttori si sono accorti di essere giunti ad una sorta di "asintoto prestazionale" per cui ulteriori miglioramenti della curva di Stribeck di un particolare sistema lubrificato potevano essere ottenuti, non più mediante additivazione, ma solo sostituendo la base di origine minerale.

La Bellini s.r.l. ha iniziato, così, nel 2006 una campagna di sperimentazioni al fine di individuare quali basi alternative potessero portare a dei miglioramenti apprezzabili.

Questi test hanno evidenziato che utilizzando una base estere si potevano ottenere notevoli riduzioni del coefficiente d'attrito del sistema lubrificato e, in particolar modo, prestazioni elevate migliori delle massime performance ottenute con l'utilizzo di basi idrocarburiche.

Ciò non può stupire se si considera che già da anni gli esteri venivano utilizzati come additivi di prestazione nella formulazione degli oli minerali.

Nonostante ciò, gli oli minerali risultavano ancora i prodotti più prestanti quanto riguarda la stabilità al degrado termo-ossidativo e la conservazione delle proprietà nel tempo.

Nei sistemi di lubrificazione si possono avere, infatti, tempi di residenza dell'olio nel circuito anche di parecchi mesi grazie ai sistemi di recupero, filtrazione e ricircolo. In questo periodo di tempo l'olio viene sottoposto a regimi di alta pressione, alte temperature, presenza di aria e ossigeno, e presenza di sfido metallico che funge da catalizzatore. Tutto ciò porta alla degradazione chimica dell'olio che peggiora le proprie prestazioni nel tempo.

La struttura chimica degli oli minerali risulta essere molto più stabile a questo tipo di sollecitazione se confrontata con quella degli oli a base estere che, invece, tendono ad "irrancidire" molto velocemente in queste condizioni di utilizzo.

Ciò si manifesta attraverso fenomeni di ossidazione che causano la formazione di sostanze acide con rischio connesso di ossidazione dell'attrezzatura e dei pezzi lavorati e con reazioni di polimerizzazione che generano lacche e vernici all'interfaccia di scorrimento in grado di bloccare col passare del tempo i cinematismi della macchina utensile.

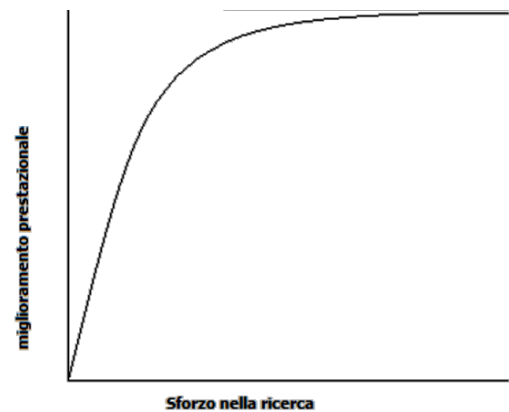


Fig. 3.14: Andamento delle prestazioni raggiunte dai lubrificanti a base minerale nel tempo.

L'incapacità da parte dei produttori negli anni passati di domare la scarsa resistenza all'ossidazione e alla degradazione degli oli vegetali ha portato alla presenza sul mercato di prodotti mediocri che hanno generato un certo scetticismo negli utilizzatori a passare a questa nuova tipologia di lubrificanti.

I migliori risultati venivano, inoltre, ottenuti con oli di origine vegetale (o semi-sintetici) cioè con quegli oli a base estere ottenuti a partire da oli vegetali, ma trattati con una reazione di sintesi chimica (saturazione...) in grado di eliminare i "punti deboli" del olio.

Tale processo risulta, però, molto costoso e rende tali lubrificanti non competitivi sul mercato rispetto agli oli minerali, nonostante il notevole incremento del prezzo del petrolio avuto negli ultimi anni.

La linea di prodotti vegetali Harolbio della Bellini s.r.l. (e le nuove famiglie in fase di sviluppo) risultano essere, invece, competitivi sul prezzo rispetto agli oli minerali più resistenti ai carichi e, addirittura, più stabili alle reazioni termo-ossidative dei prodotti di origine petrolifera.

Questo risultato è stato reso possibile grazie ad un'intensa attività di collaborazione tra il laboratorio R&S della Bellini e centri di ricerca universitari che hanno portato alla messa a punto di un processo di produzione di oli lubrificanti biodegradabili a base di esteri di derivazione vegetale.

Sono ottenuti da semi di piante oleose (colza, girasole, olivo, soia...) selezionate e modificate geneticamente. Sono di conseguenza fonti rinnovabili disponibili in elevata quantità e a basso prezzo sul mercato.

L'innovazione deriva dal fatto di avere un olio vegetale diretto già stabile in partenza grazie ad un "controllo totale della produzione" sul quale viene eseguito unicamente un processo di raffinazione e un'additivazione tale da garantire al lubrificante vegetale prestazioni elevate e durature.

Non risulta, invece, necessaria alcuna fase di sintesi chimica, il che permette un notevole risparmio sui costi di produzione del lubrificante e, quindi, un prezzo finale competitivo sul mercato.

Si ottiene un prodotto che, oltre a manifestare tutti i vantaggi derivanti dall'assenza di olio minerale, ha dimostrato di essere in grado di garantire:

NOTA:

- **OLI VEGETALI DIRETTI:** oli ricavati da lavorazione di semi o piante oleose che subiscono unicamente processi di raffinazione e additivazione
- **OLI DI ORIGINE VEGETALE:** oli semi-sintetici a base esterea ricavati tramite sintesi chimica a partire da oli vegetali.

- un'ottima scorrevolezza anche a basse temperature ed un eccezionale potere bagnante, per cui l'olio si disperde sulla superficie metallica in modo rapido ed uniforme;

- un ottimo potere lubrificante con una riduzione del coefficiente d'attrito fino al 30% anche in assenza di additivi EP grazie alle proprietà untuosanti, antiusura, antisaldanti e distaccanti della base estere. Ciò permette un incremento dei parametri di taglio, la realizzazione di ottime finiture, ma, soprattutto, prolunga la durata degli utensili;
- una maggiore stabilità all'ossidazione rispetto agli oli vegetali tradizionali e agli oli insaturi;
- una riduzione dei consumi sia energetici che di olio;
- una biodegradabilità superiore al 90%;
- punti di infiammabilità e di fumo superiori a qualsiasi altra tecnologia formulativa.

La particolare conformazione dell'impianto produttivo porta, tuttavia, a ipotizzare la presenza di contaminazioni nell'olio in uso nel processo di rullatura.

Le possibili fonti di contaminazioni che possono variare le caratteristiche chimico-fisiche rispetto al prodotto nuovo sono:

- Olio Bellini X-DRAW 341 spruzzato nella pressa a monte dell'impianto di filettatura sul nastro di C45 per favorire le operazioni di tranciatura, imbutitura e piegatura.
È un fluido per lavorazioni meccaniche gravose esente da olio minerale ottenuto dalla miscela di composti untuosanti sia sintetici sia di origine naturale (semi-sintetici) con derivati organici clorurati (additivi EP).
- Olio da ingranaggi AGIP EXIDIA HG 220 a base paraffinica additivato con untuosanti, antiruggine e antisaldanti (EP).
È usato nella lubrificazione delle patrone delle unità di filettatura, ma, a causa della particolare progettazione di quest'ultime, può trafilare e colare nella zona di lavoro sottostante.
- Sfrido metallico particellare di C45 generato durante le operazioni di tranciatura che rimane adeso al nastro metallico finché non viene rimosso dal flusso di lubrificante, rimanendo in sospensione all'interno della vasca di raccolta dell'impianto di lubrificazione.

Per quantificare il grado di contaminazione dell'olio in uso si è provveduto a far analizzare un campione di lubrificante prelevato da un ugello di lubrificazione dell'impianto di maschiatura presso il laboratorio della Bellini s.r.l. al fine di valutare le variazioni subite dalle proprietà dell'olio dopo il periodo di permanenza nell'impianto.

Tale lubrificante verrà in seguito denominato HAROLBIO 5 (*) per sottolineare le diverse caratteristiche rispetto all'HAROLBIO 5 originale.

Dal report fornito dalla Bellini s.r.l. sono emersi i seguenti punti chiave:

- 1) Notevole contaminazione da parte degli altri oli usati nell'impianto:

COMPOSIZIONE HAROLBIO 5 (*)	HAROLBIO 5	EXIDIA HG 220	X-DRAW 341
	≈ 55%	30 %	≈ 15%

Tabella X: Contaminazione da altri oli riscontrata nel campione 0 del lubrificante.

La determinazione del tenore di inquinanti presenti nel campione è stata ottenuta triangolando i risultati forniti da un'analisi spettroscopica ad infrarossi (FT-IR) in assorbanza eseguita sul campione di HAROLBIO 5 (*) raccolto e sui campioni dei tre oli nelle condizioni di fornitura.

Le sostanze contaminanti risultano, nonostante l'elevato tenore, essere compatibili fisicamente con l'HAROLBIO 5. L'olio non presenta, infatti, stratificazioni, gelificazioni o separazioni di fase in prove condotte a 20 e a 50 °C. Ciò è indice di perfetta miscibilità e solubilità dei componenti nelle concentrazioni date.

Le immediate conseguenze derivanti da questa contaminazione sono, tuttavia:

- a) Variazione delle caratteristiche medie fisiche del lubrificante

PROPRIETA' FISICHE MEDIE	NORMA DI RIFERIMENTO	Campione 0: HAROLBIO 5 (*)	HAROLBIO 5 NUOVO	EXIDIA HG 220	X-DRAW 341
Densità a 20°C[Kg/m ³]	ASTM D 1298	954	914	895	1090
Viscosità a 40°C[cSt]	ASTM D 445	58,9	39,8	220	38,3
Viscosità a 100°C[cSt]	ASTM D 445	9,17	8,57	18,9	5,51
Indice di viscosità[-]	ASTM D 2270	135	202	96	69

Tabella XI: proprietà fisiche medie dell'HAROLBIO 5 (*) e dei suoi costituenti

Si nota, in particolar modo, un incremento della viscosità sia alla temperatura di esercizio dell'olio (≈ 35 °C), sia a temperature elevate, anche se, nel complesso, si ha una diminuzione dell'indice di viscosità.

b) Incremento delle prestazioni EP del lubrificante.

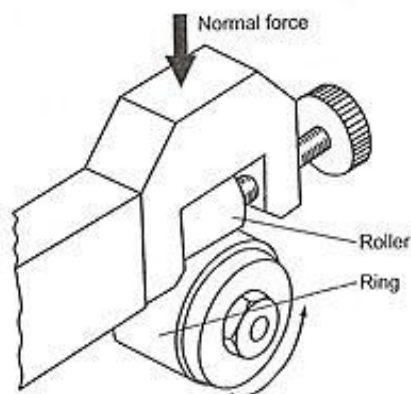


Fig. 3.15: configurazione tipica del Brugger Test.

La valutazione del comportamento meccanico del lubrificante viene eseguita nel laboratorio della Bellini attraverso il cosiddetto Brugger Test.

Questa prova condotta secondo norma DIN 51347 sfrutta un particolare tribometro formato da due rulli (di materiale normato) lubrificati con il fluido lubro-refrigerante sotto analisi.

I rulli in rotazione vengono posti a contatto per 30 secondi con una

pressione specifica fornita da un sistema di leve e pesi (a loro volta normati).

Al termine della prova si misura l'area della superficie di usura generatasi e il valore ottenuto diviso il carico applicato determina il valore di Brugger in N/mm^2 .

Il tribometro è, molto spesso, anche in grado di misurare la potenza elettrica assorbita in modo tale da determinare indirettamente il coefficiente d'attrito.

VALORE BRUGGER [N/mm ²]	NORMA DI RIFERIMENTO	Campione 0: HAROLBIO 5 (*)	HAROLBIO 5 NUOVO
		DIN 51347	178,8

Tabella XII: Confronto tra le proprietà meccaniche del campione d'olio prelevato con quelle del lubrificante nuovo.

È evidente un netto miglioramento delle prestazioni rispetto al prodotto originale grazie al notevole potere EP ed untuosante delle sostanze contaminanti.

L'X-DRAW 341, in particolar modo, è fortemente additivato con cloro-paraffine le quali, sotto effetto di elevate temperature e pressioni, reagiscono con il metallo formando strati limite altamente scorrevoli a base di cloruro di ferro.

La presenza di questi additivi ha, tuttavia, numerose controindicazioni tra cui la formazione di acido cloridrico che porta a velocizzare i fenomeni di acidificazione e ossidazione del lubrificante a base estere.

La ricerca nella formulazione dei nuovi lubrificanti, motivata soprattutto da considerazioni tossicologiche ed ambientali, sta spingendo, infatti, sempre più nel produrre oli esenti da additivi a base cloro.

Le paraffine clorurate se bruciate o portate ad alta temperatura liberano diossine fortemente tossiche e cancerogene.

Le stesse possono generarsi anche nel corso del processo di deformazione, a causa del calore sviluppato e dissipato dall'attrito. I prodotti di combustione sono, inoltre, altamente corrosivi nei confronti dei refrattari usati nei forni a causa dell'ulteriore formazione di acido cloridrico con la condensa.

c) Riduzione della biodegradabilità.

Mentre l'HAROLBIO 5 è un prodotto facilmente biodegradabile (con una biodegradabilità superiore al 90%), non lo sono l'EXIDIA HG 220 e l'X-DRAW 341 che pur non essendo classificati come sostanze pericolose per l'ambiente hanno dei costituenti moderatamente persistenti nell'ambiente particolarmente in condizioni anaerobiche.

- 2) Oltre alla contaminazione da sostanze estranee è stata rilevata una notevole presenza particellare (codice di contaminazione secondo ISO 4406 = 23/23/19), nonostante la presenza nel circuito di lubrificazione del doppio sistema di filtrazione.

Tale fenomeno può essere dovuto a un qualche malfunzionamento dell'impianto di filtrazione (principalmente del filtro a torre).

Si è deciso, tuttavia, di non intraprendere nessuna misura correttiva fino alla conclusione del lavoro, in modo tale da mantenere costanti le caratteristiche del sistema tribologico.

A tal fine, inoltre, verrà monitorata nel tempo la concentrazione di particelle presenti nel lubrificante.

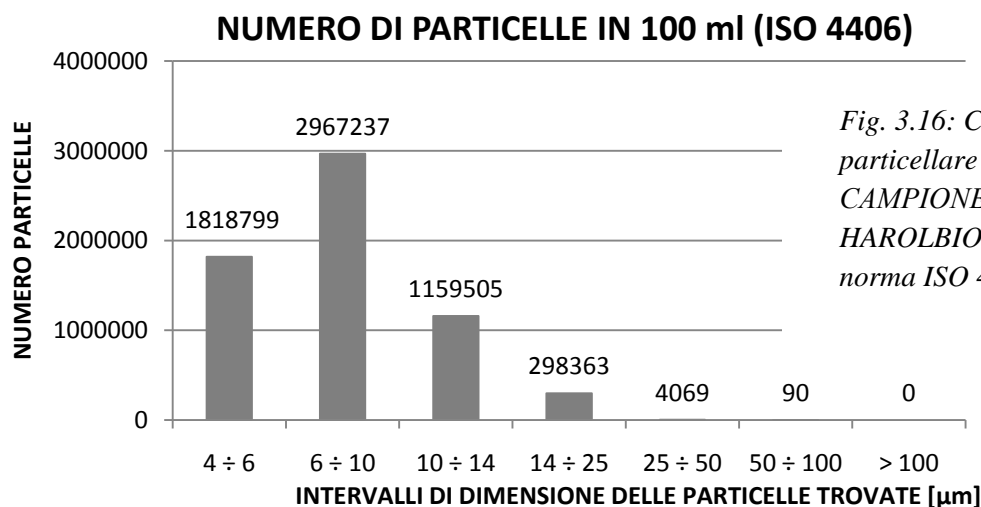


Fig. 3.16: Contaminazione particellare nel CAMPIONE 0 dell'olio HAROLBIO 5() secondo norma ISO 4406.*

Tale contaminazione è evidente anche ad un primo esame visivo, in quanto il campione di liquido prelevato, invece di apparire quale un fluido limpido di colore giallo paglierino (come il prodotto nuovo), appare bruno e torbido, anche dopo un lungo periodo di decantazione.

- 3) Ridotta degradazione termo-ossidativa dell'olio con conseguente scarsa acidificazione del lubrificante.

Se si determina, infatti, il numero di neutralizzazione (N.N.TAN) (con le modalità descritte dalla norma ASTM D 974) del lubrificante prelevato dal circuito questo fornisce un valore molto simile al valore nel HAROLBIO 5 nuovo.

Lo stesso tenore di antiossidante (valutato mediante FT-IR) non è variato significativamente rispetto al prodotto commercializzato.

Anche il contenuto d'acqua, valutato con il metodo Karl Fisher (ASTM D 1744) non risulta particolarmente elevato.

	NORMA DI RIFERIMENTO	HAROLBIO 5 (*)	HAROLBIO 5 NUOVO
N.N.TAN [mgKOH/gr]	ASTM D 974	0,20	0,25
ACQUA [ppm]	ASTM D 1744	257	/

Tabella XIII: Confronto tra gli indici di degradazione del campione d'olio con il lubrificante nuovo.

Ne deriva che la temperatura a cui si viene a trovare mediamente il fluido nell'impianto di lubrificazione (non considerando la temperatura flash raggiunta nei punti di contatto utensile-preforo) non genera un degrado termico spinto dello stesso.

Da qui si è esclusa la necessità di introdurre un sistema di raffreddamento nell'impianto, il quale non porterebbe nessun vantaggio apprezzabile, se non quello di aumentare la viscosità.

Non migliorerebbe, infatti, nemmeno il processo di asportazione del calore sviluppato durante la deformazione, in quanto, una riduzione della temperatura di partenza del lubrificante anche di una trentina di gradi, avrebbe un effetto irrilevante all'interfaccia dove la temperatura raggiunge localmente alcune centinaia di gradi.

In conclusione dall'analisi del lubrificante si evince come la contaminazione con gli altri oli presenti nell'impianto da una parte riduca la biodegradabilità del prodotto in uso, ma, dall'altra, va a potenziarne enormemente le prestazioni per un processo quale la maschiatura a rullare per la quale risultano essere fondamentali caratteristiche EP e untuosanti del lubrificante.

La filettatura Metrica ISO

4.1 Definizione

Il filetto nella sua accezione più comune è una costruzione meccanica derivante da un'operazione di filettatura atta a realizzare un accoppiamento elicoidale tra due elementi.

Normalmente il filetto assume l'aspetto di un solco ad andamento elicoidale, inciso su una superficie cilindrica (o conica). Effettuando una sezione longitudinale il suo profilo presenta di solito un andamento approssimativamente triangolare, con un'alternanza di apici esterni (chiamati creste) e apici interni (chiamati fondi).

Quando la filettatura è realizzata sulla superficie esterna di un pezzo (es. un gambo, un cilindro, un'asta, ecc.) questa viene chiamata vite, quando, invece, è realizzata, come nel caso sotto analisi, su una superficie interna (es. un foro, una cavità, ecc.) viene chiamata madrevite.

L'accoppiamento tra vite e madrevite (detto comunemente avvvitamento) avviene tramite la rotazione coassiale di un elemento rispetto alla controparte complementare, purché entrambe abbiano filettature con le stesse caratteristiche.

Per garantire ciò, organi governativi e sovranazionali si sono impegnati negli anni passati a realizzare norme di riferimento che permettessero la standardizzazione delle filettature.

La filettatura metrica ISO fu normata per l'appunto con questo scopo nel 1947 dalla neonata Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione ed è diventata, col passare del tempo, la geometria di filettatura più comunemente adottata.

Non è, tuttavia, ancora riuscita a soppiantare definitivamente gli altri tipi di filettatura i quali persistono ancora al giorno d'oggi, nonostante possano essere giustificati solo in parte da esigenze pratiche di realizzazione o applicazione.

4.2 Caratteristiche geometriche della filettatura Metrica ISO

Le caratteristiche geometriche principali della filettatura ISO (serie M) sono contenute nella norma internazionale ISO 68-1.

Questa norma stabilisce che il *profilo ideale* di vite e madrevite coincidano e siano costituiti da un profilo triangolare con angolo al vertice di 60° , tale da rendere uguali la dimensione del passo di filettatura e la lunghezza del fianco ideale del filetto.

Il *profilo base* è anch'esso identico su vite e madrevite e differisce dal profilo ideale per la presenza di smussi di altezza pari ad $H/4$ per il fondo della vite e la cresta della madrevite e pari ad $H/8$ per il fondo della madrevite e la cresta della vite.

Il *profilo nominale* rimane, invece, invariato rispetto al profilo base per la madrevite, mentre la gola della vite è soggetta ad un ulteriore raccordo di raggio pari ad $H/6$.

Il *profilo d'esecuzione* differisce, infine, per tutte quelle piccole variazioni dovute di volta in volta al processo di lavorazione della filettatura.

Un notevolissimo vantaggio della filettatura metrica è che, come si vede dall'immagine, le creste del filetto sono sempre spianate, e quindi i due filetti della giunzione filettata entrano in contatto solo con i fianchi del filetto stesso, mentre le creste hanno un gioco apprezzabile.

Questo sistema garantisce la non interferenza tra le due parti sulle creste rendendo più agevole la realizzazione del filetto ed il montaggio delle parti stesse che, in tal modo, non rischiano di incastrarsi l'un l'altra.

D'altra parte, la filettatura metrica ha esclusivamente lo scopo di realizzare una tenuta di tipo meccanico, non garantendo, in alcun modo, la tenuta di un fluido in pressione.

Quest'ultima si può ottenere solo implementando il sistema con guarnizioni o superfici di tenuta. La relazione geometrica che lega nella filettatura metrica ISO l'altezza H e il passo P del filetto è data da:

$$H = \cos(30^\circ) \cdot P = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot P \approx 0,866 \cdot P$$

In una filettatura esterna (vite, ad esempio su un bullone), il diametro maggiore (o diametro nominale D) e il diametro minore (diametro di nocciolo D_1) definiscono le dimensioni massime del filetto. Ciò significa che la filettatura esterna deve terminare piatta entro D , ma può essere raccordata al di sotto di D_1 . Al contrario in una filettatura interna (madrevite, ad esempio su un dado) i diametri maggiore e minore sono le dimensioni minime e, per tanto, il profilo di filettatura deve terminare piatto entro D_1 , ma può essere raccordato oltre D .

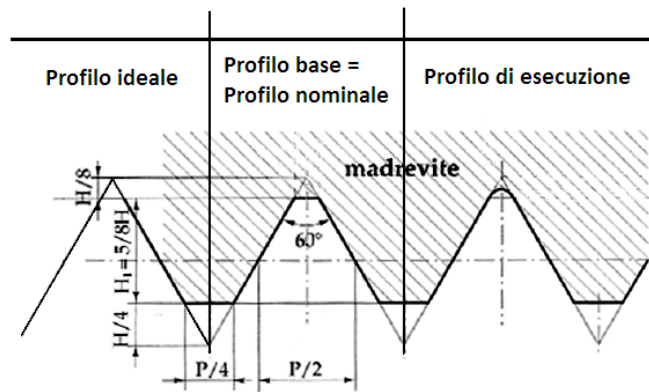


Fig. 4.1: Profilo della madrevite in una filettatura metrica ISO da norma ISO 68-1.

Il diametro minore D_1 e il diametro medio D_2 si ricavano dal diametro nominale e dal passo con le seguenti relazioni:

$$D_1 = D - 2 \cdot \frac{5}{8} \cdot H = D - \frac{5\sqrt{3}}{8} \cdot P \approx D - 1,082532 \cdot P$$

$$D_2 = D - 2 \cdot \frac{3}{8} \cdot H = D - \frac{3\sqrt{3}}{8} \cdot P \approx D - 0,649519 \cdot P$$

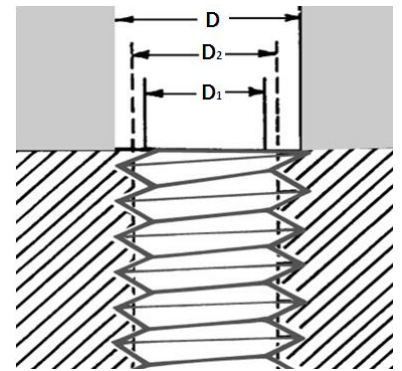


Fig. 4.2: Schematizzazione dei vari diametri (nominale, medio e di nocciolo) su una filettatura interna.

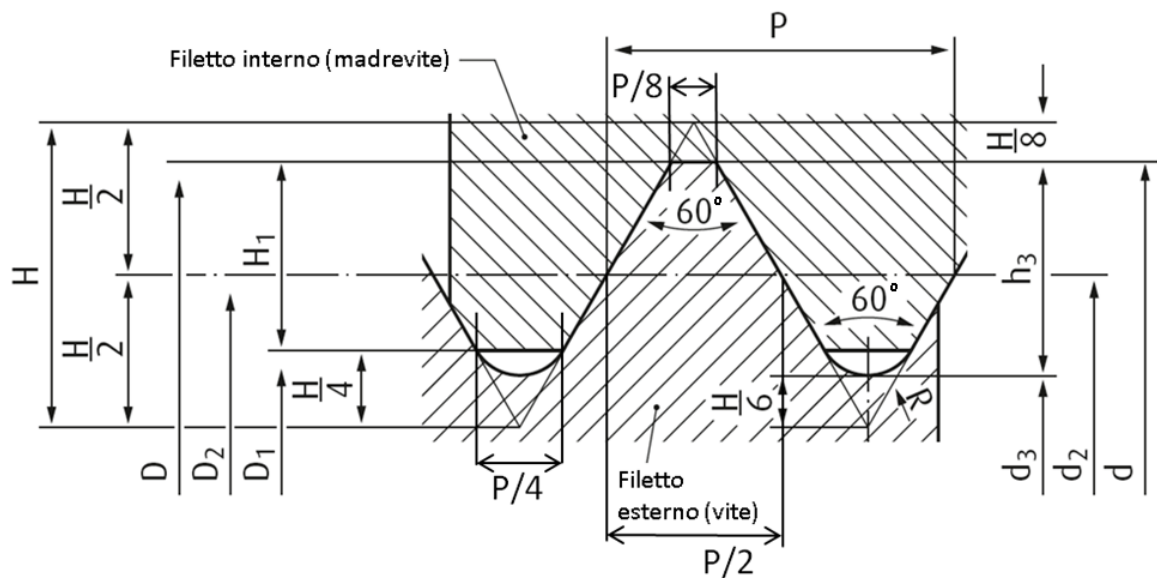


Fig.4.3: Profilo base della filettatura metrica ISO con riportate le dimensioni geometriche caratteristiche.

Le dimensioni principali per una filettatura M5 (il tipo di filettatura realizzata sui morsetti) sono riportate nella tabella seguente:

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE	Diametro nominale del filetto	Passo	Diametro medio	Diametro del nocciolo	Altezza del triangolo ideale	Altezza di filettatura (5H/8)	Raggio di raccordo (H/6)
SIMBOLO	D	P	D_2	D_1	H	H_1	R
VALORE[mm]	5	0,8	4,480	4,134	0,693	0,433	0,115

Tabella XIV: Dimensioni caratteristiche della filettatura M5 secondo la norma ISO 68-1.

4.3 Il sistema di tolleranza ISO per le filettature

Il sistema internazionale metrico delle tolleranze è basato su un insieme di limiti e accoppiamenti.

I limiti di tolleranza sui componenti e l'ampiezza del campo di tolleranza determinano l'accoppiamento dell'assemblato.

Per semplicità il sistema di tolleranze è descritto e schematizzato per parti cilindriche. Risulta, per tanto, che la superficie interna filettata (madrevite) è equivalente ad un foro, mentre quella esterna (vite) lo è ad un albero, come nel caso del classico accoppiamento meccanico albero-foro.

In particolar modo, la linea dello zero viene fissata sul profilo base dei filetti, garantendo un riferimento comune ad entrambi i componenti.

A partire dalla linea dello zero sono definiti degli scostamenti fondamentali che identificano la regione di tolleranza.

Lo scostamento superiore ES (dal francese *écart supérieur*) è definito come la differenza algebrica tra il limite massimo della dimensione ammessa e la dimensione base.

Lo scostamento inferiore, invece, EI (dal francese *écart inférieur*) è dato dalla differenza algebrica tra il limite minimo della dimensione ammessa e la dimensione base.

Nel caso di filettature esterne questo scostamento corrisponde anche alla deviazione fondamentale (è, infatti, il limite più vicino alla dimensione base).

La tolleranza T è per definizione la differenza tra le due dimensioni limite.

Gli accoppiamenti sono definiti a partire dallo scostamento fondamentale e possono essere positivi o negativi in relazione ai costituenti l'insieme.

La loro combinazione può originare a seconda dei casi: giochi, interferenze o accoppiamenti incerti.

Tracciata la linea dello zero in corrispondenza della dimensione base, ricalcando la convenzione usata negli accoppiamenti foro-albero, il profilo della madrevite si troverà al di sopra di questa, mentre i limiti dimensionali della vite saranno al di sotto (ciò non vale ovviamente nel caso di accoppiamento per interferenza tipo quello realizzato da viti autofilettanti).

Viene quindi definita in base allo scostamento fondamentale la posizione di tolleranza indicata solitamente con una lettera.

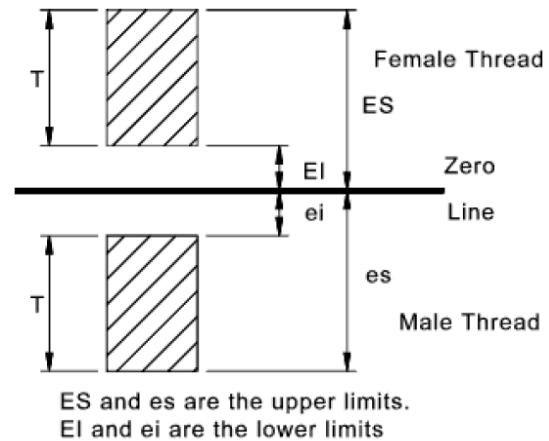


Fig. 4.4: Schematizzazione degli scostamenti fondamentali e limiti definiti dalle norme.

Per madreviti ISO si usano lettere maiuscole da **A** a **H** dove la posizione **H** corrisponde ad uno scostamento di base nullo mentre da **A** a **G** si hanno scostamenti positivi progressivamente decrescenti.

Per indicare le posizioni di tolleranza delle viti si usano invece lettere minuscole sempre dalla **a** alla **h** dove **h** corrisponde alla misura zero e **a** allo scostamento negativo maggiore.

Tuttavia le norme ISO tra l'altro riprese dalla norma UNI 5542-65 prevedono per le madreviti l'uso esclusivamente di due posizioni:

- **H** per filetti a maggiore precisione
- **G** per filetti che riceveranno un trattamento superficiale.

Corrispondentemente si associano solitamente viti in tolleranza **g** nel primo caso ed **e** nel secondo.

Se si adottano tolleranze con posizione **e**, **g** e **G** le dimensioni limite prescritte dalle norme si intendono valide per la filettatura prima del rivestimento; dopo il rivestimento le dimensioni delle madreviti possono risultare minori del limite minimo prescritto per i vari diametri purché non siano minori delle dimensioni nominali.

Quando si adottano tolleranze con posizione **h** e **H** le dimensioni limite prescritte si intendono valide per le filettature dopo l'eventuale rivestimento.

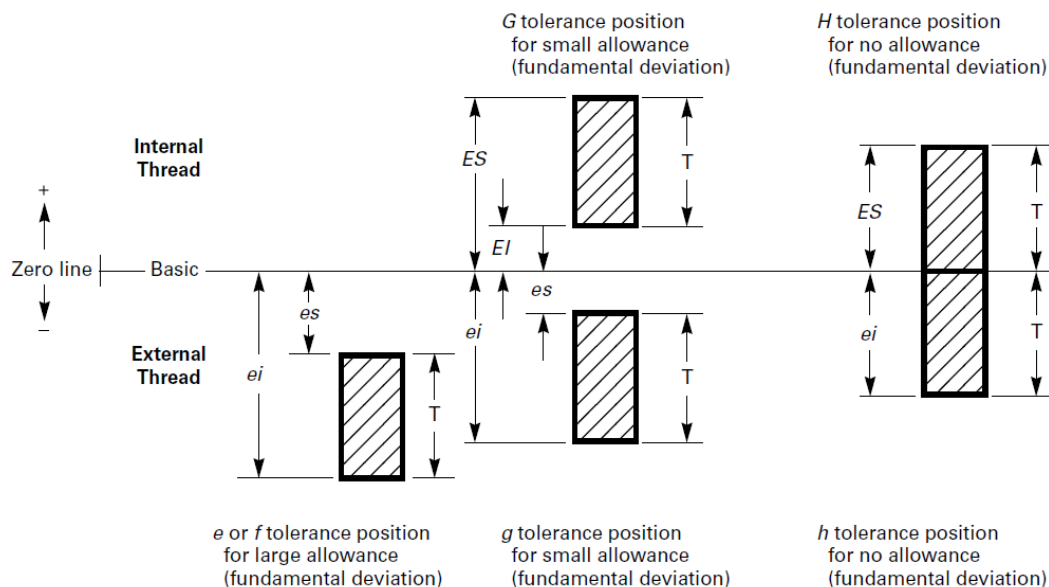


Fig. 4.5: Posizioni di tolleranza tipiche per filetti esterni ed interni.

La posizione di tolleranza è solitamente preceduta da un numero compreso tra 3 e 9 nel caso delle viti e da 4 a 8 nel caso delle madreviti indicante il grado di tolleranza. Questo numero identifica la qualità della tolleranza ed è solitamente indicata sia per il diametro medio sia per il diametro di nocciolo della filettatura.

Il grado di precisione deve essere scelto in base a due principali parametri:

- 1) La lunghezza di avvitamento cioè la lunghezza della parte in comune tra vite e madrevite quando queste sono accoppiate.
È misurata lungo l'asse di filettatura e i suoi valori limite sono tabulati nella norma ISO 965-1 in funzione del diametro nominale e del passo in tre gruppi:
 - S: lunghezza di avvitamento **corta** (Short);
 - N: lunghezza di avvitamento **normale** (Normal);
 - L: lunghezza di avvitamento **lunga** (Long).

- 2) La qualità (o precisione) di lavorazione che, secondo le norme (ad esempio la UNI 4534), può essere:
 - **precisa** (o **fine**) per filettature di precisione, con piccolissimo gioco tra vite e madrevite;
 - **media** per impiego generale di bulloneria di categoria A, avente lavorazione media e tolleranze ristrette;
 - **grossolana** per bulloneria di categoria C, avente lavorazione grossolana e tolleranza ampia, o ogni qual volta possano insorgere difficoltà produttive (p. es. in filettature di barre laminate a caldo, nel filettare fori profondi o pezzi in materiale sintetico).

In funzione dei due parametri tramite la tabella seguente si possono determinare i campi di tolleranza raccomandati per le filettature interne:

Lunghezza di avvitamento	Qualità di lavorazione	Campi di tolleranze per filettature interne			Osservazioni e note
		Senza rivestimento	Fosfatate o con rivestimento galvanico (1)	Con rivestimento galvanico di grande spessore (2)	
S	Precisa	4H	-	-	Scegliere preferibilmente i campi indicati in grassetto. (1) Lo spessore del rivestimento è minore di ¼ dello scostamento fondamentale per la posizione g (2) Spessore del rivestimento maggiore di quello di (1)
	Media	5H	5H	5G	
	Grossolana	-	-	-	
N	Precisa	4H 5H	4H 5H	4G 5G	
	Media	6H	6H	6G	
	Grossolana	7H	7H	7G	
L	Precisa	6H	6H	-	
	Media	7H	7H	7G	
	Grossolana	8H	8H	8G	

Tabella XV: Campi di tolleranza raccomandati per le filettature in funzione della lunghezza di avvitamento e della qualità della lavorazione secondo la norma UNI 4534.

Ne deriva che per lunghezze di avvitamento corte sono consigliati accoppiamenti stretti in modo da favorire una maggiore resistenza del collegamento, mentre per avvitamenti lunghi è preferibile adottare accoppiamenti con tolleranze maggiori per compensare eventuali scostamenti di passo.

Per ogni dimensione nominale di filettatura, ad una combinazione grado-posizione, vengono associati dei valori alle dimensioni fondamentali del filetto.

Designazione della tolleranza	Scostamento fondamentale EI	Diametro esterno D	Diametro medio D ₂			Diametro di nocciolo D ₁		
		min.	min.	toll.	max.	min.	toll.	max.
6H	0	5.000	4.480	0.125	4.605	4.134	0.200	4.334
6G	+0.024	5.024	4.504	0.125	4.629	4.158	0.200	4.358

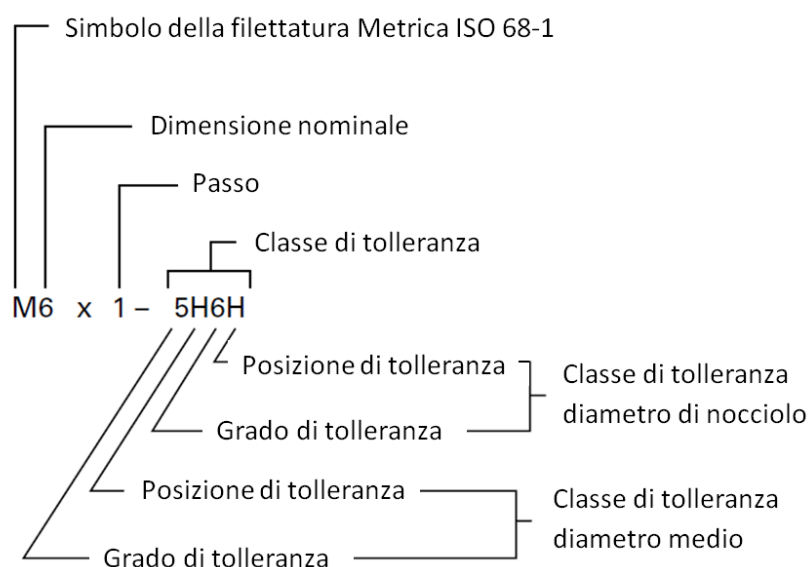
Tabella XVI: Dimensioni fondamentali per un filetto M5x0,8 (estratto da UNI 5542-65).

Le norme riportano sia il valore del diametro medio che del diametro di nocciolo, perché la dimensione del diametro funzionale (di nocciolo) è legata ad eventuali variazioni del diametro di passo (diametro medio), dalla forma del filetto e dal profilo.

Le variazioni nelle singole caratteristiche del filetto quali l'angolo del fianco, l'assialità, la conicità e il raggio di raccordo portano ogni singolo filetto ad essere diverso dalla maggior parte degli altri; pertanto i valori misurati per D₁ e D₂ di un dato filetto sono uguali a quelli di un altro filetto nominalmente identico solo nel caso in cui entrambi abbiano una forma perfettamente corrispondente al profilo nominale.

Per verificare la conformità del filetto occorre misurare, per tanto, il diametro di passo o quello funzionale o entrambi, verificando che rispettino le dimensioni limite date dalle norme per la dimensione di filettatura e classe di tolleranza in questione.

La completa designazione di un filetto avviene per mezzo di una sigla alfanumerica che descrive il tipo di filettatura, la dimensione nominale, il passo di filettatura e le classi di tolleranza.



Se le due classi di tolleranza per le due dimensioni sono identiche non è necessario ripetere i simboli.

M6 × 1 – 6H

Fig. 4.6: Descrizione della designazione di una filettatura.

4.3.1 Tolleranze dimensionali nella maschiatura a rullare

Nella maschiatura a rullare la particolare geometria dell'utensile fa sì che questo tenda ad autoguidarsi all'interno del foro evitando errori di taglio assiali e permettendo, in collaborazione con l'elevata rigidità degli utensili utilizzati, l'ottenimento di eccellenti tolleranze, anche nella lavorazione di piccole misure, in maniera del tutto comparabile con quanto ottenuto nella filettatura per asportazione.

Diverse sono, invece, le tolleranze con cui sono tipicamente realizzate le parti filettate del maschio a taglio e del maschio a rullare.

Nel primo caso si usano maschi di dimensioni corrispettive al campo di tolleranza relativo alla madrevite che si sta realizzando.

Nel secondo caso, invece, occorre ricordare come il materiale durante la rullatura, oltre alla deformazione plastica, subisca anche una quota parte elastica che viene, poi, recuperata una volta che, terminata l'operazione, vengono rimossi i carichi in gioco.

Per sopperire a questo fenomeno il maschio a rullare è, per tanto, realizzato con una tolleranza più alta rispetto a quella del maschio a tagliare.

Il filetto prodotto risulterà, sempre a seguito del ritorno elastico, più piccolo rispetto alla parte filettata del maschio a rullare e, una volta conclusa la rullatura, non sarà possibile riavvitare nuovamente a mano l'utensile nel filetto, operazione che, invece, è generalmente eseguibile senza problemi nel caso del maschio a tagliare.

Di conseguenza, è necessario creare una parte filettata del maschio a rullare più prossima alla soglia di tolleranza superiore della madrevite.

Per i filetti interni metrici ISO prodotti mediante maschiatura a rullare le tolleranze tipicamente adottate sono definite dalla norma DIN 13-50 che fornisce scostamenti limite e classi di tolleranze da utilizzare.

I campi di valori di tolleranza tipici sono:

- per il diametro medio: H6
- per il diametro del nocciolo: H7

Si nota come la tolleranza del diametro del nocciolo sia stata definita maggiore rispetto a quella del diametro medio di un grado di qualità.

Ciò deriva dalle considerazioni precedenti sul ritorno elastico che subisce il materiale dopo la deformazione.

Per tanto, in caso di filettature non specificate in DIN 13-50, è opportuno procedere in maniera analoga aumentando la tolleranza del diametro del nocciolo di un grado di qualità in funzione della tolleranza del diametro medio.

I fenomeni di ritorno elastico che si hanno in rullatura comportano che le dimensioni effettive del maschio siano diverse rispetto a quelle della filettatura che va a creare (bisogna ricordare, inoltre, come il profilo del filetto segua nel maschio a rullare, a differenza che in una vite, una spirale di forma poligonale e non cilindrica vista la presenza dei caratteristici lobi nel profilo attivo di pressione).

L'indicazione della classe di tolleranza del maschio a rullare non si riferisce per tanto alle sue dimensioni, ma a quelle della madrevite che va a creare.

Esistono maschi di dimensioni maggiorate rispetto alle classi di tolleranza contraddistinti dall'aggiunta della lettera X alla sigla indicante la classe di tolleranza (6HX, 6GX).

Questa maggiorazione, ampliando il campo di tolleranza, permette una compensazione dei fenomeni iniziali di usura del maschio garantendo una maggiore vita utile.

Questa accortezza risulta, inoltre, utile ogni qual volta i filetti prodotti saranno sottoposti ad un successivo trattamento di rivestimento, in quanto fornisce quello spessore aggiuntivo che sarà riempito, poi, dallo strato protettivo.

In particolar modo, tutti i morsetti realizzati nel processo sotto studio vengono lavorati con maschi M5×0.8 6GX questo perché i filetti realizzati devono essere conformi alle caratteristiche di una filettatura M5×0.8 6H dopo essere stati sottoposti alla zincatura in accordo allo standard di riferimento ISO 965-1.

PASSO [mm]	X [μ m]
0,20 ÷ 0,70	+15
0,75 ÷ 1,00	+20
1,25 ÷ 2,50	+25
>2,50	+30

Tabella XVII: Maggiorazioni delle dimensioni limite ammesse nelle classi di tolleranza 6HX e 6GX in relazione al passo del filetto.

4.3.2 Effetto del rivestimento sulle dimensioni del filetto

Quando le filettature interne o esterne non devono avere giochi nell'accoppiamento o scostamenti minimi dopo essere state rivestite è necessario, come sopra accennato, garantire una tolleranza nel filetto di partenza tale da evitare che il filetto dopo rivestimento ecceda rispetto alle dimensioni limite.

Noto lo spessore del rivestimento che si andrà a creare sulla superficie in questione, occorre per tanto valutare attentamente le variazioni dimensionali che questo apporta alla geometria del filetto.

Se, infatti, su una superficie cilindrica l'effetto del rivestimento è quello di variare il diametro di due volte lo spessore del rivestimento, su un filetto questa considerazione può essere applicata unicamente al diametro maggiore (nominale) e al diametro minore (di nocciolo).

Sul diametro medio la situazione è diversa, in quanto la superficie di deposizione non risulta perpendicolare al diametro stesso e lo spessore del rivestimento depositato risulterà, invece, perpendicolare al fianco inclinato.

La situazione nel caso di filettature Metriche ISO può essere schematizzata come seguente:

D_2' = diametro medio dopo il rivestimento

$$D_2' = D_2 \pm 2 \cdot 0,5a = D_2 \pm \frac{2t}{\sin 30^\circ}$$

a = variazione del diametro medio dovuta al rivestimento

t = spessore del rivestimento

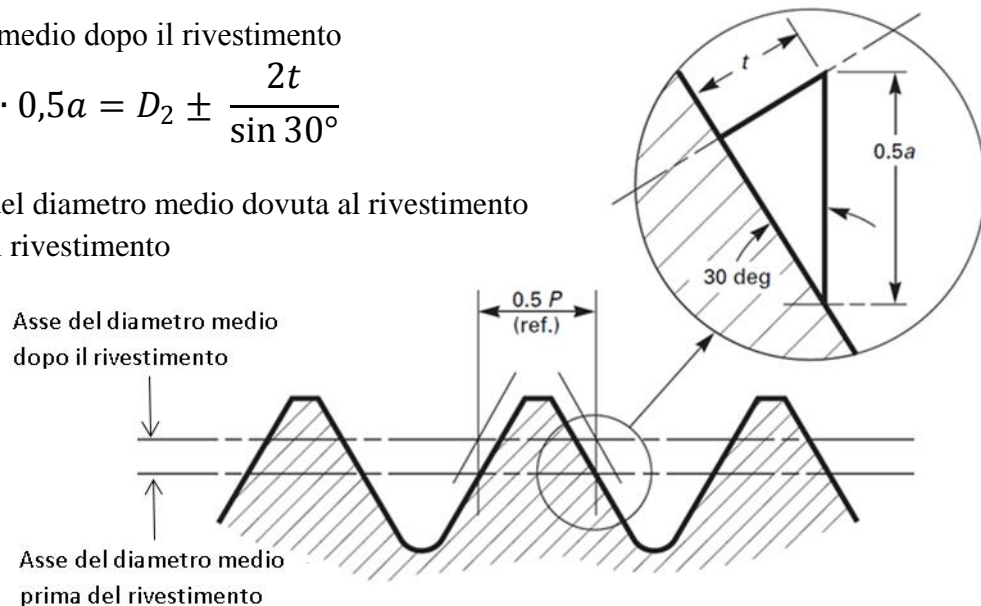


Fig. 4.7: Schematizzazione dell'effetto del rivestimento sulle dimensioni di una filettatura Metrica ISO.

Ne deriva che, per un filetto con angolo al fianco di 60° , l'effetto di un rivestimento uniforme è quello di cambiare il diametro medio di 4 volte lo spessore del rivestimento ($a = 4t$).

In particolar modo risulterà aumentato nel caso di filettature esterne ($+ \rightarrow D_2' > D_2$) e ridotto nelle filettature interne ($- \rightarrow D_2' < D_2$).

Tuttavia, la maggior parte dei rivestimenti non si distribuisce uniformemente sui filetti (soprattutto a causa della geometria concavo-convessa), con effetti più o meno marcati a seconda della tecnologia impiegata nell'applicazione del rivestimento.

Molti produttori hanno risolto il problema sviluppando (soprattutto empiricamente) delle geometrie opportune del filetto prima del rivestimento tali da permettere, per una dato processo di rivestimento, ottimi risultati geometrici e dimensionali che evitino successivi fenomeni di interferenza nella fase di assemblaggio vite-madrevite.

4.3.3 Controllo della conformità della filettatura tramite tampone filettato

Per la filettatura ISO Metrica, il sistema di controllo è definito dalla norma UNI 5870-71 (una norma simile è la DIN ISO 1502) con lo scopo di garantire l'intercambiabilità illimitata di pezzi con filettature di pari caratteristiche nominali.

I principi di base di questa tipologia di norme sono i seguenti:

1. il fabbricante non può fornire un pezzo avente un filetto con misura effettiva al di fuori dei limiti definiti dalle norme sia esso il diametro medio o il diametro medio di accoppiamento;
2. il cliente, analogamente, non può scartare un pezzo con un filetto con misura effettiva entro i limiti definiti.

La norma UNI 5870-71 prevede che il controllo della filettatura venga effettuato mediante l'uso di un calibro a tampone filettato PASSA/NON PASSA.

È possibile, tuttavia, utilizzare altri metodi di controllo, quali l'uso di opportuni strumenti di misura indicatori purché portino allo stesso risultato. Nel caso di dubbi, infatti, i calibri consigliati nella norma sono decisivi per il controllo della filettatura ed è assolutamente necessario affiancare al sistema di misura alternativo un controllo a campione con calibri filettati normalizzati.

Per altri sistemi di filettatura (p. es. filettature americane) vengono applicate, per la realizzazione dei calibri, altre norme.

La temperatura di riferimento per i calibri e per i pezzi nella misurazione è 20 °C. Se il controllo è effettuato ad una temperatura diversa, bisogna considerare i coefficienti di dilatazione termica sia del campione che del calibro.

Come si può vedere dalla figura fino al diametro di filetto 40 mm i lati PASSA e NON PASSA di un calibro filettato sono montati su un'unica impugnatura e sono denominati calibro a tampone PASSA/NON PASSA(TP/TNP).

Per dimensioni maggiori i due tamponi possono essere montati su due impugnature indipendenti (normalizzate nella DIN 2240-2).

Il lato PASSA del tampone (caratterizzato da una maggiore lunghezza del filetto e da un profilo di filetto pieno su tutta la lunghezza filettata) ha dimensioni normate secondo DIN 2281 e DIN 2282 e va a misurare vari aspetti della geometria della filettatura tra cui la misura minima del diametro medio della filettatura interna D_2 e il diametro esterno (diametro nominale D).

Permette, inoltre, di controllare la cosiddetta misura d'accoppiamento del filetto e la possibilità d'avvitamento stessa, in quanto è in grado di evidenziare la presenza di errori di forma, quali

insufficiente raccordo sul fondo del filetto, errori di rettilineità del fianco e della lunghezza dello stesso.

È in grado di valutare anche deviazioni sul passo di filettatura, variazioni dell'angolo di profilo e dell'angolo di elica, la non assialità e circolarità del filetto.

La filettatura può ritenersi conforme secondo il principio di verifica sostanziale di Taylor se risulta possibile avvitare manualmente senza sforzo (o considerevoli variazioni di coppia) il calibro a tampone filettato su tutta la profondità filettata del pezzo.

Per assicurare il controllo del passo, la lunghezza del calibro a tampone filettato non deve essere inferiore al 80% della lunghezza filettata.

Il lato NON PASSA del calibro a tampone filettato è marcato da un anello rosso ed è caratterizzato da dimensioni normate secondo DIN 2283 e DIN 2284.

Ha una lunghezza filettata minore, ma di almeno tre filetti, e un profilo del filetto dalla cresta ridotta.

Viene utilizzato per valutare se il diametro medio effettivo della filettatura interna del pezzo supera la misura massima prescritta, mentre non è in grado di controllare il diametro esterno.

In particolar modo questo tampone non deve poter essere avvitato manualmente, senza forzare, nella filettatura interna del pezzo per più di due giri da entrambi i lati della filettatura (se questa è passante).

In tal senso opera approssimativamente secondo il principio di Taylor.

Sia il lato PASSA che quello NON PASSA del tampone filettato non sono, tuttavia, in grado di controllare il diametro di nocciolo D_1 della filettatura interna che viene, invece, verificato con un calibro a tampone liscio PASSA/NON PASSA (TIP/TINP).

Anche questo dispositivo è caratterizzato da un lato PASSA, che deve poter essere inserito facilmente per tutta la lunghezza di filettatura, e da un lato NON PASSA (marchiato sempre da un anello rosso), che non deve poter essere inserito manualmente senza forzare nella filettatura interna del pezzo per più di un giro da entrambi i lati della filettatura (se questa è passante).

Un aspetto fondamentale di cui bisogna tenere conto nell'uso dei calibri filettati è che il loro impiego

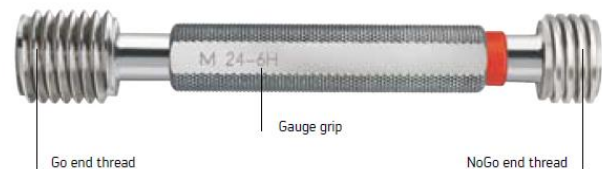


Fig. 4.8: Calibro a tampone filettato PASSA/NON PASSA.



Fig. 4.9: Calibro a tampone liscio PASSA/NON PASSA.

ripetuto li rende soggetti a fenomeni di usura tali da modificarne le dimensioni caratteristiche (e con esse le tolleranze misurate).

Ciò può far nascere controversie su misurazioni effettuate con calibri con diversi gradi di usura.

In tali casi sono da ritenere accettabili le filettature dei pezzi se i calibri con le quali sono state giudicate in tolleranza corrispondono alle dimensioni limite dei calibri.

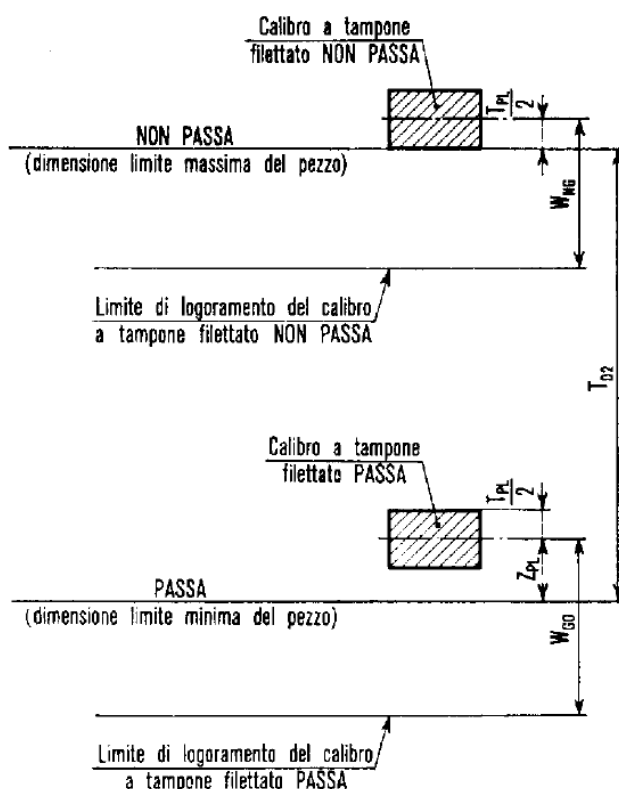
Solitamente, per evitare differenze tra i risultati rilevati nel reparto produttivo con quelli ottenuti successivamente dal reparto di collaudo, è consigliabile usare in produzione calibri PASSA nuovi o poco usati e NON PASSA leggermente usurati, mentre il reparto di collaudo deve essere dotato di calibri PASSA, il cui diametro medio si trovi entro la metà esterna della zona di logoramento ammesso (cioè più usurati), e di calibri NON PASSA nuovi.

Devono essere, inoltre, sottoposti a controlli periodici (proporzionali alla frequenza di utilizzo) per verificare che rispettino i valori di tolleranza previsti dalle norme.

In particolar modo il lato PASSA del calibro a tampone filettato che solitamente è il più usato, e quindi il più rapido nell'usurarsi, viene generalmente ricoperto con un rivestimento al cromo duro o TiN in modo da aumentare la vita utile dello strumento.

La conformità dimensionale del calibro filettato viene determinata nella modalità prevista dal Piano di Taratura e Verifica degli Strumenti e delle Apparecchiature interno all'azienda secondo le modalità previste dalla norma UNI 5870-71.

Tale norma determina le zone di tolleranza ammesse per i diametri medi ed esterni dei calibri filettati secondo il seguente schema:



Simboli:

T_{D2} = Tolleranza sul diametro medio della filettatura interna del pezzo.

T_{PL} = Tolleranza sul diametro medio dei calibri a tampone filettati PASSA E NON PASSA.

W_{NG} = Valore medio rappresentante il logoramento ammesso del calibro a tampone filettato NON PASSA.

W_{GO} = Valore medio rappresentante il logoramento ammesso del calibro a tampone filettato PASSA.

Z_{PL} = Distanza tra la mezzzeria della zona di tolleranza T_{PL} del calibro a tampone filettato PASSA ed il limite inferiore del diametro medio della filettatura del pezzo.

Fig. 4.10: Zone di tolleranza sul diametro medio dei calibri per filettature interne.

In particolar modo per la taratura dei tamponi filettati PASSA M5×0,8 6G sono previste dalla norma le seguenti dimensioni di tolleranza e logoramento ammesso:

filettatura (UNI 5542-65) [mm]			Tolleranza e logoramento del tampone (UNI 5870-71) [mm]		
D + EI	D ₂ + EI	T _{D2}	Z _{PL}	T _{PL}	W _{GO}
5,024	4,504	0,125	0,006	0,009	0,013
Diametro esterno del tampone [mm]					
Limite superiore	Limite inferiore	Limite di logoramento	Piano di controllo		
			True Quantity Value	Le _i	
5,039	5,021	5,018	5,03	0.009	
Diametro medio del tampone [mm]					
Limite superiore	Limite inferiore	Limite di logoramento	Piano di controllo		
			True Quantity Value	Le _i	
4,515	4,506	4,498	4,51	0,004 5	

Tabella XVIII: Dimensioni limite per un calibro a tampone filettato PASSA M5×0,8 6G.

Infatti per i calibri filettati per filettature interne valgono le seguenti formule:

- per il diametro esterno:

$$\text{dimensione nominale (TQV)} = D + EI + Z_{PL} \text{ con scostamento limite} = \pm T_{PL}$$

- per il diametro medio:

$$\text{dimensione nominale (TQV)} = D_2 + EI + Z_{PL} \text{ con scostamento limite} = \pm \frac{T_{PL}}{2}$$

in entrambi i casi la dimensione limite di logoramento è data da: TQV - W_{GO}

Il piano di taratura interno all'azienda prevede che la taratura iniziale dello strumento sia effettuata da un ente esterno in conformità con la norma specifica (dipendente dal tipo di filetto).

Di tale attività viene acquisito e archiviato il certificato di conformità emesso.

Le tarature successive vengono eseguite internamente con una certa frequenza temporale con lo scopo di tenere sotto controllo l'usura del calibro stesso nella configurazione PASSA (non è infatti generalmente previsto nei piani di controllo della conformità del prodotto la configurazione NON PASSA non essendo generalmente utilizzata nei piani di controllo qualità dei pezzi).

Tale attività di verifica consiste nell'eseguire almeno tre misure del diametro esterno del tampone usando un micrometro digitale e almeno tre misure del diametro medio usando un micrometro digitale con punta a capruggine. Tali valori ottenuti saranno contenuti all'interno di un dato range di cui verrà calcolato il valore medio.

Se tale valore si posiziona all'interno dello scostamento limite, il tampone è ritenuto conforme, mentre, al di sotto del valore limite inferiore, lo strumento viene annullato in quanto eccessivamente usurato. Valore limite, che non deve essere assolutamente superato, è quello di

logoramento, in quanto un calibro filettato di tali dimensioni porterebbe a considerare conformi pezzi che, in realtà, sono al di fuori delle specifiche tecniche dettate dalle norme.

Tutta l'attività di taratura è gestita a livello informatico, il che permette, tra l'altro, di monitorare l'andamento dell'usura del tampone nel tempo attraverso grafici come il seguente:

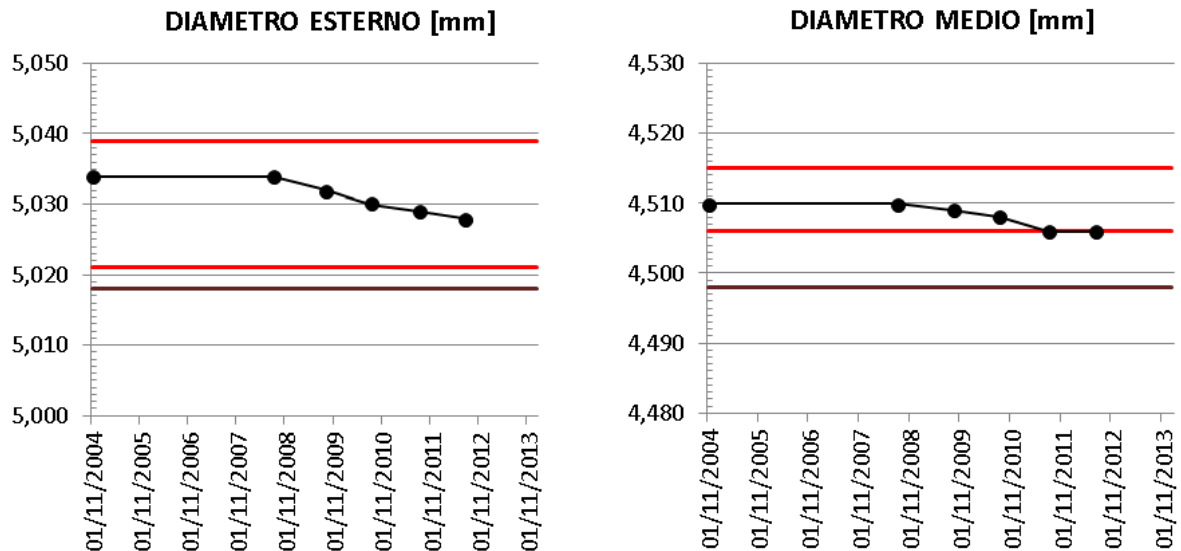


Fig. 4.11: Grafici relativi all'attività di taratura del calibro filettato PASSA M5(x0,8) 6G – cod. CFF1P2.023 usato nella selezione nel reparto produzione del morsetto.

In rosso sono riportati i limiti dimensionali superiori e inferiori mentre in rosso scuro è evidenziato il limite di logoramento.

Una metodologia di taratura alternativa spesso consigliata dai produttori di tamponi filettati sfrutta il cosiddetto metodo di controllo a tre fili.

Questo metodo permette di determinare il valore del diametro medio della filettatura e questo parametro da solo è in grado di fornire informazioni sull'ampia gamma dei difetti che possono affliggere una filettatura.

Questo processo di taratura consiste nel posizionare tre fili metallici di uguale diametro G (dipendente dalle dimensioni del passo P del filetto) all'interno del filetto, due da un lato e uno nel lato opposto come in figura.

La scelta del diametro dei fili da usare avviene tramite le seguenti formule:

- Diametro minimo del filo = $0,56 \cdot P$
- Diametro massimo del filo = $0,90 \cdot P$
- Diametro del filo per avere il contatto sulla linea del passo (Best Size Wire) $(D_2) = 0,57735 \cdot P$

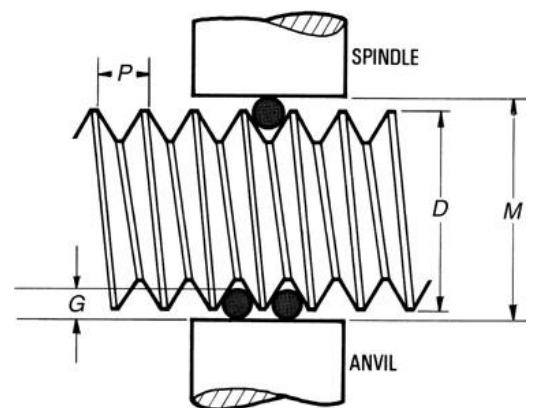


Fig. 4.12: Rappresentazione schematica del metodo di controllo a tre fili.

Viene quindi utilizzato un micrometro per misurare la distanza M tra i fili.

Acquisito il valore di M e noto il valore del passo di filettatura è possibile calcolare il diametro medio della filettatura con la seguente formula:

$$D_2 = M - \text{costante}$$

Dove la costante dipende dalle dimensioni del passo e dal diametro dei fili usati.

Nel caso specifico di una filettatura M5 (x0,8) la costante è pari a 1,13598 mm.

4.3.4 APPROFONDIMENTO SPERIMENTALE II: Controllo della conformità della filettatura mediante confronto diretto.

Il controllo di una filettatura mediante calibro a tampone filettato ha i vantaggi fondamentali di essere una prova di rapida esecuzione, che utilizza strumenti a basso costo al cui uso risulta estremamente facile l'addestramento degli operatori.

È per tanto una prova che si presta facilmente al controllo della produzione direttamente nel reparto produttivo.

Tale prova, tuttavia, non è in grado di misurare l'effettiva dimensione del filetto e non è nemmeno in grado di fornire informazioni su quale sia la causa che porta la filettatura ad uscire dal proprio campo di tolleranza.

La conoscenza della caratteristica geometrica del filetto non conforme è, invece, essenziale nell'attività di ricerca condotta, in quanto può essere sfruttata per ottenere informazioni sul meccanismo che porta a produrre la non conformità.

Solo, infatti, la conoscenza dello specifico meccanismo che porta a produrre filetti non conformi permette di apportare al processo delle azioni correttive o di miglioramento efficaci.

Paradossalmente, risulterebbe inutile una sperimentazione che punti unicamente a migliorare le condizioni tribologiche tra utensile e superficie lavorata al fine di ridurre l'usura dei maschi per aumentarne la vita utile, nel caso in cui la non conformità fosse generata da problemi legati non all'usura dell'utensile, bensì alla modalità di esecuzione della rullatura stessa o ad altre condizioni di contorno del processo.

Possibili allineamenti o bloccaggi non corretti dei pezzi durante la lavorazione, un cattivo sincronismo del moto roto-traslazionale della filettatrice, una insufficiente rigidità dell'attrezzatura, vibrazioni etc., sono tutte possibili sorgenti di non conformità quali errori sul passo, errori di rettilineità e/o coassialità del filetto rispetto al foro, errori sull'angolo di profilo o sull'angolo dell'elica.

Altri errori di forma del filetto potrebbero derivare dalla richiesta all'attrezzatura di sforzi o momenti torcenti eccessivi, dovuti all'uso di velocità di taglio troppo elevate, a condizioni

tribologiche sfavorevoli, quali insufficiente lubrificazione e grippaggio, o alla realizzazione di un processo deformativo eccessivamente gravoso per il materiale lavorato.

Tutti questi fenomeni possibili porterebbero, di conseguenza, a produrre pezzi con filettature di dimensioni non conformi rispetto alla tolleranza prevista anche nel caso in cui il maschio a rullare fosse in condizioni di usura ancora accettabili.

Fenomeni legati all'usura dei maschi portano invece a produrre pezzi solitamente non conformi in quanto di dimensioni (D , D_1 , D_2) minori rispetto a quanto previsti dalle norme.

Allo scopo di determinare quale sia l'effettiva caratteristica geometrica a fuoriuscire dal proprio campo di tolleranza si è realizzata una comparazione diretta tra il profilo del filetto ottenuto dal processo di rullatura e il profilo nominale previsto dalle norme.

Si sono per tanto prodotti dei provini in maniera del tutto analoga a quelli sottoposti all'analisi metallografica e alle prove di microindentazione, in modo da ottenere una superficie di osservazione che corrispondesse con esattezza alla sezione di filettatura in prossimità del diametro massimo (cioè nella quale il profilo del filetto sia perfettamente giacente sul piano).

Si sono analizzati campioni contenenti morsetti risultanti fuori tolleranza alla verifica con il calibro a tampone filettato PASSA e, come controprova, altri contenenti, invece, dei morsetti in tolleranza prodotti da maschi nuovi (pezzi prelevati nei primi 1000 pezzi prodotti).

I provini opportunamente lucidati (con le stesse modalità usate nella preparazione dei campioni sottoposti alla prova di durezza) sono stati, quindi, osservati usando uno STEREOSCOPIO NIKON SMZ800. Questo strumento permette l'osservazione macroscopica dei campioni ad ingrandimenti di 10×, 20×, 30×, 40×, 50×, 63× ed è interfacciato mediante una telecamera digitale NIKON DIGITAL SIGHT DS-Fi1 ad un software (NIS-Elements BR 2.30) che permette la misurazione delle caratteristiche geometriche di un campione (lunghezze, distanze, aree, angoli...) attraverso la conversione dei pixel dell'immagine acquisita dalla telecamera in dimensione geometrica (in mm, mm², gradi...).

Questa interfaccia (stereoscopio – telecamera - software) viene periodicamente tarata effettuando misurazioni su blocchetti di riscontro, cioè su campioni di riferimento contenenti dei reticoli di dimensione normata.

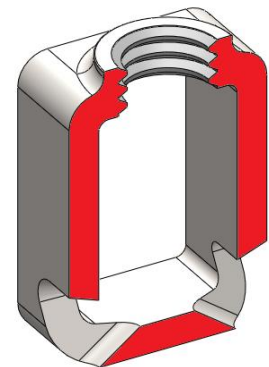


Fig. 4.13: Sezione del morsetto filettato con evidenziata la superficie corrispondente al diametro massimo utilizzata nell'esecuzione della comparazione dimensionale.

Per eseguire una misurazione dimensionale diretta delle caratteristiche geometriche di ogni singola filettatura si è deciso di operare come descritto in seguito.

Innanzitutto si sono acquisite immagini del profilo del morsetto assicurando la verticalità dell'asse del filetto usando come riferimento le pareti verticali del morsetto.

Le immagini sono state ottenute ad un ingrandimento di $10\times$ essendo l'unico in grado di ottenere in un'unica foto il filetto e le pareti del morsetto. Il software permette, poi, di ingrandire digitalmente l'immagine acquisita sfruttando la grande risoluzione con cui sono state acquisite le macrografie.

Per semplificare l'operazione di verifica dimensionale e geometrica del filetto, si è deciso di ricostruire sulla macrografia il profilo nominale definito dalla norma ISO 68-1 e i relativi campi di tolleranza, in modo tale da osservare facilmente come si posiziona il profilo reale del filetto rispetto alle dimensioni limite.

Per fare ciò si è assunto come riferimento l'asse di simmetria del morsetto, che risulta essere anche l'asse di simmetria della filettatura stessa.

Sfruttando tale retta di riferimento geometrico (funge da asse medio dei vari diametri caratteristici della filettatura) si sono riportate sull'immagine tutte le dimensioni fondamentali in grado di identificare il tipo di filettatura analizzata (vedi tabella XIV) e la relativa classe di tolleranza (vedi tabella XVI).

Per la valutazione del passo, misurato ortogonalmente ai vari diametri, si sono usati come riferimenti le valli dei filetti, essendo questi dei riferimenti certi nella geometria del filetto e non dipendenti dalla forma del fianco o dell'apice realizzato (in particolar modo del caratteristico artiglio). La posizione del fondo del filetto della madre vite è costante anche al variare della tolleranza adottata.

È stato quindi creato un reticolo formato da una famiglia di rette orizzontali equidistanti ($P/2 = 0,400$ mm) che intersecate alle rette verticali delimitanti l'altezza del triangolo ideale H hanno permesso di ricostruire sull'immagine il profilo ideale della filettatura interna M5 (retta spezzata di colore giallo).

Applicando le ulteriori relazioni geometriche stabilite dalla norma si sono ricreati, poi, i caratteristici smussi del profilo base (retta spezzata di colore rosso) sulla base della geometria descritta dalla figura 4.3, verificando che il modello ricreato rispettasse tutte le relazioni geometriche previste.

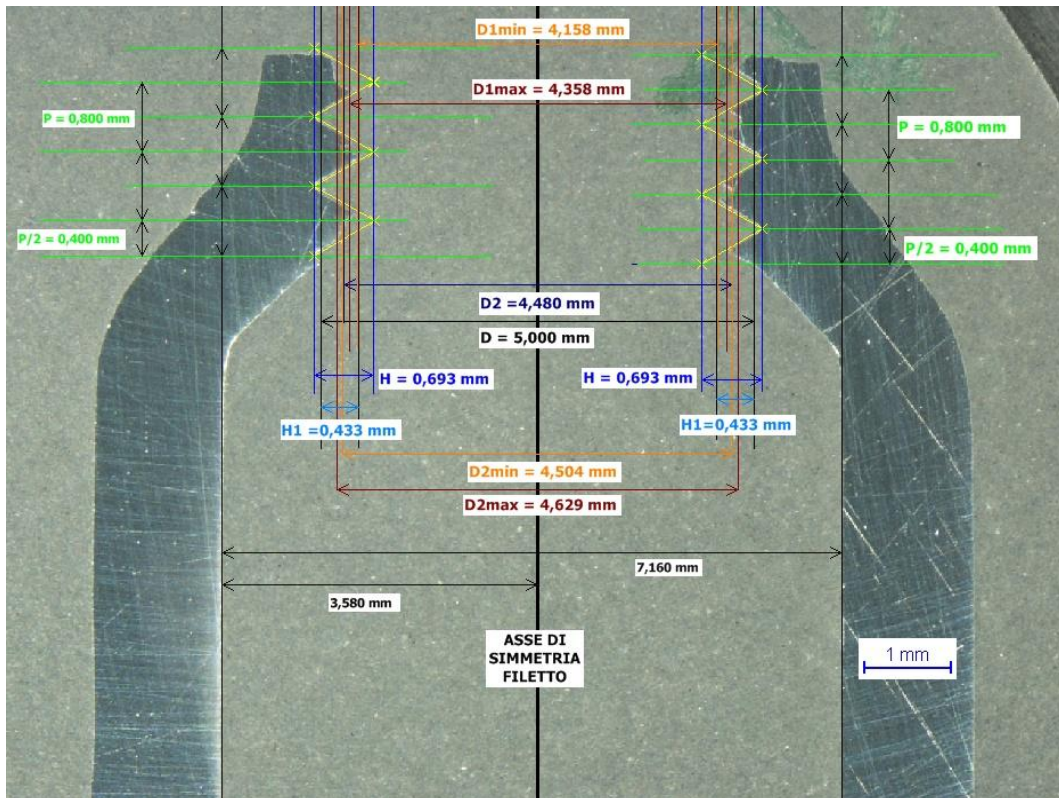


Fig. 4.14: Campione 03_a ad un ingrandimento di 10× con in evidenza l'asse di simmetria e le dimensioni principali date dalle norme ISO 68-1 e UNI 5542-65 per quanto riguarda una filettatura M5 × 0,8 – 6G. La retta spezzata di colore giallo rappresenta il profilo ideale della filettatura ISO Metrica M5.

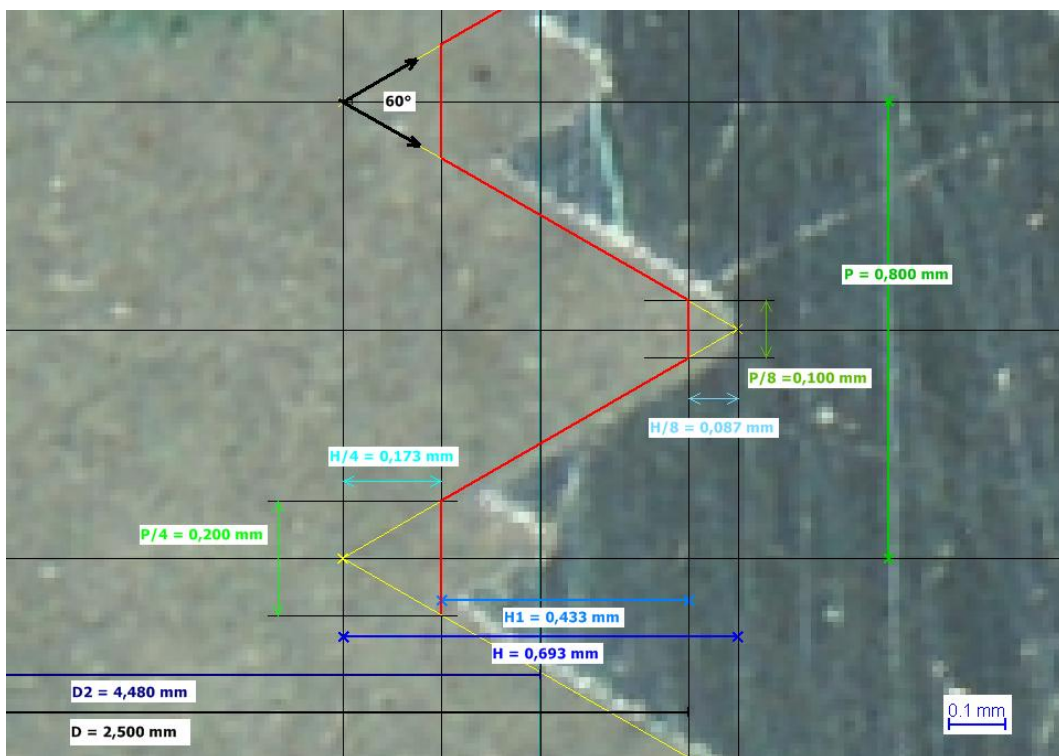


Fig. 4.15: Zoomata sulla costruzione del profilo base M5 del campione 03_a_dx (ingrandimento 10×). Si può notare come le misure effettuate rispettino i valori prescritti dalla norma ISO 68-1. La retta spezzata di colore rosso rappresenta il profilo base della filettatura ISO Metrica M5.

Sul profilo base si è, quindi, ricostruito il campo di tolleranza $M5 \times 0,8 - 6G$ come previsto dalla norma UNI 5542-65.

NOME	SIMBOLO	EQUAZIONE	M5 X 0,80 - 6G
DIAMETRO NOMINALE	D	D	5
PASSO	P	P	0,8
DIAMETRO MEDIO DELLA MADREVITE	D ₂	$D_2 = D - 0,64952 P$	4,480
DIAMETRO DI NOCCIOLO DELLA MADREVITE	D ₁	$D_1 = D - 1,08254 P$	4,134
SCOSTAMENTO FONDAMENTALE	EI	EI	0,024
TOLLERANZA SUL DIAMETRO	T	T	0
TOLLERANZA SUL DIAMETRO MEDIO DELLA MADREVITE	T _{D2}	T _{D2}	0,125
TOLLERANZA SUL DIAMETRO DI NOCCIOLO DELLA MADREVITE	T _{D1}	T _{D1}	0,2
DEVIAZIONE LIMITE (D ₂)	ES _{D2}	$ES_{D2} = EI + T_{D2}$	0,149
DEVIAZIONE LIMITE (D ₁)	ES _{D1}	$ES_{D1} = EI + T_{D1}$	0,224
DIAMETRO NOMINALE	D _{min}	D _{min}	5
DIAMETRO MEDIO DELLA MADREVITE minimo	D _{2min}	$D_{2min} = D_2 + EI$	4,504
DIAMETRO MEDIO DELLA MADREVITE massimo	D _{2max}	$D_{2max} = D_2 + ES_{D2}$	4,629
DIAMETRO DI NOCCIOLO DELLA MADREVITE minimo	D _{1min}	$D_{1min} = D_1 + EI$	4,158
DIAMETRO DI NOCCIOLO DELLA MADREVITE massimo	D _{1max}	$D_{1max} = D_1 + ES_{D1}$	4,358

Tabella XIX: Calcolo delle dimensioni limite previste dalla norma UNI 5542-65 per la filettatura $M5 \times 0,8 - 6G$.

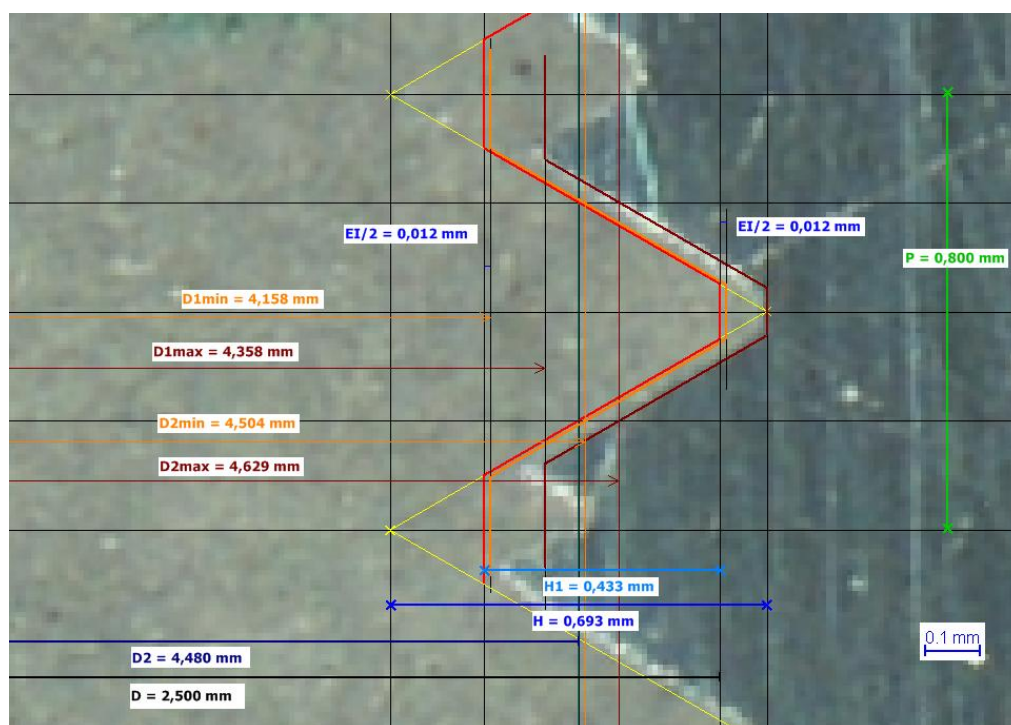


Fig. 4.16: Campione 03_a_dx (ingrandimento 10×) con in evidenza la costruzione del campo di tolleranza 6G per una filettatura M5. La retta spezzata in colore arancione rappresenta il limite inferiore del campo di tolleranza, quella in rosso scuro il limite superiore.

La norma UNI 5542-65 afferma che una filettatura è conforme quando il suo profilo si sviluppa all'interno della fascia delimitata dalle dimensioni limite del campo di tolleranza relativo.

Per maggiore chiarezza il campo di tolleranza M5 × 0,8 – 6G è evidenziato in colore giallo nell'immagine seguente:

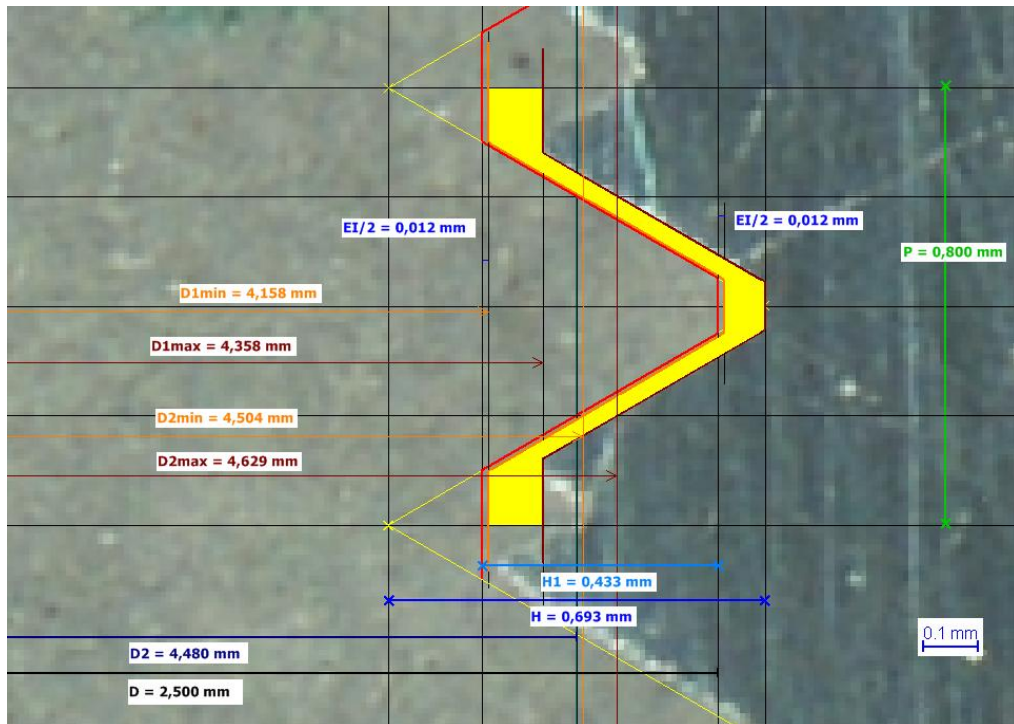


Fig. 4.17: Campione 03_a_dx (10×) con in evidenza la fascia dimensionale di tolleranza 6G per una filettatura M5 all'interno della quale deve ricadere il profilo di una filettatura conforme.

Per ricostruire la fascia di tolleranza si è usato il profilo base della filettatura M5 come riferimento geometrico come previsto dalle norme.

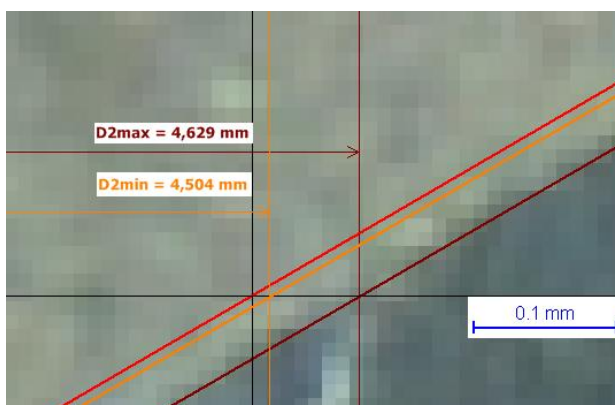
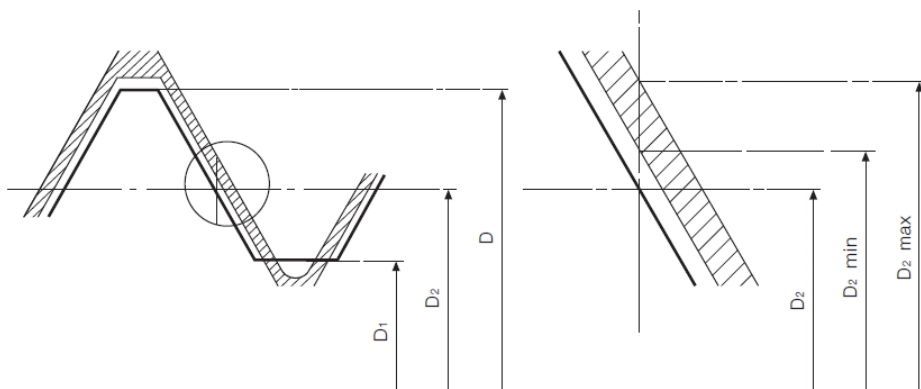


Fig. 4.18: Schematizzazione e costruzione della fascia di tolleranza sul fianco del filetto in corrispondenza del diametro medio.

Il modello geometrico costruito è stato inizialmente applicato a campioni contenenti filettature conformi alla verifica con il calibro filettato PASSA/NON PASSA per verificare la coerenza dei risultati ottenuti con i due diversi metodi.

Dall'immagine seguente si può notare come il profilo della filettatura in tolleranza si sviluppi internamente al relativo campo di tolleranza e un risultato analogo si è ottenuto dall'analisi degli altri campioni contenenti filettature conformi.

Ciò dimostra la validità del metodo sviluppato per eseguire una valutazione diretta delle caratteristiche geometriche di una madrevite, in quanto, fornisce risultati del tutto coerenti a quelli derivanti dalla verifica diretta mediante tampone.

Il metodo rispetta, inoltre, le condizioni previste dalla norma UNI 5870-71 per il controllo della conformità di una filettatura ISO metrica.



Fig. 4.19: Campione 03_a_sx (10×) con profilo di filettatura $M5 \times 0,8 - 6G$ in tolleranza. Il profilo del filetto ricade all'interno della fascia di tolleranza.

Ulteriore conferma della validità del metodo sviluppato deriva dall'esame di campioni contenenti filettature non conformi al controllo mediante calibro filettato.

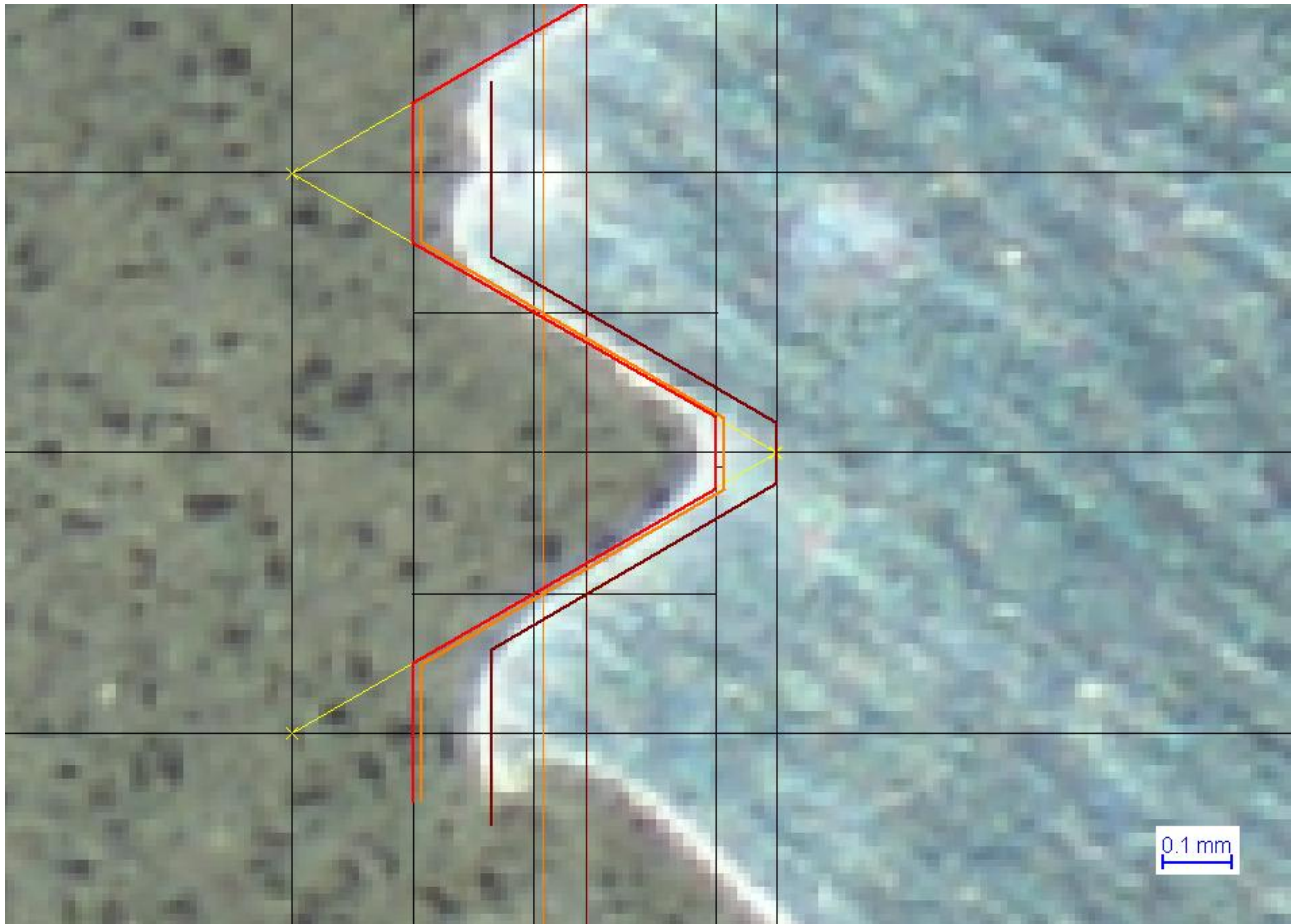


Fig. 4.20: Campione 02_a_dx (10×). Si nota come il profilo del filetto si sviluppi fuori della fascia tolleranza soprattutto in prossimità del fondo di filetto.

In tali campioni si nota come il profilo del filetto tenda a svilupparsi al di sotto dei limiti minimi ammessi dalla norma (rette di colore arancione) e nei casi più evidenti sfiori addirittura al di fuori del profilo base stesso della filettatura (rette di colore rosso).

In particolar modo, la regione che nei vari campioni risulta non conforme alle specifiche è il fondo del filetto, cioè la zona che viene creata dalla pressione esercitata dal profilo di filettatura attivo presente sui maschi a rullare.

Non si sono, invece, rilevati errori legati a scostamenti sul passo o alla forma generale del filetto quali ad esempio scostamenti sull'angolo del fianco.

La non conformità evidenziata dall'osservazione diretta dei filetti fuori tolleranza risulta, quindi, essere del tutto compatibile e coerente rispetto ai fenomeni di usura riscontrati sui lobi dei maschi a rullare.

È verosimile, infatti, che la riduzione dimensionale che l'usura causa sugli apici del profilo poligonale di un maschio a rullare renda i lobi dell'utensile incapaci di imprimere la superficie del preforo sufficientemente in profondità per ricreare il corretto profilo di filettatura.

Queste considerazioni avvalorano l'ipotesi per cui un miglioramento nella produttività del processo, inteso come aumento della durata degli utensili, si possa ottenere ricercando sul mercato utensili a rullare maggiormente performanti per quanto riguarda la resistenza ad usura e migliorando le condizioni tribologiche a cui avviene il processo di deformazione.

Si può, allo stesso tempo, escludere che la sopraggiunta non conformità della filettatura prodotta sia imputabile a cause non strettamente connesse ai fenomeni di usura e danneggiamento degli utensili.

PARTE SPERIMENTALE: Studio dell'usura dei maschi a rullare

5.1 Studio e definizione delle condizioni standard del processo produttivo

La prima fase dell'attività di tesi ha riguardato la definizione e descrizione dello stato dell'arte del processo di filettatura realizzato, in modo tale da individuarne le caratteristiche tipiche e poter pianificare eventuali azioni correttive o di miglioramento volte ad incrementare l'efficienza produttiva.

A tal fine è risultata fondamentale la collaborazione con il tecnologo del reparto e con gli operatori addetti all'impianto 908-02, la cui intervista ha permesso di evidenziare soprattutto quegli aspetti che avrebbero potuto compromettere la qualità della successiva campagna dati.

Si sono, quindi, eseguite delle prove preliminari mantenendo inalterato il processo in modo tale da:

- identificare problemi o particolarità del processo;
- stabilire un valore di efficienza produttiva di partenza che potesse fornire un valore di confronto con i risultati ottenuti in seguito all'applicazione delle modifiche;
- mettere a punto il sistema di raccolta dati e di misurazione in modo da renderlo oggettivo e ripetibile;
- ottenere informazioni preliminari sui fenomeni che si instaurano nel sistema e che portano l'utensile a produrre pezzi non conformi;

5.1.1 Modalità di raccolta ed analisi dei dati

5.1.1.1 Determinazione della durata degli utensili

Lo scopo principale dell'attività di tesi svolta presso Mevis S.p.A., come già descritto, è stata l'aumento dell'efficienza del processo produttivo, intesa come aumento del numero totale di morsetti filettati dai maschi a rullare in uso alle filettatrici prima di riscontrare nel controllo dimensionale filettature non conformi al calibro a tampone filettato PASSA M5x0,8 - 6G.

Vista l'elevata produttività dell'impianto è stato fondamentale determinare un metodo di rilevamento del numero di pezzi prodotti dai maschi nel corso della loro vita utile.

A tale scopo si è deciso di sfruttare il sistema di controllo elettronico Brankamp della pressa di formatura essendo questo dotata di vari slot programmabili di conteggio dei colpi pressa.

Il conteggio avviene in base al segnale inviato al dispositivo da sensori posizionati sulla pressa stessa.

Si è deciso per tanto di dedicare il contatore numero 5 (prima inutilizzato e rinominato per l'occasione CONTATORE MASCHI) al conteggio dei colpi pressa intercorsi tra un cambio utensili e il successivo.

In aggiunta a ciò, l'uso di tale contatore ha avuto l'ulteriore vantaggio di poter pianificare degli intervalli di lavorazione (della durata pari ad un numero di pezzi programmabile) al termine dei quali l'impianto si ferma in automatico permettendo la sostituzione degli utensili.

Ciò ha permesso di analizzare i fenomeni di usura sui maschi a rullare non solamente a fine vita, ma, anche, ad intervalli intermedi predefiniti, permettendo l'ottenimento dei modelli che saranno in seguito presentati.

Unica attenzione da prestare dall'uso di tale contatore deriva dal fatto che esso conta le battute eseguite dalla pressa e, quindi, solo indirettamente i pezzi prodotti da un singolo maschio secondo le seguenti relazioni:

$$\text{numero battute contatore} = N$$

$$\text{numero totale pezzi prodotti} = 2N$$

$$\text{numero pezzi filettati da un singolo maschio a rullare} = N/3$$

Queste relazioni derivano dalla conformazione stessa dell'impianto produttivo: come descritto ad ogni battuta lo stampo esegue una lavorazione parallela sui due lati della strisciata, quindi di conseguenza ad ogni battuta della pressa dall'ultima stazione escono 2 morsetti formati ancora uniti al nastro guida.

Essendo i morsetti filettati da sei unità di maschiatura che operano in contemporanea è chiaro che sono necessarie tre battute della pressa per rifornire le filettatrici di 6 morsetti da lavorare.

Di conseguenza pure le velocità di produzione sono bilanciate in modo tale da avere una portata costante di materiale nelle varie stazioni del processo integrato.

Per esempio, se la velocità della pressa è impostata a 180 colpi/minuto, ogni singola filettatrice lavorerà ad una velocità di 60 filetti/minuto come la pressa di stacco finale che eseguirà 60 battute al minuto, per una produttività totale di 360 pz/min.

L'impianto prevede, tuttavia, la presenza di due polmoni (il primo tra pressa e filettatrici e il secondo tra filettatrici e stacco) realizzati mediante una blanda curvatura della strisciata in modo da permettere un certo gioco nella produttività istantanea delle varie stazioni. Questo evita eccessive tensioni sulla strisciata che porterebbero a errori sul passo o cattivi allineamenti.

L'errore stimabile nel conteggio dei pezzi filettati con il metodo appena descritto si aggira nel peggiore dei casi attorno alla decina di pezzi.

Nell'impianto, come abbiamo visto, lavorano contemporaneamente 6 maschi a rullare, ciò permette di avere una buona ripetitività statistica nelle prove avendo 6 utensili che lavorano nel corso della loro intera vita nelle medesime condizioni.

I maschi vengono, inoltre, numerati realizzando un'incisione sul piano di attacco del codolo di maggiore dimensione (il cosiddetto dente di trascinamento).

La numerazione permette di riconoscere il singolo utensile e di abbinarlo ad una data filettatrice.

Ciò rende possibile, anche in caso di misurazioni intermedie, il riposizionamento dell'utensile su una data unità di maschiatura e in tal modo si garantisce la costanza dei parametri di lavorazione per un dato maschio analizzato essendo possibili leggere variazioni di azzeramento, velocità e corsa da filettatrice a filettatrice.

L'incisione consente, inoltre, di riconoscere con facilità le singole facce del profilo poligonale del maschio a rullare (e di conseguenza i lobi compresi tra 2 facce adiacenti) permettendone un'identificazione inequivocabile nelle successive misurazioni ed osservazioni.

Una volta che al controllo periodico si trovino delle filettature che non superano il controllo al tampone filettato, la combinazione di numerazione dei maschi e sequenza di filettatura permette, dall'analisi della strisciata in uscita dalle filettatrici, di capire quali effettivamente tra i sei maschi producano filetti ancora conformi e quali non.

In particolar modo ad ogni cambio maschi gli operatori sono stati istruiti nel prelevare e conservare una strisciata contenente 19 morsetti a partire dall'ultimo non filettato (compreso).

Si è deciso di prelevare uno spezzone siffatto in modo tale da avere tre campioni filettati per ogni singola filettatrice, il che garantisce una buona ripetitività statistica e un numero sufficiente di campioni per eventuali analisi successive.

Tutte le strisciate raccolte sono state, quindi, opportunamente identificate ed archiviate.

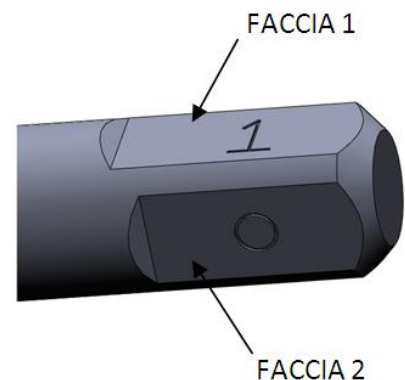
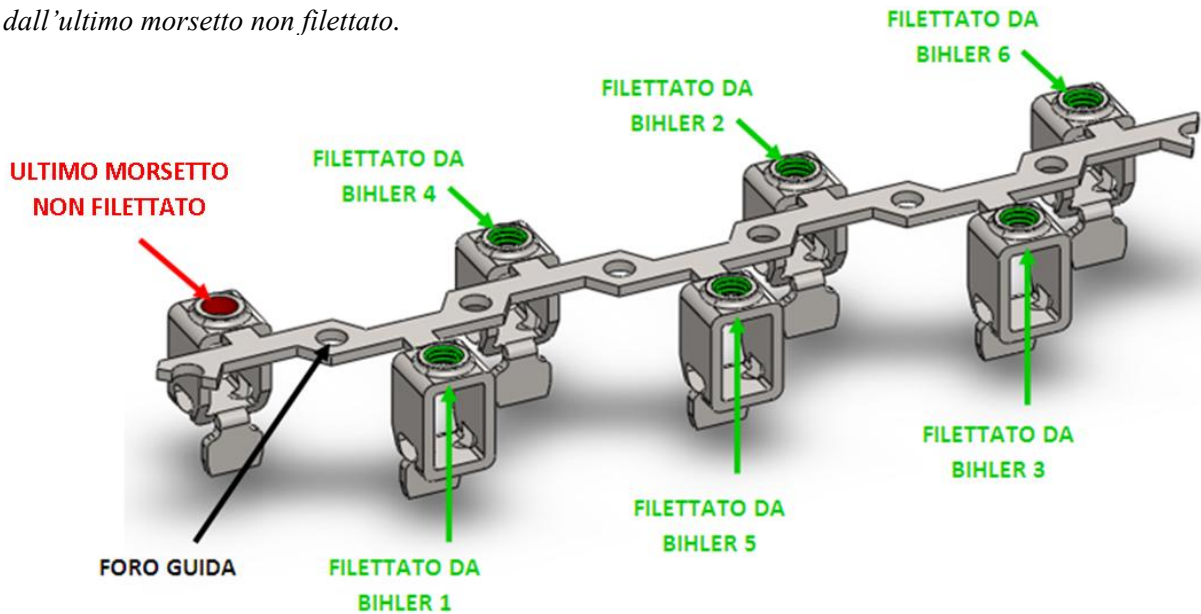


Fig. 5.1: Schematizzazione della modalità di identificazione dei maschi e dell'orientamento delle facce.

Fig. 5.2: Schematizzazione della modalità di riconoscimento dei filetti prodotti a partire dall'ultimo morsetto non filettato.



Con tale metodo è stato possibile definire di volta in volta quale/i tra i vari maschi avessero determinato la sostituzione dell'intero gruppo.

L'analisi statistica della posizione dei maschi risultati non conformi al cambio maschi ha dimostrato come tutte le filettatrici lavorassero omogeneamente.

Non si sono manifestate, infatti, particolari predisposizioni da parte di una data filettatrice nel portare a fine vita un utensile prima delle altre.

Questo fenomeno avrebbe potuto compromettere la bontà della raccolta dati in quanto se presente, sarebbe stato sintomo di malfunzionamenti (quali eccessive usure di componenti meccaniche come il sistema patrona-madrevite, insufficiente rigidità del sistema, cattivo centraggio) di quella data unità di maschiatura.

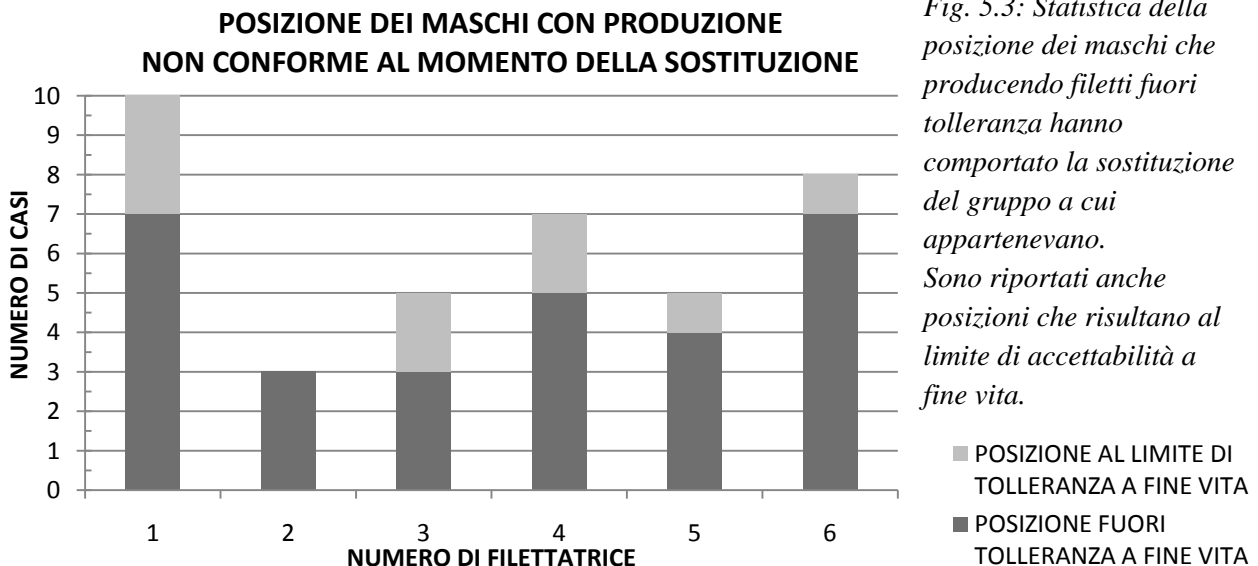


Fig. 5.3: Statistica della posizione dei maschi che producendo filetti fuori tolleranza hanno comportato la sostituzione del gruppo a cui appartenevano. Sono riportati anche posizioni che risultano al limite di accettabilità a fine vita.

Per quanto riguarda la determinazione del momento in cui considerare un utensile a fine vita (e di conseguenza il relativo numero di pezzi prodotti) si è deciso di attenersi alle predisposizioni dettate dalla produzione.

Seguendo la logica del caso peggiore si è adottato come valore di fine vita di un dato gruppo il numero di pezzi in cui si è rilevata per la prima volta una non conformità e si è fermato, di conseguenza, l'impianto per eseguire la sostituzione dell'intero gruppo di utensili.

Com'è già stato descritto, infatti, nell'ottica di realizzare una manutenzione preventiva e mantenere elevata l'efficienza dell'impianto, il cambio maschi avviene nel corso di un unico fermo macchina e il valore di fine vita che si ricava corrisponde, in realtà, alla durata dell'utensile che per primo nel gruppo ha iniziato a produrre filettature non conformi alla verifica con il calibro filettato PASSA.

5.1.1.2 Analisi dei fenomeni di usura

Come già accennato il lavoro di tesi non ha voluto soffermarsi unicamente sulla valutazione degli incrementi o decrementi in termini di durata degli utensili derivanti dalle modifiche apportate al sistema.

Volontà del lavoro è stata, infatti, quella di realizzare un modello che permettesse anche di descrivere i fenomeni di usura e che aspirasse, addirittura, a prevedere il comportamento e la risposta del sistema sulla base delle modifiche di volta in volta apportate.

A tal fine è risultato fondamentale definire dei parametri di riferimento da porre alla base di questo modello.

Si è proceduto pertanto ad un'osservazione preliminare allo stereoscopio Nikon SMZ800 di maschi a rullare a fine vita valutando le modalità in cui si manifestassero i fenomeni di usura.

Si sono riscontrate le seguenti caratteristiche:

- l'usura si manifesta principalmente sull'apice del filetto del maschio a rullare mentre il fondo del filetto a fine vita non manifesta particolari differenze rispetto ad un utensile nuovo;
- i fenomeni di usura rispecchiano il profilo poligonale tipico dei maschi a rullare, risultando molto gravi in corrispondenza dei lobi (angoli arrotondati che risentono delle sollecitazioni maggiori), mentre sono attenuati sui lati del profilo poligonale che compone l'elica;
- i fenomeni di usura presentano un andamento di gravità crescente lungo i filetti di imbocco con gravità massima all'inizio del tratto cilindrico e, quindi, un andamento

decescente fino all'ultimo filetto coinvolto nella lavorazione (che dipende dalla profondità di corsa impostata);

In particolar modo, si è notato come i fenomeni di usura si manifestassero attraverso due aspetti fondamentali:

- asportazione del rivestimento in corrispondenza dell'apice del lobo.
- variazione nella colorazione del rivestimento in corrispondenza dei lobi.

Si è deciso per tanto deciso di sfruttare questi due fenomeni come variabili in grado di descrivere l'andamento dell'usura degli utensili rispetto ai pezzi prodotti mediante la messa a punto di un sistema di analisi quantitativa, nel primo caso, e qualitativa nel secondo.

5.1.1.3 Valutazione dell'area di asportazione del rivestimento

L'osservazione degli utensili allo stereoscopio ha evidenziato come quest'ultimi manifestino negli stadi finali della loro vita utile dei notevoli fenomeni di asportazione del rivestimento con conseguente comparsa di regioni (soprattutto all'apice dei lobi) in cui il rivestimento lascia affiorare l'acciaio rapido sottostante, il quale subisce a sua volta diversi fenomeni di danneggiamento.

Sulla base di quanto previsto da alcuni test di usura (ad esempio il Brugger Test da norma DIN 51347) e sull'esempio di studi precedenti ritrovati in letteratura, si è deciso di usare come parametro di misura dei fenomeni di usura l'area di asportazione del rivestimento su ogni singolo lobo del profilo poligonale del maschio a rullare.

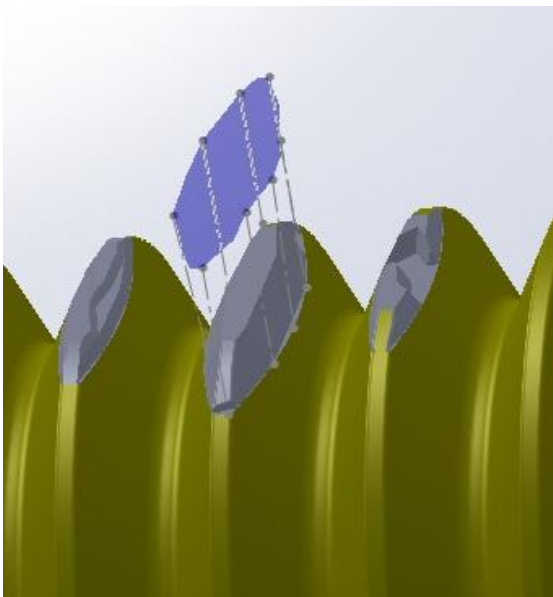


Fig. 5.4: Proiezione dell'area di asportazione del rivestimento su un piano.

In particolar modo, vista la complessità geometrica della superficie interessata dai fenomeni di asportazione e le modalità di misura, la superficie effettivamente misurata è stata quella della proiezione dell'area di usura sul piano di messa a fuoco (A [mm^2]) dello stereoscopio Nikon SMZ800.

Le misurazioni sono state effettuate sfruttando la combinazione stereoscopio – telecamera - software precedentemente descritta, e un supporto con scanalatura a V che ha permesso di posizionare agevolmente gli utensili con i vari lobi parallelamente al piano di misura.

Tutte le misurazioni sono state effettuate usando ingrandimenti dello stereoscopio pari a $30\times$, facendo coincidere il piano focale con il piano contenente l'apice dei lobi del filetto.

La valutazione di A [mm^2] è stata effettuata sfruttando un'applicazione del software NIS-Elements BR 2.30 che permette di quantificare l'estensione delle superfici ricorrendo alla conversione tra il numero di pixel dell'immagine acquisita dalla telecamera calibrata e le dimensioni effettive dell'oggetto da cui è stata ricavata.

Si è deciso di impostare la sensibilità di tale strumento a $0,01 \text{ mm}^2$, risultando questo valore essere il giusto compromesso tra la risoluzione richiesta all'analisi e l'incapacità dell'attrezzatura di discernere con precisione particolari di dimensione inferiore.

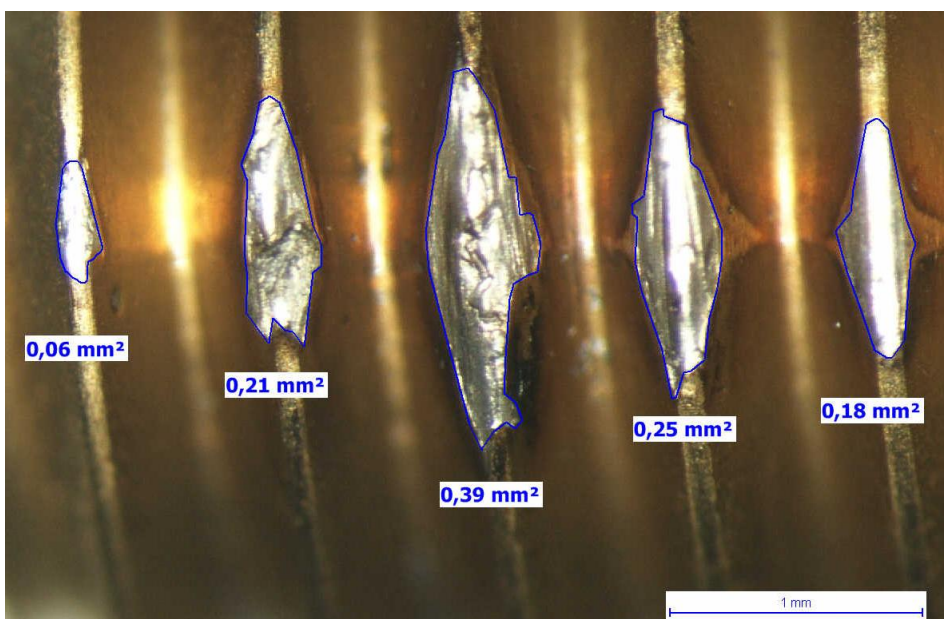


Fig. 5.5: Modalità di misurazione dell'area della proiezione dell'asportazione del rivestimento sul piano focale.

Campione A(1)1_L3-4, ingrandimento $30\times$, 95000 pezzi prodotti.

L'ingrandimento usato risulta essere il giusto compromesso in quanto permette la misurazione accurata sia di aree estremamente limitate ($\approx 0,01 \text{ mm}^2$) sia estese.

5.1.1.4 Modello per la valutazione della velocità di usura

I dati ottenuti dalla misurazione dell'area di asportazione del rivestimento sui vari lobi, oltre a permettere di ottenere l'andamento dei fenomeni di danneggiamento lungo l'elica del profilo poligonale, realizzando quelli che saranno denominati in seguito "profili di asportazione del rivestimento", hanno permesso di sviluppare un modello in grado di descrivere qualitativamente la velocità di usura manifestata dai vari utensili. Ciò ha permesso il confronto diretto tra gruppi di utensili diversi, sia per quanto riguarda le caratteristiche intrinseche degli stessi sia quelle del sistema tribologico in cui hanno lavorato.

La misurazione dell'estensione delle aree di usura sui lobi di un dato maschio a rullare effettuate ad intervalli predefiniti di pezzi prodotti ha permesso di ottenere grafici come il seguente:

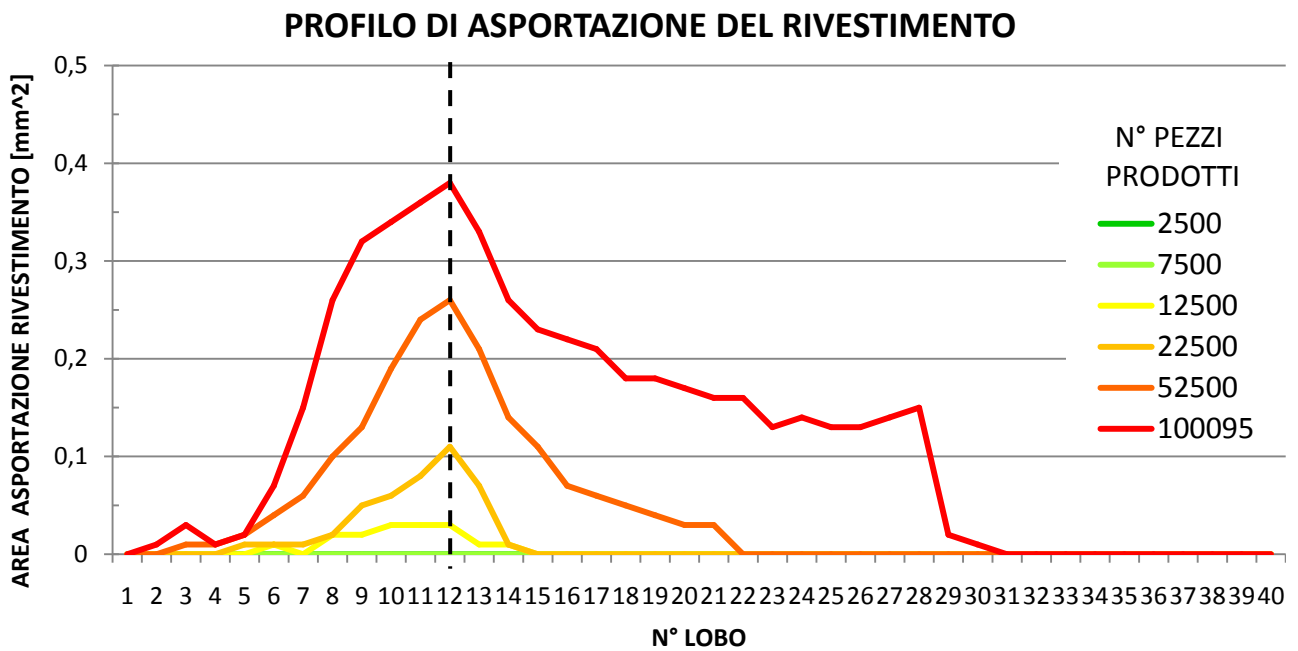


Fig. 5.6: Evoluzione tipica del profilo di usura manifestata dai maschi a rullare all'aumentare del numero di pezzi prodotti (Campione A9).

A partire da questo grafico si può identificare per ogni singolo maschio a rullare il lobo che verrà nel proseguo del lavoro denominato “**lobo critico**” cioè quella scanalatura di pressione sul profilo poligonale dell'utensile che a fine vita manifesta la massima area di asportazione del rivestimento, e, verosimilmente, il danneggiamento maggiore.

I valori di A [mm^2] ottenuti sul lobo critico nei diversi intervalli di misurazione permettono di ottenere un nuovo grafico in cui esprimere la crescita di A [mm^2] all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

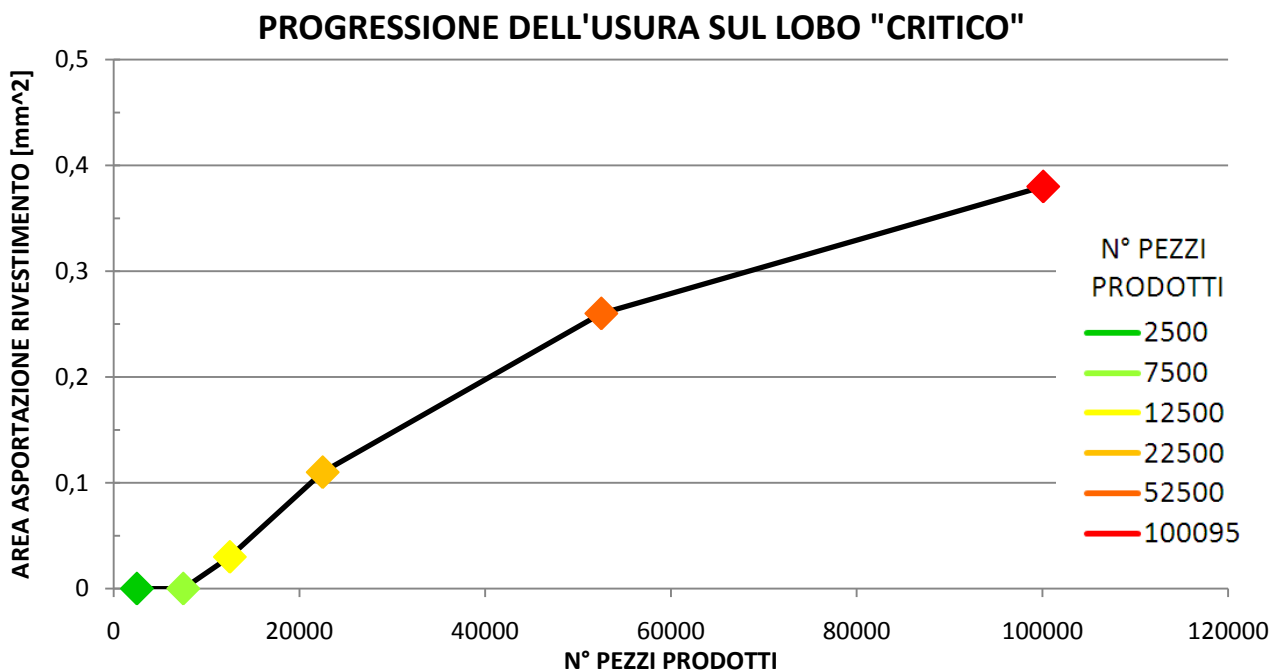


Fig. 5.7: Propagazione dell'usura sul lobo critico all'aumentare del numero di pezzi prodotti (Campione A9).

Si ottiene un grafico caratteristico che sarà ampiamente descritto in seguito.

Il confronto di tali curve ottenute per utensili diversi permettono una rapida comparazione della velocità con cui si manifestano i fenomeni di usura al variare delle diverse variabili e può essere usato come base per lo sviluppo di un modello predittivo sul comportamento dei diversi utensili sperimentati.

5.1.1.5 Analisi qualitativa dei fenomeni tribo-ossidativi

Un secondo aspetto fondamentale con cui si manifestano i fenomeni di usura sui maschi a rullare è la comparsa di aloni di colorazione differente rispetto al tipico colore giallo oro del rivestimento TiN. Questi fenomeni si manifestano sempre in corrispondenza dell'apice dei lobi, cioè di quelle regioni in cui si sviluppano le pressioni di contatto maggiori.

In particolar modo questi fenomeni cromatici si estendono a partire dall'apice del filetto lungo i fianchi fino a raggiungere nei casi più rilevanti il fondo del filetto.

Ciò ha portato ad ipotizzare la presenza di reazioni di tipo ossidativo causate da un possibile innalzamento locale della temperatura nel corso della lavorazione.

Ricerche bibliografiche hanno permesso di trovare una conferma a tale ipotesi, in particolar modo, nel articolo "*Effect of temperature and sliding velocity on TiN coating wear*" pubblicato da S.Wilson e A.T. Alpas nel 1999.

Utilizzando una prova del tipo "pin on disk" in una configurazione formata da un disco in acciaio inossidabile austenitico rivestito con uno strato sottile di TiN e un perno in acciaio rapido essi hanno valutato l'effetto che comportava la variazione di temperatura e di velocità di strisciamento sul sistema tribologico.

In particolar modo, tra i vari risultati riportati da questo studio, quello più interessante al caso specifico è la descrizione dei fenomeni che conducono alla variazione di colorazione del rivestimento TiN.

Wilson e Alpas nella loro sperimentazione individuano sul disco ricoperto in TiN al variare delle condizioni di conduzione della prova tre diversi regimi di usura caratterizzati dal manifestarsi sotto forma di tre particolari morfologie tribo-ossidative del tutto simili a quelle individuate sui lobi dei maschi a rullare.

APPROFONDIMENTO: PIN ON DISK TEST

(prova perno contro disco secondo norma ASTM G99-95).

È una prova spesso utilizzata per studiare l'usura per strisciamento dei materiali e, quindi, i meccanismi di usura adesiva e tribossidativa.

La configurazione di prova, come dice il nome stesso, è costituita da un perno a forma cilindrica (diametro tipico 5-6 mm) che viene pressato contro un disco in rotazione.

In prove lubrificate (con basso coefficiente d'attrito) o con materiali ad elevata durezza (deformazione plastica trascurabile delle zone di

contatto) è fondamentale che gli spigoli del perno a contatto con il disco siano smussati per evitare effetti di concentrazione degli sforzi.

L'apparato è in grado di misurare l'andamento dell'usura in continuo grazie ad un trasduttore che misura la variazione dell'altezza del perno. Se si genera anche un'usura non trascurabile del disco questa viene misurata a fine prova determinando l'andamento del profilo di usura con un profilometro.

Durante la prova è possibile ricavare indirettamente l'andamento del coefficiente d'attrito e misurare il calore sviluppato dal processo mediante la misura della temperatura di contatto con una o due termocoppie inserite nel perno stesso.

Infine, dall'analisi spettrografica della traccia di usura e dall'eventuale film formatosi, si può risalire ai composti generati dai fenomeni ossidativi o dalla reazione degli additivi EP con il metallo in seguito alle elevate temperature sviluppate dai fenomeni di attrito.

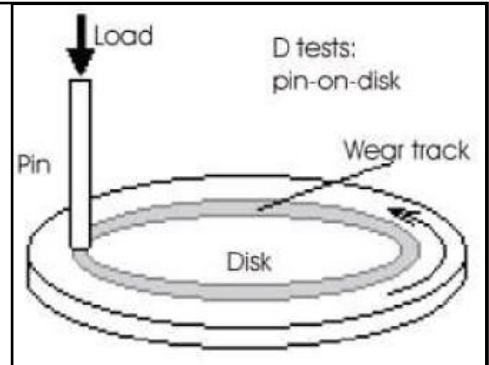


Fig. 5.8: Schematizzazione della prova perno contro disco.

Queste diverse morfologie sono così descrivibili:

- regione lucidata in cui il TiN non subisce particolari variazioni di colore, ma viene lucidato a specchio in seguito ad una sorta di trattamento di polishing;
- regione in cui il rivestimento assume una colorazione bruno-rossastra; tale fenomeno viene spiegato con la formazione sul rivestimento di un film di ossidi misti a base di Fe e Ti in cui la colorazione può essere attribuibile essenzialmente alla presenza in elevata concentrazione di ematite (Fe_2O_3).

In sostegno a tale ipotesi Wilson e Atlas dimostrano che tale film rivela a prove spettroscopiche la presenza notevole di O e Fe oltre che di Ti e che tale film non manifesta caratteristiche magnetiche (l'ematite è, per l'appunto, un ossido non magnetico).

- Regione in cui il rivestimento assume una colorazione bruno-nera; anche in questo caso si assume come causa un processo di ossidazione (a temperatura superiore al primo) che porta alla formazione di ossidi misti di Fe e Ti in questo caso ricchi di magnetite (Fe_3O_4)

che è un ossido dal colore nero che si forma a temperature maggiori e che presenta al contrario dell'ematite caratteristiche magnetiche.

Ulteriori osservazioni a sostegno di tale ipotesi possono essere ricavate dall'osservazione stessa del processo di maschiatura a rullare e dei fenomeni che avvengono sulla superficie degli utensili.

Il processo di maschiatura a rullare sviluppa un calore notevole soprattutto in prossimità dei lobi di contatto. Questo calore in parte asportato dal liquido lubrificante causa un aumento di temperatura dell'olio contenuto nel circuito di lubrificazione (circa 200 litri) che a partire da temperatura ambiente sale anche di 15°C dopo alcune ore di funzionamento.

Tuttavia, vista l'area ridotta in cui si sviluppa tale calore, non è da escludere che localmente, nei punti di contatto utensile-superficie lavorata, le temperature giungano a quei valori di alcune centinaia di gradi necessari ad instaurare fenomeni di tipo ossidativo.

In particolar modo, viste le altissime pressioni in gioco nei processi deformativi realizzati nella maschiatura a rullare, se ipotizziamo che all'interfaccia si sviluppi un regime di lubrificazione di tipo limite o misto, allora questo non sarà in grado di asportare adeguatamente il calore dalla zona di lavorazione e nelle asperità che vengono a contatto si raggiungono elevati surriscaldi come se lo strisciamento avvenisse in assenza di lubrificazione.

Tali temperature permettono tuttavia la reazione degli additivi EP contenuti nel lubrificante con il metallo (soprattutto con il C45 o in presenza di acciaio rapido affiorato) che formano strati superficiali a basso coefficiente d'attrito formati da composti che dipendono dalla natura chimica dell'additivo.

A differenza di quanto trovato da Wilson e Alpas, che nel loro studio hanno condotto prove in assenza di lubrificazione, si può per tanto ritenere che parte della diversa colorazione del rivestimento sarà, nel nostro caso, dovuta anche alla formazione sulle superfici di tali composti.

Lo spessore pari a qualche strato molecolare, tuttavia, rende lo studio della composizione chimica delle zone di diversa colorazione estremamente difficoltosa.

Le numerose prove condotte con tecniche spettroscopiche sulle regioni suddette non hanno, infatti, fornito risultati soddisfacenti.

Per la determinazione della gravità dei fenomeni di usura tribo-ossidativa, vista l'impossibilità di poter attuare un metodo di misura quantitativo sufficientemente rapido, si è deciso di valutare tali fenomeni qualitativamente ricorrendo alla realizzazione di una tavola comparativa contenente immagini tipo.

Quest'ultima è stata realizzata in modo tale da poter attribuire ad un particolare fenomeno tribo-ossidativo un determinato grado qualitativo di gravità mediante la comparazione tra immagini

osservate ed immagini tipo ottenute nelle medesime condizioni di ingrandimento e modalità di acquisizione dell'immagine.

In particolar modo, in base a considerazioni legate all'estensione dei fenomeni tribossidativi, alla colorazione assunta dal rivestimento ed all'integrità o meno del rivestimento, si è realizzata la sequenza di 10 gradi di gravità riportata in seguito.

Ciò ha permesso di valutare i fenomeni di usura anche nei punti in cui il rivestimento risultasse ancora integro, permettendo, per tanto, una descrizione rapida del danneggiamento osservato.

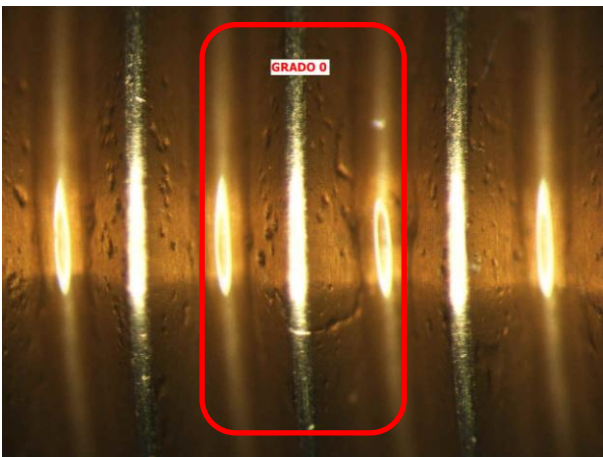
Tutte le immagini-tipo usate nella costruzione della tavola comparativa (come le immagini usate nella successiva determinazione della gravità dei fenomeni di usura) sono state ricavate ad un ingrandimento pari a 30× in corrispondenza dei lobi dei maschi a rullare, essendo queste le aree che manifestano variazioni significative di aspetto durante la vita degli utensili.

Gli utensili sono stati preparati alla successiva osservazione unicamente mediante lavaggio in acqua calda con aggiunta di un comune detergente per stoviglie per rimuovere i residui di lubrificante e successivamente asciugati con un soffio di aria compressa.

In tal modo si è voluto evitare di modificare eccessivamente gli strati superficiali venutesi a creare ad opera dei meccanismi tribo-ossidativi.

5.1.1.6 Tavola comparativa dei fenomeni tribo-ossidativi

GRADO 0

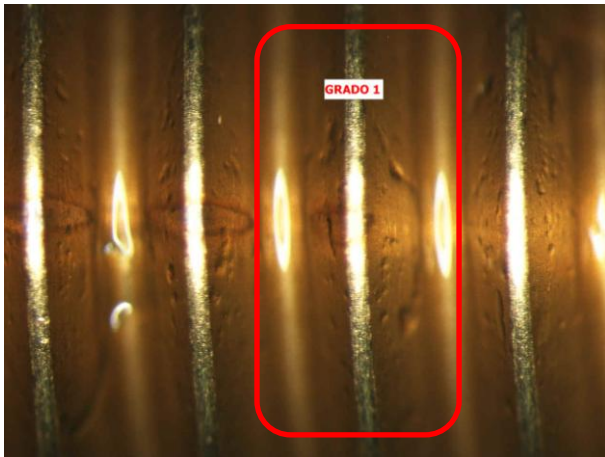


Il rivestimento appare intatto e non manifesta nessun tipo di fenomeno di usura.

È l'aspetto del rivestimento presente sull'utensile nuovo.

Presenta una rugosità dipendente dal grado di finitura raggiunto dalle fasi del processo di rivestimento usato dall'azienda produttrice.

GRADO 1

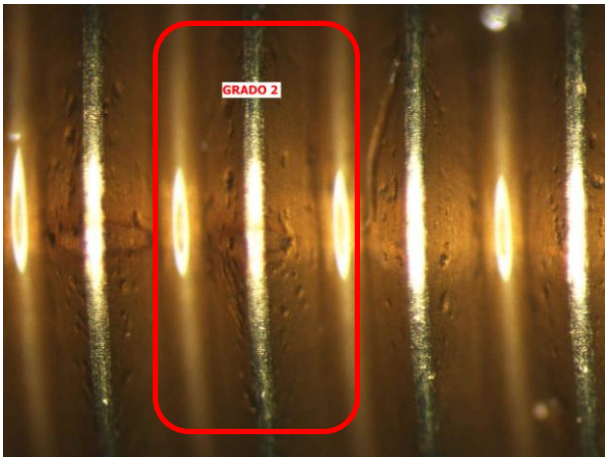


Il rivestimento presenta un alone di area ridotta sull'apice del filetto soprattutto sul fianco rivolto nel senso di avanzamento della lavorazione.

Tale alone presenta una colorazione bruno rossastra particolarmente evidente sul bordo e tenue all'interno.

Il rivestimento non presenta alterazioni visibili per quanto concerne la morfologia e la rugosità del rivestimento.

GRADO 2

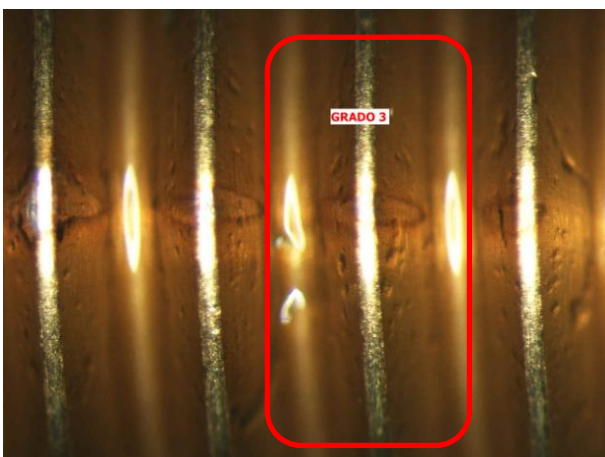


L'alone sintomatico della presenza di fenomeni tribo-ossidativi si estende su entrambi i fianchi del filetto.

La dimensione dell'alone si estende sia in larghezza lungo l'elica sia in lunghezza arrivando quasi al fondo del filetto.

Presenta una colorazione più marcata rispetto al grado precedente.

GRADO 3

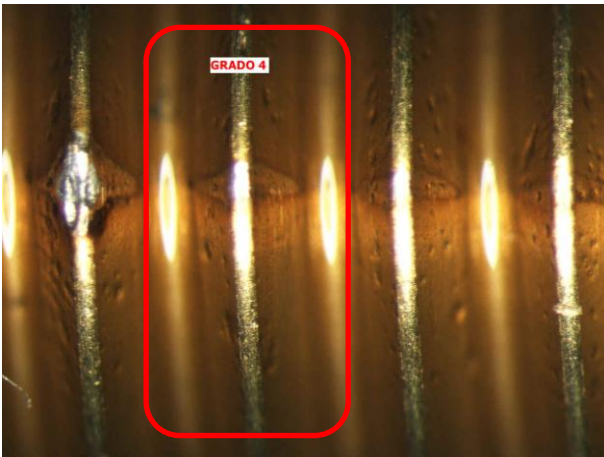


La zona ossidata si estende su tutto il lobo del filetto con, in alcuni casi, unione tra aloni dei filetti contigui.

La colorazione appare più intensa rispetto ai gradi precedenti e il bordo dell'alone appare di maggiore spessore.

Si nota un fenomeno di lucidatura sull'apice del lobo, tuttavia, il rivestimento risulta ancora integro se pur probabilmente assottigliato dai fenomeni abrasivi ed ossidativi.

GRADO 4



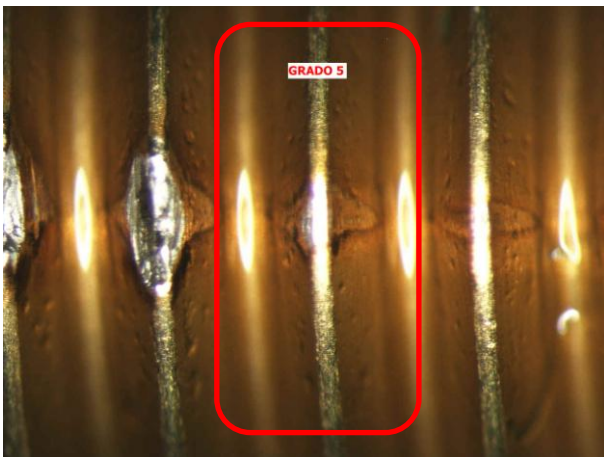
Alone di area maggiore e con un bordo di colorazione più bruna rispetto al precedente.

Sull'apice del lobo il rivestimento perde di continuità lasciando affiorare l'acciaio rapido sottostante.

La morfologia del lobo appare modificata non solo dai fenomeni di lucidatura (polishing), ma, anche, dalla comparsa in alcuni casi di fenomeni di inflessione del rivestimento, di rigature e solchi dovute a fenomeni abrasivi.

Le zone periferiche dell'alone presentano invece una rugosità minimamente alterata.

GRADO 5



La zona che presenta una colorazione bruna si estende lungo l'elica proporzionalmente all'estensione maggiore dell'area che presenta l'assenza del rivestimento.

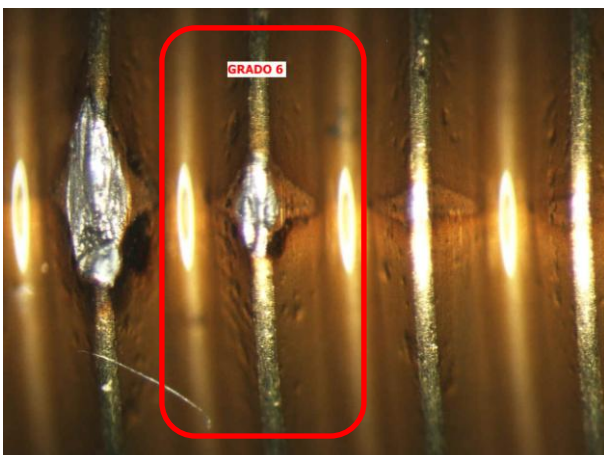
Tale zona presenta acciaio rapido pulito con morfologia che può essere lucidata, rigata e in alcuni punti scheggiata.

Il bordo dell'alone diventa più spesso e dalla colorazione più scura (quasi nero in alcuni

punti), il che può indicare il raggiungimento di temperature superiori.

Ciò è facilmente attribuibile al maggiore attrito che si sviluppa all'interfaccia HSSE-C45 rispetto all'interfaccia TiN-C45 a parità di condizioni di lubrificazione.

GRADO 6



I fenomeni tribossidativi generano aloni che si estendono all'esterno della zona in cui il rivestimento è stato asportato dall'usura.

Gli aloni sono caratterizzati da un'area sull'apice del lobo in cui si nota una progressiva lucidatura che riduce progressivamente lo spessore del rivestimento a partire dal

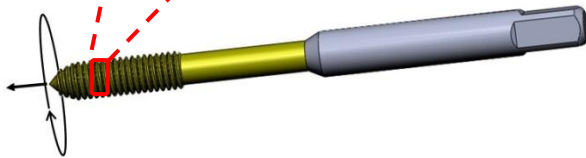
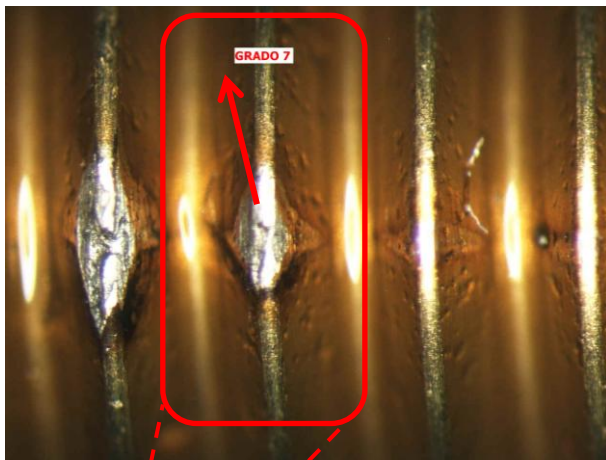
rivestimento integro fino all'asportazione dello stesso.

Sul fianco presentano, inoltre, una regione interna di colorazione mutata rispetto a quella originaria, ma relativamente chiara e dal colore metallico.

Un bordo dall'aspetto definito di colore bruno che sfuma poi verso le zone in cui il rivestimento appare inalterato.

Nelle regioni prossime all'asportazione del rivestimento compaiono fenomeni ossidativi più gravi caratterizzati da colorazioni molto scure.

GRADO 7



Manifesta fenomeni del tutto analoghi al grado precedente, ma di maggiore estensione superficiale.

Si nota come le regioni di colorazione più scura tendono a manifestarsi tutte nella regione in basso a destra rispetto all'apice del lobo.

Questa regione è la regione opposta al moto sincronizzato del materiale che ruota e avanza come schematizzato in figura spostando i lobi verso alto a sinistra.

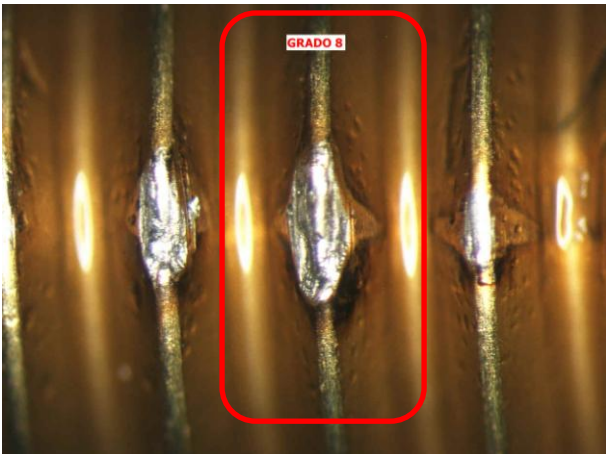
Fig. 5.9: Correlazione tra moto del maschio nel corso della lavorazione e distribuzione dei fenomeni ossidativi sui lobi.

Si può dare una spiegazione a tale fenomeno ipotizzando una sorta di “effetto cometa” in cui il maggiore sviluppo di calore avviene nei punti a coefficiente d'attrito maggiore cioè in corrispondenza delle aree di interfaccia HSSE-C45 (regioni chiare prive del rivestimento).

Il calore, tuttavia, a causa del movimento stesso dell'utensile rispetto alla superficie in C45 ferma e dei processi di conduzione termica, fa sì che le temperature maggiori (e di conseguenza i fenomeni ossidativi più gravi) si sviluppino nelle regioni che, in accordo al moto, seguono immediatamente dopo il punto “caldo”.

Inoltre, la minore pressione sviluppata sul fianco opposto all'avanzamento facilita la permanenza di lubrificante che alle temperature raggiunte decompone formando residui carboniosi.

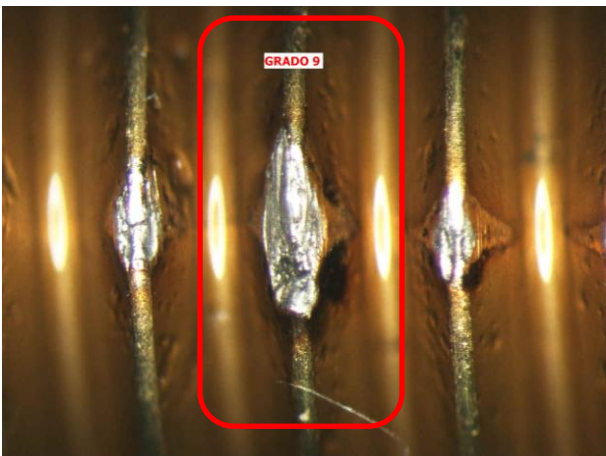
GRADO 8



I fenomeni ossidativi risultano molto evidenti e accompagnati da un'estesa asportazione del rivestimento.

Sono del tutto analoghi al caso precedente, ma di maggiore estensione e gravità.

GRADO 9



Grado di gravità massimo dei fenomeni ossidativi.

L'area ossidata assume in molti casi una colorazione nera a causa degli estesi depositi carboniosi che vi si formano ed ha un'estensione maggiore rispetto ai gradi precedenti.

È il grado di ossidazione tipico raggiunto nei lobi più sollecitati a fine vita.

In molti casi analizzati i maschi producono filetti non conformi dimensionalmente e, quindi, vengono sostituiti ancor prima di raggiungere uno sviluppo dei fenomeni ossidativi di tale gravità.

Questa analisi qualitativa permette di ottenere molto rapidamente osservazioni sull'andamento dei vari fenomeni di usura che interessano i maschi a rullare oggetto d'indagine. I risultati ottenuti saranno riportati più dettagliatamente in seguito, tuttavia si può anticipare come i maschi a rullare tendano a manifestare un andamento dei fenomeni di ossidazione variabile sia al progredire della vita dell'utensile (variazione temporale) sia rispetto alla posizione della regione osservata (variazione spaziale).

L'ossidazione, infatti, a parità di regione osservata tende a peggiorare nel tempo all'aumentare del numero di pezzi prodotti, mentre, a parità di numero di pezzi prodotti, i vari filetti di un maschio a rullare mostrano fenomeni di ossidazione diversi e tali da generare un profilo che rispecchia le sollecitazioni esercitate dal processo sull'utensile.

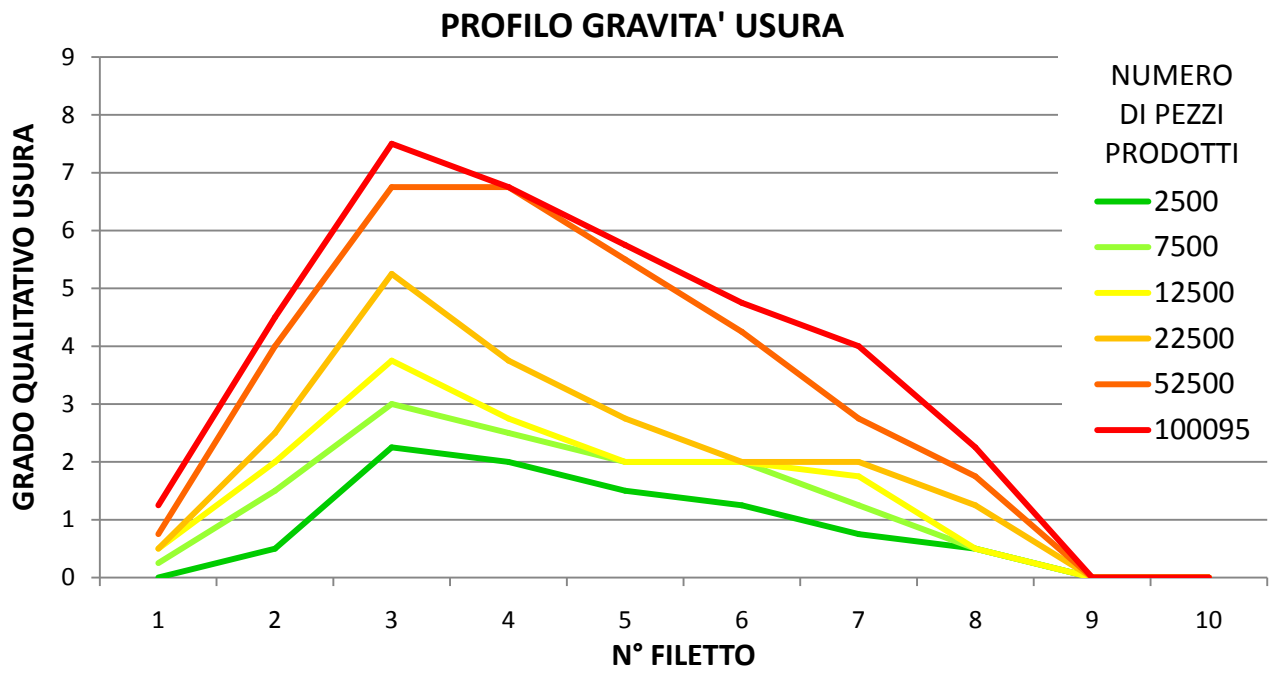


Fig. 5.10: Evoluzione tipica dei fenomeni tribo-ossidativi manifestata dai maschi a rullare all'aumentare del numero di pezzi prodotti (Campione A9).

5.1.2 Caratteristiche del processo standard di filettatura (GRUPPO STANDARD)

Il processo di filettatura che l'attività sperimentale si è preposta di ottimizzare è caratterizzato dai seguenti aspetti peculiari:

1) UTENSILI:

Il processo usa di default maschi a rullare EMUGE® M5-6GX Drück-1 STEEL HSSE-TIN-T1 (codice identificativo catalogo Emuge® = B0911420 0050).

Le caratteristiche fondamentali di tali utensili sono riportate nella seguente tabella:

DIMENSIONE NOMINALE	M5
CLASSE DI TOLLERANZA	6GX
SUBSTRATO	HSS-E
RIVESTIMENTO	TIN-T1
FORMA IMBOCCO	C/ 2-3
NUMERO LOBI	4
PRESENZA DI CANALINI DI LUBRIFICAZIONE	NO

Fig. 5.11: Illustrazione dal catalogo di un maschio a rullare Emuge Drück..

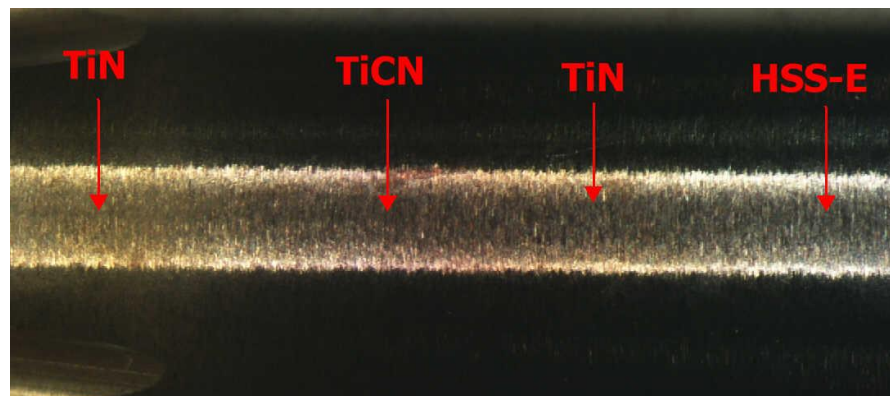


Tabella XX: Caratteristiche principali dei maschi a rullare EMUGE® M5-6GX Drück-1 STEEL HSSE-TIN-T1

Il rivestimento TiN-T1 è un particolare rivestimento multistrato realizzato da Emuge® sui propri utensili mediante procedimento PVD. Sulla superficie dell'utensile in acciaio rapido (HSS-E) viene depositato un primo strato a base TiN (durezza 2300 HV), un secondo a base TiCN (durezza 3000 HV) e uno strato finale nuovamente in TiN. Prima e dopo ogni singola fase di deposizione il pezzo subisce un processo di lucidatura spinta, denominato super-polishing, che permette di ottenere una morfologia a rugosità minima del rivestimento finale. Questa particolare configurazione permette di sfruttare contemporaneamente le proprietà ottimali del TiN per quanto riguarda la capacità di aderire tenacemente al substrato e l'ottima scorrevolezza e combinarle con la maggiore durezza conferita dallo strato intermedio in TiCN.

Quest'ultimo, infatti, possiede, a parità di rugosità superficiale e condizioni operative, una maggiore tendenza a manifestare fenomeni di usura adesiva e un coefficiente d'attrito maggiore.

Fig. 5.12: Stratificazione dei diversi layer nel rivestimento sottile denominato TiN-T1.



Lo spessore finale del rivestimento è minore di 5 μm .

Composizione	Microdurezza HV (0,05)	Coefficiente di attrito su acciaio (a secco)	Spessore (μm)	Temperatura massima di esercizio ($^{\circ}\text{C}$)	Colore indicativo
TiN	2300	0,4	1÷5	600 $^{\circ}\text{C}$	Giallo-oro
TiN-T1	3000	0,4	1÷4	400 $^{\circ}\text{C}$	Giallo-oro

Tabella XXI: Confronto tra le proprietà fisiche del rivestimento multilayer TiN-T1 e di quello monostrato “classico” a base TiN.

La geometria dei maschi a rullare attualmente in uso ha forma e dimensioni secondo norma DIN 2174.

Tali utensili presentano, però, all’acquisto, una punta conica che si estende oltre l’imbocco.

Questa variabile geometrica, non sottoposta a specifiche limitazioni da parte della norma, è usata in fase di fabbricazione come elemento di riferimento per centrare l’utensile.

Tale forma dovrebbe, inoltre, aiutare in produzione l’allineamento e il centraggio dell’utensile nel preforo, ma, vista l’elevata rigidità delle unità di maschiatura in uso e la precisione nel posizionamento relativo di utensile e pezzo, l’apporto benefico risulta essere insignificante nel impianto sotto esame.

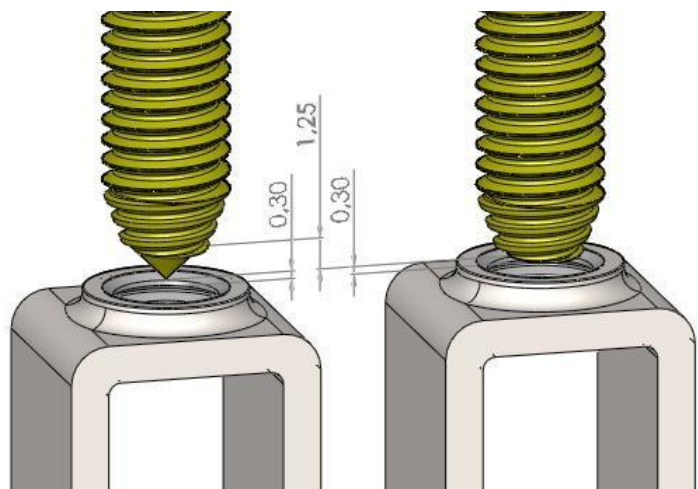
La presenza della punta conica comporterebbe, invece, un’inefficienza nel processo produttivo, costringendo al posizionamento dell’utensile ad una quota di partenza superiore in modo tale da permettere di mantenere una distanza di sicurezza tra utensile e pezzo sufficiente ad evitare collisioni accidentali tra di essi durante l’avanzamento del nastro.

Ne deriverebbe la necessità di avere una corsa dell’utensile maggiore e maggiori tempi ciclo con conseguente riduzione della produttività finale.

Gli operatori sono stati, quindi, istruiti ad asportare tale punta in modo di poter abbassare la quota di partenza della sezione di primo contatto tra utensile e preforo.

Fig. 5.13: Rappresentazione schematica dell’ingombro derivante la presenza della punta nei maschi a rullare e il “risparmio” di corsa dell’utensile derivante la sua rimozione.

Le dimensioni approssimate sono riportate in mm.



L'operazione viene condotta generalmente mediante molatura su una smerigliatrice da banco da parte degli operatori dell'impianto che, prima di posizionare l'utensile ne asportano il materiale in eccesso fino a sfiorare il primo filetto d'imbocco.

Nonostante l'elevata manualità degli operatori questa lavorazione risulta deleteria alla qualità dell'utensile per vari motivi:

- L'operazione è svolta manualmente e senza alcun tipo di supporto o sistema di controllo. Ciò porta ad avere una precisione dimensionale minima nell'utensile rilavorato. Vista la quota di sicurezza adottata estremamente ridotta, maschi molati insufficientemente possono collidere con la strisciata, al contrario una lavorazione eccessiva può intaccare i primi filetti del utensile compromettendone la geometria e di conseguenza riducendone la capacità di deformare il materiale.

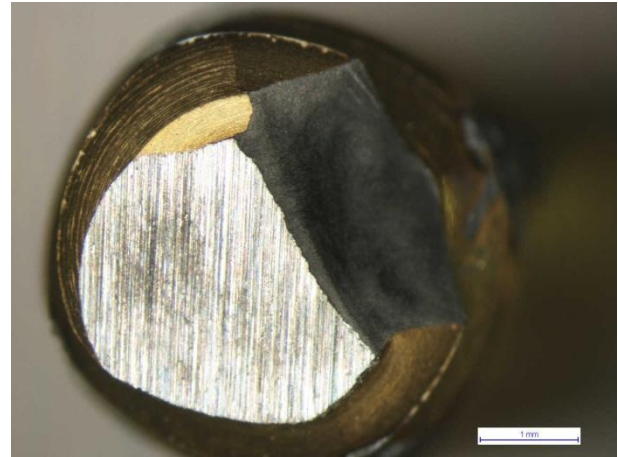


Fig. 5.14: Scheggiatura evidente del primo filetto avvenuta in concomitanza di una cattiva lavorazione superficiale (Campione STANDARD(4)-1 foto a 20×).

In tal caso il lavoro di deformazione viene concentrato sui lobi successivi, incrementando il livello di sollecitazione a cui sono sottoposti e, di conseguenza, favorendone l'usura.

Lo spigolo che si viene a creare funge, inoltre, da intensificatore di tensione diminuendo la resistenza meccanica del materiale adiacente.

- La molatura comporta una perdita di continuità del rivestimento dell'utensile che può favorire fenomeni di delaminazione dello stesso e, quindi, ridurre la resistenza ad usura dei filetti d'imbocco.

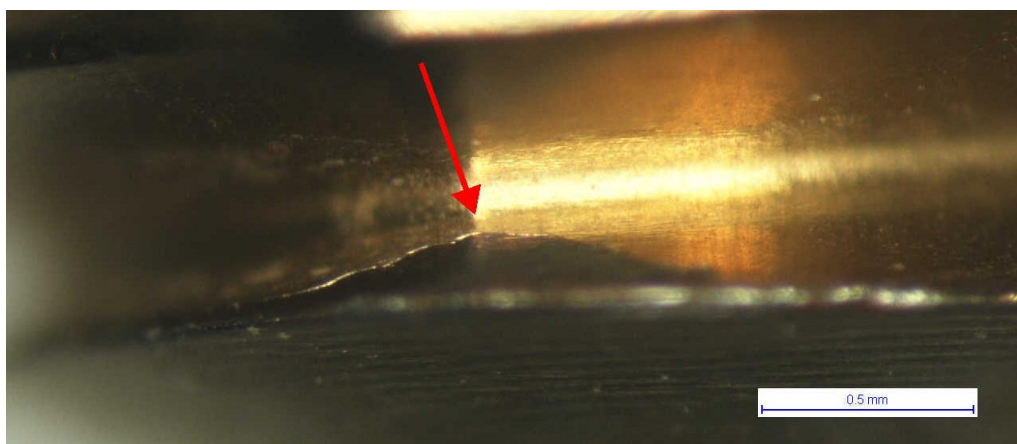


Fig. 5.15: Esempio di delaminazione del rivestimento (Campione A-6 a 50×).

- La molatura eseguita senza alcun fluido lubro-refrigerante, causa un elevato innalzamento locale della temperatura che può ridurre la durezza del materiale base dell'utensile originando fenomeni di rinvenimento e generare shock termici che favoriscono il distacco del rivestimento stesso.

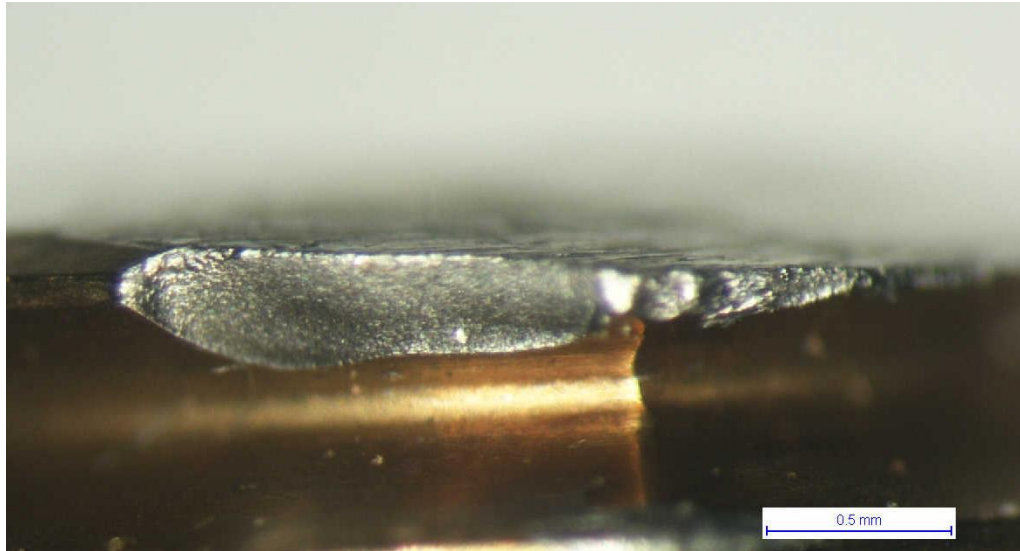


Fig. 5.16: Fenomeno di scheggiatura/usura avvenuto in corrispondenza di una cattiva lavorazione (Campione STANDARD(3)-4 a 40×).

Tale operazione, inoltre, mal si presta alla volontà di ridurre al minimo le variabili esterne che possono in qualche modo influenzare il manifestarsi dei fenomeni di usura, sarà per tanto sostituita con una lavorazione a maggiore ripetibilità (vedi GRUPPO A).

2) PARAMETRI DI LAVORAZIONE

I maschi a rullare lavorano in un processo di filettatura che risulta essere pienamente conforme con quanto consigliato dai produttori di utensili a rullare per ottenere una buona qualità del prodotto lavorato e la durata massima degli utensili.

Le filettatrici sono programmate, infatti, per operare una deformazione ad una velocità periferica dell'utensile $V_c = 40$ m/min.

Tale valore ricade perfettamente all'interno del range di velocità consigliate dai produttori di utensili che, nella filettatura di acciai da bonifica non legati quali il C45E (materiali che presentano una resistenza a trazione ≤ 850 N/mm²) raccomandano un valore di V_c compreso tra 20 e 60 m/min.

La corsa delle filettatrici si aggira attorno agli 8 mm, ma è variabile a seconda dello specifico valore di coppia richiesto dalla singola operazione.

Anche il diametro del preforo pari a $\varnothing = 4,65$ mm risulta essere conforme a quanto consigliato dai produttori di maschi a rullare per la realizzazione di una filettatura M5.

FILETTATURA [ISO DIN 13]	M5
CLASSE DI TOLLERANZA [UNI 5542-65]	6GX
DIAMETRO PREFORO	4,65 mm
SPESSORE ZONA FILETTATA	3,15 \pm 0,15 mm
CORSA FILETTATRICE	\approx 8 mm
VELOCITÀ PERIFERICA	40 m/min
LUBRIFICANTE	HAROLBIO 5 (*)

Tabella XXII: Parametri di lavorazione usati come standard nella produzione del morsetto.

5.1.3 Determinazione della durata degli utensili nelle condizioni standard del processo

La prima attività sperimentale svolta ha riguardato la definizione della durata media degli utensili nelle condizioni standard che permettesse di definire un valore di confronto con i risultati ottenuti in seguito all'applicazione al sistema produttivo delle varie misure correttive o alle diverse modifiche apportate.

A tal scopo sono stati tenuti sotto osservazione 5 gruppi di maschi (30 utensili) identificandoli opportunamente, ma evitando alcun tipo di interferenza sul processo produttivo sopra riportato.

Ciò ha permesso di determinare la seguente produttività media :

GRUPPO	N° CONTATORE	N° PEZZI PRODOTTI
STANDARD	258423	86141
STANDARD(1)	244600	81533
STANDARD(2)	220000	73333
STANDARD(3)	297000	99000
STANDARD(4)	280000	93333
MEDIA	255006	85002

Tabella XXIII: Numero di pezzi prodotti da ogni singolo maschio in condizioni standard al momento della sostituzione.

Si ricorda che questo valore corrisponde alla durata dell'utensile che per primo è uscito dal campo di tolleranza per quel determinato gruppo.

La durata media di un utensile nelle condizioni standard di lavorazione gli permette di produrre mediamente 85000 filettature prima che i fenomeni di usura lo portino a produrre pezzi non conformi.

5.1.4 Studio dei fenomeni di usura nelle condizioni standard di processo

I maschi a rullare sono stati successivamente analizzati e misurati con la volontà di ottenere informazioni sull'andamento dell'usura e dei fenomeni ossidativi. Si è voluto in tal modo, inoltre, mettere a punto il sistema di raccolta dati utilizzato nell'intero lavoro.

I dati ottenuti dalla misurazione degli utensili standard si sono, tuttavia, dimostrati essere fortemente influenzati dai danneggiamenti indotti dalla cattiva qualità di rilavorazione eseguita sugli utensili.

Si sono manifestati comportamenti anomali da parte di alcuni utensili che si sono tradotti in andamenti particolari o discontinui dei parametri adottati nella descrizione dei fenomeni.

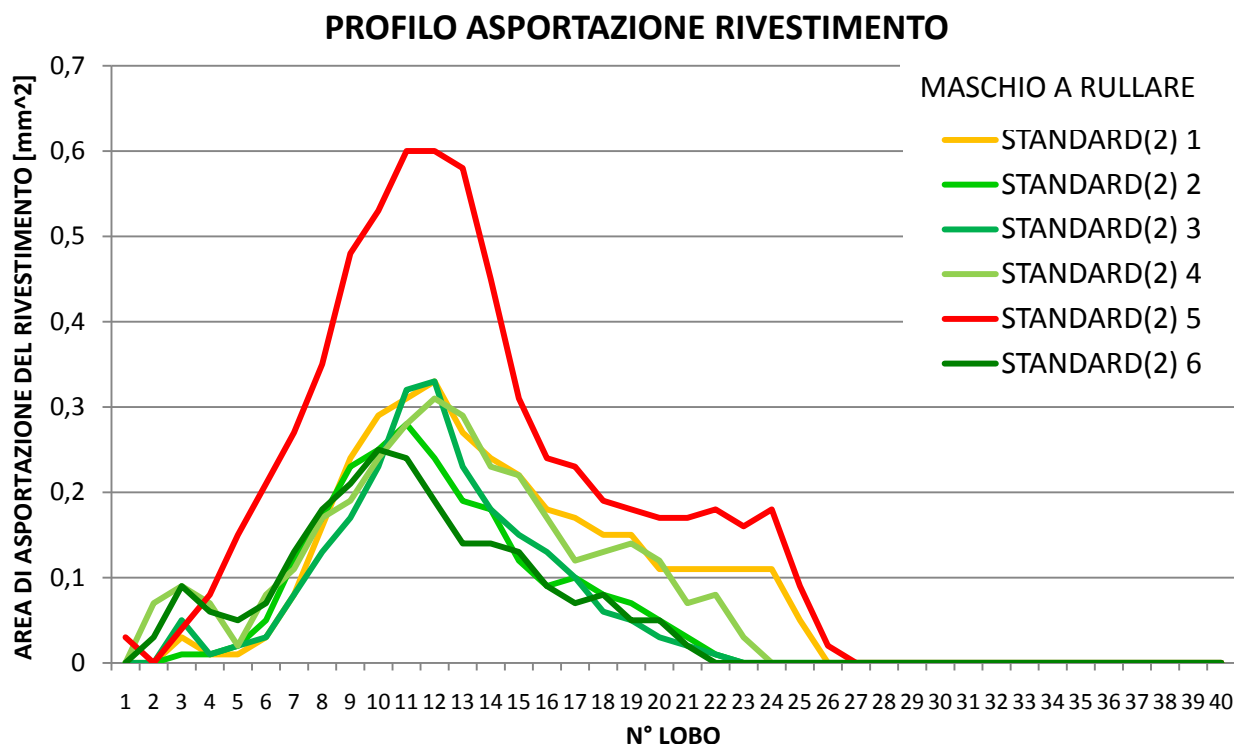


Fig. 5.17: Confronto tra i profili di asportazione del rivestimento dei maschi del gruppo STANDARD(2) al momento della sostituzione (71000 pezzi prodotti).

In rosso sono riportati gli utensili che sono risultati fuori tolleranza a fine vita e hanno comportato la sostituzione dell'intero gruppo a cui appartenevano; in giallo gli utensili al limite di tolleranza e in verde quelli che al momento della sostituzione producevano ancora filettature conformi.

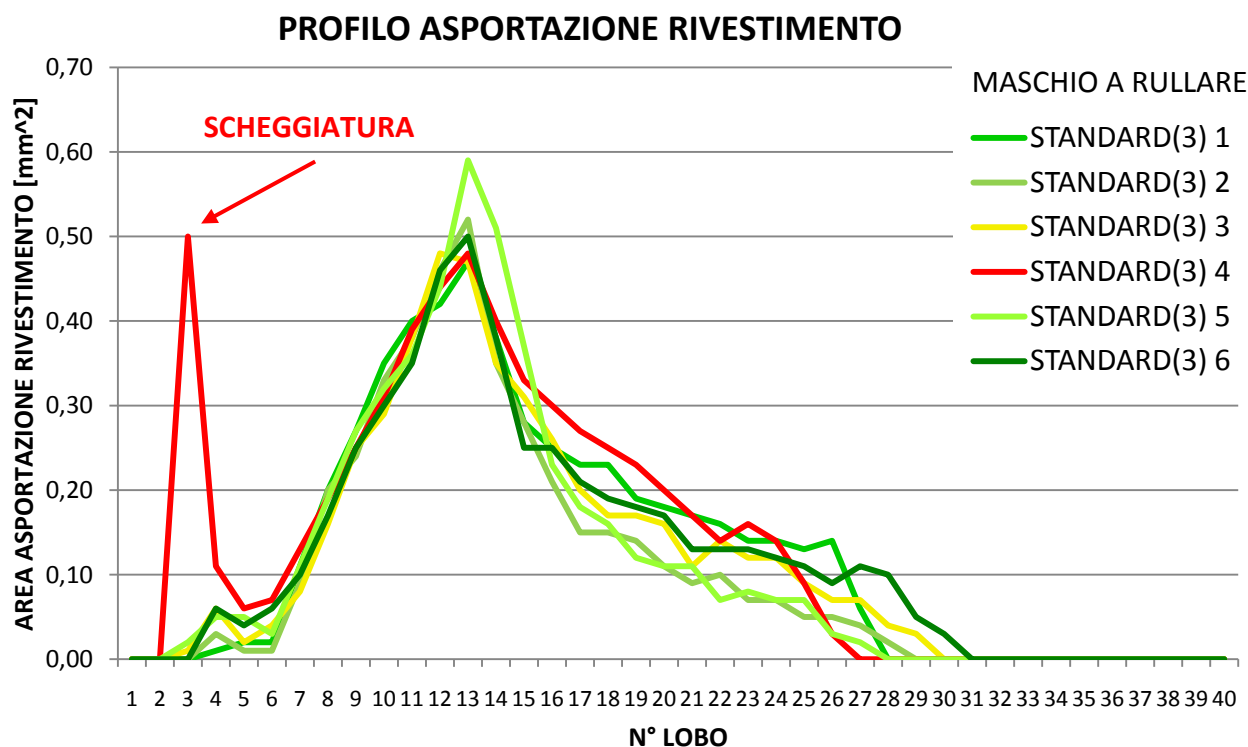


Fig. 5.18: Confronto tra i profili di asportazione del rivestimento dei maschi del gruppo STANDARD(3) al momento della sostituzione (99000 pezzi prodotti).

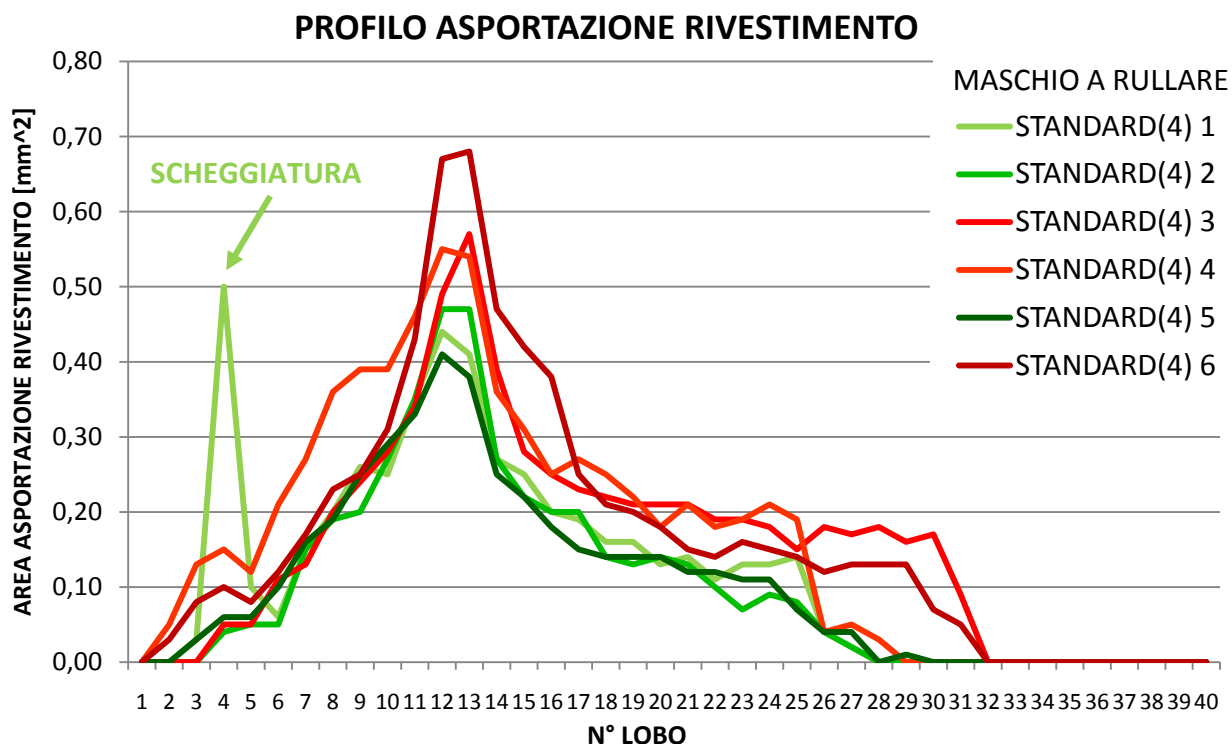


Fig. 5.19: Confronto tra i profili di asportazione del rivestimento dei maschi del gruppo STANDARD(4) al momento della sostituzione (93333 pezzi prodotti).

I profili di usura che si ottengono risultano spesso avere un andamento fortemente influenzato dai fenomeni localizzati di scheggiatura e/o delaminazione.

Non è da escludere, di conseguenza, che tali fenomeni modifichino profondamente l'evoluzione dei meccanismi di usura per quei specifici utensili che li manifestano andando a falsare le eventuali osservazioni condotte.

Tutto ciò, inoltre, contravviene alla volontà di limitare il più possibile le variabili che possono influire sulle prestazioni degli utensili.

Si è per tanto deciso di limitare le osservazioni condotte su tali utensili e di riprenderle solo dopo aver trovato il modo di escludere la qualità della lavorazione eseguita sugli utensili dalla lista delle possibili variabili influenzanti il sistema tribologico sotto esame.

Ciò sarà ottenuto con il gruppo di utensili denominato successivamente GRUPPO A.

5.2 GRUPPO A

La prima azione correttiva intrapresa è stata la sostituzione della modalità di molatura impiegata con una lavorazione più ripetibile e qualitativamente superiore, al fine di limitare il più possibile l'influenza che la rilavorazione dell'utensile ha dimostrato di avere sui fenomeni di usura.

L'obiettivo principale è risultato, di conseguenza, quello di determinare il processo che avrebbe permesso di ottenere la variazione voluta nella geometria dell'utensile, ma senza alterarne il comportamento ad usura.

A tale fine ci si è rivolti agli operatori del centro manutenzioni che hanno individuato l'attrezzatura adatta a tale scopo in una molatrice dotata di fermi meccanici a controllo micrometrico.

Il suo uso ha permesso, infatti, di ottenere una geometria perfettamente ripetibile e priva di danneggiamenti evidenti sui primi lobi degli utensili.

Oltre ad aver uniformato il comportamento ad usura degli utensili di un dato gruppo (rendendolo indipendente dalla fase di molatura e, quindi, legato esclusivamente alle condizioni del sistema tribologico) l'azione correttiva intrapresa è risultata avere un'influenza benefica anche per quanto riguarda la durata complessiva degli utensili.

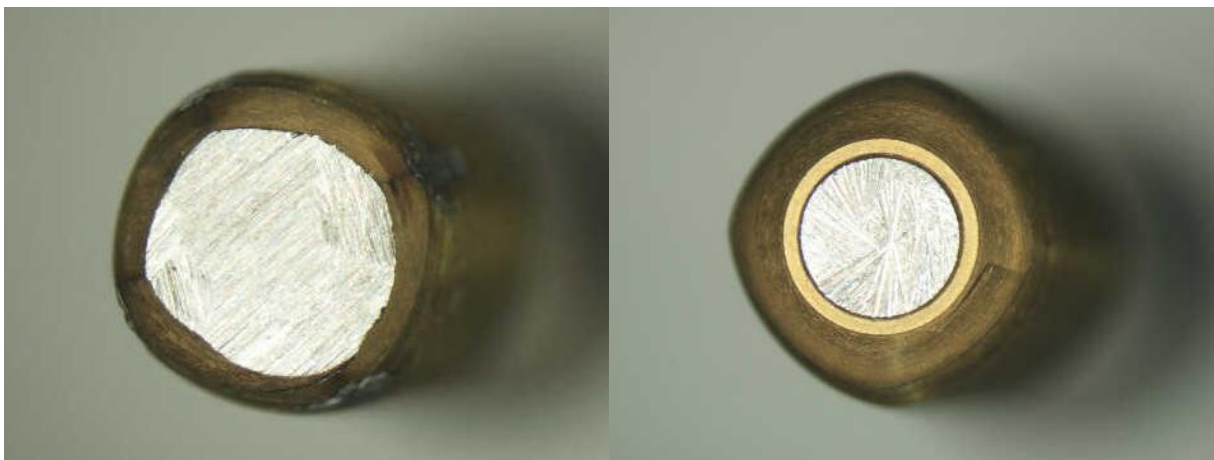


Fig. 5.20: Confronto tra la superficie ottenuta in seguito alla rilavorazione "standard" e quella ottenuta con mola dotata di fermi meccanici al centro manutenzioni.

Tale operazione è stata estesa, di conseguenza, come prassi su tutti i gruppi di maschi sperimentati successivamente che necessitassero l'asportazione della punta conica, in modo da eliminare la qualità della rilavorazione dell'estremità dell'utensile dalla lista delle possibili variabili che possono influire sui fenomeni di usura dell'utensile.

Dal confronto con il tecnico commerciale della Emuge-Franken S.r.l. è, tuttavia, emersa la possibilità per l'azienda di acquistare a partire dal prossimo ordine maschi a rullare di geometria modificata.

Pur non essendo presente a catalogo esiste, infatti, per ogni codice di utensile, una versione “GS” prodotta priva di punta all’estremità.

Tale geometria viene, invece, adottata come standard da altri produttori (ad esempio la giapponese YAMAWA®).

Questi utensili hanno il vantaggio, rispetto ai primi di essere lavorati dal produttore con macchine a rettifica prima di subire trattamenti termici e processi di rivestimento. In tal modo anche l’estremità piatta presenta un rivestimento continuo, privo di tensioni residue dovute a fasi di riscaldamento e raffreddamento non omogenee e con migliori caratteristiche di adesione al substrato. Si vanno, inoltre, ad eliminare i tempi necessari alla rilavorazione degli utensili da parte degli operatori con conseguente aumento di efficienza del processo produttivo.

Le rimanenti caratteristiche di questo gruppo sono invariate rispetto alle condizioni standard e riportate nella tabella riassuntiva a pagina 147.

5.2.1 Analisi della durata

Il passaggio alla nuova modalità di rilavorazione degli utensili ha permesso di ottenere, tra l’altro, un aumento del numero medio di filettature prodotte prima che i meccanismi di usura conducano i maschi a rullare al di fuori del range di tolleranza.

GRUPPO	UTENSILI NON CONFORMI	N° CONTATORE	N° PEZZI PRODOTTI
A	A10 (A11)	292785	97595
A(1)	A17 (A13)	283055	94352
MEDIA	-	287920	95973

Tabella XXIV: Numero di pezzi prodotti a fine vita dagli utensili del gruppo A. Tra parentesi gli utensili al limite di conformità al momento della sostituzione.

Il solo fatto di aver migliorato la rilavorazione degli utensili in modo da ottenere una geometria migliore ha permesso un incremento della durata degli stessi di circa il 13% passando ad un valore medio di circa 96000 filettature conformi eseguite da ogni singolo maschio a rullare.

5.2.2 Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi

L'analisi degli utensili del gruppo A ha permesso di ottenere grafici, come i seguenti, in cui i due parametri di riferimento adottati riescono a descrivere l'andamento temporale e spaziale dei fenomeni di usura. I risultati ottenuti per i vari utensili hanno dimostrato possedere, inoltre, un maggior grado di ripetibilità e andamenti privi di fenomeni localizzati.

L'osservazione periodica dei fenomeni di usura su un dato utensile consente di definire le modalità con questi si evolvano all'aumentare del numero di pezzi prodotti in maniera dipendente unicamente dalle caratteristiche del sistema tribologico realizzato.

È evidente come l'usura abbia inizio in corrispondenza dell'ultimo filetto d'imbocco, cioè nel punto in cui l'utensile raggiunge il diametro massimo caratteristico del successivo tratto cilindrico di calibrazione.

All'aumentare del numero di pezzi prodotti i meccanismi di usura proseguono aggravandosi lungo due direttrici principali:

- Sui lobi del terzo filetto che manifestano ad ogni intervallo sia la massima area di asportazione del rivestimento sia il grado qualitativo di usura più elevato.
- Lungo i filetti di calibrazione che manifestano una propagazione del danneggiamento verso i filetti più lontani dall'imbocco all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

Si può notare, inoltre, come i fenomeni di danneggiamento tribo-ossidativo si estendano per un numero di filetti maggiori rispetto a quelli in cui effettivamente si ha l'asportazione del rivestimento.

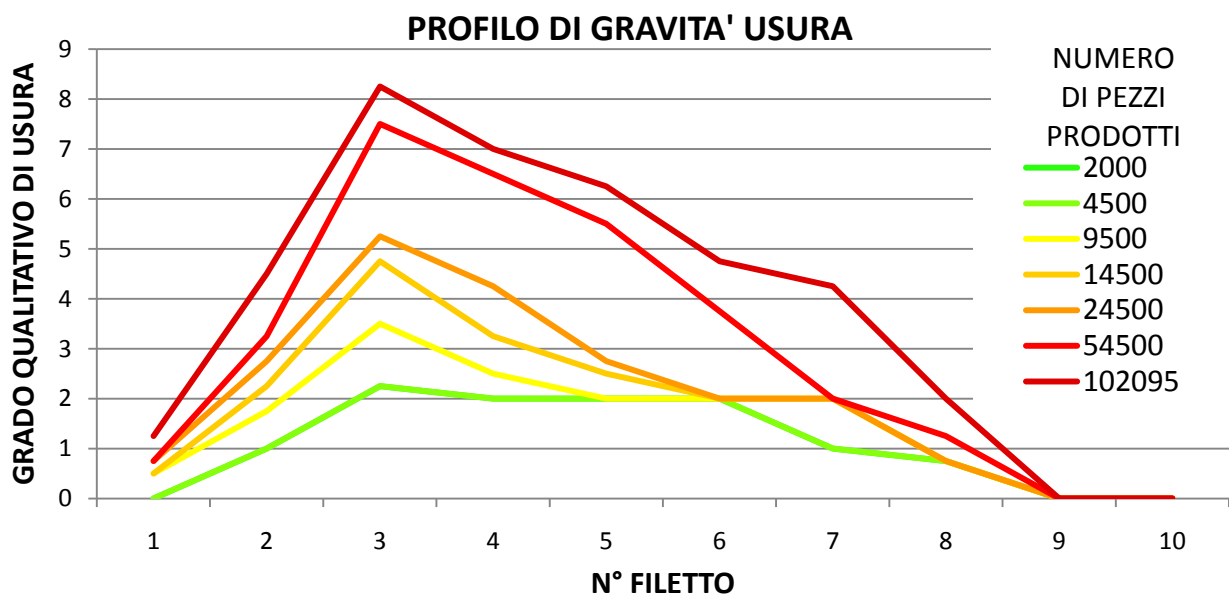


Fig. 5.21: Evoluzione dei fenomeni di usura sui filetti dell'utensile A8 all'aumentare del numero di pezzi prodotti (il risultato per ogni filetto è la media dei dati ottenuti sui 4 lobi che compongono la sezione di ogni filetto). I gradi qualitativi corrispondono a quelli riportati e descritti nella corrispettiva tavola comparativa dei fenomeni di usura.

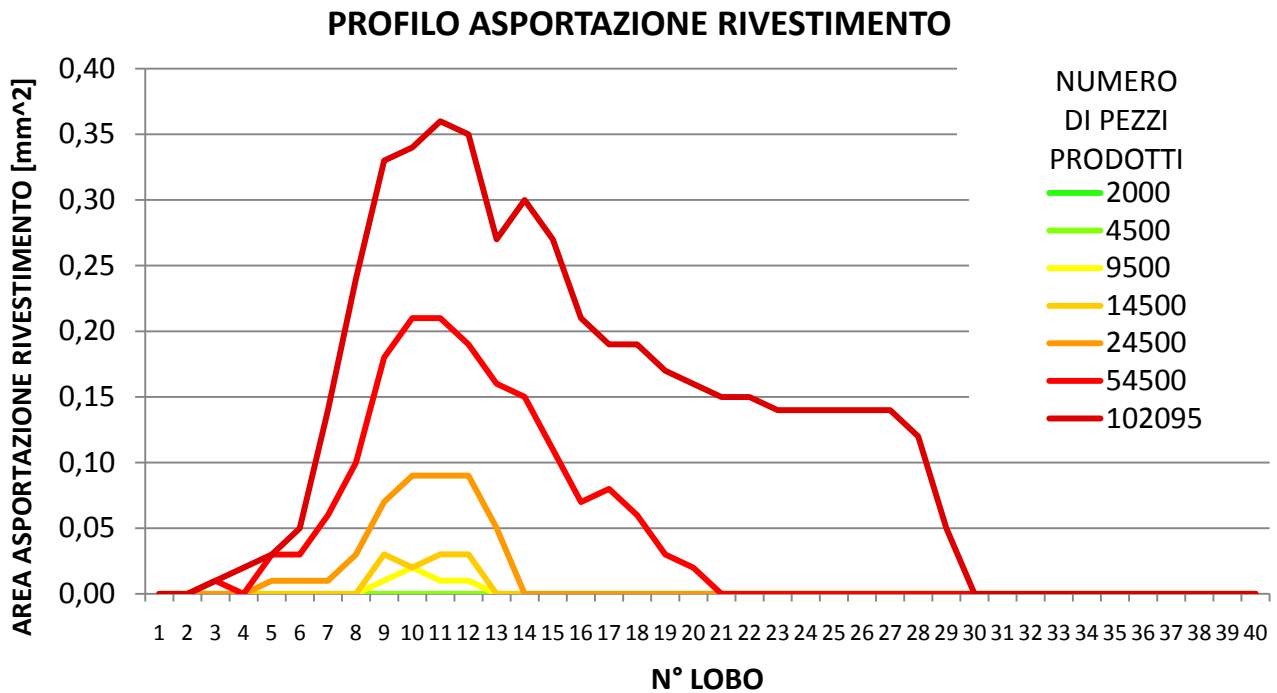


Fig. 5.22: Evoluzione dell'asportazione del rivestimento sui lobi dell'utensile A8 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

L'analisi del profilo di asportazione del rivestimento e di quello relativo alla comparazione qualitativa dei fenomeni di usura in utensili a fine vita porta ad ulteriori considerazioni.

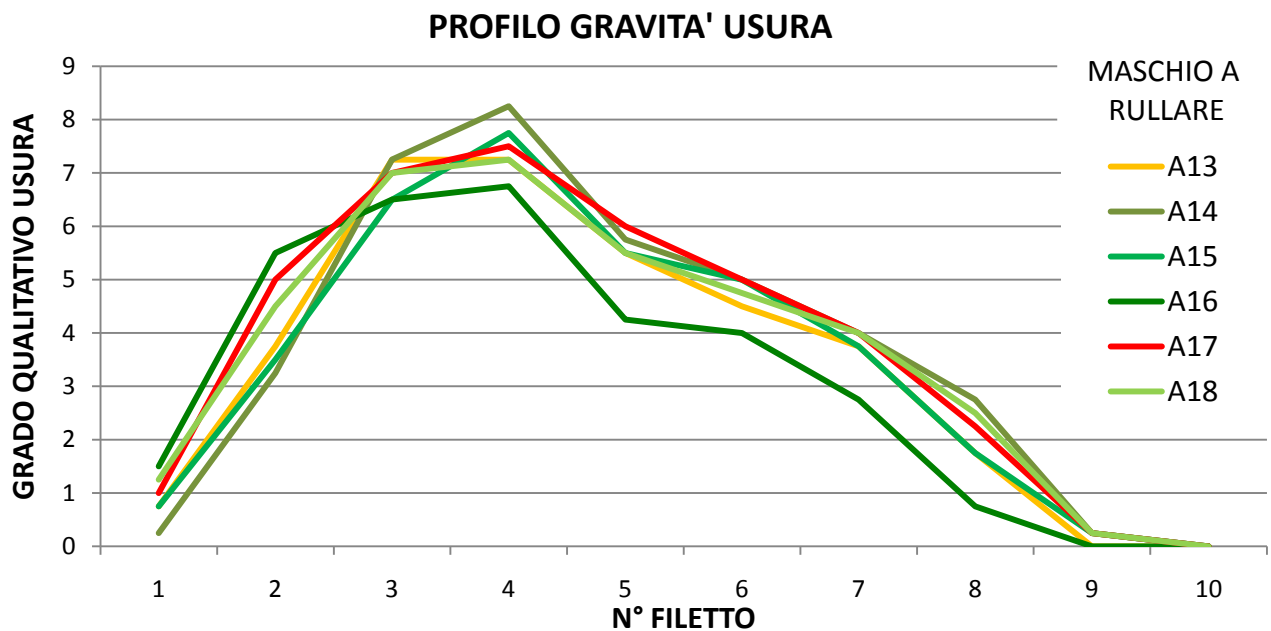


Fig. 5.23: Confronto tra i profili di gravità usura dei maschi del gruppo A(1) al momento della sostituzione (94352 pezzi prodotti).

In rosso sono riportati gli utensili che sono risultati fuori tolleranza a fine vita e hanno comportato la sostituzione dell'intero gruppo; in giallo gli utensili al limite di tolleranza e in verde quelli che al momento della sostituzione producevano ancora filettature conformi.

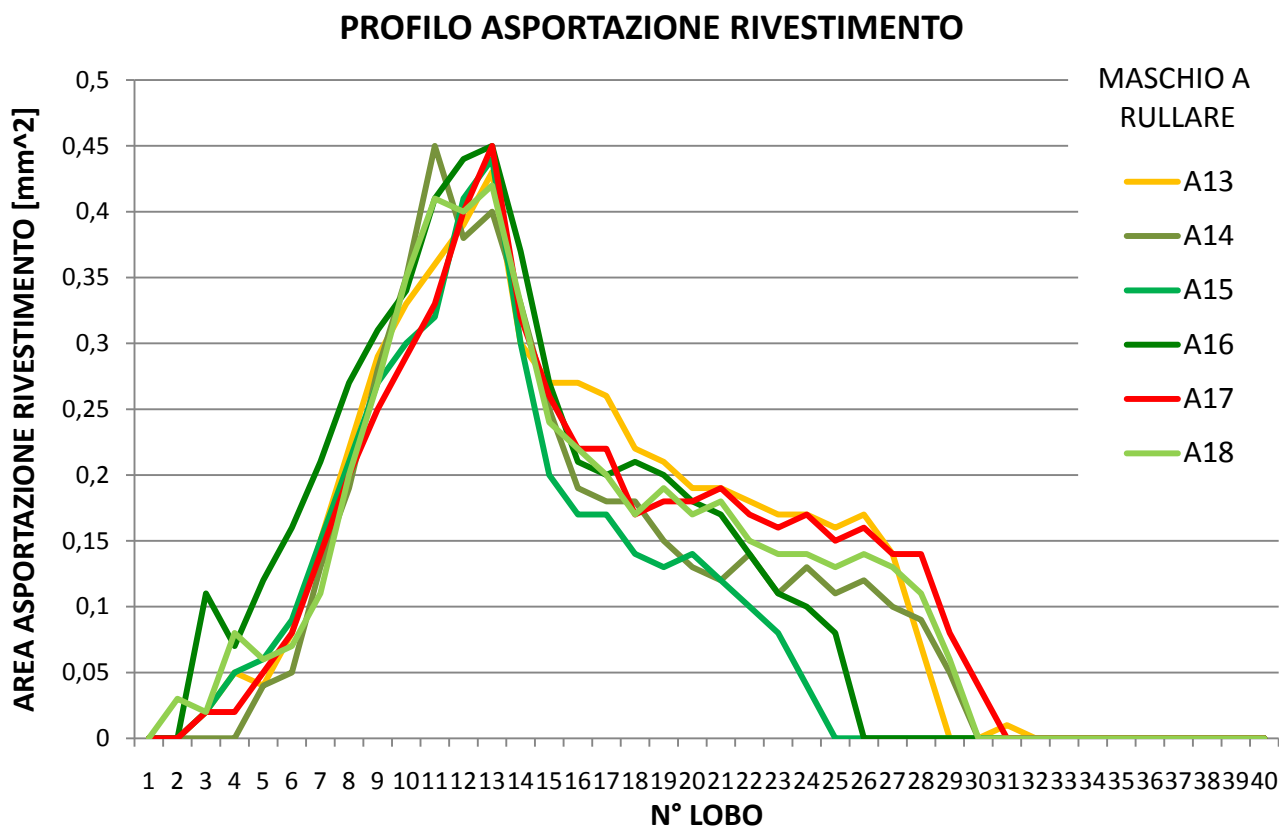


Fig. 5.24: Confronto tra i profili di asportazione del rivestimento nei maschi del gruppo A(1) al momento della sostituzione (94352 pezzi prodotti).

Dai grafici sopra riportati è evidente come non ci sia, in questo caso specifico, una differenza notevole di comportamento tra i maschi a rullare ancora conformi e quelli non conformi al momento della sostituzione per quanto riguarda i fenomeni tribo-ossidativi.

Ciò porta a ritenere che tali fenomeni siano dipendenti principalmente dal numero di pezzi prodotti

Per quanto riguarda, invece, l'asportazione del rivestimento si notano dei profili molto simili tra i vari utensili, in cui l'unica differenza sostanziale tra maschi conformi e non, è un'usura maggiore dei lobi più lontani manifestata dagli utensili non più in grado di produrre filettature conformi.

Si può, per tanto ipotizzare che i fattori che concorrono alla fuoriuscita di un utensile dal campo di tolleranza siano sostanzialmente due:

- Usura eccessiva dei lobi di imbocco, in particolar modo di quello critico, che non risultano più in grado di deformare correttamente la superficie del preforo costringendo a tale compito i lobi di calibrazione.
- Usura dei lobi di calibrazione che impedisce loro di rifinire le dimensioni del filetto formato e di portarle all'interno del range dimensionale previsto dalla norma.

La sostanziale uniformità di comportamento manifestata a fine vita dai diversi utensili, ben diversa da quanto osservato negli utensili standard, può derivare dalla maggiore ripetibilità ottenuta, nell'asportazione della punta degli utensili, con l'uso della molatrice dotata di fermi meccanici.

Si è di conseguenza riusciti ad escludere la qualità di lavorazione dalle variabili che influenzano il sistema tribologico sotto studio.

L'analisi della propagazione dell'usura sul lobo critico porta, infine, al seguente grafico:

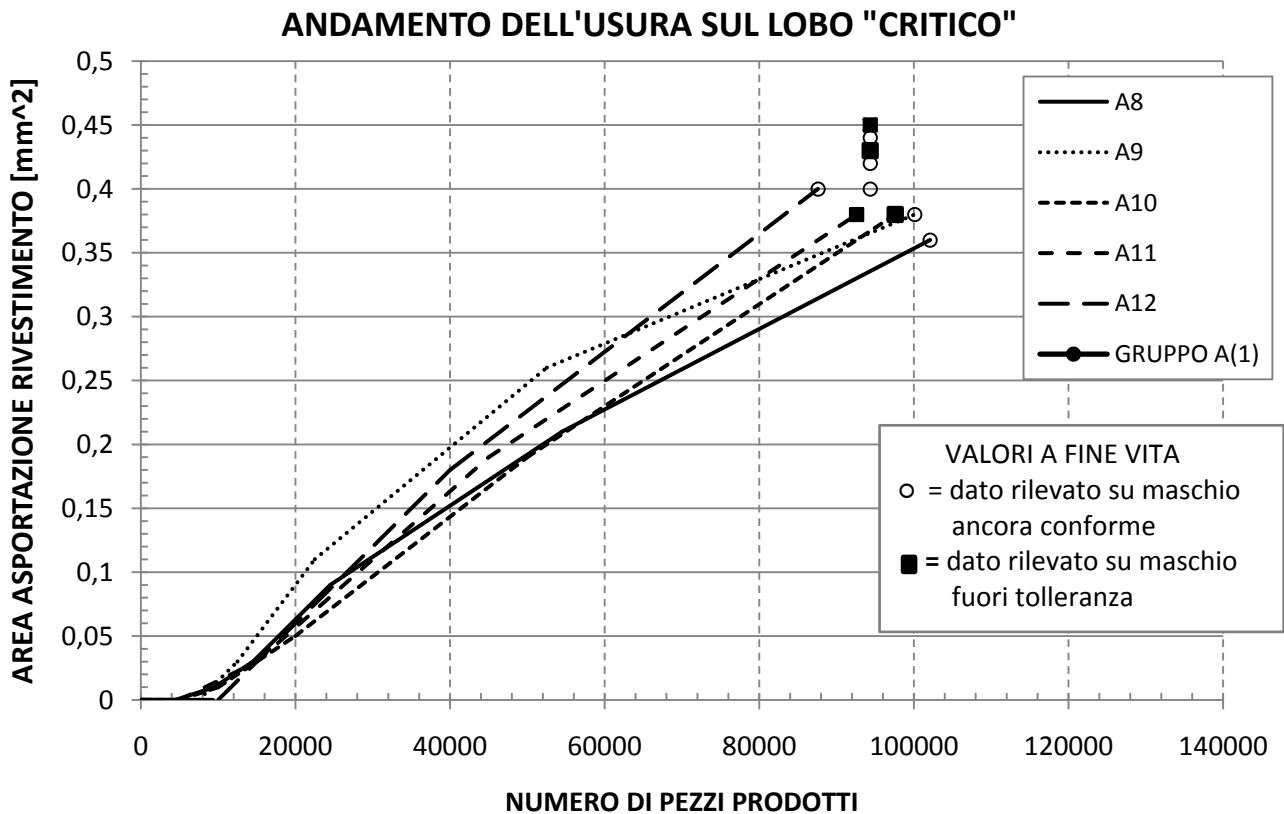


Fig. 5.25: Propagazione dell'usura sul lobo critico all'aumentare del numero di pezzi prodotti per gli utensili del gruppo A.

Da tale grafico risulta evidente come l'usura su ogni singolo lobo progredisca all'aumentare del numero di pezzi prodotti attraverso due stadi successivi.

Lo stadio iniziale presenta un tratto a pendenza nulla e, come verrà ampiamente dimostrato in seguito, corrisponde alle fasi iniziali del danneggiamento degli utensili in cui il rivestimento sottile degli utensili è sottoposto principalmente a meccanismi abrasivi. Per l'intero tratto a pendenza nulla il rivestimento subisce un progressivo assottigliamento, ma permane integro sulla superficie dei lobi senza far affiorare porzioni apprezzabili dell'acciaio rapido sottostante.

Il secondo stadio ad andamento pressoché lineare inizia dopo che il rivestimento superficiale ha perso di continuità e si inizia, quindi, ad avere il contatto diretto tra superfici apprezzabili dell'acciaio rapido dell'utensile e dell'acciaio basso-legato lavorato.

La variazione del sistema tribologico modifica profondamente i meccanismi di usura coinvolti nel danneggiamento progressivo dell'utensile, manifestando una crescita dell'area di usura con un andamento approssimativamente lineare all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

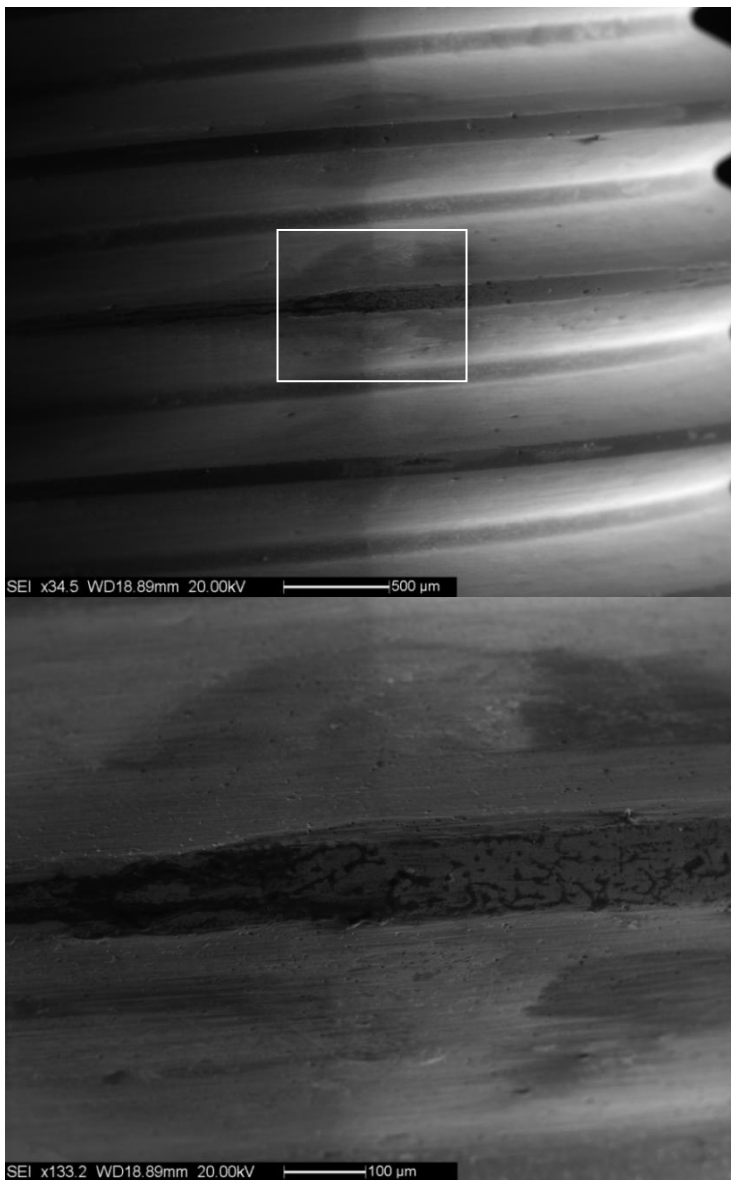
La pendenza di questo tratto fornisce indicazioni sulla capacità del rivestimento non più integro di sopportare i meccanismi di usura sviluppatasi all'interfaccia.

5.2.3 Descrizione dei meccanismi di usura

Al fine di descrivere il meccanismo specifico con cui si manifestano e procedono i fenomeni di usura sui maschi a rullare sono stati prelevati dei campioni a diversi stadi di vita e osservati al microscopio elettronico a scansione (SEM). Questo strumento permette ottenere immagini tridimensionali ad alta risoluzione ed alti ingrandimenti della topografia superficiale dei maschi a rullare sfruttando l'analisi degli elettroni secondari emessi dal campione dopo essere stato colpito dal fascio di elettroni.

L'analisi degli elettroni retrodiffusi (o "backscattered") permette di ottenere un'ulteriore immagine contenente informazioni sulla composizione superficiale dell'area analizzata a cui può essere affiancata un'analisi chimica puntuale della superficie mediante l'analisi dispersiva dei raggi X di fluorescenza (EDS).

CAMPIONE A1 (1000 pezzi prodotti)



Le immagini ottenute al microscopio elettronico sfruttando gli elettroni secondari (SEI) mostrano come l'utensile dopo aver prodotto un numero esiguo di pezzi inizi a manifestare dei fenomeni di danneggiamento nei punti in cui, nel corso della lavorazione, è sottoposto alle maggiori sollecitazioni.

Le aree in cui la superficie dell'utensile manifesta i primi fenomeni di usura sono, infatti, lo smusso presente all'apice del filetto e i fianchi immediatamente adiacenti ad esso in corrispondenza del lobo dell'utensile.

*Fig. 5.26: Campione A1_LA-1.
Macrografia della superficie dei lobi
con ingrandimento del lobo
corrispondente al 3° filetto.
Foto ottenute sfruttando gli elettroni
secondari.*

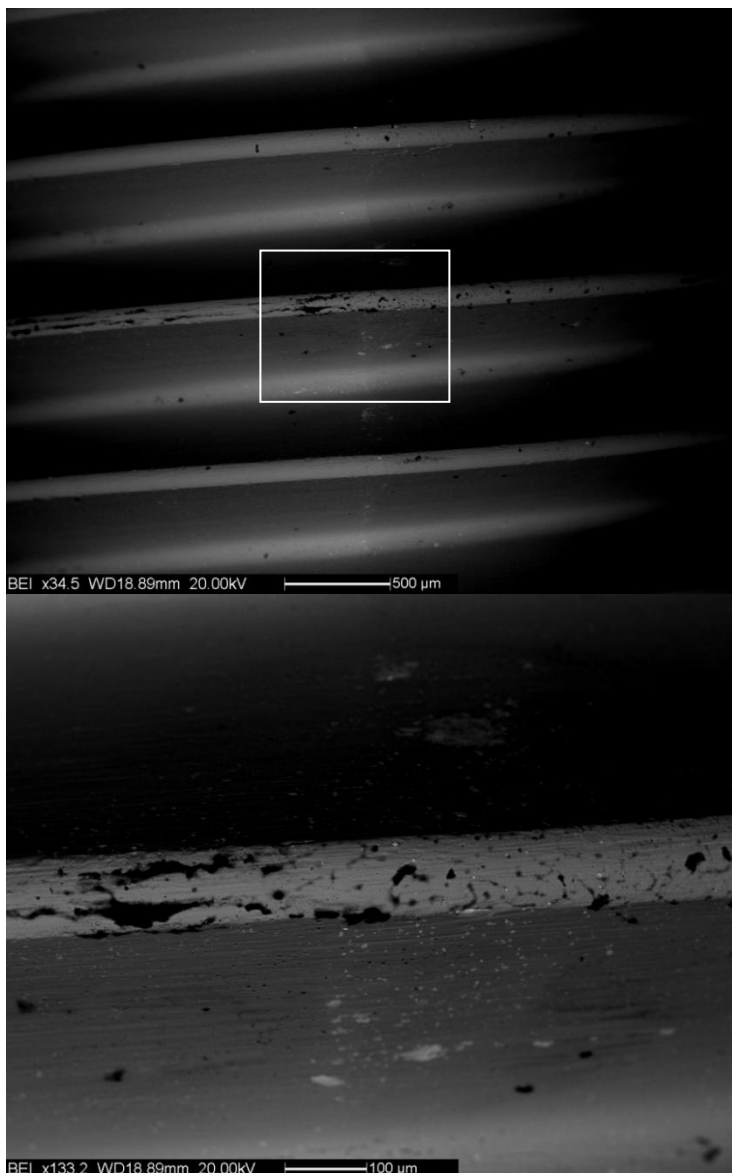
I fenomeni riscontrati sono essenzialmente di tre tipi:

- Meccanismo di deformazione dell'apice del filetto con formazione di solchi o di variazioni geometriche dello stesso.

Questo fenomeno può essere attribuito essenzialmente alla combinazione tra fenomeni di aratura e di inflessione del rivestimento dovuto alla deformazione del materiale costituente il substrato a causa delle elevate tensioni che si concentrano sullo spigolo tra smusso e fianco del filetto.

- Lucidatura del fianco del filetto ad opera di meccanismi abrasivi e tribo-ossidativi che riducono la rugosità superficiale del rivestimento causandone un contemporaneo assottigliamento.
- Formazione di depositi in corrispondenza dell'apice del filetto.

Acquisendo immagini delle medesime aree usando però gli elettroni retrodiffusi (BEI) emergono



ulteriori informazioni:

- I depositi presenti sull'apice del filetto in corrispondenza principalmente del 3° filetto sono residui carboniosi derivanti dalla decomposizione termica del lubrificante.

- In corrispondenza della zona lucidata si ha una notevole presenza di depositi di C45 che occludono le porosità presenti nel rivestimento, contribuendo a ridurre ulteriormente la rugosità dello stesso.

Questo fenomeno può spiegare la diversa colorazione che assume quest'area quando è osservata allo stereoscopio.

Fig. 5.27: Campione A1_LA-1. Macrografia della superficie dei lobi con ingrandimento del lobo corrispondente al 3° filetto. Foto ottenute sfruttando gli elettroni retrodiffusi.

La minore rugosità da luogo ad una superficie più riflettente, mentre la presenza dei depositi di acciaio può favorire la formazione degli ossidi misti che danno vita al caratteristico alone.

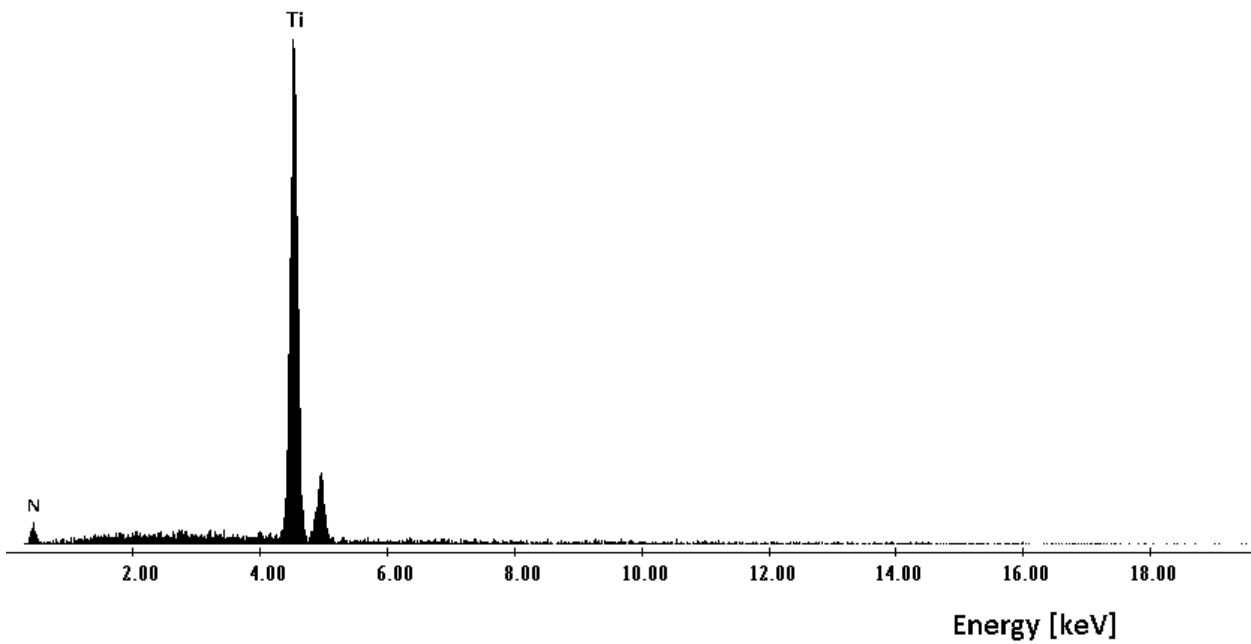


Fig. 5.28: Spettro EDS ottenuto in corrispondenza del rivestimento a base TiN “vergine”. Sono presenti unicamente i picchi corrispondenti agli elementi Ti e N.

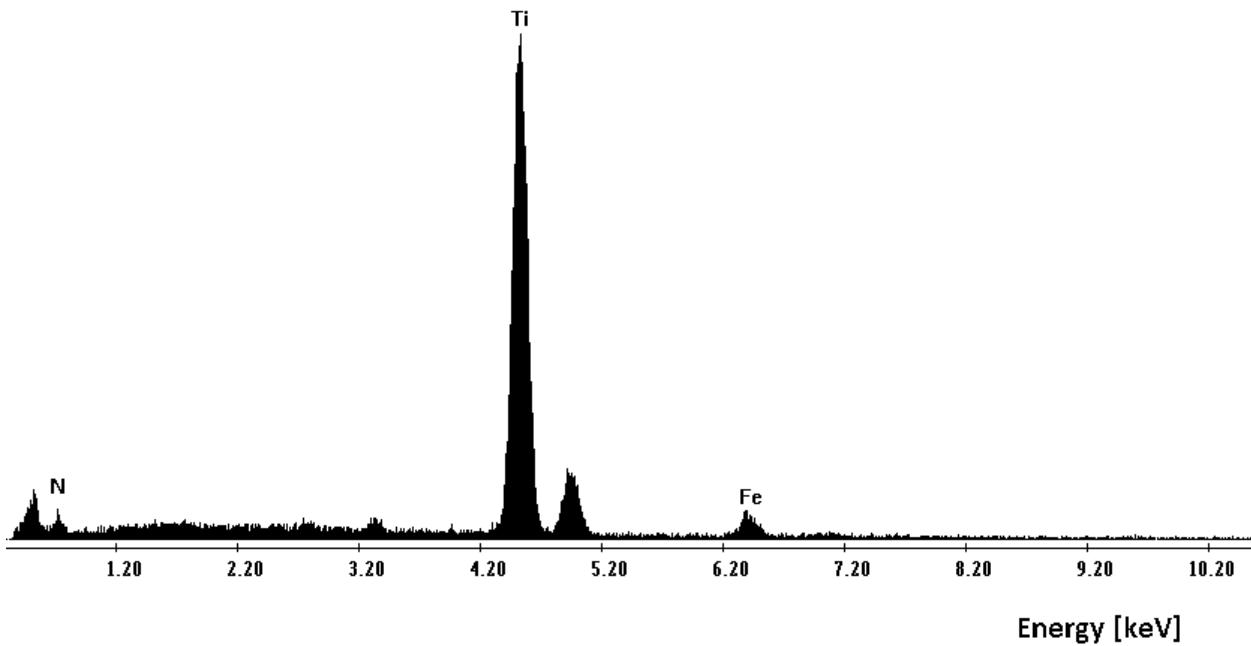
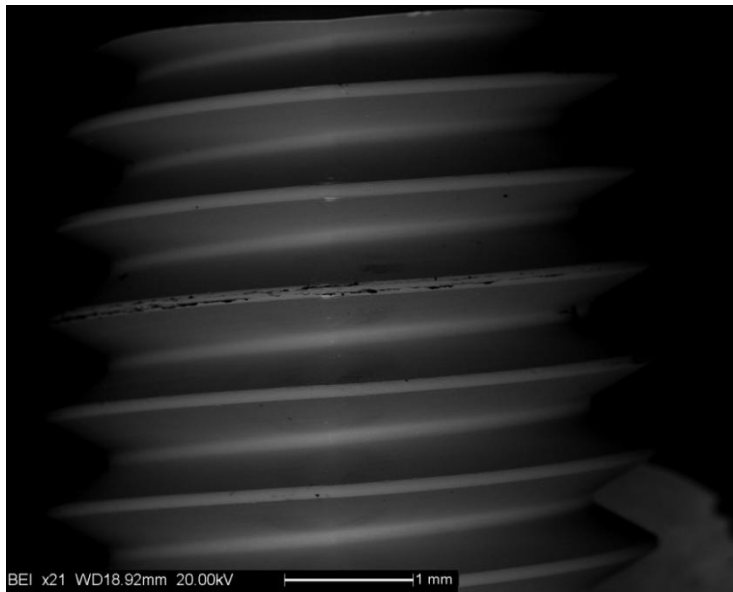


Fig. 5.29: Spettro EDS ottenuto in corrispondenza dell’alone sul fianco del filetto. Si nota un certo contenuto di ferro non presente invece sul rivestimento “vergine”.

CAMPIONE A3 (4500 pezzi prodotti)



Le immagini ottenute da un campione che ha prodotto un numero maggiore di pezzi permettono di descrivere come evolvono i meccanismi di usura. Si ha un evidente danneggiamento sull'apice dei lobi di imbocco (principalmente sul 2° e 3° filetto). Questo si manifesta come un aggravio dei fenomeni di abrasione/solcatura tali da causare l'affioramento dell'acciaio super-rapido sottostante il rivestimento.

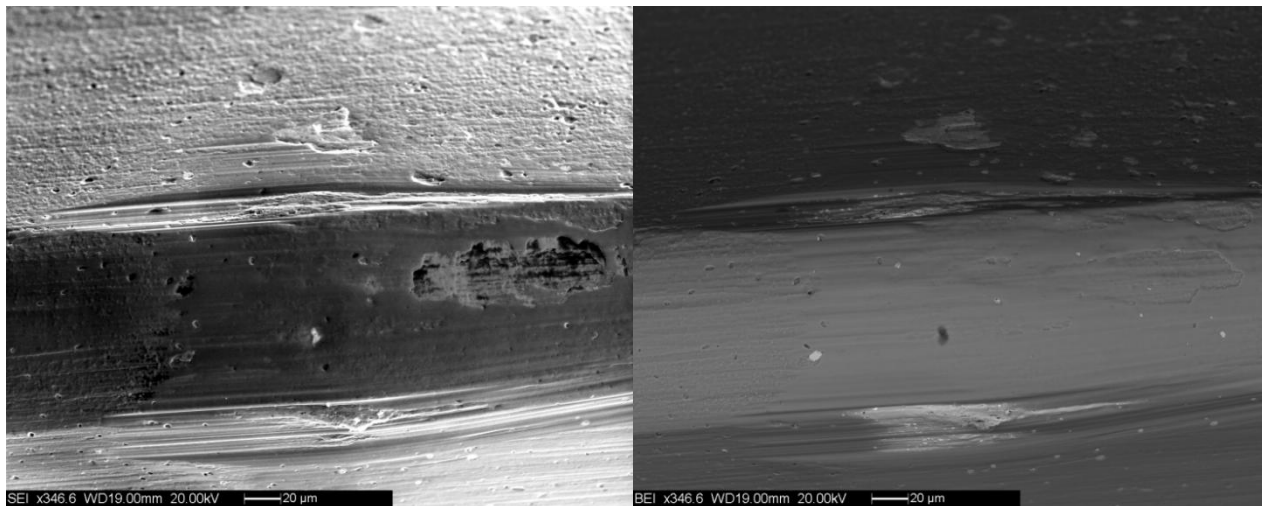


Fig. 5.30: Campione A3_L4-1, macrografia ed ingrandimento in corrispondenza del lobo sul secondo filetto (SEI e BEI)

Nei punti in cui l'HSS-E viene esposto al contatto con il C45 lavorato, l'elevata affinità chimico-fisica tra le due tipologie di acciaio e le elevate pressioni di contatto sviluppate durante la deformazione favoriscono l'instaurarsi di fenomeni di adesione che si manifestano sotto forma di riporti di C45 al di sopra della superficie in HSS-E esposta.

A livello visivo il riconoscimento delle due tipologie di acciaio risulta estremamente semplice in quanto l'acciaio rapido risulta essere estremamente ricco di carburi (che appaiono come puntini bianchi), mentre il C45 ne è completamente privo.

Questa descrizione è ovviamente suffragata da numerose analisi dispersive delle zone corrispondenti:

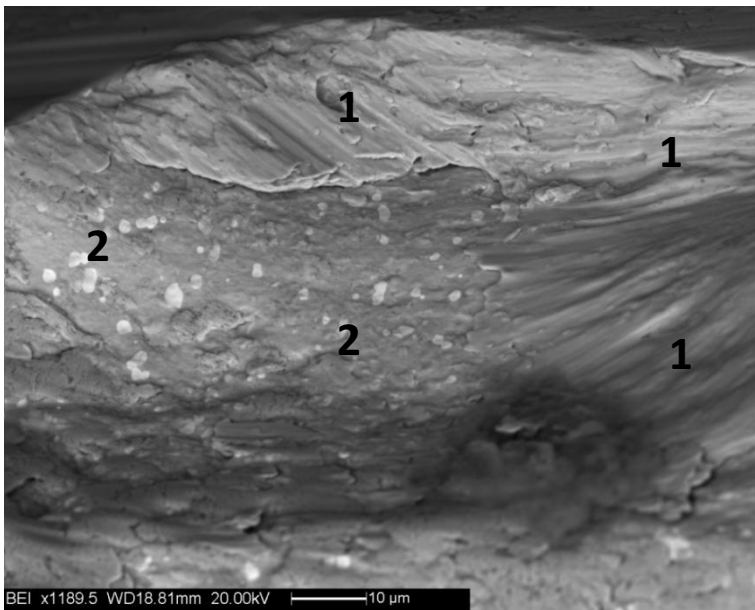


Fig. 5.31: Campione A7_L3-2. Superficie in HSS-E con C45 "spalmato" sopra.

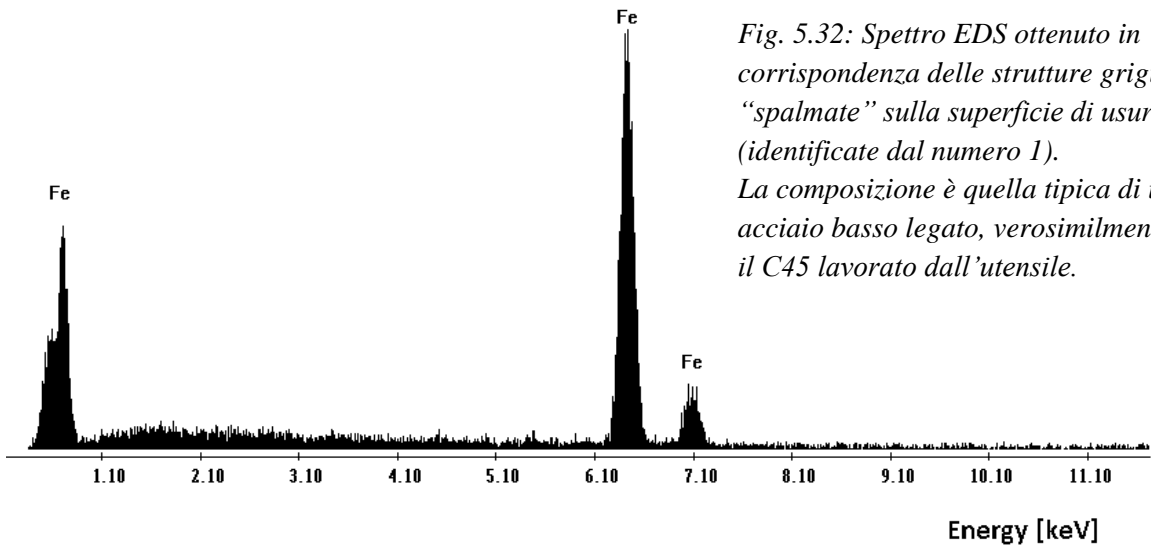


Fig. 5.32: Spettro EDS ottenuto in corrispondenza delle strutture grigie "spalmate" sulla superficie di usura (identificate dal numero 1). La composizione è quella tipica di un acciaio basso legato, verosimilmente il C45 lavorato dall'utensile.

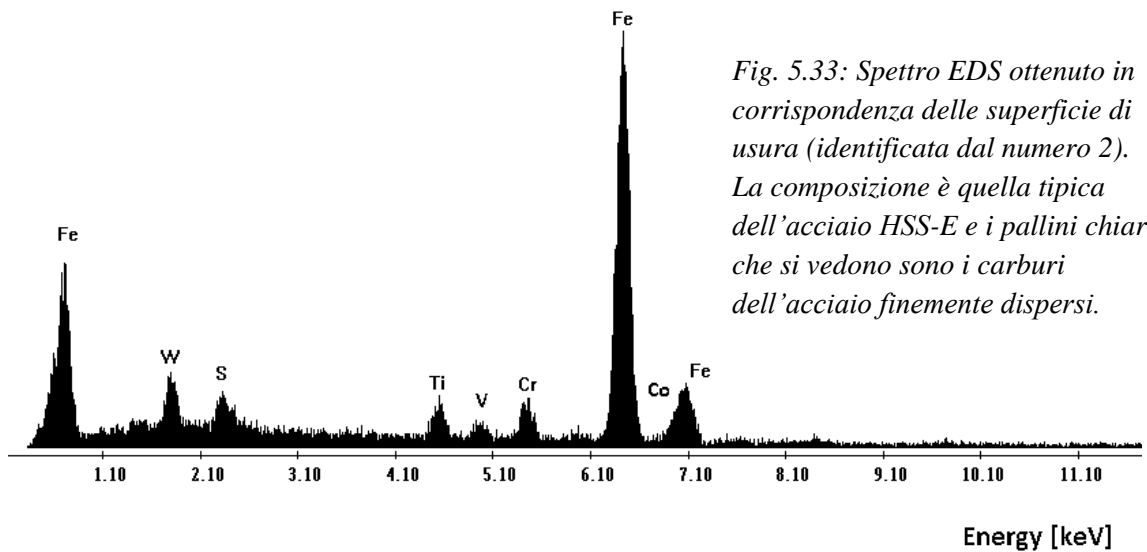


Fig. 5.33: Spettro EDS ottenuto in corrispondenza delle superficie di usura (identificata dal numero 2). La composizione è quella tipica dell'acciaio HSS-E e i pallini chiari che si vedono sono i carburi dell'acciaio finemente dispersi.

I fenomeni di usura procedono, inoltre, riducendo ulteriormente la rugosità della superficie che, nei punti maggiormente sollecitati, risulta lucidata a specchio e aumentando l'estensione e l'intensità degli aloni sui fianchi del filetto.

Sono presenti, anche in questo campione, residui carboniosi che aderendo alla superficie possono in parte modificare il comportamento tribologico della superficie.

Da immagini ottenute a maggiori ingrandimenti si è riscontrata la presenza di alcune cricche sulla superficie smussata del filetto in corrispondenza dei lobi maggiormente sollecitati. Lo sviluppo e la propagazione di queste cricche per effetto delle elevate tensioni a cui è sottoposta la superficie dell'utensile favorisce la successiva scheggiatura della superficie.

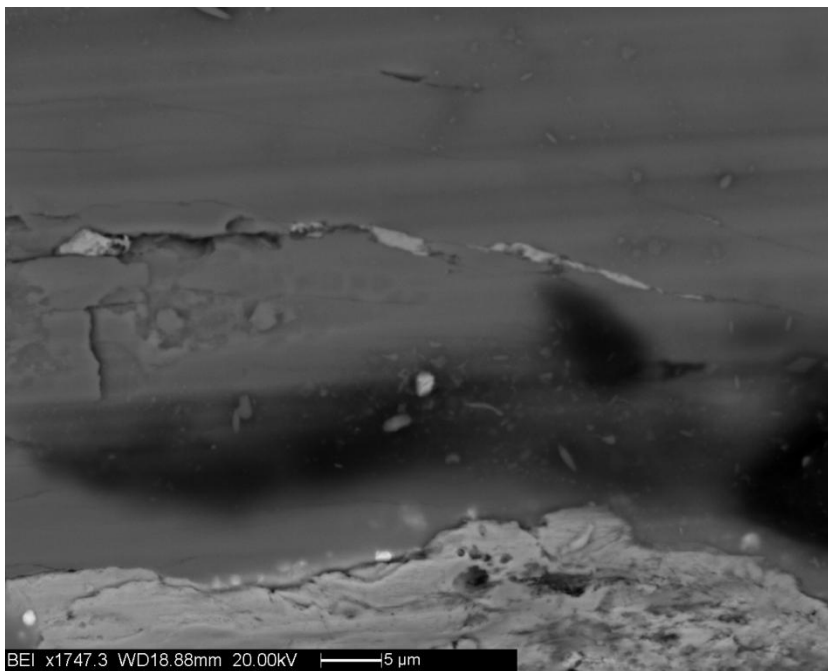


Fig. 5.34: Cricche presenti sulla superficie del lobo in corrispondenza del terzo filetto del campione A3.

Da questa immagine si nota, inoltre, la presenza di residuo carbonioso e in basso di C45 adeso nei punti in cui affiora l'HSS-E.

Del C45 si è insinuato anche all'interno della cricca di dimensioni maggiori.

CAMPIONE A5 (12000 pezzi prodotti)



Fig. 5.35: Campione A5_L4-1, fenomeni di usura in corrispondenza del 2° e 3° filetto.

filetto, all'aumentare del numero di pezzi prodotti si estendono anche sulla superficie dello smusso e, in generale, tendono ad aumentare di profondità facendo emergere l'acciaio rapido sottostante.

Si ripete il meccanismo, già evidenziato, di formazione di strutture adese a base di C45 nei punti in cui il rivestimento è risultato asportato. Questo fenomeno ha conseguenze notevoli sul comportamento tribologico del sistema. Se, infatti, il rivestimento a base TiN manifesta un coefficiente d'attrito relativamente basso e da vita, durante lo strisciamento con la superficie

Andando ad analizzare campioni raccolti dopo aver prodotto un numero via via crescente di pezzi si osserva che l'usura degli utensili procede più rapidamente sui lobi appartenenti al tratto di avvicinamento, mentre i lobi "di calibrazione" subiscono unicamente fenomeni di lucidatura e tribo-ossidativi con formazione dei caratteristici aloni sui fianchi del nocciolo in corrispondenza dei lobi.

Sul secondo e terzo filetto si nota come il meccanismo di usura conservi le caratteristiche precedentemente descritte.

Si ha in corrispondenza dell'apice del lobo una notevole solcatura del rivestimento con formazione di solchi paralleli alla direzione data dalla rotazione. Questi solchi, che nei campioni precedentemente descritti si ritrovavano solo sulla parte superiore del fianco del

lavorata, a fenomeni di usura tribo-ossidativa ed abrasiva caratterizzati da un tasso di usura solitamente modesto, lo strisciamento dei riporti di C45 sulla superficie di analoga composizione peggiora notevolmente le caratteristiche del sistema.

In tali punti il coefficiente d'attrito aumenta notevolmente a causa dell'elevata compatibilità tribologica e la combinazione di questa con le elevate pressioni e temperature in gioco stimola la formazione di microgiunzioni, saldature e trasferimento ulteriore di materiale dal filetto in formazione e la superficie del maschio a rullare.

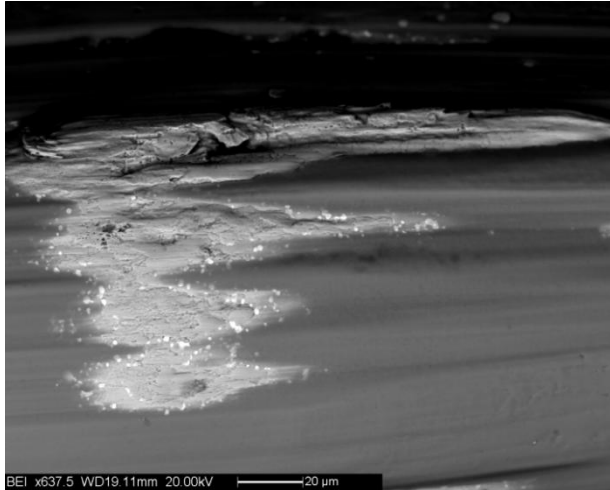


Fig. 5.36: Campione A5, secondo filetto. Solchi profondi che lasciano affiorare l'acciaio rapido sottostante (materiale con carburi bianchi) e la formazione su di esso di riporti in C45.

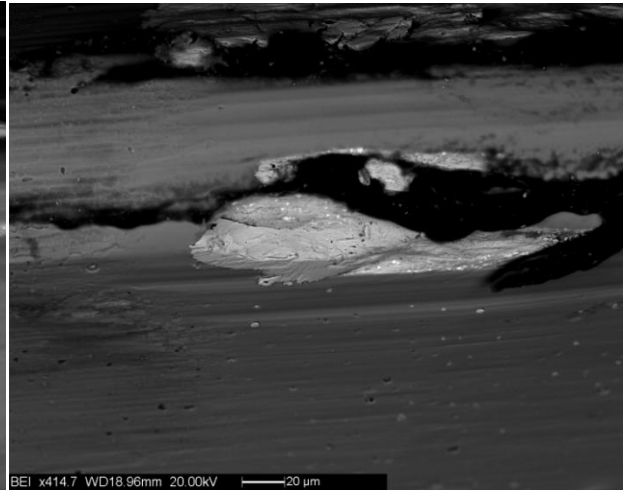


Fig. 5.37: Campione A5, terzo filetto. Lamella in C45 adesa nel punto in cui è affiorato l'HSS-E. Evidente lucidatura del fianco e della cresta del filetto in corrispondenza del lobo e presenza diffusa di residui carboniosi.

CAMPIONE A6 (17000 pezzi prodotti)

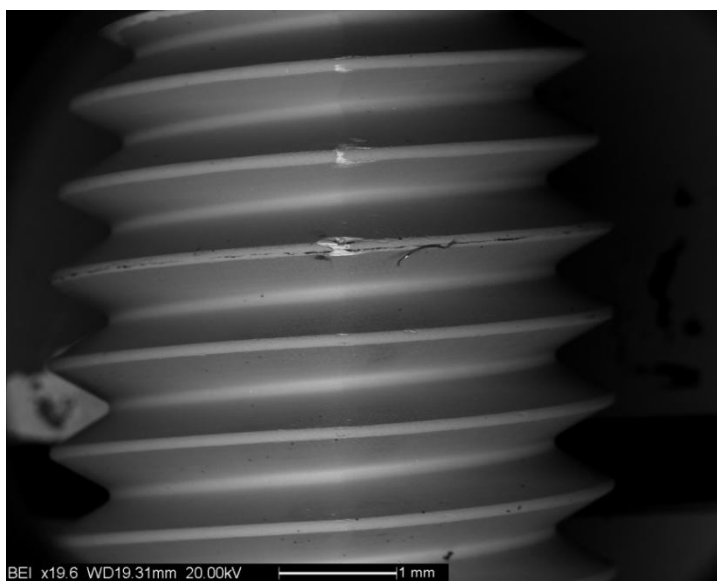


Fig. 5.38: Campione A6_LA-1. 1° e 2° filetto manifestano un danneggiamento simile a quello descritto precedentemente, mentre si ha una notevole scheggiatura sul 3°.

Le modificate condizioni che si vengono a creare sull'apice del lobo portano ad un rapido deterioramento dello stesso con la formazione e asportazioni di frammenti di usura anche di dimensioni notevoli (maggiori di 100 μm).

Questi fenomeni di scheggiatura possono essere spiegati mediante l'azione combinata di meccanismi di usura adesiva e di fatica superficiale.

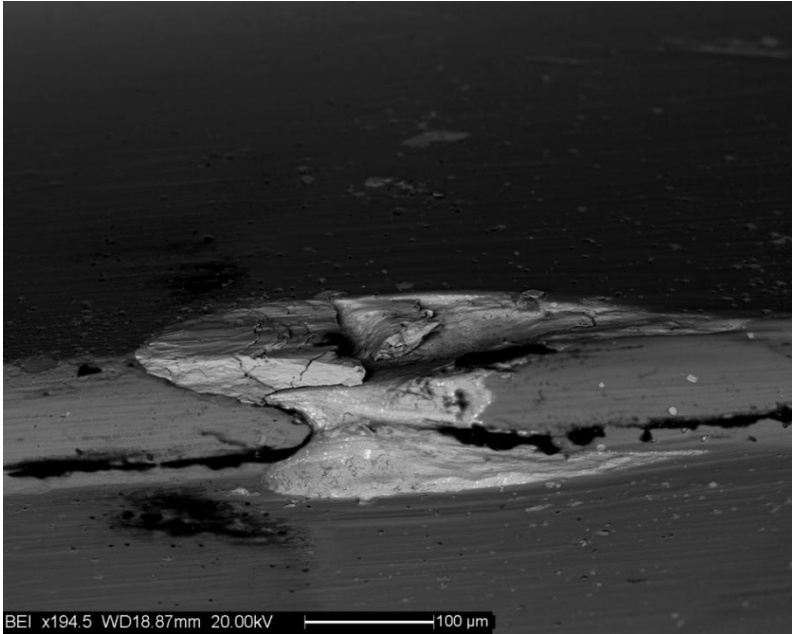


Fig. 5.39: Ingrandimento sulla scheggiatura presente sul 3° filetto. Si intravede la superficie di frattura in acciaio rapido sulla quale va ad aderire il C45.

Quest'ultimo, in particolar modo riempie la cavità formatasi con una struttura a lamelle sovrapposte che riproduce in parte la forma originale del filetto.

Sulla superficie del lobo, infatti, si verrà a creare un complesso stato tensionale dato dagli sforzi di compressione, derivanti dalla penetrazione che l'utensile compie sulla superficie del preforo per realizzare il fondo del filetto, e dagli sforzi di trazione che si vengono a creare in seguito al moto relativo tra l'utensile e il filetto in formazione.

Il moto di strisciamento reciproco nei punti ad elevata compatibilità tribologica porta alla formazione di numerose giunzioni tra i due materiali, immediatamente rotte dagli sforzi di trazione e taglio sviluppati dalla rotazione relativa dei due corpi.

Questi fenomeni che si sviluppano con andamento periodico caratterizzato da un'elevata frequenza favoriscono la nucleazione e propagazione di cricche di fatica fino alla formazione e al distacco di un frammento di usura.

Il danneggiamento per fatica superficiale in regime di lubrificazione fluida avviene solitamente con un meccanismo come quello riportato nella figura a lato.

La cricca nuclea generalmente ad una certa distanza dalla superficie alla quale risulta essere massimo lo stato tensionale (a) come previsto dalla teoria di Hertz.

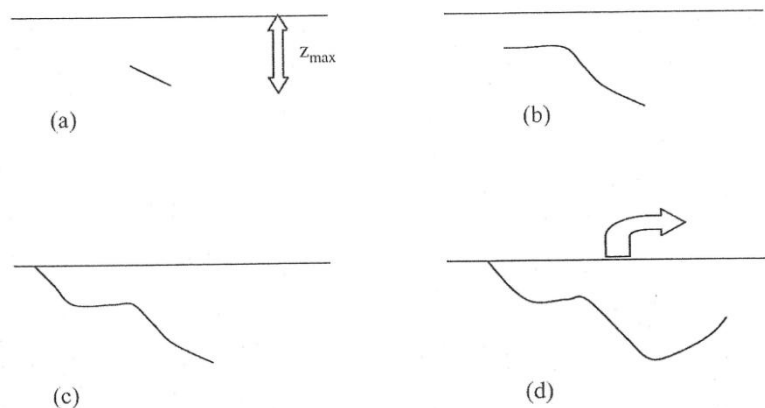


Fig. 5.40: Meccanismo di danneggiamento per fatica superficiale in presenza di lubrificazione fluida.

Questa cricca propaga, poi verso la superficie ed eventualmente parallelamente alla stessa (b) fino a che il materiale tra l'apice della cricca e la superficie risulta talmente indebolito da cedere sotto l'azione degli sforzi in gioco (c).

A questo punto l'olio in pressione presente nella zona di contatto è libero di penetrare all'interno della cricca e favorirne la propagazione anche nell'altra direzione (d), esercitando un'azione di apertura quando rimane intrappolato all'interno della cricca stessa (fenomeno di *spalling*).

La nucleazione delle cricche può avvenire anche a livello superficiale, favorita dagli scorrimenti plastici locali, dal contatto e dalla giunzione delle diverse asperità superficiali dei corpi in strisciamento reciproco. Una delle conseguenze immediate di questo fenomeno è la contaminazione del lubrificante con particelle di acciaio rapido estremamente abrasive.

Finché queste particelle non vengono rimosse dal fluido lubrificante dal sistema di filtrazione, infatti, esse possono insinuarsi all'interno dell'interfaccia di lavoro creando solchi superficiali (come quelli riscontrati sui campioni precedenti), i quali, a loro volta possono fungere da inneschi a nuove cricche di fatica.

In generale la letteratura è concorde nell'affermare che la resistenza alla fatica superficiale di un sistema lubrificato diminuisce al diminuire del fattore lamda.

In un processo, come la maschiatura a rullare, nella quale abbiamo visto si instaura un regime di lubrificazione misto e in cui lo strisciamento induce un aumento di temperatura del lubrificante (e di conseguenza una riduzione della viscosità) l'uso di un lubrificante maggiormente viscoso e dotato di un elevato indice di viscosità (quindi con una viscosità poco sensibile alle variazioni di temperatura) dovrebbe portare ad una riduzione della gravità del fenomeno.

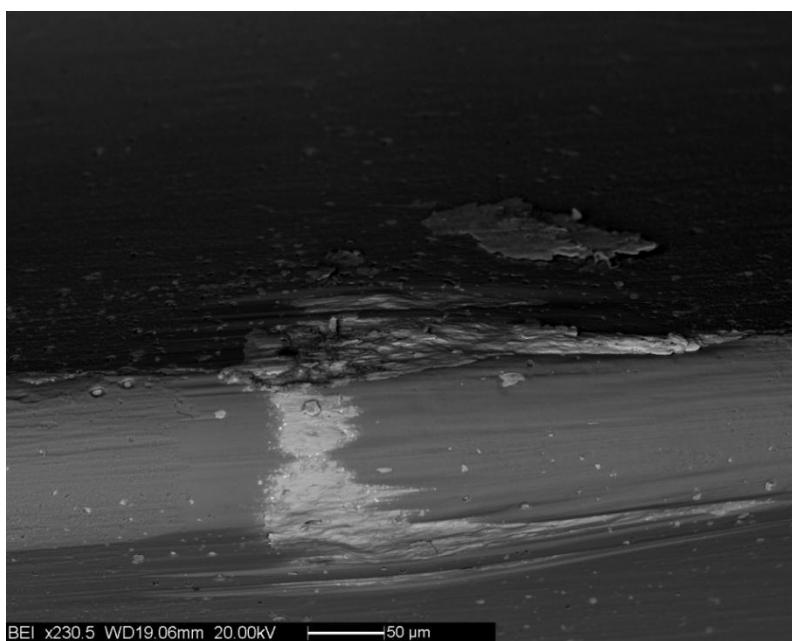


Fig. 5.41: Apice del lobo del 2° filetto.

Il danneggiamento è del tutto analogo a quello descritto nella figura 5.36 anche se ad uno stadio successivo. Nell'immagine sono molto evidenti i fenomeni di lucidatura che interessano il lobo, la solcatura dei fianchi e l'adesione del C45 nei punti in cui affiora l'acciaio rapido. Si nota, inoltre, in corrispondenza della zona usurata, il riempimento delle porosità del rivestimento con particelle di C45 e una lamella dello stesso materiale debolmente adesa al fianco superiore del filetto.

CAMPIONE A7 (26000 pezzi prodotti)

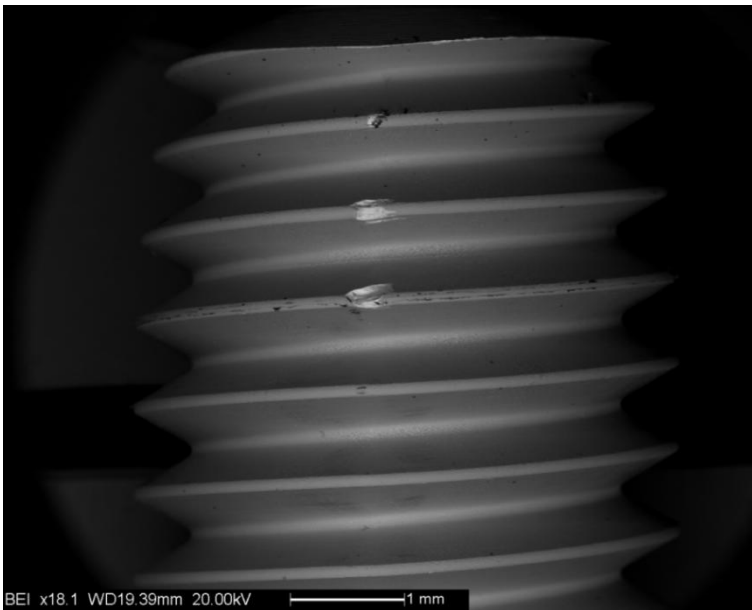


Fig. 5.42: Campione A7_L1-2. Macrografia.

All'aumentare del numero di pezzi prodotti i fenomeni di usura procedono rispecchiando l'andamento a campana evidenziato dai profili di asportazione del rivestimento e, verosimilmente, l'andamento delle sollecitazioni sull'utensile.

L'analisi in sequenza dei campioni, infatti, rispecchia la progressione dell'usura che inizia a manifestarsi inizialmente sul 3° filetto e si propaga, poi, anche sui restanti lobi di imbocco.

Come si vedrà, solo dopo aver raggiunto un certo grado di danneggiamento sui lobi d'imbocco, i fenomeni di usura propagano sui filetti di calibrazione. Nell'immagine è evidente come il primo filetto si trovi ancora al primo stadio di usura (solcatura e adesione di C45 dove compare l'HSSE), mentre il 2° e 3° filetto risultano scheggiati.

Sul 4° filetto il rivestimento inizia a manifestare una prima forma di danneggiamento.

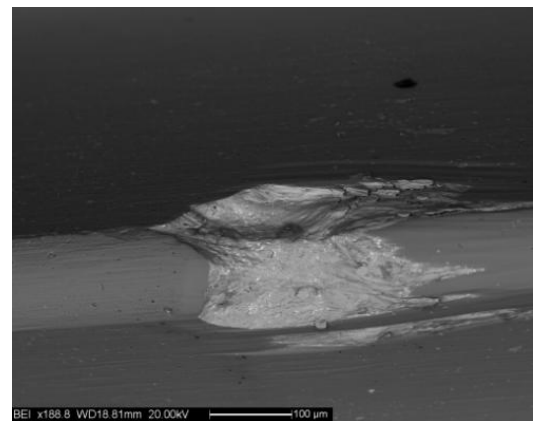
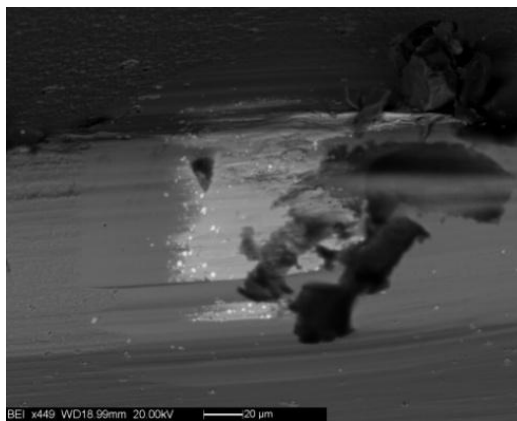
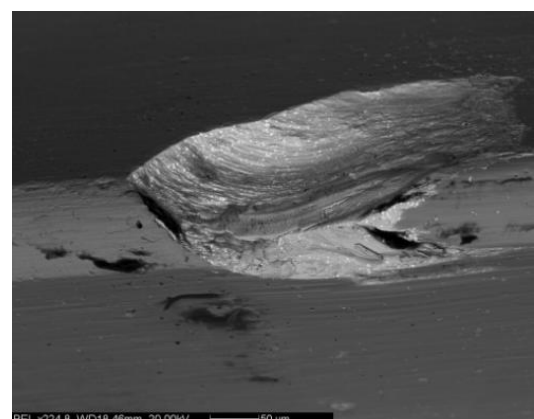


Fig. 5.43: Superficie usurata in corrispondenza del lobo rispettivamente del 1°, 2° e 3° filetto.

In corrispondenza della superficie di frattura sul 2° filetto si ha l'adesione di strutture in C45 a lamelle sovrapposte, mentre la superficie di frattura sul 3° filetto è ancora relativamente pulita (soprattutto sul tratto a maggior pendenza) e presenta una topografia a superficie scabra e solchi paralleli alla direzione di rotazione generata dalla propagazione a fatica della cricca.



CAMPIONE A8 (102095 pezzi prodotti)

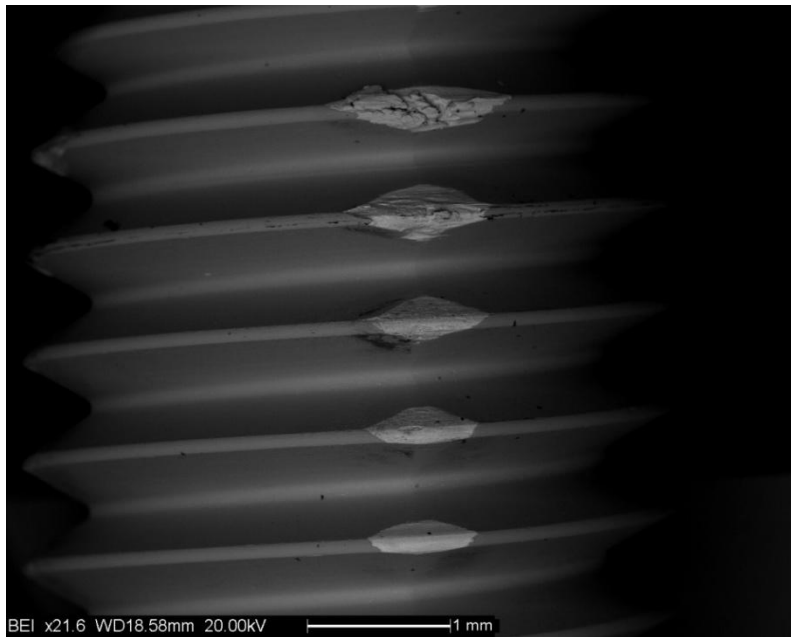


Fig. 5.44: Campione A8_L1-2. Macrografia della superficie dell'utensile a fine vita.

Si nota la propagazione dei meccanismi di usura sui lobi di calibrazione dal 3° al 7° filetto.

I lobi più lontani diminuiscono i fenomeni di scheggiatura e adesione per lasciare posto ad una superficie in cui il rivestimento è abraso e genera una superficie in HSS-E relativamente liscia e pulita. Ciò può essere implicato alle minori tensioni che risente l'utensile nel tratto di calibrazione rispetto ai filetti in cui va ad operare la maggior parte della deformazione.

Analizzando la superficie del maschio rullare a fine vita, si nota un danneggiamento esteso del rivestimento che si propaga sui filetti di calibrazione successivi al tratto di imbocco.

Il meccanismo di usura varia man mano che si procede dai lobi di imbocco verso i lobi successivi. In particolar modo, sul terzo filetto si ha una scheggiatura estesa con formazione di una struttura a lamelle sovrapposte in C45 che riproduce in parte la forma del filetto precedente la frattura. Sui

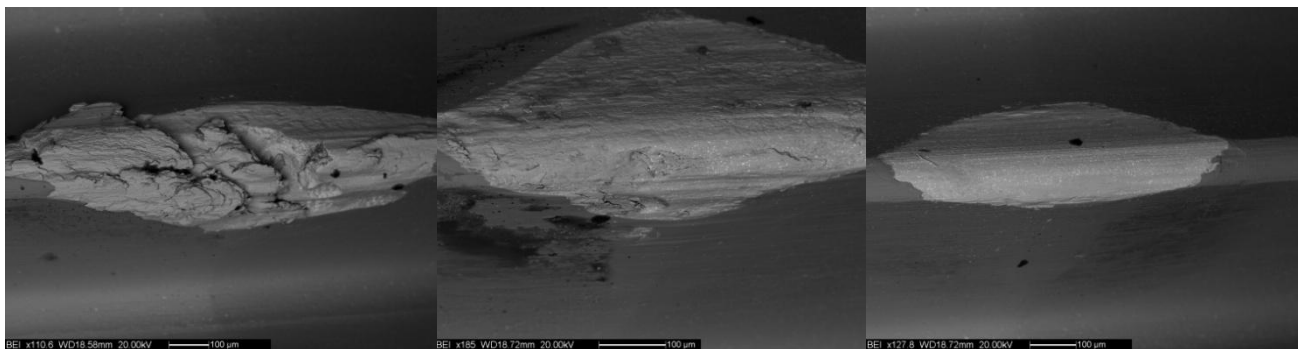


Fig. 5.45: Variazione della superficie di usura al progredire lungo il profilo poligonale.

Da destra verso sinistra sono riportate le micrografie ottenute in corrispondenza del 3°, 5° e 7° lobo.

5.3 Ipotesi proposte per l'ottimizzazione del processo

Partendo dall'osservazione preliminare del processo eseguito nelle condizioni standard, ma soprattutto dall'analisi degli utensili del GRUPPO A sono state formulate delle ipotesi di miglioramento in risposta alle singole cause che concorrono alla riduzione della vita degli utensili.

Si è visto come l'operazione di filettatura fuoriesca dal range di conformità in seguito alla progressione dell'usura sui lobi dei maschi a rullare.

In particolar modo, l'usura risulta critica sui lobi finali del tratto conico di imbocco, in quanto, ad essi è affidato il compito di realizzare la maggior parte della deformazione del materiale.

In queste regioni gli utensili sono sottoposti alle sollecitazioni maggiori e, di conseguenza, vi si realizzano le peggiori condizioni tribologiche da cui derivano i fenomeni di usura più gravi.

Si nota, infatti, dall'osservazione degli utensili del gruppo A come, quando i lobi corrispondenti al tratto finale dell'imbocco si usurano eccessivamente, il lavoro di deformazione viene concentrato man mano sui lobi successivi (porzione iniziale del tratto di guida cilindrico).

Questi perdono, a loro volta, lo scopo di mera calibrazione del filetto, risentono di sollecitazioni via via maggiori le quali fanno progredire rapidamente i fenomeni di usura anche su questi filetti.

Ciò porta il filetto prodotto ad uscire dal range di tolleranza dimensionale.

È chiaro che, maggiori sono le pressioni che si sviluppano localmente sui lobi, più gravi saranno i fenomeni di usura che essi risentono. Si può, per tanto, pensare di adottare alcune modifiche tali da diminuire le pressioni in gioco nel processo di deformazione:

- **AUMENTARE IL NUMERO DI FILETTI DI IMBOCCO**: il passaggio da una forma di imbocco C/2-3 a forme di imbocco più gradualì, ad esempio la D/3,5-5, permetterebbe di distribuire il lavoro di deformazione su un numero maggiore di lobi, riducendo notevolmente le pressioni e verosimilmente la velocità di usura.

Tale soluzione è, tuttavia, assente nel mercato nelle dimensioni M5-6GX e, di conseguenza, non può essere adottata. I produttori di maschi a rullare sono, infatti, spinti dal mercato a produrre maschi dagli imbrocchi particolarmente rapidi (in commercio si trovano quasi esclusivamente maschi a rullare con imbocco C) per soddisfare le esigenze di produttività richieste alla rullatura.

- **AUMENTARE IL NUMERO DI LOBI**: l'adozione di sezioni con forme poligonali dal numero di lati maggiore dovrebbe allo stesso modo distribuire il lavoro di deformazione su una superficie di contatto maggiore permettendo di ridurre gli stati tensionali prodotti.

Anche in questo caso, tuttavia, il mercato non offre alternative essendo diffusi unicamente utensili a 4 lobi nelle dimensioni richieste.

Vari produttori offrono la possibilità di ordinare maschi non a catalogo di geometria (forma d'imbocco, numero dei lobi...) a discrezione del cliente. Tale soluzione non è, tuttavia, praticabile essendo del tutto antieconomica.

L'incremento di durata previsto per gli utensili nelle più rosee aspettative, infatti, non potrebbe giustificare l'adozione di utensili dal costo 2-3 volte superiore a quelli in uso attualmente.

- MODIFICARE IL PROFILO POLIGONALE: a parità di numero di lobi la geometria del profilo poligonale influisce notevolmente sul comportamento a deformazione del materiale.

Tanto più i profili di pressione hanno una forma che tende a quella del cerchio circoscritto, più il lavoro di deformazione è distribuito su una superficie di contatto più ampia diminuendo le sollecitazioni sull'utensile.

Ciò causa, tuttavia, un incremento dei fenomeni di attrito e generalmente, fa aumentare la coppia richiesta dal processo. Maggiore attrito corrisponde, inoltre, a maggiore energia dissipata sotto forma di calore con conseguente innalzamento della temperatura del sistema.

All'opposto profili poligonali che risultino avere lobi più appuntiti realizzano deformazioni più rapide e localizzate, il che porta ad avere dei picchi di pressione elevati, in quanto, gli sforzi sono distribuiti su un'area ridotta.

Una forma siffatta ha, per giunta, lo svantaggio di usurarsi rapidamente e essendo minore il materiale che effettivamente occupa un diametro utile nella lavorazione, tali utensili realizzano prodotti fuori tolleranza dimensionale già a valori di usura inferiori.

Lo studio di quale sia la forma poligonale che massimizzi la prestazione per un dato caso specifico richiede, tuttavia, la realizzazione di modellazioni estremamente complesse vista l'enorme quantità di variabili in gioco, il che esula lo scopo di questa tesi.

A sostegno di questa considerazione si ha, inoltre, l'impossibilità di esercitare una qualche forma di controllo sulla geometria del profilo poligonale e, di fatto, sulla forma della superficie che imprime il filetto, essendo questa variabile un know-out esclusivo e non condiviso dai singoli produttori di utensili a rullare.

Non si ha, per tanto, la possibilità di scegliere sul mercato degli utensili piuttosto che altri in base a tali considerazioni.

Altre soluzioni possibili per aumentare la durata degli utensili si possono ricercare nei parametri di lavorazione stessa a parità di utensile utilizzato:

- DIMINUIRE LA VELOCITÀ PERIFERICA: diminuire la cosiddetta velocità di taglio (nella maschiatura a rullare sarebbe più corretto parlare di velocità di deformazione o di velocità periferica) porterebbe ad inequivocabili vantaggi in termini di durata dell'utensile.

Ciò deriva principalmente dal fatto che un materiale metallico oppone tanta più resistenza alla deformazione quanto più velocemente essa viene realizzata e, di conseguenza, la diminuzione della velocità di taglio comporterebbe una diminuzione delle sollecitazioni subite dall'utensile durante la deformazione. Riducendo la velocità di lavorazione si avrebbe, inoltre, un minore incremento della temperatura del sistema con i conseguenti effetti benefici sul comportamento ad usura degli utensili.

Non si deve, tuttavia, dimenticare l'elevata frequenza produttiva richiesta alla rullatura che, nel nostro caso, utilizza già valori di velocità periferica al limite per garantire una sufficiente economicità del processo.

- AUMENTARE LA CORSA DELL'UTENSILE: questa soluzione permetterebbe di utilizzare un maggior numero di filetti dell'utensile nella fase di calibratura e, quindi, agli utensili di produrre pezzi conformi anche ad usure più avanzate dei primi filetti.

Si avrebbe, infatti, una minore sensibilità del processo ai fenomeni di danneggiamento dei lobi di imbocco il cui compito sarebbe progressivamente sopperito dai filetti successivi.

Questa risulta essere, tuttavia, una soluzione che mal si sposa con le considerazioni fatte precedentemente sulla necessità di avere un processo estremamente rapido per essere sufficientemente economico.

Aumentare la corsa dell'utensile, a parità di velocità di taglio, comporta, infatti, un notevole aumento dei tempi di lavorazione, ricordando che l'utensile dovrebbe coprire una maggiore distanza sia nella fase di avanzamento che di ritorno.

- AUMENTARE LA DIMENSIONE DEL PREFORO: ciò riduce la quantità di materiale da deformare e di conseguenza le pressioni in gioco. Tuttavia, come già descritto nel paragrafo relativo, se il preforo è troppo grande il nocciolo del filetto può non essere sufficientemente deformato e non soddisfare le caratteristiche di resistenza meccanica richieste dalla prova di tenuta. L'assenza di materiale sufficiente a formare completamente il filetto porta, inoltre, allo sviluppo di graffe (artigli) di dimensioni eccessive, tali da generare problemi in fase di avvitatura, soprattutto se realizzata con avvitatori automatici.

Il fatto che, già con la dimensione del preforo in uso attualmente, si generi una graffa evidente sulla sommità del filetto porta a sconsigliare tale soluzione, senza parlare dell'onere

economico che la variazione della dimensione del preforo comporterebbe (sostituzione dei punzoni di tranciatura e degli stampi di imbutitura nella pressa a monte).

Tutte queste soluzioni risultano per tanto impraticabili. Le sollecitazioni che il processo deformazione esercita sull'utensile sono, di conseguenza, da considerare come parametro imm modificabile del sistema.

Le soluzioni in grado di diminuire la gravità dei fenomeni di usura dovranno essere, di conseguenza, ricercate modificando altre variabili del sistema tribologico.

Tra queste si possono, ad esempio, individuare tutte quelle soluzioni che comportino l'aumento della resistenza ad usura dell'utensile.

A tal proposito occorre ricordare come ad ormai tutti gli utensili venga applicato un rivestimento superficiale sottile (mediante tecnologia PVD o CVD) in grado di migliorare notevolmente le proprietà dei substrati.

In tutte quelle applicazioni in cui la vita utile di un utensile sia limitata da un insieme di meccanismi di usura la possibilità di azione volta al miglioramento dell'efficienza risulta essere duplice:

- SCelta DI UN RIVESTIMENTO SUPERFICIALE ADATTO: che permetterebbe di ostacolare i meccanismi di usura principalmente nella fase relativa al primo stadio individuato. Tanto più a lungo il film sottile depositato sulla superficie dell'utensile riesce a mantenersi integro ed adeso al substrato, tanto più verranno ritardati i fenomeni di usura sul materiale sottostante, permettendo di produrre, nel caso specifico del maschio a rullare, un maggior numero di filettature conformi.

Negli ultimi anni si sono diffusi a livello industriale un grande numero di rivestimenti antiusura con lo scopo di incrementare la vita degli utensili (dal 200 al 500%), migliorare la produttività (velocità di taglio aumentate fino al 150%) e la qualità delle superfici lavorate.

L'azione benefica che tali film sottili (dello spessore di alcuni micrometri) svolgono sul substrato metallico sottostante può essere riassunta nei seguenti punti:

- riduzione delle forze di attrito tra utensile e materiale lavorato (bassi coefficienti di attrito anche in assenza di lubrificazione);
- limitazione delle interazioni chimico-fisiche all'interfaccia utensile-materiale lavorato (composizione ceramica) e, di conseguenza, minori effetti di trasferimento di materiale in seguito a microsaldature o altri meccanismi di usura adesiva;
- maggiore resistenza ai fenomeni di abrasione conferita dall'elevata durezza del film superficiale;

- maggiore resistenza alle elevate temperature, ai fenomeni di ossidazione e protezione del materiale sottostante dall'innalzamento della temperatura grazie a buone caratteristiche di refrattarietà del rivestimento;

Il rivestimento più comunemente diffuso è, ancora al giorno d'oggi, quello a base TiN, ma le esigenze di mercato stanno spingendo i costruttori di impianti PVD-CVD e i centri di ricerca specializzati alla messa a punto di rivestimenti superficiali con caratteristiche sempre più elevate in termini di resistenza ad usura e a corrosione, di durezza e con minori coefficienti di attrito ad alte temperature.

La tabella sottostante riporta le caratteristiche dei rivestimenti più comunemente diffusi, anche se il settore è in continua e rapida evoluzione per cui sul mercato si ritrovano molte altre soluzioni brevettate dai singoli produttori.

Bisogna, altresì ricordare che le prestazioni di un dato rivestimento a parità di composizione nominale possono variare significativamente da produttore a produttore, a seconda dei parametri di deposizione adottati, della preparazione superficiale e degli eventuali trattamenti intermedi o finali.

Composizione	Microdurezza HV (0,05)	Coefficiente di attrito su acciaio (a secco)	Spessore (µm)	Temperatura massima di esercizio (°C)	Colore indicativo
TiN	2300	0,4	1÷5	600 °C	Giallo-oro
TiCN	3000	0,4	1÷5	400 °C	Grigio-blu
CrN	1750	0,5	1÷4	700 °C	Grigio-argento
TiAlN	3300	0,30÷0,35	1÷6	900 °C	Viola-grigio
WC-C	1000	0,1÷0,2	1÷4	300 °C	Antracite
DLC	>8000	0,15÷0,20	4÷6	600 °C	Grigio

Tabella XXV: Proprietà dei film superficiali sottili ottenuti tramite deposizione da fase vapore più comunemente diffusi.

L'evoluzione dei sistemi di rivestimento ha, inoltre, come tendenza, quella di sostituire i rivestimenti costituiti da singoli film con rivestimenti multistrato, in cui i diversi layer hanno, sempre più, composizione chimica differente, in modo tale da combinare sinergicamente le proprietà dei diversi materiali.

Questa tecnica permette di conferire al rivestimento migliori caratteristiche di tenacità e di adesione al substrato.

Le nuove frontiere di ricerca nel campo dei rivestimenti sono proiettate all'uso sempre maggiore di rivestimenti superlattices e nanocristallini compositi.

Tra i vari rivestimenti proposti è presente anche il DLC (Diamond Like Carbon), che pur presentando prestazioni superiori, non è adatto alla lavorazione di materiali ferrosi risultando essere altamente solubile in essi.

Un cenno a parte meritano, infine, quei rivestimenti a cui sia aggiunto uno strato esterno autolubrificante. Questi strati sono principalmente a base di bisolfuro di molibdeno e riescono a combinare contemporaneamente un basso coefficiente d'attrito ($0,05 \div 0,01$), una bassa durezza (50 HV) e un'ottima resistenza all'ossidazione alta stabilità termica (fino a 800°C).

Le proprietà autolubrificanti derivano dalla struttura esagonale lamellare del MoS_2 con forze coesive molto forti all'interno delle lamelle, ma deboli tra i diversi piani, dando vita ad un meccanismo lubrificante del tutto simile a quello realizzato dalla grafite.

Il minimo spessore di apporto con cui si riesce a depositare questa tipologia di film (0,5 μm) permette, inoltre, di rivestire utensili senza modificare la geometria degli stessi e manifesta le migliori prestazioni in abbinamento con un film duro ottenuto tramite PVD.

La letteratura riporta numerose esperienze ottenute usando riporti duplex a base TiN, TiCN o TiAlN con un film esterno autolubrificante a base di MoS_2 e in tutti i casi si sono ottenuti miglioramenti della durata degli utensili rispetto ai rivestimenti monolayer in qualunque condizione di lubrorefrigerazione testata.

Tuttavia, nonostante l'ampia gamma di rivestimenti proposta dai produttori di maschi a rullare, la possibilità di sperimentare tipologie di rivestimento alternative a quelle classiche a base TiN si è scontrata con la particolare classe di tolleranza richiesta agli utensili in uso nella produzione sotto studio.

La politica comune dei vari produttori di maschi a rullare è risultata, infatti, essere quella di proporre a catalogo prodotti rivestiti con film sottili di nuova generazione solo per quegli utensili di dimensione e classe di tolleranza per cui è alta la richiesta di mercato.

Al contrario l'offerta di prodotti a catalogo è risultata estremamente povera per maschi a rullare M5-6GX.

Unica alternativa possibile potrebbe essere quella di richiedere al produttore maschi con caratteristiche "speciali fuori catalogo" che in quanto tali risultano essere non solo più costosi (e di conseguenza meno convenienti in termini di economicità del processo) ma, soprattutto, hanno tempi di attesa di evasione dell'ordine improponibili allo svolgimento dell'attività di tesi.

Non si esclude tuttavia la possibilità di sfruttare i risultati ottenuti da questo lavoro come base per ulteriori sperimentazioni future.

- SCelta DI UN SUBSTRATO ADATTO: dalle osservazioni effettuate sui meccanismi di usura coinvolti è chiaro come le proprietà del materiale con cui è realizzato l'utensile diventano fondamentali, per garantire la maggior durata possibile dello stesso quando il rivestimento protettivo viene asportato dai meccanismi di usura.

Al verificarsi di tali condizioni, di conseguenza, tanto maggiore sarà la resistenza ad usura del substrato, tanto più l'utensile potrà continuare a produrre pezzi conformi prima di essere definitivamente sostituito.

Si deve, per tanto, orientare la ricerca verso quei materiali base che presentino caratteristiche tali da contrastare il più possibile i fenomeni di usura.

Da anni è comune la prassi di realizzare utensili altamente sollecitati, quali i maschi a rullare, in acciaio rapido (HS) o super-rapido (HSS).

Sono acciai ad elevatissimo rendimento particolarmente adatti a realizzare utensili non soggetti ad urti a cui sono richieste elevate velocità di taglio. La loro composizione è caratterizzata da contenuti di C e Cr generalmente costanti (rispettivamente $\approx 1\%$ e $\approx 4\%$) e da 4 elementi in lega caratteristici in quantità variabile che conferiscono alla lega diverse proprietà:

- W \rightarrow aumenta la rinvenibilità e la resistenza ad usura dell'acciaio facilitando la precipitazione di carburi estremamente duri finemente dispersi (durezza secondaria);
- Mo \rightarrow migliora plasticità e la tenacità del materiale;
- V \rightarrow aumenta resistenza ad usura essendo un altro elemento formatore di carburi;
- Co \rightarrow è l'elemento che distingue gli acciai super-rapidi, permette trattamenti di tempra a partire da temperature superiori e migliora la resistenza al calore.

Ne deriva un materiale che presenta proprietà di elevata durezza e tenacità, elevata rigidità ed elevata resistenza meccanica, elevata resistenza ad usura, elevata resistenza alla fatica meccanica, alla fatica termica e agli shock termici.

I maschi a rullare più diffusi in commercio sono realizzati in acciaio HSS-E, un particolare tipo di acciaio super-rapido appositamente studiato per migliorare la resistenza ad usura in condizioni di lavorazione severa e con un elevato contenuto di Co che conferisce una maggiore durezza alle alte temperature.

Infatti, mentre in un acciaio rapido come l'HS 6-5-3 (M3) l'elevato contenuto di vanadio garantisce elevata resistenza ad usura a basse velocità di taglio, in uno super-rapido come l'HS 2-9-1-8 (M42) la resistenza ad usura è ulteriormente incrementata non solo dalla presenza dei carburi, ma, anche, dalla maggiore durezza della matrice stessa conferita dagli elevati tenori di molibdeno e cobalto.

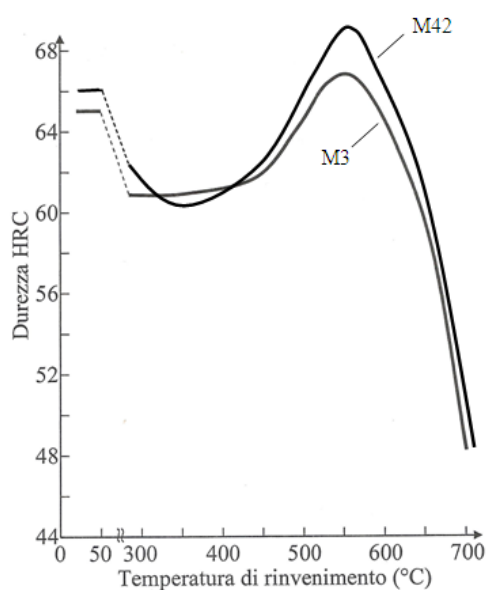


Fig. 5.46: Diagramma di rinvenimento degli acciai AISI M3 e M42 secondo UNI EN ISO 4957.

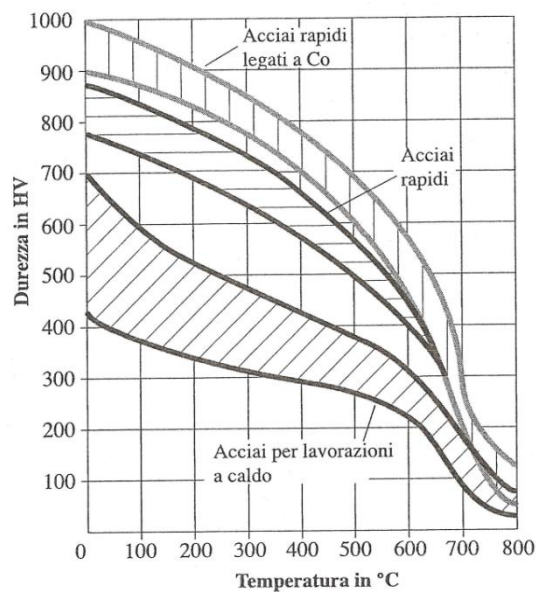


Fig. 5.47: Durezza in funzione della temperatura degli acciai rapidi e degli acciai per lavorazioni a caldo.

ACCIAIO	C	W	Mo	V	Co	Cr	Si
HS 6-5-3	1,15÷1,25	5,90÷6,70	4,70÷5,20	2,70÷3,20	\	3,80÷4,50	≤0,45
HS 2-9-1-8	1,05÷1,15	1,20÷1,90	9,00÷10,00	0,90÷1,30	7,50÷8,50	3,50÷4,50	≤0,70

Tabella XXVI: Limiti di composizione chimica percentuale negli acciai super-rapidi comunemente usati nella realizzazione dei maschi a rullare.

La necessità di poter realizzare utensili con elevatissima resistenza all'usura sta, tuttavia, spingendo i produttori di maschi all'adozione di nuove tipologie di substrato, quali acciai rapidi ottenuti tramite metallurgia delle polveri (PM) o metallo duro.

Nel primo caso la metallurgia delle polveri è diventata uno dei processi più importanti per la fabbricazione di acciai da utensili ad elevatissime prestazioni grazie ai vantaggi che questi acciai presentano rispetto a quelli ottenuti tramite metodi tradizionali.

Gli acciai rapidi PM, infatti, grazie alla rapida solidificazione delle polveri atomizzate non presentano alcuna segregazione (al contrario di quelli convenzionali), mentre sono dotati di una microstruttura finissima con distribuzione uniforme dei carburi e delle inclusioni non metalliche.

Questo fa sì che, pur utilizzando gli stessi trattamenti termici di base dei corrispondenti acciai prodotti convenzionalmente, la risposta degli acciai PM ai vari TT sia più rapida e riproducibile.

Possono per giunta essere temprati e rinvenuti ad una durezza maggiormente elevata, il che assicura un'elevata resistenza ad usura.

La resistenza all'usura, infatti, dipende generalmente dalla durezza e dal tipo, volume e forma dei carburi primari presenti nella matrice. A tal fine, la maggiore durezza ottenibile con gli acciai rapidi PM, per la quantità di carburi che si possono introdurre in questi acciai, costituisce un significativo vantaggio rispetto agli acciai rapidi convenzionali.

La resistenza al rinvenimento e la durezza a caldo dipendono dalla crescita dei carburi indurenti secondari promossa dal tungsteno, vanadio, molibdeno e cobalto.

Questi elementi possono essere aggiunti in più alta concentrazione agli acciai PM senza caduta di altre proprietà.

La microstruttura fine garantisce, inoltre, proprietà migliorate per quanto riguarda la lavorabilità, la rettificabilità e la stabilità dimensionale durante il trattamento termico.

Gli acciai rapidi PM mostrano, infine, migliore tenacità e duttilità a freddo, migliore resistenza meccanica e minore sensibilità a fenomeni di fatica termica.

L'adozione di maschi a rullare basati su questa tecnologia produttiva potrebbe, viste le premesse, portare ad un incremento nella durata rispetto a utensili realizzati in acciai rapidi convenzionali.

Altro incremento di produttività potrebbe, invece, derivare dall'adozione di utensili fabbricati con substrato in metallo duro.

Gli acciai rapidi, infatti, per quanto prestanti, hanno limiti notevoli per quanto riguarda la resistenza a meccanica e durezza soprattutto a temperature elevate. Di conseguenza la loro efficacia è limitata nel caso di elevate velocità di taglio che realizzano fenomeni tali da ridurre la durata.

Al contrario il metallo duro mantiene la sua durezza (superiore a quella degli acciai rapidi già a T ambiente) in un campo di temperature più vasto garantendo una inferiore sensibilità alle alte velocità di lavorazione richieste agli utensili.

Questo deriva dalla natura del materiale che nelle versioni più comuni è un materiale composito sinterizzato contenente particelle di carburo di tungsteno (WC) legate assieme in

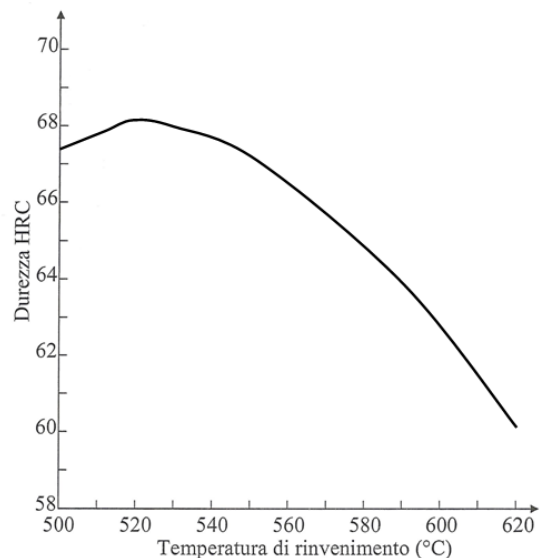


Fig. 5.48: Diagramma di rinvenimento dell'acciaio HS 6-5-3-8 PM30 (VANADIS 30) temperato a partire da $T_{ac3}=1180$ °C.

una matrice metallica di cobalto. A tale composizione base possono venire poi aggiunti carburi di diverso tipo (titanio, niobio, tallio, molibdeno, vanadio...) per impartire proprietà particolari all'utensile.

Le due variabili più influenti risultano essere, tuttavia, la concentrazione di legante (Co) e la dimensione della grana cristallina.

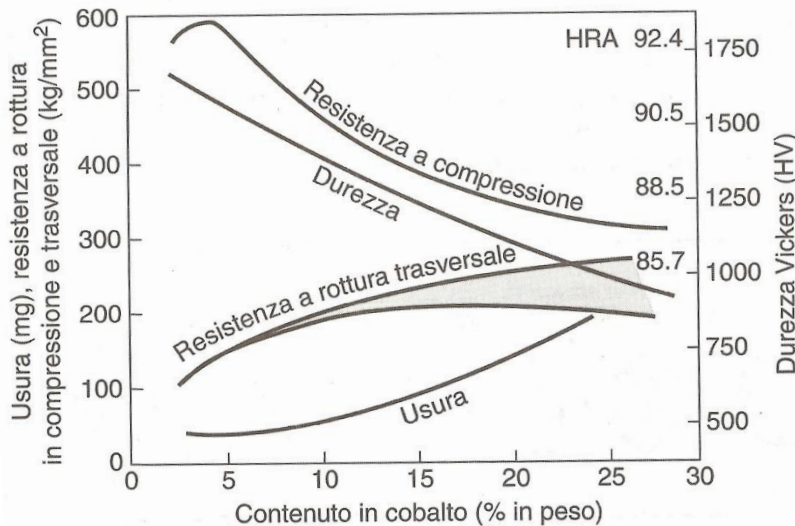


Fig. 5.49: Effetto del contenuto di cobalto sulle proprietà meccaniche degli utensili in carburo di tungsteno.

Da notare come la durezza è direttamente proporzionale alla resistenza a compressione e inversamente proporzionale all'usura (legge di Archard).

All'aumentare del contenuto di cobalto, infatti, il materiale aumenta la propria tenacità, ma, per contro, diminuiscono la durezza (e di conseguenza la resistenza ad usura), la rigidità, la resistenza meccanica, la resistenza a corrosione. L'aumento di fase metallica, inoltre, favorisce una maggiore affinità chimica con il materiale lavorato e di conseguenza aumentano i fenomeni di adesione e trasferimento di materiale. Tuttavia, nel nostro caso specifico, l'affinità con il C45 risulterebbe essere comunque inferiore a quella sviluppata tra C45 e HSS-E.

Una granulometria maggiore influisce positivamente sulla tenacità, ma contribuisce a ridurre la durezza massima.

Aspetto fondamentale da ricordare è che l'adozione di utensili in metallo duro può avvenire solo se l'impianto è dotato di macchine utensili di elevata rigidità, in quanto fenomeni vibratorii possono causare scheggiature o rotture premature dell'utensile.

Questa soluzione, pur essendo stata ricercata, è stata, tuttavia, ostacolata dall'assenza sul mercato di prodotti a catalogo con le dimensioni richieste. Tempi di attesa e costi previsti hanno definitivamente portato a scartare questa opzione.

Altro insieme di soluzioni adottabili riguarda il miglioramento delle condizioni di lubrificazione alla quale avviene il processo di rullatura.

Tanto più, infatti, si riescono a spostare le condizioni di lavorazione verso quelle in grado di realizzare un regime di lubrificazione mista o, ancor meglio, idrodinamica, tanto minori saranno gli attriti in gioco sviluppati nel sistema e di conseguenza i fenomeni di usura coinvolti.

A tal fine si può incrementare l'afflusso di fluido lubrificante all'interfaccia di lavoro mediante l'adozione di:

- MASCHI A RULLARE DOTATI DI CANALINI DI LUBRIFICAZIONE: la presenza di questa particolare geometria con discontinuità nel profilo attivo di pressione dell'utensile dovrebbe evitare l'estrusione del lubrificante presente tra le due superfici a causa delle forti pressioni che si generano. Grazie ai canalini di lubrificazione, infatti l'olio è in grado di affluire sulla superficie di contatto anche durante quelle fasi in cui l'utensile occlude completamente il preforo deformandolo. Ciò garantisce una migliore asportazione del calore e lo sviluppo di regimi di lubrificazione migliori.

La presenza di spigoli netti generati dai canalini di lubrificazione sul profilo poligonale può, tuttavia, generare il dubbio che questi fungano da taglienti facendo lavorare l'utensile non solo per deformazione, ma, anche, a taglio con gli svantaggi che da ciò deriverebbero.

Tale soluzione, molto diffusa sul mercato, è stata sperimentata in varie forme nel corso dell'attività di tesi, ponendo sempre un occhio di riguardo a verificare che non si manifestassero sugli spigoli dei canalini di lubrificazione fenomeni di usura tali da far ipotizzare la realizzazione di fenomeni di asportazione di truciolo.

- MASCHI CON PASSAGGIO INTERNO ASSIALE DEL LUBRIFICANTE E FUORIUSCITA RADIALE: esistono sul mercato alcune tipologie di utensili a rullare dotati contemporaneamente di canalini di lubrificazione e di un passaggio interno assiale di lubrificante che, fuoriuscendo in pressione dalla punta del maschio, va ad irrorare abbondantemente la superficie di lavoro.

Questo particolare geometria permette di sommare al regime di lubrificazione idrodinamica, dovuta allo scorrimento relativo delle due superfici, un contributo statico derivante dalla pressione alla quale il liquido lubrificante viene pompato.

Un sistema siffatto si troverà a lavorare, di conseguenza, a valori del numero di Stribeck superiori rispetto a quelli ottenuti dalla semplice adozione dei canalini di lubrificazione.

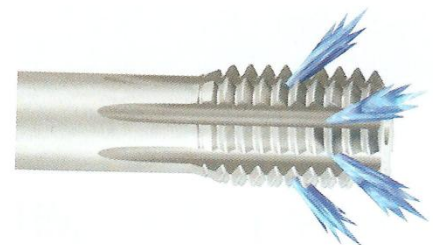


Fig. 5.50: Fuoriuscita radiale di lubrificante da un maschio a rullare dotato di canale assiale interno.

La fuoriuscita del lubrificante può essere fatta avvenire assialmente (sistema valido solo se prevede la lavorazione di fori ciechi) o radialmente (applicabile nel caso di fori passanti).

Tale soluzione si presta bene in tutti quei casi in cui risulti necessario filettare fori di notevole profondità, mentre la sua efficacia potrebbe essere notevolmente inferiore in una lavorazione, come quella in esame, in cui lo spessore da filettare è di soli 3 mm.

Tuttavia, il problema non si pone non essendo le unità di maschiatura, di cui è dotato l'impianto, predisposte alla realizzazione di tale tipologia di lubrificazione.

Ultima soluzione possibile per migliorare la durata degli utensili è chiaramente quella di modificare le caratteristiche del fluido lubrificante rendendole più prestanti al caso in esame.

- ADDITIVAZIONE DEL LUBRIFICANTE CON SOSTANZE AD EFFETTO EP, UNTUOSANTE E MIGLIORATORE DI VISCOSITÀ.

Come è già stato accennato è possibile migliorare le condizioni di un sistema lubrificato, non solo spostando le condizioni di lavoro in punti della curva di Stribeck che presentino un minore coefficiente d'attrito, ma, anche, modificando la curva stessa mediante additivazione.

Nel primo caso si può cercare di aumentare la viscosità dell'olio per fare in modo che migliori la sua capacità di resistere ai carichi imposti, senza trafilare al di fuori dell'interfaccia di contatto o comunque persistendo per maggiore tempo al suo interno.

Ciò può essere ottenuto addizionando sostanze ad alta viscosità, quali opportuni additivi polimerici solubili nell'olio di partenza.

Nel secondo caso appare ovvia la necessità di ricorrere ad additivi tali da migliorare la resistenza del lubrificante ai carichi imposti (EP ed untuosanti).

A tal fine ci si è avvalsi della collaborazione e dell'esperienza del Dott. Marco Bellini, chimico industriale responsabile del settore R&S del omonima azienda attualmente fornitrice dell'olio usato nell'impianto.

Basandosi sulla conoscenza della composizione dell'olio in circolo nell'impianto di rullatura, come abbiamo visto diversa e in un certo verso migliorata dall'inquinamento da parte degli altri oli rispetto alla composizione originale, Bellini ha proposto di additivare il lubrificante con due sostanze opportune in elevata concentrazione al fine di incrementare ulteriormente le già alte prestazioni del mezzo lubrificante.

Si è deciso di testare l'effetto dei due additivi in maniera sequenziale, in modo tale da poter quantificare, inizialmente, l'effetto benefico apportato dalla prima sostanza e, successivamente, le prestazioni dell'olio additivato con entrambi.

Caratteristiche e effetti previsti dai singoli additivi saranno trattati approfonditamente all'interno dei capitoli relativi.

Nonostante esistano, come visto, molteplici linee d'azione sperimentabili al fine di migliorare la durata degli utensili nel processo di maschiatura a rullare sotto esame, la maggior parte di esse sono risultate impraticabili a livello pratico (pur rimanendo concettualmente molto valide) e pertanto abbandonate.

Anche la soluzione che potrebbe sembrare più ovvia, cioè la ricerca sul mercato di utensili più performanti è stata molto meno fruttuosa del previsto nonostante siano state contattate le maggiori aziende produttrici di maschi a rullare al livello internazionale.

Una collaborazione maggiormente proficua è nata, invece, con la Bellini s.r.l., nella persona del Dott. Marco Bellini, il quale, oltre a offrire la sua preziosa consulenza, ha prontamente fornito i materiali da testare e svolto le analisi presso il proprio laboratorio.

La combinazione delle diverse soluzioni sperimentabili allo scopo di migliorare l'efficienza del processo produttivo ha portato alla sperimentazione di 8 combinazioni di parametri, in cui ognuna di queste è caratterizzata dall'aver adottato una (in alcuni casi due) delle soluzioni proposte, in modo tale da ottenere informazioni sull'effettivo beneficio apportato dalla variazione di quella particolare caratteristica del processo.

Per ogni combinazione di parametri di processo sono stati raccolti i dati relativi alla durata e all'andamento dell'usura per un gruppo formato da 12 o 18 maschi a rullare (a seconda delle modalità di raccolta dati, delle tempistiche del processo produttivo e della disponibilità del mercato).

Il numero, multiplo di 6, deriva ovviamente dalla presenza nell'impianto produttivo di 6 unità di filettatura che lavorano in contemporanea ed è tuttavia sufficiente con la modalità di raccolta dati prevista ad ottenere un risultato dotato di una discreta base statistica.

Le diverse combinazioni di parametri sperimentate sono riassunte nella tabella a pagina seguente.

NOME GRUPPO	DENOMINAZIONE COMMERCIALE MASCHIA A RULLARE	DIMENSIONE E CLASSE DI TOLLERANZA	MATERIALE SUBSTRATO	RIVESTIMENTO	N° LOBI	CAMALINI DI LUBRIFICAZIONE	FORMA D'IMBOCCO (DIN 2175)	LUBRIFICANTE	ASPORTAZIONE PUNTA
STANDARD	EMUGE Drück B0911420 0050	M5 - 6GX	HSS-E	TiN-T1	4	NO	C/2-3	HAROLBIO 5 (*)	molatrice (guardia-macchina)
A	EMUGE Drück B0911420 0050	M5 - 6GX	HSS-E	TiN-T1	4	NO	C/2-3	HAROLBIO 5 (*)	molatrice manutenzione
B	EMUGE InnoForm B521A820 0050	M5 - 6GX	HSS-E	TiN-T1	4	SI (4)	C/2-3	HAROLBIO 5 (*)	molatrice con fermi
C	YAMAWA 9354	M5 - ISO 3X (M5 - 6GX)	HSS-E	TiN	4	SI (4)	C/2-3	HAROLBIO 5 (*)	non necessaria
D	GÜHRING 903	M5 - 6GX	PM HSS-E	TiN	4	NO	C/2-3	HAROLBIO 5 (*)	molatrice manutenzione
E	GÜHRING 1588	M5 - 6GX	HSS-E	AlCrN	4	SI (4)	C/2-3	HAROLBIO 5 (*)	molatrice manutenzione
F	EMUGE Drück B0911420 0050	M5 - 6GX	HSS-E	TiN-T1	4	NO	C/2-3	HAROLBIO 5 (*) + ADD SA (10%)	molatrice manutenzione
G	EMUGE Drück B0911420 0050	M5 - 6GX	HSS-E	TiN-T1	4	NO	C/2-3	HAROLBIO 5 (*) + ADD SA (10%) + X-DRAW BIO 1000 SI (10%)	molatrice manutenzione
H	EMUGE InnoForm B521A820 0050	M5 - 6GX	HSS-E	TiN-T1	4	SI (4)	C/2-3	HAROLBIO 5 (*) + ADD SA (10%) + X-DRAW BIO 1000 SI (10%)	molatrice manutenzione

Tabella XXVII: Combinazioni di parametri sperimentati per migliorare la durata degli utensili nel processo di filettatura per deformazione (evidenziati i parametri fondamentali del dato gruppo sperimentato).

5.4 GRUPPO B

Una delle soluzioni sperimentate per migliorare le condizioni tribologiche del sistema e, di conseguenza, la durata degli utensili è stata l'adozione di maschi a rullare con geometria caratterizzata dalla presenza di canalini di lubrificazione.

A tal fine si sono sostituiti i maschi a rullare in uso con altri di nuova generazione consigliati dal tecnico commerciale Emuge®.

L'azienda produttrice di maschi, e attualmente fornitrice di Mevis, ha proposto al mercato una nuova famiglia di utensili a rullare denominati InnoForm risultato di anni di ricerca e studio dei meccanismi di deformazione durante la rullatura per i diversi materiali.

Il risultato è stata una serie di maschi a rullare di geometria ottimizzata per la lavorazione di materiali o gruppi di materiali specifici.

In particolar modo si sono testati gli utensili EMUGE® M5x1-6GX InnoForm1-7 (Z-SN) HSSE-TIN-T1 7/1 (codice identificativo Emuge = B521A820 0050).

Questi utensili fanno parte della famiglia InnoForm-Z appositamente studiata per l'impiego con acciai plastici ad alta resistenza.

In questi utensili la combinazione di un rivestimento superficiale duro e di un'apposita morfologia dei lobi è tale da garantire elevate forze di deformazione mantenendo, allo stesso tempo, basse le forze d'attrito e il carico termico.

DIMENSIONE NOMINALE	M5
CLASSE DI TOLLERANZA	6GX
SUBSTRATO	HSS-E
RIVESTIMENTO	TIN-T1
FORMA IMBOCCO	C/ 2-3
NUMERO LOBI	4
PRESENZA DI CANALINI DI LUBRIFICAZIONE	SI (4)



Tabella XXVIII: Caratteristiche principali dei maschi a rullare EMUGE® M5x1-6GX Innoform1-7 (Z-SN) HSSE-TIN-T1 7/1.

Fig. 5.51: Vista laterale (10×) del campione B1.

Il rivestimento usato è il multistrato TiN-T1 già descritto nel capitolo precedente.

Come accennato la presenza dei canalini dovrebbe teoricamente consentire un maggior afflusso di liquido lubro-refrigerante migliorando le condizioni di lavoro dell'utensile e, per tanto, la durata dello stesso.

È evidente, tuttavia, come questi canalini creino delle discontinuità nette sul profilo poligonale dell'utensile, generando degli spigoli che verosimilmente potrebbero lavorare come taglienti con angoli di taglio prossimi a 90°.

Sarà per tanto fondamentale verificare nel corso della sperimentazione che tali spigoli non manifestino formazione di labbri o crateri di usura o di taglienti di riporto sintomatici di esecuzione da parte dell'utensile di asportazione di truciolo.

Gli utensili della famiglia InnoForm presentano, inoltre, un numero di filetti completi notevolmente inferiore rispetto agli utensili della famiglia Drück (9 invece di 18).

Questo fatto, nel nostro caso specifico, può risultare vantaggioso in quanto la lunghezza del tratto filettato è compatibile con la corsa eseguita dalle filettatrici, ma

allo stesso tempo evita la presenza di filetti superflui che non lavorerebbero e che, se presenti, ostacolerebbero il flusso di lubrificante schermato la zona di lavoro.



Fig. 5.52: Vista frontale (10×) del campione B1. Si notano bene le scanalature realizzate per favorire il passaggio di lubrificante.

La punta è stata asportata con le stesse modalità del gruppo A.

5.4.1 Analisi della durata

La sostituzione degli utensili Emuge Drück con i più innovativi Emuge InnoForm ha permesso un ulteriore incremento della produttività degli utensili prima che questi fuoriescano dal campo di tolleranza:

GRUPPO	UTENSILI NON CONFORMI	N° CONTATORE	N° PEZZI PRODOTTI
B	B8	376209	125403
B(1)	B13, B14, (B18)	297000	99000
MEDIA	-	336605	112202

Tabella XXIX: Numero di pezzi prodotti a fine vita dagli utensili del gruppo B. Tra parentesi gli utensili al limite di conformità al momento della sostituzione.

L'uso di utensili dotati di canalini di lubrificazione e di geometria ottimizzata, a parità delle altre variabili, ha portato ad un incremento di produttività di circa il 32% rispetto al numero di pezzi prodotto nelle condizioni standard.

5.4.2 Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi

Anche nel caso degli utensili del gruppo B si sono ottenuti i profili di usura sfruttando il confronto con la tavola comparativa e i dati ottenuti dalla misurazione della proiezione dell'area di asportazione del rivestimento.

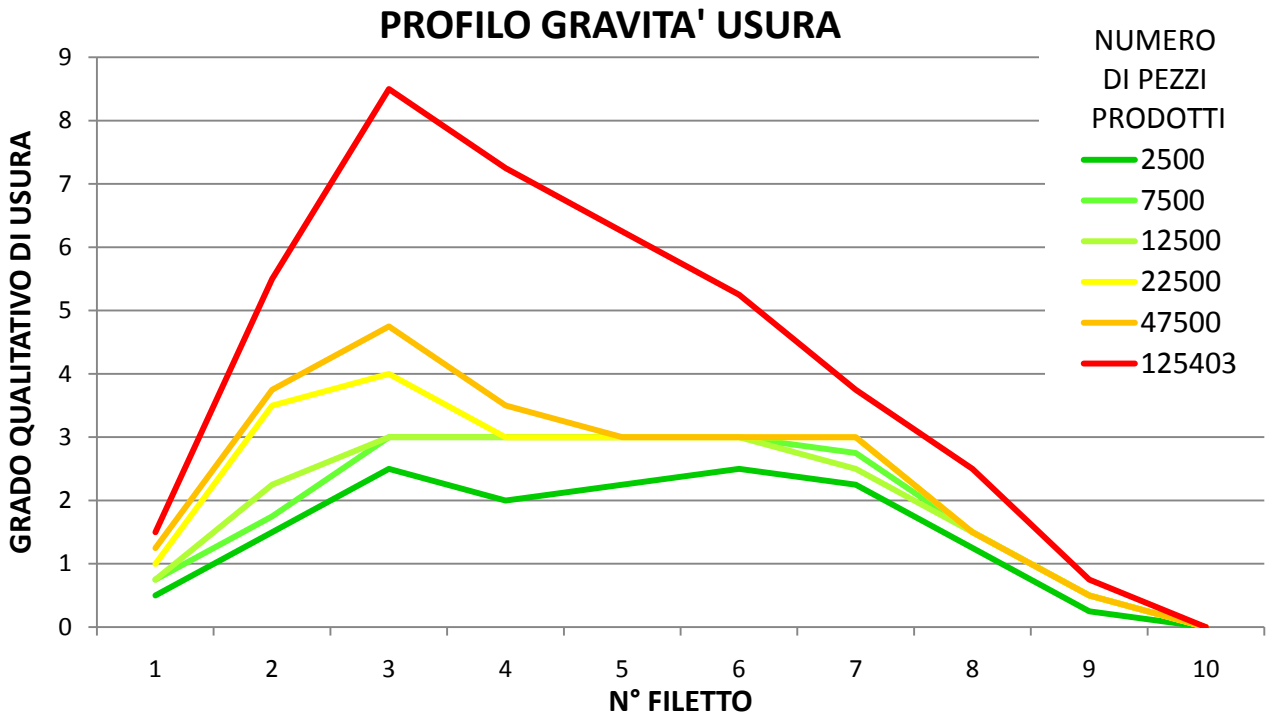


Fig. 5.53: Evoluzione dei fenomeni di usura sui filetti dell'utensile B8 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

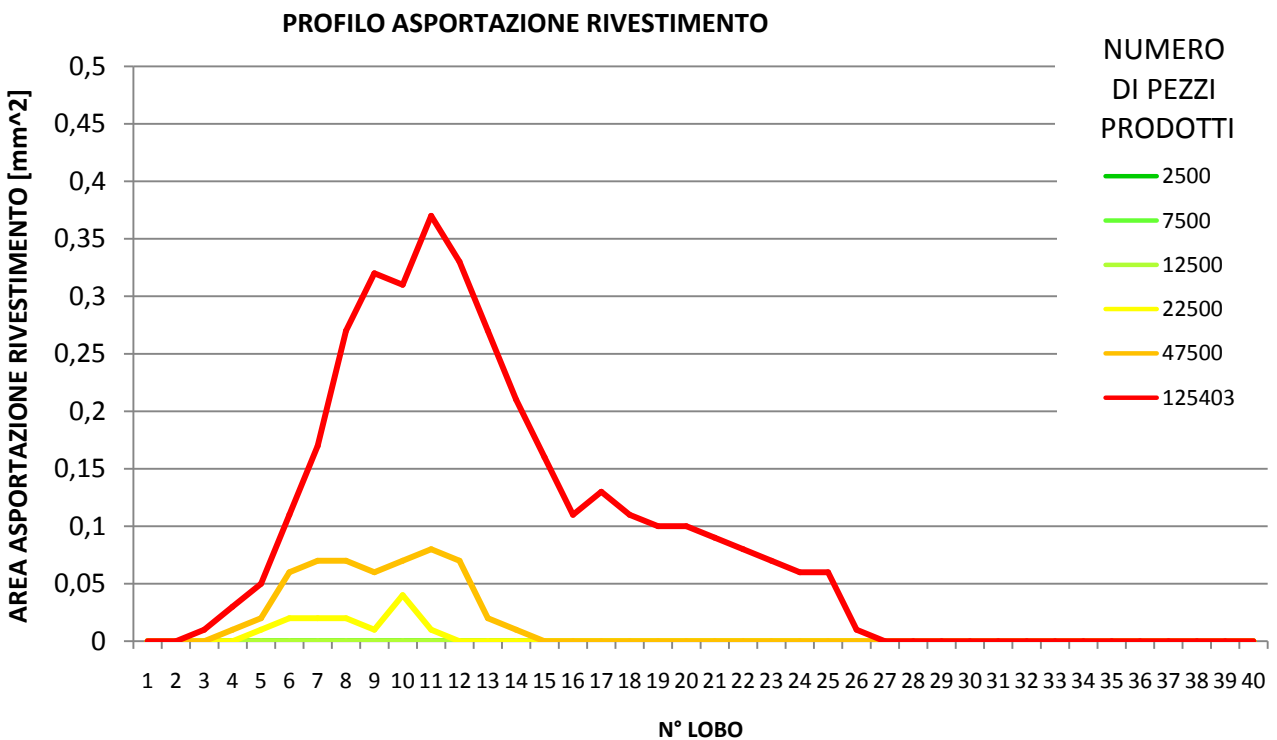


Fig. 5.54: Evoluzione dell'asportazione del rivestimento sui lobi dell'utensile B8 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

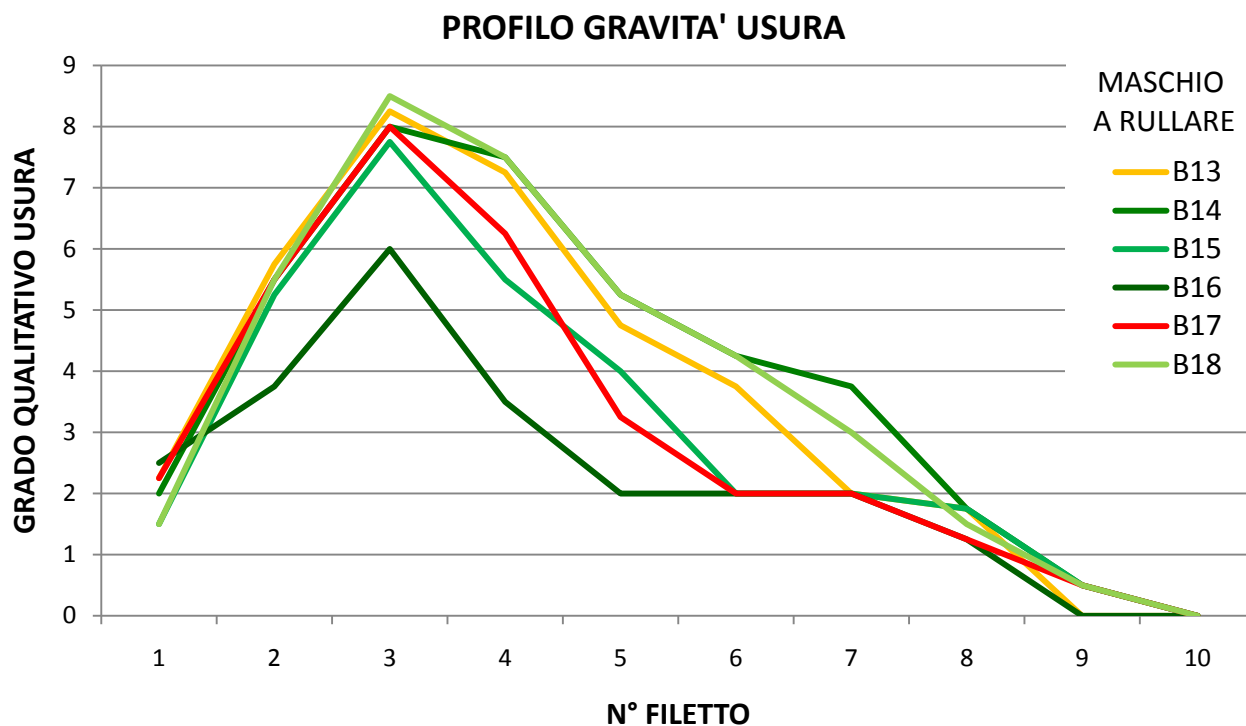


Fig. 5.55: Confronto tra i profili di gravità usura dei maschi del gruppo B(1) al momento della sostituzione (99000 pezzi prodotti)

In rosso sono riportati gli utensili che sono risultati fuori tolleranza a fine vita e hanno comportato la sostituzione dell'intero gruppo; in giallo gli utensili al limite di tolleranza e in verde quelli che al momento della sostituzione producevano ancora filettature conformi.

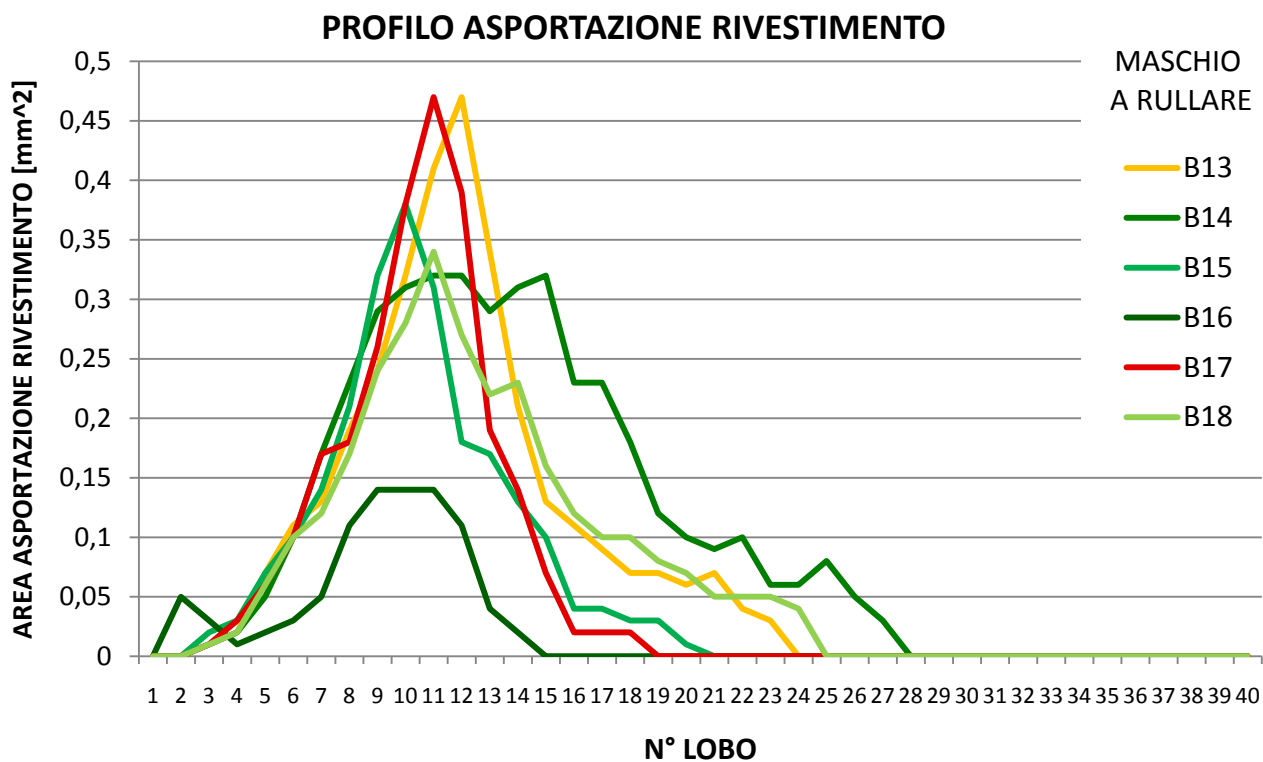


Fig. 5.56: Confronto tra i profili di asportazione del rivestimento nei maschi del gruppo B(1) al momento della sostituzione (99000 pezzi prodotti).

L'osservazione di questi grafici porta a considerazioni del tutto simili a quelle ricavate nell'analisi degli utensili del gruppo A.

Anche in questo caso si nota come l'evoluzione dei fenomeni di usura avvenga maggiormente in prossimità del lobo critico, inoltre, l'asportazione del rivestimento progredisce all'aumentare del numero di pezzi prodotti verso lobi appartenenti ai filetti più interni.

Dal confronto tra i grafici relativi al grado qualitativo di usura e l'asportazione del rivestimento si può notare come il rivestimento venga abraso e lasci affiorare porzioni apprezzabili di acciaio rapido solo dopo aver raggiunto un sufficiente grado di usura tribo-ossidativa (4° e 5°).

Per quanto riguarda il confronto tra il diverso grado di usura raggiunto dagli utensili al momento della sostituzione, si nota anche in questo caso una differenza labile tra i diversi utensili per quanto riguarda i fenomeni tribo-ossidativi, mentre, gli utensili risultati fuori tolleranza, manifestano una maggiore asportazione del rivestimento in corrispondenza del lobo critico.

Menzione a parte merita l'utensile B16 che nonostante aver prodotto un numero di pezzi uguale agli altri del gruppo B(1) presenta un livello di usura notevolmente inferiore.

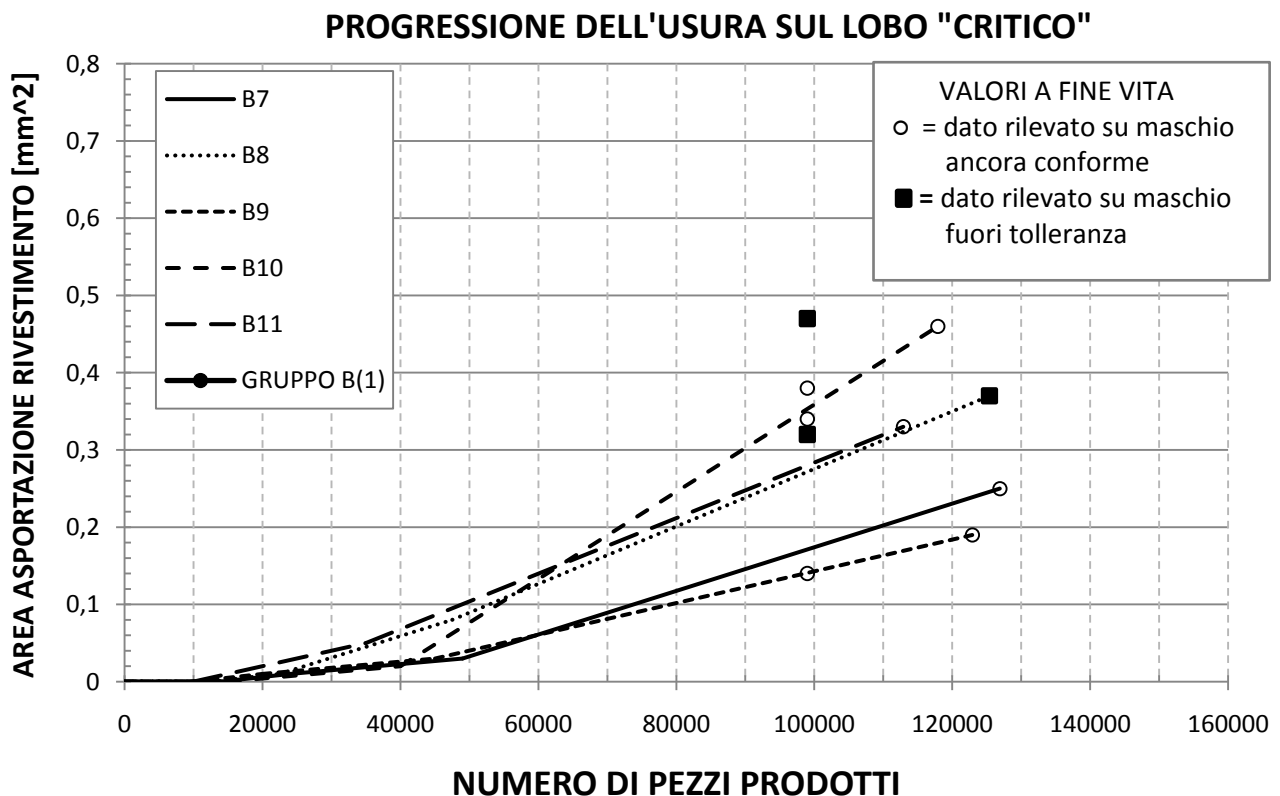


Fig. 5.57: Propagazione dell'usura sul lobo critico all'aumentare del numero di pezzi prodotti per gli utensili del gruppo B.

5.4.3 Descrizione dei meccanismi di usura

CAMPIONE B1 (1000 pezzi prodotti)

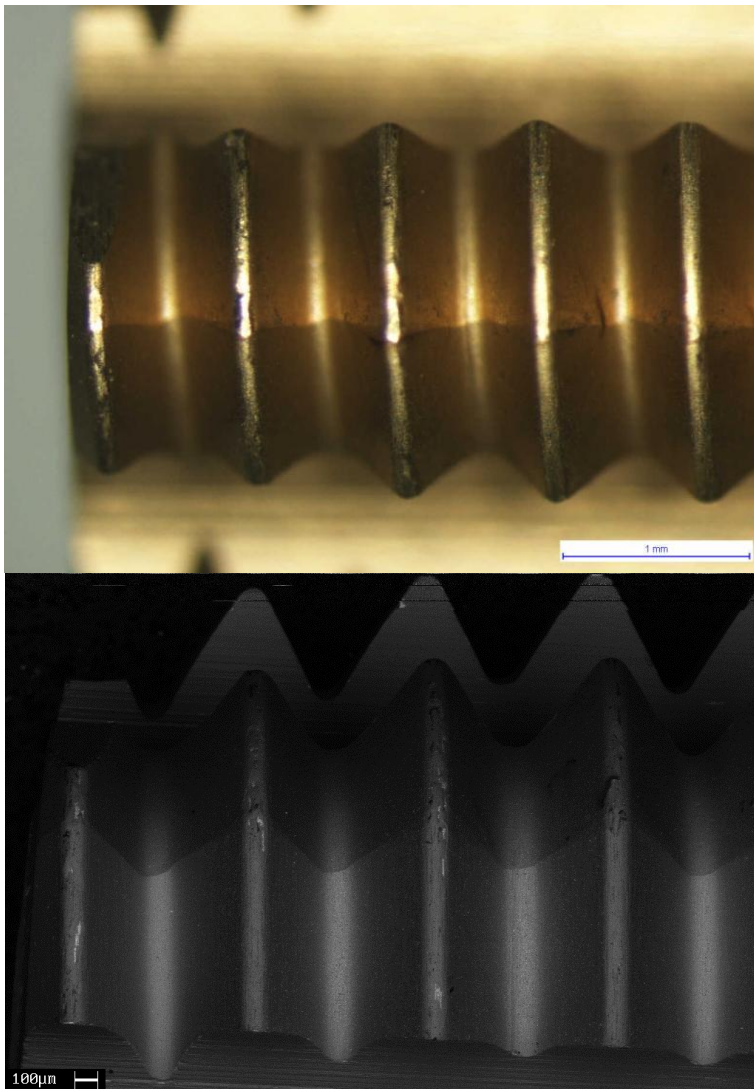
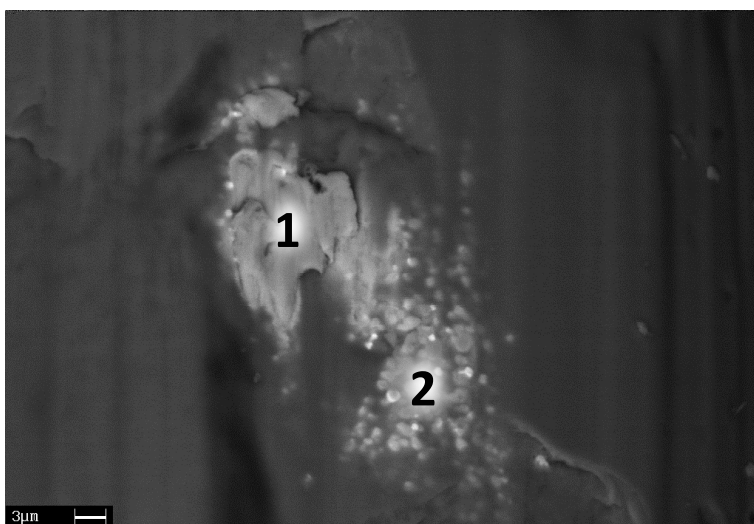


Fig. 5.58: Campione B1_L2-3. Macrografie della superficie dei lobi ottenute rispettivamente allo stereoscopio e al SEM.

adesione di C45 nei punti in cui il rivestimento TiN-T1 è stato abraso (con un meccanismo di aratura) lasciando affiorare l'HSS-E.



L'osservazione della superficie dell'utensile evidenzia, anche in questo caso, come il processo di usura e danneggiamento dei maschi a rullare si manifesti ai primi stadi con una lucidatura in corrispondenza dei lobi.

I fenomeni risultano più accentuati sull'apice del lobo dove la geometria è tale da realizzare le tensioni massime.

Tale zone se osservate allo stereoscopio risultano lucidate a specchio e manifestano il caratteristico alone.

Un certo danneggiamento è presente, inoltre, su tutta la superficie della cresta del filetto.

Dall'immagine ottenuta al microscopio elettronico sfruttando gli elettroni retrodiffusi si nota come si manifestino dei primi fenomeni di

Fig. 5.59: Particolare della superficie di usura.

Nei punti in cui affiora l'acciaio super-rapido in seguito all'abrasione del rivestimento si manifesta una subitanea adesione di C45 sotto forma di particelle lamellari.

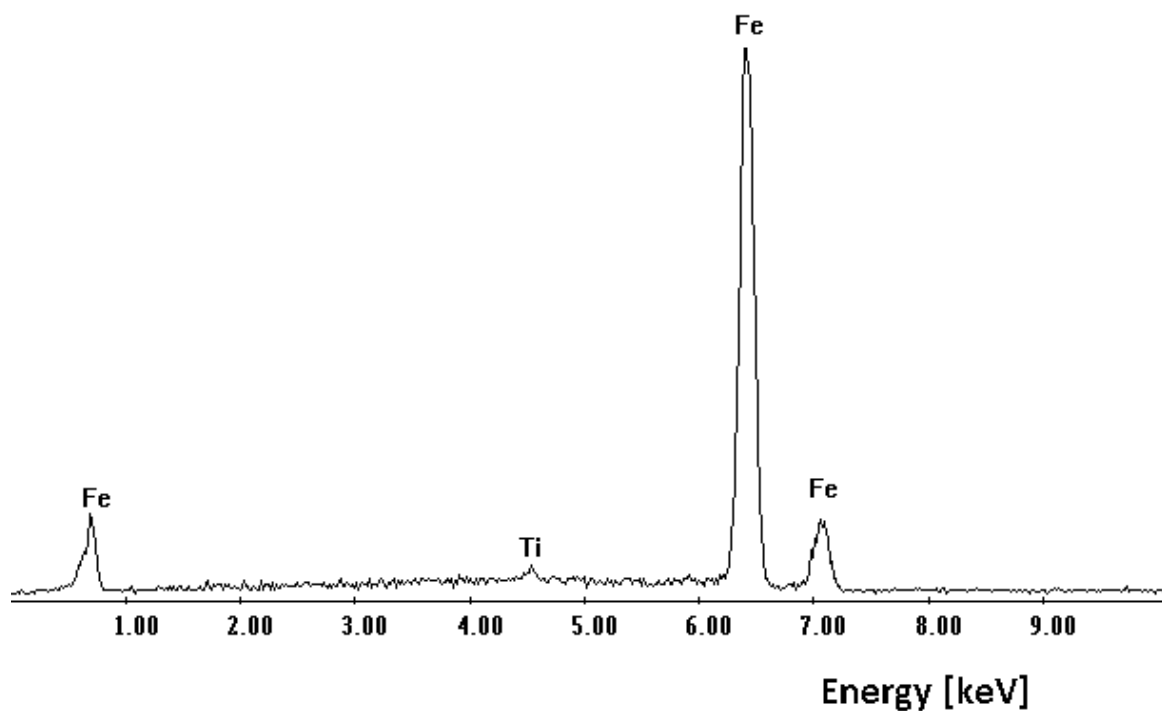


Fig. 5.60: Spettro EDS ottenuto in corrispondenza del punto 1. La composizione chimica manifestata è quella tipica di un acciaio basso-legato, nella fattispecie è il C45 in cui sono realizzati i morsetti lavorati.

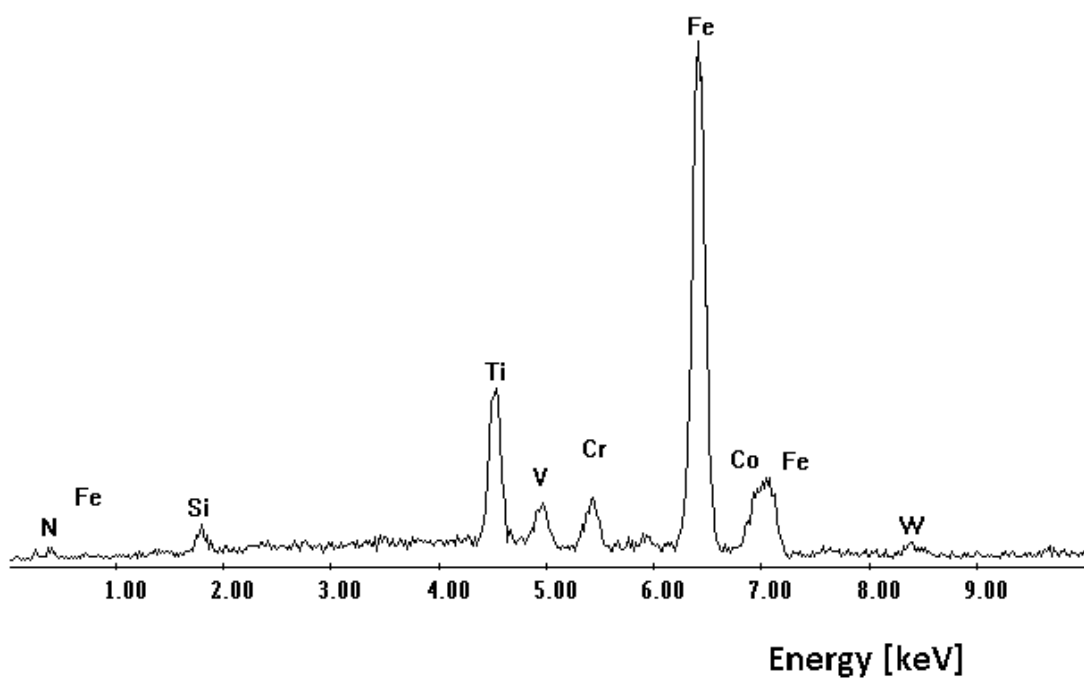


Fig. 5.61: Spettro EDS ottenuto in corrispondenza del punto 2. La composizione chimica manifestata è quella tipica dell'acciaio HSS-E in cui sono realizzati i maschi a rullare. Si nota, inoltre, la presenza di residui del rivestimento TiN non completamente abraso.

CAMPIONE B3 (5000 pezzi prodotti)

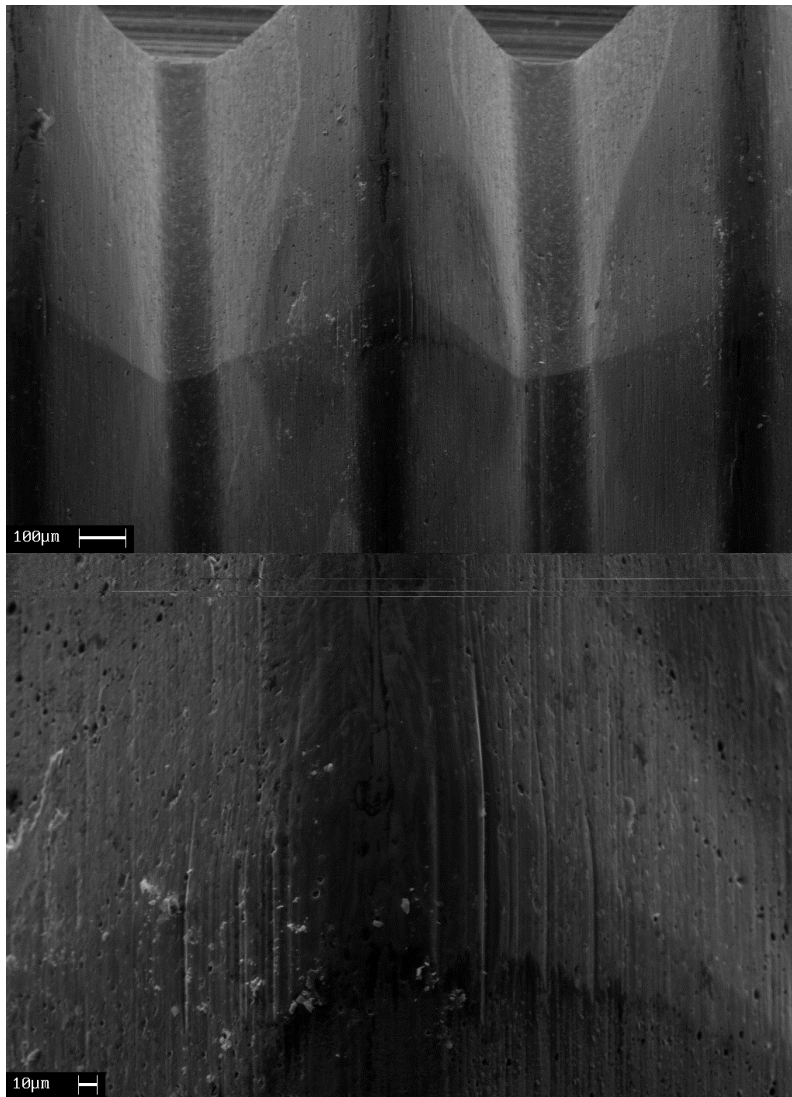


Fig. 5.62: Campione B3_L2-3. Macrografia in corrispondenza del lobo sul 3° filetto e particolare dei solchi presenti sulla sua sommità

Dall'analisi della superficie di usura del maschio a rullare B3 oltre ai fenomeni precedentemente descritti, l'osservazione agli elettroni secondari rende particolarmente evidente la topografia del danneggiamento superficiale.

È netta la differenza di rugosità tra la zona superiore del fianco lisciata dal contatto ripetuto con la superficie del preforo e il fondo del filetto che presenta ancora, invece, una rugosità inalterata.

Si nota, inoltre, una leggera inflessione del lobo a causa di un generalizzato cedimento del substrato che modifica la geometria della superficie attiva spianandola leggermente.

A maggiori ingrandimenti è evidente il fenomeno di solcatura/aratura che interessa la sommità dei lobi, cioè i punti sottoposti al maggiore stato tensionale.

CAMPIONE B5 (15000 pezzi prodotti)

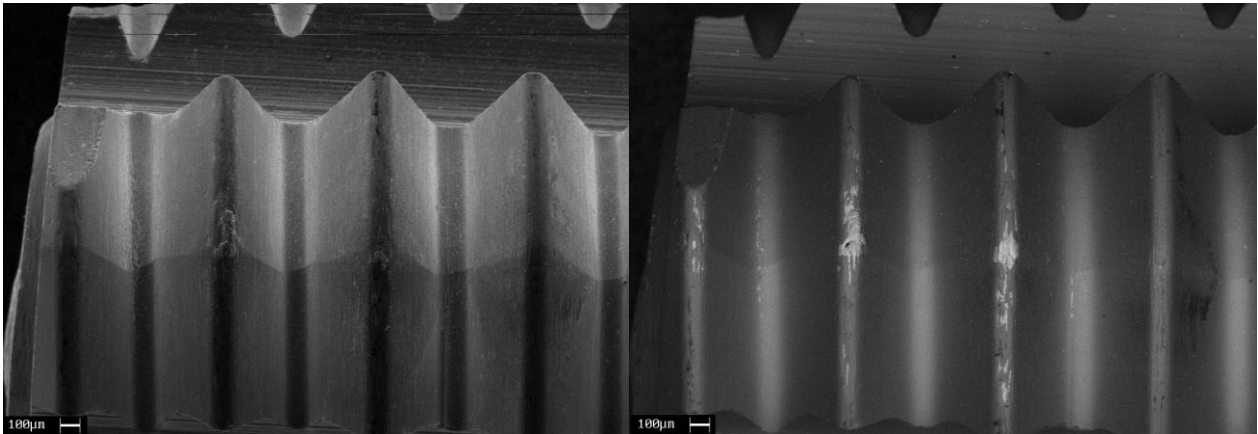


Fig. 5.63: Campione B5_L2-3. Macrografia della superficie dei lobi ottenuta rispettivamente con gli elettroni secondari (a sx) e con i retrodiffusi (a dx).

Analizzando campioni prelevati dopo un numero maggiore di pezzi prodotti si vede come i meccanismi di danneggiamento manifestati siano sostanzialmente gli stessi riscontrati sui campioni del gruppo A che avessero prodotto un numero analogo di pezzi.

Unica differenza sostanziale si riscontra nel fatto che nei maschi Emuge Innoform l'usura risulti diffusa su una porzione più ampia del filetto rispetto agli Emuge Drück.

Ciò può derivare dalla geometria ottimizzata di questi utensili che consente loro di distribuire il lavoro di deformazione su una superficie maggiore, riducendo la pressione esercitata dallo "spigolo" del lobo sulla superficie del preforo e attenuando, di conseguenza, la localizzazione dei fenomeni abrasivi.

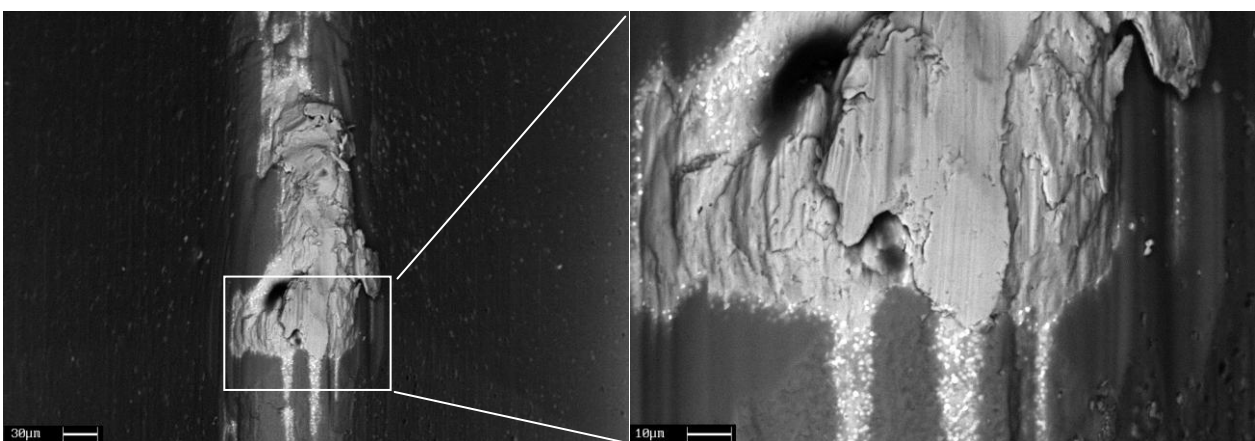
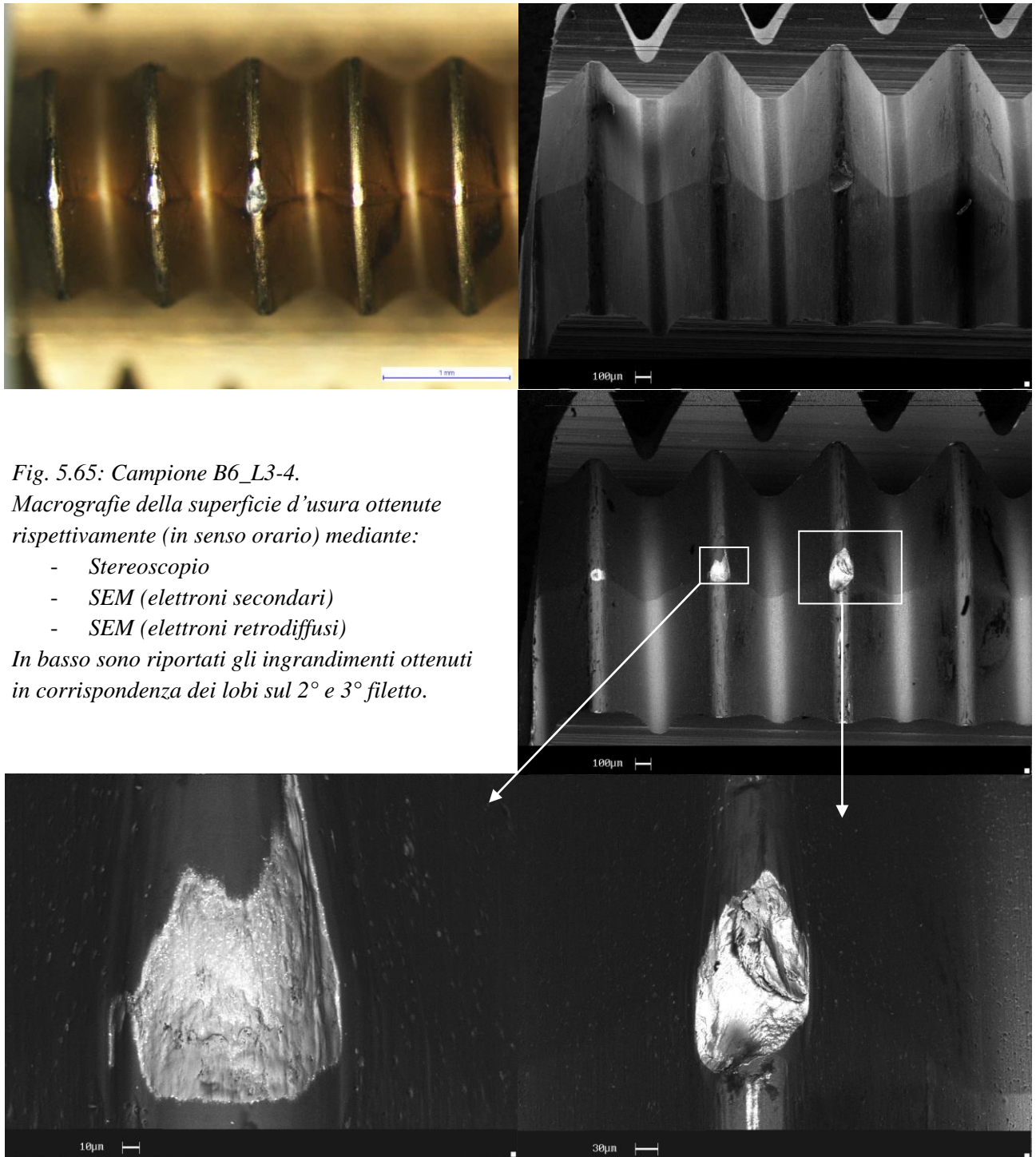


Fig. 5.64: Campione B5_L2-3. Usura sul lobo del 2° filetto. In corrispondenza dei punti in cui l'abrasione è tale da far affiorare l'HSS-E si ha l'adesione di strutture lamellari in C45.

CAMPIONE B6 (50000 pezzi prodotti)



*Fig. 5.65: Campione B6_L3-4.
Macrografie della superficie d'usura ottenute
rispettivamente (in senso orario) mediante:*

- *Stereoscopio*
- *SEM (elettroni secondari)*
- *SEM (elettroni retrodiffusi)*

*In basso sono riportati gli ingrandimenti ottenuti
in corrispondenza dei lobi sul 2° e 3° filetto.*

L'analisi dei campioni ha dimostrato come i meccanismi di usura evolvano con la stessa sequenza riscontrata nel GRUPPO A, in cui in seguito ai fenomeni di abrasione del rivestimento, si ha l'adesione del materiale lavorato sul morsetto che peggiora le condizioni tribologiche del sistema facilitando l'instaurarsi di fenomeni di fatica superficiale.

Nei punti maggiormente sollecitati si ha l'asportazione di frammenti di usura di dimensioni notevoli con la creazione di strutture lamellari di C45 che vanno a riempire parzialmente lo spazio rimasto vuoto.

Dall'analisi comparata dei fenomeni di usura dei maschi del GRUPPO A e di quelli del GRUPPO B si evince, tuttavia, come in questo caso i fenomeni di scheggiatura siano ritardati, cioè si manifestino con uguale intensità solo ad un numero di pezzi prodotti ben maggiore del precedente caso.

Si notano anche dei depositi di colore nero che analizzati mediante spettroscopia a raggi X risultano essere depositi derivanti dalla degradazione termica del lubrificante.

Essendo i maschi del gruppo B invariati per quanto riguarda il tipo di rivestimento e il substrato rispetto a quelli del gruppo A, ciò può essere implicato a delle migliori condizioni di lubrificazione realizzate da parte dei maschi dotati di canalini.

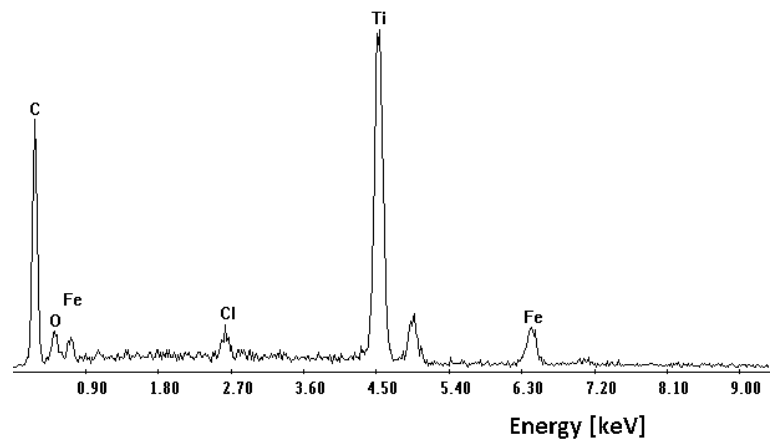


Fig. 5.66: Spettro EDS ottenuto in corrispondenza di un deposito di colore nero sul campione B6.

È evidente come sia costituito da residuo carbonioso del lubrificante ed ossidi di Fe e Ti.

Il Cl presente deriva dalla decomposizione delle cloroparaffine presenti nel lubrificante di tranciatura.

CAMPIONE B7 (≈ 127000 pezzi prodotti)

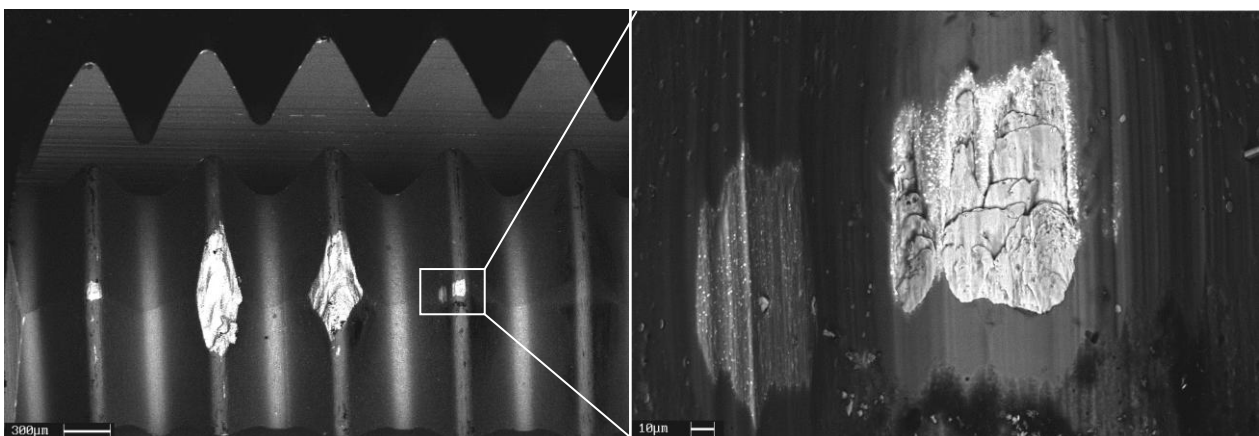


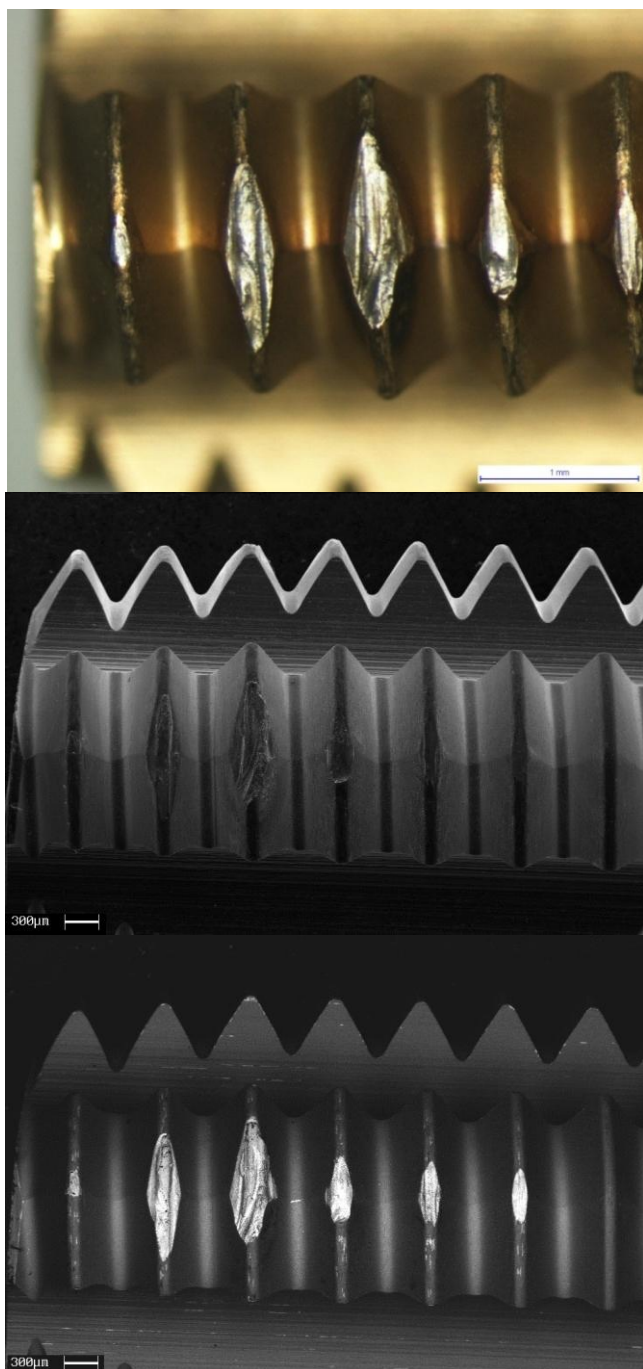
Fig. 5.67 Campione B7_L4-1. Macrografia della superficie usurata e particolare del 4° filetto (QBSD).

Le immagini ottenute in un campione ad uno stadio di usura avanzata evidenziano come, dopo che i filetti d'imbocco subiscano un certo grado di danneggiamento, l'usura coinvolga i filetti successivi dove si manifesta con le stesse modalità finora viste.

Nel particolare della superficie di usura sul 4° filetto è evidente come il fianco di avanzamento, essendo sottoposto ad una pressione superiore a quello opposto, manifesti una abrasione più grave che, in questo caso, è tale da rimuovere un'ampia porzione di rivestimento.

Il maschio a rullare B7 nonostante l'usura avanzata produceva ancora filetti conformi alla tolleranza al momento della sostituzione dettata dalla non conformità dei filetti prodotti dal maschio B8.

CAMPIONE B8 (≈ 125500 pezzi prodotti)



L'analisi del maschio a fine vita mostra ancora una volta che la produzione di filetti conformi continua fintantoché i fenomeni di usura non interessano in maniera rilevante anche i lobi posizionati sui filetti di calibrazione.

Pur avendo prodotto un numero di pezzi leggermente inferiore a B7, il maschio B8 manifesta, infatti, un'usura più grave ed estesa su un numero di filetti superiori.

Ciò deriva in parte dalla maggiore estensione della superficie danneggiata in corrispondenza dei filetti 2 e 3.

Anche in questo caso la tipologia di usura si modifica all'aumentare della distanza del filetto dall'imbocco.

I primi filetti manifestano scheggiature evidenti che lasciano posto, man mano, all'aumentare del numero di filetto, a fenomeni di tipo abrasivo meno gravosi.

*Fig. 5.68: Campione B8_L4-1.
Macrografie ottenute dall'alto verso il basso con lo stereoscopio, con microscopio elettronico a elettroni secondari e a elettroni retrodiffusi*

Il confronto tra B7 e B8 dimostra, inoltre, come a parità di condizioni e di numero di pezzi lavorati, si abbia una certa variabilità nel comportamento ad usura degli utensili appartenenti allo stesso gruppo.

Ultima considerazione che si può trarre dall'osservazione dei campioni B7 e B8 è l'assenza di fenomeni di usura significativi sullo spigolo vivo che la presenza dei canalini di lubrificazione crea sul profilo poligonale.

Il danneggiamento presente è, infatti, irrilevante se confrontato con quello manifestato dai lobi.

I maschi a rullare, pur se dotati di canalini di lubrificazione realizzano i filetti unicamente per deformazione senza alcuna produzione di truciolo.

La presenza di particolato metallico a morfologia principalmente lamellare può essere spiegata sfruttando le osservazioni condotte sui meccanismi di usura nei maschi e sulle caratteristiche della superficie dopo lavorazione.

Si è, infatti, precedentemente descritto come sulle filettature realizzate sui morsetti, il fianco opposto alla direzione di penetrazione dell'utensile risulti particolarmente incrudito e deformato con la formazione in prossimità della superficie di bande di deformazione parallele dello spessore di pochi μm .

È probabile che la formazione di microsaldature (favorite da elevate temperature, pressioni e affinità chimica) tra la superficie del maschio a rullare e la superficie del fianco possa strappare alcune di queste "lamelle" facendole aderire saldamente all'utensile.

Una parte di esse si accumuleranno all'interno delle cavità lasciate sulla superficie dell'utensile dai fenomeni di scheggiatura, creando le strutture a lamelle sovrapposte viste, mentre le restanti possono dar vita a fenomeni di usura abrasiva a tre corpi, aggravati dall'elevata durezza che l'incrudimento conferisce a tali frammenti.

5.5 GRUPPO C

Alla luce dei buoni risultati ottenuti da utensili dotati di canalini di lubrificazione si è deciso di testare un prodotto concorrente avente caratteristiche molto simili al tipo di utensile sperimentato nel gruppo B.

I maschi a rullare YAMAWA® M5 - ISO3X C OS-R-D HSS-E TiN(codice identificativo catalogo Yamawa® = 9354TI) hanno, infatti, le seguenti caratteristiche:

DIMENSIONE NOMINALE	M5
CLASSE DI TOLLERANZA	ISO3X (6GX)
SUBSTRATO	HSS-E
RIVESTIMENTO	TiN
FORMA IMBOCCO	C/ 2-3
NUMERO LOBI	4
PRESENZA DI CANALINI DI LUBRIFICAZIONE	SI (4)

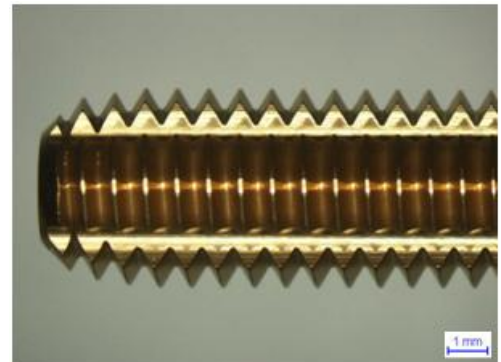


Fig. 5.69: Vista laterale (10×) del campione C1.

Tabella XXX: Caratteristiche principali dei maschi a rullare YAMAWA® M5 - ISO3X C OS-R-D HSS-E TiN.

Il rivestimento è un monolayer standard a base TiN con le seguenti caratteristiche nominali:

Composizione	Microdurezza HV (0,05)	Coefficiente di attrito su acciaio (a secco)	Spessore (µm)	Temperatura massima di esercizio (°C)	Colore indicativo
TiN	2300	0,4	1÷5	600 °C	Giallo-oro

Tabella XXXI: Caratteristiche nominali del rivestimento monolayer a base TiN.

La classe di tolleranza è denominata ISO 3X secondo la norma DIN EN 22857 ed è una classe equivalente alla 6GX definita dalla norma UNI 5542-65.

Caratteristica geometrica peculiare di questi utensili è di essere fabbricati con dimensioni conformi alla norma DIN 2174, ma con una geometria piatta prima del tratto di avvicinamento.

Questo aspetto evita che essi debbano essere rilavorati prima di essere montati sulle filettatrici.

Quest'ultime dovranno, però, essere tarate (vedi paragrafo relativo al processo produttivo) sulla lunghezza superiore degli utensili.

Gli utensili usati come standard presentano, infatti, all'acquisto una lunghezza totale conforme alle norma, ma, dopo l'asportazione della punta, la lunghezza è ridotta ad valore L pari a circa 70,00 mm e su tale valore è tarato l'azzeramento delle unità di maschiatura.

Gli utensili Yamawa® hanno, invece, una lunghezza totale al nuovo (e di conseguenza in uso) di 70,80 mm. Ciò comporta la necessità di innalzare la quota di azzeramento delle maschiatrici di

0,80 mm in modo tale da evitare collisioni accidentali tra utensili e pezzi in fase di avanzamento della strisciata.

Altre considerazioni geometriche riguardano le dimensioni dei canalini di lubrificazione che non essendo normate vengono realizzati secondo specifiche scelte dal singolo produttore.

Si può ipotizzare come dimensioni maggiori possano favorire un maggiore afflusso di lubrificante, ma, allo stesso tempo, diminuire la superficie in grado di operare la deformazione.

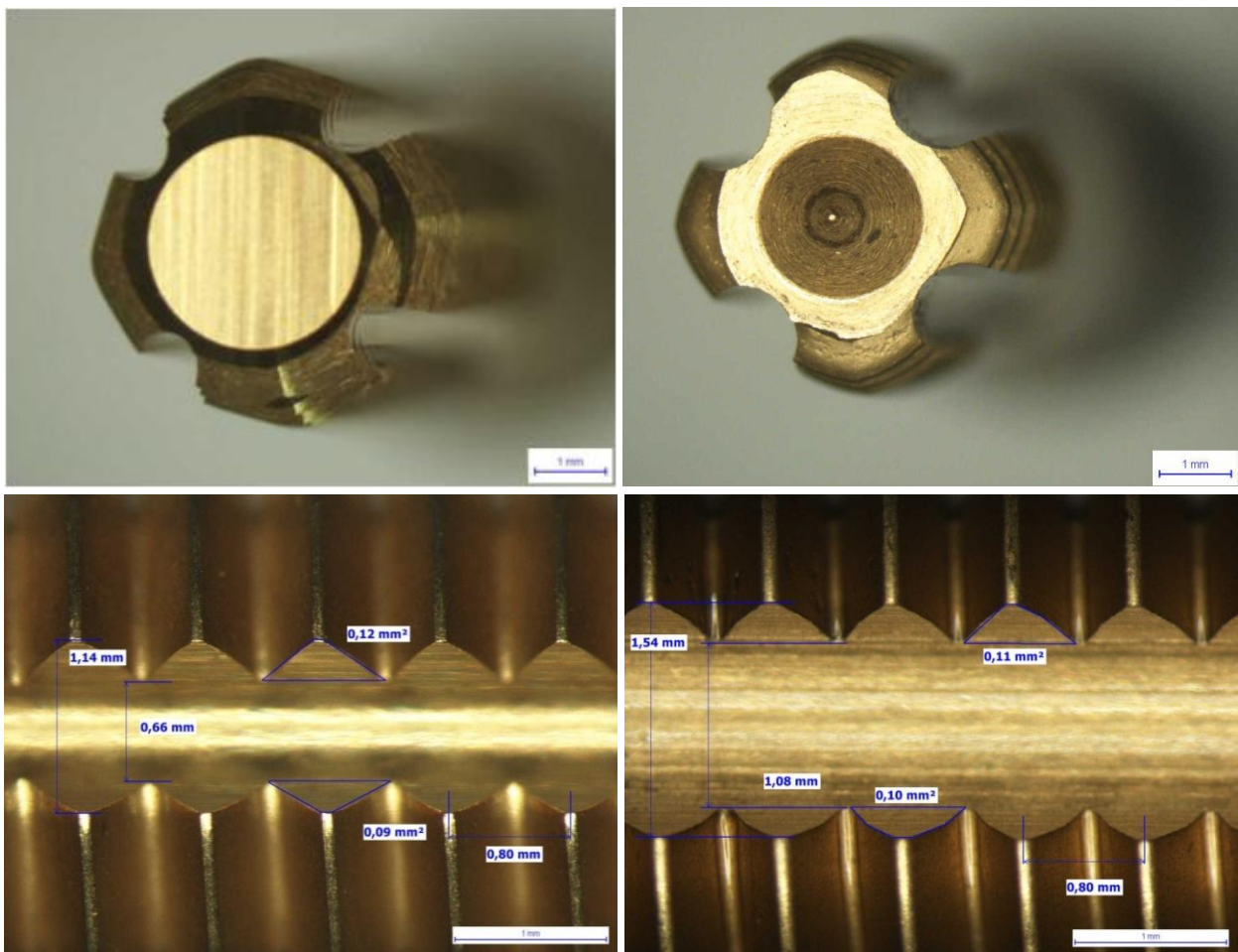


Fig. 5.70: Confronto tra la forma dei canalini di lubrificazione dei maschi Yamawa R-D (a sx) e Emuge InnoForm SN (a dx). i primi, a parità di profondità, risultano essere più stretti in corrispondenza del profilo poligonale esterno (1,14 mm contro 1,54 mm) e del diametro di fondo filetto (0,66 mm contro 1,08 mm).

5.5.1 Analisi della durata

GRUPPO	UTENSILI NON CONFORMI	N° CONTATORE	N° PEZZI PRODOTTI
C	C1, C5	198672	66224
C(1)	C7, C9, (C10), C11, C12	219445	73148
C(2)	C13, C14, C18	165000	55000
MEDIA		194372	64791

Tabella XXXII: Numero di pezzi prodotti a fine vita dagli utensili del gruppo C.

La durata di questa tipologia di utensili si è dimostrata essere di circa il 24% inferiore rispetto alla durata standard.

5.5.2 Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi

L'analisi della superficie di usura dei maschi a rullare del gruppo C ha generato grafici come i seguenti:

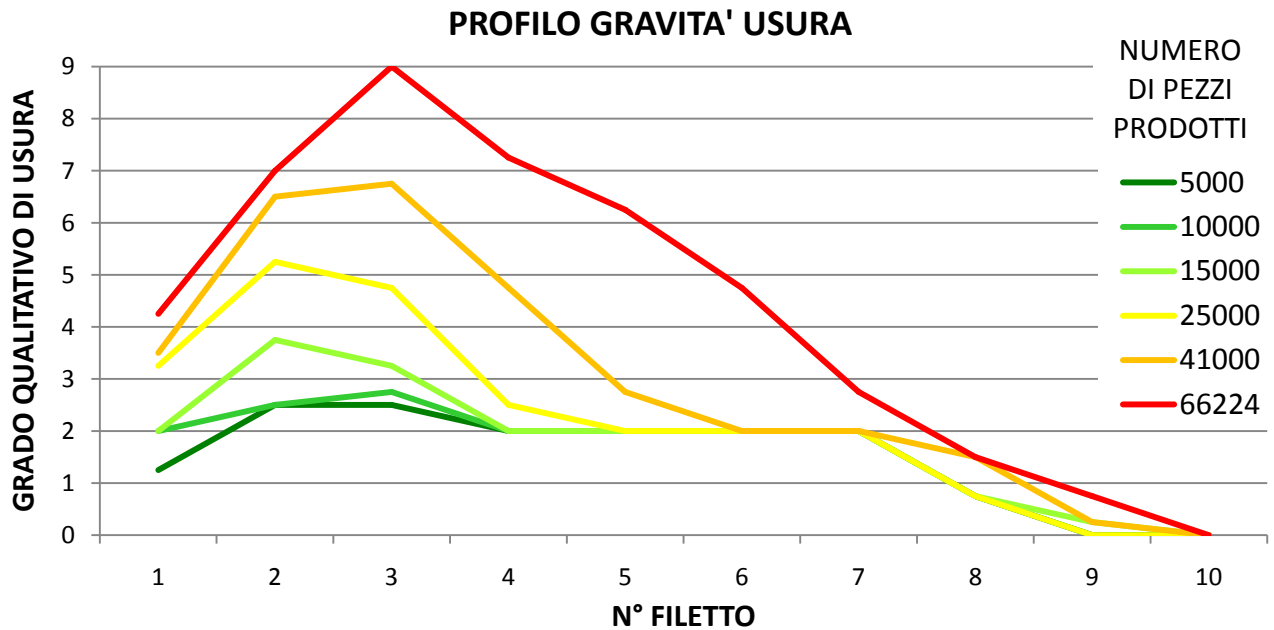


Fig. 5.71: Evoluzione dei fenomeni di usura sui filetti dell'utensile C5 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

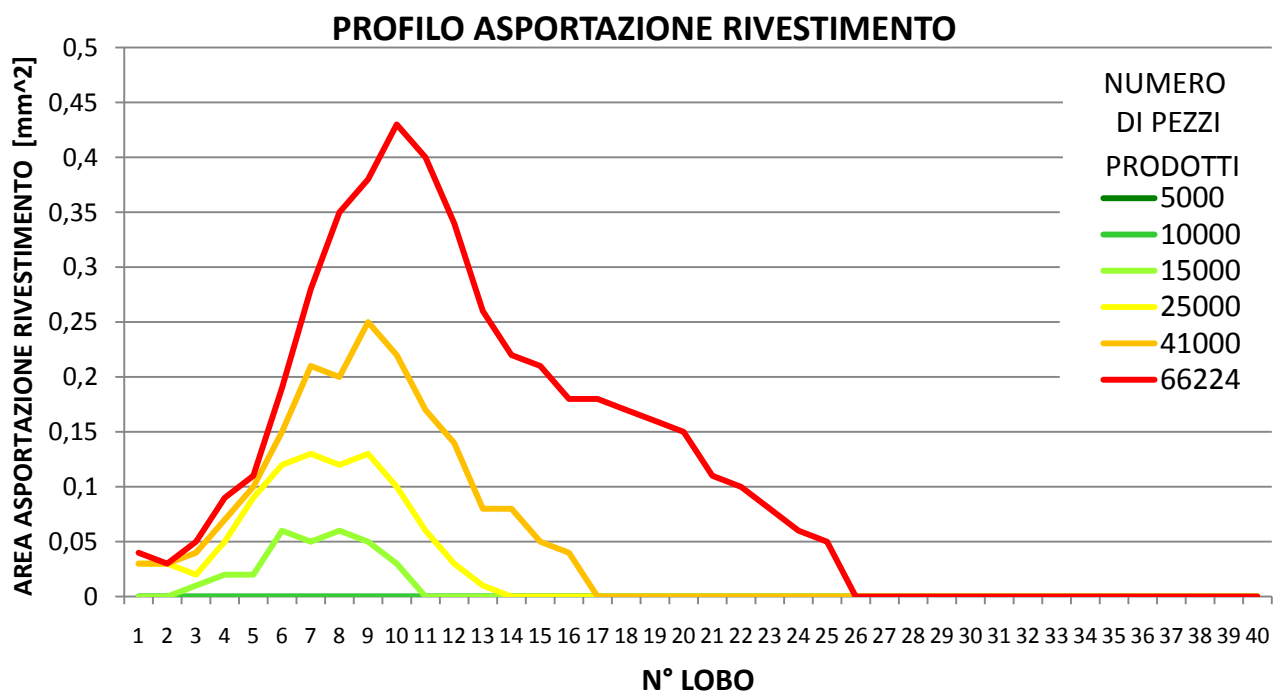


Fig. 5.72: Evoluzione dell'asportazione del rivestimento sui lobi dell'utensile C5 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

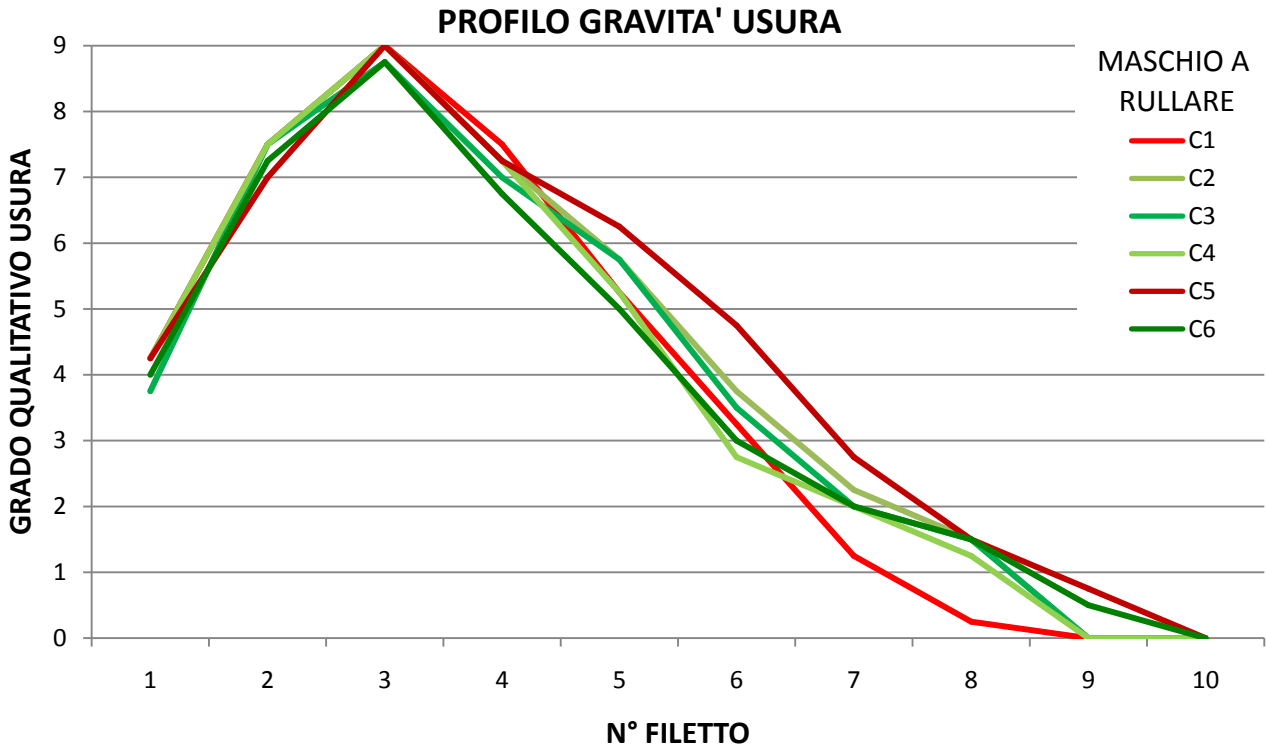


Fig. 5.73: Confronto tra i profili di gravità usura dei maschi del gruppo C al momento della sostituzione (66224 pezzi prodotti).

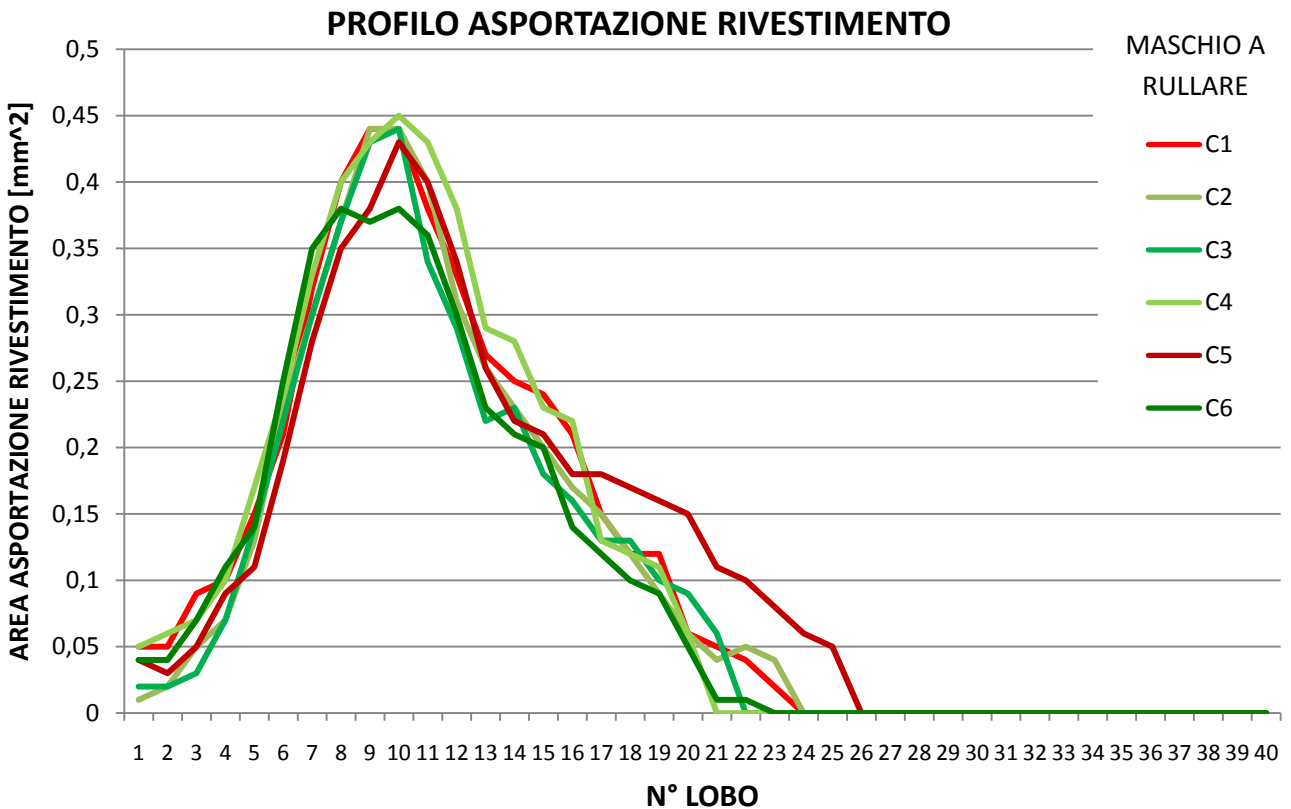


Fig. 5.74: Confronto tra i profili di asportazione del rivestimento nei maschi del gruppo C al momento della sostituzione (66224 pezzi prodotti).

I grafici relativi alla progressione del profilo di usura e di asportazione del rivestimento e quelli relativi ai profili di usura degli utensili a fine vita risultano avere un andamento molto simile a quelli degli utensili dei gruppi precedenti.

A fine vita l'estensione delle aree di usura sui lobi risulta essere prossima ai valori già misurati sugli utensili dei gruppi precedenti, con la differenza, tuttavia, che tale grado di danneggiamento viene raggiunto nel caso degli utensili YAMAWA ad un numero di pezzi prodotti notevolmente inferiore.

Come si può notare dal grafico sottostante, la velocità con si estende l'area priva di rivestimento è molto maggiore che nel caso degli utensili Emuge.

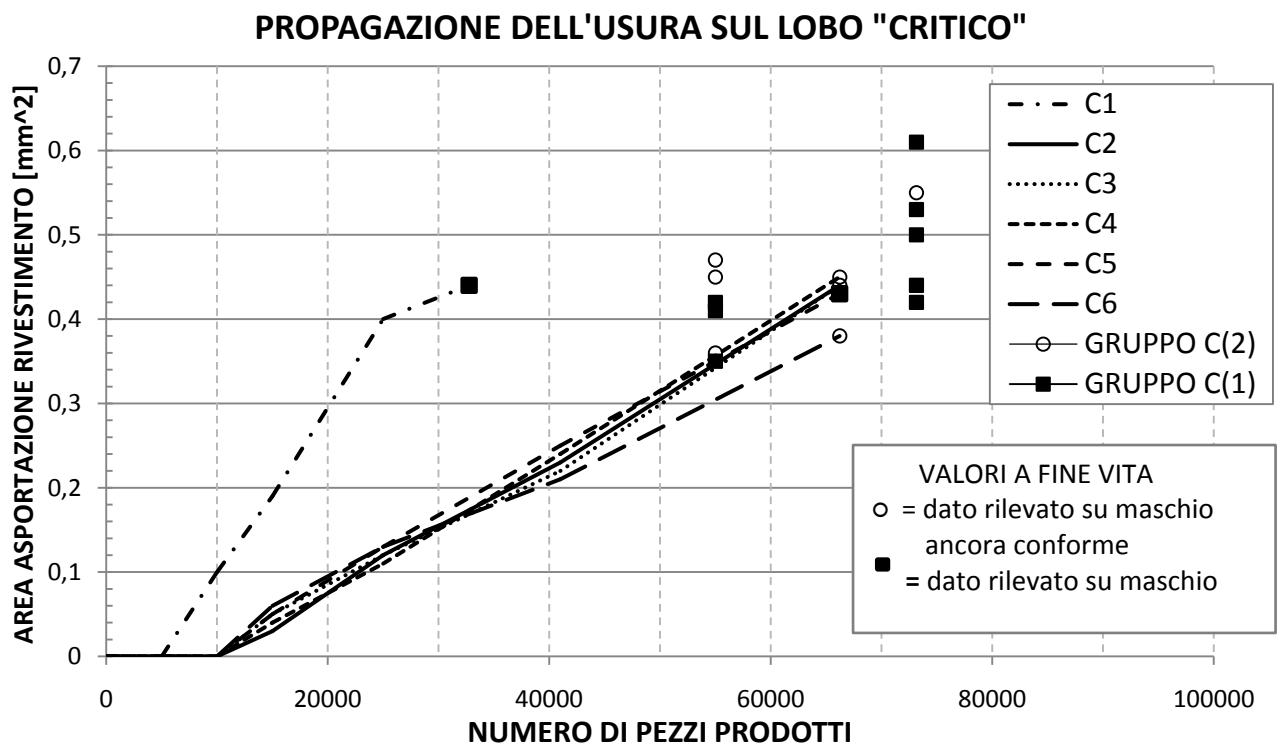


Fig. 5.75: Propagazione dell'usura sul lobo critico all'aumentare del numero di pezzi prodotti per gli utensili del gruppo C.

La ridotta durata dei maschi a rullare YAMAWA può essere attribuita, in ultima analisi, a diversi fattori tra cui l'uso di un rivestimento superficiale monostrato meno prestante e l'adozione di canalini di lubrificazione di sezione ridotta che permettono un minor afflusso di lubrificante all'interfaccia.

Fattore maggiormente influente potrebbe essere, tuttavia, la geometria stessa dell'utensile, caratterizzata da un profilo poligonale più appuntito rispetto ai maschi Emuge. Ciò comporta nel corso della lavorazione la realizzazione di una maggiore velocità di deformazione da parte dei lobi sui quali si sviluppano, di conseguenza, stati tensionali più elevati. Ne deriva un'usura più rapida che porta rapidamente l'utensile al di fuori del proprio campo di tolleranza dimensionale.

5.5.3 Descrizione dei fenomeni di usura

CAMPIONE C1 (≈ 33000 pezzi prodotti)

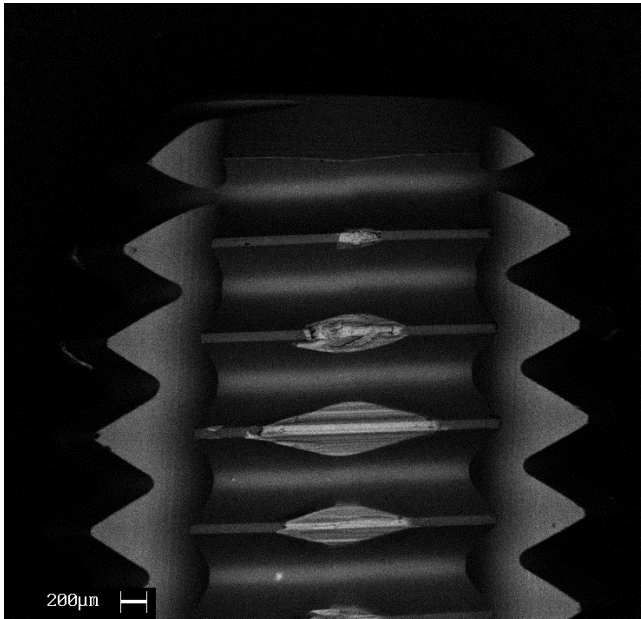


Fig. 5.76: Campione C1_1-2. Macrografia della superficie di usura.

L'analisi del campione C1 (giunto a fine vita prematuramente) mostra un danneggiamento diffuso ed esteso dei lobi.

Anche in questo caso i lobi d'imbocco manifestano soprattutto fenomeni di scheggiatura e usura adesiva, mentre in quelli di calibrazione sono presenti ampie porzioni di superficie in cui il rivestimento è stato asportato da fenomeni di tipo abrasivo.

Questa prematura comparsa di gravi forme di usura e rapida fuoriuscita dell'utensile dal campo di tolleranza, rispetto a quanto osservato nei gruppi precedenti può essere attribuita in parte anche alle minori prestazioni del rivestimento TiN mostrato rispetto al più resistente TiN-T1 adottato dalla Emuge sui propri utensili.

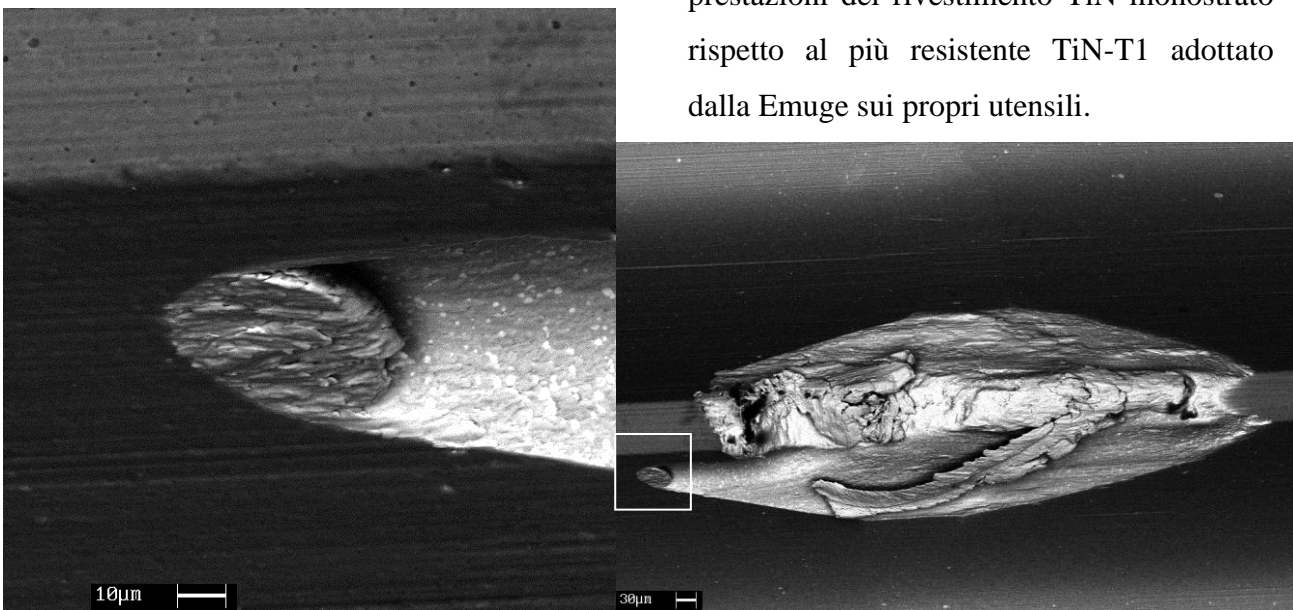


Fig. 5.77: Ingrandimento della superficie di usura sul 2° filetto e particolare.

Evidenti la presenza di materiale di riporto con morfologia a lamelle sovrapposte all'interno delle cavità formate in seguito dai fenomeni di scheggiatura.

Nell'immagine a destra si ha inoltre una particella in C45 debolmente adesa alla superficie dalla caratteristica forma lamellare in seguito alle pressioni subite durante la formatura del filetto.

Sono particelle come queste che si staccano dalla superficie di usura a formare il particolato metallico che inquina il lubrificante e si accumula a bordo macchina in seguito a fenomeni di decantazione.

CAMPIONE C5 (≈ 66000 pezzi prodotti)

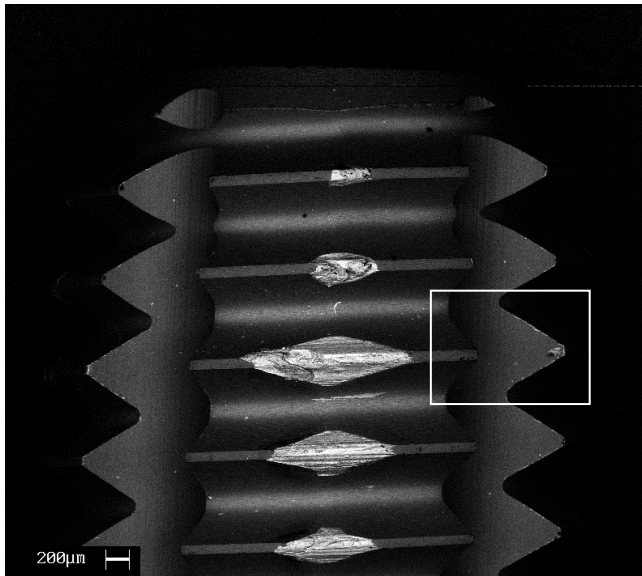


Fig. 5.78: Campione C5-L4-1. Macrografia della superficie di usura

L'analisi di un altro maschio a rullare giunto a fine vita evidenzia un meccanismo di usura del tutto simile al precedente con sviluppo nei filetti d'imbocco di scheggiature e fenomeni di tipo adesivo, e di fenomeni di tipo abrasivo sui filetti di calibratura.

L'osservazione degli spigoli dovuti alla presenza dei canalini di lubrificazione portano, ancora una volta, ad escludere che questi lavorino per asportazione di truciolo la superficie del filetto.

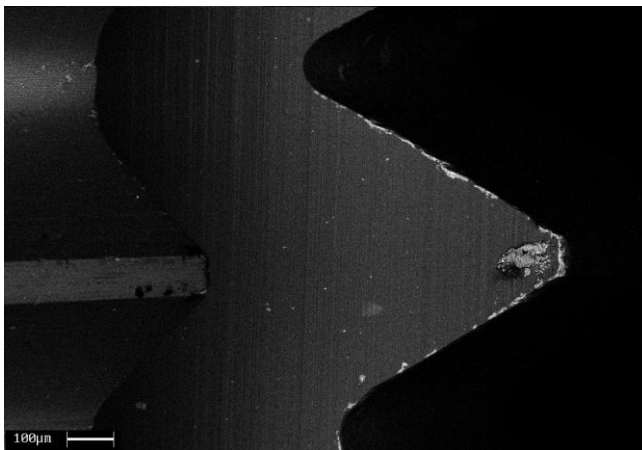


Fig. 5.79: Particolare. Ridotta asportazione del rivestimento in corrispondenza della discontinuità presente tra superficie di pressione e superficie dei canalini di lubrificazione.

L'usura è trascurabile se confrontata con il danneggiamento ritrovato sui lobi del medesimo utensile.

5.6 GRUPPO D

In relazione alle ipotesi di miglioramento formulate si è deciso di valutare l'effetto che l'adozione di utensili dal substrato realizzato tramite tecniche di metallurgia delle polveri avrebbe comportato sull'efficienza del processo produttivo.

La ricerca di maschi a rullare con tali caratteristiche ha permesso di individuare una valida alternativa nel prodotto GÜRING®00903-5,000 C-M5-6GX PROFILE PM HSS-E 13181347 (codice identificativo catalogo GÜRING® = 903) con caratteristiche:

DIMENSIONE NOMINALE	M5
CLASSE DI TOLLERANZA	6GX
SUBSTRATO	HSS-E-PM
RIVESTIMENTO	TiN
FORMA IMBOCCO	C/ 2-3
NUMERO LOBI	4
PRESENZA DI CANALINI DI LUBRIFICAZIONE	NO

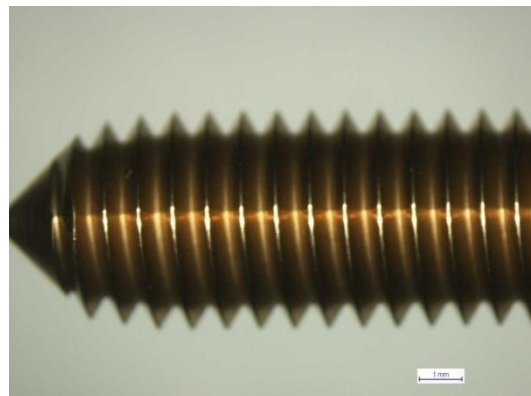


Tabella XXXIII: Caratteristiche principali dei maschi a rullare GÜRING®00903-5,000 C-M5-6GX PROFILE PM HSS-E.

Fig. 5.80: Vista laterale (10×) del campione D1.

Il particolare acciaio sinterizzato utilizzato dalla Güring® è l'HS 6-5-3-8 PM30 altrimenti noto a livello commerciale come VANADIS 30. Questo acciaio, prodotto tramite metallurgia delle polveri, possiede alta durezza e resistenza all'usura, resistenza al calore e stabilità degli spigoli taglienti (se usato per fabbricare utensili a tagliare). Ha, inoltre, una struttura molto fine, densa e costante, il che dovrebbe garantire tutti i vantaggi derivanti dall'adozione di utensili realizzati con tale tecnologia produttiva.

ACCIAIO	C	Cr	W	Mo	V	Co	DUREZZA HRC
HS 6-5-3-8	1,28	4,20	6,40	5,00	3,10	8,50	66÷68

Tabella XXXIV: Composizione chimica percentuale e proprietà dell'acciaio VANADIS 30.

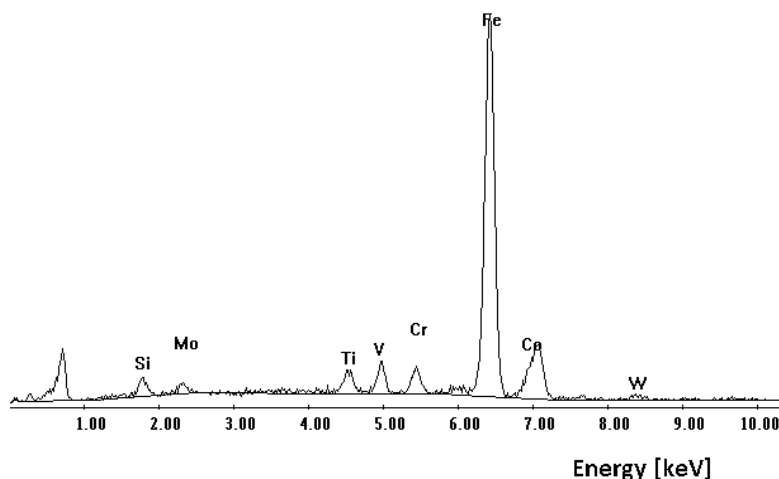


Fig. 5.81: Spettro EDS ottenuto in corrispondenza del substrato in HSS-E-PM degli utensili del gruppo D.

Il rivestimento è, anche in questo caso, il classico monolayer standard a base TiN di caratteristiche viste.

Le caratteristiche geometriche fondamentali sono, in virtù della volontà di modificare di volta in volta il minor numero di variabili possibile, le stesse rispetto all'utensile standard, ad eccezione fatta della morfologia della superficie attiva (profilo poligonale) per la quale ogni azienda sfrutta il proprio know-out.

Anche i parametri di lavorazione e le condizioni di lubrificazione alle quali tali utensili sono stati testati sono mantenute invariate.

Un piccolo appunto su questo gruppo di utensili deriva dal fatto che su 18 maschi a rullare acquistati 2 risultano essere non conformi per un difetto di fabbricazione. Non rispettano, infatti, le caratteristiche geometriche stabilite dalla norma ISO 68-1 sulla geometria del filetto.

Secondo tale norma l'apice del profilo attivo di deformazione dei maschi a rullare deve presentare uno smusso di ampiezza pari a $P/8 = 0,064$ mm per il filetto M5, mentre l'apice di questi maschi a rullare non conformi risulta essere privo di qualsiasi forma di raccordo presentando, invece, uno spigolo vivo.

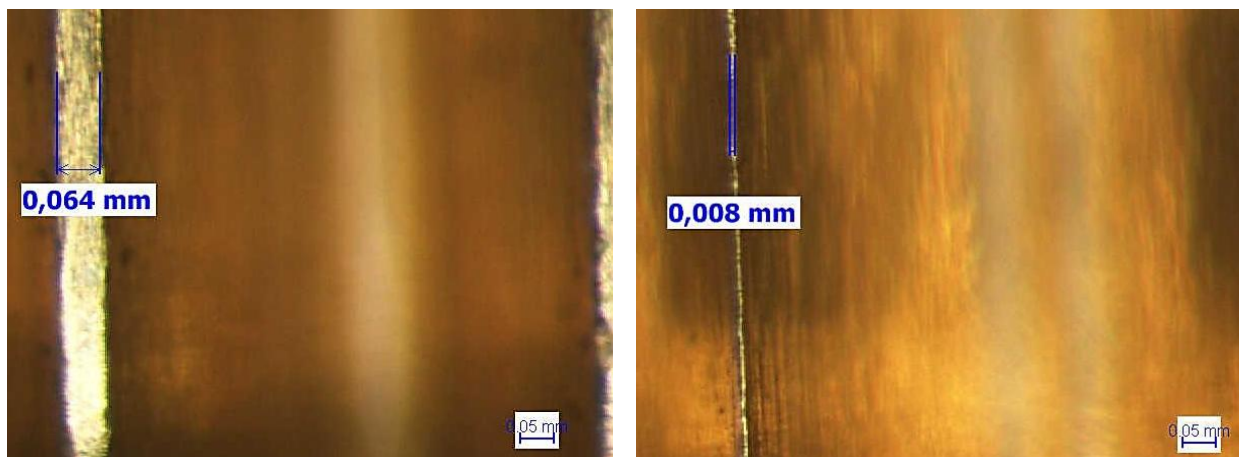


Fig. 5.82: Differenza tra l'apice del filetto di un maschio conforme (campione D1 a sx) con smusso pari a $P/8$ e di un maschio non conforme (campione D10 a dx) con smusso assente. Le foto sono state ottenute in entrambi i casi ad un ingrandimento pari a $63\times$.

Ad ulteriore prova di tale non conformità si ha che i filetti prodotti da tali utensili non superano il controllo al tampone filettato PASSA/NON PASSA.

Le prove sono state condotte, di conseguenza, unicamente con i 16 utensili conformi posizionando maschi standard (non analizzati) sulle filettatrici rimaste vuote.

5.6.1 Analisi della durata

L'uso di utensili ottenuti mediante metallurgia delle polveri non ha portato ai benefici sperati:

GRUPPO	UTENSILI NON CONFORMI	N° CONTATORE	N° PEZZI PRODOTTI
D	D7	177132	59044
D(1)	D13, D16, D18	198510	66170
MEDIA	-	187821	62607

*Tabella XXXV:
Numero di pezzi prodotti a fine vita dagli utensili del gruppo D.*

Si è riscontrata, infatti, una riduzione del numero di filettature prodotte a fine vita dagli utensili di circa il 26% rispetto alle condizioni originali.

5.6.2 Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi

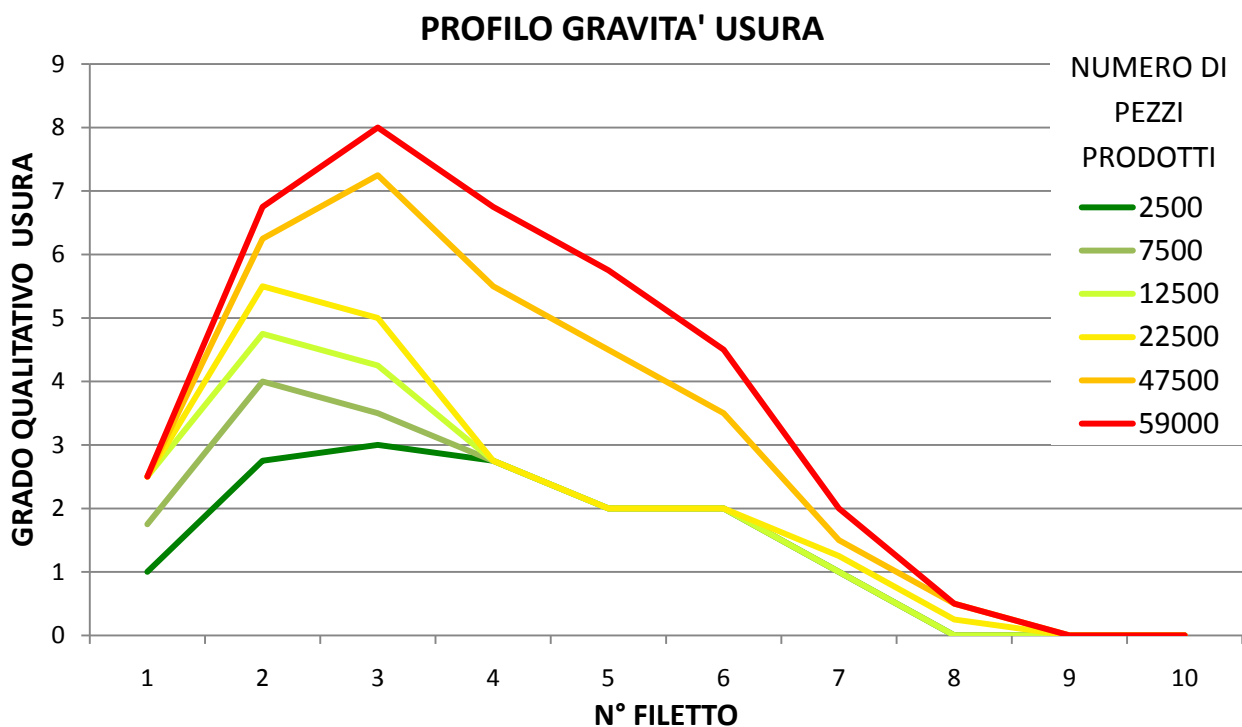


Fig. 5.83: Evoluzione dei fenomeni di usura sui filetti dell'utensile D7 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

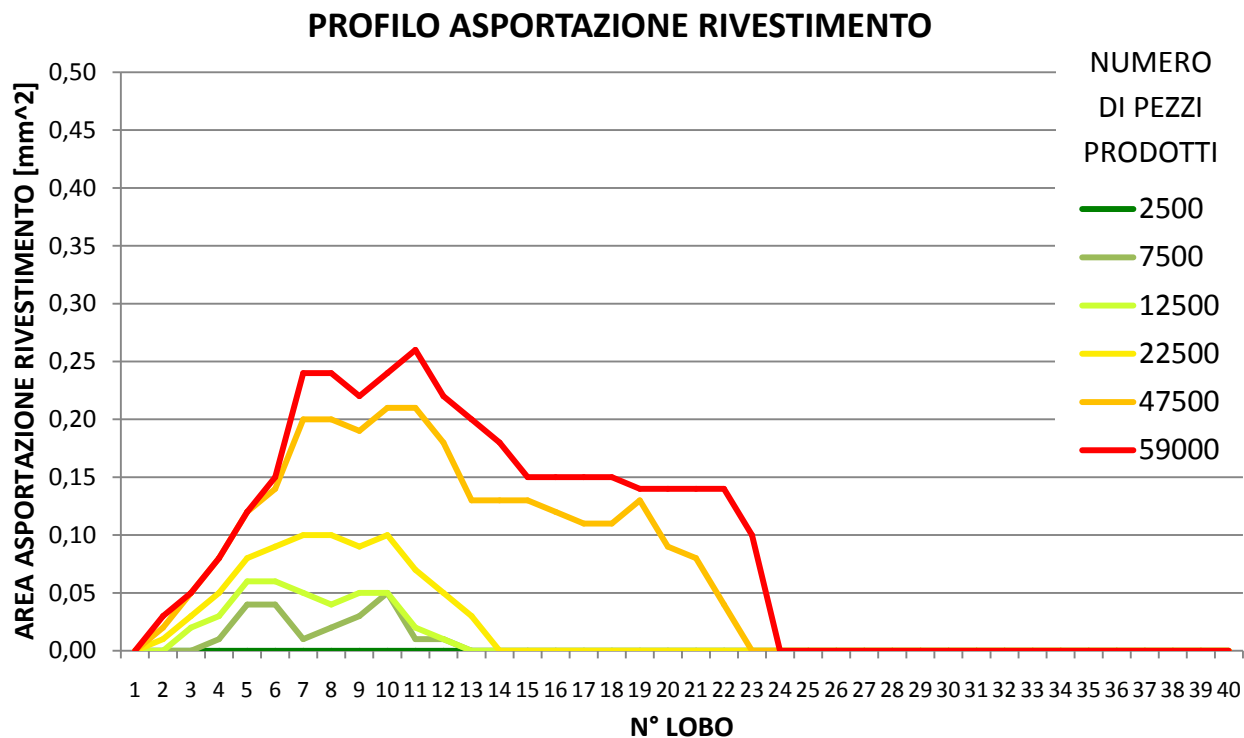


Fig. 5.84: Evoluzione dell'asportazione del rivestimento sui lobi dell'utensile D7 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

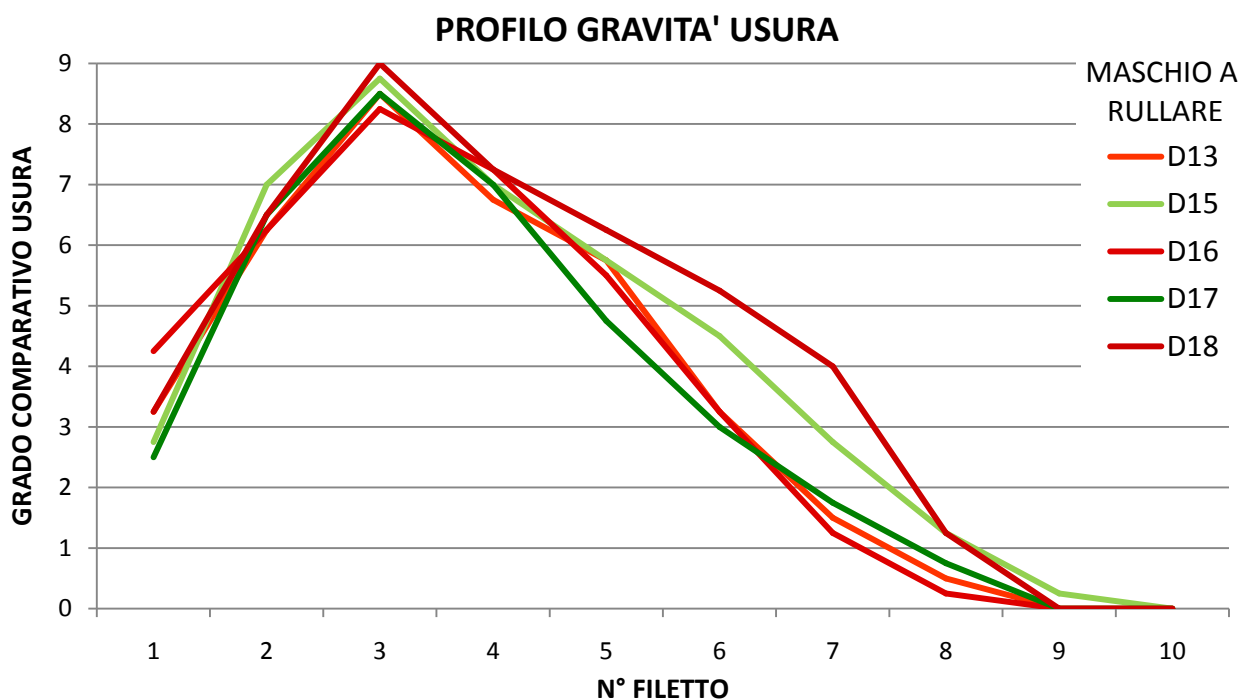


Fig. 5.85: Confronto tra i profili di gravità usura dei maschi del gruppo D(1) al momento della sostituzione (66170 pezzi prodotti da ogni singolo maschio).

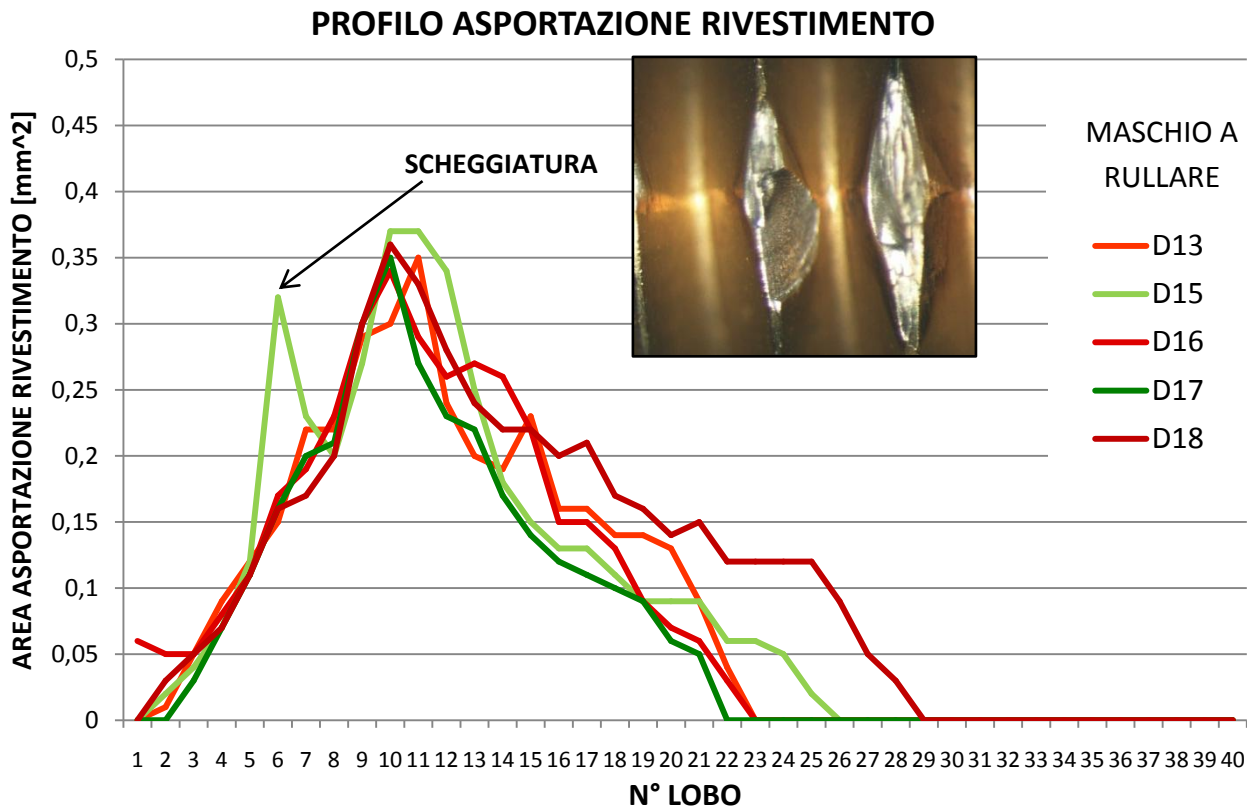


Fig. 5.86: Confronto tra i profili di asportazione del rivestimento nei maschi del gruppo D(1) al momento della sostituzione (66170 pezzi prodotti da ogni singolo maschio). Nel riquadro è riportata l'immagine del fenomeno di scheggiatura riscontrato nel maschio D15.

Lo studio dei profili di usura dei maschi a rullare Güring® 00903 ha portato ad alcune considerazioni preliminari che saranno, poi confermate da ulteriori osservazioni effettuate al microscopio elettronico.

Mentre i fenomeni tribo-ossidativi si manifestano con modalità del tutto simili a quanto osservato nei gruppi precedenti, si può notare una maggiore irregolarità nello sviluppo del profilo di usura che risulta essere particolarmente frastagliato negli utensili prodotti mediante metallurgia delle polveri.

Si è verificata, infatti, una certa tendenza, da parte di quest'ultimi, a manifestare fenomeni di frattura e scheggiatura sui lobi, rendendo maggiormente discontinuo il profilo di usura.

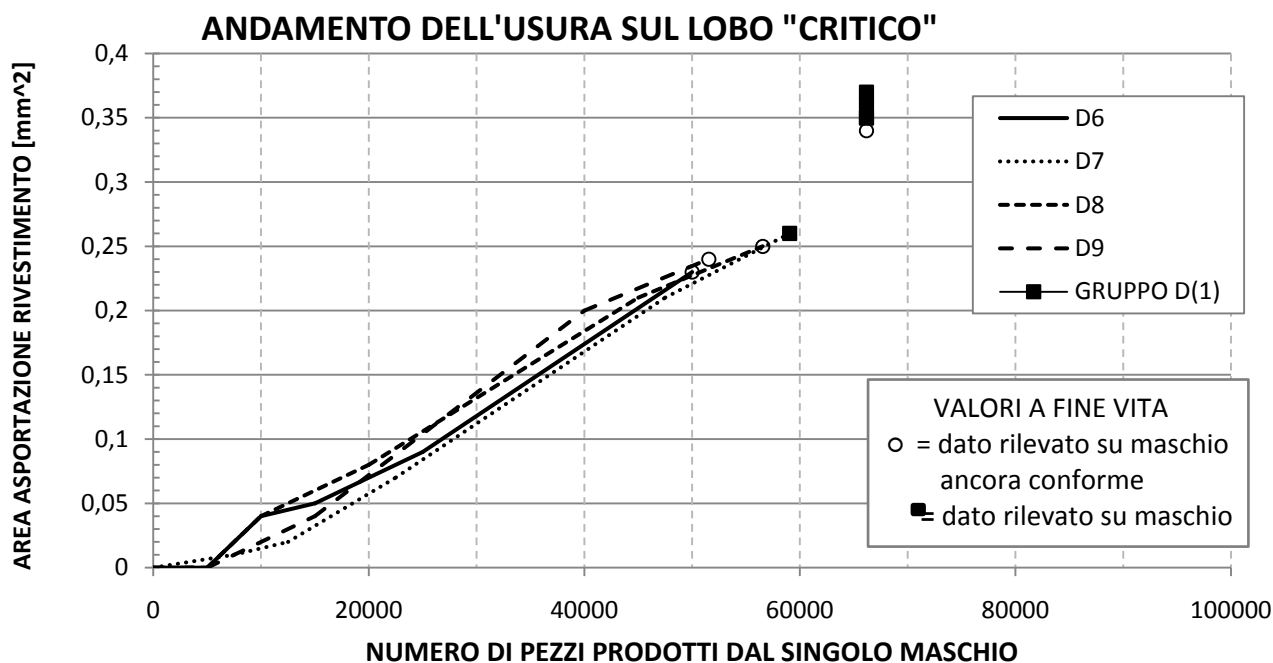


Fig. 5.87: Propagazione dell'usura sul lobo critico all'aumentare del numero di pezzi prodotti per gli utensili del gruppo D.

La velocità con cui il rivestimento viene asportato dai lobi risulta essere solo leggermente superiore a quella caratteristica dei maschi del gruppo A, ciò nonostante tali utensili fuoriescono dal campo di tolleranza a valori di usura del lobo critico mediamente inferiori a quanto osservato nei maschi standard. Il risultato di ciò, come visto, è una durata di circa il 26% inferiore rispetto gli utensili standard e di circa il 32% inferiore rispetto agli utensili del gruppo A.

Le cause possono essere ancora una volta dovute al fatto che questi utensili manifestano un profilo poligonale più appuntito che fa fuoriuscire l'utensile dal campo di tolleranza a livelli di usura inferiori.

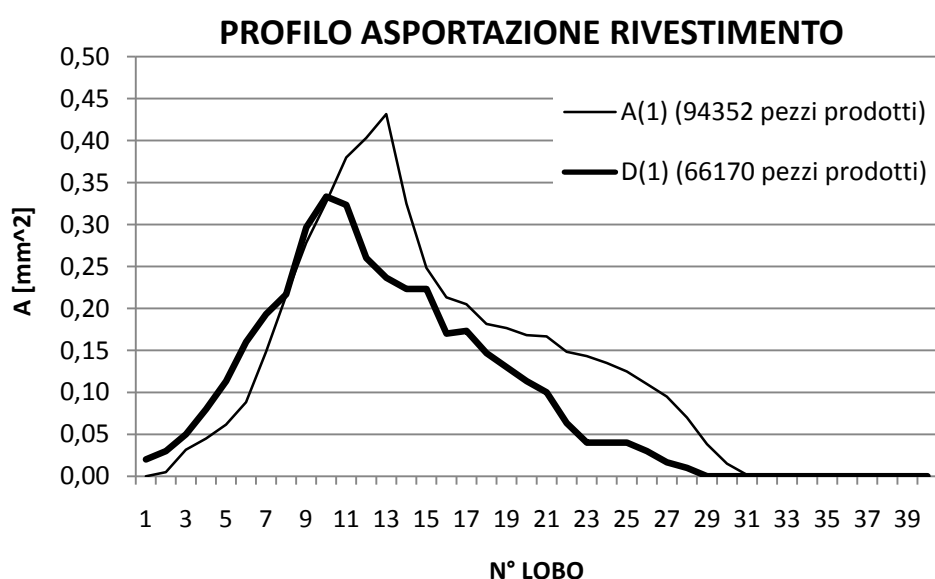


Fig. 5.88: Confronto tra il profilo di asportazione medio a fine vita degli utensili appartenenti al gruppo D(1) con quelli del gruppo A(1). Evidente come i maschi del gruppo D risultino non conformi a valori di A [mm²] massimi inferiori rispetto a quelli del gruppo A e come l'asportazione del rivestimento si estenda su un numero inferiore di lobi.

5.6.3 Descrizione dei fenomeni di usura

CAMPIONE D2 (5000 pezzi prodotti)

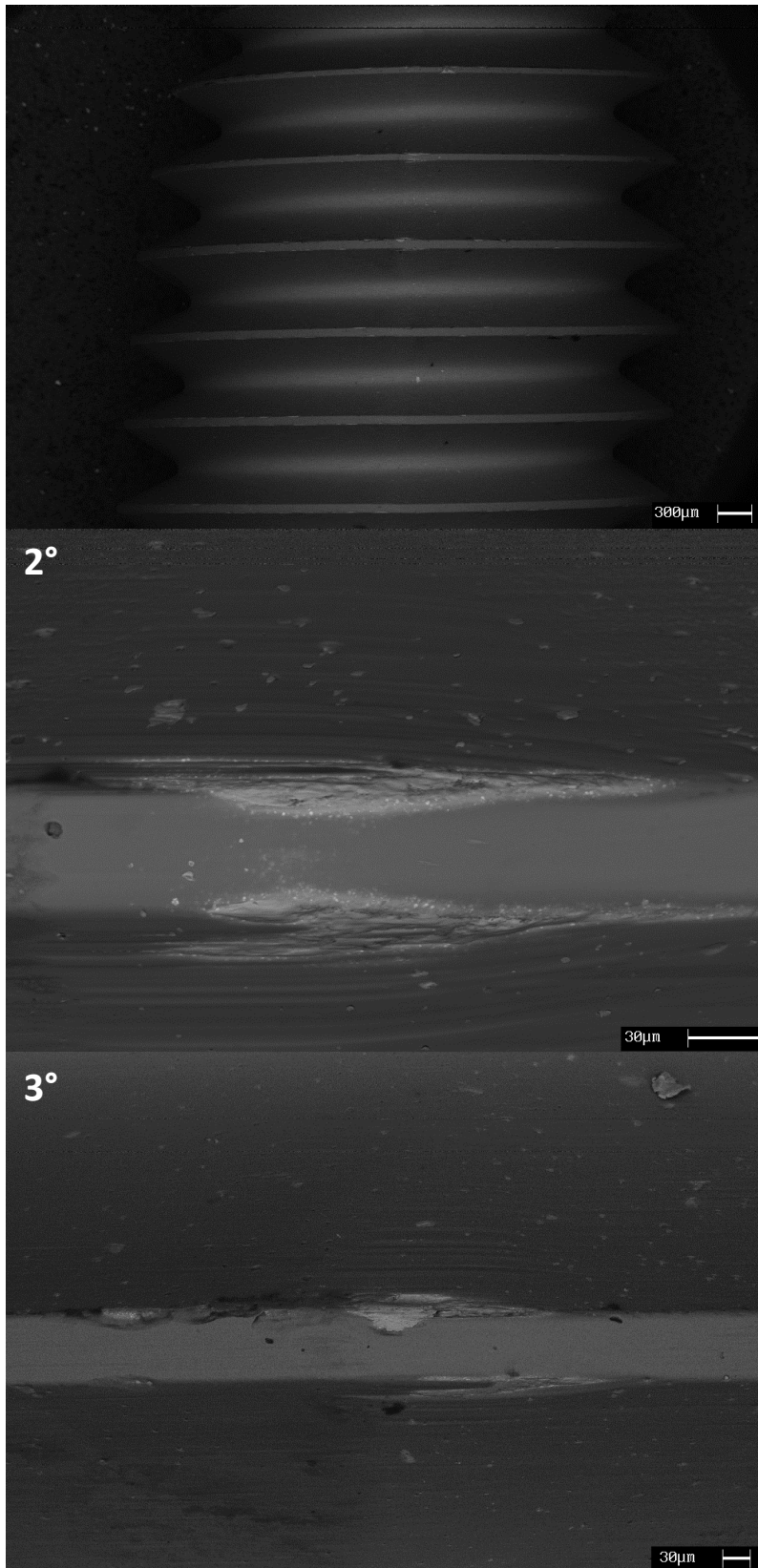


Fig. 5.89: Campione D2_L2-3. Macrografia e ingrandimento delle superfici di usura sul 2° e 3° filetto.

I maschi a rullare del gruppo D, nonostante l'adozione di un substrato ottenuto tramite metallurgia delle polveri non hanno manifestato evidenti variazioni del comportamento ad usura.

Dalle immagini si può osservare come l'usura proceda sostanzialmente con gli stessi meccanismi finora riconosciuti negli altri gruppi di utensili.

Il rivestimento monostrato a base TiN (che ancora una volta si dimostra essere meno resistente del multistrato TiN-T1) subisce nei punti maggiormente sollecitati quei fenomeni, già ritrovati, di lucidatura, inflessione ed aratura che ne causano un progressivo assottigliamento.

La gravità manifestata dai fenomeni abrasivi rispecchia l'andamento della pressione esercitata dalla lavorazione sull'utensile.

I primi punti in cui il rivestimento risulta asportato e compare l'acciaio rapido PM sottostante risultano essere, giustamente, in corrispondenza

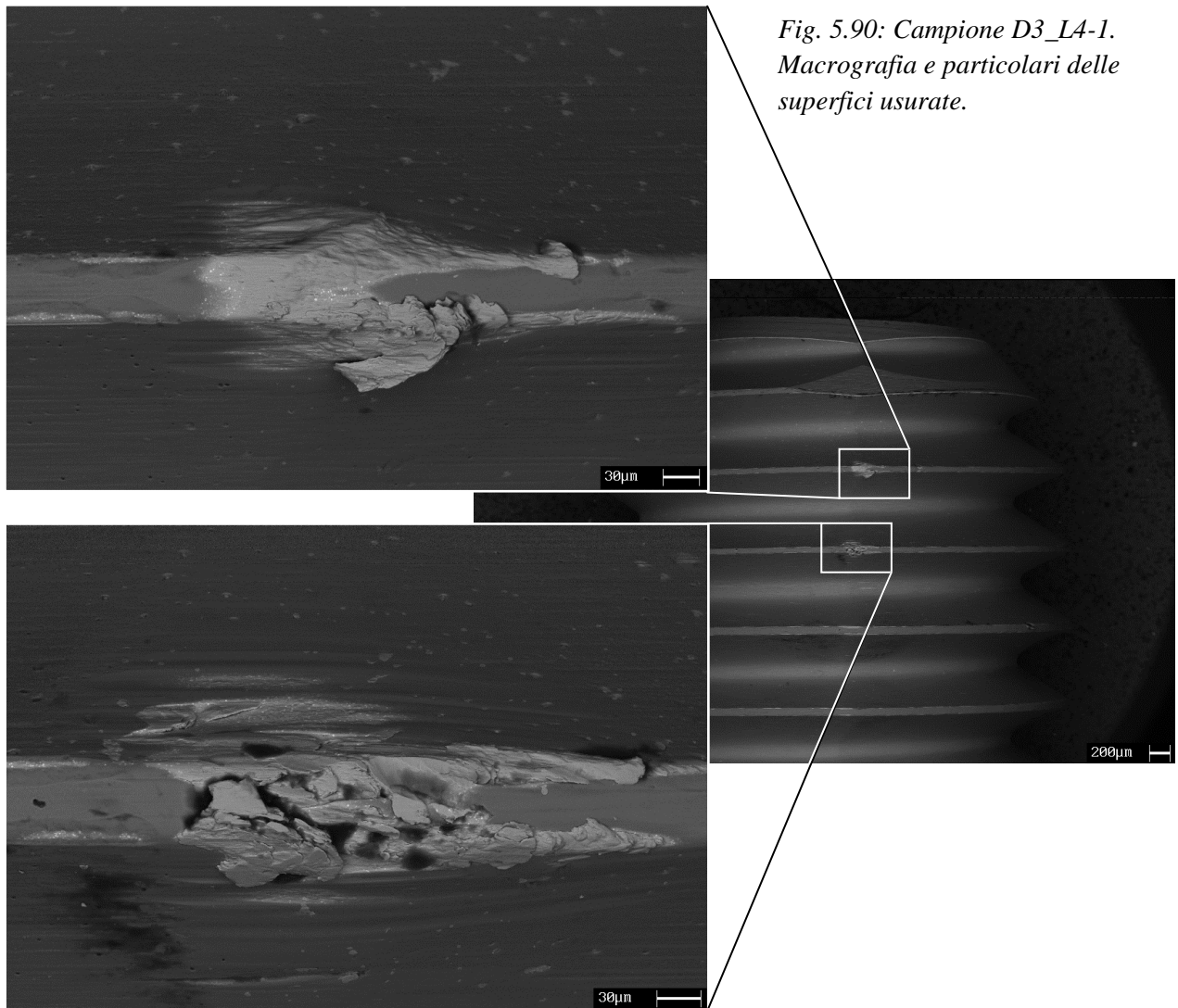
degli apici dei lobi dei filetti di imbocco dove gli utensili sono sottoposti alle tensioni massime. In tali punti hanno luogo fenomeni di trasferimento del materiale lavorato che ricopre l'HSS-E-PM con un sottile strato adesivo a morfologia lamellare.

In prossimità di tali aree si ritrovano frequentemente aloni a base di materiale carbonioso, sintomatici dell'aumento di temperatura che localmente si ha in tali punti.

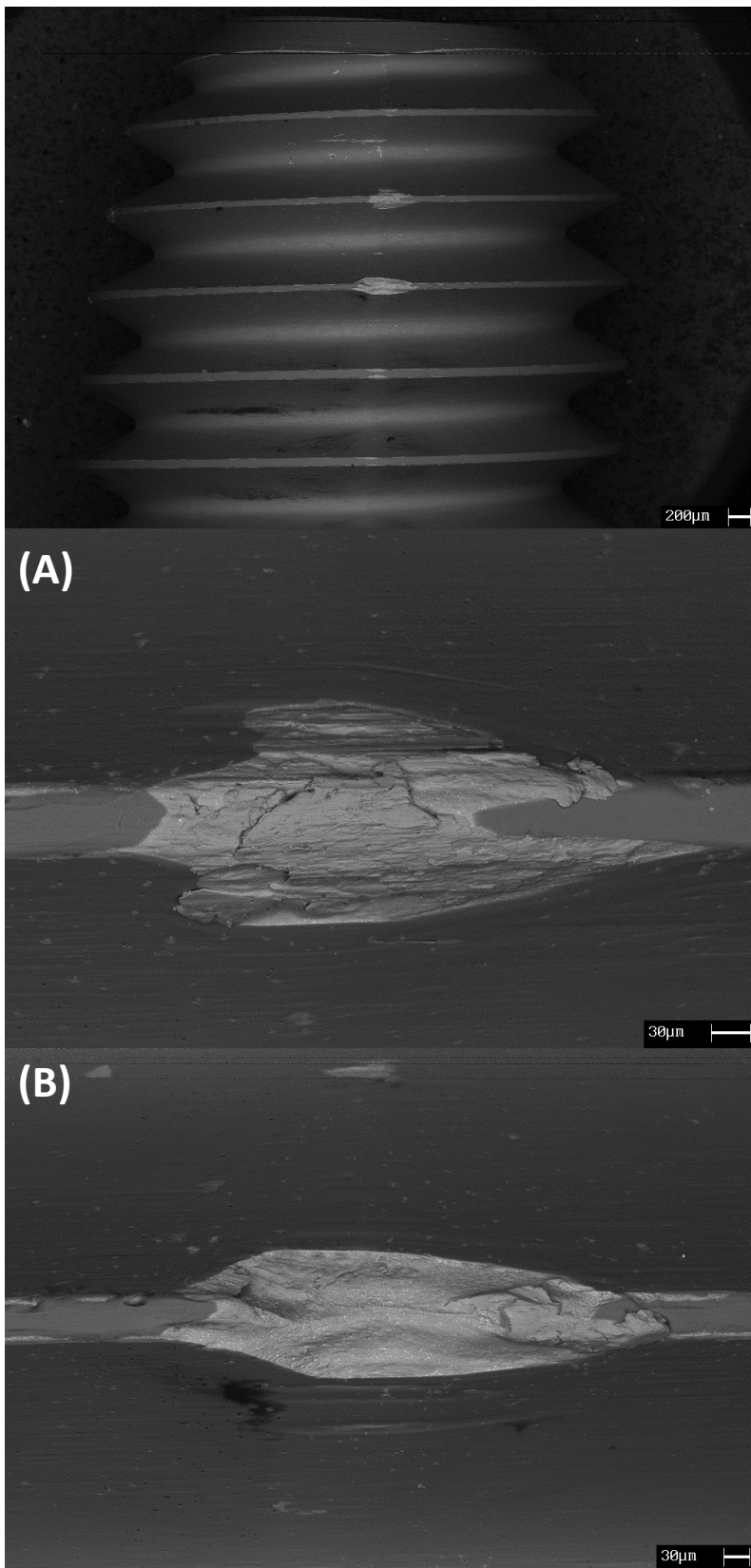
CAMPIONE D3 (10000 pezzi prodotti)

Gli stessi fenomeni sopra descritti, ma di maggiore entità ed estensione, si ritrovano in utensili che hanno prodotto un maggior numero di pezzi.

L'osservazione dei punti maggiormente sollecitati in tal caso rileva aree di asportazione del rivestimento maggiori e strutture lamellari in C45 più spesse e complesse. Contemporaneamente si estende la regione circostante in cui il rivestimento è lucidato e solcato.



CAMPIONE D4 (15000 pezzi prodotti)



I fenomeni di usura, finora descritti, modificano il comportamento tribologico del sistema, ma, di fatto, lasciano inalterata la geometria della superficie attiva.

L'eventuale riduzione del diametro degli utensili causata dall'usura è, infatti, compensata, anche in questo caso, dallo sviluppo di strutture adese in materiale di riporto che con la loro presenza schermano il materiale sottostante dal subire ulteriori fenomeni abrasivi.

Tuttavia, come ipotizzato precedentemente, il maggiore attrito sviluppato nel contatto ad elevate pressioni tra materiali di uguale composizione chimica e la ciclica formazione e rottura di microsaldature tra utensile e superficie lavorata, favorisce la nascita e sviluppo di cricche di fatica superficiale che possono portare alla frammentazione della superficie.

Fig. 5.91: Campione D4_L2-3. Macrografia e particolari delle superfici usurate.

(A) Azione "protettiva" del materiale di riporto sul 2° filetto.

(B) Scheggiatura sul 3° filetto.

Questo fenomeno è evidente in corrispondenza del terzo filetto, dove un'estesa scheggiatura modifica profondamente la geometria del lobo, rendendolo di fatto incapace di imprimere la superficie del preforo, ed espone un'ampia porzione di acciaio rapido HSS-E-PM.

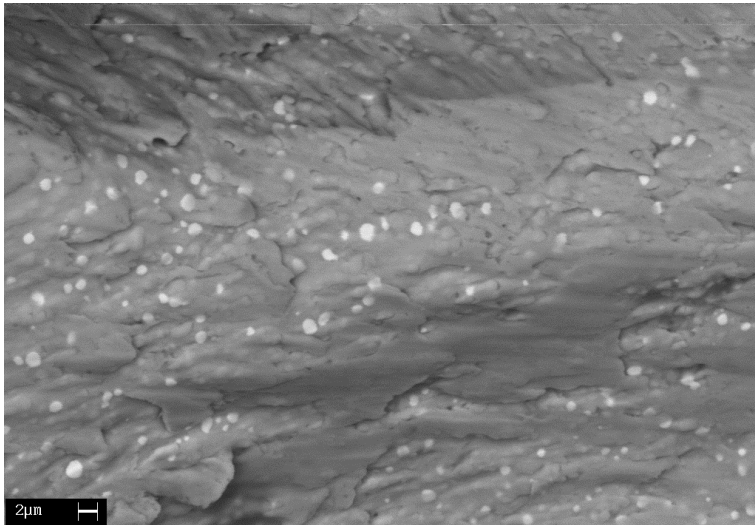


Fig. 5.92: Particolare della superficie di frattura dell'HSS-E-PM. Al di sotto delle lamelle di C45 adese è evidente la distribuzione uniforme dei carburi e la struttura densa dell'acciaio PM.

Il fenomeno di frattura del materiale risulta, tuttavia, più esteso e grave di quello manifestato da maschi prodotti in acciaio rapido “tradizionale” ad un uguale numero di pezzi prodotti.

È logico, quindi, ipotizzare una maggiore fragilità e una minore resistenza a fatica dell'acciaio HSS-E-PM rispetto all'HSS-E quando sottoposti a queste particolari condizioni.

Essendo, infatti, un acciaio ottenuto tramite sinterizzazione, è possibile che eventuali porosità o difetti residui, nonostante l'elevata densità, fungano da punti d'innescio o favoriscano la propagazione delle cricche di fatica.

CAMPIONE D6 (50000 pezzi prodotti)

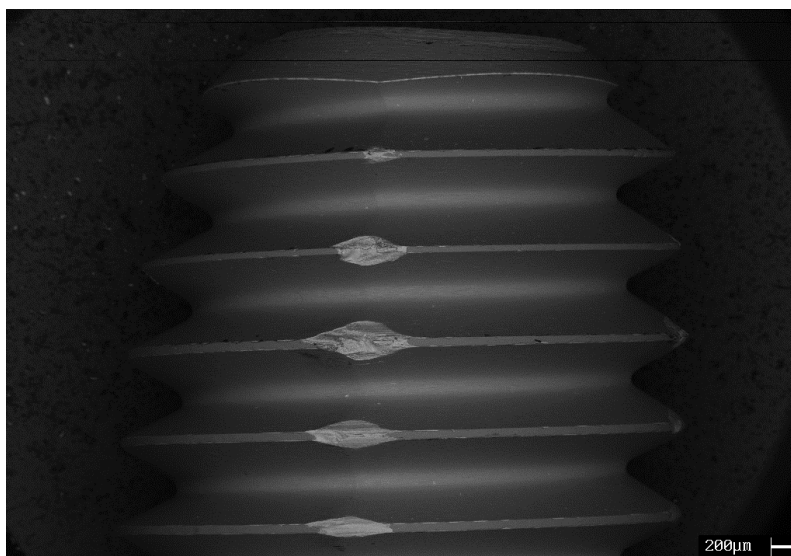


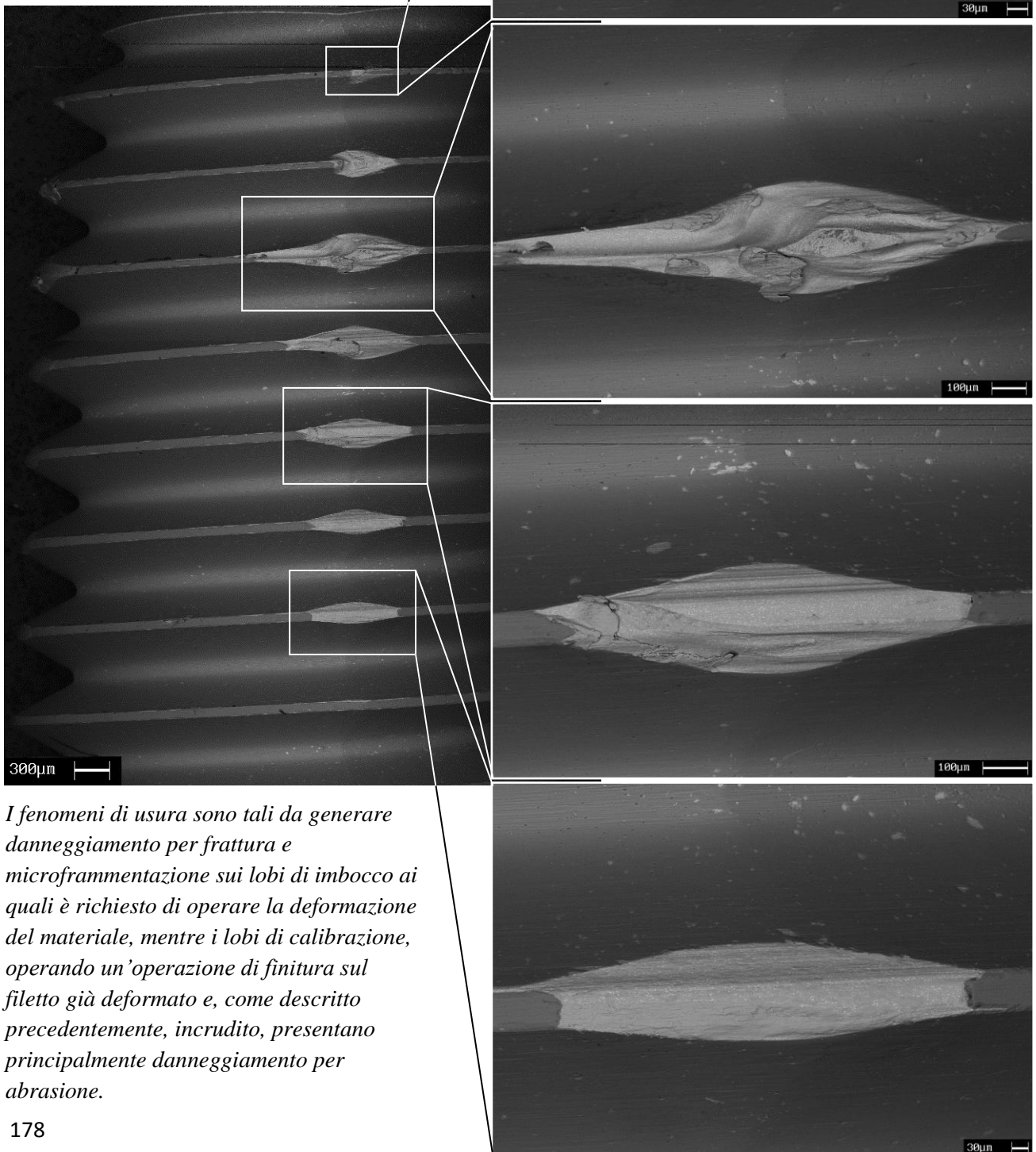
Fig. 5.93: Campione D6_L2-3. Macrografia della superficie di usura.

L'osservazione di utensili al limite di tolleranza o fuori tolleranza conferma quanto descritto sopra.

Anche nel caso di maschi a rullare prodotti da metallurgia delle polveri si nota un'evoluzione dei meccanismi di danneggiamento lungo il profilo poligonale.

CAMPIONE D18 (66000 pezzi prodotti)

*Fig. 5.94: Campione D18_L4-1.
Macrografia ed evoluzione dei
meccanismi di usura lungo il profilo
poligonale del maschio.
Particolari delle superfici di usura sui
filetti 1, 3, 5 e 7.*



I fenomeni di usura sono tali da generare danneggiamento per frattura e microframmentazione sui lobi di imbocco ai quali è richiesto di operare la deformazione del materiale, mentre i lobi di calibrazione, operando un'operazione di finitura sul filetto già deformato e, come descritto precedentemente, incrudito, presentano principalmente danneggiamento per abrasione.

5.7 GRUPPO E

Una delle soluzioni proposte per incrementare la resistenza all'usura degli utensili è stata quella di sostituire il rivestimento degli utensili con un film che presentasse maggiori prestazioni nelle condizioni di lavoro date.

La ricerca sul mercato è risultata in tal senso poco fruttuosa in quanto al classico monolayer a base TiN e al più prestante multistrato TiN-T1, unica alternativa valida trovata è stata la possibilità di testare maschi a rullare con un rivestimento a base AlCrN.

Questa povertà nell'offerta è strettamente legata, come abbiamo visto, alla scarsa richiesta del mercato di maschi M5 a tolleranza 6GX, il che fa sì che i produttori propongano un catalogo esiguo di prodotti con tale geometria.

I maschi a rullare GÜRING®01588-5,000 C-M5-6GX PROFILE HSS-E 13300703 (codice identificativo catalogo GÜRING® = 1588) presentano le seguenti proprietà:

DIMENSIONE NOMINALE	M5
CLASSE DI TOLLERANZA	6GX
SUBSTRATO	HSS-E
RIVESTIMENTO	AlCrN
FORMA IMBOCCO	C/ 2-3
NUMERO LOBI	4
PRESENZA DI CANALINI DI LUBRIFICAZIONE	SI (4)

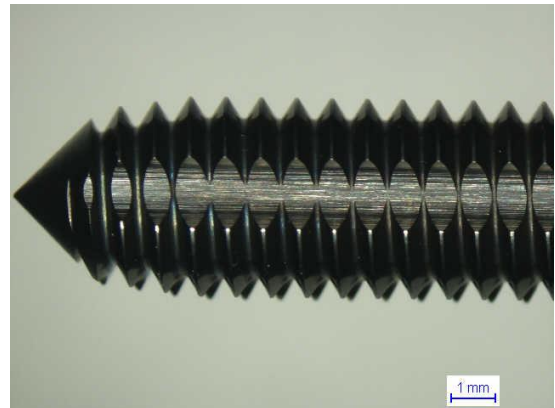


Tabella XXXVI: Caratteristiche principali dei maschi a rullare GÜRING®01588-5,000 C-M5-6GX PROFILE HSS-E.

Fig. 5.95: Vista laterale (10×) del campione E1.

Il rivestimento a base AlCrN, noto anche con il nome commerciale “Alcrona”, presenta teoricamente delle prestazioni superiori al classico monolayer a base TiN, dal punto di vista della resistenza alle fessurazioni, all'ossidazione e al calore. La maggiore durezza e il minor coefficiente d'attrito dovrebbe, inoltre, migliorare le caratteristiche di scorrevolezza e di resistenza all'usura.

Composizione	Microdurezza HV (0,05)	Coefficiente di attrito su acciaio (a secco)	Spessore [µm]	Temperatura massima di esercizio [°C]	Dilatazione termica [$*10^{-6}/^{\circ}\text{K}$]	Colore indicativo
TiN	2300	0,4	1÷5	600 °C	9,3	Giallo-oro
AlCrN	3200	0.35	1÷5	1100 °C	6,4	Blu-grigio

Tabella XXXVII: Confronto tra le proprietà fisiche dei rivestimenti a base AlCrN e quelli a base TiN.

Anche la letteratura risulta essere concorde nell'affermare come in condizioni non lubrificate le prestazioni dell'AlCrN siano superiori a quelle dei rivestimenti più comuni a base TiN, TiCN, CrN.

Negli studi condotti tale rivestimento sembrerebbe usurarsi, in assenza di fasi lubrificanti interposte, principalmente ad opera di meccanismi abrasivi e tribo-ossidativi.

Tuttavia questi ultimi fenomeni, grazie alla particolare composizione chimica del rivestimento, permettono la formazione di strati superficiali protettivi stabili termicamente e resistenti all'usura.

L'analisi spettroscopica delle superfici di usura ottenute in queste sperimentazioni ha evidenziato, infatti, la presenza di picchi energetici in corrispondenza delle energie di legame tra Al e O e tra Cr e O. Ciò si può spiegare con la formazione film di allumina (Al_2O_3) e di ossidi di cromo (Cr_2O_5 , Cr_2O_3) in seguito a reazioni di tipo ossidativo favorite dal raggiungimento sulla superficie di temperature elevate a causa dello strisciamento.

Questi film fungono, al progredire dell'usura, sia da barriera termica che da strati lubrificanti.

È dimostrato, in particolar modo, come gli ossidi di cromo manifestino a secco una resistenza ad usura migliore di quelli di titanio (sviluppati da reazioni tribo-ossidative a partire da rivestimenti TiN, TiCN, AlTiN) e da ciò potrebbe derivare parte del migliore comportamento tribologico osservato.

Tutte queste osservazioni sono, tuttavia, verificate in assenza di lubrificante, mentre non si trovano informazioni in merito a come può la presenza di un liquido lubro-refrigerante, posto tra le due superfici in strisciamento reciproco, influire sul comportamento ad usura del rivestimento in AlCrN.

Solo l'applicazione degli utensili alle condizioni specifiche di lavoro realizzate dall'impianto produttivo sotto esame potranno, per tanto, confermare o meno le previsioni.

I maschi in esame presentano, inoltre, una geometria caratterizzata dalla presenza di canalini di lubrificazione. La loro forma poco profonda e larga, diversa dagli esempi visti finora, conferma ancora una volta come i vari produttori adottino soluzioni diverse a seconda di quali credano essere le variabili maggiormente influenti sul sistema tribologico.

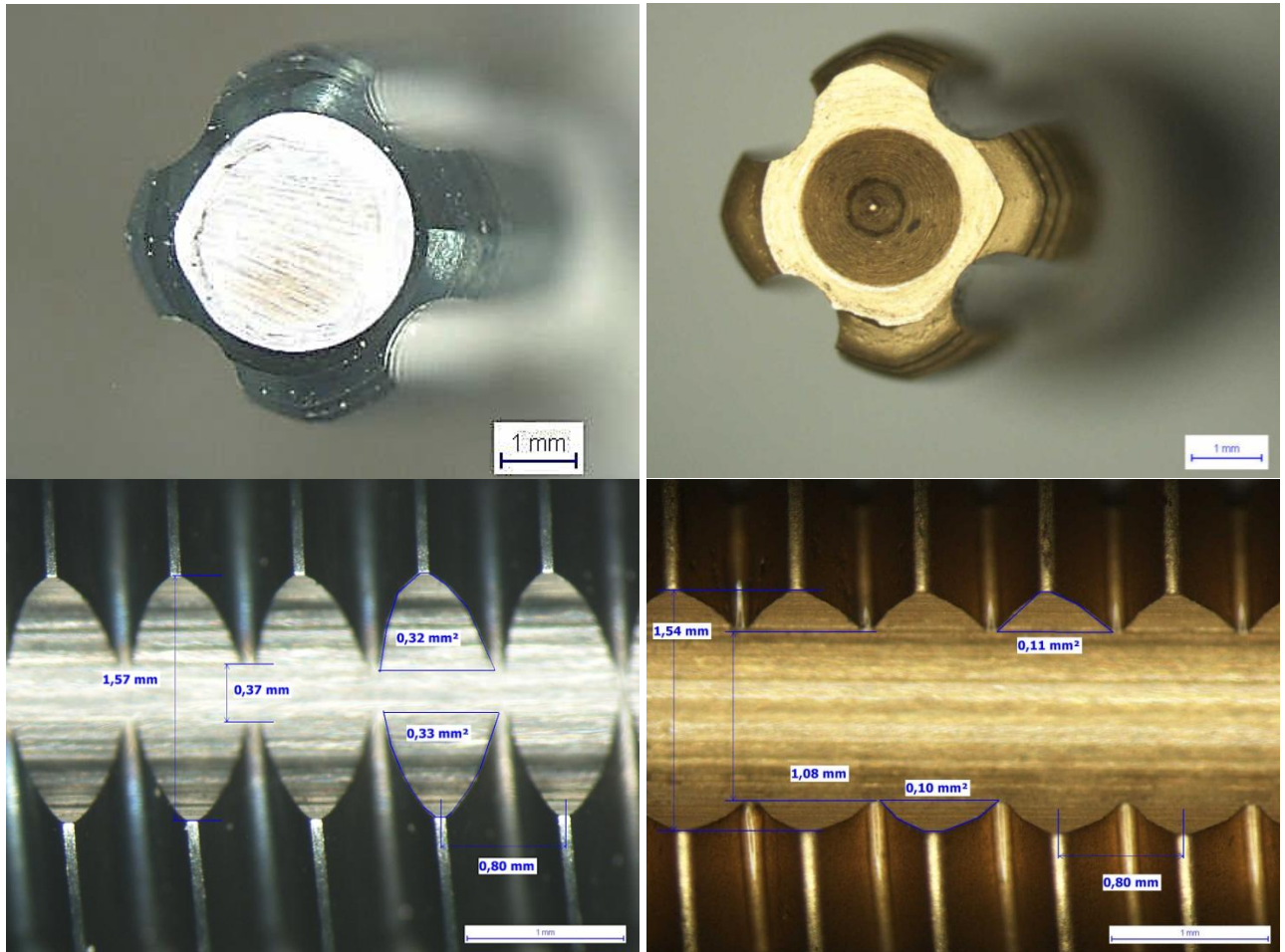


Figura 5.96: Confronto tra la forma dei canalini di lubrificazione dei maschi Guring (a sx) e Emuge InnoForm SN (a dx). i primi, a parità di larghezza sul profilo poligonale esterno (1,57 mm contro 1,54 mm), risultano essere più superficiali con una profondità del canalino che praticamente non supera il fondo del filetto.

5.7.1 Analisi della durata

L'applicazione sul campo degli utensili rivestiti in AlCrN ha portato a risultati ben al di sotto delle aspettative.

GRUPPO	UTENSILI NON CONFORMI	N° CONTATORE	N° PEZZI PRODOTTI
E	E7, (E8), (E9)	176499	58833
E(1)	E13, E15	160000	53333
MEDIA	-	168250	56083

Tabella XXXVIII: Numero di pezzi prodotti a fine vita dagli utensili del gruppo E.

Per tali utensili si è riscontrata, infatti, una durata inferiore rispetto a quella di tutte le altre tipologie di utensili sperimentate, con un numero di filettature conformi prodotte di circa il 34% inferiore rispetto alla produzione standard.

5.7.2 Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi

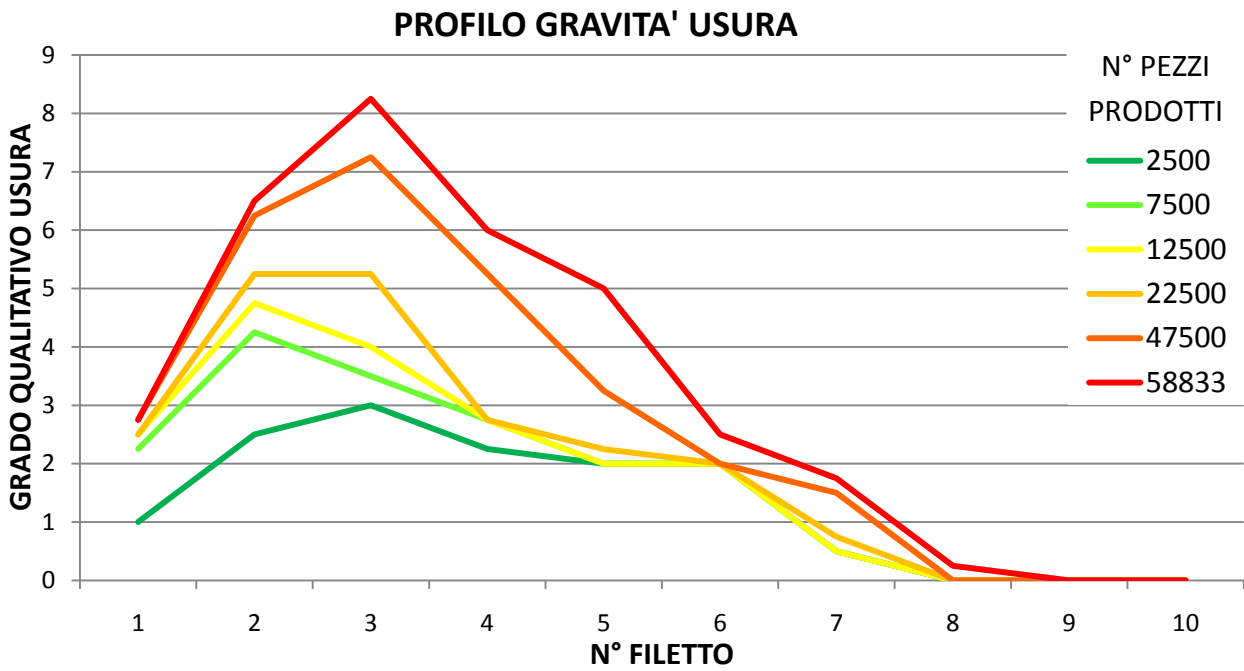


Fig. 5.97: Evoluzione dei fenomeni di usura sui filetti dell'utensile E7 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

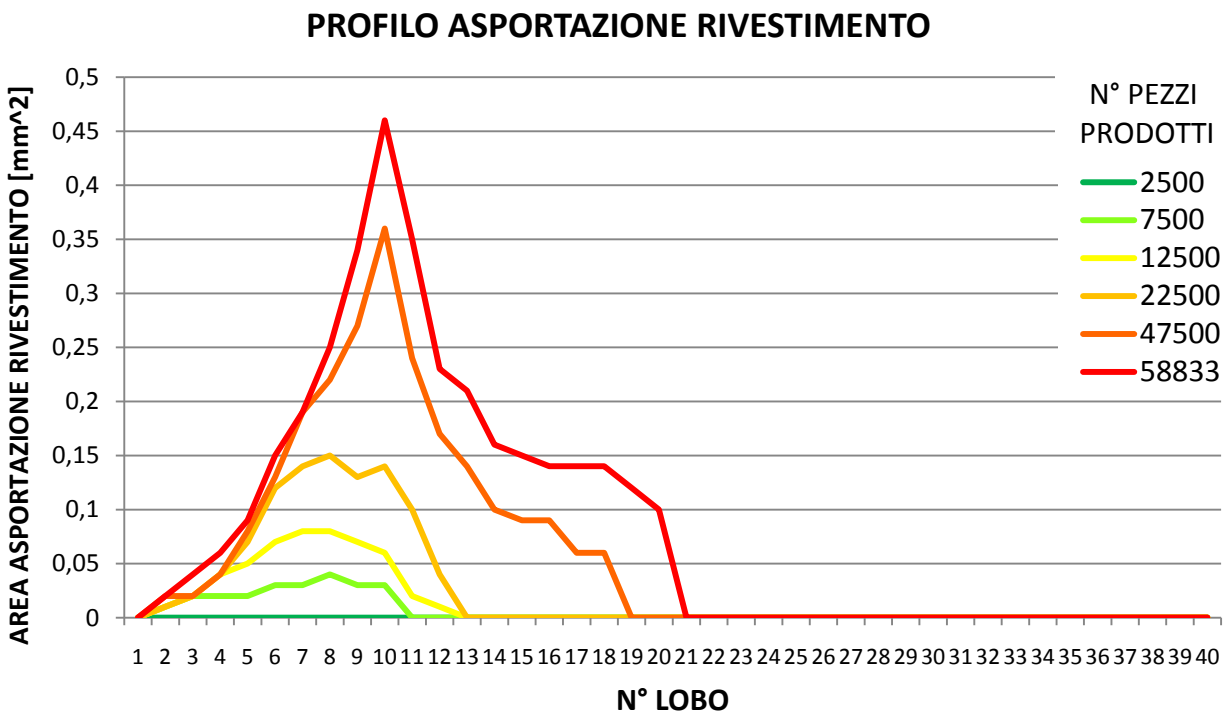


Fig. 5.98: Evoluzione dell'asportazione del rivestimento sui lobi dell'utensile E7 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

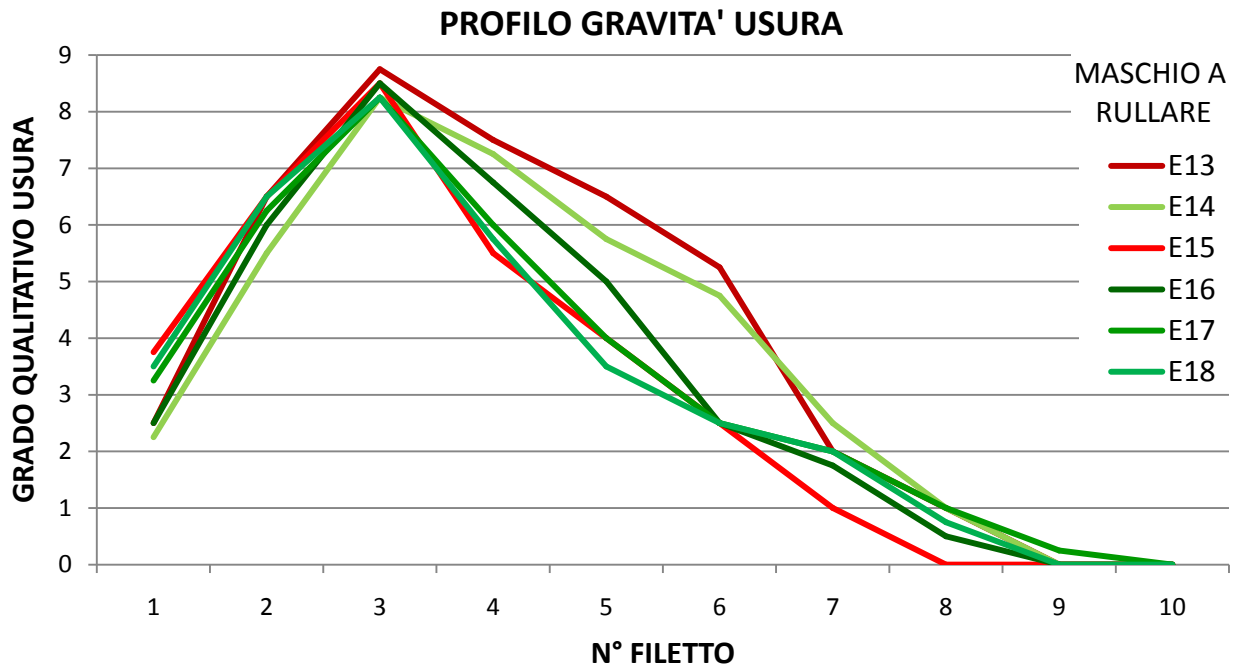


Fig. 5.99: Confronto tra i profili di gravità usura dei maschi del gruppo E(1) al momento della sostituzione (53333 pezzi prodotti da ogni singolo maschio).

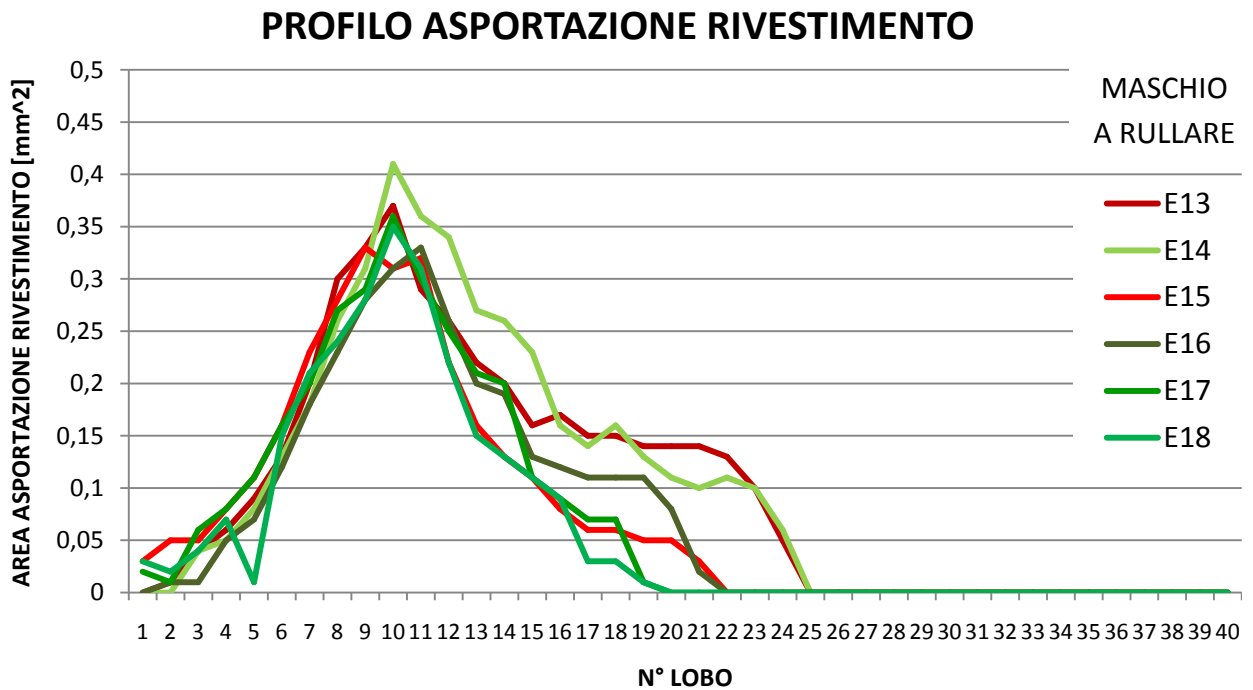


Fig. 5.100: Confronto tra i profili di asportazione del rivestimento nei maschi del gruppo E(1) al momento della sostituzione (53333 pezzi prodotti da ogni singolo maschio).

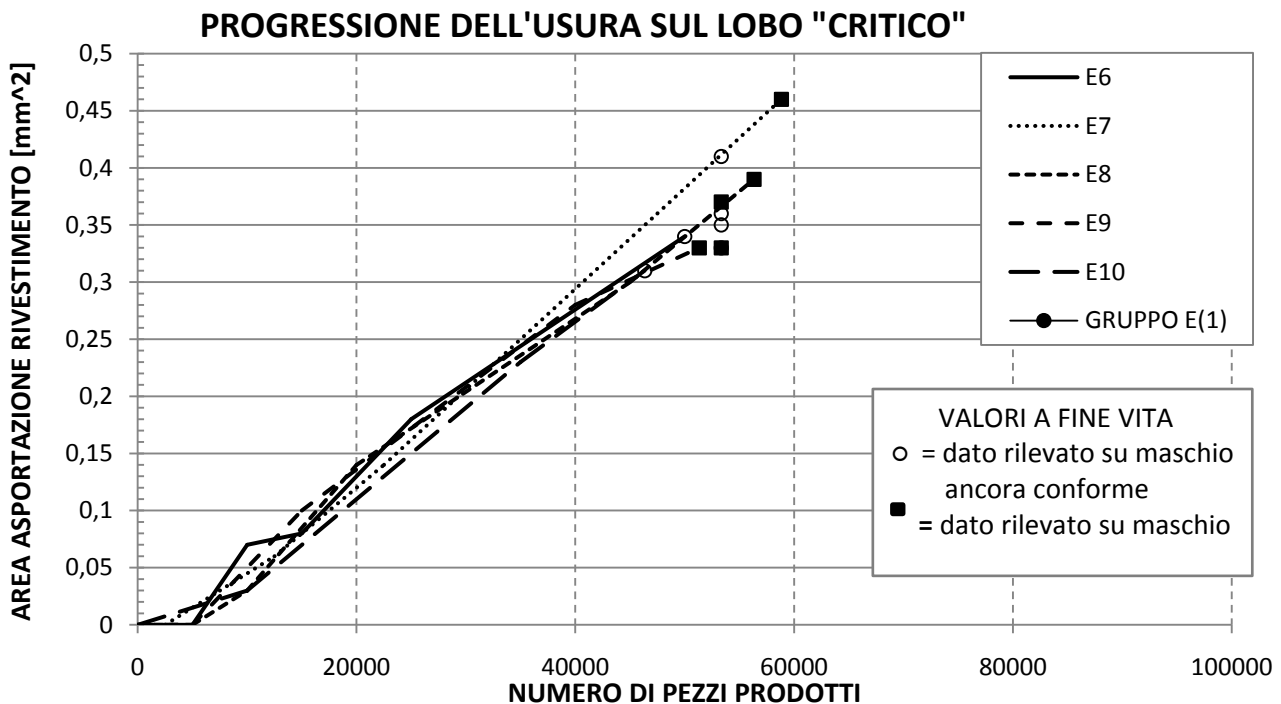


Fig. 5.101: Progressione dell'usura sul lobo critico all'aumentare del numero di pezzi prodotti per gli utensili del gruppo E.

L'analisi dei profili di usura dei maschi a rullare rivestiti in AlCrN portano alle seguenti considerazioni:

- La perdita di continuità del rivestimento avviene ad un numero di pezzi inferiore rispetto a quanto finora riscontrato negli altri gruppi (tratto a pendenza nulla estremamente ridotto e in alcuni casi non apprezzabile). Il rivestimento AlCrN viene asportato, infatti, su porzioni apprezzabili dei lobi dai vari meccanismi di usura già dopo poche migliaia di pezzi prodotti.
- L'asportazione del rivestimento sui lobi (e con essa i vari meccanismi di usura) procedono ad una velocità maggiore rispetto a quanto osservato per gli altri gruppi di maschi.

Ciò può essere implicato principalmente ad una minore resistenza all'usura del rivestimento a base AlCrN rispetto a rivestimenti monolayer o multilayer a base TiN nelle condizioni di lavoro descritte.

- I maschi del gruppo E smettono di produrre filettature conformi quando raggiungono valori di A [mm²] in corrispondenza del lobo critico mediamente inferiori rispetto a quanto osservato per gli utensili Emuge Drück originari.

Ciò è dovuto probabilmente alla geometria più appuntita dei lobi degli utensili.

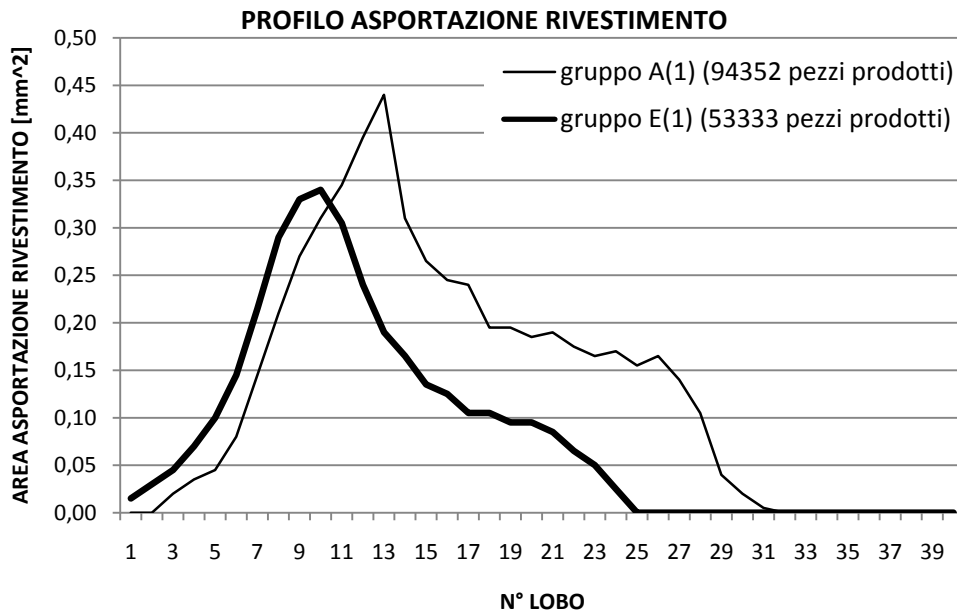
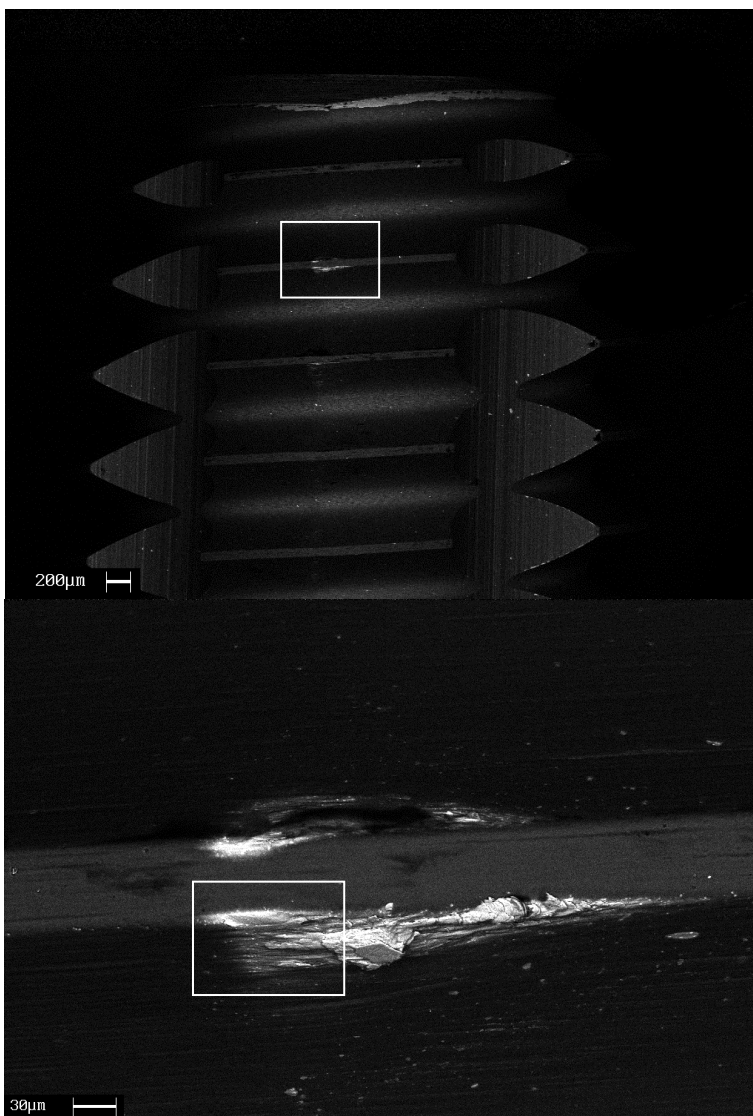


Fig. 5.102: Confronto tra il profilo di asportazione medio a fine vita degli utensili appartenenti al gruppo E(1) con quelli del gruppo A(1). Evidente come i maschi del gruppo E risultino non conformi a valori di A [mm²] massimi inferiori rispetto a quelli del gruppo A e come l'asportazione del rivestimento si estenda su un numero inferiore di pezzi.

5.7.3 Descrizione dei meccanismi di usura

CAMPIONE E1 (2500 pezzi prodotti)

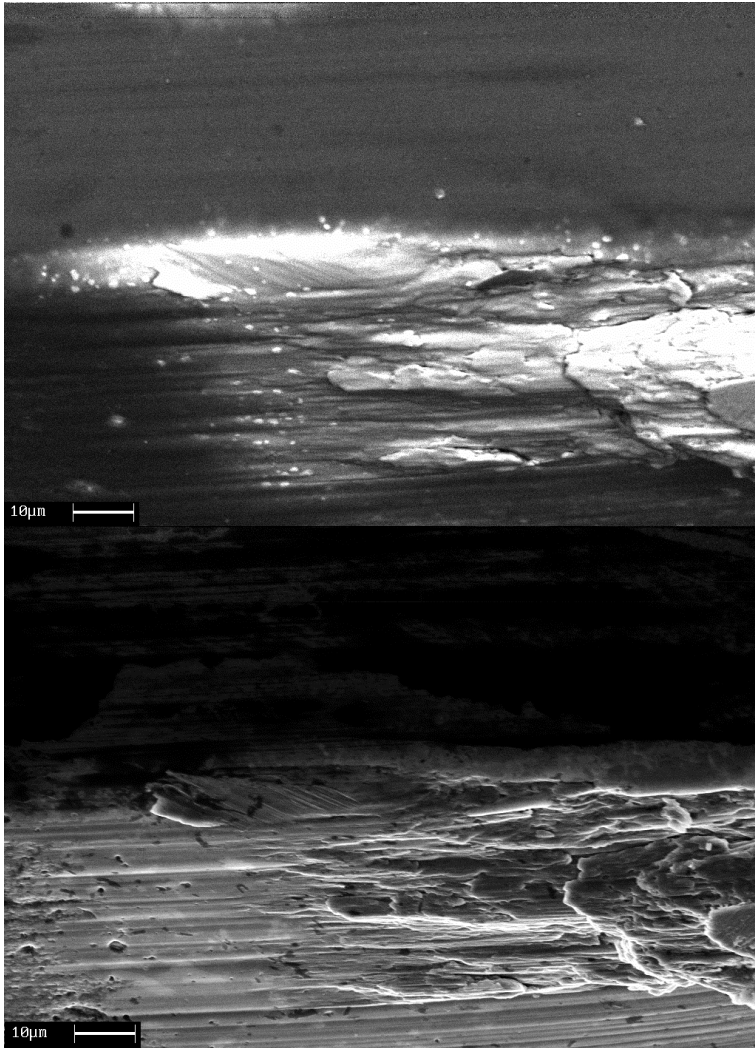


Le prestazioni manifestate dal rivestimento a base AlCrN nelle condizioni di lavoro utilizzate sono risultate al di sotto delle aspettative previste in base alle proprietà fisiche e alle informazioni ricavate dalla letteratura.

Il rivestimento Alcrona ha, infatti, manifestato in condizioni lubrificate un'usura prematura rispetto alle altre tipologie sperimentate ed una asportazione più rapida.

Già ad un numero ridotto di pezzi prodotti il rivestimento sottile risulta abraso nei punti maggiormente sollecitati originando solcature e affioramento dell'acciaio super-rapido sottostante.

Fig. 5.103: Campione E1_L4-1. Macrografia della superficie di usura ed ingrandimenti progressivi del lobo sul 2° filetto. (QBSD).



Anche in questo caso la comparsa dell'acciaio HSS-E (distinguibile dai caratteristici carburi) permette lo svilupparsi di strutture lamellari adese di C45 manifestate dalle altre tipologie di utensili solo ad un numero maggiore di pezzi prodotti.

Fig. 5.104: Particolare sul lobo del 2° filetto del campione E1.

L'immagine in alto (ottenuta con gli elettroni retrodiffusi) evidenzia come l'adesione del C45 avvenga unicamente dove si abbia precedentemente avuta l'asportazione del rivestimento.

L'immagine in basso (elettroni secondari) evidenzia la morfologia della superficie di usura.

Evidente l'azione di lucidatura e solcatura generata dai fenomeni abrasivi e la struttura a lamelle sovrapposte del materiale di riporto.

CAMPIONE E2 (5000 pezzi prodotti)

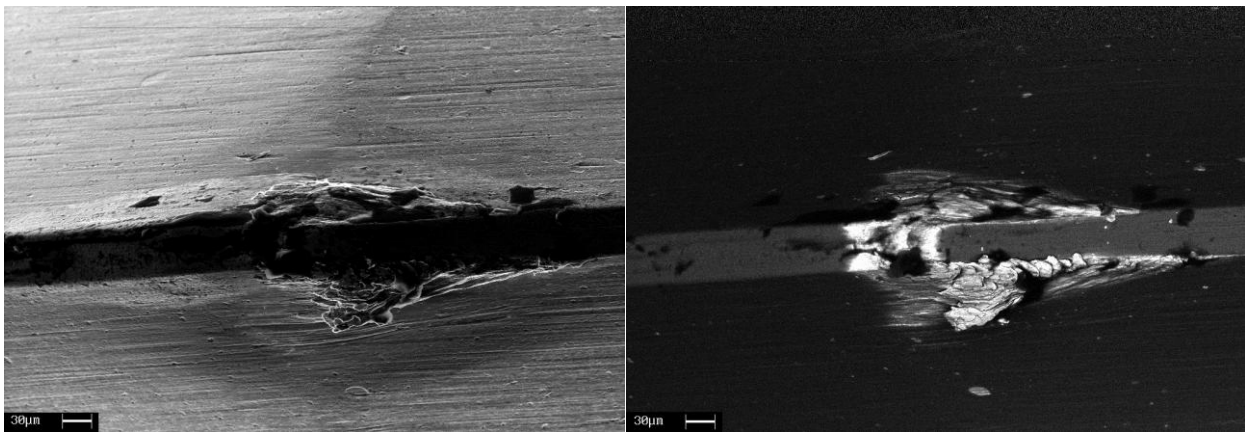


Fig. 5.105: Superficie di usura sul lobo in corrispondenza rispettivamente del 2° e 3° filetto, analizzata con gli elettroni secondari (a sx) e retrodiffusi (a dx).

Dall'osservazione di utensili che hanno prodotto un numero di pezzi via via maggiore è evidente come l'usura proceda aggravandosi con i meccanismi già descritti. In alcuni campioni sono presenti, sulla superficie di usura, diffusi residui carboniosi che possono modificare localmente il comportamento tribologico del sistema. La loro presenza è indicativa delle elevate temperature

che si possono raggiungere nei punti in cui si sviluppa il massimo attrito, cioè nei punti in cui è assente il rivestimento sottile.

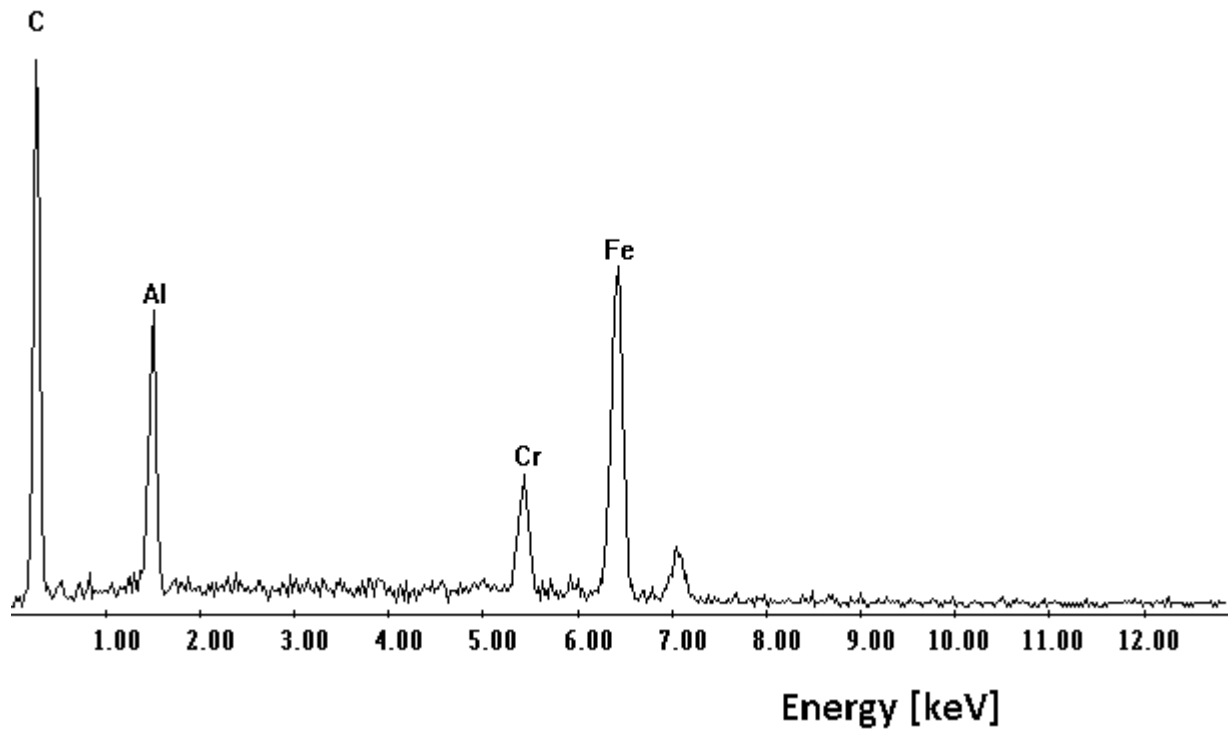


Fig. 5.106: Spettro EDS ottenuto in corrispondenza di un residuo carbonioso presente sulla superficie di usura. AL e Cr derivano dal rivestimento sottostante.

CAMPIONE E3 (10000 pezzi prodotti)

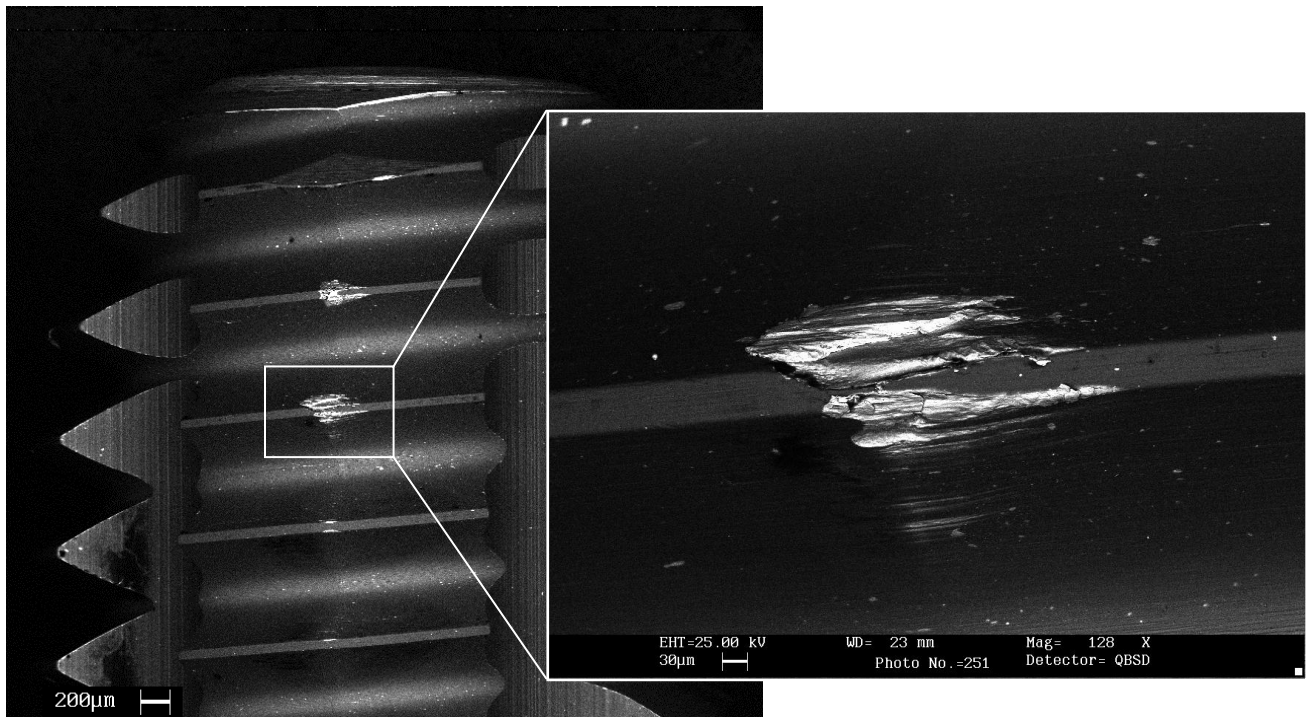


Fig. 5.107: Campione E3_L1-2.
Macrografia e particolare.

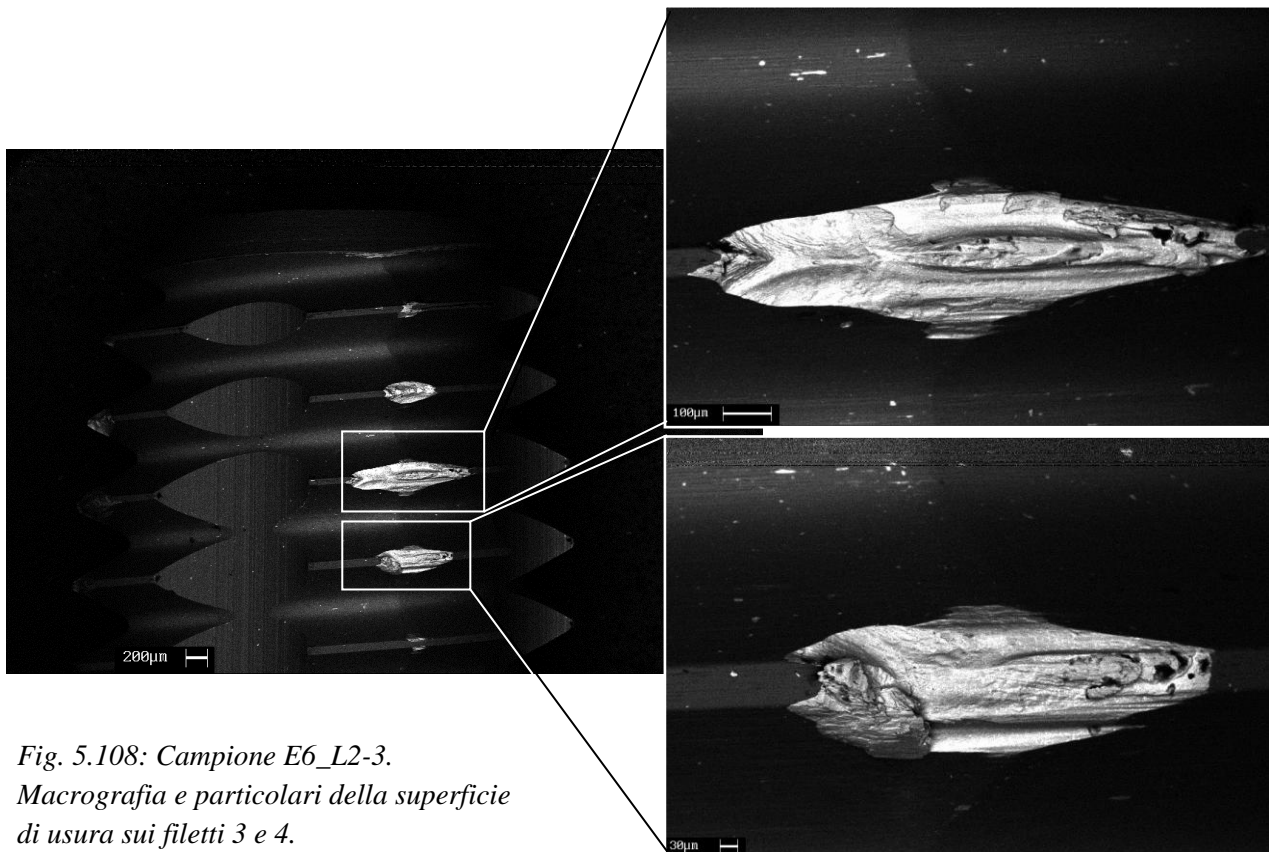
All'aumentare del numero di pezzi prodotti, sui lobi maggiormente sollecitati compaiono fenomeni di scheggiatura e frammentazione del materiale che, lasciando scoperte ampie superfici in acciaio rapido, aggravano ulteriormente i fenomeni di adesione.

Le strutture a lamelle sovrapposte in C45 che si vengono a creare permettono, tuttavia, di ridurre la variazione geometrica che i fenomeni di scheggiatura infliggono all'utensile.

Si formano, infatti, all'interno delle cavità e vengono plasmate dal filetto stesso in formazione in una geometria simile a quella del lobo di partenza. Questo fenomeno è evidente, soprattutto in corrispondenza di danneggiamenti di minore entità.

Non si deve, tuttavia, dimenticare come queste strutture saldandosi saldamente all'acciaio rapido sottostante ne favoriscano l'ulteriore scheggiatura quando vengono rimosse dalla superficie.

CAMPIONE E6 (50000 pezzi prodotti)



*Fig. 5.108: Campione E6_L2-3.
Macrografia e particolari della superficie
di usura sui filetti 3 e 4.*

L'osservazione della superficie di usura su un campione a fine vita evidenzia, ancora una volta, estese porzioni di materiale rimosse da fenomeni di scheggiatura, significativa adesione dell'acciaio lavorato, e solchi di abrasione sui fianchi del filetto.

La localizzazione dei fenomeni segue l'andamento descritto dai profili di usura.

5.8 Confronto della modalità di progressione dell'usura sul lobo critico per le diverse tipologie di utensili sperimentate

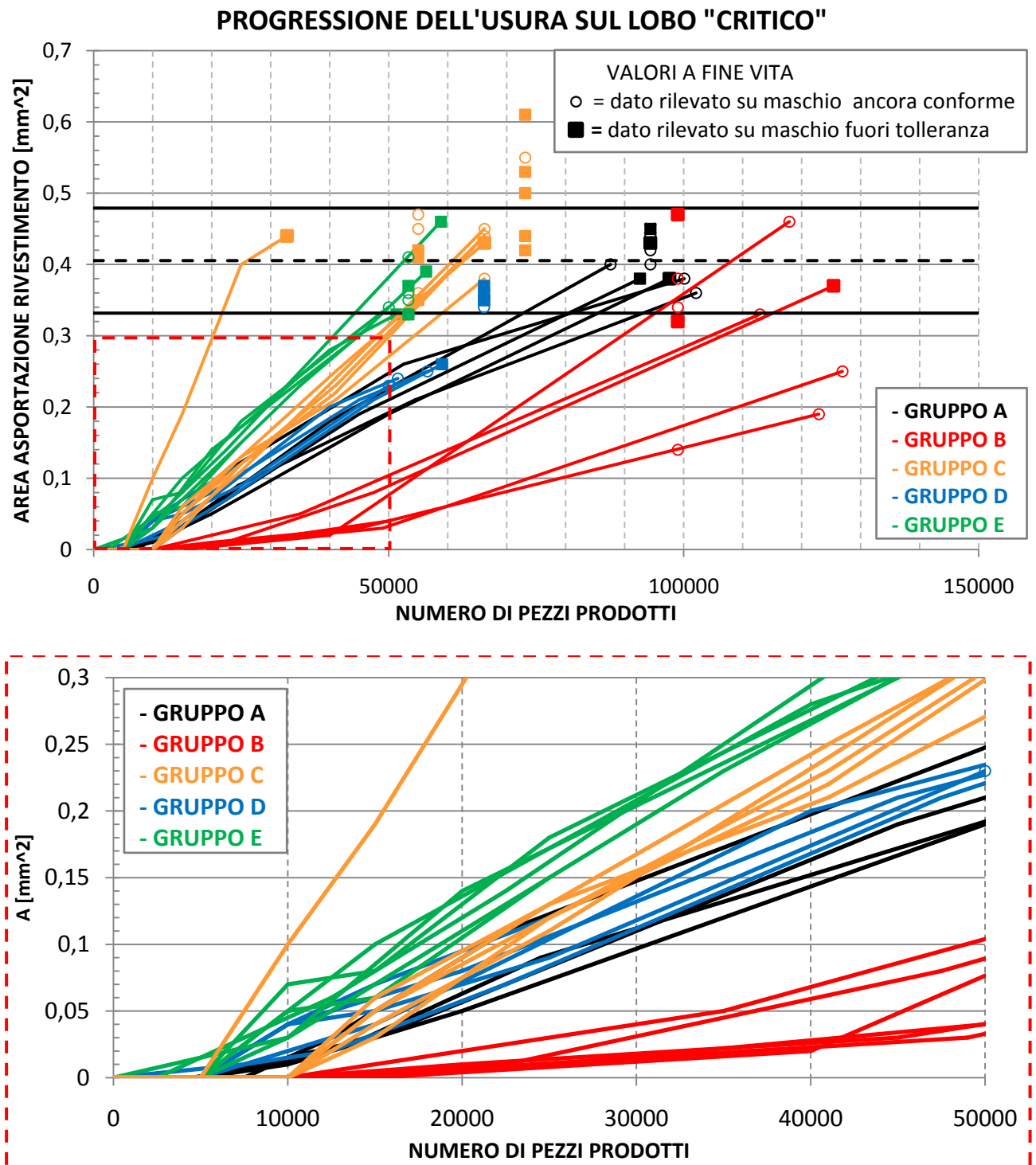


Fig. 5.109: Confronto tra la progressione dell'usura sul lobo critico all'aumentare del numero di pezzi prodotti per le diverse tipologie di maschi a rullare sperimentati.

Il grafico in basso rappresenta l'andamento dell'usura in corrispondenza delle fasi iniziali.

La retta orizzontale tratteggiata riporta il valore medio di A [mm^2] misurato sul lobo critico dei maschi non conformi a fine vita, le rette continue rappresentano i limiti dell'intervallo con scarto dalla media pari a $\pm \sigma$.

Al termine della sperimentazione condotta sulle diverse tipologie di maschi a rullare ritrovate sul mercato i risultati ottenuti, soprattutto in termini di progressione dell'usura sul lobo critico per i diversi gruppi, sono stati accorpati in un unico grafico che permette un confronto immediato dei diversi comportamenti.

Questi risultati sono stati ottenuti, di conseguenza, variando unicamente le caratteristiche degli utensili, mentre si sono mantenute invariate le condizioni di lubrificazione.

Prendendo di riferimento l'andamento del gruppo A (cioè dei maschi Emuge Drück originari) si può vedere facilmente come l'unica tipologia di utensili che presenti una migliore resistenza all'usura è quella formata dai maschi a rullare Emuge InnoForm per i quali risulta massima la durata del rivestimento sulla superficie dei lobi (come è evidente dallo zoom sull'andamento nelle fasi iniziali) e per i quali la crescita dell'area in cui il lobo critico risulta essere privo di rivestimento avviene ad una velocità mediamente inferiore agli altri gruppi.

Ben peggiore si è dimostrata la resistenza ad usura degli utensili del gruppo C.

Tralasciando il comportamento anomalo del maschio denominato C1 che ha manifestato un'usura prematura, gli altri utensili Yamawa, pur mostrando una buona durata nel primo stadio dell'usura, si sono usurati ad una velocità più elevata rispetto a qualsiasi altra tipologia di utensile con rivestimento a base TiN. La buona durata del primo stadio potrebbe derivare dall'azione benefica della presenza dei canalini di lubrificazione sulle condizioni tribologiche in presenza di utensili rivestiti

Il confronto tra la progressione dell'asportazione del rivestimento tra gli utensili del gruppo D e quelli originari non ha evidenziato differenze sostanziali né per quanto riguarda la durata dello stadio iniziale né per quanto riguarda la pendenza del tratto obliquo.

Tuttavia, come è già stato riportato nel capitolo relativo, gli utensili realizzati con tecniche di metallurgia delle polveri sono fuoriusciti dal campo di tolleranza per valori di area di asportazione del rivestimento sul lobo critico mediamente più bassi rispetto agli utensili standard.

La causa di ciò è stata attribuita alla geometria del maschio, caratterizzato da lobi più appuntiti per i quali è sufficiente asportare una minor quantità di materiale per fuoriuscire dal campo di tolleranza dimensionale, e dalla maggiore tendenza di questi utensili a microfratturarsi e scheggiarsi.

Quest'ultimo fatto porta alla formazione di una superficie di usura frastagliata che mal si presta alla realizzazione dei flussi plastici necessari alla formatura del filetto.

Infine gli utensili del gruppo E hanno manifestato il comportamento peggiore in assoluto nel sistema tribologico sotto indagine.

Il rivestimento a base AlCrN nelle condizioni di lubrificazione e di sollecitazione viste è stato rapidamente abraso perdendo di continuità sul lobo critico già per un numero di pezzi prodotti molto basso. L'usura è, poi, progredita velocemente su tutti i campioni analizzati facendo sì che questi iniziassero a produrre filettature non conformi prima di quanto osservato per gli altri utensili.

Hanno, infatti, manifestato la vita utile media più corta nel corso dell'intera sperimentazione.

L'osservazione di questo grafico riassuntivo ha fornito ulteriori informazioni:

- Il comportamento delle varie tipologie di utensili si è dimostrato essere uniforme con rette ottenute per ogni singolo gruppo contenute all'interno di una forbice relativamente stretta.

Ciò è confermato pure dai valori misurati sui gruppi di utensili analizzati unicamente a fine vita.

Il modello ottenuto, per tanto, si presta bene a descrivere il comportamento del sistema tribologico in esame e consente con un numero ridotto di prove di determinare la variazione di prestazione del processo produttivo al variare delle diverse condizioni applicate sia nel corso di questo lavoro, ma non si esclude la possibilità di applicarlo in sperimentazioni future che vadano a modificare ulteriori parametri di lavorazione

- Gli utensili che risultano non essere più in grado di produrre filettature conformi e che, per tanto, causano l'arresto del processo e la sostituzione dell'intero gruppo di maschi, hanno un'estensione dell'area sul lobo critico che risulta priva di rivestimento situata in un intervallo di valori relativamente stretto.

Tralasciando la quota parte della variabilità attribuita alla diversa geometria dei maschi a rullare sperimentati, si può attribuire il valore di A [mm^2] misurato sul lobo critico dei maschi non conformi unicamente al particolare meccanismo di usura manifestato che abbiamo visto essere sostanzialmente lo stesso per le diverse tipologie di utensili sperimentate.

Questa ipotesi è confermata dalle sperimentazioni successive in cui, come riportato in seguito, al variare della composizione del lubrificante si sono modificati i meccanismi di usura coinvolti e conseguentemente i valori di A [mm^2] misurati a fine vita.

L'analisi dei gruppi di maschi a rullare suddetti ha permesso di ottenere i seguenti valori di usura sul lobo critico negli utensili fuori tolleranza:

GRUPPO A		GRUPPO B		GRUPPO C		GRUPPO D		GRUPPO E	
A [mm ²]		A [mm ²]		A [mm ²]		A [mm ²]		A [mm ²]	
A10	0,38	B8	0,37	C1	0,44	D7	0,26	E7	0,46
A11	0,38	B13	0,47	C5	0,43	D13	0,35	E8	0,39
A13	0,43	B14	0,32	C7	0,44	D16	0,34	E9	0,33
A17	0,45			C9	0,42	D18	0,36	E13	0,37
				C10	0,53			E15	0,33
				C11	0,50				
				C12	0,61				
				C13	0,42				
				C14	0,41				
				C18	0,35				

Tabella XXXIX: Valori dell'area di asportazione misurati a fine vita sul lobo critico degli utensili non conformi a fine vita.

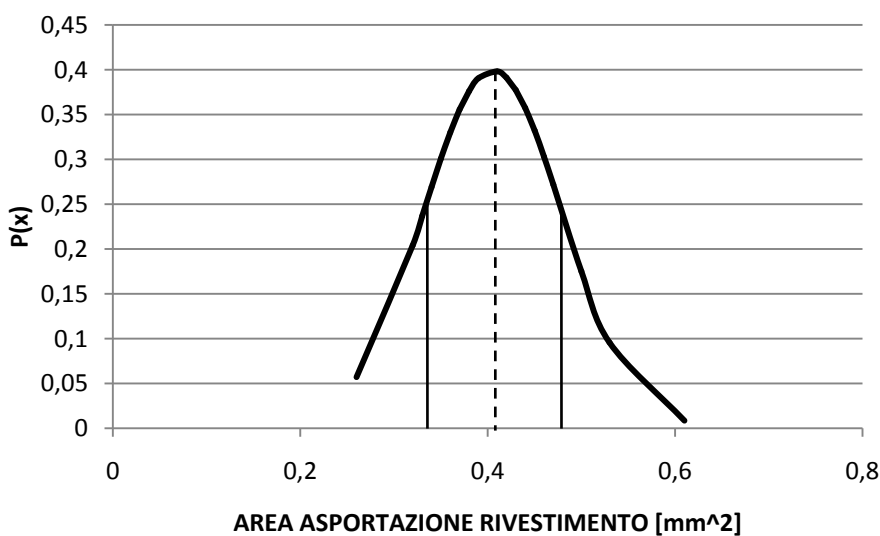


Fig. 5.110: Distribuzione normale standard standardizzata dell'area di asportazione del rivestimento sul lobo critico per gli utensili non conformi a fine vita. La retta tratteggiata riporta il valore medio di A [mm²], le rette continue rappresentano i limiti dell'intervallo con scarto dalla media pari a $\pm \sigma$.

- VALORE MEDIO DELL' AREA DI ASPORTAZIONE DEL RIVESTIMENTO $\bar{A} = 0,405 \text{ mm}^2$
- DEVIATION STANDARD $\sigma = 0,074 \text{ mm}^2$

Dall'analisi dei dati risulta che con i meccanismi di usura visti un maschio a rullare ha una probabilità del 68,3% di fuoriuscire dal campo di tolleranza quando l'area di asportazione sul suo lobo critico assume valori compresi tra 0,33 e 0,48 mm².

Questo modello può essere quindi sfruttato per prevedere, a parità di condizioni di lubrificazione, la durata verosimile di un utensile dato dall'intersezione della retta di progressione dell'usura sul

lobo critico e l'intervallo di $A[\text{mm}^2]$ per cui è massima la probabilità dell'utensile di iniziare a produrre filettature non conformi.

Ovviamente tanto maggiore sarà il valore di $A [\text{mm}^2]$ sul lobo critico tanto maggiore sarà la probabilità che l'utensile non sia conforme.

Se le modifiche adottate al sistema produttivo dovessero causare una variazione dei meccanismi di usura coinvolti allora il modello dovrà essere aggiornato in modo tale da ottenere un nuovo intervallo di valori di A .

5.9 GRUPPO F

In merito all'incremento della produttività del processo di maschiatura a rullare è stato descritto come una possibile linea d'azione potesse riguardare la variazione delle proprietà dell'olio lubrificante usato grazie all'aggiunta di sostanze opportune.

Nel corso della sperimentazione la prima di queste ad essere miscelata all'HAROLBIO 5 (*) è stata un additivo integratore di taglio destinato a lavorazioni meccaniche denominato commercialmente ADD SA (codice commerciale: EX00193-XXX-*).

-Nome commerciale: ADD SA
-Codice commerciale: EX00193-XXX-*
-Tipo di prodotto e impiego: additivo integratore di taglio
-Aspetto e colore: liquido limpido di colore bruno chiaro
-Odore: sui generis
-Punto di infiammabilità: >250 °C
-Densità relativa: 1.055 Kg/l
-Idrosolubilità: insolubile in acqua
-Viscosità a 40°C ASTM D445: 264 cst
-Proprietà esplosive: non esplosivo
-Proprietà comburenti: non comburente

Tabella XL: informazioni e proprietà fisico-chimiche principali dell'additivo ADD SA.

La miscelazione è stata effettuata versando il fluido gradualmente in una zona di elevata vorticosità del circuito, in modo tale da favorirne la solubilizzazione nell'olio base. La raccolta dati per il gruppo F è cominciata solamente il giorno successivo al fine di garantire la completa miscelazione dei componenti grazie all'azione meccanica indotta dal ricircolo e dal pompaggio dell'olio stesso.

Sono stati versati nel circuito 24 Kg di prodotto, pari a circa 22,75 litri, realizzando un tenore di additivo pari a circa il 10 %. Il circuito era stato preventivamente svuotato di una quantità d'olio corrispondente al fine di evitare fuoriuscite.

Il produttore non rende nota la composizione esatta dell'additivo a base zolfo ADD SA.

Alcune considerazioni portano, però, a ritenere si tratti di una miscela a base di esteri alifatici solforati ottenuti dalla solforazione di oli insaturi con zolfo in presenza di H₂S. Il prodotto è, infatti, perfettamente solubile nell'olio a base esterea, sintomo di elevata affinità fisico-chimica ed è di colore chiaro. La realizzazione di reazioni di solforazione di oli esterei in presenza unicamente di zolfo darebbe vita, al contrario, di un prodotto di colore scuro.

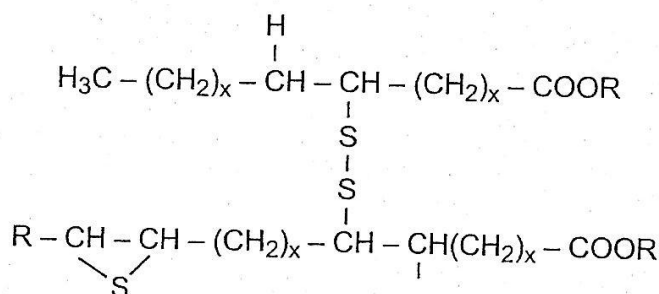


Fig. 5.111: Molecola di acido grasso metil-estereo con ponti a disolfuro.

Gli esteri alifatici solforati sono ampiamente utilizzati nei moderni lubrificanti nei quali sostituiscono additivi ormai superati e di prestazioni inferiori come l'olio di spermaceti, i terpeni e le olefine.

La combinazione, infatti, dello zolfo con le proprietà untuosanti (SL) delle catene alifatiche crea eccellenti additivi EP con elevate capacità di carico e che, al contrario di altri additivi, manifestano elevata biocompatibilità e biodegradabilità, prestandosi ottimamente all'uso in oli vegetali.

Allo stesso tempo l'uso dello zolfo come additivo EP per oli minerali si ritrova già agli albori della lubrificazione. Inizialmente lo zolfo veniva solubilizzato direttamente nelle miscele idrocarburiche minerali in tenori superiori all'1,5%, successivamente, però, il passaggio a composti organici solforati solubili in olio di formula generale $R-S_x-R$ (i cosiddetti *S-carriers*) ha permesso di migliorare la solubilità e di avere un buon controllo della reattività dello zolfo con la superficie metallica.

Questi composti si dicono *inattivi* quanto contengono principalmente legami C-S stabili che reagiscono unicamente a temperature elevate (predominanza di ponti a disolfuro $x = 2$), mentre si dicono *attivi* con x comprese tra 3 e 5 (pentasolfuri). Questo perché i ponti a polisolfuro sono molto più labili e la reazione può avvenire, per tanto, a temperature notevolmente inferiori.

L'uso di *S-carriers* con distribuzioni specifiche del tipo di polisolfuro contenuto permette di coprire un campo di sollecitazioni molto vasto mantenendo costanti ed elevate le prestazioni anche al variare del livello di stress a cui sono sottoposte le superfici in strisciamento.

Il meccanismo di azione di questi composti, senza andare troppo nello specifico, si può riassumere nello schema seguente:

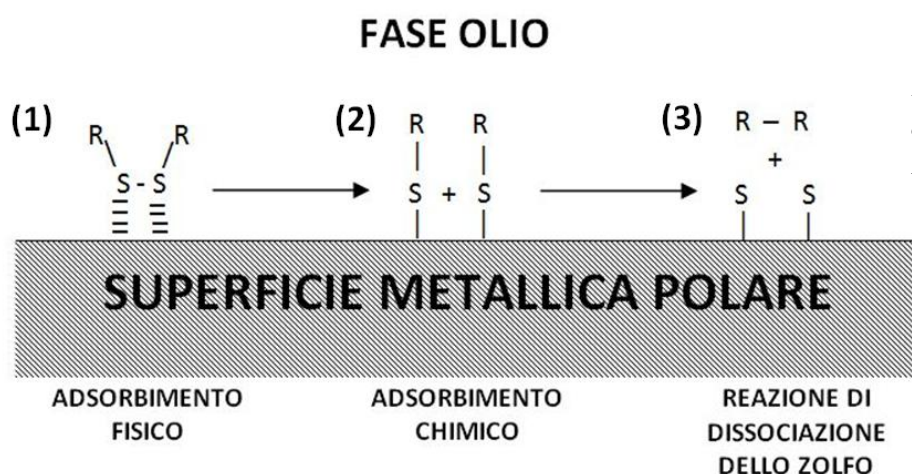


Fig. 5.112: Meccanismo di azione degli additivi EP a base zolfo.

In condizioni di elevate pressioni l'azione degli *S-carriers* inizia con l'adsorbimento fisico (1) degli stessi sulla superficie metallica che avviene sfruttando i raggruppamenti polari delle

molecole che, solo successivamente, si adsorbono chimicamente (2). A temperature prossime a 600°C avviene il rilascio dello zolfo mediante dissociazione del composto (3) e la reazione vera e propria con il metallo che porta alla formazione di solfuro di ferro sulla superficie metallica (4).

Il beneficio apportato dal solfuro di ferro è del tutto analogo a quanto descritto nel capitolo relativo all'azione degli additivi EP: la sua presenza riduce l'attrito tra le superfici metalliche e diminuisce l'adesione dei metalli contrapposti.

Per concentrazioni pari a 85% FeS – 15% Fe si ha, inoltre, la formazione di un eutettico con temperatura di fusione pari a 985 °C che, come visto, contribuisce a proteggere il metallo sottostante e a stabilizzare le temperature.

Con lo scopo di valutare le variazioni delle proprietà del fluido lubrificante indotte dall'additivazione, sono stati prelevati dei campioni d'olio precedentemente e successivamente alla miscelazione e fatti analizzare dal laboratorio della Bellini s.r.l. .

Si sono osservate le seguenti variazioni:

1) CONTAMINAZIONE DA OLI ESTRANEI E RESIDUO PARTICELLARE

	CAMPIONE	DATA PRELIEVO	CONTAMINANTI		CODICE DI CONTAMINAZIONE DA PARTICELLE (ISO 4406)
			EXIDIA HG 220	X-DRAW 341	
1	HAROLBIO 5(*)	18/12/2012	≈24%	≈10%	23/23/22
2	HAROLBIO 5(*) + 10% ADD SA	19/12/2012	≈22%	≈9%	23/23/21

Tabella XLI: Contaminazione da oli estranei e particelle dei campioni prelevati.

L'additivazione lascia pressoché inalterata la presenza particellare nell'olio, mentre causa, come è logico aspettarsi, una leggera diluizione dei contaminanti presenti.

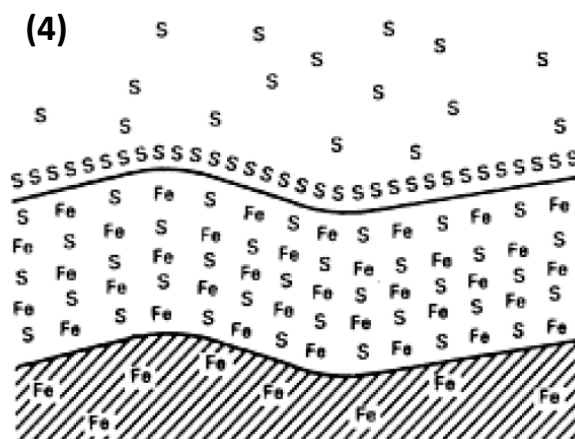


Fig. 5.113: Film inorganico di solfuro di ferro formato dalla reazione tra zolfo e ferro sulla superficie metallica.

2) PROPRIETÀ FISICHE E MECCANICHE

PROPRIETÀ FISICHE E MECCANICHE	NORMA DI RIFERIMENTO	Campione 1: HAROLBIO 5 (*)	Campione 2: HAROLBIO 5 (*) + 10% ADD SA
Densità a 20°C [Kg/m ³]	ASTM D 1298	947	959
Viscosità a 40°C [cSt]	ASTM D 445	58,1	78,3
Viscosità a 100°C [cSt]	ASTM D 445	9,28	11,4
Indice di viscosità [-]	ASTM D 2270	141	136
Valore Brugger [N/mm ²]	DIN 51347	123	196

Tabella XLII: Variazioni delle proprietà fisiche e meccaniche in seguito all'additivazione.

L'additivazione con circa il 10% di additivo di prestazione porta ad un incremento della viscosità del lubrificante di circa il 35% e del valore Brugger di circa il 60%.

L'aggiunta di questo particolare prodotto al lubrificante dovrebbe, per tanto, portare ipoteticamente a dei benefici sull'efficienza del processo produttivo tra cui:

- Discreto effetto SL dovuto sia alla polarità del composto sia alla sua maggiore viscosità. Ciò dovrebbe migliorare il regime di lubrificazione già dagli stadi iniziali, garantendo una maggiore durata del rivestimento dell'utensile.
- Elevato effetto EP con conseguente miglioramento delle condizioni tribologiche del sistema, soprattutto dopo che il rivestimento duro è stato asportato lasciando affiorare la superficie metallica.

Gli utensili utilizzati in questo caso sono del tutto analoghi a quelli sperimentati nel gruppo A, si tratta per tanto di maschi a rullare Emuge Drück di caratteristiche viste, a cui è stata asportata la punta dagli operatori del centro manutenzione con l'ausilio di una molatrice dotata di fermi meccanici.

Le caratteristiche peculiari della sperimentazione sono riassunte nelle tabelle seguenti:

DIMENSIONE NOMINALE	M5	FILETTATURA [ISO DIN 13]	M5
CLASSE DI TOLLERANZA	6GX	CLASSE DI TOLLERANZA [UNI 5542-65]	6GX
SUBSTRATO	HSS-E	DIAMETRO PREFORO	4,65 mm
RIVESTIMENTO	TIN-T1	SPESSORE ZONA FILETTATA	3,15 ±0,15 mm
FORMA IMBOCCO	C/ 2-3	CORSA FILETTATRICE	≈ 8 mm
NUMERO LOBI	4	VELOCITÀ PERIFERICA	40 m/min
PRESENZA DI CANALINI DI LUBRIFICAZIONE	NO	LUBRIFICANTE	HAROLBIO 5 (*) + 10% ADD SA

Tabella XLIII: Parametri di lavorazione usati nella sperimentazione del gruppo F.

5.9.1 Analisi della durata

Le ipotesi relative al comportamento del sistema tribologico in seguito all'additivazione dell'olio si sono confermate con un netto miglioramento della produttività degli utensili.

GRUPPO	UTENSILI NON CONFORMI	N° CONTATORE	N° PEZZI PRODOTTI
F	F4, (F1)	505000	168333
F(1)	F10, (F11)	606213	202071
MEDIA	-	555607	185202

Tabella XLIV: Numero di pezzi prodotti a fine vita dagli utensili del gruppo F. Tra parentesi gli utensili al limite di conformità al momento della sostituzione.

L'uso del lubrificante arricchito con additivi EP a base solfurea ha, infatti, più che raddoppiato la durata degli utensili a parità di tutte le altre condizioni al contorno.

Il numero di pezzi conformi prodotti mediamente da un utensile prima di fuoriuscire dal campo di tolleranza è aumentato di circa il 118% rispetto alla produzione standard e di circa il 93% rispetto a quanto manifestato dal gruppo A. L'uso degli stessi utensili sperimentati nel gruppo A e degli stessi parametri di lavorazione ci assicurano sul fatto che l'incremento di prestazioni sia dovuto unicamente alle migliori prestazioni dell'olio in seguito all'additivazione.

5.9.2 Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi

La causa del notevole aumento della durata degli utensili in seguito all'additivazione del lubrificante può essere ricercata nella sostanziale variazione dei meccanismi di usura attuati dal processo sotto analisi.

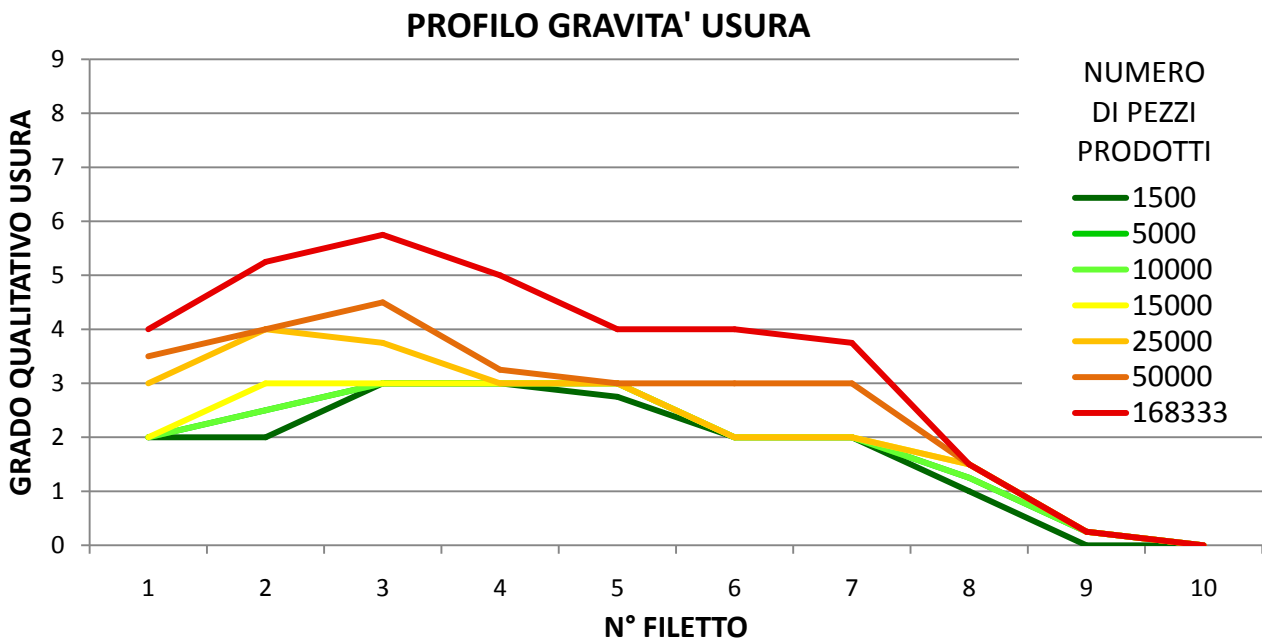


Fig. 5.114: Evoluzione dei fenomeni di usura sui filetti dell'utensile F4 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

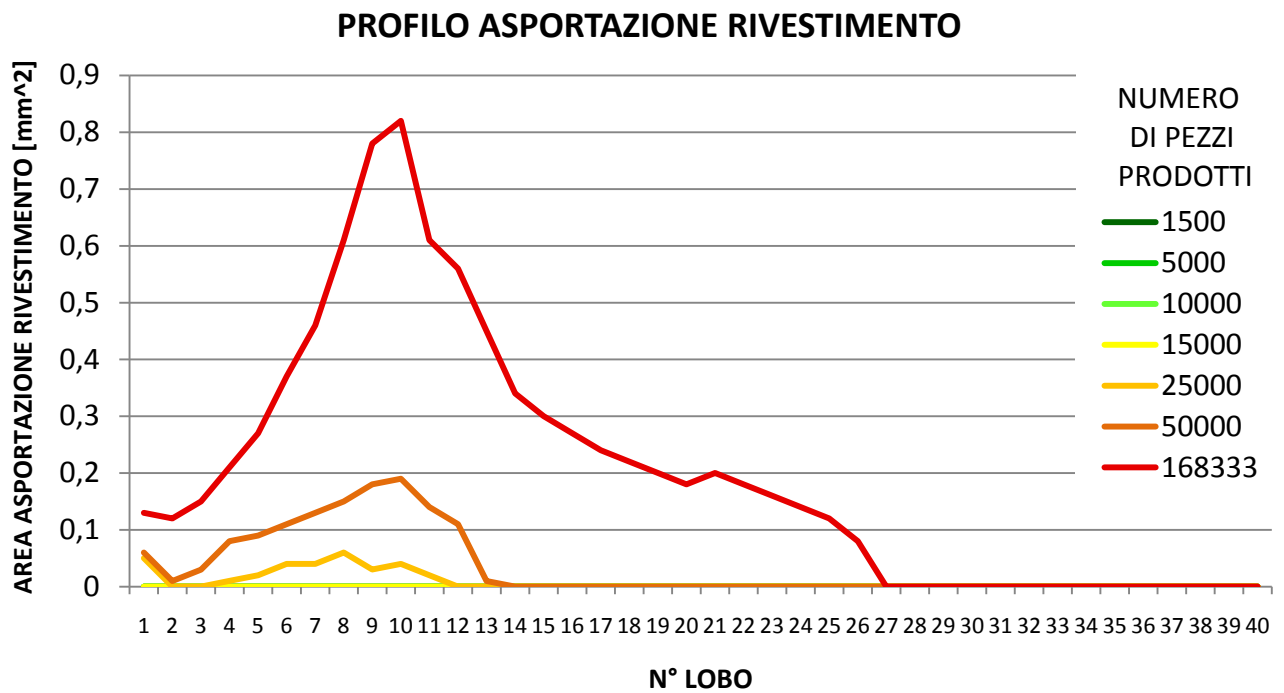


Fig. 5.115: Evoluzione dell'asportazione del rivestimento sui lobi dell'utensile F4 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

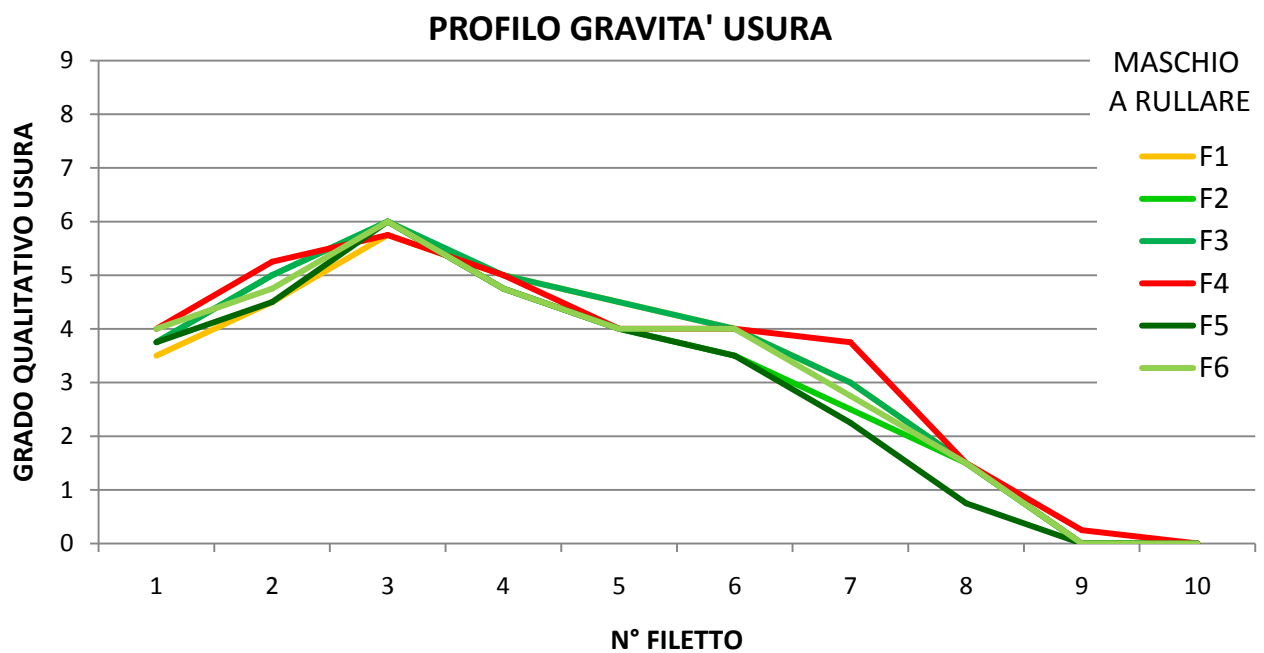


Fig. 5.116: Confronto tra i profili di gravità usura dei maschi del gruppo F al momento della sostituzione (16833 pezzi prodotti).

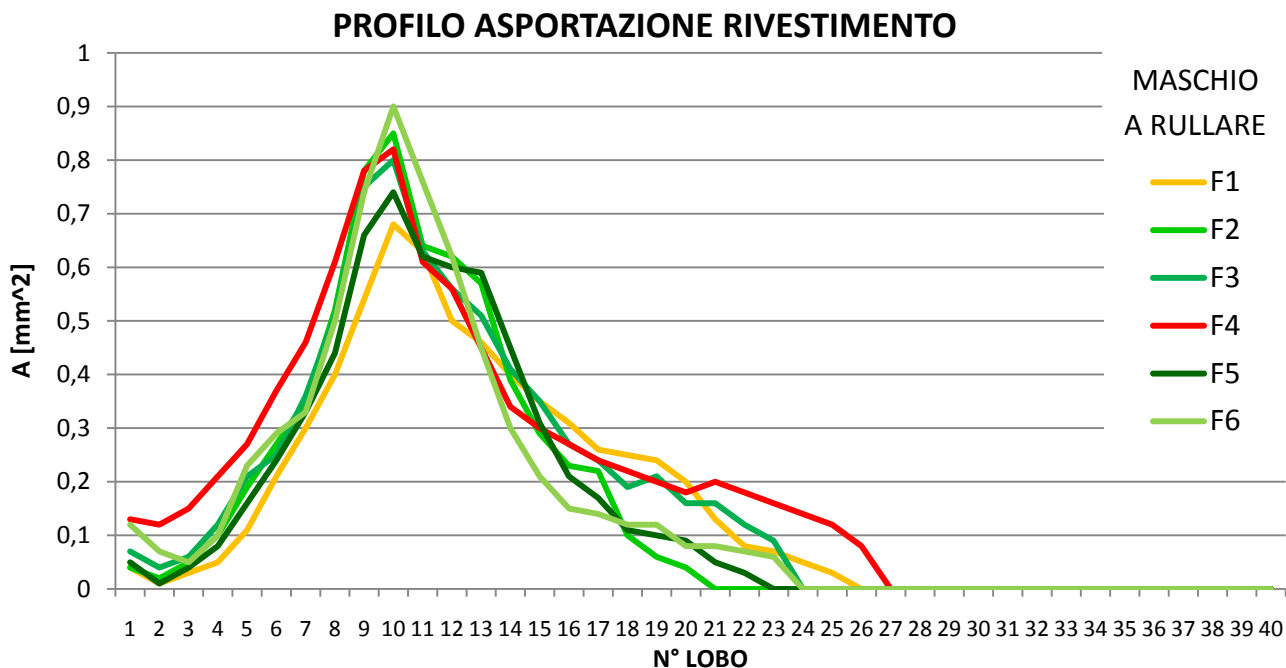


Fig. 5.117: Confronto tra i profili di asportazione del rivestimento nei maschi del gruppo F al momento della sostituzione (168333 pezzi prodotti).

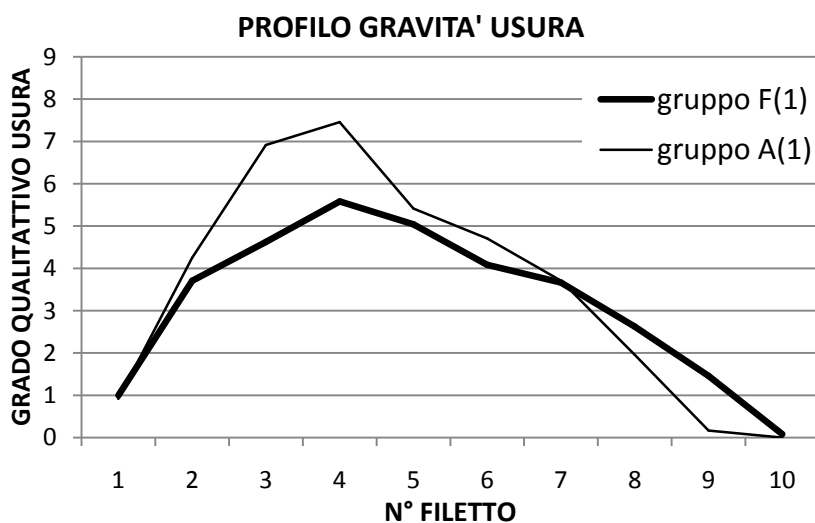
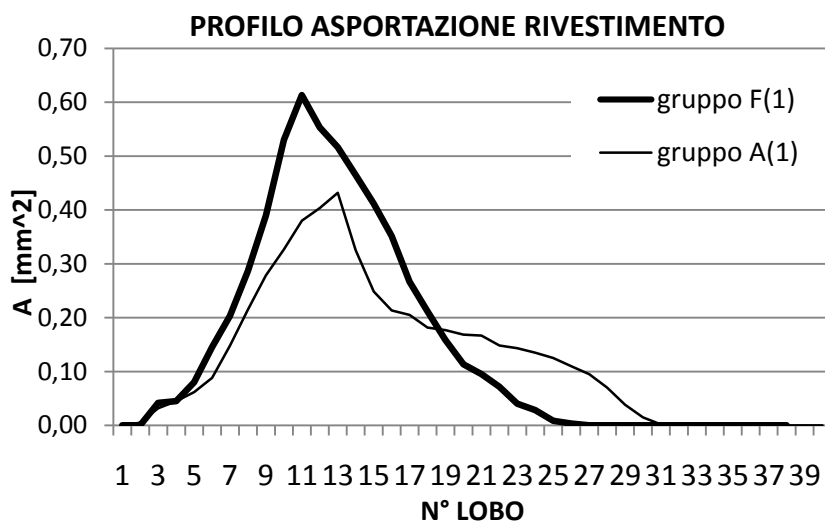


Fig. 5.118: Confronto tra il profilo medio di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi a fine vita degli utensili appartenenti al gruppo F(1) (202071 pezzi prodotti) con quelli del gruppo A(1) (94352 pezzi prodotti). Evidente come in seguito all'additivazione i maschi a rullare subiscono fenomeni ossidativi di minore entità.

Fig. 5.119: Confronto tra il profilo di asportazione medio a fine vita degli utensili appartenenti al gruppo F(1) con quelli del gruppo A(1).

I maschi del gruppo F a fine vita manifestano un'asportazione del rivestimento sul lobo critico molto maggiore di quella osservata comunemente sui maschi fuori tolleranza prima dell'additivazione. Allo stesso tempo l'usura si propaga su un numero di lobi inferiori (coinvolge circa un filetto in meno).



Dall'osservazione dei grafici ottenuti per il gruppo F emerge una sostanziale variazione del comportamento ad usura dei maschi a rullare in seguito all'additivazione del lubrificante con l'additivo EP.

Il notevole incremento di durata manifestata può essere di conseguenza attribuita alla realizzazione di meccanismi di usura differenti rispetto a quanto finora riscontrato.

I nuovi meccanismi di usura realizzati a livello delle variabili misurate influiscono riducendo la gravità dei fenomeni tribo-ossidativi manifestati nelle regioni adiacenti alle superfici private del rivestimento. Gli aloni appaiono di colorazione più chiara, di minore estensione, e manifestano la tipica morfologia realizzata da fenomeni di lucidatura.

Anche la distribuzione delle aree di asportazione del rivestimento sui lobi risulta mutata, con una riduzione del numero di filetti su cui risulta esposto l'acciaio rapido e una maggiore estensione delle aree di usura misurate sui lobi adiacenti al lobo critico a fine vita.

Quest'ultimo fenomeno può essere spiegato ipotizzando che i nuovi meccanismi di usura coinvolgano unicamente strati più superficiali del materiale e, quindi, a parità di area di rivestimento asportata la geometria del lobo venga modificata in misura inferiore (minori scheggiature e fratture superficiali) e riesca, di conseguenza, a realizzare una deformazione maggiore.

Questa ipotesi verrà confermata dalle successive osservazioni al microscopio elettronico.

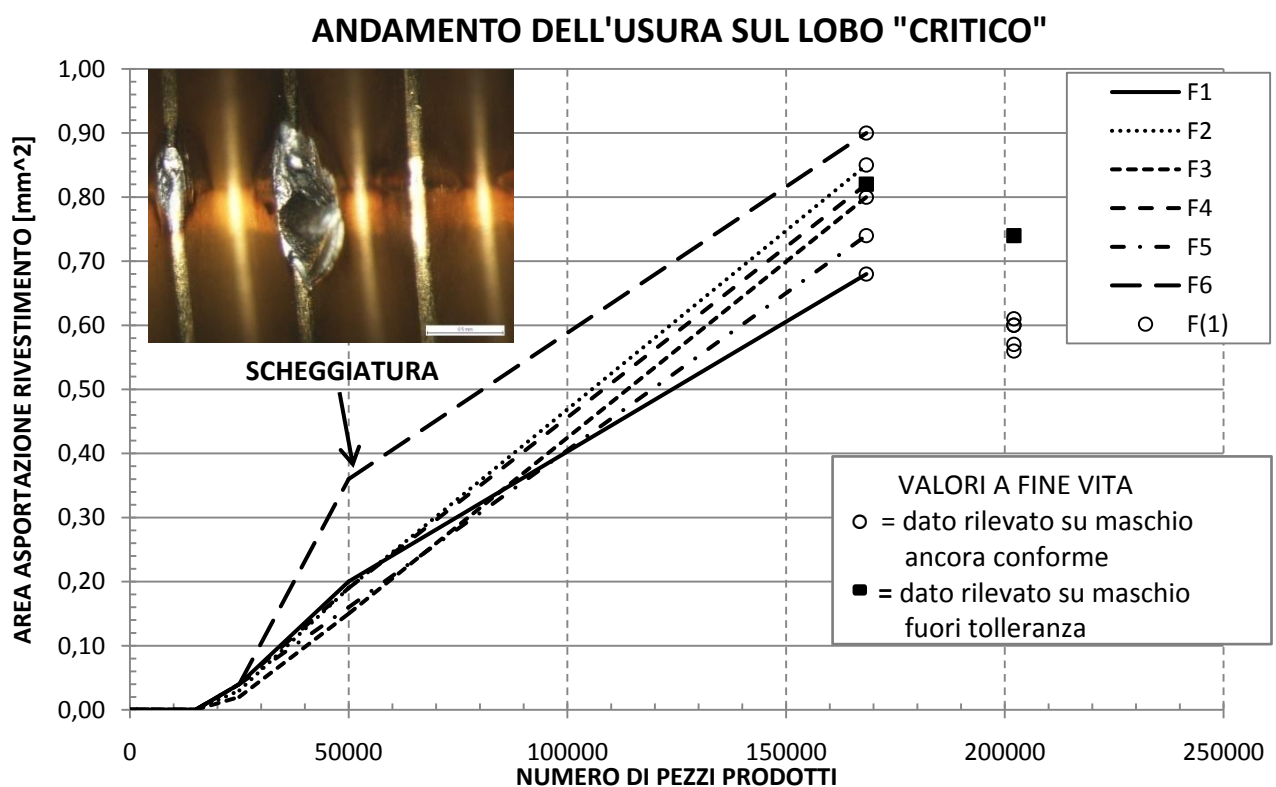


Fig. 5.120: Propagazione dell'usura sul lobo critico all'aumentare del numero di pezzi prodotti per gli utensili del gruppo F.

L'andamento particolare manifestato dall'utensile F6 è dovuto ad una scheggiatura avvenuta sul lobo critico prima dei 50000 pezzi prodotti.

5.9.3 Descrizione dei meccanismi di usura

CAMPIONE F1 (≈ 170000 pezzi prodotti)

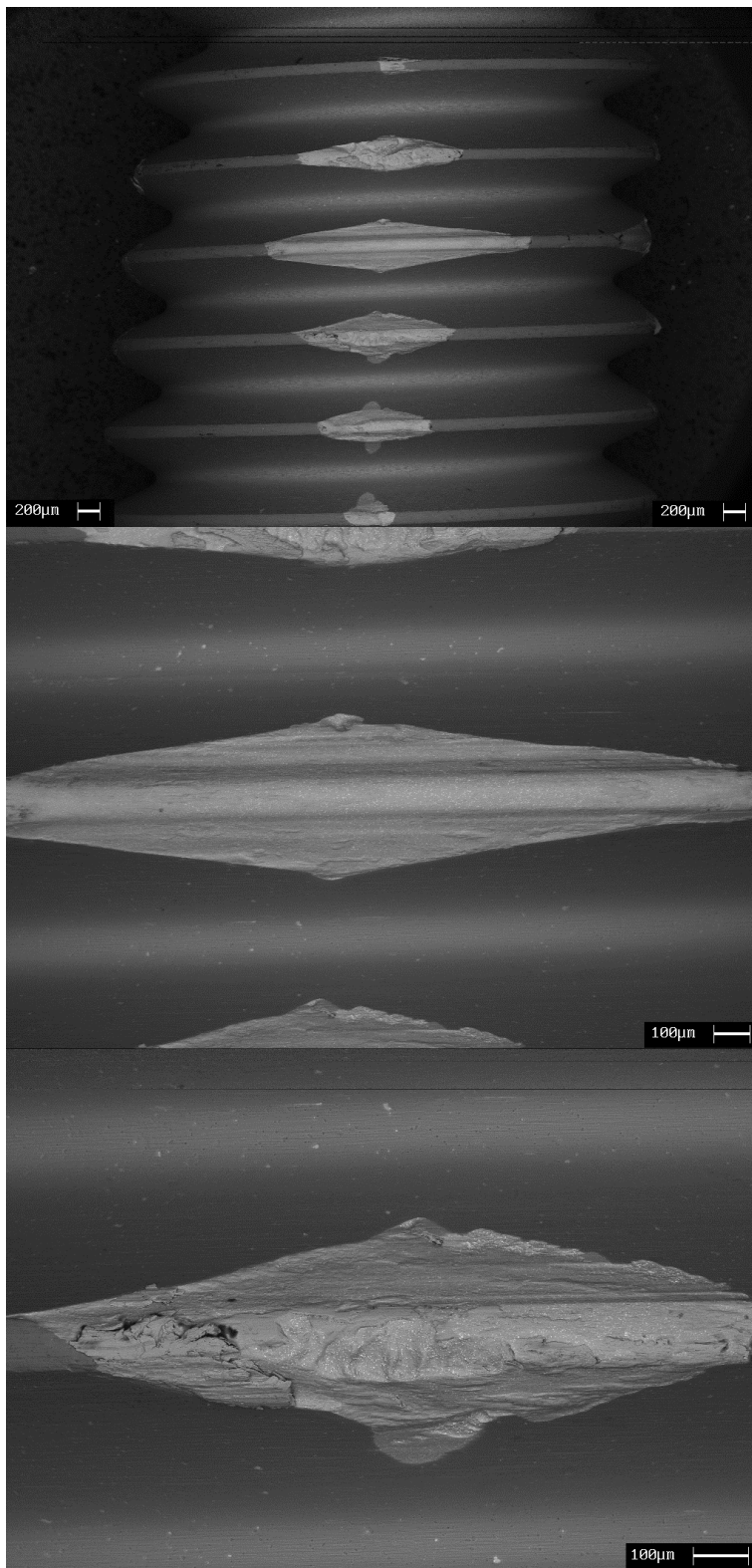


Fig. 5.121: Campione F1_L2-3. Macrografia della superficie di usura e ingrandimenti in corrispondenza del 3° e 4° filetto.

L'analisi della superficie di usura dei maschi a rullare a fine vita evidenzia una notevole variazione dei meccanismi di usura rispetto ai gruppi precedenti.

Possedendo i maschi analizzati nel gruppo F le medesime caratteristiche di quelli del gruppo A, è facile dedurre come questa modifica sia implicabile unicamente al diverso comportamento del lubrificante.

L'osservazione della superficie dei lobi di imbocco porta ad osservare innanzitutto come l'estensione dell'area in cui il rivestimento risulta asportato è molto maggiore rispetto ai casi precedenti.

Questo aspetto è strettamente connesso alla notevole riduzione, riscontrata in tali utensili, dei fenomeni di adesione e di fatica superficiale.

Il meccanismo di usura che risulta essere prevalente è, infatti, quello di tipo abrasivo con sviluppo di superfici che manifestano le caratteristiche solcature nella direzione di lavorazione.

L'assenza di fenomeni di frattura e frammentazione rilevanti in

corrispondenza dei lobi di imbocco fa sì che la geometria dei lobi dei maschi a rullare venga modificata in modo minore. I lobi di imbocco riescono, per tanto, ad abbozzare la forma del filetto sulla superficie del preforo per un numero maggiore di pezzi ritardando ulteriormente i fenomeni di usura sui lobi di calibrazione.

Allo stesso modo i fenomeni di abrasione asportano maggiori porzioni di rivestimento sui singoli lobi prima che l'utensile fuoriesca dal campo di tolleranza.

CAMPIONE F4 (≈ 170000 pezzi prodotti)

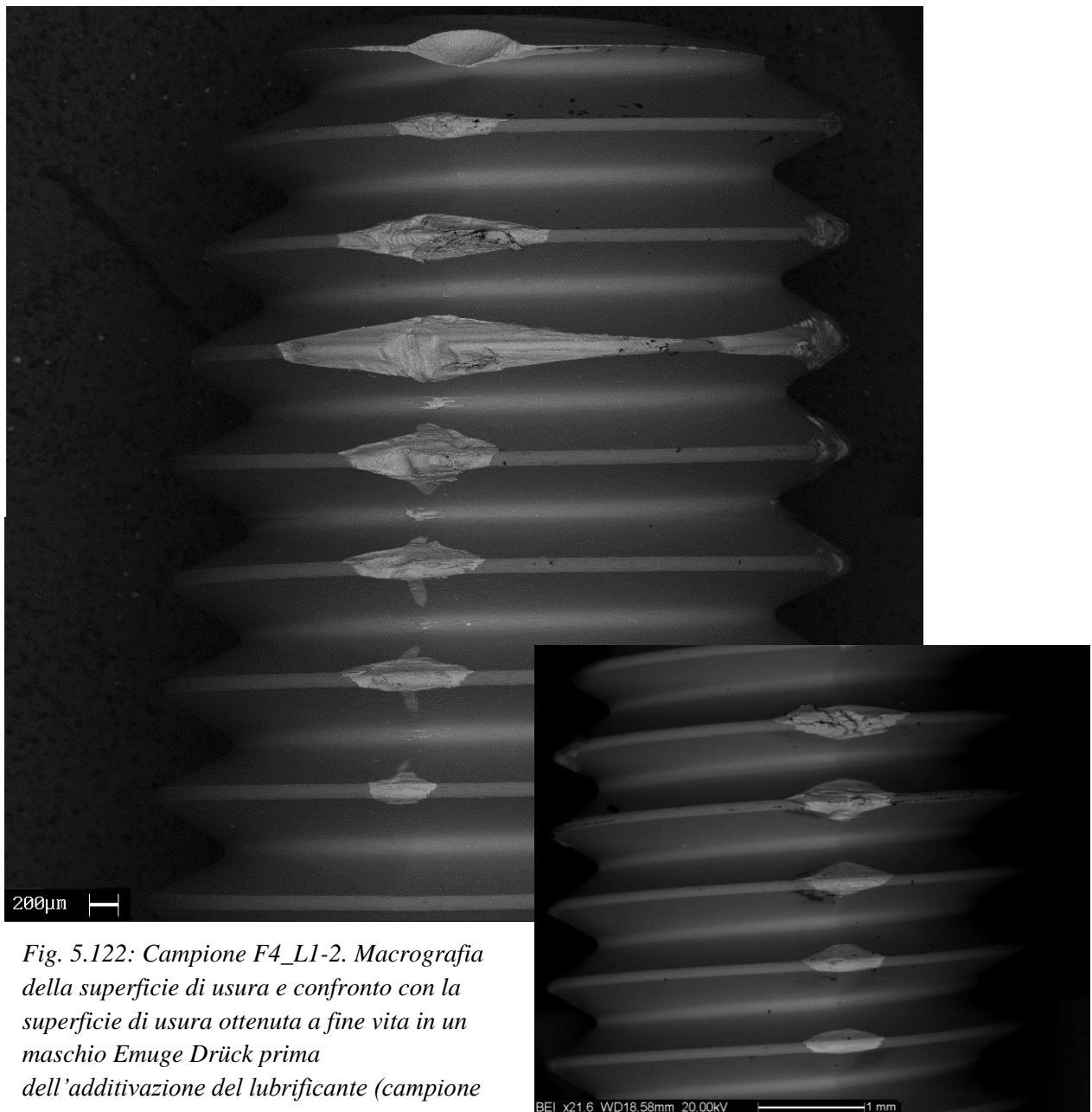
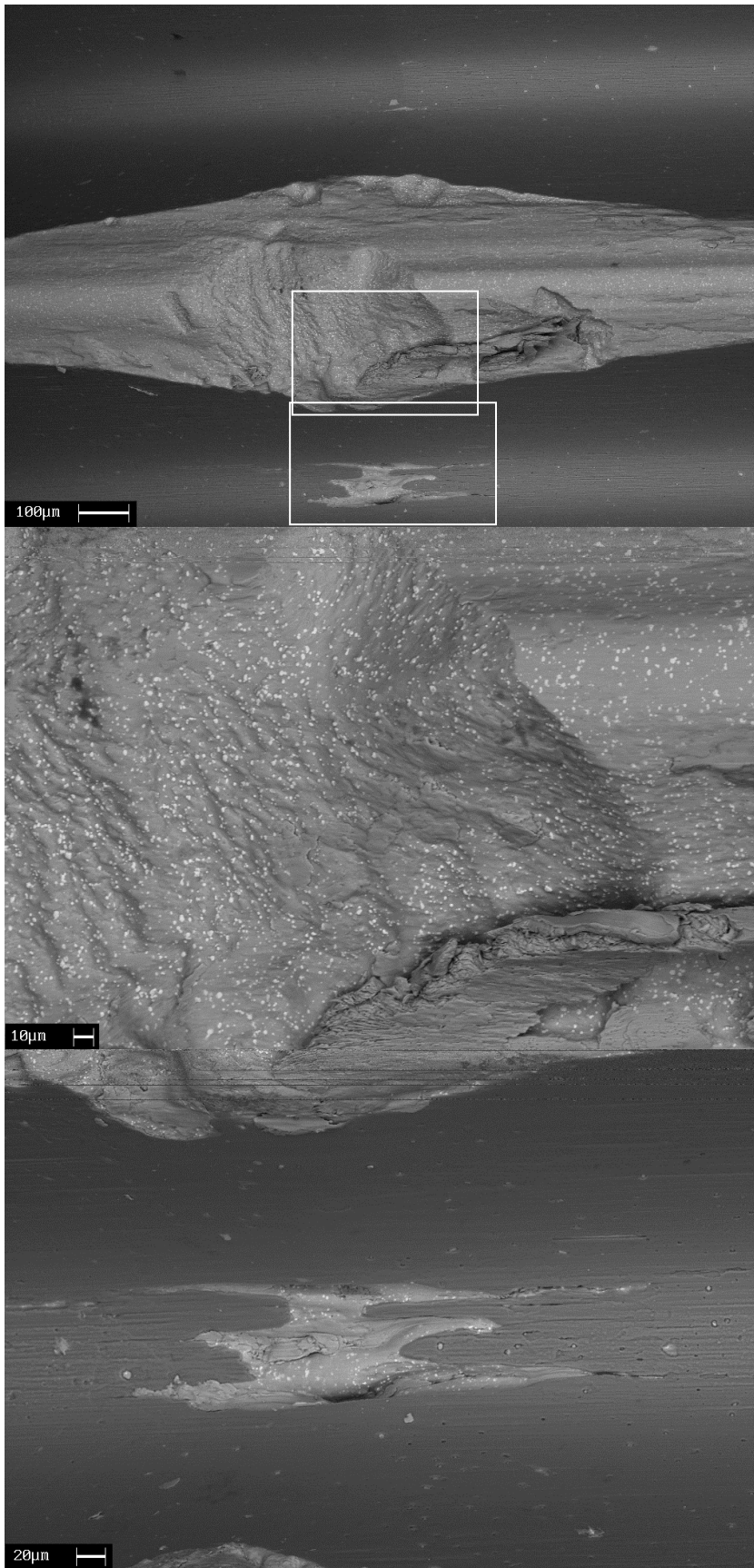


Fig. 5.122: Campione F4_L1-2. Macrografia della superficie di usura e confronto con la superficie di usura ottenuta a fine vita in un maschio Emuge Drück prima dell'additivazione del lubrificante (campione A8 nel riquadro piccolo).

È evidente la diversa morfologia del danneggiamento ottenuta a fine vita dopo l'additivazione. In corrispondenza dei lobi di imbocco si hanno aree più estese in cui il rivestimento risulta asportato, tuttavia, risultano praticamente assenti i fenomeni di adesione e di formazione di strutture a lamelle sovrapposte.



Il danneggiamento subito dai maschi a rullare Emuge Drück in seguito all'additivazione del lubrificante è risultato modificato nei seguenti aspetti:

- Produzione di filettature conformi su un numero maggiore di pezzi (quasi il doppio);
- Maggiore area di asportazione del rivestimento sui lobi d'imbocco a fine vita;
- Ridotti fenomeni di scheggiatura o frammentazione dell'acciaio rapido;
- Formazione di materiale di riporto quasi assente con minima adesione di lamelle di C45 nelle aree in cui affiora l'acciaio HSS-E;
- Presenza di danneggiamenti e abrasioni a fondo filetto in corrispondenza dei lobi;
- Presenza di zolfo nei residui carboniosi ritrovati.

Fig. 5.123: Campione FI_L2-3. Micrografia in corrispondenza del 3° filetto e particolari della superficie di usura e dei fenomeni abrasivi a fondo filetto.

Queste osservazioni portano ad affermare che l'additivazione con ADD SA ha avuto esiti positivi sulle prestazioni già elevate dell'HAROLBIO 5 (*).

L'inserimento di una sostanza ad effetto EP a base zolfo in elevata concentrazione ha permesso di modificare notevolmente i meccanismi di usura degli utensili riducendo notevolmente i fenomeni di adesione e di fatica superficiale.

Ciò può essere ipoteticamente dovuto ai meccanismi d'azione degli additivi EP precedentemente descritti.

L'asportazione del rivestimento mediante meccanismi di tipo abrasivo porta, infatti, alla presenza di HSS-E all'interfaccia. Tuttavia l'elevata concentrazione di additivi EP nell'olio (a base cloro e zolfo) stimola la formazione di strati molecolari di prodotti di reazione sulla superficie dell'acciaio riducendo notevolmente l'affinità chimica della superficie dell'utensile con quella del pezzo lavorato.

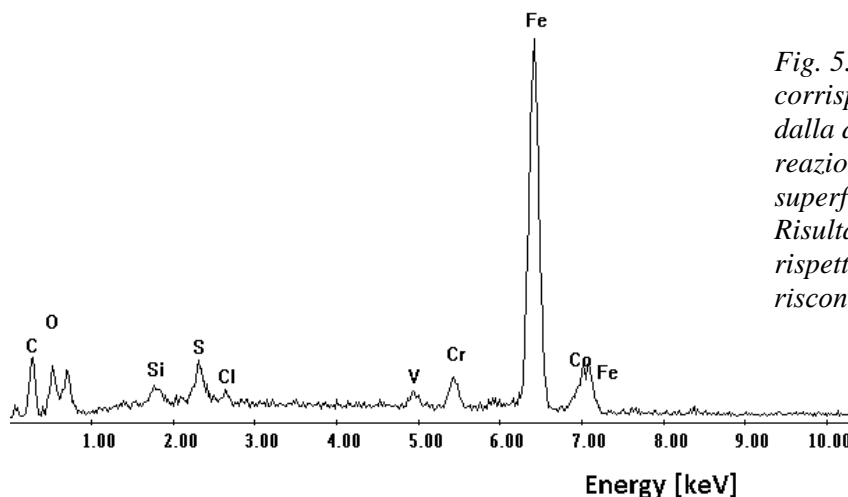
Ciò permette di avere minore attrito durante la lavorazione, ma, soprattutto, limita notevolmente i fenomeni di usura adesiva.

La mancata adesione di lamelle di C45 sulla superficie dell'utensile ha un ulteriore effetto benefico nella riduzione dei fenomeni di fatica superficiale che portavano alla scheggiatura e frammentazione dei lobi maggiormente sollecitati.

Il meccanismo di usura che risulta essere predominante negli utensili del gruppo F è quello di tipo abrasivo.

L'usura abrasiva coinvolgendo solamente gli strati più superficiali del materiale modifica in maniera inferiore la geometria dell'utensile che riesce, per tanto, ad imprimere un filetto con profilo conforme sulla superficie dei prefiori molto più a lungo.

Ciò è evidente dalla notevole area di asportazione del rivestimento manifestata sui lobi a fine vita e dal fatto che l'assottigliamento dei lobi è tale che in prossimità di questi si ha il contatto del fondo filetto con l'apice del filetto in formazione e ciò ne causa l'abrasione vista.



*Fig. 5.124: Spettro EDS ottenuto in corrispondenza di un residuo derivante dalla decomposizione termica e dalla reazione del lubrificante con la superficie metallica..
Risulta notevolmente arricchito in zolfo rispetto alla composizione tipica riscontrata prima dell'additivazione.*

5.10 GRUPPO G

Nella ricerca di una formulazione del fluido lubrificante che meglio si prestasse al processo di maschiatura a rullare, il passo successivo è stato quello di sperimentare un'additivazione a base di sostanze untuosanti nella speranza che queste avessero un effetto sinergico con gli additivi EP precedentemente miscelati.

Sempre affidandoci alla consulenza del dott. Marco Bellini si è proceduto miscelando con le stesse modalità del caso precedente 24 Kg di prodotto additivante X-DRAW BIO 1000 SI (codice commerciale: EX00300-XXX-14).

Questo prodotto è un lubro-refrigerante intero particolarmente adatto per operazioni di stampaggio e imbutitura a freddo di acciai interi legati, inox e leghe non ferrose a base di esteri e additivi polimerici specifici. È, invece, esente da olio minerale e da additivi clorurati.

Il fluido è chiaro, altamente viscoso (1000 cSt), con ottimo potere adesivo e un altissimo potere antisaldante, distaccante e di taglio, il che dovrebbe favorire ottime finiture nei pezzi in acciaio lavorati, anche se ad alta resistenza ed a sagoma complessa.

Oltre all'effetto fortemente aggraffante, l'aggiunta di tale prodotto dovrebbe incrementare notevolmente la viscosità dell'olio con i relativi benefici indotti sulla posizione del sistema lubrificato all'interno del diagramma di Stribeck.

Anche in questo caso, al termine di un adeguato periodo di miscelazione dei componenti, è stato prelevato un campione di 100 ml di lubrificante e fatto analizzare dal laboratorio della Bellini s.r.l. .

Il confronto con un campione prelevato precedentemente alla miscelazione ha evidenziato le seguenti variazioni delle proprietà fisiche e meccaniche:

-Nome commerciale: **X-DRAW BIO 1000 SI**
 -Codice commerciale: **EX00300-XXX-14**
 -Tipo di prodotto e impiego: **Fluido per lavorazioni meccaniche gravose**
 -Aspetto e colore: **liquido limpido di colore bruno chiaro**
 -Odore: **sui generis**
 -Idrosolubilità: **insolubile in acqua**
 -Viscosità a 40°C ASTM D445: **1000 cst**
 -Proprietà esplosive: **non esplosivo**
 -Proprietà comburenti: **non comburente**

Tabella XLV: Informazioni e proprietà fisiche-chimiche principali dell'additivo X-DRAW BIO 1000 SI.

PROPRIETA' FISICHE E MECCANICHE	NORMA DI RIFERIMENTO	Campione 3: HAROLBIO 5 (*) + 10% ADD SA	Campione 4: HAROLBIO 5 (*) + 10% ADD SA + 10% X-DRAW BIO 1000 SI
Densità a 20°C [Kg/m ³]	ASTM D 1298	963	964
Viscosità a 40°C [cSt]	ASTM D 445	74,1	115
Viscosità a 100°C [cSt]	ASTM D 445	10,8	16,1
Indice di viscosità [-]	ASTM D 2270	133	148
Valore Brugger [N/mm ²]	DIN 51347	224	155

Tabella XLVI: Variazioni delle proprietà fisiche e meccaniche del lubrificante in seguito alla seconda additivazione.

L'additivazione con circa il 10% di additivo di prestazione viscoso porta ad un incremento della viscosità del lubrificante di circa il 55%.

Se si confronta il valore di viscosità con quello posseduto dall'HAROLBIO 5 (*) prima di entrambe le additivazioni si vede come quest'ultima sia addirittura raddoppiata. Ciò sposta il sistema verso condizioni di lubrificazione migliori ed ha effetti benefici sulla resistenza a fatica superficiale dell'utensile.

Il valore Brugger del campione 4 risulta, invece, inferiore di circa il 30% rispetto a quello del campione 3.

Ciò è imputabile al diverso meccanismo d'azione dell'additivo untuosante rispetto a quello dell'additivo EP precedentemente inserito. Le sostanze contenute nei due diversi additivi, agendo entrambe a livello superficiale, danno, probabilmente, origine ad un meccanismo competitivo che riduce in parte l'azione dell'additivo EP a base zolfo.

Il valore Brugger del campione 4 risulta, comunque, il 26% maggiore rispetto a quello misurato nel campione 1.

È risultata, invece, pressoché inalterata la presenza particellare (codice di contaminazione secondo ISO 4406 = 23/23/20).

In base a queste considerazioni un risultato atteso sul sistema tribologico è l'aumento della resistenza ad usura soprattutto nel periodo iniziale della vita degli utensili, cioè l'aumento del numero di pezzi prodotti prima che il rivestimento sottile perda le caratteristiche di integrità e continuità.

Essendo il TiN, ma in generale tutti i rivestimenti ceramici, pressoché inerti chimicamente, è, infatti, logico aspettarsi una scarsa reattività con gli additivi EP (il cui funzionamento come visto presuppone la presenza di una superficie metallica nuda e, per tanto, attiva chimicamente).

Quest'ultimi inizieranno a svolgere il proprio ruolo di protezione solo nella seconda parte della vita degli utensili, una volta che, in seguito alla rimozione da parte dei vari meccanismi di usura del rivestimento ceramico, viene esposta la superficie in acciaio super-rapido.

Al contrario un additivo ad effetto untuosante come l'X-DRAW BIO 1000 SI dovrebbe sfruttare le caratteristiche di polarità dei gruppi chimici contenuti nelle molecole polimeriche per adsorbirsi fisicamente alla superficie rivestita e fungere da strato limite.

Ciò dovrebbe proteggere il rivestimento permettendogli di permanere integro (con relativi vantaggi dal punto di vista tribologico) per un maggior numero di filettature eseguite.

Ritardando l'asportazione del rivestimento sottile è logico aspettarsi un prolungamento della durata totale degli utensili prima che questi inizino a produrre pezzi non conformi.

I maschi a rullare e i parametri di lavorazione usati nel corso di questa sperimentazione sono, come nel caso del gruppo F, gli stessi applicati nel gruppo A, con unica differenza l'ulteriore variazione della composizione del lubrificante.

5.10.1 Analisi della durata

L'ulteriore additivazione del lubrificante ha comportato, al contrario delle aspettative una contrazione del numero medio di pezzi prodotti.

GRUPPO	UTENSILI NON CONFORMI	N° CONTATORE	N° PEZZI PRODOTTI
G	G6	400000	133333
G(1)	G13, G18, (G15)	554900	184967
MEDIA	-	477450	159150

Tabella XLVII: Numero di pezzi prodotti a fine vita dagli utensili del gruppo G. Tra parentesi gli utensili al limite di conformità al momento della sostituzione.

L'aggiunta dell'additivo untuosante al lubrificante ad alta concentrazione di additivi EP ha comportato una riduzione media della durata degli utensili di circa il 14% rispetto a quella manifestata dagli stessi utensili precedentemente l'additivazione.

La vita media dei maschi a rullare risulta comunque circa il 187% la durata degli stessi rispetto ai valori misurati ad inizio sperimentazione

5.10.2 Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi

Lo studio dei fenomeni di usura degli utensili appartenenti al gruppo G ha portato al conseguimento dei seguenti grafici:

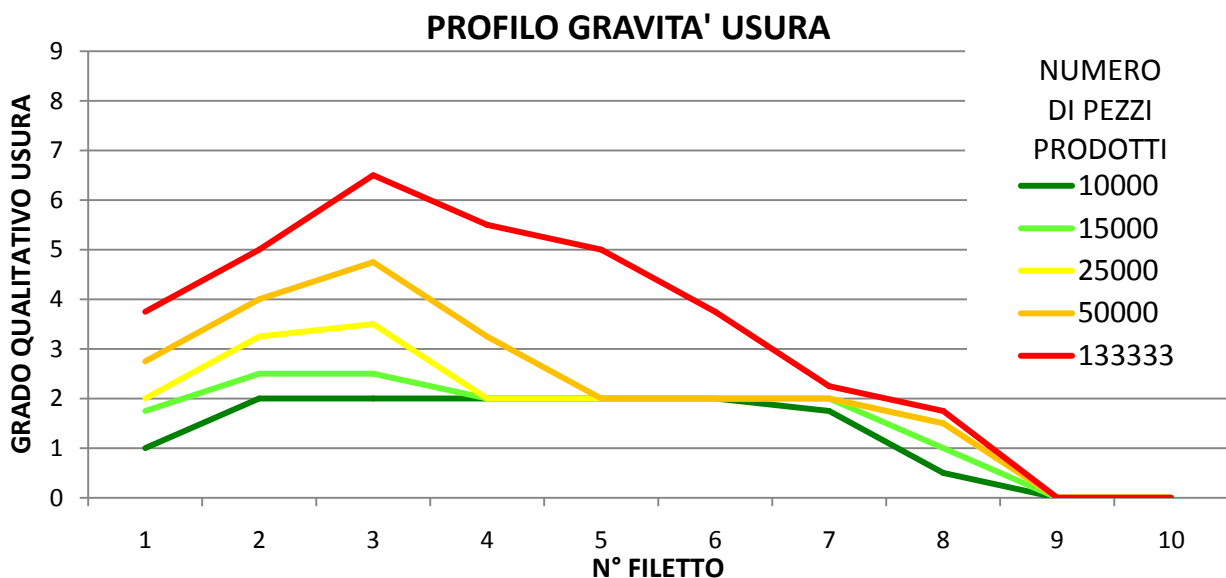


Fig. 5.125: Evoluzione dei fenomeni di usura sui filetti dell'utensile G6 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

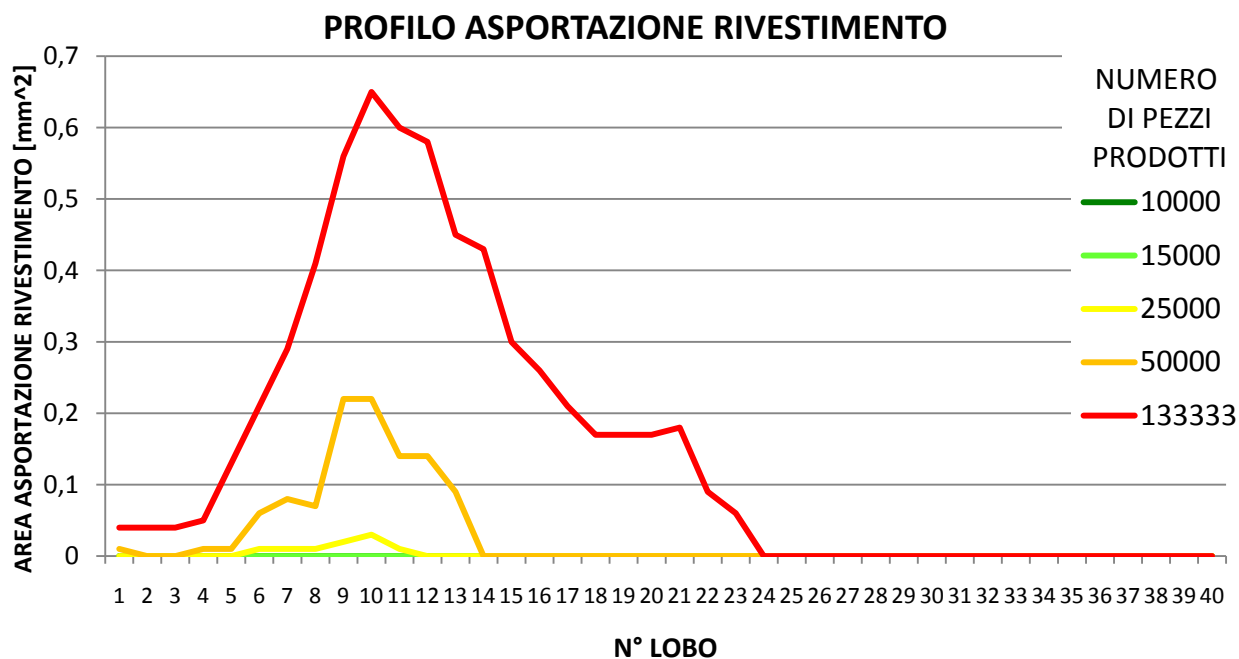


Fig. 5.126: Evoluzione dell'asportazione del rivestimento sui lobi dell'utensile G6 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

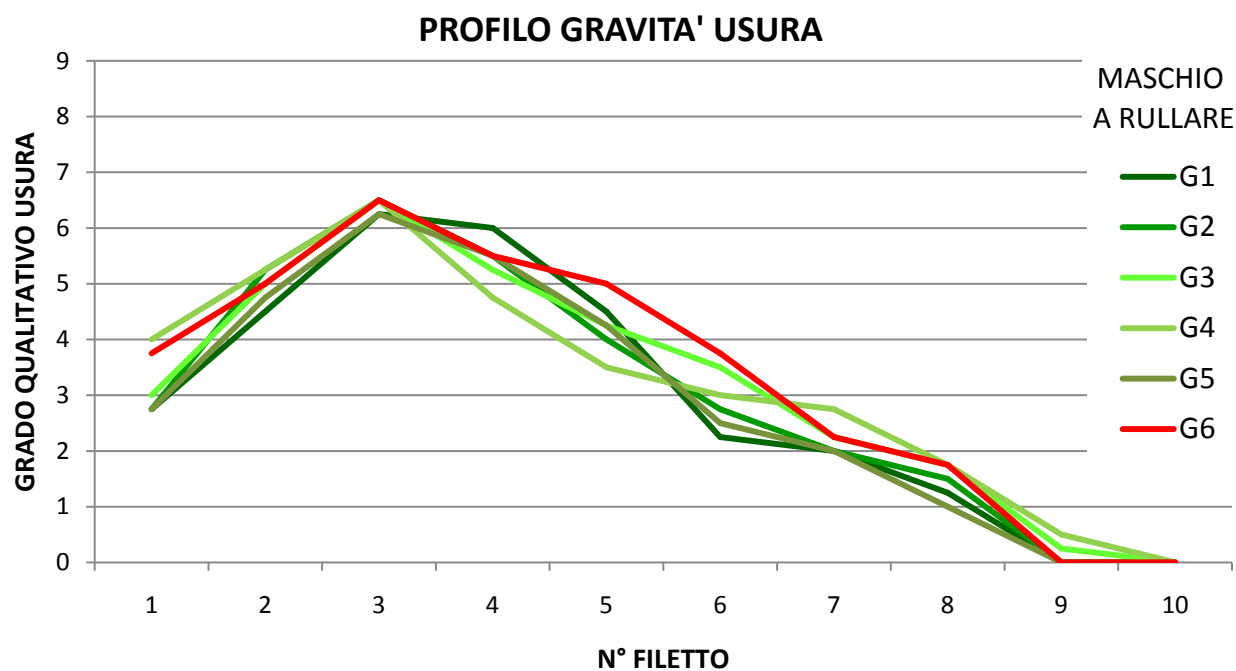


Fig. 5.127: Confronto tra i profili di gravità di usura dei maschi del gruppo G al momento della sostituzione (13333 pezzi prodotti).

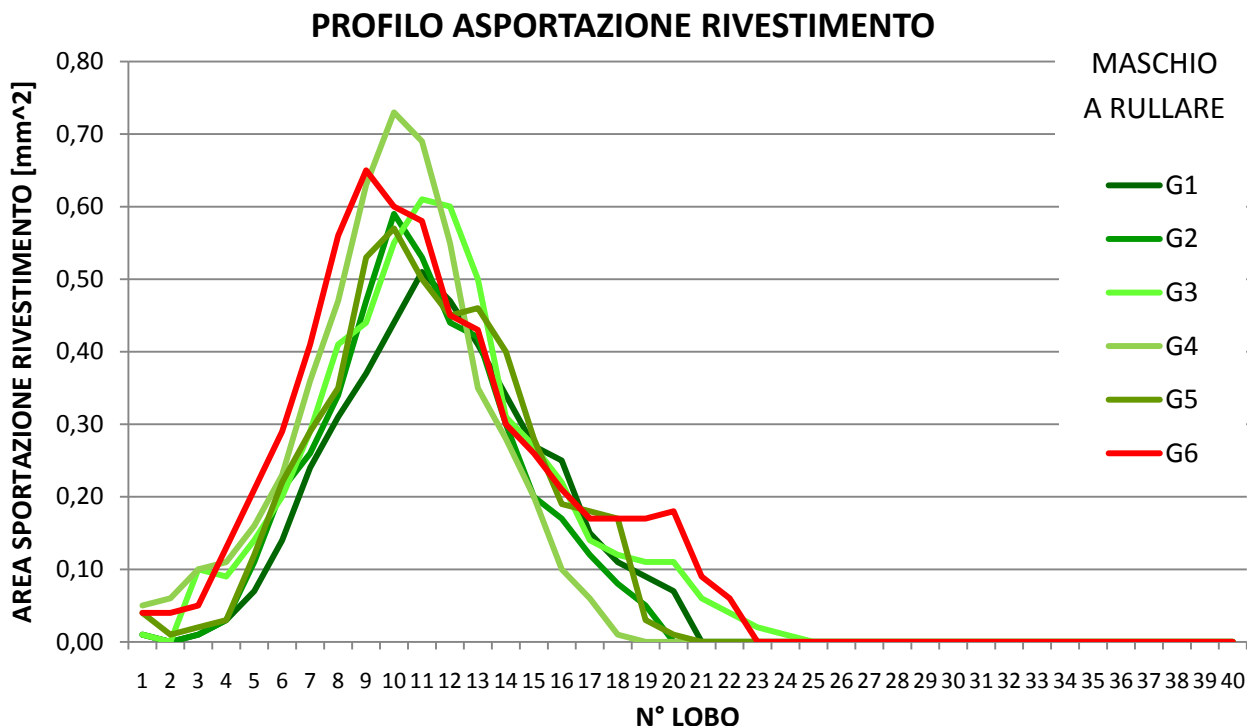


Fig. 5.128: Confronto tra i profili di asportazione del rivestimento nei maschi del gruppo G al momento della sostituzione (133333 pezzi prodotti).

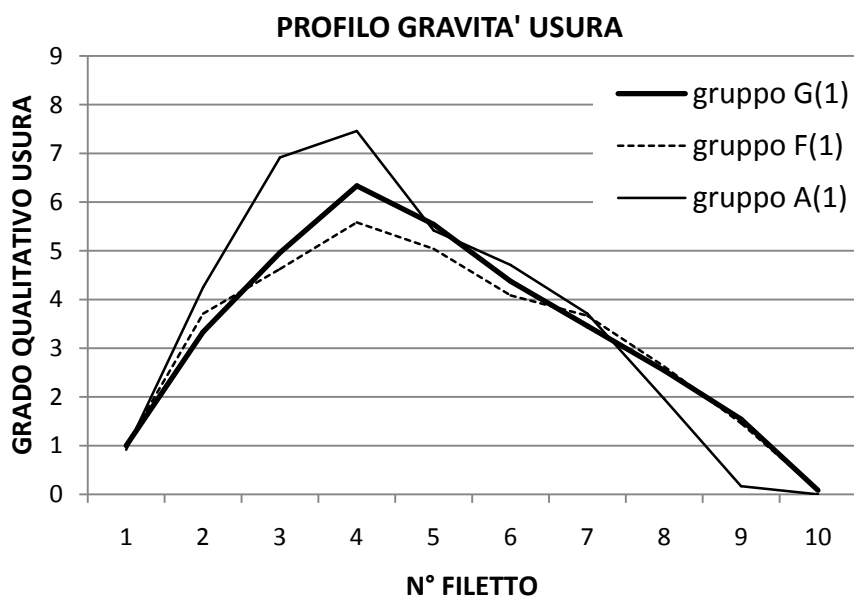


Fig. 5.129: Confronto tra il profilo medio di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi a fine vita degli utensili appartenenti al gruppo G(1) (184967 pezzi prodotti) con quelli del gruppo A(1) (94352 pezzi prodotti) e F(1) (202071 pezzi prodotti). Evidente come in seguito alla seconda additivazione del lubrificante il comportamento degli utensili peggiori leggermente rispetto a quello manifestato in presenza del solo additivo EP.

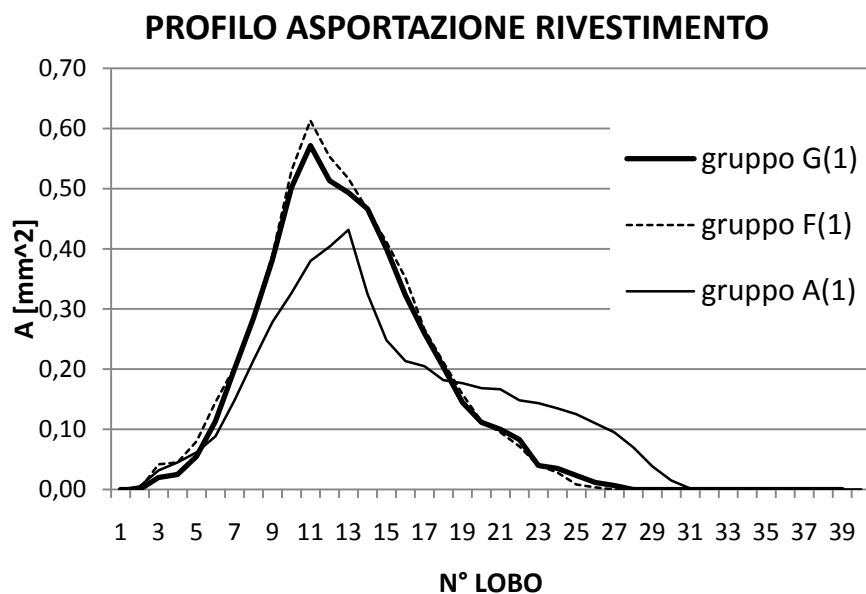


Fig. 5.130: Confronto tra il profilo di asportazione medio a fine vita degli utensili appartenenti al gruppo G(1) con quelli del gruppo A(1) e F(1).

I maschi del gruppo G a fine vita manifestano un'asportazione del rivestimento sul lobo critico leggermente inferiore a quanto osservato nel gruppo F.

Il comportamento ad usura degli utensili del gruppo G è, tuttavia, molto simile a quello del gruppo F rispetto a quanto manifestato dagli utensili nelle condizioni standard.

I dati relativi alla gravità dei fenomeni tribo-ossidativi e all'estensione dell'aree prive del rivestimento ottenuti in seguito alla seconda additivazione possono essere correlati direttamente alla variazione di prestazioni riscontrate.

La minore durata manifestata in seguito alla miscelazione con l'additivo untuosante si rispecchia anche sull'andamento delle curve che si posizionano su valori molto prossimi a quelli ottenuti per il gruppo F, ma con una minore differenza rispetto al comportamento manifestato dagli utensili nelle condizioni di lubrificazione iniziali.

In un certo senso l'aggiunta dell'additivo X-DRAW BIO 1000 SI ha causato una leggera inibizione dell'azione svolta dall'additivo ADD SA, facendo tornare il sistema tribologico verso condizioni più simili a quelle manifestate dall'uso del solo HAROBIO 5 (*).

Lo studio della propagazione dell'usura sul lobo critico permette, tuttavia, di osservare, come con l'aggiunta della seconda sostanza, il rivestimento permanga integro per un numero superiore di pezzi rispetto a prima.

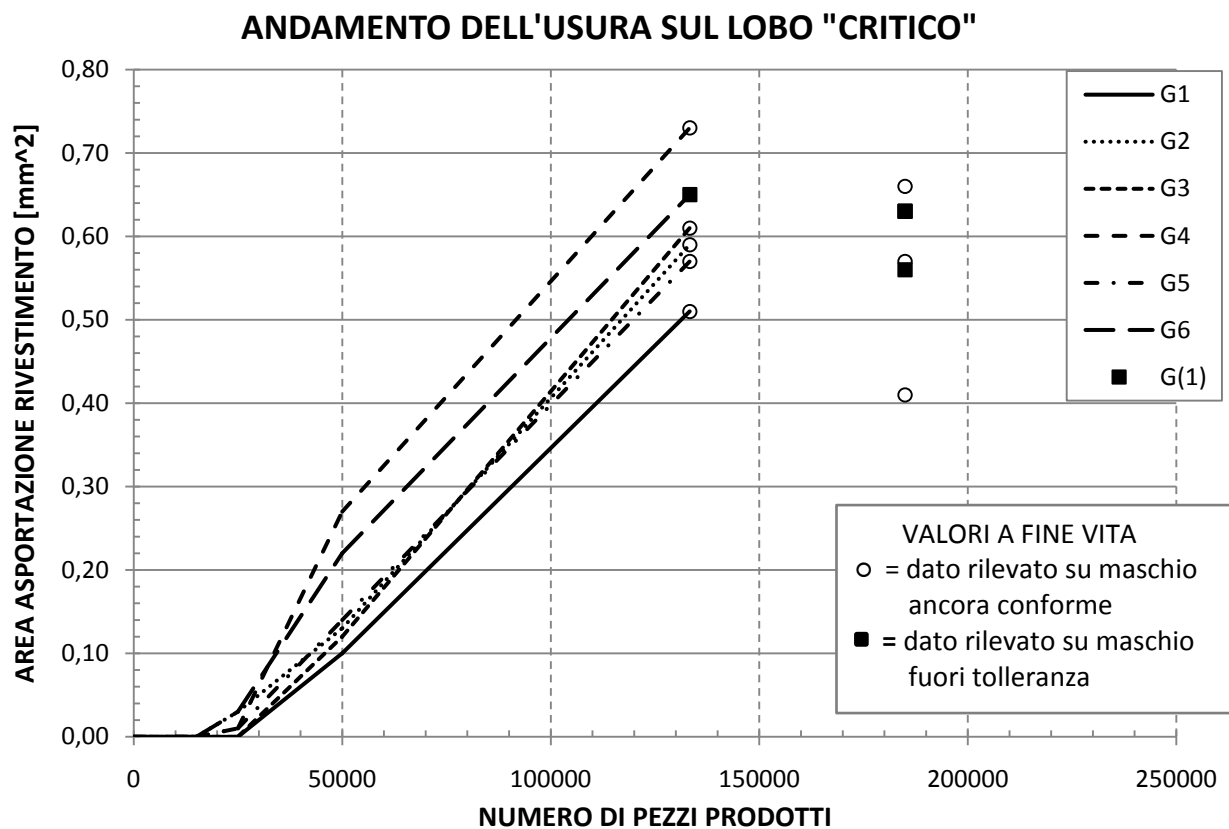


Fig. 5.131: Propagazione dell'usura sul lobo critico all'aumentare del numero di pezzi prodotti per gli utensili del gruppo G.
 Si nota un esteso tratto iniziale a pendenza nulla corrispondente alla presenza del rivestimento sulla superficie dei lobi.

5.10.3 Descrizione dei fenomeni di usura

CAMPIONE G4 (≈ 133000 pezzi prodotti)

L'analisi delle superfici di usura degli utensili del gruppo G a fine vita confermano la variazione dei meccanismi di usura riscontrata in seguito all'additivazione del lubrificante.

In seguito alla seconda additivazione si ha, come descritto, un modesto aumento della durata del rivestimento integro sulla superficie dei lobi.

Tuttavia, in seguito all'asportazione del rivestimento, la presenza del secondo additivo porta ad un leggero peggioramento delle condizioni tribologiche rispetto a quanto osservato nel gruppo F. Sebbene sia ancora predominante il meccanismo di usura abrasiva, in seguito alla seconda additivazione tornano a manifestarsi, in maniera più evidente, fenomeni di adesione e di scheggiatura della superficie.

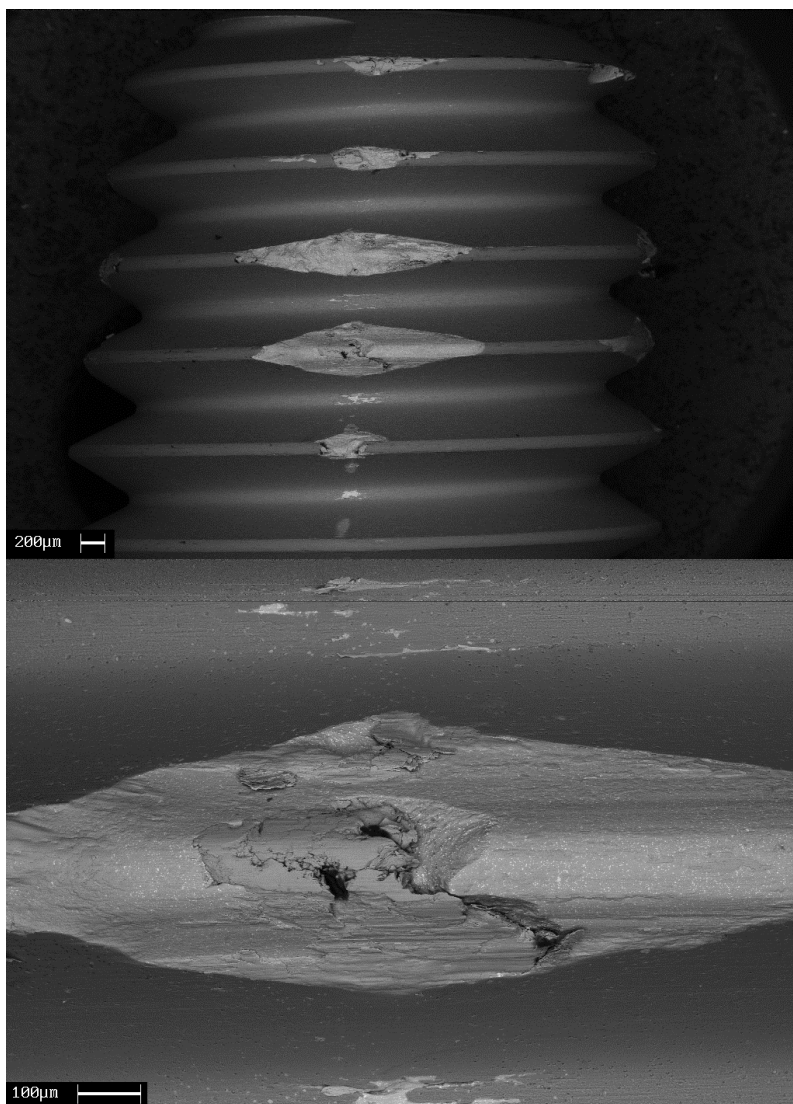


Fig. 5.132. Campione G4_L2-3. Macrografia e ingrandimento sul 4° filetto. Evidente come lo spazio generatosi in seguito ad una frattura del materiale sia stato riempito da materiale di riporto.

Ciò può essere imputabile allo sviluppo di un meccanismo competitivo tra l'azione dell'additivo EP e di quello untuosante. Come ampiamente descritto nel capitolo relativo alla lubrificazione entrambe le tipologie di additivo per poter svolgere il proprio compito necessitano, infatti, di venir adsorbite sulla superficie del materiale.

Se la permanenza dell'additivo untuosante sulla superficie dell'utensile si protrae anche dopo che il rivestimento viene asportato ed affiora l'acciaio rapido la sua presenza limita la capacità di adsorbimento superficiale dell'additivo EP portando allo sviluppo di un sistema tribologico peggiore.

Si ha, quindi, lo sviluppo di fenomeni di usura che conducono più rapidamente l'utensile fuori dal range di tolleranza previsto.

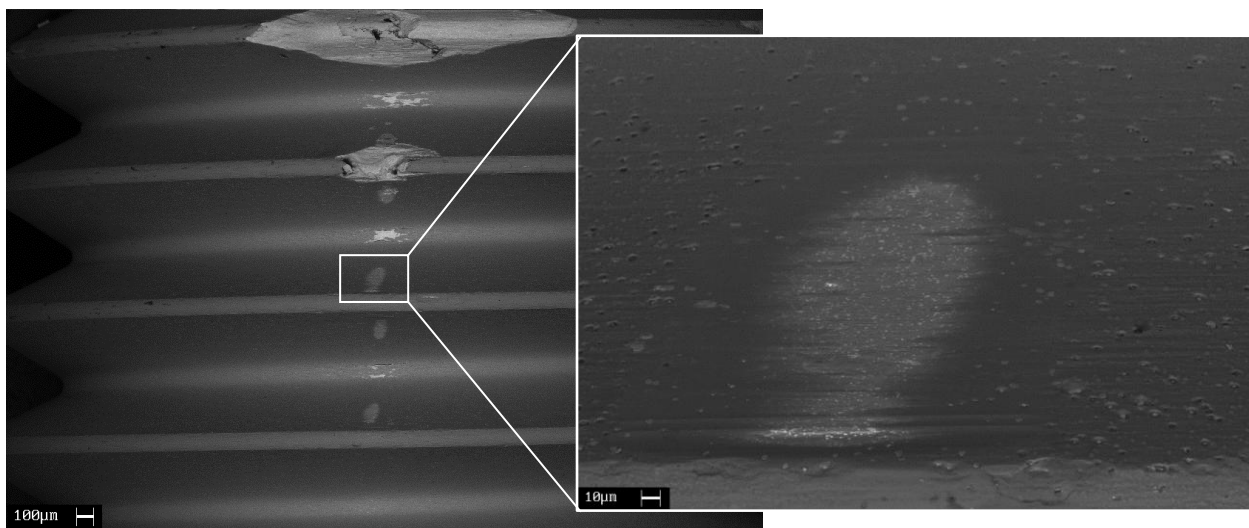
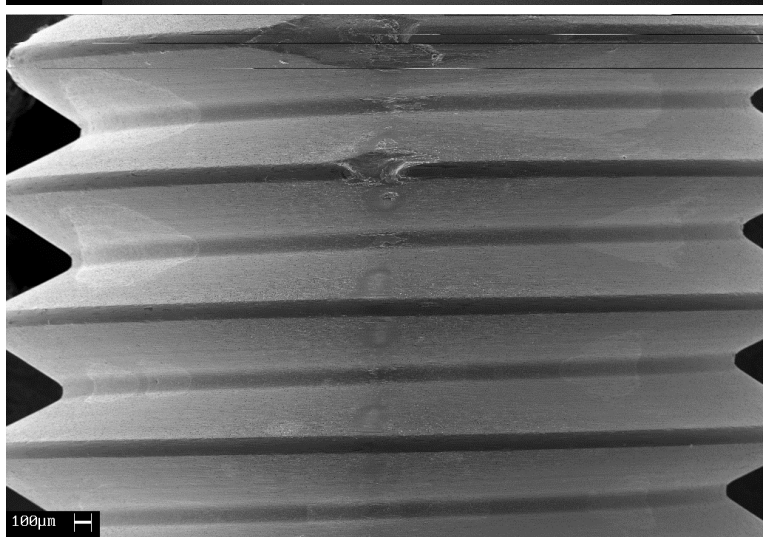


Fig. 5.133: Analisi dei fenomeni di lucidatura sui lobi "ossidati".

Dall'osservazione condotta al SEM sia usando gli elettroni retrodiffusi (in alto) che quelli secondari (in basso) è evidente come l'alone, che si forma sugli ultimi lobi di calibratura affetti da fenomeni di usura, sia generato principalmente da un meccanismo di lucidatura e abrasione il quale fa emergere in successione i vari strati del rivestimento e lascia intravedere l'acciaio rapido sottostante.

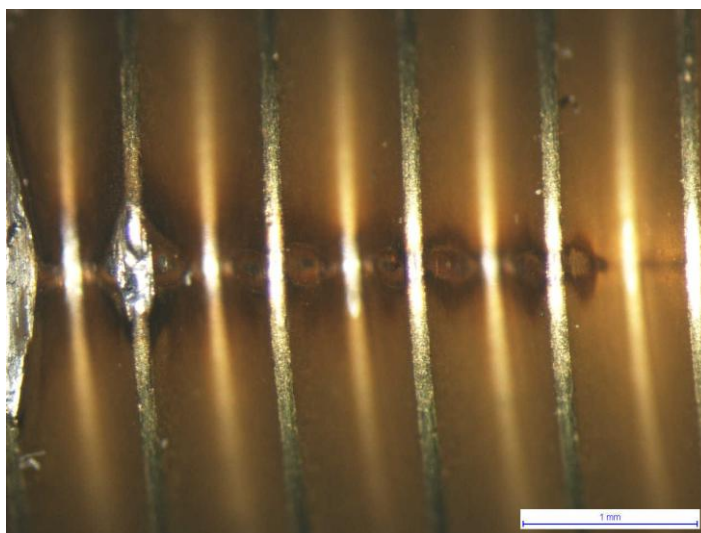


L'immagine ottenuta con gli elettroni secondari fornisce inoltre una mappatura delle zone in cui effettivamente si ha il contatto tra superficie dell'utensile con la filettatura in formazione. Le aree chiare presenti a fondo filetto nelle facce dei filetti di imbocco sono regioni in cui il rivestimento superficiale è intatto e non ha subito alcuna modifica rispetto alle condizioni al nuovo.

Gli strati ossidati che sono riconoscibili da una modificata colorazione del rivestimento risultano, invece, troppo sottili per poter essere provati e analizzati tramite tecniche di tipo EDS.

Fig. 5.134: Immagine ottenuta allo stereoscopio dei filetti dal 5° al 9° del campione G4 a fine vita.

Evidente la propagazione dei fenomeni di lucidatura e ossidazione del rivestimento sottile.



CAMPIONE G6 (≈ 133000 pezzi prodotti)

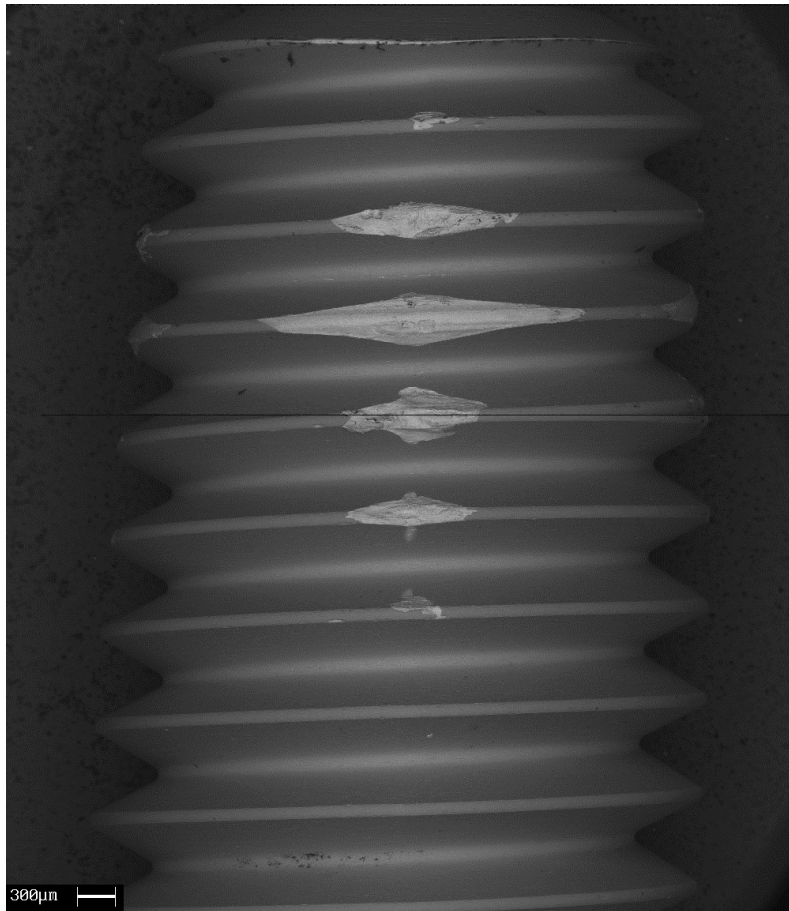


Fig. 5.135: Campione G6_L1-2. Macrografia della superficie di usura.

Solo l'analisi EDS effettuata in corrispondenza di residui carboniosi ha permesso l'individuazione di tali composti.

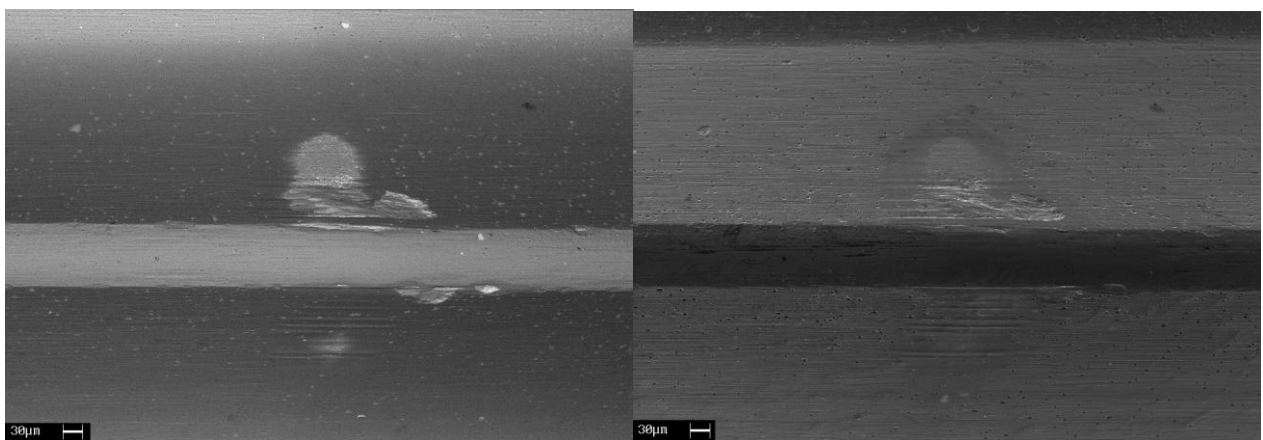


Fig. 5.136: Campione G13_L4-1 (≈ 185000 pezzi prodotti). Particolare del lobo lucidato ottenuto con elettroni secondari (a sx) e retrodiffusi (a dx).

L'osservazione di tale campione ha portato a confermare le considerazioni effettuate precedentemente sui meccanismi di usura implicati.

Come nell'analisi del gruppo F, anche per i campioni del gruppo G osservati, le tecniche di preparazione ed osservazione dei provini non si sono rivelate adeguate al riconoscimento dello specifico meccanismo di azione del lubrificante.

Analisi EDS della superficie di frattura non hanno evidenziato alcuna presenza di elementi attivi quali S e Cl o di composti di reazione di questi con l'acciaio.

5.11 Influenza sulla modalità di propagazione dell'usura sul lobo critico per le diverse formulazioni di lubrificante sperimentate

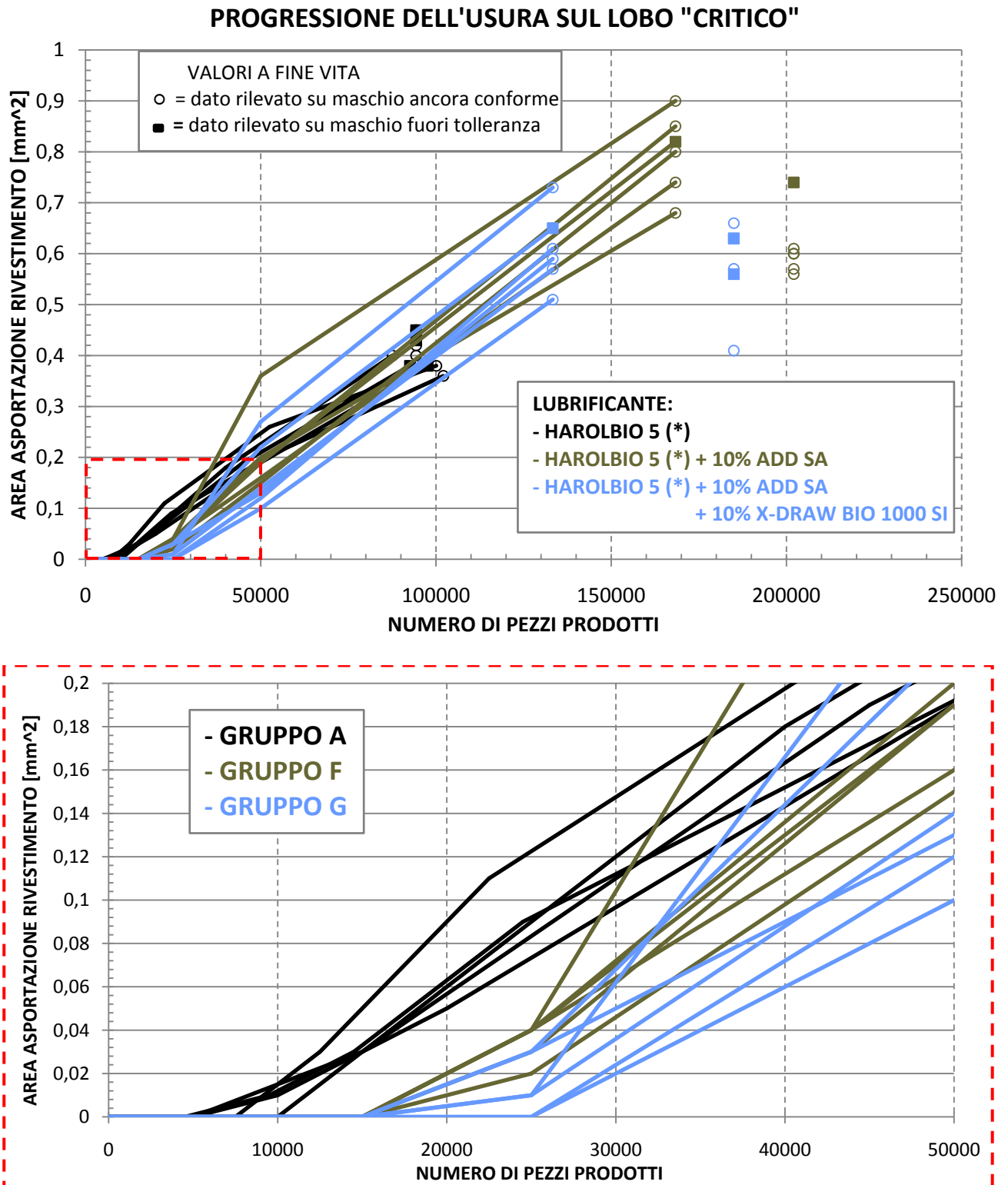


Fig. 5.137: Confronto tra la progressione dell'usura sul lobo critico all'aumentare del numero di pezzi prodotti sui maschi Emuge Drück al variare della composizione dell'olio. Il grafico in basso rappresenta l'andamento dell'usura in corrispondenza delle fasi iniziali.

Allo stesso modo in cui si è confrontato il comportamento ad usura dei diversi tipi di utensili sperimentati si è osservata l'influenza che l'additivazione con sostanze ad azione EP ed untuosante hanno avuto sulla progressione dell'usura in corrispondenza del lobo critico.

Al fine di ridurre al minimo le variabili del sistema si è usata, nel corso di questa sperimentazione, un'unica tipologia di utensili, gli Emuge Drück, usati come standard nel processo produttivo.

Ciò ha permesso di valutare l'influenza data dai soli additivi sul comportamento del sistema.

L'aggiunta del solo additivo EP ha generato i seguenti effetti sul sistema (gruppo F):

- aumento della durata del rivestimento sulla superficie dei lobi rispetto a quanto verificato in presenza del lubrificante originario, ritardandone l'abrasione e la perdita di continuità.
- pendenza delle rette nel secondo stadio comparabile con quella manifestata dal gruppo A.
- valore di A [mm^2] a fine vita notevolmente superiori rispetto a quanto manifestato in assenza di additivo a causa del mutato meccanismo di usura avutosi (come descritto nel capitolo relativo).

Si può ipotizzare che con la prevalenza di fenomeni di usura abrasiva i maschi giungano a fine vita per valori di A [mm^2] compresi in un intorno del valore $A = 0,75 \text{ mm}^2$.

La mancanza del numero sufficiente di dati non ha permesso, tuttavia, un'adeguata analisi statistica a sostegno di tale affermazione.

L'aggiunta del additivo untuosante al lubrificante, come visto, ha comportato un certo grado di inibizione dell'azione dell'additivo EP con conseguente diminuzione di durata degli utensili ed un certo ritorno a meccanismi di usura adesiva.

L'effetto è evidente sull'andamento dell'usura del lobo critico che si mantiene ad una velocità pressoché simile al caso precedente, ma conduce i maschi fuori tolleranza a valori di A [mm^2] mediamente inferiori.

In questo caso si può ipotizzare che i maschi giungano a fine vita per valori di A [mm^2] compresi approssimativamente in un intorno del valore $A = 0,62 \text{ mm}^2$

Unico effetto benefico sul comportamento ad usura dei maschi a rullare Emuge Drück derivante dall'aggiunta al lubrificante dell'additivo untuosante ad alta viscosità è l'ulteriore ritardo nella comparsa dell'acciaio HSS-E in corrispondenza dei lobi.

Questo risultato può essere visto positivamente nell'ottica di ottenere preziose informazioni su cui basare una successiva formulazione ad hoc del lubrificante per il processo di maschiatura a rullare sempre in collaborazione con la Bellini s.r.l. .

5.12 GRUPPO H

Come ultima sperimentazione si sono analizzati i benefici indotti dalla combinazione dell'additivazione spinta del lubrificante e dell'uso dei maschi a rullare EMUGE InnoForm-Z, cioè di quella tipologia di utensili che ha manifestato le maggiori prestazioni in presenza del lubrificante HAROLBIO 5 (*).

È logico aspettarsi un'azione sinergica tale per cui i benefici indotti dalla presenza dei canalini, del rivestimento multistrato e della geometria ottimizzata nell'utensile si sovrappongano a quelli derivanti dall'utilizzo di un fluido lubrificante fortemente additivato, sviluppato specificatamente per il processo di filettatura per deformazione.

Per richiamare la nomenclatura dei gruppi finora utilizzata, la sperimentazione del gruppo H consiste nello studio del comportamento ad usura degli utensili sperimentati nel gruppo B in presenza del lubrificante usato nell'analisi del gruppo G.

5.12.1 Analisi della durata

La durata osservata da questa combinazione di parametri ha confermato pienamente le aspettative.

GRUPPO	UTENSILI NON CONFORMI	N° CONTATORE	N° PEZZI PRODOTTI
H	H4	744000	248000
H(1)	H7, H8, H12	1155999	385333
MEDIA	-	950000	316667

Tabella XLVIII: Numero di pezzi prodotti a fine vita dagli utensili del gruppo H.

Si è ottenuto un incremento della durata degli utensili maggiore del 270% rispetto alle condizioni standard con un numero medio di pezzi conformi prodotti da un singolo maschio quasi quadruplicato rispetto alle condizioni iniziali.

L'uso dell'olio fortemente additivato ha permesso un incremento della durata degli utensili Emuge InnoForm-Z di circa il 180% confermando come la nuova formulazione del lubrificante rallenti notevolmente l'usura degli utensili a parità di condizioni di lavoro.

5.12.2 Profilo di asportazione del rivestimento e di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi

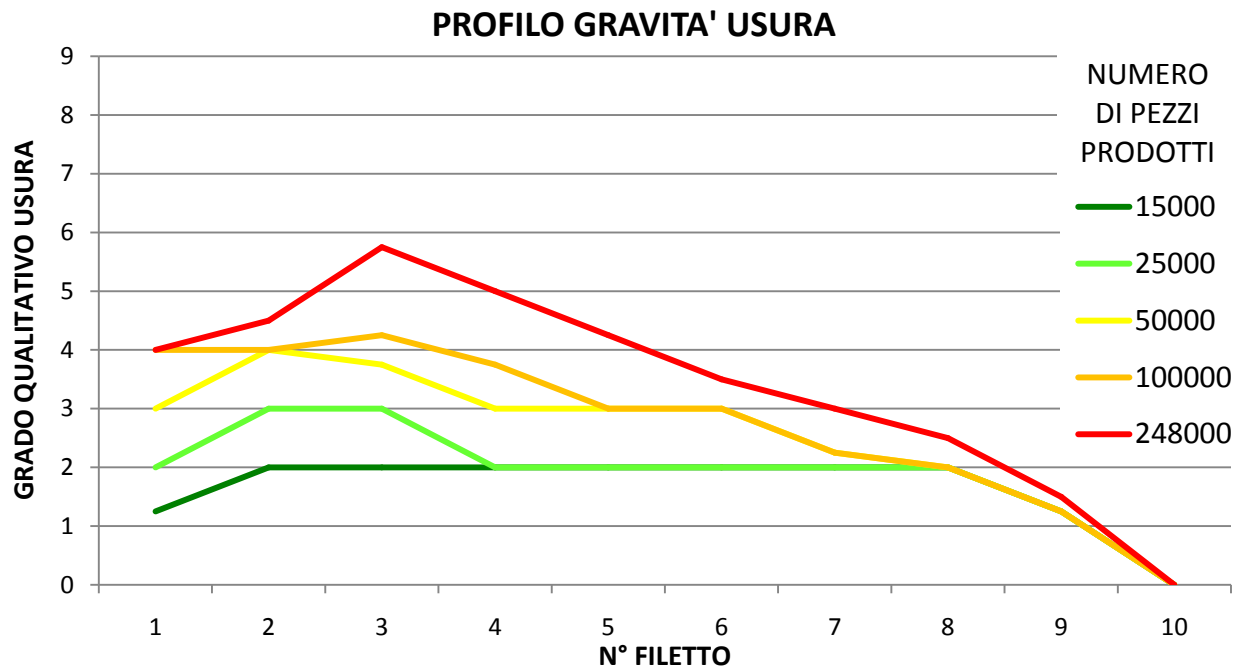


Fig. 5.138: Evoluzione dei fenomeni di usura sui filetti dell'utensile H4 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

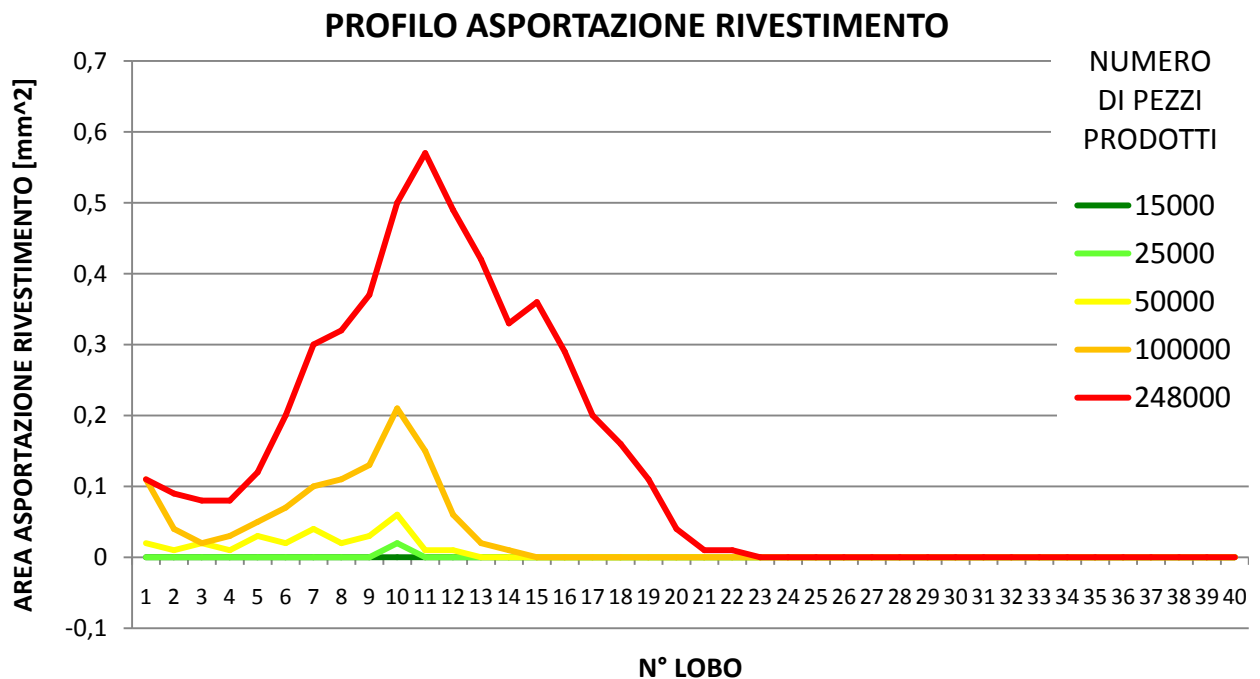


Fig. 5.139: Evoluzione dell'asportazione del rivestimento sui lobi dell'utensile H4 all'aumentare del numero di pezzi prodotti.

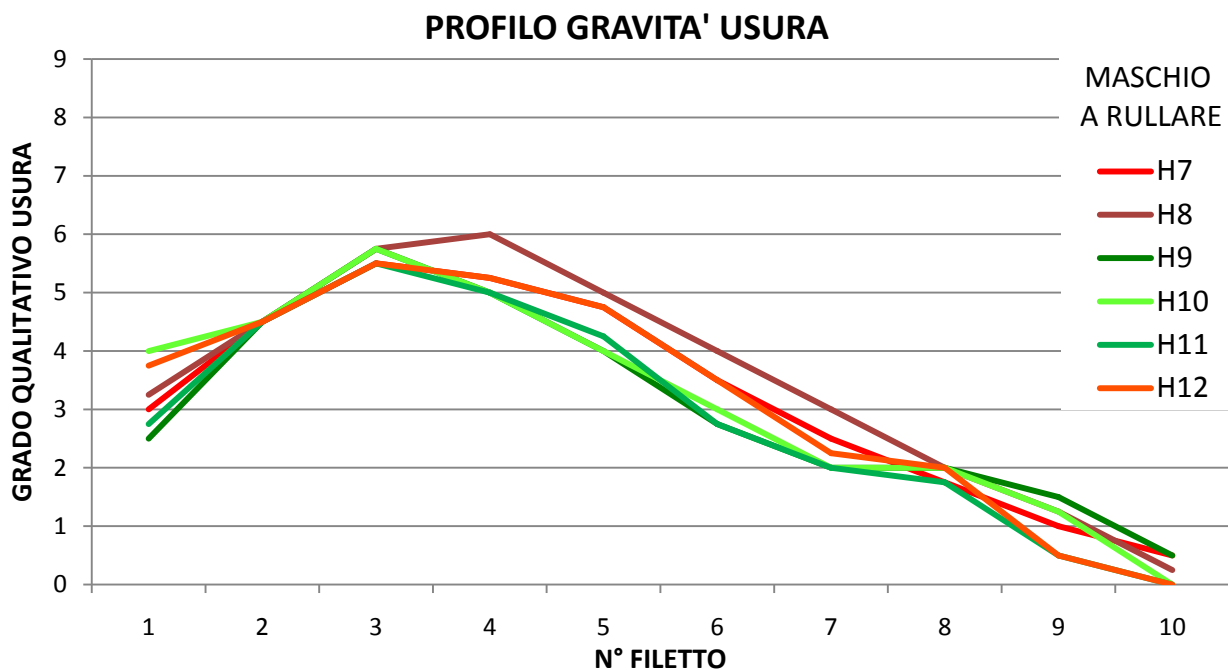


Fig. 5.140: Confronto tra i profili di gravità usura dei maschi del gruppo H(1) al momento della sostituzione (385333 pezzi prodotti).

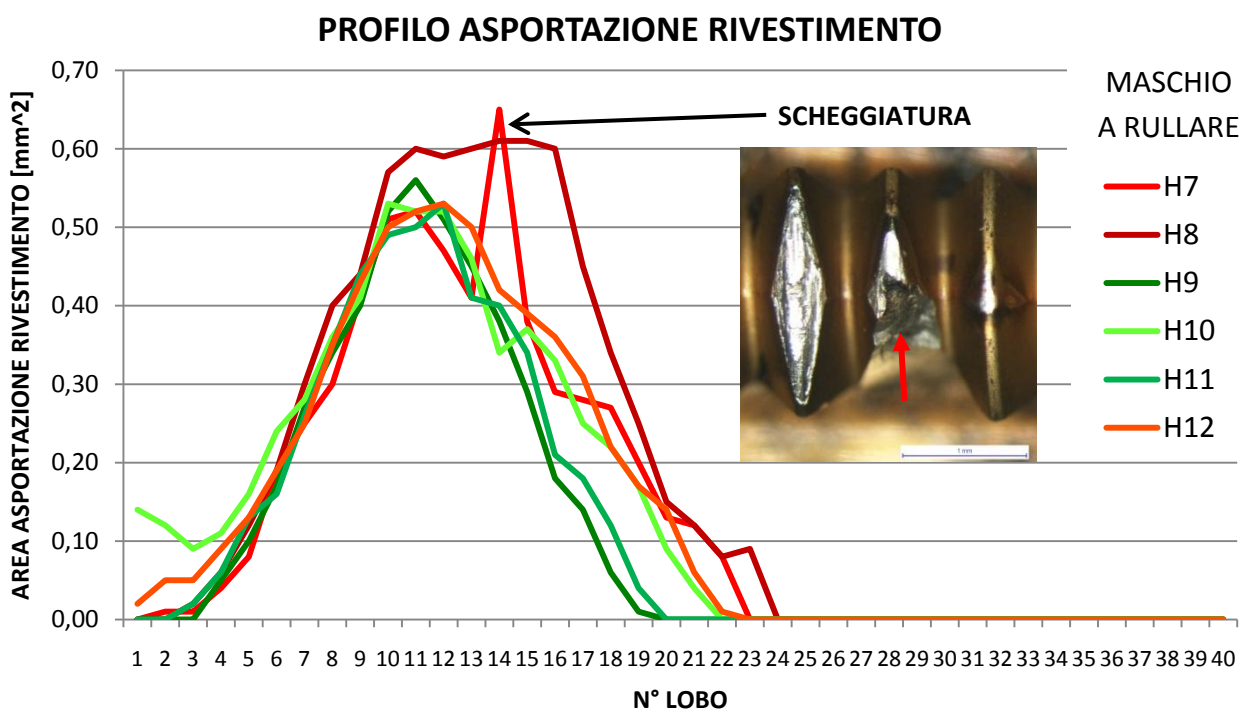


Fig. 5.141: Confronto tra i profili di asportazione del rivestimento nei maschi del gruppo H(1) al momento della sostituzione (358333 pezzi prodotti).
L'andamento particolare del campione H7 è dovuto alla presenza di una frattura di notevole entità (vedi riquadro) avvenuta sul 14° lobo dell'utensile.

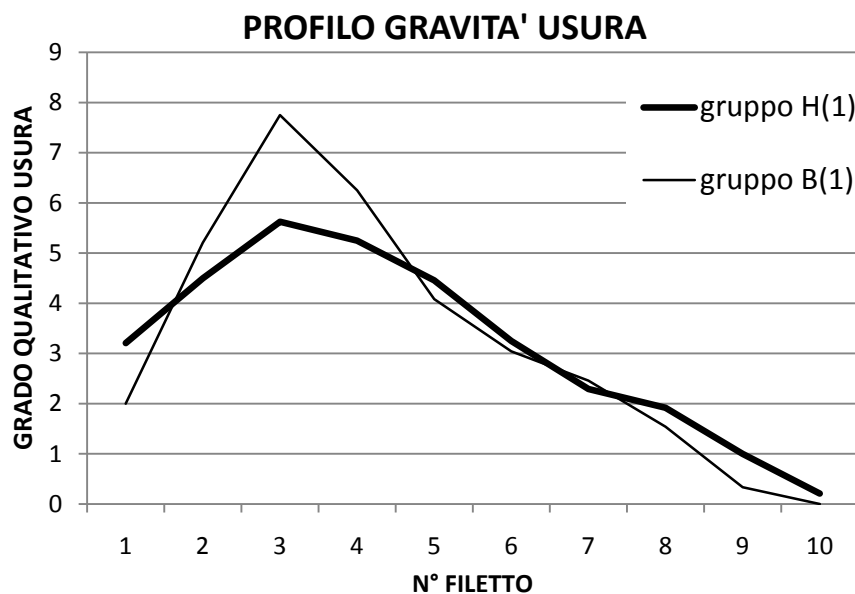


Fig. 5.142: Confronto tra il profilo medio di gravità dei fenomeni tribo-ossidativi a fine vita degli utensili appartenenti al gruppo H(1) (385333 pezzi prodotti) con quelli del gruppo B(1) (99000 pezzi prodotti). Analogamente a quanto osservato per i maschi Emuge Drück anche per i maschi Emuge InnoForm la nuova formulazione del lubrificante diminuisce la gravità dei fenomeni tribo-ossidativi in corrispondenza dei filetti maggiormente sollecitati.

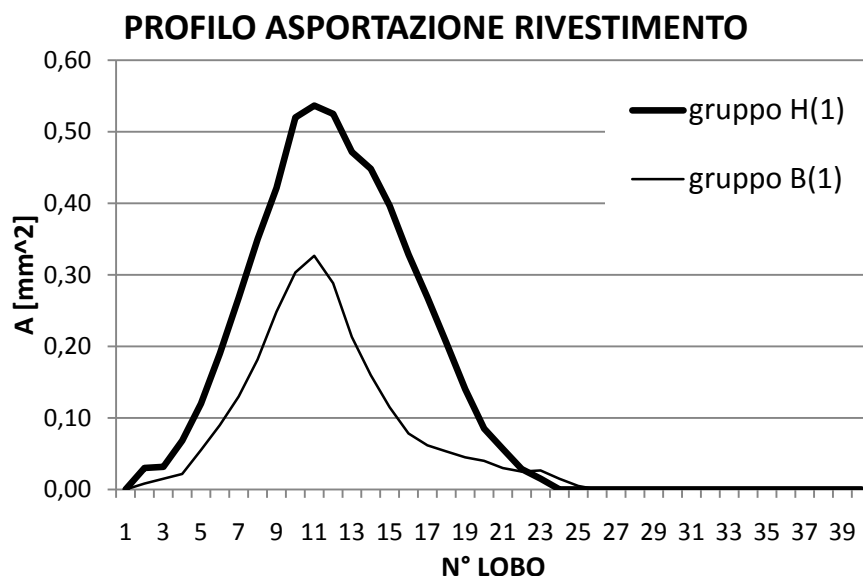


Fig. 5.143: Confronto tra il profilo di asportazione medio a fine vita degli utensili appartenenti al gruppo H(1) con quelli del gruppo B(1). I maschi del gruppo H a fine vita manifestano un'asportazione del rivestimento sul lobo critico e sui lobi adiacenti molto maggiore di quella misurata su utensili di pari caratteristiche prima dell'additivazione spinta del lubrificante.

L'osservazione dei grafici ricavati nello studio dei meccanismi di usura degli utensili del gruppo H conferma quanto già osservato nei gruppi F e G.

L'additivazione del lubrificante con sostanze ad effetto EP ed effetto untuosante ha modificato profondamente le modalità con cui gli utensili fuoriescono dal proprio campo di tolleranza.

Il fatto che gli utensili producano pezzi conformi anche in presenza di aree usurate di maggiore estensione rispetto a quanto riscontrato con il lubrificante originale, può essere spiegato, ancora una volta, mediante il passaggio da un meccanismo di usura prevalentemente adesiva (con fatica superficiale e scheggiature) ad uno di usura prevalentemente abrasiva che a parità di area asportata di rivestimento risulta avere una minore riduzione del diametro di lavoro dell'utensile.

Ciò permette di modificare in maniera più limitata la geometria della superficie attiva del maschio che, quindi, riesce ad imprimere la forma del filetto su un numero maggiore di utensili nonostante la maggiore estensione superficiale del danneggiamento.

Tale ipotesi verrà confermata dalle osservazioni delle superfici di usura al microscopio elettronico.

Si osserva, inoltre, come pure la gravità dei fenomeni ossidativi risulti notevolmente ridotta.

Il meccanismo iniziale di asportazione del rivestimento avviene molto meno a causa di fenomeni di inflessione e rigatura e molto più con un meccanismo simile alla lucidatura.

Negli stadi finali della propria vita, gli utensili non presentano i tipici aloni ossidati di colore scuro, ma unicamente delle regioni lucidate, leggermente brunite, in cui la diversa colorazione è in parte frutto della comparsa progressiva sulla superficie dei vari strati che compongono il rivestimento sottile multilayer.

Lo studio della propagazione dell'usura all'aumentare del numero di pezzi prodotti porta alla realizzazione dei grafici riportati nella pagina seguente, nei quali viene confrontato l'andamento dell'usura in corrispondenza del lobo critico per gli utensili InnoForm Z prima e dopo l'additivazione del lubrificante (rispettivamente gruppo B e gruppo H).

Ciò ha permesso di analizzare gli effetti benefici indotti dalla mutata composizione dell'olio a parità di tutte le altre variabili del sistema.

Oltre ad aumentare il valore di A [mm^2] misurato sul lobo critico a fine vita e a diminuirne corrispondentemente i fenomeni ossidativi, il nuovo lubrificante ha dimostrato di essere in grado di ostacolare notevolmente l'abrasione iniziale del rivestimento sottile permettendogli di permanere integro per un numero maggiore di pezzi, posticipando, per tanto, l'inizio dei vari meccanismi di danneggiamento.

Questo effetto può essere attribuito sostanzialmente alla notevole capacità aggraffante conferita all'olio dall'additivo untuosante.

Il secondo effetto ottenuto è, invece, un'ulteriore riduzione della pendenza delle rette nel secondo stadio dovuta all'intervento di meccanismi di usura meno rapidi permesso grazie alle mutate condizioni tribologiche.

Questo fenomeno, come visto, è legato all'azione protettiva generata dagli additivi EP sull'acciaio rapido quando questo viene esposto sulla superficie dell'utensile.

PROGRESSIONE DELL'USURA SUL LOBO "CRITICO"

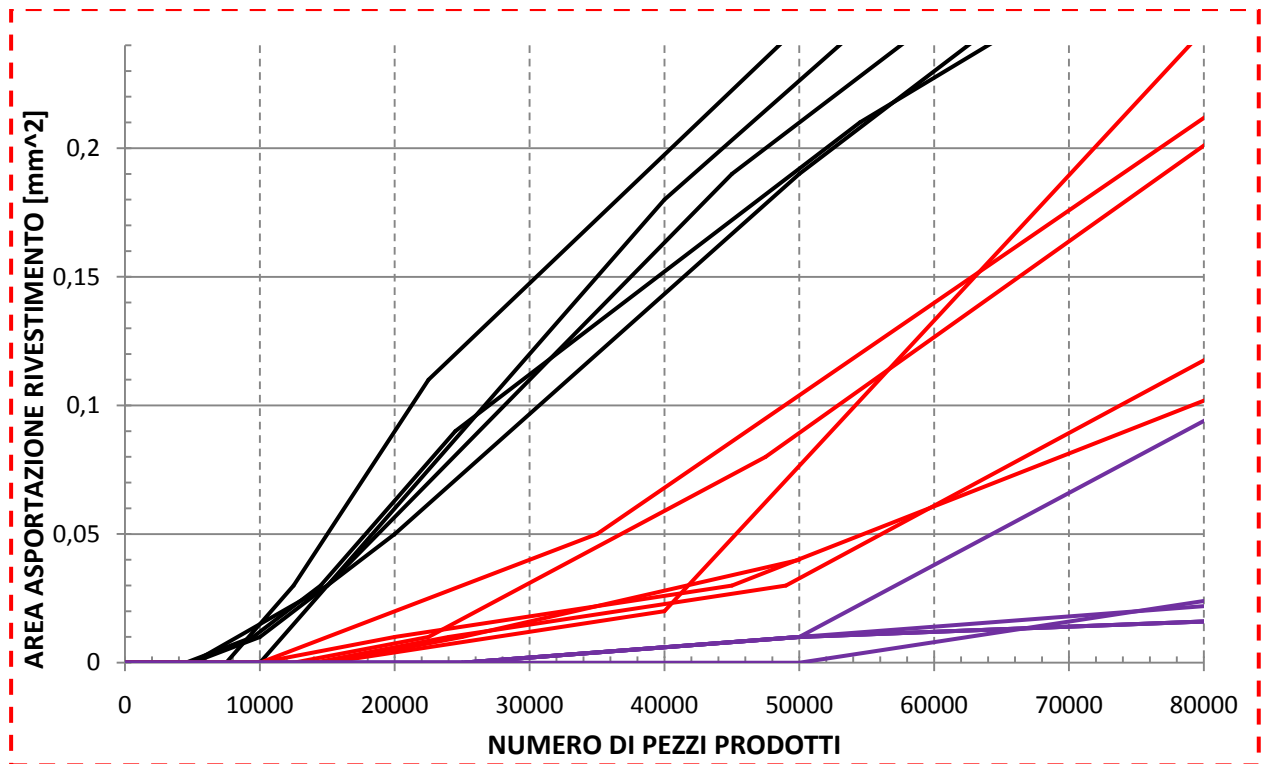
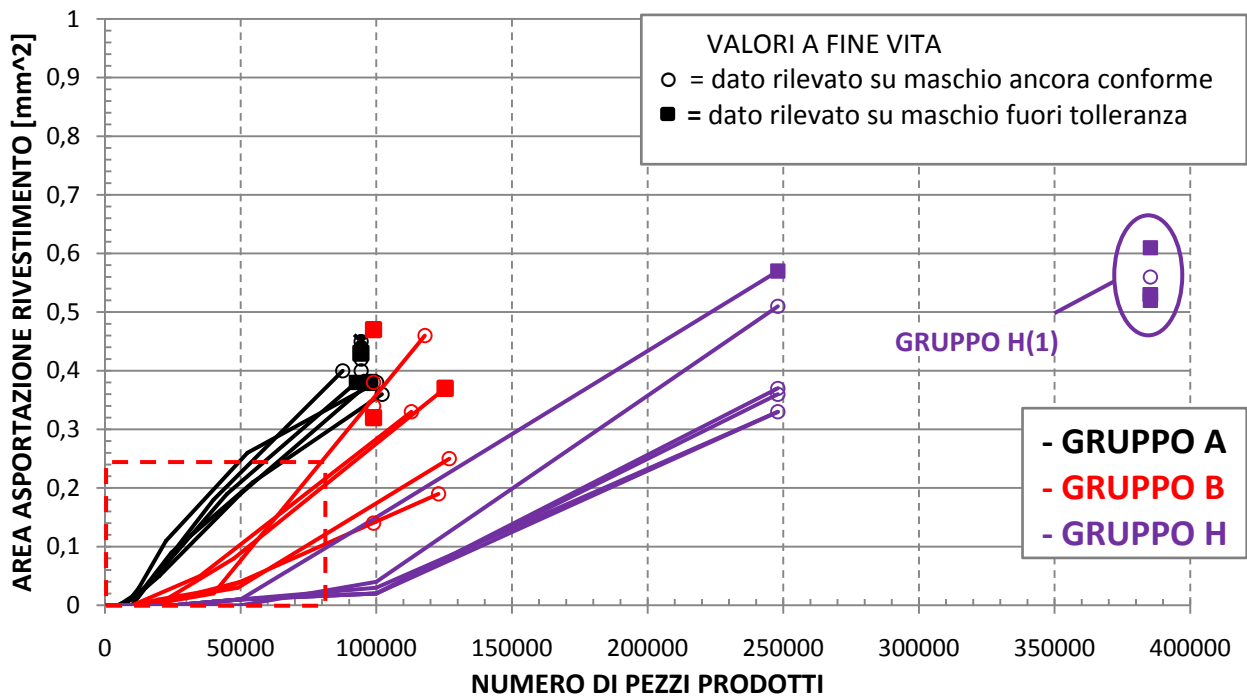
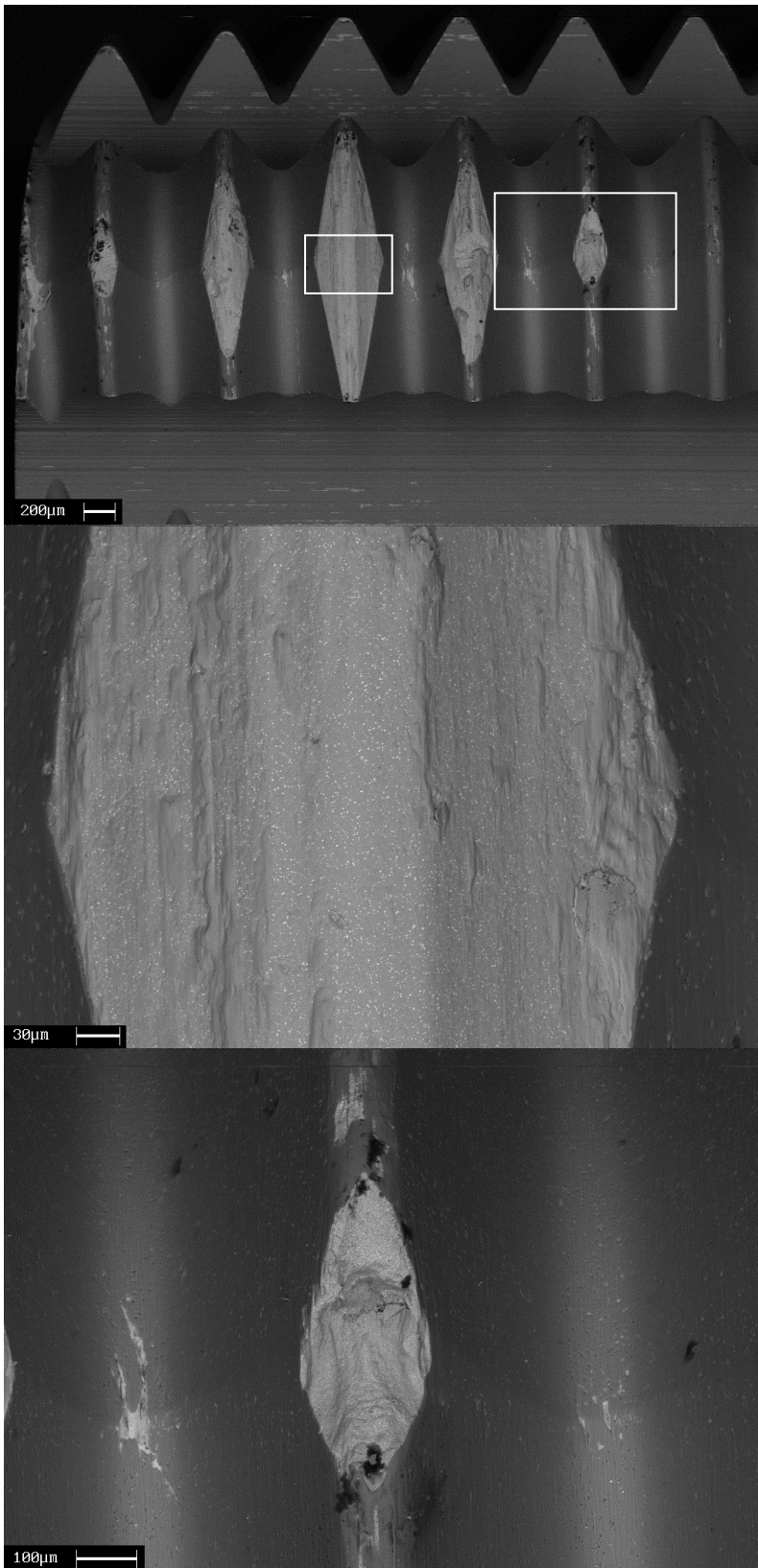


Fig. 5.144: Confronto tra la progressione dell'usura sul lobo critico all'aumentare del numero di pezzi prodotti per gli utensili del gruppo H con il comportamento manifestato dal gruppo B ed A. Il grafico in basso rappresenta l'andamento dell'usura in corrispondenza delle fasi iniziali.

5.12.3 Descrizione dei meccanismi di usura

CAMPIONE H3 (250000 pezzi prodotti)



L'osservazione della superficie di usura dei maschi a rullare del gruppo H e il confronto con i fenomeni riscontrati nei maschi Emuge InnoForm prima della variazione nella composizione del lubrificante, porta a confermare quanto già osservato, in maniera analoga, nel confronto tra i meccanismi di usura degli utensili del gruppo A con quelli del gruppo F e G.

Anche in questo caso, l'additivazione del lubrificante con additivi di prestazione di tipo EP ed untuosante ha portato ad una evidente variazione dei meccanismi di usura, riducendo i fenomeni di adesione e microframmentazione e lasciando il posto principalmente ad un meccanismo di tipo abrasivo.

Fig. 5.145: Campione H3_L4-1. Macrografia della superficie e ingrandimenti sul lobo del 3° e 5° filetto.

È evidente come la superficie del lobo critico risulti in questo caso totalmente priva di fratture o scheggiature e sia ricoperta in minima parte da materiale adeso.

Fenomeni di microframmentazione si ritrovano, invece, se pur di modesta entità, su alcuni lobi dei filetti di calibrazione.

Altra differenza sostanziale nel confronto con la superficie di usura nei maschi del gruppo B è il notevole incremento dell'area di asportazione del rivestimento manifestata a fine vita dai maschi del gruppo H in corrispondenza del lobo critico e dei lobi adiacenti.

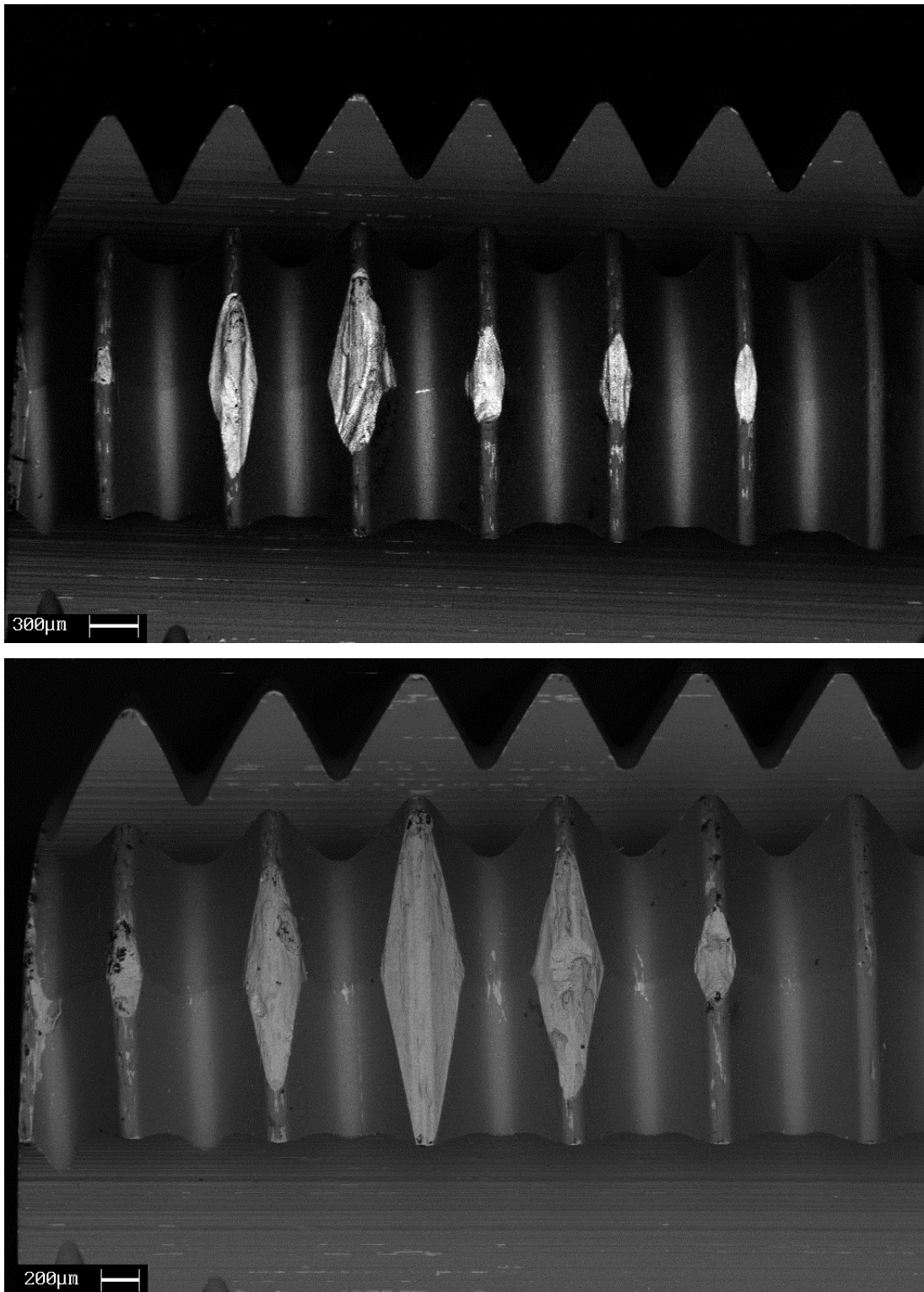


Fig. 5.146: Differenza delle superfici di usura manifestate a fine vita dai maschi Emuge InnoForm prima (in alto) e dopo l'additivazione del lubrificante (Campioni B8 ed H3).

Il prevalere di meccanismi di usura di tipo abrasivo su quelli di tipo adesivo e per fatica superficiale è evidente se si vanno ad osservare le superfici di usura degli utensili. In seguito all'additivazione sono pressoché scomparse le tipiche strutture lamellari in C45 osservate nei test condotti con il lubrificante originale e si sono estremamente ridotti anche tutti quei fenomeni di scheggiatura e frattura delle superfici. Tutto ciò ha lasciato il posto a superfici che presentano le classiche striature e rigature lungo la direzione di strisciamento generate da fenomeni abrasivi.

L'asportazione del rivestimento in corrispondenza del lobo critico negli utensili del gruppo H è talmente estesa da giungere, in alcuni casi, in corrispondenza della discontinuità geometrica realizzata dalla presenza del canalino di lubrificazione.

L'osservazione degli spigoli dei canalini di lubrificazione nei maschi a fine vita e la presenza minima (quando non del tutto assente) di labbri di usura, di frammentazioni e di taglienti di riporto porta ad escludere, ancora una volta, che tali spigoli fungano da taglienti nel corso della lavorazione.

Si può, affermare con certezza che la presenza dei canalini di lubrificazione non modifica in alcun modo il meccanismo di formazione del filetto che rimane esclusivamente di tipo deformativo.

Analogamente a quanto osservato negli utensili dei gruppi F e G, anche negli utensili del gruppo H, il livello di usura dei lobi è, in alcuni casi, tale da permettere il contatto del filetto in formazione con il fondo del filetto dell'utensile che ne risulta danneggiato.

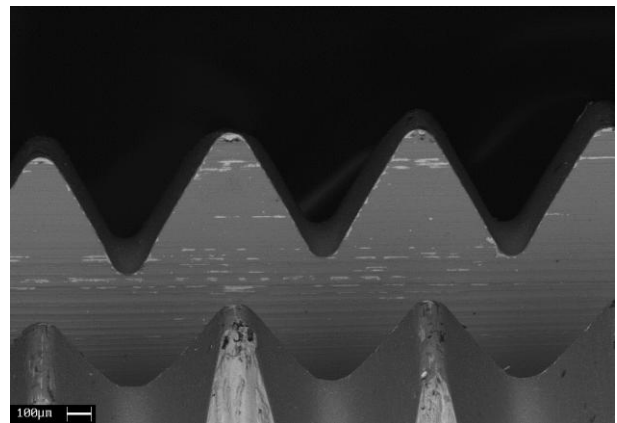


Fig. 5.147: Particolare degli spigoli generati dai canalini di lubrificazione sulla superficie dell'utensile. È evidente come i fenomeni di usura manifestati siano estremamente ridotti.

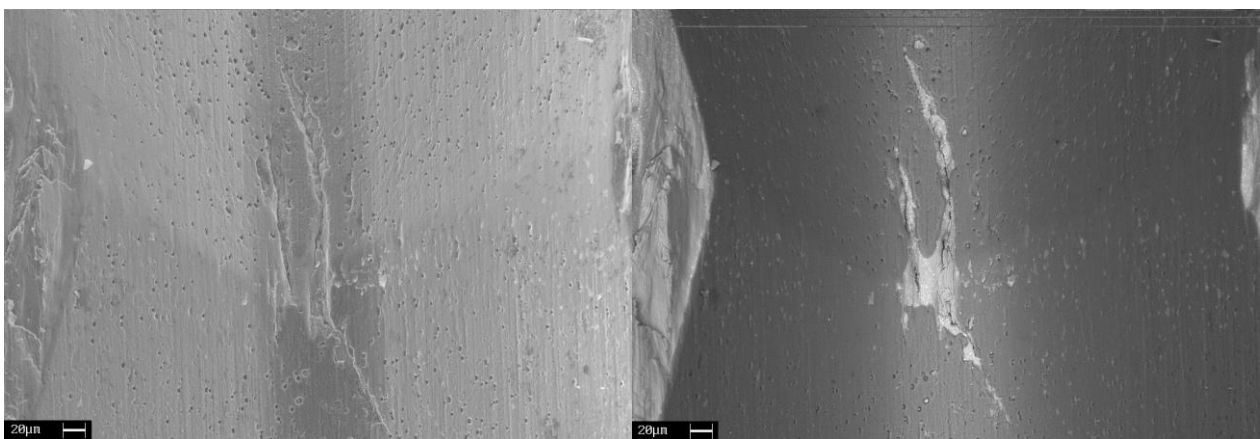


Fig. 5.148: Campione H3_LA-1. Particolare dell'usura a fondo filetto tra 4° e 5° filetto ottenuto con elettroni secondari (a sx) e retrodiffusi (a dx).

CAMPIONE H4 (250000 pezzi prodotti)

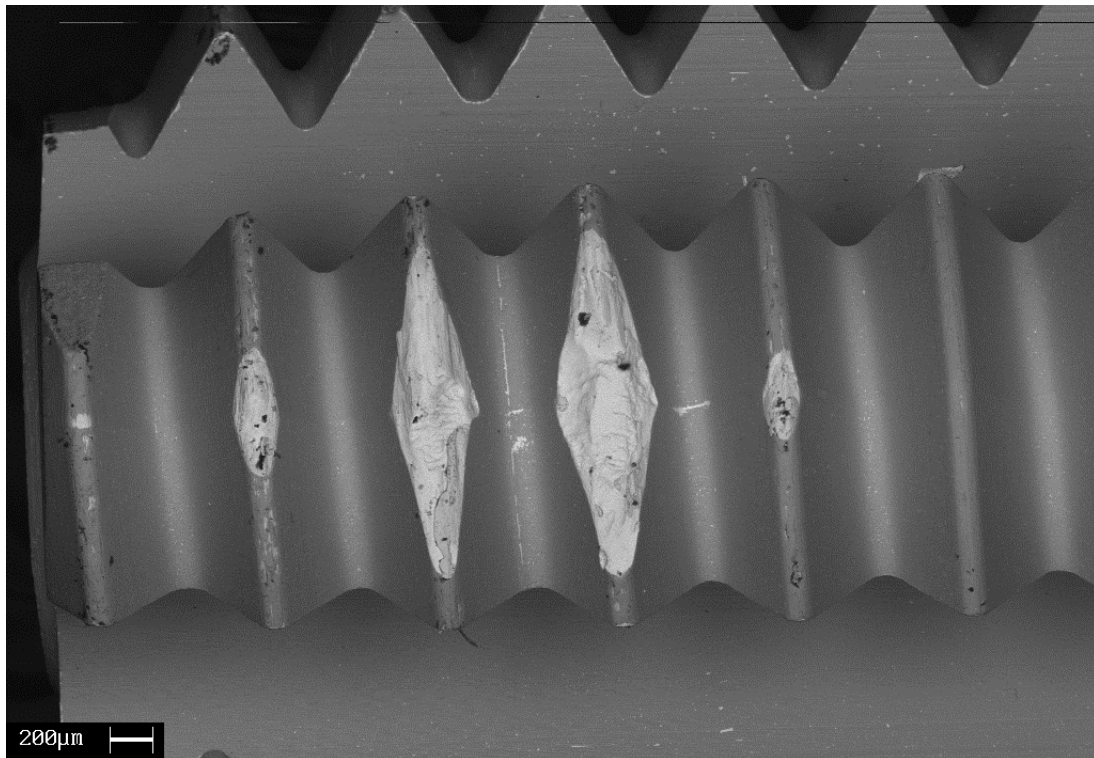


Fig. 5.149: Campione H4_L2-3. Macrografia della superficie di usura. La superficie dei lobi mostra ridotti fenomeni di adesione (solo alcune lamelle adese) e assenza di fratture di grandi dimensioni. La superficie è danneggiata principalmente a causa di fenomeni di abrasione e microframmentazione.

CAMPIONE H9 (385000 pezzi prodotti)

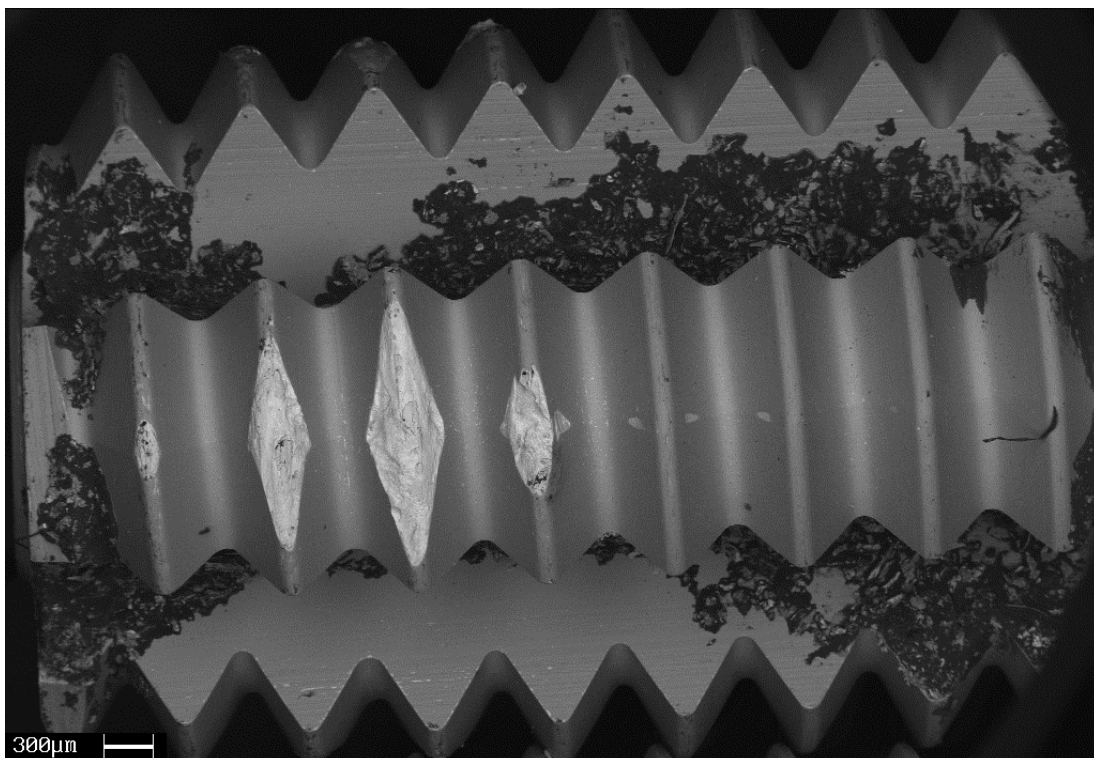


Fig. 5.150: Campione H9_L1-2. Macrografia della superficie di usura.



Fig. 5.151: Particolare del residuo morchioso sviluppato dal lubrificante sui maschi del gruppo H(1).

Nel secondo gruppo di 6 utensili testati con i parametri del gruppo H (è il gruppo di utensili che ha manifestato la massima durata) questi, pur manifestando fenomeni di usura del tutto simili agli altri del gruppo H a fine vita, sono stati ricoperti da una morchia carboniosa formata da vari prodotti di decomposizione del lubrificante e da particelle di C45 in essa intrappolate.

Tale residuo è il risultato della decomposizione termica dell'olio e della reazione degli elementi attivi degli additivi con la superficie metallica.

Tali prodotti si sono accumulati nelle zone in cui non si ha strisciamento dell'utensile con la superficie del preforo e, col passare del tempo, sono aumentati di spessore ed hanno inglobato particelle metalliche sospese nel lubrificante.

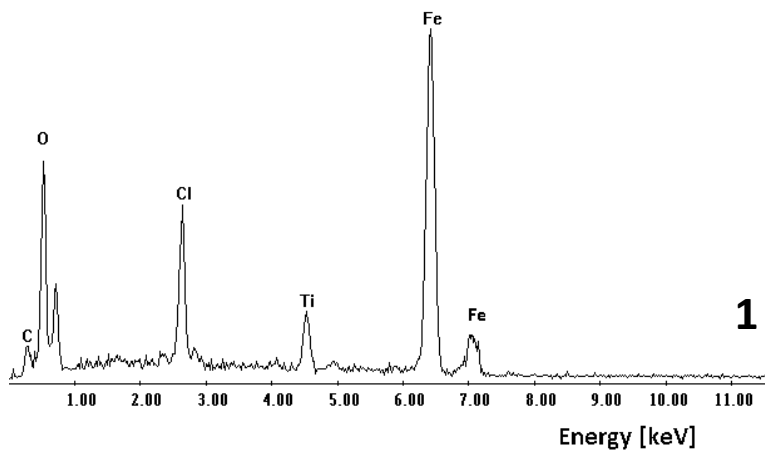
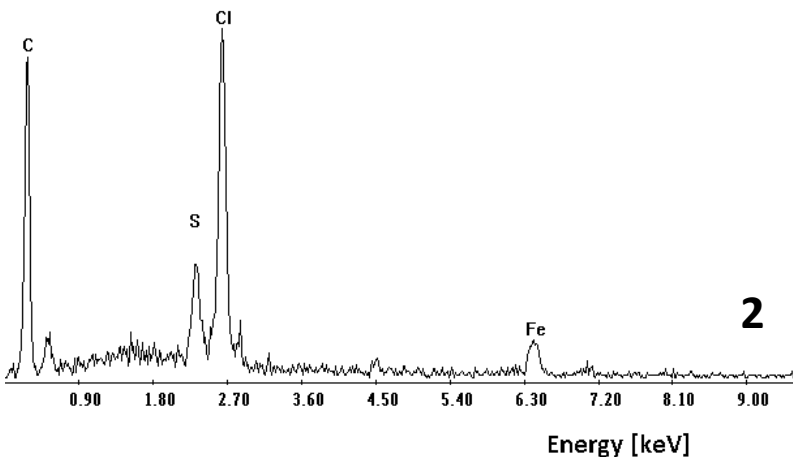


Fig. 5.152: Spettri EDS ottenuti in corrispondenza del residuo morchioso sviluppato dal lubrificante.



Considerazioni ed indicazioni conclusive

Le soluzioni alternative sviluppate nel corso della sperimentazione sulla base dello studio del danneggiamento tribologico dei maschi a rullare e della progressione dell'usura stessa all'aumentare del numero di pezzi prodotti, hanno permesso di individuare quali condizioni del sistema comportassero un miglioramento significativo delle prestazioni e quali no.

L'insieme dei risultati ottenuti in termini di durata del singolo utensile, al variare delle caratteristiche del sistema tribologico, sono riportate nel grafico seguente:

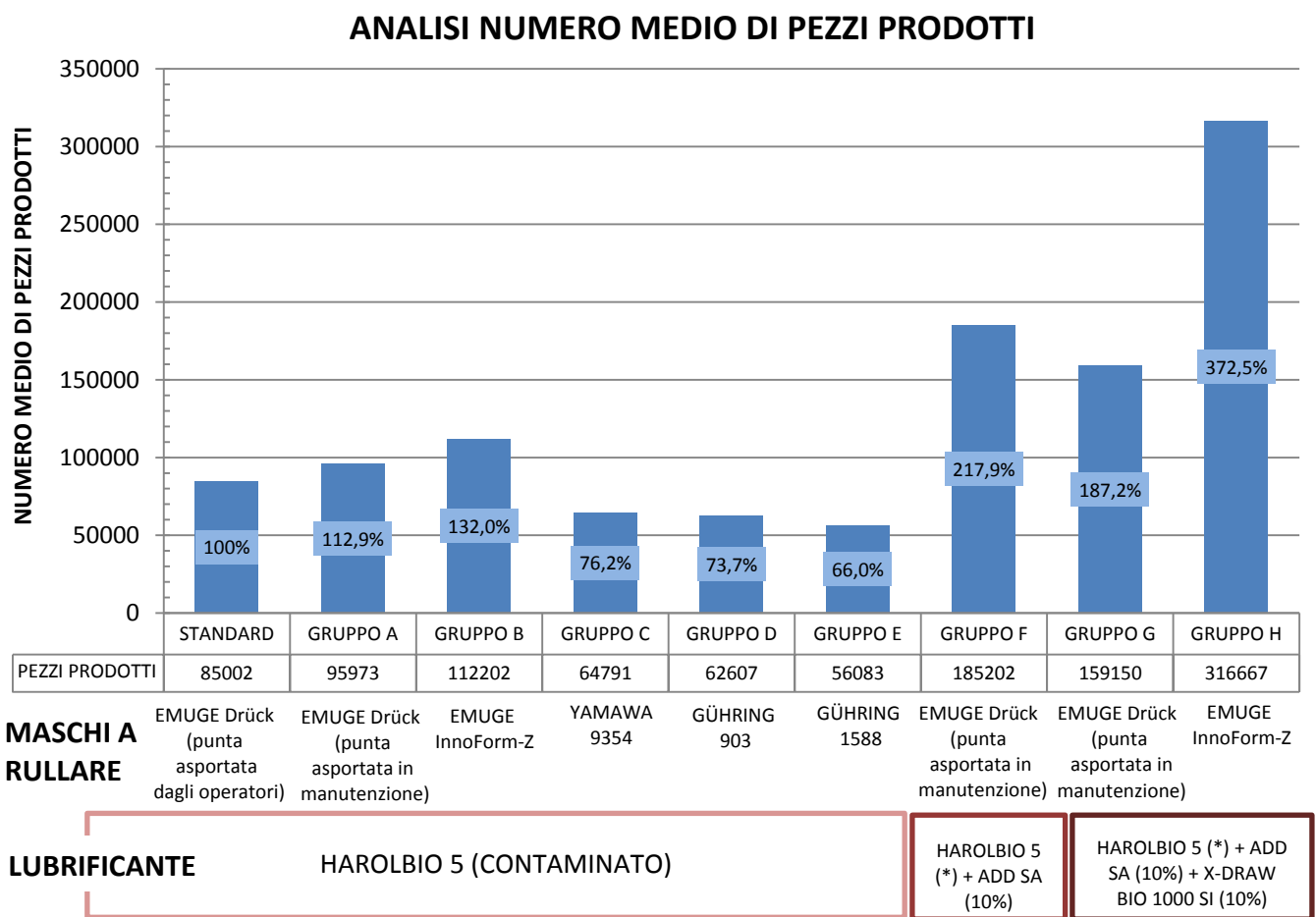


Fig. i: Numero medio di pezzi prodotti da ogni singolo utensile nelle diverse combinazioni di parametri sperimentate. Le percentuali espresse per ogni gruppo rappresentano la durata (in percentuale) rispetto le condizioni standard misurate ad inizio lavoro.

I risultati migliori in termini di incremento della durata degli utensili sono stati ottenuti con l'aggiunta dell'additivo ad effetto EP denominato ADD SA che, come visto, ha permesso una netta variazione dei meccanismi di usura coinvolti nel danneggiamento progressivo degli utensili.

La combinazione del lubrificante ad alta concentrazione di sostanze additivanti e l'uso di utensili con geometria ottimizzata, canalini di lubrificazione e rivestimento multistrato ha aumentato il numero di pezzi prodotti da un singolo utensile di quasi 3 volte (+ 272,5 %) rispetto alla produttività media che il processo produttivo era in grado di realizzare nelle condizioni standard. Questo incremento nella vita degli utensili porta a numerosi benefici nel processo produttivo del morsetto, infatti, diminuisce il numero di fermate necessarie alla sostituzione degli utensili e i corrispettivi tempi passivi, aumenta la produttività e riduce i costi di produzione di ogni singolo morsetto.

Inoltre, diminuisce notevolmente il fabbisogno di utensili da parte dell'azienda con conseguente riduzione dei costi derivanti dal loro acquisto e permette la riduzione delle giacenze degli stessi in magazzino utensili con ulteriori vantaggi in termini economici.

Le indicazioni conclusive che si possono ricavare da questo lavoro, anche nell'ottica di continuare la sperimentazione di nuove soluzioni che permettano ulteriori miglioramenti di prestazioni, sono:

- 1) L'azione di lavorazione degli utensili, eseguita da parte degli operatori su una smerigliatrice da banco tradizionale al fine di eliminare la punta del maschio a rullare, è deleteria sulle prestazioni dell'utensile in quanto favorisce fenomeni di danneggiamento localizzato dei primi filetti dell'utensile. La realizzazione di una lavorazione qualitativamente superiore eseguita al centro manutenzioni si è tradotta in un comportamento ad usura più uniforme ed omogeneo dei primi filetti dei maschi a rullare così lavorati.

L'evoluzione successiva consigliata deve avvenire a livello commerciale con l'acquisto di maschi a rullare con geometria a punta piatta quali ad esempio gli utensili identificati con il codice "GS" da parte della Emuge-Franken®.

- 2) La geometria del maschio a rullare influenza notevolmente il comportamento ad usura dello stesso. Di conseguenza, la geometria delle scanalature di pressione (lobi) è una variabile fondamentale che influenza le prestazioni e la durata dell'utensile. L'uso di geometrie specificatamente studiate per la lavorazione di acciai plastici ad alta resistenza ha manifestato il comportamento migliore nel corso del lavoro svolto.
- 3) La presenza di canalini di lubrificazione sui maschi a rullare (a parità di altre caratteristiche) ha comportato un aumento della durata degli utensili. Questo miglioramento può essere dovuto grazie al migliore afflusso di fluido lubrificante all'interfaccia che permette di realizzare un migliore regime di lubrificazione e una migliore asportazione del calore.

- 4) Il rivestimento superficiale che ha dimostrato il miglior comportamento nelle condizioni di lavoro date è stato il rivestimento multistrato TiN-T1 realizzato dalla Emuge sui propri utensili. Ciò non esclude la possibilità futura di sperimentare ulteriori tipologie di rivestimento sfruttando il modello realizzato in questa tesi per avere una rapida comparazione dei risultati.
- 5) Il fluido lubrificante ottenuto dall'additivazione dell'olio contenuto nell'impianto di lubrificazione (HAROLBIO 5 contaminato) con un additivo EP a base zolfo ad alte prestazioni ha causato un netto aumento della durata degli utensili.

Al contrario l'additivazione con il fluido ad alta viscosità ad effetto untuosante X-DRAW BIO 1000 SI, ha favorito un modesto aumento di durata del primo stadio di usura, ma, nel complesso, la sua presenza ha causato una leggera contrazione della durata totale degli utensili.

Il passo successivo previsto sarà quello di condividere le informazioni ottenute in questo lavoro con la Bellini s.r.l. la quale sarà in grado di formulare un lubrificante appositamente studiato ed ottimizzato per il processo di maschiatura a rullare.

Sempre relativamente al lubrificante un'ulteriore azione correttiva che si è prospettata è la sostituzione del fluido lubrificante utilizzato nella pressa a monte e di quello usato nella lubrificazione delle patrone delle unità di maschiatura (rispettivamente i prodotti X-DRAW 341 ed EXIDIA 220 HG) con oli di origine vegetale esenti da cloro paraffine.

Nel primo caso un valido sostituto è stato ritrovato nel prodotto X-DRAW BIO 40, sempre della Bellini s.r.l., e attualmente in sperimentazione, mentre si stanno ancora vagliando le possibilità offerte dal mercato per quanto riguarda la lubrificazione delle patrone.

I lubrificanti scelti, dovranno a parità di prestazioni offerte, vista l'ineliminabilità dei fenomeni di contaminazione che essi realizzano nel fluido usato nella maschiatura a rullare, garantire elevata compatibilità fisica e chimica con quest'ultimo, essere ininfluenti nei riguardi delle prestazioni meccaniche dello stesso o nel migliore dei casi avere l'effetto di additivi di prestazione (come accade attualmente).

Dovranno, inoltre, essere facilmente bio-degradabili in modo tale da non influenzare negativamente la biodegradabilità dell'olio usato nella filettatura.

- 6) Nonostante la presenza del sistema filtrante su tutti i campioni di lubrificante prelevati dal circuito a valle dei sistemi di filtrazione si è riscontrata una notevole contaminazione particellare non giustificata.

Questo fenomeno, riscontrato durante l'intera campagna di raccolta dati, è sintomatico di un malfunzionamento del sistema di filtrazione e, in particolar modo, del sistema a torre DIEDRON.

Questo cattivo funzionamento può essere imputato a due cause principali:

- a) una o più delle cartucce filtranti presenti nelle torri di filtrazione si è danneggiata o lacerata nel tempo permettendo il passaggio di olio non filtrato.

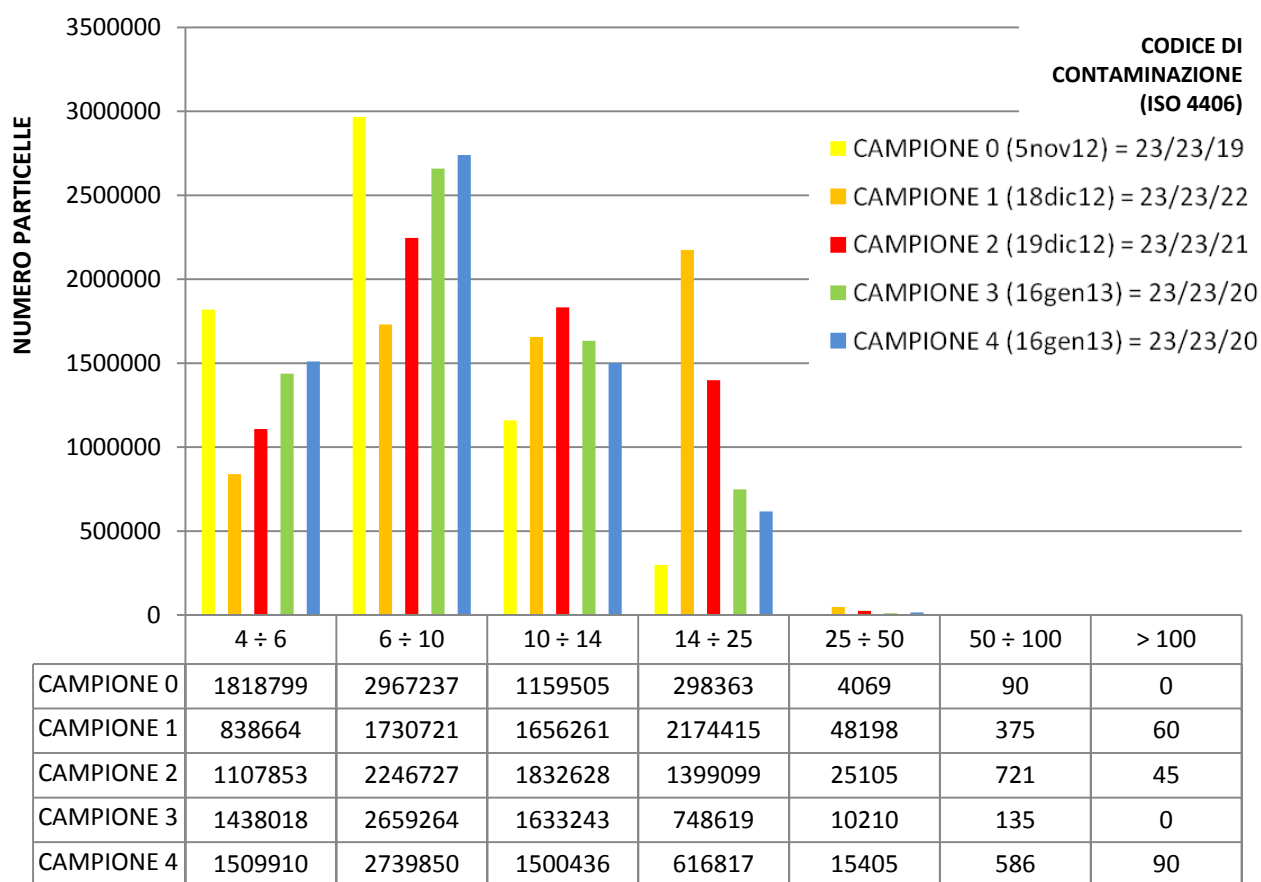
Il manometro tuttavia non si è azzerato a causa dell'elevata difficoltà che il fluido viscoso incontra nell'attraversare le restanti regioni del filtro che con buona probabilità sono ostruite dal particolato depositatosi nel tempo.

L'uso della pressione interna ai cilindri come parametro con cui valutare la necessità di manutenzione nel tempo, si è dimostrato poco efficace e si dovrà, per tanto, prevedere la sostituzione periodica del filtro basandosi su differenti osservazioni.

- b) Il collegamento in by-pass, non costringe fisicamente tutto il lubrificante usato a passare attraverso il filtro, ma si presuppone sia la differenza di portata realizzata tra il circuito principale e il circuito in by-pass a farlo. Non è da escludere, tuttavia, che si instaurino condizioni di turbolenza o flussi che permettano a parte del lubrificante "sporco" a rientrare in circolo senza essere passato attraverso l'elemento filtrante.

La presenza di particolato metallico di dimensioni anche notevoli all'interno del lubrificante è sicuramente deleterio nei confronti della durata degli utensili, in quanto favorisce fortemente meccanismi di usura di tipo abrasivo responsabili dell'asportazione iniziale del rivestimento e della propagazione successiva dell'usura.

NUMERO DI PARTICELLE IN 100 ml (ISO 4406)



INTERVALLI DI DIMENSIONE DELLE PARTICELLE TROVATE [μm]

Fig. ii: Grafico riassuntivo relativo alla presenza particellare riscontrata su tutti i campioni di lubrificante prelevati e fatti analizzare. I valori sono stati ottenuti con tecniche di confronto di immagini come previsto dalla norma ISO 4406.

Avendo grazie all'additivazione del lubrificante ridotto notevolmente tutti i fenomeni di usura adesiva, tribo-ossidativa e di fatica superficiale, non è da escludersi un ulteriore incremento nella durata degli utensili diminuendo la presenza particellare nell'olio.

A tal fine è stata programmata un'attività di manutenzione del sistema filtrante Diedron Clean Tower EFFE4 presente nell'impianto produttivo del morsetto. Sono previste, in primo luogo, la sostituzione delle cartucce filtranti e, in secondo luogo, se dovesse rendersi necessario, la modifica della tipologia di allacciamento del sistema filtrante al circuito di lubrificazione passando dal sistema in by-pass attuale con uno in serie che impedisca fisicamente al lubrificante non filtrato di rientrare in circolo.

È prevista a termine di questa attività manutentiva sul sistema filtrante una nuova raccolta dati necessaria a valutare l'influenza della contaminazione particellare del lubrificante sulla durata degli utensili.

L'azienda: Mevis S.p.A

Storia e sviluppo aziendale

L'azienda "Metallurgica Visentin" (abbreviata in seguito con l'acronimo Mevis) venne fondata a Rosà (VI) nel 1961 come ditta individuale a carattere artigianale da Adriano Visentin, con l'obiettivo di andare a coprire l'allora carente offerta di molle nel mercato locale.

Negli anni seguenti la produzione è stata allargata anche al settore minuterie metalliche facendo raggiungere all'organico aziendale, nel 1972, una dimensione industriale.

Nel 1977, con il passaggio all'attuale sede, l'azienda si organizzò suddividendosi in Centri di Produzione e ciò le permise di proporsi in forma più flessibile rispetto alle esigenze del mercato.

Nel 1983, l'incalzare delle problematiche di gestione, determinate dall'ampliamento delle strutture e dalla necessità di introdurre al meglio le nuove tecnologie, fecero abbracciare all'azienda i principi del "Company Wide Quality Control" (Gestione Totale della Qualità).

L'azienda aumentò ulteriormente di dimensione nel 1986 quando venne estesa l'area coperta ad oltre 4500 m² su una superficie totale di 13000 m². Ciò rese necessaria una revisione totale della struttura organizzativa, ottenuta mediante l'introduzione dei principi del "Just in Time", e l'attivazione di "Gruppi di progetto".

Nel 1994 il sistema qualità Mevis, dopo aver ottenuto il riconoscimento da parte di numerosi clienti ottenne la certificazione ISO 9001, che ne favorì l'espansione nel mercato unico europeo, soprattutto nei settori automobilistico ed elettrotecnico.

Tuttavia fu il 1997 l'anno in cui l'azienda si distinse notevolmente sul panorama europeo, ottenendo, primo mollificio in Europa, oltre alla certificazione ISO 9001 anche la certificazione secondo i rigorosi schemi auto AVSQ 94 (normativa Italiana), EAQF 94 (normativa Francese), VDA6 (normativa Tedesca) e QS 9000 (normativa Americana).

L'anno successivo venne introdotto il sistema informativo SAP R/3 il quale grazie alle funzioni ERP (Enterprise Resource Planning) e MRP (Material Requirement Planning) semplificò notevolmente la programmazione della produzione.

Con l'avvento del nuovo millennio ebbe luogo l'apertura di Mevis5, unità pilota al cui interno l'intero flusso di materiali viene gestito secondo la logica del "Kanban".

Lo stesso anno arrivò un ulteriore riconoscimento del sistema qualità con la certificazione ISO TS 16949 (normativa internazionale) e l'accreditamento presso il Ministero dell'Istruzione,

Università e Ricerca del laboratorio Mevis. Venne redatta, inoltre, la prima edizione della Carta dei Valori.

Gli anni successivi furono caratterizzati da una continua espansione della realtà aziendale, caratterizzata dall'acquisizione nel 2006 dell'unità Mevis7 situata a Belluno, con la quale l'azienda ha raddoppiato le proprie capacità di sviluppo attrezzature e con l'aggiunta di ulteriori 20000 m² all'unità produttiva Mevis1 che arrivò così a coprire un area di ben 34000 m².

Lo stesso anno l'azienda ha inaugurato l'unità Mevis Slovacchia a Samorin, sede che, già l'anno successivo, ha ottenuto sia la certificazione ISO 9001:2000 che la ISO TS 16949.

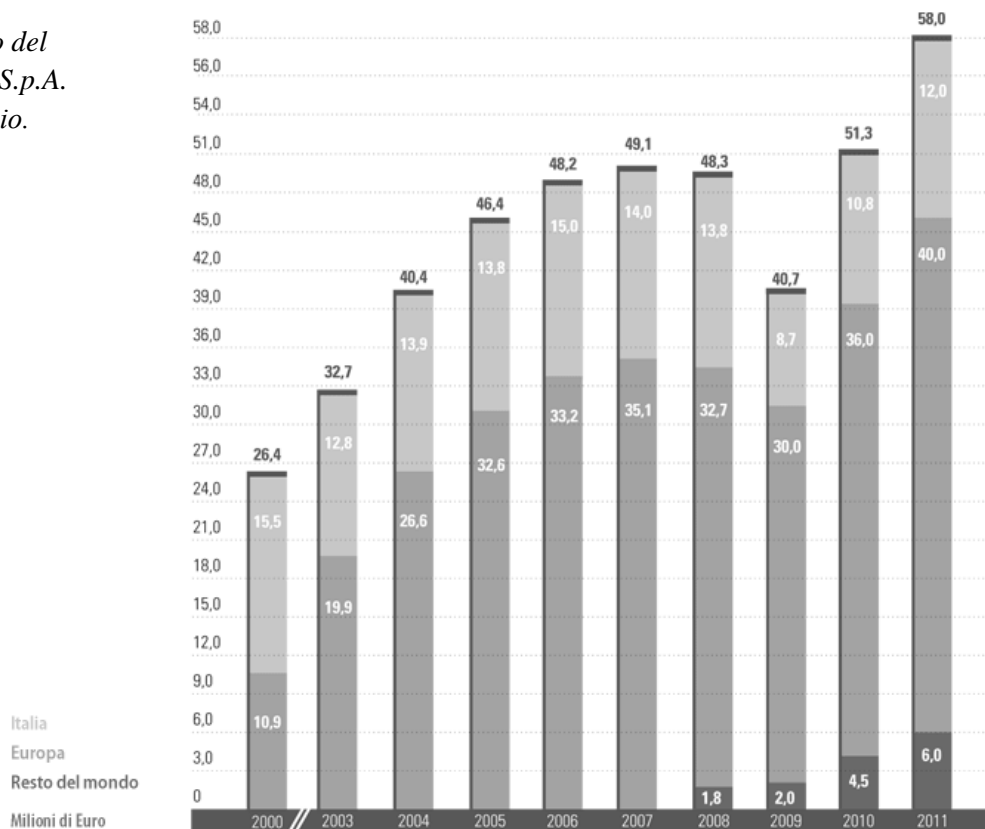
Nel 2011, 50° anniversario dalla fondazione, Mevis Slovacchia ha aperto un secondo stabilimento a Galanta, Slovacchia.

Attualmente la Mevis Spa presenta, ancora, una conduzione familiare da parte della famiglia Visentin, dove il fondatore, Adriano Visentin, ricopre il ruolo di presidente della società, mentre l'amministratore delegato è il figlio dott. Federico Visentin.

Altri componenti del nucleo familiare ricoprono, ruoli strategici nell'organigramma aziendale.

Grazie all'entrata come fornitore nel settore automobilistico, che al giorno d'oggi rappresenta la destinazione di circa il 70% dei prodotti Mevis, l'azienda ha più che raddoppiato il proprio fatturato nell'ultimo decennio, nonostante la crisi economica globale, passando dai circa 26 milioni di Euro del 2000 ai 58 milioni di Euro del 2011.

Fig. iii: Andamento del fatturato di Mevis S.p.A. nell'ultimo decennio.



Anche l'organico aziendale è in costante aumento passando da circa 130 addetti a metà anni Novanta a circa 350 nel 2010.

La forza dell'azienda risiede nella capacità di produrre con le tecnologie presenti al suo interno una grande varietà di prodotti, nella vocazione di creare rapporti di partnership con i propri clienti, nella qualità, competitività, flessibilità e puntualità della produzione.

Questi fattori sono riconosciuti da più di duemila clienti tra cui importantissimi gruppi europei, non solo del settore automotive, ma anche elettromeccanico, della produzione di elettrodomestici, dell'equipaggiamento sportivo e dell'occhialeria.

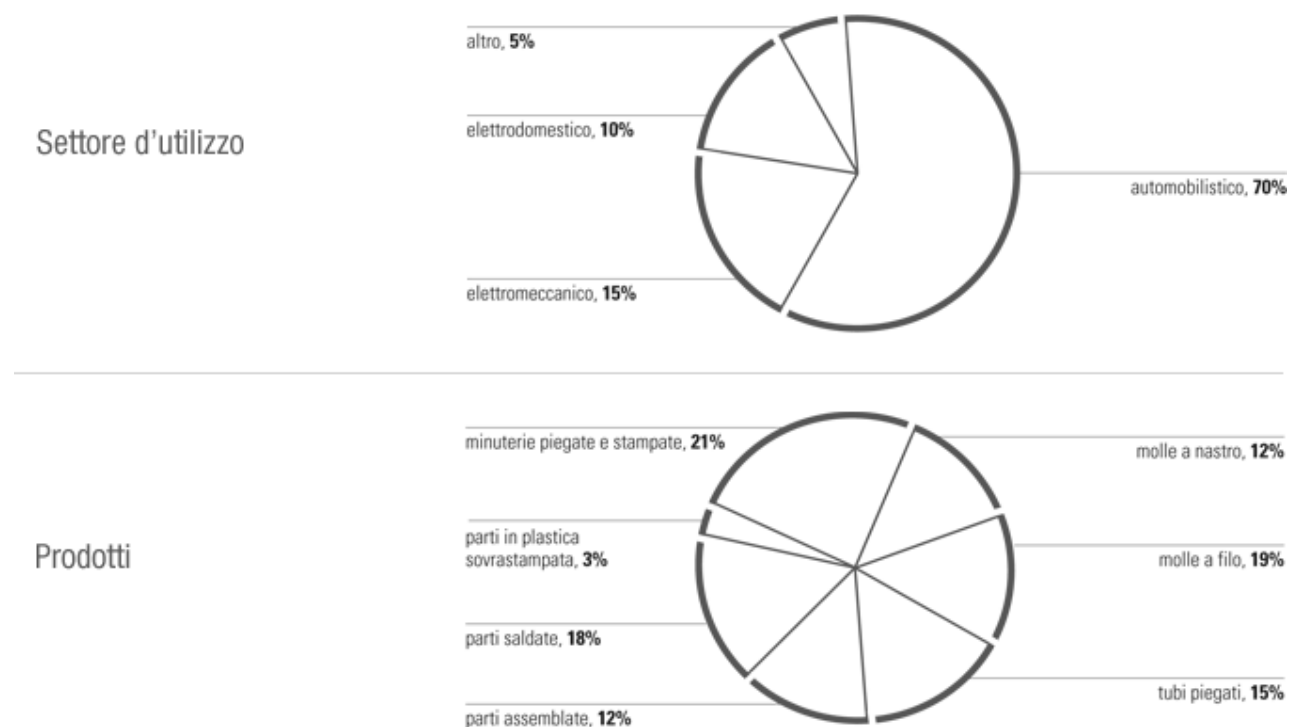


Fig iv: Settori d'utilizzo soddisfatti da Mevis S.p.A. e tipologie di prodotti realizzati.

Le caratteristiche della produzione

Le tecnologie produttive presenti in azienda consentono di eseguire una vasta gamma di lavorazioni, prevalentemente legate a:

- piega, avvolgimento e/o torsione fili, piattine (fili a sezione rettangolare) o tubi metallici;
- stampaggio di nastri metallici mediante presse;
- assemblaggio di componenti metallici e non metallici mediante saldatura e altre tecnologie specialistiche;
- trattamenti termici e superficiali.

Tutte le operazioni di deformazione sono eseguite a freddo e ciò comporta una limitazione dell'insieme dei materiali lavorabili, sia dal punto di vista dimensionale-geometrico (fili inferiori

ad un certo diametro massimo, ecc.) che da quello meccanico (resistenza a snervamento, allungamento a rottura...).

Le tecnologie produttive presenti in azienda sono, comunque, in grado di soddisfare una vasta fascia di esigenze del mercato.

L'organizzazione aziendale segue una logica di suddivisione delle attività tra i vari stabilimenti che porta a mantenere nella sede centrale le tecnologie utilizzate per la produzione dei codici che richiedono attrezzaggi più frequenti e/o più complessi, mentre si trasferiscono presso le divisioni distaccate le cosiddette "produzioni dedicate", dove con "dedicate" s'intende finalizzate, per la maggior parte, alla realizzazione di un numero limitato di articoli con domanda stabile per un target ristretto di clienti.

L'azienda dispone, inoltre, di funzioni di sviluppo prodotto dedicate alla *customer satisfaction*, sia per quanto riguarda lo studio della fattibilità di una soluzione presentata dal cliente, sia per quanto riguarda lo sviluppo vero e proprio del prodotto come soluzione del problema che viene presentato all'azienda dal cliente stesso.

Queste funzioni vengono esercitate principalmente a due livelli, uno gestionale e uno operativo.

A livello gestionale la funzione di studio del prodotto è svolta dall'ufficio processo, il quale viene messo in contatto con il cliente dall'ufficio commerciale. Se il cliente richiede la produzione di un prodotto specifico già progettato, allora l'ufficio processo ne valuta sia la fattibilità operativa sia il rispetto delle caratteristiche tecnico-fisiche richieste dal cliente come la resistenza allo sforzo, il livello di deformazione ecc. Successivamente presenta un preventivo dei costi.

Se, invece, il cliente si presenta con il problema, ma non con la soluzione, allora l'ufficio processo si premura di sviluppare un progetto che rispetti le richieste del committente. Questo viene successivamente realizzato a livello operativo nel centro campionature interno all'azienda, al fine di verificarne la fattibilità operativa e di effettuare tutti i test necessari per stabilire la bontà della soluzione.

In Mevis, l'intero processo produttivo è rivolto al solo obiettivo di garantire rapidità, precisione e flessibilità nella realizzazione di progetti facendoli allo stesso tempo diventare soluzioni tecniche competitive e qualitativamente superiori. Ogni fase della produzione risulta, inoltre, accompagnata da test strutturali e funzionali, eseguiti secondo le più rigorose normative internazionali.

All'interno dell'azienda, inoltre, sono stati messe a punto unità produttive specializzate che permettono di seguire con successo anche i clienti più esigenti fornendo risultati concreti, all'altezza delle aspettative e in anticipo sul mercato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Straffelini (2005) *Attrito e usura*, tecniche nuove.
- [2] G. Straffelini (2007-2009) *Ottimizzazione del ciclo produttivo per la costruzione di sistemi di movimentazione e bloccaggio dei sedili per impieghi automotive (Report I, II e III)*, Mevis S.p.A.
- [3] T. Mang , W. Dresel (2001) *Lubricants and Lubrication*, WILEY-VCH.
- [4] S. Del Ross (1982) *Vademecum dell'utilizzatore di lubrificanti*, tecniche nuove.
- [5] S. Del Ross (-) *Evoluzione delle caratteristiche di materiali e superfici in un sistema tribologico lubrificato*, tecniche nuove.
- [6] S. Cicero (1988) *Teoria e pratica della lubrificazione*, tecniche nuove.
- [7] E.R. Braithwaite (1969) *Lubrificazione, Lubrificanti e Tribologia*, tecniche nuove.
- [8] (1992) *ASM Metals HandBook Volume 18 - Friction, Lubrication, and Wear Tecnology*, ASM.
- [9] (1992) *ASM Metals HandBook Volume 16 - Machining Processes*, ASM.
- [10] (1992) *ASM Metals HandBook Volume 12 - Fractography*, ASM.
- [11] (1992) *ASM Metals HandBook Volume 11 - Failure Analysis And Prevention*, ASM.
- [12] (1992) *Microindentation Hardness Testing (ASM Metals HandBook Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation)*, ASM.
- [13] A. Rivola (2010) *Lubrificazione*.
- [14] R. Maione, L. D'Elia (-) *Lubrificazione e lubrificanti*.
- [15] C. Cibaldi (2006) *I Criteri di Scelta e di Trattamento degli Acciai da costruzione e da Utensili VOLUME PRIMO: metallurgia di base*, AQM.
- [16] C. Cibaldi (2007) *I Criteri di Scelta e di Trattamento degli Acciai da costruzione e da Utensili VOLUME SECONDO: acciai speciali da costruzione*, AQM.
- [17] C. Cibaldi, A. Ghidini (2009) *I Criteri di Scelta e di Trattamento degli Acciai da costruzione e da Utensili VOLUME TERZO: acciai da utensili*, AQM.

- [18] C. Cibaldi (2010) *I Criteri di Scelta e di Trattamento degli Acciai da costruzione e da Utensili VOLUME QUARTO: diagnosi dei difetti metallurgici AQM.*
- [19] (-) *Guida intelligente HSS*, HSS Reseach Forum.
- [20] G.A. Fontalvo, R. Humer, C. Mitterer, K. Sammt, I. Schemmel (2005) *Microstructural aspects determining the adhesive wear of tool steels*, WEAR (ELSEVIER).
- [21] S. Wilson, A.T. Alpas (1999) *Wear mechanism maps for TiN-coated high speed steel*, SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY (ELSEVIER).
- [22] S. Wilson, A.T. Alpas (1999) *Effect of temperature and sliding velocity on TiN coating wear*, SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY (ELSEVIER).
- [23] S. Wilson, A.T. Alpas (2000) *Tribo-layer formation during sliding wear of TiN coatings*, WEAR (ELSEVIER).
- [24] L. Paracchini (1983) *Manuale di trattamenti e finiture superficiali*, AMMA.
- [25] S. Kalpakjian, S.R. Schmid (2008) *Tecnologia Meccanica*, PEARSON.
- [26] P. Stèphan, F. Mathurin , J. Guilllot (2010) *Analytical study of maximal tapping torque during forming screw process*, Journal of Materials Processing Technology
- [27] P. Stèphan, F. Mathurin , J. Guilllot (2011) *Experimental study of forming and tightening processes with thread forming screws*, Journal of Materials Processing Technology
- [28] G. Fromentin, G. Poulachon (-) *Precision and surface integrity of threads obtained by form tapping.*
- [29] V. Ivanov , V. Kirov (1996) *Rolling of internal threads*, Journal of Materials Processing Technology.
- [30] H. Sağlam , R. Kuş (2011) *Performance of internal thread rolling head and the mechanical properties of rolled thread.*
- [31] (2012) *Thread production by pressure deformation, Tool Catalogue 42*, GÜHRING.
- [32] (2010) *Informazioni tecniche, ToolCatalogue 140*, EMUGE.
- [33] (2010) *Catalogue 2010*, YAMAWA.

- [34] G.A. Lange (1986) *Systematic Analysis of Technical Failures*, DGM.
- [35] J.L. Mo, M.H. Zhu (2008) *Sliding tribological behavior of AlCrN coating*, Tribology International.
- [36] J.L. Mo, M.H. Zhu (2008) *Tribological oxidation behaviour of PVD hard coatings*, Tribology International.
- [37] (2008) *FLUIDI PER LA LAVORAZIONE DEI METALLI Manuale di buone pratiche per la sicurezza, la salute e la corretta gestione degli impianti*, GAIL.
- [38] M.M. Riva, M. Bellini, P. Leghissa, D. Gambini, G. Mosconi (2012) *Esposizione ad oli lubrificanti vegetali: effetti sulla salute*, G ItalMedLav Erg 2012.
- [39] G.M. Paolucci (2004) *Lezioni di METALLURGIA vol.2 TECNOLOGIA DEI MATERIALI METALLICI*, Edizioni Libreria Progetto Padova.
- [40] (2005) *ASME B1.13M -2005 Metric Screw Threads: M Profile*, ASME.
- [41] (1965) *UNI 5542-65 Filettature metriche ISO a profilo triangolare*, UNI.
- [42] (1971) *UNI 5870-71 Strumenti di misura - Calibri e riscontri per filettature metriche ISO*, UNI.
- [43] L. Favero (2012) *Taratura e verifica degli strumenti e delle apparecchiature (norma interna Mevis)*, Mevis S.p.A.
- [44] (2002) *UNI EN 10132-3 Nastri di acciaio laminati a freddo da trattamento termico - Condizioni tecniche di fornitura - Acciai da bonifica*, UNI.
- [45] (2005) *UNI EN ISO 18265 Conversione dei valori di durezza*, UNI
- [46] (2006) *UNI EN ISO 6507-1 Prova di durezza Vickers - Parte 1: Metodo di prova*, UNI.
- [47] (1965) *UNI 3137-65 Esame microscopico dei materiali ferrosi*, UNI.

Ringraziamenti

Desidero fare un ringraziamento doveroso a tutto il personale Mevis S.p.A. soprattutto agli addetti all'impianto di produzione del morsetto: Giuseppe, Paolo, Rosario, Savino, Fabio, Petru, per la simpatia, la partecipazione e soprattutto la pazienza che hanno dimostrato nel corso di questo lavoro, ad Andrea per la supervisione in reparto, ai ragazzi della manutenzione per l'assoluta disponibilità a fornirmi il materiale necessario alle varie sperimentazioni.

Un grazie dovuto va all'ing. Giovanni M. Bizzotto per avermi accompagnato in quello è stato in primo luogo un percorso di crescita, professionale ed umana.

Come dimenticare poi i colleghi del laboratorio: Ilaria, Paolo e Luca con cui ho condiviso molti bei momenti nel corso dei mesi di tirocinio: grazie.

La mia riconoscenza va anche al Dott. Marco Bellini della Bellini s.r.l. per il suo elevato contributo alla riuscita di questa tesi.

Desidero ringraziare, inoltre il professor Dabalà per l'elevato interesse trasmessomi nello studio dei materiali metallici e l'ing. Katya Brunelli del dipartimento di Ingegneria Industriale per aver messo al servizio di questo lavoro la sua elevata competenza nell'utilizzo del microscopio a scansione elettronica.

Cercando di essere breve e non annoiarvi vorrei ringraziare di cuore anche:

I miei genitori per avermi cresciuto con affetto, per avermi dato sempre tutto ciò di cui ho avuto bisogno e per avermi sostenuto in tutti questi anni.

Le mie sorelle Valentina e Lucia e i loro preziosi consigli sul genere femminile.

Sara per la serenità e la forza che il suo Amore riesce a darmi ogni giorno.

Filippo (detto Andri) per essere più che un amico il fratello che ho sempre desiderato.

Claudio, Grigol e Kejo compagni di banco e non solo nel corso di questa laurea magistrale.

Diana e Spike per farmi invidiare ogni giorno la loro noiosa vita da cani.

Il mio cognatino preferito Paolo che accollandosi Valentina garantisce dei momenti di silenzio, pace e tranquillità in casa.

Tutti i membri del fantastico "VE FASEMO MORIRE...DAL RIDERE" Team di Volley che, anche grazie alla mia grande abilità nel ruolo di centrale, si piazza all'ultimo posto in ogni torneo amatoriale a cui ci iscriviamo.

Tutti gli amici e compagni di vita che ora tenterò di elencare: Gaspa, Federico, Comu, Ery, Vere, Matteo, Gino, Toni, Busa, Moce, Luca, Giulia, Fede, Fefa, Vale, Coco, Micol, Edo, Lorentz, Pierre, Silvia, Chiara, Marta, Ornella...

A tutti (anche quelli che ho dimenticato):

Grazie