



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII,

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali

*Lavorabilità alle macchine utensili del ferro puro
al variare delle condizioni di lubrificazione*

Relatore: Prof.ssa Stefania Bruschi

Correlatore: Prof.ssa Rachele Bertolini

Laureando: Giacomo Marchiori

Matricola n. 1237548

Anno Accademico 2023/2024

Alla mia famiglia

INDICE

SOMMARIO.....	v
CAPITOLO 1: FERRO PURO ARMCO.....	1
1.1 Introduzione	1
1.1.1 Il ferro come elemento.....	1
1.1.2 Metallurgia di base	2
1.1.2.1 Reticolo cristallino.....	2
1.1.2.2 Trasformazioni allotropiche del ferro.....	5
1.2 Il ferro puro ARMCO.....	7
1.2.1 Cenni storici	8
1.2.2 Applicazioni comuni	9
1.3 Proprietà magnetiche.....	10
1.3.1 Introduzione.....	10
1.3.2 Tipi di magnetismo.....	11
1.3.3 Isteresi magnetica	13
1.3.4 Ferro puro e magnetismo.....	14
CAPITOLO 2: CARATTERIZZAZIONE DEL FERRO PURO.....	17
2.1 Introduzione	17
2.2 Analisi microstrutturale.....	18
2.2.1 Attrezzatura e metodi	18
2.2.1.1 Micro troncatrice	18
2.2.1.2 Inglobatrice e resine.....	19
2.2.1.3 Levigatrice	20
2.2.1.4 Lucidatrice	21
2.2.1.5 Microscopio ottico	21
2.2.1.6 Microscopio SEM.....	23
2.2.2 Attacco chimico.....	26
2.2.3 Risultati microstruttura.....	27
2.3 Durezza	30
2.3.1 Microdurezza.....	30
2.3.1.1 Attrezzatura e metodi.....	33
2.3.1.2 Prove di microdurezza	34
2.3.1.3 Risultati microdurezza	34
2.3.2 Nanoindentazione.....	35

2.3.2.1	Attrezzatura e metodi.....	36
CAPITOLO 3: TORNITURA.....		39
3.1	Introduzione	39
3.2	Lavorazioni per asportazione di truciolo e tornitura	40
3.2.1	Taglio ortogonale.....	41
3.2.2	Taglio obliquo	46
3.2.3	Tornitura.....	47
3.2.4	Misura delle forze di taglio.....	48
3.3	Tipologia di truciolo.....	50
3.3.1	Lavorabilità, considerazioni sul materiale di lavoro	52
3.4	Lubrorefrigeranti e influenza della temperatura.....	52
3.4.1	Tornitura criogenica	53
3.5	Usura degli utensili da taglio.....	56
3.6	Tornitura dei campioni.....	57
3.6.1	Scelta degli utensili.....	57
3.6.2	Parametri di lavorazione.....	59
3.7	Risultati forze di taglio.....	63
3.8	Morfologia dei trucioli	67
3.9	Confronto dello stato degli inserti.....	69
CAPITOLO 4: FINITURA E INTEGRITÀ SUPERFICIALE.....		73
4.1	Introduzione	73
4.2	Rugosità superficiale.....	74
4.2.1	Difettologia della superficie	75
4.2.2	Misure di rugosità.....	77
4.2.3	Parametri areali del profilo.....	79
4.2.3.1	Parametri R	79
4.2.3.2	Parametri S.....	80
4.2.4	Attrezzatura e metodi	81
4.2.4.1	Profilometro ottico 3D.....	81
4.2.4.2	Acquisizione della superficie.....	82
4.2.4.3	Elaborazione delle acquisizioni	84
4.2.5	Risultati rugosità.....	85
4.3	Caratterizzazione meccanica della superficie del ferro puro lavorato.....	91
4.3.1	Strato di deformazione plastica severa	91
4.3.2	Durezza.....	94
4.3.2.1	Microdurezza	94

4.3.2.2 Nanoindentazione	99
CAPITOLO 5: CONCLUSIONI.....	103
BIBLIOGRAFIA.....	109
APPENDICE A: ANALISI AL SEM DEGLI UTENSILI	113

SOMMARIO

I primi sviluppi del ferro puro *ARMCO*[®] risalgono agli anni '20 del XX secolo, prendendo il nome dall'azienda che introdusse il processo di raffinazione, l'*American Rolling Mill Company*. Questo materiale, dopo un secolo di progresso tecnico e continuo miglioramento della purezza, rimane la scelta principale per molte industrie grazie alle sue proprietà uniche, con una quantità minima di ferro del 99,85% e microstruttura composta esclusivamente da ferrite. Il Ferro Puro trova impiego in una vasta gamma di settori industriali, tra cui quello chimico, automobilistico, elettronico, e molti altri. Il ferro puro *ARMCO*[®] è contraddistinto da una purezza elevata, eccellenti proprietà elettriche, magnetiche e, se paragonato agli acciai dolci, una migliore resistenza alla corrosione e ossidazione, buona capacità di formatura a freddo e ottima saldabilità. Essendo un materiale non legato, non è progettato per ottenere specifiche proprietà meccaniche. È caratterizzato da una resistenza a trazione di 290 MPa, una conducibilità termica di 73,2 W/m°C, e ottime proprietà magnetiche come bassa forza coercitiva, alta permeabilità e valore di induzione di saturazione di 2,15 T. Nonostante il materiale sia duttile e facilmente lavorabile alle macchine utensili, la formazione di un truciolo continuo rende la lavorazione complicata e richiede maggiori accortezze, anche nella scelta degli strumenti di taglio. L'obiettivo di questa tesi è sviluppare una strategia mirata a cambiare la morfologia del truciolo, da continuo a frammentato, durante il processo di lavorazione del Ferro Puro. Per questo scopo, sono stati condotti test di tornitura variando le condizioni di lubrificazione e raffreddamento degli utensili da taglio. Nello specifico, si è esaminata l'efficacia della refrigerazione criogenica come alternativa alla lubrificazione a inondazione, utilizzata comunemente nelle industrie. L'effetto di diverse velocità di taglio è stato studiato valutando l'usura degli inserti da taglio e la qualità della lavorazione sul campione. In particolare, ogni campione è stato analizzato al microscopio a scansione elettronica e al profilometro ottico 3D. I risultati mostrano che la velocità influenza la qualità superficiale ottenibile. Non vi è un miglioramento nell'utilizzo del raffreddamento criogenico per quanto riguarda la morfologia del truciolo ma si è riscontrato una rilevante diminuzione della lunghezza media. Diverse analisi sull'integrità superficiale dei campioni hanno dimostrato come il raffreddamento criogenico riduca lo strato incrudito.

Nel capitolo 1 vengono introdotte le varie proprietà del ferro puro e le sue applicazioni industriali. Vengono inoltre descritte le principali proprietà magnetiche che lo caratterizzano e lo distinguono dagli altri prodotti industriali.

Nel capitolo 2 viene caratterizzato il materiale di partenza attraverso analisi microstrutturali, osservazioni al microscopio ottico e misure di microdurezza. Vengono descritti i metodi e le attrezzature utilizzate, con particolare attenzione agli aspetti pratici.

Nel capitolo 3 viene illustrata la tornitura dei campioni, partendo da una descrizione teorica del processo di asportazione del truciolo, del modello di taglio ortogonale e delle diverse tipologie del truciolo. Vengono descritte le diverse strategie di lubrorefrigerazione adottate in ambito industriale e i vantaggi della tornitura criogenica. Sono inoltre descritte le attrezzature utilizzate e la misura delle forze di taglio con dinamometro. Viene poi descritto il processo produttivo adottato, inclusa la scelta degli utensili e dei parametri tecnologici, quale la velocità di taglio, l'avanzamento al giro e la profondità di passata. In Appendice A è riportato il confronto tra il petto dell'utensile nuovo e quello dopo l'operazione di tornitura.

Nel capitolo 4 viene studiata la finitura e l'integrità superficiale dei campioni ottenuti dalla tornitura della barra di ferro puro. Si analizza la morfologia della superficie e si ricavano i principali parametri di areali di rugosità. Le misurazioni sono effettuate con un sistema senza contatto, utilizzando un profilometro ottico 3D. Successivamente, mediante immagini al microscopio elettronico a scansione, si indaga la presenza di difetti dovuti ai tre metodi di tornitura. L'influenza dell'operazione di asportazione sulle proprietà meccaniche e magnetiche è valutata attraverso misure dello strato di deformazione plastica severa, utilizzando il microscopio ottico, e misure di microdurezza.

Nel capitolo 5 si traggono le conclusioni sul lavoro svolto e sui risultati ottenuti.

CAPITOLO 1

FERRO PURO ARMCO

1.1 Introduzione

1.1.1 Il ferro come elemento

Il ferro (simbolo Fe) è un elemento chimico di natura metallica, appartenente all'ottavo gruppo del sistema periodico (metalli di transizione), con numero atomico 26, massa atomica 55,847 *uma* e raggio atomico a temperatura ambiente di 0,124 *nm*.

Il ferro è una delle specie chimiche maggiormente presenti sulla crosta terrestre, seconda solo all'alluminio. Ha una temperatura di fusione di 1538°C ed una densità pari a circa 7.870 *kg/m³*; è un metallo ferromagnetico il cui comportamento magnetico si riduce al crescere della temperatura, fino ad annullarsi in corrispondenza di 770°C (temperatura di Curie). La conduttività termica del ferro a temperatura ambiente è dell'ordine di 80 *W/m°C* mentre la sua conduttività elettrica è all'incirca $10 \cdot 10^6$ (Ωm)⁻¹. Il ferro, come la maggior parte dei metalli puri, non ha caratteristiche meccaniche rilevanti. Il carico unitario di rottura a trazione oscilla tra 250 e 270 *MPa* mentre la durezza è compresa tra 70 e 80 *HB*. [1]

Il legame metallico, che permette agli atomi di ferro di aggregarsi tra loro, possiede caratteristiche uniche rispetto ai legami ionici e covalenti tipici dei materiali ceramici e polimerici. Nel caso del ferro, come per molti elementi metallici, gli atomi hanno un numero limitato di elettroni nell'orbitale più esterno, noti come elettroni di valenza. Questo si traduce in una bassa elettronegatività e una ridotta energia di ionizzazione, facilitando la perdita di elettroni di valenza, che per il ferro sono generalmente due.

Quando questi elettroni di valenza raggiungono un livello energetico superiore a una soglia specifica, chiamata livello di Fermi, essi si separano dagli atomi originari. Questo processo crea una nuvola di elettroni delocalizzati con carica negativa che circonda i cationi ferro, ovvero gli atomi di ferro che hanno perso i loro elettroni di valenza e, quindi, acquisito una carica positiva. I cationi ferro si dispongono in posizioni di equilibrio spaziale, circondati dalla nube di elettroni delocalizzati. Questa nuvola, o gas elettronico, funge da collante per il sistema dei cationi ferro. L'energia di legame in un metallo come il ferro deriva dall'interazione elettromagnetica tra le cariche negative degli elettroni delocalizzati e le cariche positive dei cationi ferro. Questo legame è la chiave della struttura e delle proprietà dei metalli, consentendo loro di condurre elettricità e calore, e di essere malleabili e duttili.

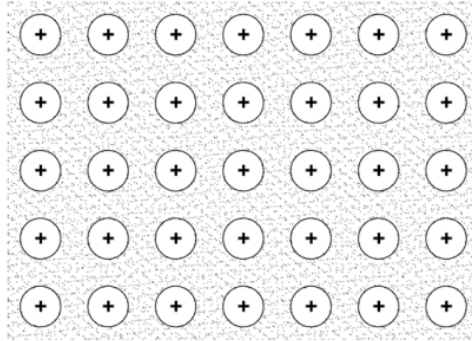


Figura 1.1: Schematizzazione del legame metallico di un cristallo di ferro. Fonte: [1]

Il modello del legame metallico offre una spiegazione completa di molte proprietà fisiche e meccaniche del ferro e dei materiali metallici in generale. Una delle caratteristiche più notevoli dei metalli è la loro conduttività termica ed elettrica, entrambe strettamente legate alla presenza della nube di elettroni di valenza delocalizzati. Poiché gli elettroni delocalizzati non sono vincolati a un legame specifico tra atomi, possono muoversi liberamente attraverso il reticolo metallico. Questa libertà di movimento consente agli elettroni di trasportare energia termica ed elettrica in modo efficiente. Quando una differenza di temperatura viene applicata a un metallo, gli elettroni mobili possono trasferire energia termica dalle regioni più calde a quelle più fredde. Analogamente, quando viene applicata una differenza di potenziale elettrico, gli elettroni possono muoversi facilmente attraverso il materiale, permettendo il flusso di corrente elettrica. Inoltre, la mobilità degli elettroni di valenza contribuisce parzialmente alle proprietà di duttilità e malleabilità dei metalli. In un cristallo metallico, gli atomi sono disposti in un reticolo regolare, ma non vi sono legami localizzati rigidi tra di essi come avviene nei solidi covalenti o ionici. Quando viene applicata una forza di scorrimento, i cationi di ferro possono scivolare l'uno rispetto all'altro senza rompere la struttura complessiva del reticolo. La nube di elettroni delocalizzati funge da "collante gelatinoso", mantenendo la coesione del sistema anche mentre gli atomi si muovono.

1.1.2 Metallurgia di base

1.1.2.1 Reticolo cristallino

La disposizione spaziale degli atomi di ferro in un materiale metallico non è casuale, ma segue un ordine regolare e ben definito. Questo ordine è caratterizzato dalla presenza di una struttura di base, composta da un certo numero di atomi, che si ripete indefinitamente nelle tre dimensioni dello spazio. L'unità di base di questa ripetizione regolare è chiamata cella elementare o cella unitaria.

La cella elementare rappresenta il più piccolo gruppo di atomi che, ripetuto attraverso traslazioni nelle tre dimensioni, può generare l'intera struttura del cristallo. (figura 1.2) Questa struttura cristallina è tipica dei materiali metallici e rappresenta il tratto distintivo di tutti i solidi cristallini.

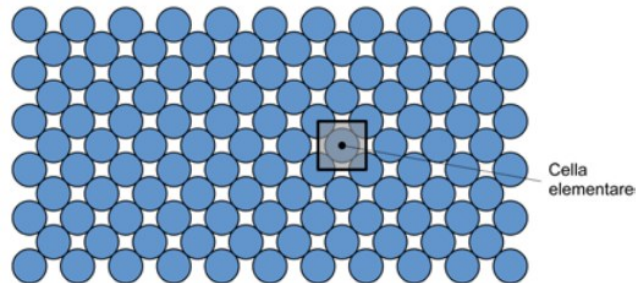


Figura 1.2: Semplificazione di un reticolo metallico in cui è evidenziata la cella elementare. Gli atomi sono rappresentati col modello a sfere rigide. Fonte: [1]

Nel caso del ferro, come di molti altri metalli, la struttura cristallina varia con la temperatura, un fenomeno noto come polimorfismo. A pressione atmosferica, il ferro esiste in due principali forme allotropiche, ognuna caratterizzata da una diversa configurazione geometrica degli atomi nel reticolo cristallino. Queste forme allotropiche sono rappresentate da due diverse celle elementari: la cella elementare con reticolo cubico a corpo centrato (CCC) e la cella elementare con reticolo cubico a facce centrate (CFC), anche chiamati ferro α (o ferro δ) e ferro γ . In entrambe le strutture, il lato del cubo della cella elementare è chiamato parametro reticolare e viene indicato con la lettera a . Questo parametro è una misura della distanza tra gli atomi all'interno del reticolo cristallino e varia a seconda della forma allotropica e delle condizioni termiche. La rappresentazione grafica dei due reticoli del ferro, utilizzando il modello atomico a sfere rigide, è mostrata in figura 1.3.

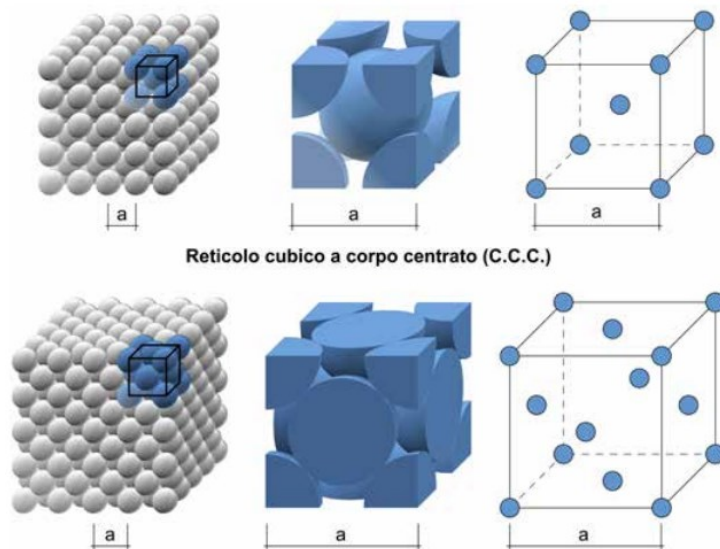


Figura 1.3: La cella elementare del reticolo cubico a corpo centrato (in alto) e la cella elementare del reticolo cubico a facce centrate (in basso). Fonte: [1]

La cella elementare del reticolo cubico a corpo centrato (C.C.C.) presenta un atomo di ferro posizionato al centro del cubo. Intorno a questo atomo centrale, ci sono otto atomi di ferro collocati agli otto vertici del cubo (quattro sopra e quattro sotto). In questo sistema, le sfere rigide che rappresentano gli atomi di ferro sono tangenti lungo le diagonali del cubo. Al contrario, nella cella elementare del reticolo cubico a facce centrate (C.F.C.), un atomo di ferro è posizionato al centro di ciascuna delle sei facce del cubo. Anche in questa configurazione ci sono otto atomi di ferro collocati agli otto vertici del cubo. Nel sistema C.F.C., il contatto tra gli atomi di ferro avviene lungo le diagonali delle facce del cubo.

Conoscendo le diagonali lungo le quali gli atomi si toccano, è possibile calcolare la lunghezza del lato della cella, a , a partire dal raggio atomico R . Il lato della cella è $a \approx 2,309 R$ per il reticolo C.C.C. e $a \approx 2,828 R$ per il reticolo C.F.C. Di conseguenza, a parità di raggio atomico R , il volume a^3 della cella cubica a corpo centrato è molto minore rispetto a quello della cella cubica a facce centrate ($V_{C.C.C.} \approx 12,32 R^3$ e $V_{C.F.C.} \approx 22,63 R^3$). Tuttavia, la cella C.F.C. contiene un numero doppio di atomi propri rispetto alla cella C.C.C.: quattro atomi per la cella cubica a facce centrate, due per la cella cubica a corpo centrato. Questo consente di affermare che il cosiddetto grado di compattazione atomica della cella, ovvero il volume della cella effettivamente occupato dai suoi atomi, sia maggiore nel caso della cella C.F.C. (~74%) rispetto a quello della cella C.C.C. (~68%). Pertanto, la cella cubica a facce centrate è leggermente più densa (cioè, più costipata dai suoi atomi) rispetto alla cella cubica a corpo centrato, anche se quest'ultima occupa un volume molto minore nello spazio. Un altro aspetto importante nel confronto tra le due celle elementari è la presenza di spazi liberi all'interno del reticolo, chiamati interstizi o lacune reticolari. Nelle figure 1.4 e 1.5 sono mostrate le lacune ottaedriche e tetraedriche delle celle cubiche a corpo centrato e a facce centrate; i pallini bianchi indicano il centro delle varie lacune, mentre i pallini azzurri rappresentano gli atomi di ferro del reticolo.

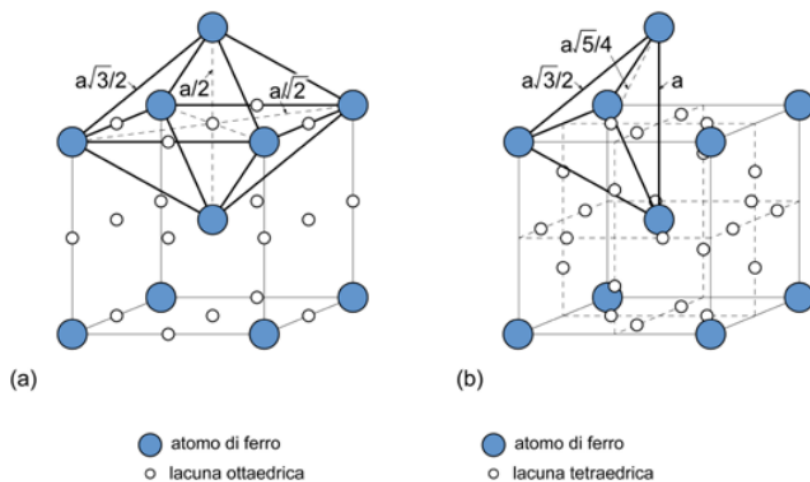


Figura 1.4: (a) Lacune ottaedriche e (b) lacune tetraedriche del reticolo cubico a corpo centrato. Fonte: [1]

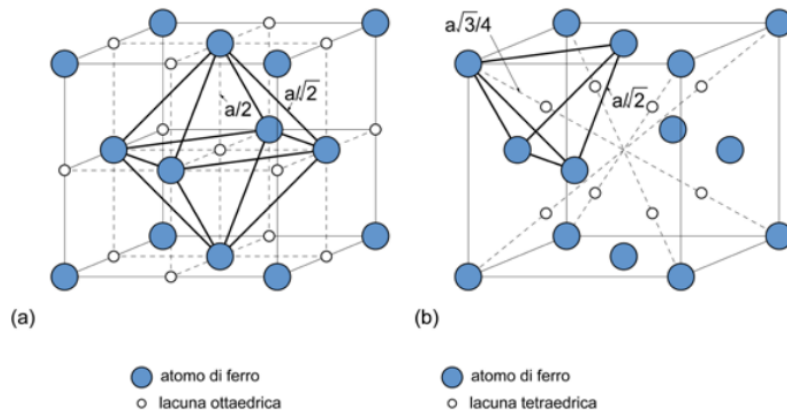


Figura 1.5: (a) Lacune ottaedriche e (b) lacune tetraedriche del reticolo cubico a facce centrate. Fonte: [1]

1.1.2.2 Trasformazioni allotropiche del ferro

L'aggregazione degli atomi di ferro secondo il reticolo C.C.C. o C.F.C. dipende dalla temperatura a cui il metallo si trova. Per comprendere meglio questo fenomeno, consideriamo una barretta di ferro sottoposta a un lentissimo riscaldamento dalla temperatura ambiente fino alla fusione, seguita da un raffreddamento altrettanto lento. Rappresentando su un diagramma l'andamento della temperatura nel tempo, si ottiene quanto mostrato in figura 1.6.

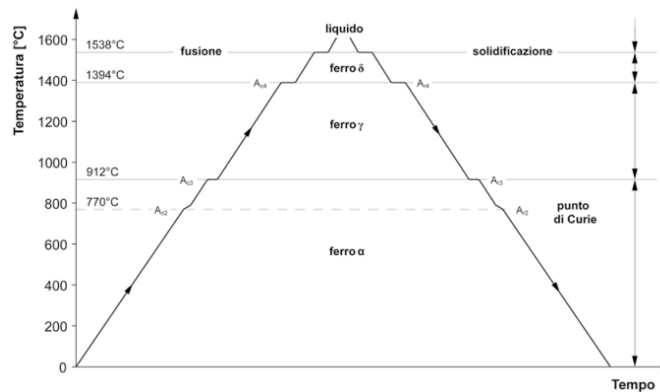


Figura 1.6: Riscaldamento e raffreddamento di una barretta di ferro con l'indicazione dei punti critici in corrispondenza dei quali si hanno le trasformazioni allotropiche. Fonte: [1]

Sia durante il riscaldamento che il raffreddamento, la curva mostra tre punti (912°C, 1394°C, 1538°C) in cui la temperatura si mantiene costante per un breve intervallo temporale. Queste orizzontali isoterme, chiamate temperature critiche o punti critici, indicano le temperature a cui avvengono le trasformazioni allotropiche del ferro, cioè le trasformazioni della struttura cristallina del ferro (punto critico $A_3 = 912^\circ\text{C}$; punto critico $A_4 = 1394^\circ\text{C}$; temperatura di fusione $T_f = 1538^\circ\text{C}$).

CAPITOLO 1: Ferro Puro ARMCO

In particolare, partendo dalla temperatura ambiente fino ad arrivare allo stato liquido, il ferro puro si presenta:

- con cella a reticolo cubico a corpo centrato (C.C.C.) da 20°C fino a 912°C (detta ferro α);
- con cella a reticolo cubico a facce centrate (C.F.C.) da 912°C fino a 1394°C (detta ferro γ);
- con cella a reticolo cubico a corpo centrato (C.C.C.) da 1394°C fino a 1538°C , (detta ferro δ);
- allo stato liquido al di sopra di 1538°C .

Le trasformazioni del ferro comportano sempre l'assorbimento di calore dall'ambiente circostante durante il riscaldamento o la cessione di calore verso l'ambiente circostante durante il raffreddamento. Di conseguenza, si osservano fenomeni di termostatazione (arresto della temperatura) in corrispondenza dei punti critici, sia durante il riscaldamento che il raffreddamento. In sintesi, le trasformazioni allotropiche del ferro avvengono a temperatura costante, analogamente a quanto accade nei cambiamenti di stato di aggregazione delle sostanze pure. Oltre ai tre punti critici già indicati, è osservabile un'ulteriore discontinuità a 770°C , detta punto di Curie, che non rappresenta una trasformazione allotropica, ma un cambiamento del comportamento del ferro da ferromagnetico ($T < 770^{\circ}\text{C}$) a paramagnetico ($T > 770^{\circ}\text{C}$). Tutti i punti critici sono indicati con la lettera *A* (dal francese *arrêter* = interrompere, sospendere) e con un numero progressivo (1, 2, 3 e 4), accompagnati dalla lettera *c* se determinati durante il riscaldamento (dal francese *chauffer* = riscaldare) o la lettera *r* se determinati durante il raffreddamento (dal francese *refroidir* = raffreddare). Infine, la distinzione tra ferro δ e ferro α è solo formale, poiché entrambi possiedono lo stesso reticolo cristallino di tipo cubico a corpo centrato. In figura 1.7 è mostrato l'andamento del parametro reticolare, *a*, per le tre forme allotropiche del ferro (α , γ e δ) al variare della temperatura.

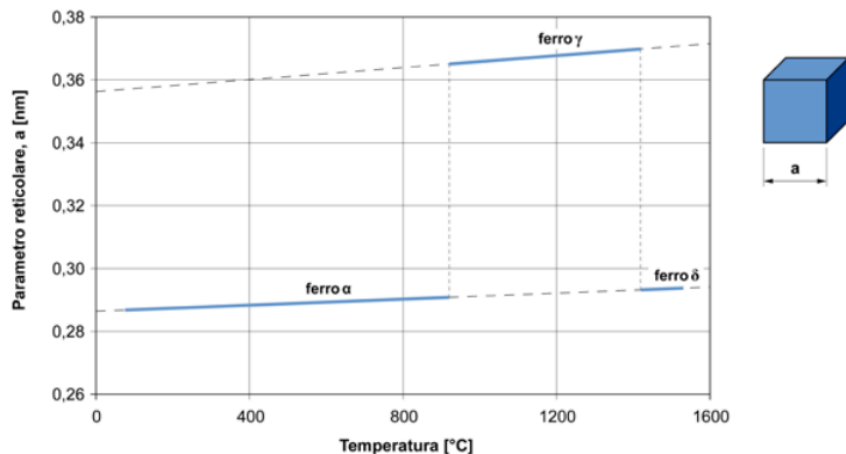


Figura 1.7: Andamento del parametro reticolare *a*, al variare della temperatura. Fonte: [1]

1.2 Il ferro puro ARMCO®

Il ferro puro *ARMCO*®, noto anche come ferro ARMCO o ferro puro a basso tenore di carbonio, è una forma di ferro che è stata raffinata per ridurre al minimo la presenza di impurità, in particolare il carbonio, con una purezza minima di ferro del 99.85%. Il termine "ARMCO" è spesso utilizzato come acronimo per "American Rolling Mill Company".

A causa della sua elevata purezza, il ferro puro ARMCO ha proprietà meccaniche marginali rispetto agli acciai a basso tenore di carbonio. Ciò significa che le sue applicazioni sono principalmente legate alla sua purezza, piuttosto che alle sue proprietà meccaniche.

Composizione	%
Ferro [Fe]	99,8657
Carbonio [C]	0,0070
Manganese [Mn]	0,0420
Fosforo [P]	0,0050
Zolfo [S]	0,0030
Rame [Cu]	0,0100
Azoto [N]	0,0043
Stagno [Sn]	0,0020
Silicio [Si]	0,0040
Alluminio [Al]	0,0050
Cromo [Cr]	0,0250
Molibdeno [Mo]	0,0030
Nichel [Ni]	0,0210
Cobalto [Co]	0,0030

Tabella 1.1: Composizione del prodotto ARMCO® Pure Iron Bar Round Hot Rolled EN 10060.

Il ferro puro è sottoposto a un processo di purificazione durante la fusione utilizzando tecniche avanzate di produzione dell'acciaio e di raffinazione. Dopo il processo di solidificazione, presenta una composizione omogenea con bassissimi contenuti di elementi correlati come l'ossigeno, e una purezza della scoria notevolmente elevata. La sua microstruttura è interamente costituita da ferrite, caratterizzata da contenuti eccezionalmente bassi di carbonio, ossigeno e azoto, con una presenza minima di inclusioni non metalliche.

Essendo un materiale non legato per definizione, il ferro puro ARMCO non è progettato per ottenere specifiche proprietà meccaniche. In particolare, il basso contenuto di carbonio limita le sue proprietà meccaniche rispetto agli acciai. Le proprietà meccaniche del ferro puro possono variare significativamente in base alla forma, allo spessore e ai trattamenti termici applicati. Valori medi delle proprietà meccaniche sono riportati a titolo informativo nella tabella 1. Questi valori si riferiscono al materiale dopo essere stato sottoposto a trattamenti termici come ricottura per rilassamento o ricottura di ricristallizzazione a temperature moderate.

Il trattamento termico per il rilassamento degli stress contribuisce a prevenire l'invecchiamento meccanico e a stabilizzare la durezza del materiale.

UTS [MPa]	0,2 % YS [MPa]	Elongation % in 4D ₀	Reduction of Area [%]	Brinell Hardness [HB]	Rockwell Hardness [HRB]	Modulus of Elasticity [GPa]
290	186	38	73	74-83	40-50	207

Tabella 1.2: Proprietà meccaniche tipiche del ferro puro dopo ricottura. Fonte: [2]

Grazie alla sua purezza e al basso tenore di carbonio, il ferro puro mostra proprietà ferromagnetiche superiori rispetto agli acciai a basso tenore di carbonio. Per garantire ottime proprietà magnetiche, come bassa forza coercitiva ed alta permeabilità magnetica, è essenziale mantenere un contenuto di carbonio estremamente basso. Altri elementi come zolfo, azoto e ossigeno possono essere dannosi per le proprietà ferromagnetiche del materiale. Anche in quantità molto ridotte (*ppm*), questi elementi possono influenzare la microstruttura del ferro puro e interferire con il movimento dei domini magnetici, compromettendo le sue prestazioni magnetiche.

1.2.1 Cenni storici

Il ferro puro ARMCO ha una storia ricca e una evoluzione significativa nel settore metallurgico. È stato sviluppato per la prima volta nel 1909 dall'ex American Rolling Mill Company (ARMCO), fondata nel 1899 a Middletown, Ohio, negli Stati Uniti. La sua creazione rappresentava un salto significativo nella produzione di ferro ad alta purezza, con una concentrazione di impurità inferiore allo 0,15%. Il marchio ARMCO è diventato rapidamente sinonimo di qualità e purezza nel settore siderurgico, e la prima colata di ferro puro ARMCO in Europa è stata effettuata presso la "Vereinigte Stahlwerke AG" in Germania, contribuendo alla sua diffusione internazionale. Nel corso del XX secolo, con oltre un secolo di progresso tecnologico continuo, il ferro puro ARMCO ha mantenuto la sua rilevanza e ha continuato a essere un materiale altamente utilizzato. Le sue proprietà speciali, tra cui alta purezza, basso contenuto di carbonio, buone proprietà magnetiche e resistenza alla corrosione, lo rendono ideale per una vasta gamma di applicazioni industriali. Attualmente, AK Steel, ora parte di Cleveland-Cliffs, è l'erede diretto dell'ex ARMCO e continua a produrre ferro puro ARMCO insieme ad altri materiali metallici avanzati. Questo marchio continua a rappresentare un punto di riferimento nel settore per la qualità e l'affidabilità dei suoi prodotti, soddisfacendo le diverse esigenze delle industrie moderne. [2]

1.2.2 Applicazioni comuni

Il ferro puro è utilizzato in molti processi e prodotti industriali, da materia prima per fusione sia per applicazioni nei trasporti (settore aerospaziale, ferroviario ed automobilistico), energetico, ambienti corrosivi, dispositivi magnetici e saldature. Qui un elenco delle applicazioni principali:

- Componenti elettromagnetici, date gli alti livelli di induzione magnetica ed alta permeabilità, come relè a corrente continua, acceleratore di particelle, elettromagneti, telai magnetici, magneti permanenti per lastre di stampa, radar, sistemi frenanti (anti-lock breaking system), espansione polare (scarpa polare), etc.
- Parti elettriche, che richiedono alta conduttività elettrica, come rotaie conduttrici, filo del fusibile, filo per messa a terra, frizioni ed innesti elettrici
- Schermatura magnetica, per scanner a risonanza magnetica statici o mobili, rilevatori, dispositivi a raggi x
- Serbatoi e attrezzature per la zincatura, rulli, cestelli, ganci, catenelle e tubi per proteggere pirometri
- Rifusione di scorie, essendo ferro con bassissimo contenuto di carbonio, può essere aggiunto per la produzione di acciai inossidabili resistenti alla corrosione ed acidi, colate di acciai, e alcune leghe a base nickel
- Anodi anticorrosione, per bagni di sale (indurimento) e bagni di decapaggio, e per condensatori di acqua di mare (scambiatori di calore) realizzati con tubi in Cu Ni 90/10; spesso utilizzato anche nei sistemi di raffreddamento delle centrali elettriche e negli impianti di desalinizzazione
- Filo di saldatura, usato per saldature di riparazione in serbatoi per zincatura

Queste applicazioni mostrano come il ferro puro ARMCO, con la sua alta purezza e basso contenuto di carbonio, sia cruciale in molti settori industriali che richiedono materiali con elevate prestazioni magnetiche, elettriche e di resistenza alla corrosione.



Figura 1.8: Fotografia che mostra la bobina circondata da un alloggiamento in ferro puro (a sinistra) e il nucleo di ferro conico che può essere inserito al centro per migliorare il campo magnetico generato (a destra). Fonte: [63]

1.3 Proprietà magnetiche

1.3.1 Introduzione

Il magnetismo è un fenomeno in cui un materiale esercita una forza di attrazione o repulsione su un altro. La fonte primaria di questa forza è il movimento delle particelle elettricamente cariche, in particolare gli elettroni negli atomi, che seguono un moto orbitale attorno al nucleo. Questo movimento orbitale, insieme allo spin degli elettroni, genera distinti momenti magnetici che influenzano il comportamento magnetico dei materiali. Di conseguenza, ogni materiale può rispondere a un campo magnetico, ma il modo in cui lo fa dipende dalla sua struttura atomica, determinando se sarà fortemente o debolmente magnetico.

In modo analogo ai dipoli elettrici, un dipolo magnetico è un piccolo magnete composto da un polo nord e un polo sud, anziché da cariche positive e negative. All'interno di un campo magnetico, la forza del campo esercita una coppia che tende ad allineare i dipoli con il campo stesso.

Se un campo magnetico è generato facendo passare una corrente i attraverso una bobina di lunghezza l e con un numero di spire n , l'intensità del campo magnetico, H (unità di misura A/m), è data dalla formula:

$$H = \frac{ni}{l} \quad (1.1)$$

La densità del flusso magnetico (induzione) è una misura delle linee di flusso all'interno di un mezzo. Essa ha come unità di misura il weber (Wb/m^2) o il Tesla (T) ed è definita come:

$$B = \mu H \quad (1.2)$$

Dove μ è la permeabilità, una proprietà specifica del mezzo e ha come unità di misura Wb/Am o l'henry per metro (H/m). La permeabilità magnetica relativa è definita come:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.3)$$

Dove μ_r è una misura del grado in cui un materiale può essere magnetizzato rispetto al vuoto e μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto.

La magnetizzazione, M , misura l'intensità del momento magnetico all'interno di un materiale magnetico in risposta a un campo magnetico esterno. Essa fornisce informazioni sul grado di magnetizzazione di un materiale e sulla sua risposta al campo magnetico applicato ed è definita come:

$$M = \chi_m H \quad (1.4)$$

Allora

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 \mu_r H \quad (1.5)$$

La suscettibilità magnetica, χ_m , fornisce informazioni sulla capacità di un materiale di polarizzarsi in risposta a un campo magnetico applicato, ed è definita come:

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad (1.6)$$

1.3.2 Tipi di magnetismo

Un materiale è caratterizzato magneticamente in base alla sua suscettibilità magnetica, che determina come può essere magnetizzato. Esistono tre principali tipi di magnetismo:

- Diamagnetismo: è un effetto molto debole che esiste solo in presenza di un campo esterno e non è permanente. Quando un campo è applicato (H) gli elettroni in orbita negli atomi creano piccoli dipoli magnetici. La direzione di magnetizzazione (M) è opposta alla direzione del campo applicato. La suscettibilità magnetica è negativa e molto piccola (-10^{-5}).
- Paramagnetismo: è leggermente più forte del diamagnetismo. Quando viene applicato un campo esterno, i dipoli si allineano con il campo, risultando in una magnetizzazione positiva. Tuttavia, poiché i dipoli non interagiscono tra loro, l'effetto scompare quando il campo viene rimosso, poiché l'agitazione termica rende casuali le direzioni dei dipoli. La suscettibilità magnetica è leggermente positiva, compresa tra $+10^{-5}$ e $+10^{-2}$.
- Ferromagnetismo: I materiali ferromagnetici possiedono momenti magnetici permanenti anche in assenza di un campo esterno, grazie a dipoli permanenti non appaiati. Questi dipoli si allineano facilmente con un campo magnetico applicato. I materiali ferromagnetici (es. Fe, Co, Ni, Gd) possono avere suscettibilità magnetiche molto elevate

(fino a 10^6). Al di sopra della temperatura di Curie, si comportano come materiali paramagnetici. e la loro suscettibilità è data dalla legge di Curie-Weiss, definita come:

$$\chi_m = \frac{C}{T-T_c} \quad (1.7)$$

dove C è una costante del materiale, T è la temperatura e T_c è la temperatura di Curie (circa 768°C per il ferro). In generale, le leghe ferrose con struttura cristallina cubica a corpo centrato (CCC) sono ferromagnetiche, mentre quelle con struttura cubica a facce centrate (CFC) non lo sono.

I diversi tipi di magnetismo si distinguono non solo per la suscettibilità, ma anche per la struttura dei dipoli magnetici, organizzati in regioni chiamate domini. Ogni dominio ha momenti magnetici allineati, creando un momento magnetico netto permanente per dominio. I confini tra domini, noti come pareti di Bloch, sono aree in cui la direzione del momento magnetico cambia gradualmente. I domini sono molto piccoli, circa $50 \mu\text{m}$ o meno, mentre le pareti di Bloch sono spesse circa 100 nm . In un campione policristallino, ogni grano può contenere più di un dominio. Anche in assenza di un campo esterno, i domini esistono con orientamenti casuali, risultando in una magnetizzazione netta pari a zero. Quando viene applicato un campo magnetico, i domini allineati con il campo crescono a spese di quelli non allineati, fino a quando restano solo i domini favorevoli. Questo processo richiede il movimento delle pareti di Bloch, sostenuto dal campo esterno. Alla saturazione magnetica, tutti i domini sono allineati con il campo, e la permeabilità del materiale diventa bassa.

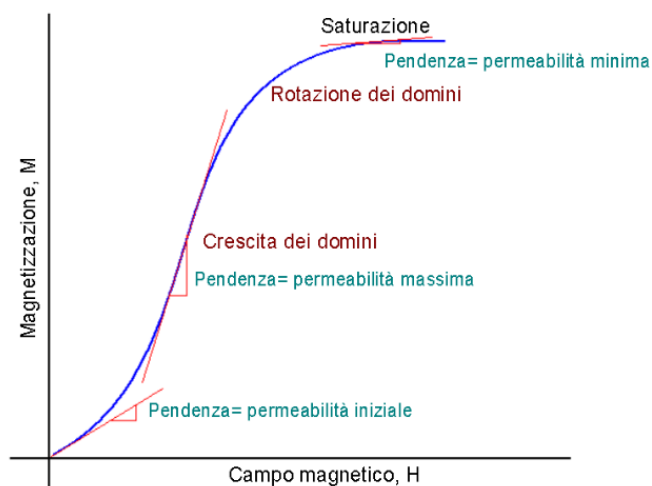


Figura 1.9: Curva di induzione magnetica. Fonte: [32]

1.3.3 Isteresi magnetica

Quando si magnetizza un materiale ferromagnetico, aumentando l'intensità del campo magnetico fino alla saturazione e poi riportando il campo a zero, il materiale mantiene una magnetizzazione residua. Questa può essere annullata solo applicando un campo opposto, detto campo coercitivo (H_C). Ripetendo il ciclo, il materiale segue una curva simmetrica nota come ciclo di isteresi. Per ogni valore del campo magnetico (H_0), ci sono tre valori possibili di induzione magnetica (B), dipendenti dalla storia del materiale. Questo indica che la permeabilità del materiale non è costante. Il ciclo di isteresi permette di classificare i materiali ferromagnetici in dolci e duri. I materiali dolci hanno un ciclo di isteresi stretto, sono facilmente smagnetizzabili, hanno un basso campo residuo e coercitivo, alta permeabilità e alta magnetizzazione di saturazione. Il ferro, usato in elettromagneti e trasformatori, è un esempio di materiale dolce. I materiali duri, invece, hanno un ciclo di isteresi largo, alto campo residuo e coercitivo, e sono difficilmente smagnetizzabili. [31]

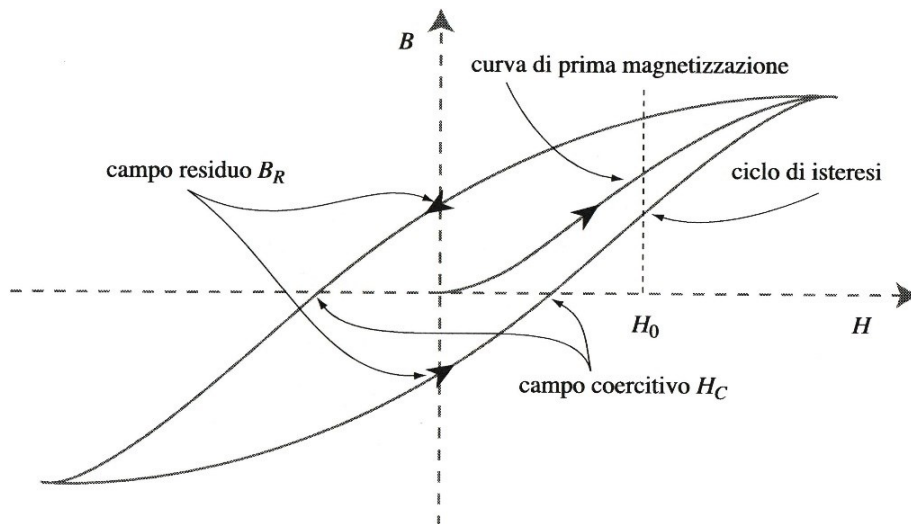


Figura 1.10: Ciclo di isteresi. Fonte: [31]

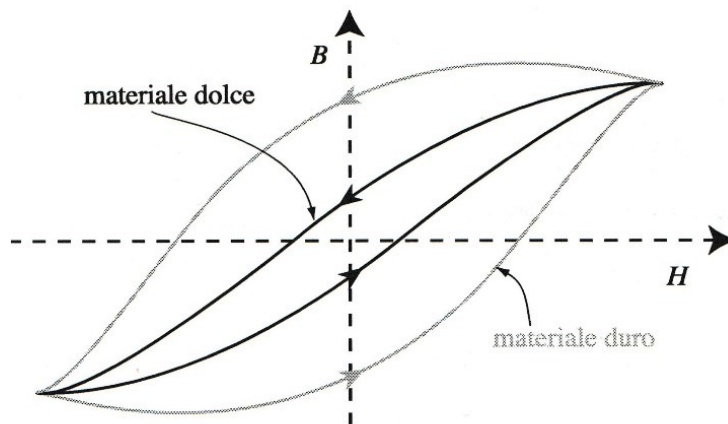


Figura 1.11: Ciclo di isteresi e rappresentazione materiali duri e dolci. Fonte: [31]

1.3.4 Ferro puro e magnetismo

Il ferro è considerato "ad alta purezza" quando le impurità (principalmente C, N, O, P, S, Si e Al) non superano poche centinaia di ppm. Se la concentrazione di impurità è maggiore, il ferro è definito acciaio a basso tenore di carbonio o acciaio non legato. Il ferro molto puro ha una conducibilità elettrica elevata ed è inadatto per le applicazioni in corrente alternata. La polarizzazione magnetica di saturazione (J_s) di circa 2,15 T non è influenzata dalla purezza. Tuttavia, la forza coercitiva (H_c) e la permeabilità magnetica dipendono significativamente dalla purezza e dalle caratteristiche cristallografiche. [40]

Material	H_c ($A\ m^{-1}$)	μ_i (μ_0)	μ_{max} (μ_0)
Ingot (99.8% Fe)	112	10	1 000
Armco	80	200	7 000
Commercially pure	20-100	200-500	3 500-20 000
Carbonyl iron powder	6	3 000	20 000
Vacuum-melted	25	—	21 000
Electrolytic	7	1 000	26 000
Electrolytic annealed	18	—	41 500
Vacuum-smelted and hydrogen-annealed	3	—	88 400
Purified Armco (99.95% Fe)	4	10 000	227 000
Vacuum-annealed	—	14 000	280 000
Single-crystal	—	—	680 000
Single-crystal, magnetically annealed	12	—	1 430 000

Figura 1.12: Proprietà magnetiche di vari gradi di ferro [40]

Il ferro puro ARMCO è ideale per nuclei che operano in corrente continua (DC), come negli elettromagneti. Durante la magnetizzazione di un singolo cristallo di ferro, figura 1.13, inizialmente si osserva il movimento delle pareti di dominio che contribuiscono alla permeabilità iniziale, e a un rapido aumento della magnetizzazione. Oltre un certo punto, la magnetizzazione richiede la rotazione dei domini dalle direzioni facili $\langle 010 \rangle$ alle direzioni facili $\langle 100 \rangle$, un processo che richiede più energia rispetto al solo movimento delle pareti.

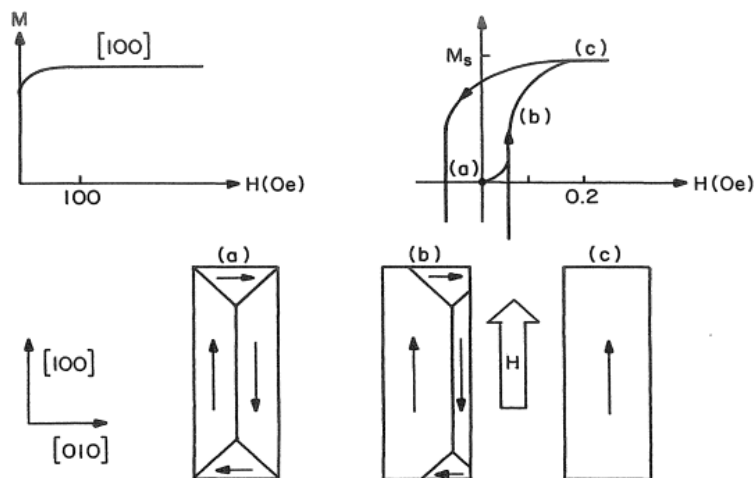


Figura 1.13: Sopra, sono presentate tipiche curve di magnetizzazione per il ferro lungo $\langle 100 \rangle$, visualizzate su scale ad alto campo e basso campo; sotto, schematizzazione dei cambiamenti nella struttura a dominio con l'applicazione del campo magnetico. [41]

Le impurità possono degradare le proprietà magnetiche del ferro, influenzando i campi di tensione se l'accoppiamento magnetoelastico è significativo. Le impurità che formano precipitati non magnetici possono bloccare le pareti di dominio, aumentando il campo coercitivo e causando perdite energetiche durante il ciclo di isteresi. [41]

Inoltre, le proprietà magnetiche dei materiali ferromagnetici sono significativamente influenzate dai processi di lavorazione del materiale e dalla microstruttura risultante. [40]

I processi di magnetizzazione sono dominati dal movimento delle pareti dei domini. La dinamica del loro movimento è determinata, tra le altre cose, dalla concentrazione di centri di ancoraggio, che sono dominati dai bordi di grano, dalle inomogeneità meccaniche, dalle dislocazioni e atomi di impurità. [51, 45]

L'aumento della densità di dislocazione significa un aumento del numero di siti di ancoraggio per il movimento delle pareti dei domini, e questo influisce sulla componente delle perdite per isteresi a bassa induzione. [36, 52]

Per esempio, la permeabilità iniziale e massima diminuisce nel materiale lavorato a freddo. Questo è dovuto al fatto che le dislocazioni prodotte agiscono come ostacoli allo spostamento delle pareti di Bloch. [43, 45] Le proprietà magnetiche dell'ARMCO potrebbero essere ottimizzate mediante un processo di ricottura, che aumenta le dimensioni del grano e ottimizza la diffusione delle impurità all'interno della microstruttura. [39]

Le misurazioni di durezza sono generalmente correlate con la densità di dislocazioni e difetti strutturali, e di conseguenza con le proprietà magnetiche dei materiali. Con l'aumento della durezza, la forza coercitiva aumenta, rendendo così più difficile l'inversione delle pareti dei domini magnetici. [38, 50]

Durante i processi di taglio, i pezzi in lavorazione realizzati con materiali ferromagnetici subiscono modifiche nelle loro proprietà magnetiche superficiali, influenzando i successivi passaggi di produzione e l'uso dei componenti. I progettisti solitamente considerano i dati forniti dai fornitori, basati su materiali non lavorati. Tuttavia, i processi di lavorazione necessari per produrre il prodotto finito possono alterare permanentemente le proprietà del materiale. Nel contesto di applicazioni esigenti come l'aerospaziale e l'automotive, le macchine elettriche operano ai limiti tecnologici, rendendo cruciale considerare anche le minime variazioni nelle proprietà del materiale. In uno studio su un motore sincrono a magneti permanenti (PMSM), è stata osservata una riduzione dell'efficienza dell'1% a causa di tali variazioni, un valore molto significativo per applicazioni ad alte prestazioni. [37, 44]

CAPITOLO 2

CARATTERIZZAZIONE DEL FERRO PURO

2.1 Introduzione

Per la realizzazione dei campioni, per le prove di asportazione di truciolo, si sono utilizzate barre tonde laminate a caldo di ferro puro, fornite da *AK Steel International B.V.* Le proprietà meccaniche, la lavorabilità alle macchine utensili e le caratteristiche magnetiche di un componente sono influenzate dal tipo di microstruttura e dalla durezza. È stato quindi necessario caratterizzare il materiale dal punto di vista metallografico ed eseguire prove di microdurezza. Le analisi sono state condotte su spezzoni ricavati dalla barra originale.



Figura 2.1: Barre per la realizzazione dei campioni da tornire.

Le informazioni fornite dal produttore per la barra originale includono il diametro nominale di 20 mm e la scheda tecnica della colata (tabella 2.1). Il ferro puro ARMCO contiene principalmente ferro (Fe), con una purezza generalmente superiore al 99.85%, e altri elementi in quantità estremamente ridotte. Negli acciai, gli elementi leganti come carbonio (C), manganese (Mn), azoto (N), cromo (Cr), molibdeno (Mo), nichel (Ni) e cobalto (Co) sono aggiunti per migliorare la resistenza e la durezza. Altri elementi come fosforo (P), stagno (Sn) e rame (Cu) vengono utilizzati per migliorare la resistenza alla corrosione, mentre l'alluminio (Al) è aggiunto per proteggere dalla ossidazione. Tuttavia, elementi come lo zolfo (S) possono rendere l'acciaio fragile. Inoltre, ossigeno (O), azoto (N) e zolfo (S) possono avere un effetto negativo sulle

proprietà magnetiche del ferro. Nel ferro puro tutti questi elementi sono mantenuti a percentuali molto basse per preservare la duttilità, la lavorabilità e le eccellenti proprietà magnetiche del materiale.

Composizione	%
Ferro [Fe]	99,8657
Carbonio [C]	0,0070
Manganese [Mn]	0,0420
Fosforo [P]	0,0050
Zolfo [S]	0,0030
Rame [Cu]	0,0100
Azoto [N]	0,0043
Stagno [Sn]	0,0020
Silicio [Si]	0,0040
Alluminio [Al]	0,0050
Cromo [Cr]	0,0250
Molibdeno [Mo]	0,0030
Nichel [Ni]	0,0210
Cobalto [Co]	0,0030

Tabella 2.1: Composizione del prodotto ARMCO® Pure Iron Bar Round Hot Rolled EN 10060.

2.2 Analisi microstrutturale

Lo scopo dell'analisi è osservare la microstruttura dei campioni di ferro puro prima della lavorazione per asportazione di truciolo. Un sottocampione è stato prelevato dalla barra e successivamente inglobato in una resina specifica. Questo processo consente manipolare il campione e di lucidarne la superficie a specchio, permettendo poi ad un attacco chimico di corrodere selettivamente i bordi dei grani. In questo modo, è possibile osservare la microstruttura del campione al microscopio ottico, poiché le aree corrose assumono un colore diverso rispetto alle parti della struttura non intaccate dall'attacco chimico.

2.2.1 Attrezzatura e metodi

2.2.1.1 Micro troncatrice

Per ricavare dei sottocampioni dalla barra originale è stata utilizzata la micro-troncatrice da banco della ditta *QATM*® modello *Brillant 210 A*, presente nel laboratorio per la preparazione metallografica dell'università degli studi di Padova. La troncatrice utilizza un disco da taglio di precisione in corindone (ossido di alluminio a base di resina) della ditta *CT Cloeren Technology s.r.l.* modello *PCut009* (figura 2.2).

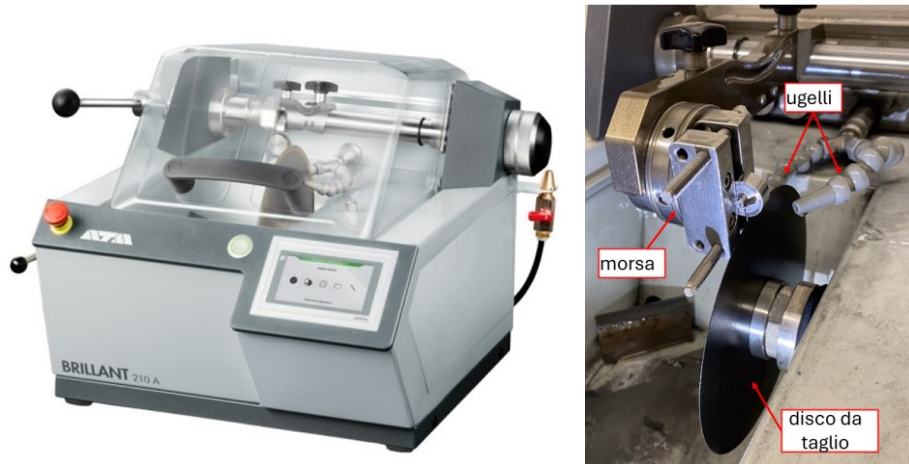


Figura 2.2: (a) micro-troncatrice Brillant 210 A (b) morsa per serraggio campione, disco da taglio PCut009 e ugelli di lubrificazione.

La troncatrice è equipaggiata con una morsa per il serraggio dei pezzi da tagliare e con un sistema di lubrificazione ad accensione automatica, che impiega un fluido lubrorefrigerante a base d'acqua. La troncatura deve essere eseguita lentamente e in modo controllato per evitare la rottura catastrofica del disco e l'eccessivo surriscaldamento della superficie di taglio.

2.2.1.2 Inglobatrice e resine

I sottocampioni di Ferro Puro vengono inglobati in una resina per facilitarne la manipolazione durante le successive operazioni di lucidatura e analisi al microscopio ottico. L'inglobatura può essere eseguita in due modi: a freddo o a caldo. Il primo metodo è indicato per materiali che tendono a modificare la microstruttura se eccessivamente riscaldati. Il Ferro Puro non soffre di questo problema, pertanto si utilizza il metodo a caldo che utilizza resine termoindurenti.

Nel laboratorio dell'università di Padova è presente l'inglobatrice *Labopress-3* della ditta *Struers*[®] (figura 2.3). I parametri usati per la realizzazione dei campioni inglobati sono:

- Diametro stampo: 30 mm
- Temperatura: 180°C
- Forza di compressione: 30 KN
- Tempo di riscaldamento: 7 min
- Tempo di raffreddamento: 7 min

Oltre all'analisi metallografica della superficie si vuole anche osservare i bordi del campione. A tal fine, è stata utilizzata la resina *WEM Dap*, a base di dialifalato azzurro, della ditta *Cloeren Technology s.r.l.*, in combinazione con la resina *WEM Phenol*, resina fenolica nera (figura 2.3). La prima resina, rinforzata con fibre di vetro, offre un'eccellente resistenza all'abrasione, garantendo di ovviare al problema della ritenzione dei bordi. Questo problema si presenta con

l'uso esclusivo della resina *WEM Phenol*, rinforzata con polvere di legno e quindi più economica e tenera.

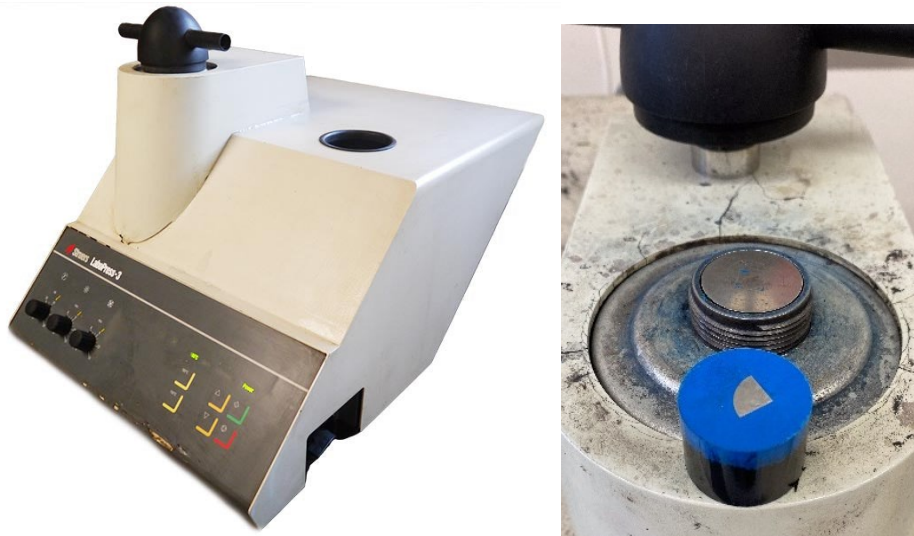


Figura 2.3: (a) Inglobatrice Labropress-3 della ditta Struers® (b) esempio di campione inglobato con combinazione delle resine WEM Dap, azzurro, e WEM Phenol, nero.

2.2.1.3 Levigatrice

Dopo aver inglobato i campioni, seguono una serie di operazioni di levigatura per spianare la superficie e rimuovere la zona alterata termicamente durante la troncatura del campione. Nel laboratorio dell'Università degli Studi di Padova è presente la levigatrice automatica *Abramin* della ditta *Struers*® (figura 2.4), ma sono messe a disposizione anche altre levigatrici manuali.

La levigatrice automatica *Abramin* è dotata di un disco orizzontale rotante, su cui vengono posizionati i dischi di carta abrasiva, e di un pistone pneumatico disposto ortogonalmente ad esso. Un porta-campioni, fissato tramite un attacco rapido al pistone della macchina, tiene i campioni inglobati in posizione durante la levigatura. La velocità di rotazione del disco abrasivo e la pressione esercitata dal pistone pneumatico possono essere regolate manualmente tramite il display di comando della macchina e da un regolatore di pressione dell'aria compressa. Durante le operazioni di levigatura, viene utilizzata acqua come refrigerante, che, insieme alla forza centrifuga, facilita l'evacuazione del materiale asportato dalla superficie dei campioni.

Per levigare la superficie dei campioni di ferro puro sono state utilizzate diverse carte abrasive, con granulometria sempre più fine, secondo la sequenza *P320*, *P500*, *P800*, *P1200*. Dopo ciascun passaggio con una carta abrasiva, il provino è stato accuratamente lavato con acqua e sapone per rimuovere i residui di materiale asportato. Successivamente, è stato deterso con alcool denaturato per eliminare contaminazioni residue e asciugato con aria compressa. Questo processo è stato eseguito per garantire che la superficie fosse completamente pulita e priva di qualsiasi contaminazione prima di procedere con l'uso della carta abrasiva successiva.



Figura 2.4: Levigatrice Abramin della ditta Struers®.

2.2.1.4 Lucidatrice

La lucidatura è un'operazione simile alla levigatura, ma utilizza panni speciali su cui viene distribuita una sospensione di abrasivo. Nel caso del Ferro Puro, vengono impiegate particelle abrasive di diamante in sospensione che agiscono da refrigerante e lubrificante durante il processo. Queste particelle abrasive hanno forme appuntite e una granulometria che varia tipicamente da 0,01 a 6 μm . La velocità di rotazione del piatto rotante della lucidatrice, in genere, è di 150÷300 *giri/min*. La lucidatura è eseguita con movimenti circolari nel senso opposto alla rotazione del panno. Nel caso specifico del Ferro Puro, vengono utilizzate sospensioni abrasive con granulometria di 6 e 1 μm per le fasi di lucidatura intermedia e finale. Questo processo garantisce che il campione sia lucidato a specchio, cioè con una superficie perfettamente riflettente, rendendolo pronto per ulteriori trattamenti come l'attacco chimico per la visualizzazione della microstruttura o per eseguire analisi di microdurezza.

2.2.1.5 Microscopio ottico

Una delle prime tecniche utilizzate per studiare la topografia di una superficie è la microscopia ottica. Il campione esaminato è montato su un supporto metallografico che fornisce una vista planare della sezione trasversale della superficie. I microscopi ottici convenzionali hanno una risoluzione limitata dalle dimensioni delle particelle sub-micrometriche che si avvicinano alla lunghezza d'onda della luce visibile (400-700 *nm*). Ci sono due tipi principali di microscopi ottici, che differiscono per il modo in cui la luce interagisce con il campione:

- Microscopia a trasmissione: in questa tecnica, un fascio di luce attraversa il campione montato sul supporto metallografico;
- Microscopia a riflessione: questo tipo di microscopia utilizza un fascio di luce che riflette sulla superficie del campione. È particolarmente adatto per analizzare superfici di

CAPITOLO 2: Caratterizzazione del ferro puro

materiali opachi. Un esempio di questo approccio è il microscopio metallografico, che consente di studiare la morfologia superficiale e la struttura dei materiali.

Per l'analisi metallografica dei metalli, è comune esaminare le superfici che sono state lucidate o non attaccate chimicamente, in modo da rivelare caratteristiche come corrosione, erosione, crepe, pieghe, ecc. Una volta che il campione è stato attaccato chimicamente con un agente corrosivo appropriato, la microscopia ottica rivela dettagli delle fasi microstrutturali come ferrite, la dimensione e la forma dei grani, eventuali strutture multifase, linee di flusso, ecc. [56]

Per condurre l'analisi metallografica descritta, è stato utilizzato un microscopio ottico (LM, Light Microscope), modello *DMR* della ditta *Leica*[®], dotato di telecamera *Zeiss AxioCam ERc5s* per la visualizzazione e l'acquisizione delle immagini tramite PC. Il software impiegato è *Zeiss ZEN core*, che offre diverse funzionalità, tra cui la visualizzazione in tempo reale del campione sul monitor, la regolazione di parametri di immagine come saturazione e bilanciamento del bianco, l'applicazione di marcatori e la possibilità di eseguire misurazioni dopo l'acquisizione. Il campione inglobato è stato fissato su una piastrina di supporto utilizzando della plastilina e una pressa apposita. Questo sistema consente di posizionare il campione metallografico in modo perfettamente piano, garantendo che la superficie da osservare sia ortogonale all'obiettivo per una messa a fuoco corretta.

Il microscopio utilizzato, visibile in figura 2.5, è equipaggiato con un revolver con sei obiettivi: 5x, 10x, 20x, 50x, 100x. L'oculare e la telecamera forniscono un ingrandimento di 10x. L'ingrandimento totale, M_{tot} , è calcolato come il prodotto dell'ingrandimento dell'obiettivo, M_{ob} , e dell'ingrandimento dell'oculare, M_{eye} . [35].

$$M_{tot} = M_{ob} \cdot M_{eye} = M_{ob} \cdot 10 \quad (2.1)$$

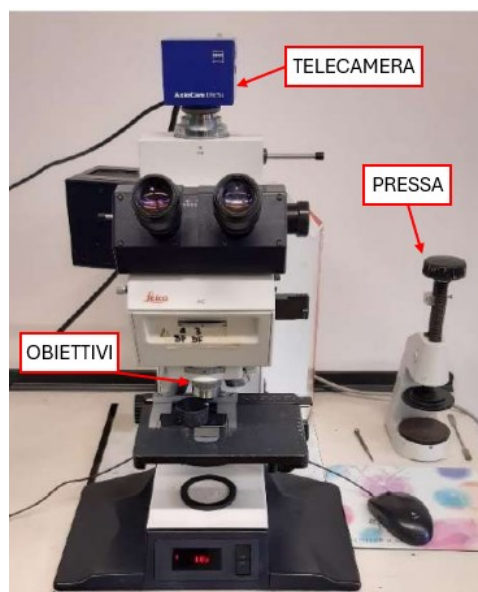


Figura 2.5: Microscopio ottico DMR Leica[®].

2.2.1.6 Microscopio SEM

Tecnica molto versatile per ottenere immagini ad alta risoluzione e informazioni dettagliate della superficie del campione, permettendo di generare immagini con ingrandimenti molto elevati superando il limite risolutivo della microscopia ottica. Il SEM garantisce inoltre immagini con una maggiore profondità di campo, e nel caso sia dotato di detector EDS, di ottenere informazioni composizionali relative al campione in esame. Lo strumento è costituito da una sorgente di elettroni, termoioniche (come il filamento di tungsteno) o ad emissione di campo, dalla quale viene generato un fascio di elettroni. Il fascio di elettroni viene gestito dalla colonna costituita da diverse lenti, elettrostatiche o elettromagnetiche, e dei rilevatori in grado di raccogliere il segnale (elettroni, fotoni e radiazioni) generato a seguito dell'interazione tra fascio e campione. Lo strumento è inoltre dotato di un sistema di vuoto così da evitare che il fascio di elettroni incontri ostacoli, come molecole di gas, coi quali andrebbero ad interagire, rendendo un'immagine più rumorosa e meno accurata. (figura 2.6) [3,4,5]

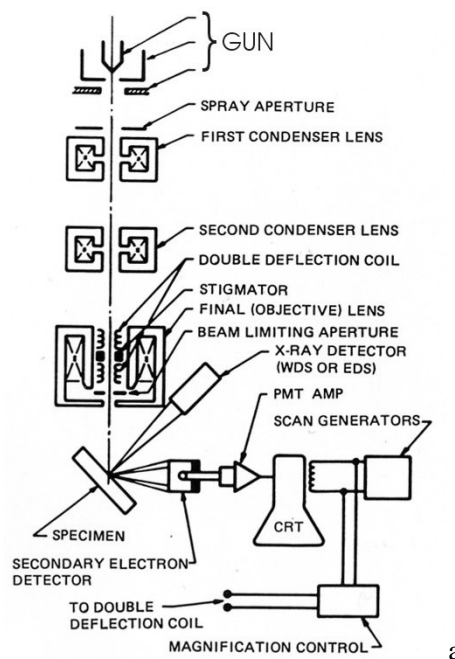


Figura 2.6: Diagramma schematico del funzionamento di un SEM, con raffigurato una combinazione di ottiche per rilevamento di elettroni secondari e raggi-X. Fonte: [4]

Quando il fascio di elettroni colpisce la superficie del campione, penetra fino a una profondità di alcuni micron prima di interagire con gli atomi nel campione (figura 2.7). L'estensione del volume di interazione dipende dalla tensione di accelerazione degli elettroni primari e dalla densità del materiale del campione. Nei campioni a bassa densità, il volume di interazione assume una forma a lacrima, mentre nei campioni costituiti da elementi più pesanti il volume di interazione è emisferico. Una tensione di accelerazione più elevata aumenta la profondità di penetrazione del fascio di elettroni. Molti segnali vengono generati a seguito dell'interazione del fascio di elettroni

CAPITOLO 2: Caratterizzazione del ferro puro

con il campione, i quali possono essere utilizzati per ottenere informazioni sulla topografia e sulla composizione del campione. I due tipi più comuni di rilevatori utilizzati in un SEM sono il rilevatore di elettroni secondari (Secondary Electrons Detector, SED) e il rilevatore di elettroni retrodiffusi (Backscatter Detector, BSD). Inoltre, l'analisi microscopica della composizione superficiale può essere effettuata utilizzando rilevatori di spettroscopia a raggi X a dispersione di energia (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS). [3,4,5]

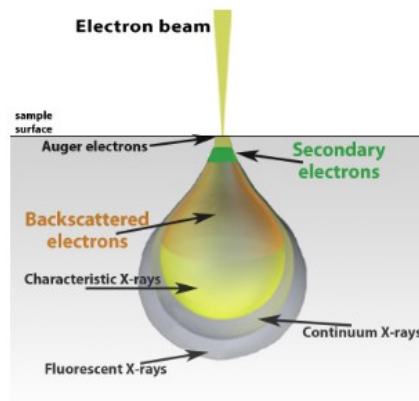


Figura 2.7: Schema di interazione tra il campione da osservare e il fascio di elettroni generato dalla sorgente del SEM. Fonte: [3]

Gli elettroni retrodiffusi (Backscattered Electrons, BSE) si generano a seguito di un'interazione elastica tra gli elettroni del fascio e i nuclei degli atomi costituenti il campione. Questi elettroni vengono raccolti dal rilevatore di elettroni retrodiffusi (Backscatter Electrons Detector, BSED), che permette di ottenere immagini composizionali, con una scala di grigio, dove le zone più scure corrispondono ad elementi con peso atomico minore e quelle più chiare ad elementi con peso atomico maggiore. Questo avviene perché, quando il fascio primario si avvicina al nucleo di un atomo, la carica positiva del nucleo provoca una deviazione dell'elettrone, causandone l'emissione in superficie. La resa degli elettroni retrodiffusi varia in funzione della carica positiva del nucleo e quindi del numero atomico. Gli elettroni secondari (Secondary Electrons, SE) vengono emessi a causa di scattering (dispersione) inelastico o di interazioni che comportano il trasferimento di energia da un elettrone del fascio primario a un atomo del campione. L'energia degli elettroni secondari è inferiore a 50 eV , e poiché hanno energie più basse rispetto agli elettroni retrodiffusi, solo gli elettroni secondari vicini alla superficie (entro poche decine di nm) riescono a emergere dal campione. Le immagini raccolte con i rilevatori di elettroni secondari (Everhart Thornley Detector, ETD, cognomi degli inventori di questo tipo di detector) offrono una migliore risoluzione laterale grazie al volume di interazione relativamente piccolo. Forniscono quindi informazioni dettagliate, tridimensionali e topografiche sulla superficie del campione. I raggi X emessi dal campione vengono utilizzati per analisi spettroscopiche. Questi raggi X sono generati quando un atomo ionizzato si rilassa a uno stato fondamentale, riempiendo un vuoto elettronico in un orbitale interno con un elettrone proveniente da un orbitale superiore. La differenza di

CAPITOLO 2: Caratterizzazione del ferro puro

energia tra i due stati elettronici è equivalente all'energia dei raggi X caratteristici, il che permette di identificare gli elementi che costituiscono il campione sia in maniera qualitativa che semi-quantitativa. [3,4,5]

Il SEM (figura 2.8 e 2.9) utilizzato presso il laboratorio Te.Si. dell'Università degli studi di Padova, che si trova a Rovigo, è il modello *FEI Quanta 450* [33]. Ha a disposizione due detector, uno per gli elettroni retrodiffusi (BSED) ed uno per gli elettroni secondari (ETD). Sono presenti tre modalità di funzionamento: HiVac (High Vacuum) è la modalità a vuoto spinto che si usa normalmente, LowVac (Low Vacuum) che porta la camera in basso vuoto e ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope). La tensione del filamento di tungsteno è solitamente impostata tra i 20 e 25 *kV*, e come massimo può raggiungere i 30 *kV*. Le immagini vengono visualizzate sul monitor del pc con installato il software xT microscope Control [33]. Mediante l'uso dell'interfaccia utente, o della console con potenziometri, si può effettuare la regolazione del fuoco, del contrasto e della luminosità.

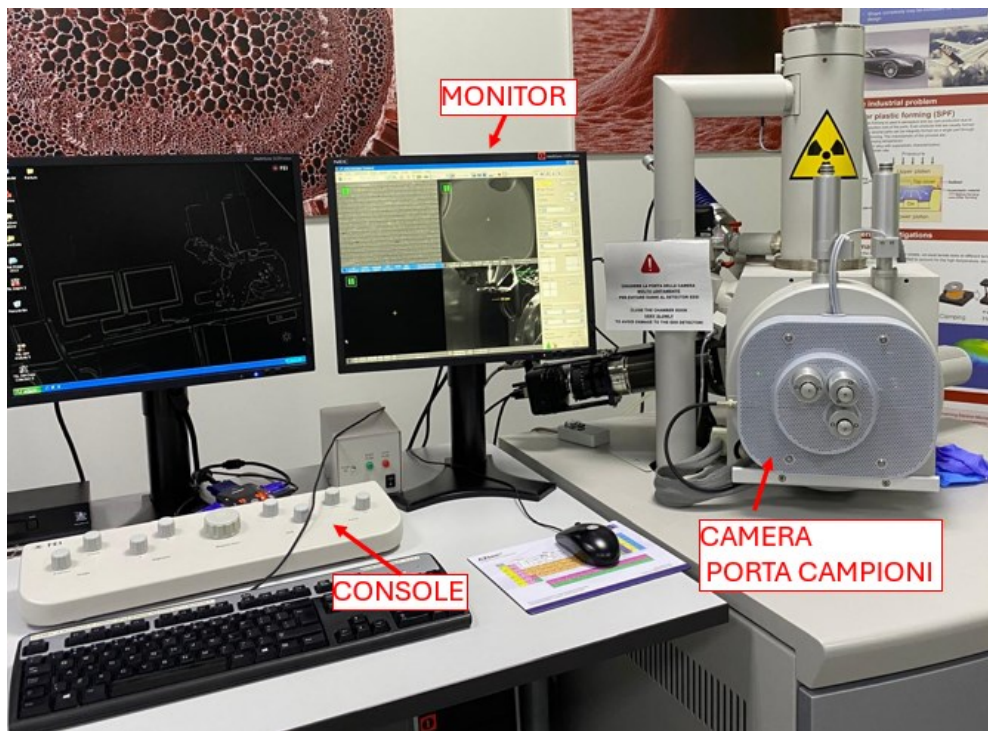


Figura 2.8: Postazione del SEM del laboratorio Te.Si. di Rovigo, Università degli studi di Padova. Attraverso i monitor si osservano, e si acquisiscono le immagini, tramite il software xT microscope Control.



Figura 2.9: SEM FEI Quanta 450. All'interno della colonna verticale viene generato e direzionato il fascio elettronico. La parte frontale si apre a scorrimento e permette di accedere all'interno della camera per posizionare i campioni.

2.2.2 Attacco chimico

Osservando al microscopio ottico la superficie lucidata di campioni metallografici non è possibile osservare caratteristiche strutturali, ma esso è in grado di rilevare solo caratteristiche quali corrosione, crepe, porosità o inclusioni metalliche, questo perché riflettono la luce in modo diverso rispetto al resto del metallo. L'attacco metallografico è eseguito per rendere visibile la struttura cristallina del metallo e produrre un contrasto ottico tra le varie fasi microstrutturali, o strutture multifase, corrodendo in maniera selettiva i bordi grano, effetto visibile in figura 2.10.



Figura 2.10: Effetto dell'attacco chimico sulla riflessione della luce. Fonte: [57]

CAPITOLO 2: Caratterizzazione del ferro puro

Il ferro puro è solitamente attaccato con una soluzione di acido nitrico (HNO₃) e alcool, detta *Nital*, con concentrazione di acido nitrico 2-10%v/v. Questa miscela è in grado di rivelare la microstruttura generale di acciai, incluso i bordi grano e fasi differenti. Oltre alla possibilità di variare la concentrazione dell'attacco, un altro parametro da tenere controllato è il tempo dell'attacco, così da poter ottenere un campione né poco né troppo corrosivo. In tabella 2.2 è riportata la soluzione acida utilizzata e il tempo di attacco.

Denominazione	Composizione	Tempo consigliato [s]	Metodo consigliato	Tempo effettivo [s]	Risultato
Nital	3 ml acido nitrico 97 ml alcool etilico	10 ÷ 60	tamponare o immergere	15	buona distinzione dei grani

Tabella 2.2.: Attacco Nital 3% per l'analisi microstrutturale degli acciai.

Il campione metallografico è stato attaccato versando la soluzione acida con una pipetta e aggiungendo continuamente nuovo reagente. Il tempo di attacco della superficie è stato di 15 secondi, scelto in base alle varie prove eseguite. Per neutralizzare l'acido al termine dell'attacco, il campione è stato immerso in un becher contenente acqua. In seguito, il campione è stato lavato con acqua corrente, etanolo e infine asciugato con aria compressa.

2.2.3 Risultati microstruttura

È stato analizzato un campione ricavato da uno spezzone di barra di *Ferro Puro ARMCO*[®]. L'analisi della microstruttura è stata eseguita sulla sezione trasversale, secondo lo schema in figura 2.11.

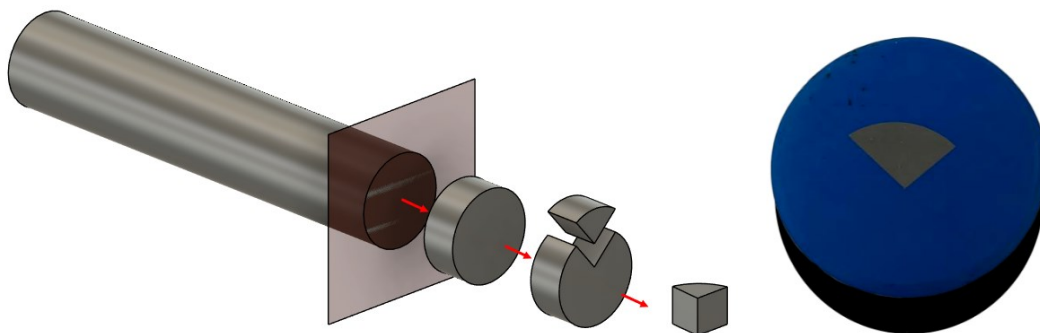


Figura 2.11: Schema di prelievo dei campioni, sezione trasversale e campione reale.

Il campione è stato inglobato con una combinazione di resina *WEM Dap*, azzurro, e *WEM Phenol*, nero, secondo le modalità descritte nel §2.2.1.2. Dopo le fasi di levigatura, lucidatura e attacco chimico, è stato osservato al microscopio ottico a vari ingrandimenti.

CAPITOLO 2: Caratterizzazione del ferro puro

La microstruttura risultante è ferrite. Data l'alta purezza del materiale non vi è presenza di inclusioni non metalliche. Visivamente si osservano grani poligonali con struttura omogenea e bordi netti e ben distinti.

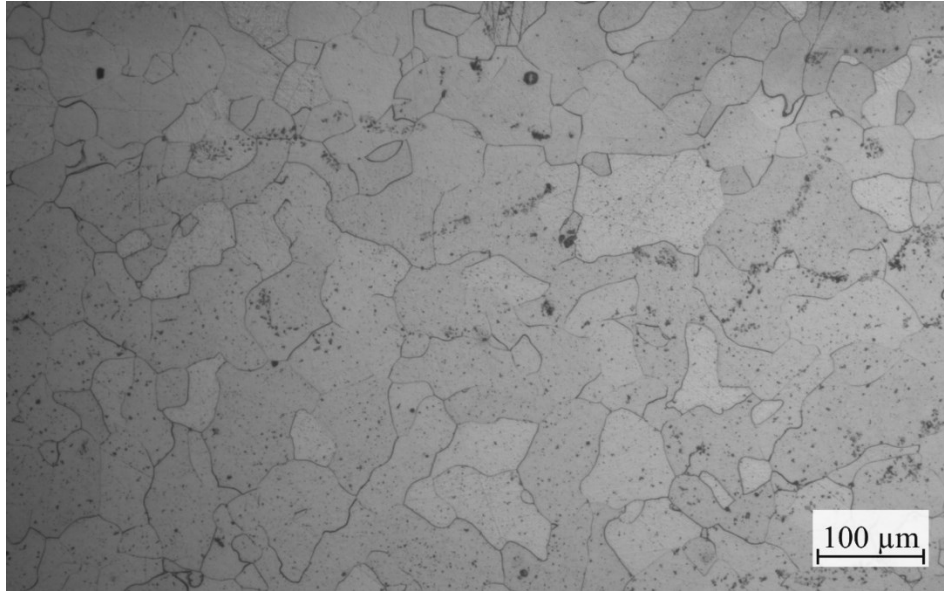


Figura 2.12: Microstruttura di una barra di Ferro Puro ARMCO®, composta da grani di ferrite, sezione trasversale. Attacco: Nital 3%. Ingrandimento 100x LM.

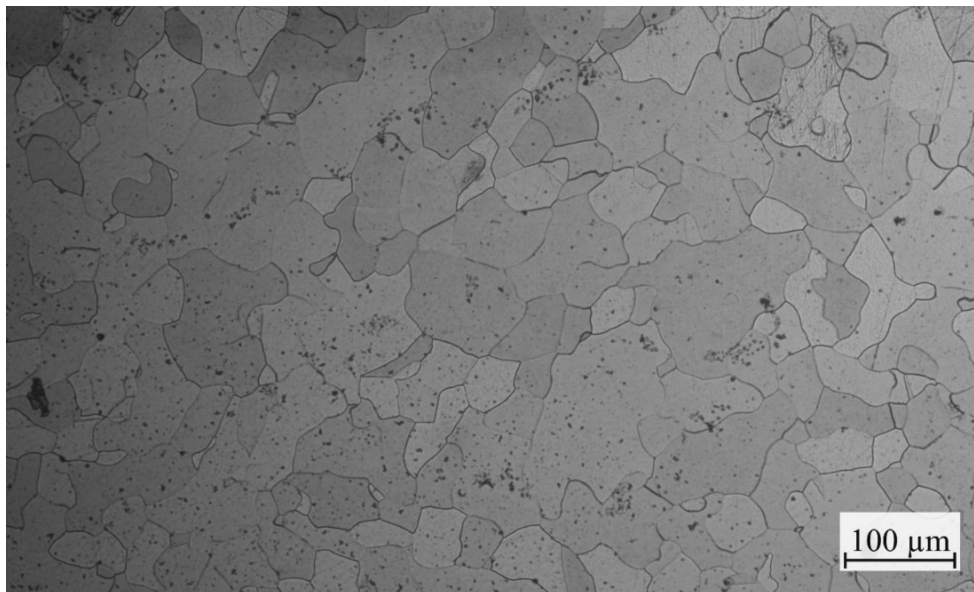


Figura 2.13: Microstruttura di una barra di Ferro Puro ARMCO®, composta da grani di ferrite, sezione trasversale. Attacco: Nital 3%. Ingrandimento 100x LM.

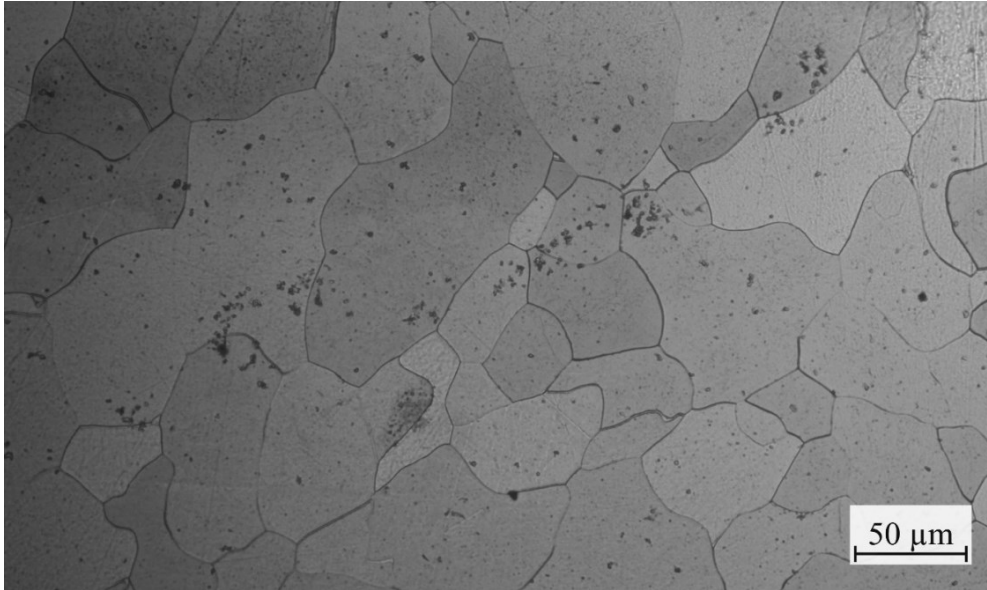


Figura 2.14: Microstruttura di una barra di Ferro Puro ARMCO®, composta da grani di ferrite, sezione trasversale. Attacco: Nital 3%. Ingrandimento 200x LM.

Dalle figure precedenti è possibile calcolare, in maniera approssimata, la dimensione media dei grani. Per fare questo si è utilizzato il software *ImageJ*TM. Dopo una corretta selezione della scala e della zona da elaborare è stato possibile calcolare le aree dei grani di ferrite (figura 2.15). In tabella 2.3 vengono riportati i risultati e in figura 2.16 il diagramma della distribuzione relativa alla dimensione dei grani di ferrite.

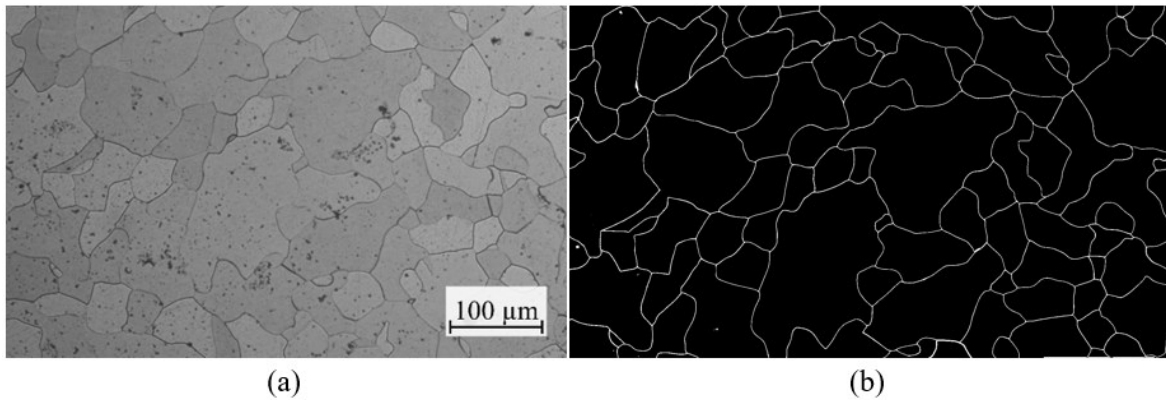


Figura 2.15: Elaborazione immagine LM per il calcolo della dimensione dei grani. (a) area selezionata per l'analisi estrapolata dalla figura 2. La seconda. (b) bordi di grano in evidenza.

Immagini LM (figura 2.12, 2.13, 2.14)		
Area grani (min÷max)	[μm ²]	20,02÷11260,28
Area media grani	[μm ²]	2369,72
Φ* equivalente grani (min÷max)	[μm]	5,05÷119,74
Φ* equivalente medio grani	[μm]	47,87

$$* \Phi_{equivalente} = \sqrt{\frac{4 \cdot Area}{\pi}}$$

Tabella 2.3: Dimensione dei grani di una barra di Ferro Puro ARMCO®, sezione trasversale. Elaborazione mediante il software *ImageJ*TM delle microstrutture in figura 2.

CAPITOLO 2: Caratterizzazione del ferro puro

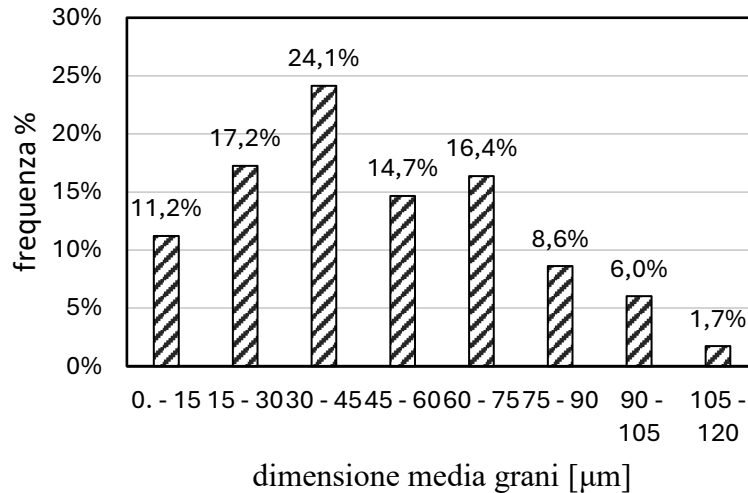


Figura 2.16: Distribuzione della dimensione dei grani della barra di Ferro Puro ARMCO[®], sezione trasversale. Elaborazione mediante il software ImageJ delle microstrutture in figura 2.

La dimensione dei grani può variare in base alla storia termica del metallo, e le dimensioni osservate sono coerenti con quelle riportate in letteratura, ossia ad una granulometria media. Le proprietà magnetiche, così come la duttilità e la lavorabilità del materiale alle macchine utensili, sono correlate alla microstruttura e alla dimensione dei grani. [18, 58, 59]

2.3 Durezza

La durezza è definita come la resistenza che la superficie di un materiale oppone alla penetrazione di un corpo duro di forma e dimensioni prestabilite, detto penetratore. La durezza influenza la resistenza all'incisione, all'usura, al taglio e talvolta alla corrosione. [7]

2.3.1 Microdurezza

Per eseguire le prove di microdurezza Vickers, che utilizza carichi di prova ridotti rispetto alle prove di sola durezza, è stata usata la normativa EN ISO 6507-1 [6]. Dunque, una delle principali differenze tra prove di microdurezza e durezza è il carico e quindi la deformazione imposta al pezzo, minore per la microdurezza. Inoltre, è da tenere presente che la microdurezza cresce con il diminuire del carico di prova, per questo è necessario indicare la forza applicata (tabella 2.4)

CAPITOLO 2: Caratterizzazione del ferro puro

Forza applicata, F [N]	Peso applicato, P [kgf]	Simbolo durezza	Designazione
$F \geq 49,03$	$P \geq 5$	$\geq HV 5$	Test di durezza Vickers
$1,961 \leq F < 49,03$	$0,2 \leq P < 5$	HV 0,2 fino a < HV 5	Test di durezza Vickers a basso carico
$0,009807 \leq F < 1,961$	$0,001 \leq P < 0,2$	HV 0,001 fino a < HV 0,2	Test di microdurezza Vickers

Tabella 2.4: Tre diversi range di carico e forza indicati dalla normativa ISO 6507-1 per il test di durezza Vickers. Fonte: [6]

In questo metodo si usa un indentatore piramidale a base quadrata, solitamente in diamante, con angolo al vertice α ($\alpha = 136^\circ$) il quale viene applicato al campione con forza (a partire da 10 gf) e tempo di mantenimento (15 secondi di norma) controllati (figura 2.17).

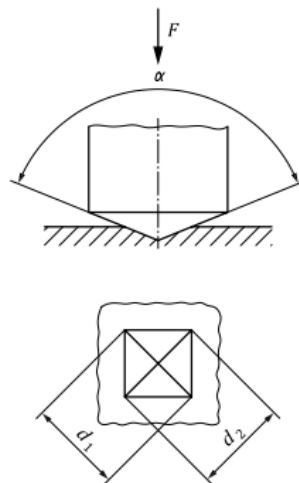


Figura 2.17: Principio di funzionamento del test, geometria dell'indentatore e impronta Vickers. Fonte: [6]

Più grande è l'impronta lasciata sulla superficie del campione ad una data forza e tempo e più soffice è il materiale in esame.

Le prove di microdurezza sono spesso utilizzate per valutare e quantificare variazioni di durezza in piccoli intervalli di distanza, ad esempio dovuti a metodi produttivi, di lavorazione o cambiamenti microstrutturali. Solo le prove di durezza possono essere usate per valutare la durezza massiva del materiale in esame, questo per la possibilità di usare carichi maggiori che introducono minori errori, ad esempio nella misura dell'impronta, sia una maggiore riproducibilità e ripetibilità [7].

Nella scelta del carico di prova un parametro che influisce molto è la dimensione dell'impronta, le quali diagonali devono avere una lunghezza compresa tra 0,020 mm e 1,400 mm. Misure al di fuori da questo range soffrono di una grande incertezza dovuta a limitazioni nella misura ottica e

CAPITOLO 2: Caratterizzazione del ferro puro

ad imperfezioni della geometria della punta. La prova deve essere eseguita su superficie liscia ed uniforme, priva di ossidi, materie inquinanti e lubrificanti. Per metalli duri lo strato di materiale rimosso, durante la levigatura e preparazione del campione, dalla superficie non deve essere meno di $0,2 \text{ mm}$. Lo spessore del campione o dello strato sotto analisi deve essere almeno 1,5 volte la diagonale dell'impronta, e per metalli duri lo spessore del campione deve essere almeno 1 mm . L'indentatore deve essere messo in contatto con la superficie di prova in una direzione perpendicolare, senza shock, vibrazioni o sovraccarico, fino a quando la forza applicata raggiunge il valore specificato. Il tempo dall'applicazione iniziale della forza fino al raggiungimento della piena forza di prova deve essere di 7_{-5}^{+1} s , così che la velocità con cui l'indentatore impatta la superficie è minore di $0,070 \text{ mm/s}$. La durata della prova deve essere di 14_{-4}^{+1} s , o altrimenti specificata se diversa. Visto la possibilità che la deformazione plastica indotta da un'impronta possa influenzarne la successiva, sono definite delle distanze minime tra impronte adiacenti. Nello specifico, per metalli duri, la distanza tra il bordo libero del campione e il centro dell'impronta deve essere almeno 2,5 volte la diagonale, e la distanza tra due centri di impronte vicine deve essere almeno 3 volte la diagonale (figura 2.18).

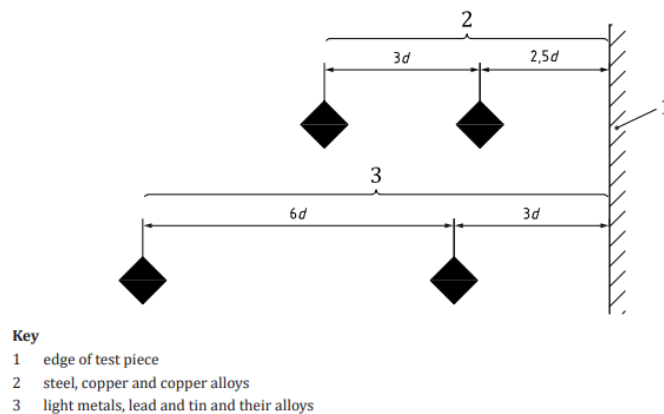


Figura 2.18: Distanza minima tra le impronte. (1) bordo del campione (2) materiali duri, acciaio, rame e leghe di rame (3) materiali leggeri, piombo, stagno e le loro leghe. Fonte: [6]

La durezza Vickers è calcolata tramite la relazione 2.2.

$$HV = 1854,4 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (2.2)$$

Dove:

HV = durezza Vickers, $[\text{kgf}/\text{mm}^2]$

P = peso applicato, $[\text{gf}]$

d = diagonale media = $(d_1+d_2)/2$, $[\mu\text{m}]$

La misura della durezza Vickers viene espressa seguendo questo esempio:

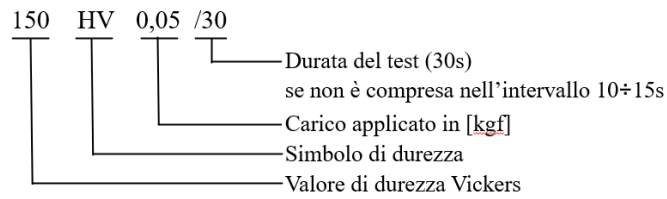


Figura 2.19: Esempio di espressione di una misura Vickers secondo ISO 6507-1. Fonte: [6]

2.3.1.1 Attrezzatura e metodi

Lo strumento usato per le misure di microdurezza è il Microdurometro Miniloat 2 della ditta Leitz™, figura 2.20, presente nel laboratorio dell'Università degli Studi di Padova. Lo strumento ha due obiettivi, uno per la messa a fuoco più grossolana a 5x e l'altro per eseguire le misure a 50x. Inoltre, sono disponibili i seguenti pesi: 10, 15, 25, 50, 100, 200, 300, 500 gf. La figura mostra le varie parti dello strumento. La base è dotata di due viti micrometriche per la regolazione degli assi orizzontali x e y. La distanza del penetratore dalla superficie del pezzo viene regolata inizialmente in modo grossolano tramite una ghiera, che muove l'intero corpo lungo l'asse z. Successivamente, la regolazione della messa a fuoco prevede il movimento della sola testa dello strumento (obiettivi e penetratore) tramite una manopola micrometrica. La discesa del penetratore è azionata tramite un cavo flessibile di rilascio, e le fasi di inizio contatto e fine lavorazione sono indicate con i led posti sulla testa dello strumento. Le varie parti dello strumento sono visibili in figura 2.20. La durata della penetrazione è impostata a 30 secondi, dopodiché con una manopola si solleva il penetratore dal campione.

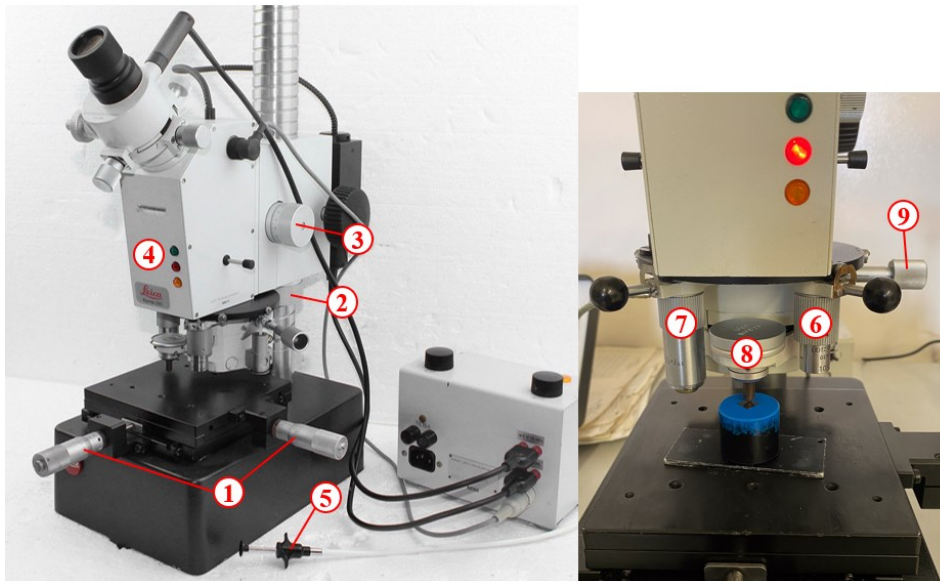


Figura 2.20: Microdurometro Miniloat 2 della ditta Leitz™. (1) viti micrometri per la regolazione della base; (2) ghiera per la regolazione grossolana in z; (3) manopola per la messa a fuoco; (4) testa dello strumento; (5) cavo flessibile di rilascio; (6) obiettivo 5x; (7) obiettivo 50x; (8) penetratore; (9) manopola per il comando di salita del penetratore.

La misura delle diagonali, usate per la determinazione del valore di durezza, può essere eseguita direttamente dall'oculare dello strumento, o si può scegliere di misurarle con un microscopio ottico.

2.3.1.2 Prove di microdurezza

La microdurezza di uno spezzone di barra di ferro puro *ARMCO*[®] è stata determinata con l'utilizzo di un campione inglobato e lucidato, prelevato secondo lo schema di figura 2.11 del §2.2.3. Sono state effettuate 10 misurazioni, utilizzando un carico di 50 *gf*, scelto dopo una serie di prove per garantire una diagonale minima di 20 μm . Il tempo di penetrazione per il microdurometro *Miniload 2* della ditta *Leitz*[™] è impostato a 30 secondi. Per la misura delle diagonali si è scelto di eseguirle con il microscopio ottico *DMR Leica*[®] e il software *Zeiss ZEN core*.

2.3.1.3 Risultati microdurezza

Le 10 impronte sono state eseguite al centro del campione, rispettando una distanza minima tra di esse di 3 volte la diagonale. Le immagini successive mostrano la serie di 10 impronte, e come viene effettuata la misurazione delle diagonali, eseguite con il microdurometro sulla superficie del campione.

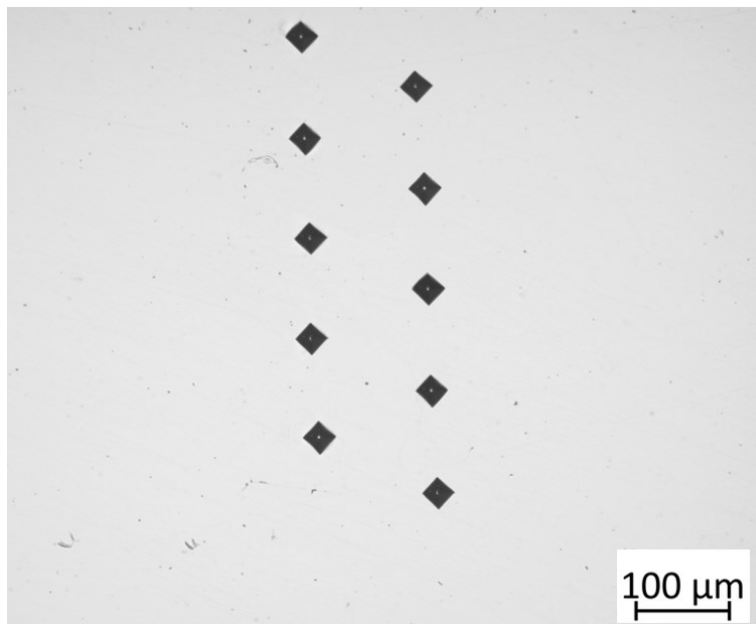


Figura 2.21: Serie di 10 impronte Vickers eseguite con carico di 50 *gf* per 30 s su barra di Ferro Puro *ARMCO*[®], sezione trasversale. Ingrandimento 100x LM.

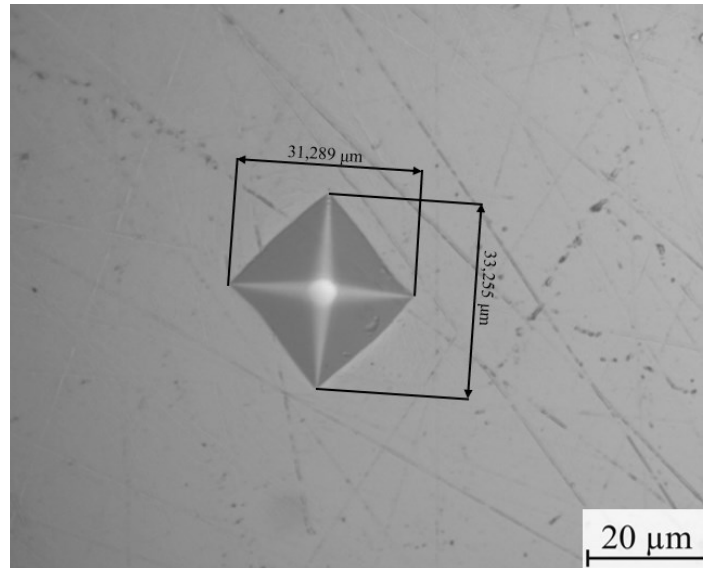


Figura 2.22: Misurazione di un'impronta, eseguita con carico di 50 gf per 30 s su barra di Ferro Puro ARMCO®, sezione trasversale. Ingrandimento 500x LM.

La tabella 2.5 riassume i risultati delle misure delle diagonali e del calcolo della microdurezza utilizzando la relazione 2.2, peso applicato 50 gf.

n	d ₁ orizzontale [μm]	d ₂ verticale [μm]	d media [μm]	HV _{0,05/30}
1	31,96	31,83	31,90	91,11
2	32,702	32,19	32,45	88,06
3	32,49	30,73	31,61	92,79
4	30,89	30,03	30,46	93,00
5	30,94	32,41	31,68	92,41
6	30,95	31,48	31,21	91,00
7	34,37	32,13	33,25	83,88
8	32,61	32,54	32,57	87,39
9	31,17	32,47	31,82	88,00
10	31,29	33,26	32,27	89,03
Media				89,67
Dev. St.				2,92

Tabella 2.5: Misure di microdurezza Vickers su campione di barra Ferro Puro ARMCO®, sezione trasversale.

2.3.2 Nanoindentazione

A differenza dei classici metodi di misura della durezza, ad esempio Vickers, in grado di determinare un solo valore caratteristico, la nanoindentazione consente una misurazione molto precisa e subordinata alla profondità di diversi parametri specifici del materiale.

Nel test di indentazione, un penetratore viene premuto nell'oggetto di prova con una curva di forza definita. Una volta raggiunta la forza massima specificata, il penetratore viene rilasciato in modo controllato. Durante il carico e lo scarico viene registrata la profondità di penetrazione. Dalla

forza applicata, la forma del penetratore (la punta più utilizzata è di tipo Berkovich) e la profondità della rientranza è possibile calcolare diversi parametri.

La norma ISO 14577 consente di valutare l'indentazione dei materiali considerando sia la forza che lo spostamento durante la deformazione plastica ed elastica. Monitorando l'intero ciclo di aumento e rimozione della forza di prova, visibile in figura 2.23, è possibile determinare valori di durezza equivalenti ai valori di durezza tradizionali. In aggiunta è possibile determinare ulteriori proprietà del materiale, come il suo modulo di indentazione e la durezza elasto-plastica. Tutti questi valori possono essere calcolati senza la necessità di misurare otticamente l'impronta. Inoltre, il test di indentazione consente di registrare i profili di durezza e modulo all'interno di un ciclo di indentazione, anche complesso.

La durezza dell'impronta H-IT è la misura della resistenza del materiale alla deformazione plastica. Di solito viene determinata alla massima forza.

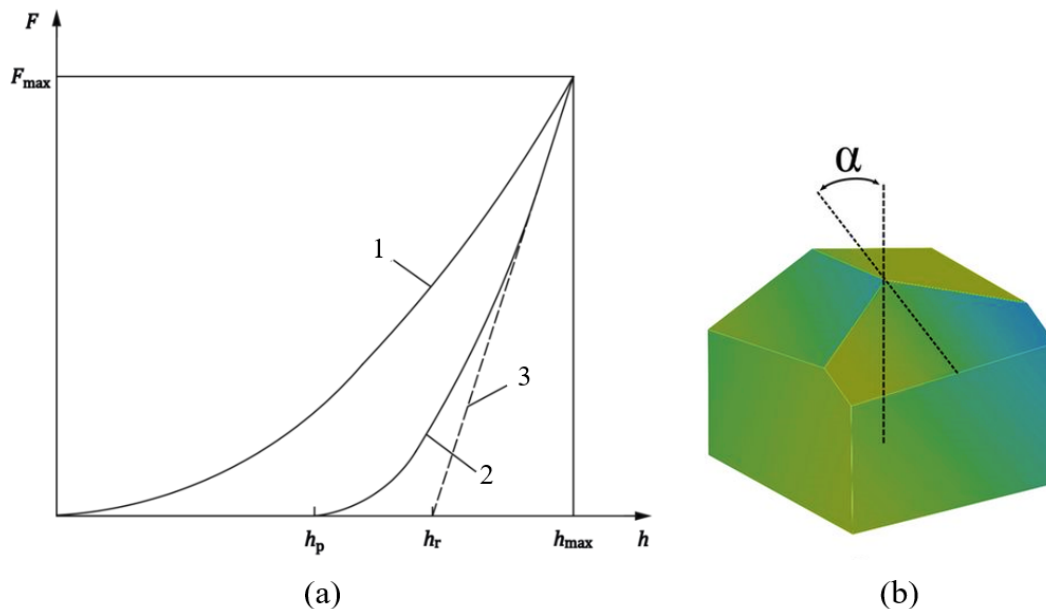


Figura 2.23: (a) Rappresentazione schematica della procedura di test: 1-applicazione della forza, 2- rimozione della forza, 3-tangente della curva 2 alla forza massima. (b) Punta di tipo Berkovich. Fonte: [66]

2.3.2.1 Attrezzatura e metodi

Lo strumento utilizzato per le nanoindentazioni è il modello *iMicro Nanoindenter* della *Nonomechanics, Inc.*, figura 2.24, presente nel laboratorio Te.Si. di Rovigo. Per il posizionamento del campione, impostazione del ciclo di indentazione e misura si utilizza il software *InView*.

CAPITOLO 2: Caratterizzazione del ferro puro

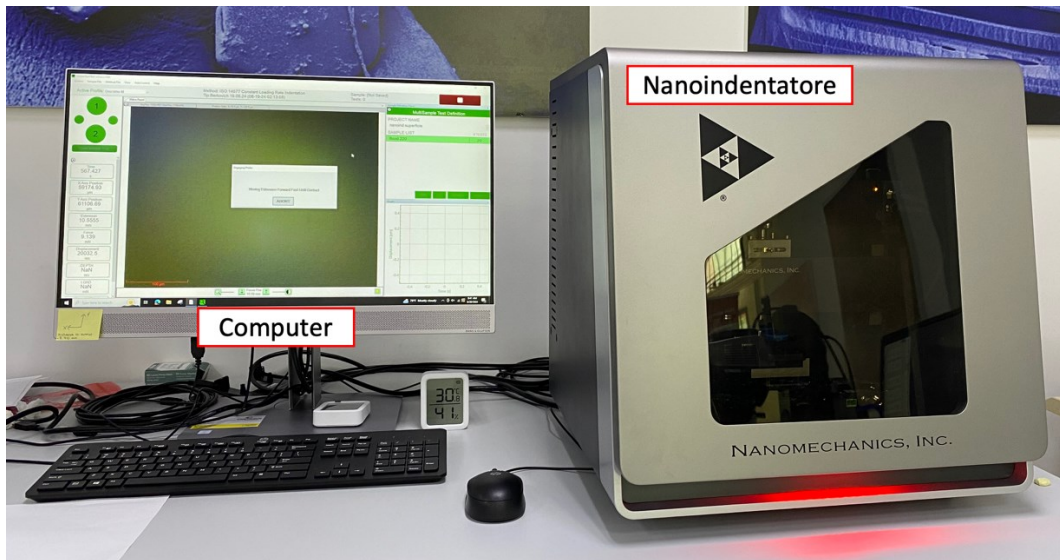


Figura 2.24: Postazione con computer e software, e nanoindentatore per misure di durezza.

CAPITOLO 2: Caratterizzazione del ferro puro

CAPITOLO 3

TORNITURA

3.1 Introduzione

I campioni sono stati ottenuti a partire da una barra di ferro puro *ARMCO*[®], laminata a caldo, con un diametro nominale di 20 mm. I provini sono realizzati con tre diverse strategie di lubrificazione, ossia tradizionale a base acquosa, criogenica con azoto liquido e a secco, con lo scopo di studiare l'influenza del metodo di tornitura sulla morfologia del truciolo e proprietà magnetiche di componenti in ferro puro *ARMCO*[®].

Il taglio per asportazione di truciolo è un'operazione di deformazione plastica severa in cui il materiale viene separato producendo trucioli come risultato finale. Questa trasformazione del sovrametallo in trucioli mette in evidenza una superficie lavorata, che rappresenta il risultato del processo. Lo studio del taglio per asportazione del truciolo può essere semplificato considerando uno schema di base, in cui un utensile a geometria definita, simile a un cuneo, viene messo in contatto con il pezzo da lavorare per ridurne lo spessore mediante la formazione di trucioli, come illustrato in figura 3.1. Da questo modello si possono definire alcuni elementi che saranno necessari per tutta la trattazione successiva:

- α : angolo di spoglia superiore.
- Faccia dell'utensile: superficie dell'utensile su cui scorre il truciolo.
- Dorso/fianco dell'utensile: superficie dell'utensile affacciata alla superficie lavorata.
- Tagliante: segmento individuato dall'intersezione tra faccia e dorso dell'utensile.

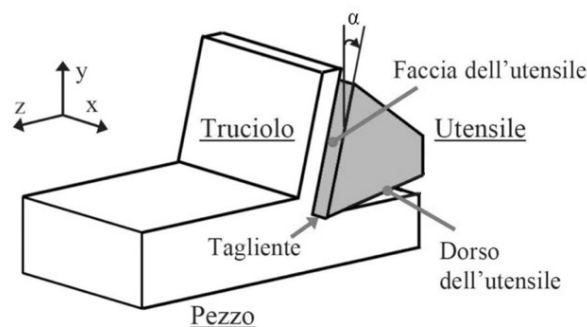


Figura 3.1: Schema di un processo di taglio con utensile e geometria definita. Fonte: [16]

Le lavorazioni per asportazione di truciolo non solo determinano la morfologia superficiale dei componenti, finitura ed integrità superficiale, ma incidono anche sulle loro proprietà meccaniche e funzionali. Durante il processo di taglio, si verificano fenomeni di deformazione plastica, incrudimento superficiale e alterazioni termiche, che possono influenzare lo stato tensionale

residuo e la microstruttura del materiale. Questi aspetti possono avere un impatto sul comportamento magnetico del prodotto, andando a peggiorarne le prestazioni in applicazioni a corrente continua e bassa induzione. [36,39,44]

3.2 Lavorazioni per asportazione di truciolo e tornitura

La tornitura (figura 3.2) è una lavorazione per asportazione di truciolo dove si utilizza una macchina utensile, chiamata tornio (figura 3.3), per ottenere componenti con forme assial-simmetriche da pezzi ottenuti mediante colata, forgiatura o altri processi di formatura.

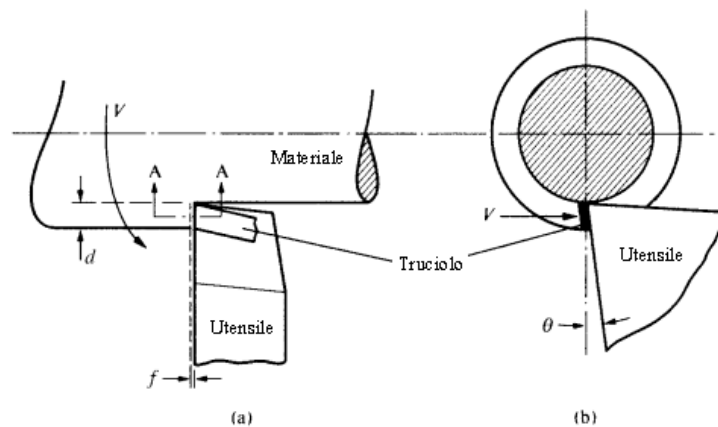


Figura 3.2: Operazione di tornitura a punta singola. (a) Vista in pianta. (b) Vista laterale. Fonte: [12]

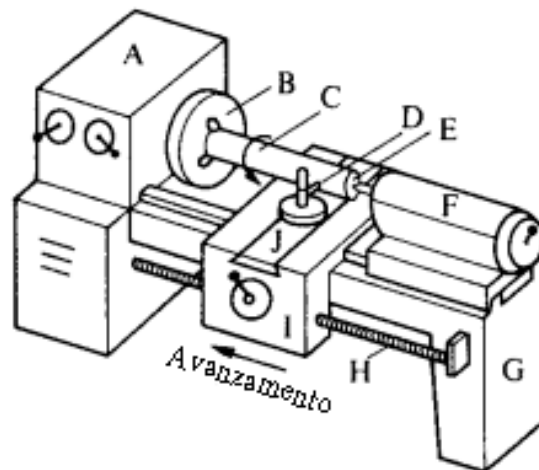


Figura 3.3: Tornio. (A = testa mobile e scatola degli ingranaggi. B = mandrino con griffe. C = pezzo lavorato. D = portautensili. E = centro fisso. F = contropunta. G = basamento. H = vite di avanzamento. I = copertura. J = slitta trasversale. Fonte: [12]

3.2.1 Taglio ortogonale

Le lavorazioni per asportazione sono generalmente di natura tridimensionale, tuttavia, una rappresentazione utile e conveniente per comprendere i principali fenomeni del processo di taglio è utilizzare il modello bidimensionale visibile in Figura 3.4. Questo modello è noto anche come taglio ortogonale, una condizione ideale in cui l'utensile e il pezzo da lavorare sono disposti in modo tale che il tagliente è perpendicolare alla direzione di taglio. L'utensile presenta un angolo di spoglia superiore, α , e un angolo di spoglia inferiore.

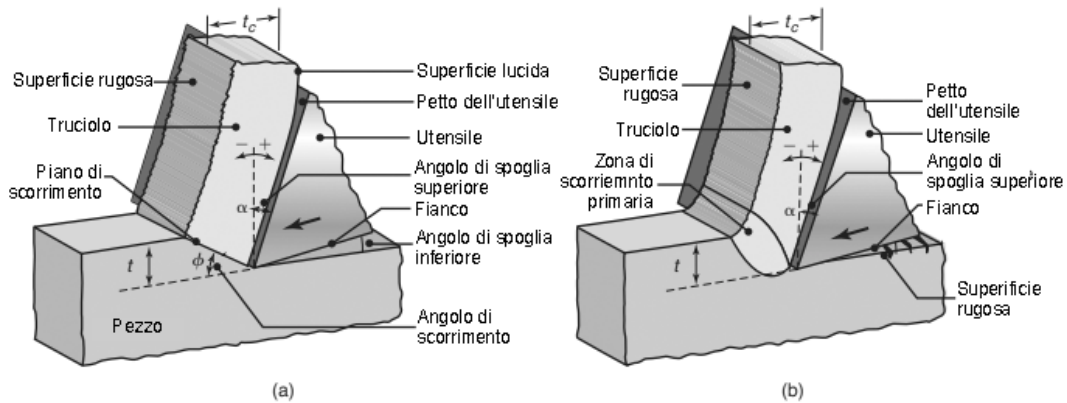


Figura 3.4: Rappresentazione schematica del processo di taglio bidimensionale o taglio ortogonale: (a) taglio ortogonale con piano di scorrimento ben definito, conosciuto come modello di Merchant e (b) taglio ortogonale senza piano di scorrimento ben definito. Fonte: [9]

Un'ipotesi che deve essere fatta è quella di essere in condizioni di taglio stazionario, ovvero considerare grandezze in gioco che non variano nel tempo. Le zone di deformazione, con le morfologie tipiche, sono schematizzate in figura 3.5:

- Zona di deformazione primaria posizionata in prossimità del tagliente.
- Zona di deformazione secondaria posizionata sulla faccia dell'utensile.
- Zona di deformazione terziaria posizionata sul dorso.

Dal punto di vista del processo, la zona di deformazione primaria è la più importante perché più estesa rispetto alle altre due quindi quella che contribuisce di più alla deformazione e all'incrudimento del materiale. La superficie localizzata all'interfaccia truciolo-utensile, in cui si ha scorrimento, individua esattamente l'area di esistenza della deformazione secondaria e va considerata anch'essa nel calcolo delle forze di taglio. Infine, si individua la zona di deformazione terziaria, che è causata dal ritorno elastico della superficie lavorata, e che può causare lo strisciamento con il dorso dell'utensile. [16]

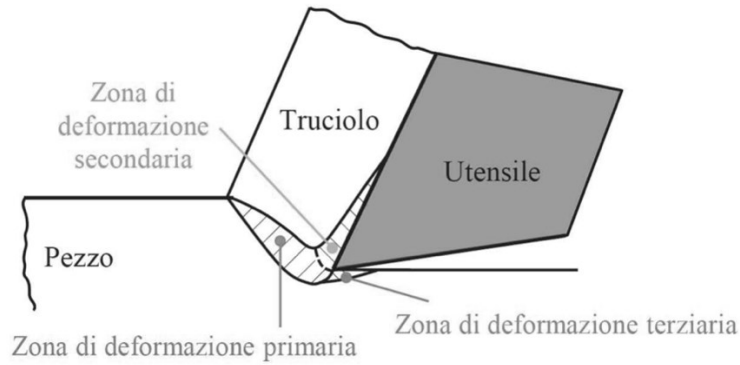


Figura 3.5: Zone di deformazione durante il taglio. Fonte: [16]

Se la zona di deformazione primaria viene confinata su di un unico piano, detto piano di scorrimento, si può considerare la formazione dei trucioli come un meccanismo di scorrimento, figura 3.6. L'angolo Φ , tra il piano di scorrimento e la superficie del pezzo, viene detto angolo di scorrimento. Lo spessore del truciolo, t_c , può essere calcolato a partire dalla conoscenza di t_0 , profondità di taglio, α e Φ . Il rapporto tra t_0 e t_c è noto come rapporto di taglio, r , calcolato come:

$$r = \frac{t_0}{t_c} = \frac{\sin \Phi}{\cos(\Phi - \alpha)} \quad (3.1)$$

L'angolo di scorrimento, Φ , può essere calcolato esprimendo l'equazione 3.1 come:

$$\tan \Phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \quad (3.2)$$

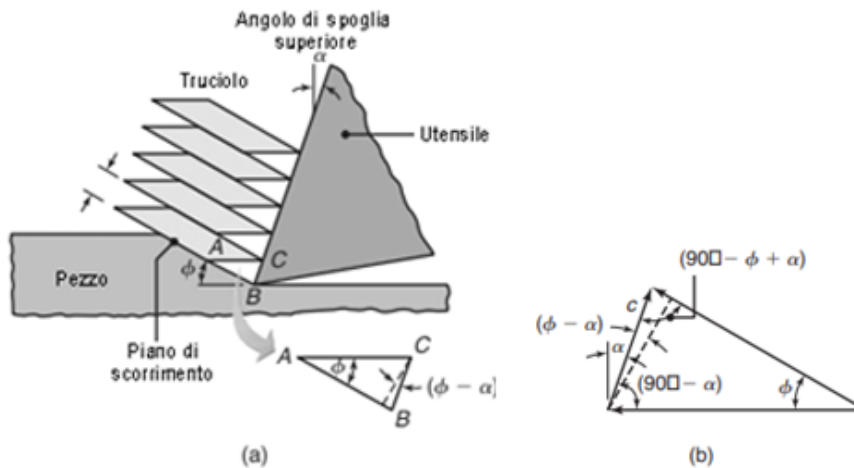


Figura 3.6: (a) Modello di taglio libero ed ortogonale secondo Pijspanen e (b) diagramma delle velocità nella zona di taglio. Fonte: [9]

Un passo avanti nello studio della formazione del truciolo è stato fatto da Ernst e Merchant, durante il periodo della Seconda guerra mondiale, i quali hanno sviluppato due modelli che ancora oggi costituiscono il fondamento della meccanica del taglio. In questo caso l'approccio al processo di taglio viene fatto in accordo con le proprietà meccaniche del materiale in lavorazione,

che ne determinano il comportamento plastico, e considerando l'azione del sistema di forze agente sul truciolo, che ne determina la geometria. Si suppone che la pressione di contatto tra utensile e truciolo sia uniformemente distribuita, e che la risultante delle forze R sia applicata al centro di questa distribuzione (figura 3.7). Essendo in condizioni stazionarie il sistema sarà equilibrato da una forza R' uguale a R in direzione e modulo, ma con verso opposto, che rappresenta la reazione dal materiale all'azione di taglio.

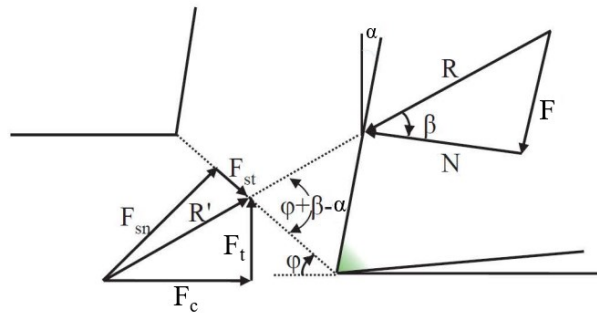


Figura 3.7: Parametri per l'applicazione della teoria di Ernst e Merchant. Fonte: [16]

La forza R può essere scomposta in:

- F : componente della forza tangenziale rispetto al petto dell'utensile (parallela alla faccia dell'utensile).
- N : componente della forza normale rispetto al petto dell'utensile.

Mentre R' può essere scomposta su due diversi sistemi di riferimento e quindi lungo quattro direzioni fondamentali:

- F_{st} : componente di scorrimento tangenziale.
- F_{sn} : componente di scorrimento normale.
- F_c : forza principale di taglio.
- F_t : forza normale alla direzione di taglio.

Il cerchio di Merchant può essere costruito assumendo che tutte le componenti di forza siano applicate sullo spigolo tagliente. Nella costruzione di questo cerchio si è dovuto scrivere le forze di taglio e di scorrimento con orientamento opposto rispetto a quanto visto precedentemente.

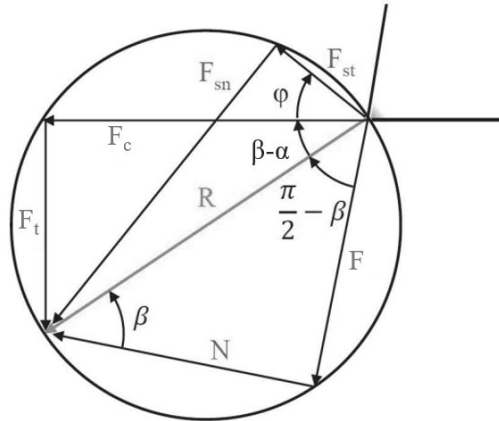


Figura 3.8: Cerchio di Merchant. Fonte: [16]

Esprimendo tutte le componenti in funzione di R e degli angoli di taglio si ottengono le seguenti relazioni.

$$F_c = R \cos(\beta - \alpha) \quad (3.3)$$

$$F_t = R \sin(\beta - \alpha) \quad (3.4)$$

$$F_{st} = R \cos(\Phi + \beta - \alpha) \quad (3.5)$$

$$F_{sn} = R \sin(\Phi + \beta - \alpha) \quad (3.6)$$

$$F = R \sin \beta \quad (3.7)$$

$$N = R \cos \beta \quad (3.8)$$

La forza di taglio, F_c , e la forza normale, F_t , sono le principali componenti oggetto di studio nei processi di asportazione di truciolo. La forza di taglio è responsabile delle potenze necessarie per il taglio, mentre la forza normale deve essere supportata dal sistema di bloccaggio per mantenere il pezzo in posizione. Un approccio sperimentale per la loro determinazione è l'uso di macchine utensili dotate di dinamometri.

L'angolo di spoglia principale α è una caratteristica geometrica intrinseca dello specifico utensile utilizzato, e in quanto tale, è noto in anticipo.

Per quanto riguarda l'angolo di attrito β , questo può essere determinato partendo dalla relazione 3.9 e assumendo che l'attrito sia solo di tipo coulombiano lungo tutto il contatto truciolo-utensile, trascurando quindi adesione in prossimità della punta del tagliente.

$$\mu = \tan \beta = \frac{F}{N} \quad (3.9)$$

CAPITOLO 3: Tornitura

Per calcolare F ed N in funzione di F_c e F_t si considerano le proiezioni di F_c e F_t in direzione di F e di N , come mostrato in figura 3.9, dalle quali si può calcolare:

$$F = \vec{c} + \vec{d} = F_t \cos \alpha + F_c \sin \alpha \quad (3.10)$$

$$N = \vec{b} + \vec{a} = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (3.11)$$

Si ottiene la relazione 3.12, da cui si calcola β , relazione 3.13.

$$\tan \beta = \frac{F}{N} = \frac{F_t \cos \alpha + F_c \sin \alpha}{F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha} = \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c - F_t \tan \alpha} \quad (3.12)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c - F_t \tan \alpha} \right) \quad (3.13)$$

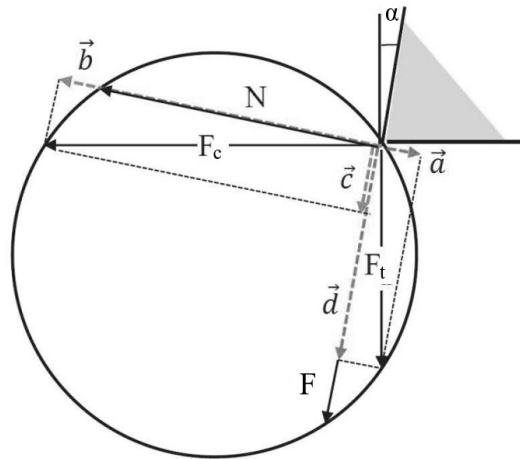


Figura 3.9: Scomposizione di F_c e F_t . Fonte: [16]

Poiché l'angolo di scorrimento e la zona di scorrimento sono molto importanti nella meccanica del taglio, sono stati condotti molti studi per analizzare le relazioni tra l'angolo di scorrimento, le proprietà del materiale e le variabili di processo. Una delle prime analisi, M.E. Merchant, si basa sull'assunzione che l'angolo di scorrimento si adatti in modo tale che la forza di taglio sia minima, oppure che la tensione tangenziale massima si manifesti in corrispondenza del piano di scorrimento. Assumendo che l'angolo di attrito sia indipendente dall'angolo di scorrimento, si può calcolare Φ come:

$$\Phi = 45^\circ + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (3.14)$$

È anche possibile usare la seguente relazione per il calcolo dell'angolo di scorrimento, dopo misure sperimentali dello spessore del truciolo e calcolo del rapporto di taglio.

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \right) \quad (3.15)$$

La deformazione di taglio per scorrimento, γ , che il materiale subisce durante la lavorazione può essere espressa come:

$$\gamma = \cot \Phi + \tan(\Phi - \alpha) \quad (3.16)$$

Da questa equazione si nota che le deformazioni per scorrimento più elevate sono associate a piccoli angoli di scorrimento e ad angoli di spoglia superiore piccoli o negativi. [9]

3.2.2 Taglio obliquo

Nella realtà, le lavorazioni per asportazione di truciolo avvengono quasi sempre con il tagliente dell'utensile inclinato di un certo angolo ψ rispetto alla normale alla direzione di taglio, come mostrato nella figura 3.10. In questo caso, il flusso del truciolo non è più ortogonale al moto, ma segue la direzione f , contenuta nel petto dell'utensile.

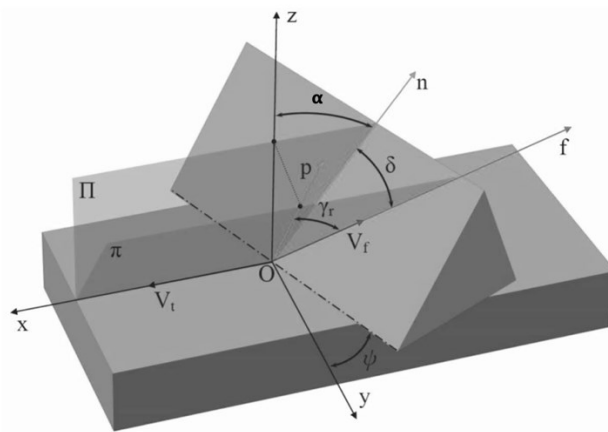


Figura 3.10: Schema del taglio obliquo. Fonte: [16]

Per quanto riguarda le forze in gioco durante il processo nel taglio obliquo la situazione è leggermente diversa rispetto a quella di taglio ortogonale. Con riferimento agli schemi di figura 3.11 si nota come la forza F_t sia scomponibile in due componenti, una assiale (F_a) ed una radiale (F_r). [16]

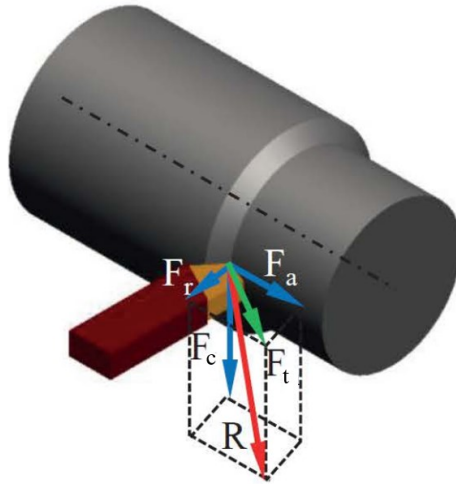


Figura 3.11: Scomposizione delle forze nel taglio obliquo. Fonte: [16]

Per trovare un'analogia con il taglio ortogonale e poter utilizzare le relazioni in esso enunciate, ad esempio per il calcolo del coefficiente di attrito, si considera la forza F_t come la risultante della forza assiale e radiale:

$$F_t = \sqrt{F_a^2 + F_r^2} \quad (3.17)$$

3.2.3 Tornitura

Durante l'operazione di tornitura un utensile di taglio, con uno o più taglienti, viene avvicinato al pezzo in rotazione fissato al mandrino del tornio, per rimuovere il materiale in eccesso e modellarlo secondo la forma desiderata.

Le forze in tornitura equivalgono alle forze nel modello di taglio obliquo, rappresentate in figura 3.12b. I parametri principali per la tornitura sono indicati in tabella 3.1, confrontati con i parametri nel taglio ortogonale.

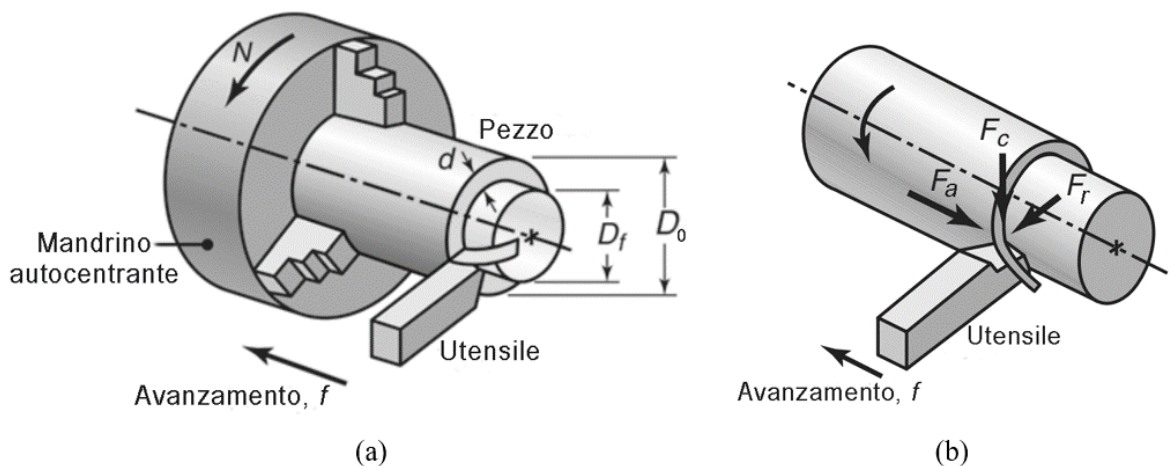


Figura 3.12: (a) Rappresentazione schematica di un'operazione di tornitura; si notino la profondità di passata, d , e l'avanzamento, f . La velocità di taglio è la velocità periferica del pezzo in corrispondenza della punta dell'utensile. (b) Forze agenti sull'utensile in tornitura: F_c è la forza di taglio, F_a è la forza di avanzamento ed F_r è la forza radiale che tende a far allontanare l'utensile dal pezzo in direzione radiale. Fonte: [9]

Tornitura		Taglio ortogonale	
avanzamento al giro	$f [mm/giro]$	$t_0 [mm]$	profondità di taglio
velocità di taglio	$V [m/min]$	$V [m/min]$	velocità di taglio
profondità di passata	$d [mm]$	$t_0 [mm]$	profondità di taglio
forza di taglio	$F_c [N]$	$F_c [N]$	forza di taglio
forza di avanzamento	$F_a [N]$	$F_t [N]$	forza di avanzamento
forza radiale	$F_r [N]$		

Tabella 3.1: Confronto dei parametri in tornitura con quelli nel modello di taglio ortogonale.

Le variabili che sono solitamente regolate dall'operatore del tornio sono la velocità di taglio, l'avanzamento e la profondità di taglio. Per il calcolo della velocità di taglio, di avanzamento, del parametro MRR (material removal rate, volume di materiale asportato nell'unità di tempo), della profondità di passata e del rapporto di taglio, r , si usano le relazioni seguenti, sapendo che N è il numero di giri del mandrino, D_0 il diametro iniziale del pezzo, D_f il diametro finale, \bar{D} il diametro medio, f l'avanzamento al giro e t_c lo spessore del truciolo.

$$V = V(D) = \pi \cdot D \cdot N \left[\frac{m}{min} \right] \quad (3.18)$$

$$V_a = N \cdot f \left[\frac{m}{min} \right] \quad (3.19)$$

$$d = \frac{D_0 - D_f}{2} [mm] \quad (3.20)$$

$$MRR = \pi \cdot \left[\left(\frac{D_0}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_f}{2} \right)^2 \right] \cdot V_a \cong \pi \cdot (\bar{D} \cdot d) \cdot f \cdot N \left[\frac{mm^3}{min} \right] \quad (3.21)$$

$$r = \frac{f}{t_c} \quad (3.22)$$

3.2.4 Misura delle forze di taglio

Poiché la formazione del truciolo è un fenomeno discontinuo, le forze variano costantemente durante la lavorazione. Se il sistema non è abbastanza rigido, possono verificarsi vibrazioni che influenzano negativamente la finitura superficiale e l'accuratezza dimensionale del pezzo lavorato. Questo può anche provocare danni e un'eccessiva usura sia dell'utensile che della macchina utensile.

Per la misura delle forze di taglio durante il processo di tornitura è stato utilizzato il dinamometro 9129AA della ditta Kistler®, figura 3.13. Il dinamometro è costituito da quattro sensori di forza a tre componenti, montati con un elevato precarico tra la piastra di copertura e le due piastre base laterali. Grazie al montaggio speciale dei sensori, l'errore dato da variazioni di temperatura è

piccolo. I sensori di forza contengono ciascuno tre dischi di cristallo, uno dei quali è sensibile alla pressione nella direzione y e gli altri due alla forza di taglio nelle direzioni x o z . I componenti del sistema di misurazione sono progettati in modo che la posizione dell'angolo di taglio sia sempre all'altezza dell'asse di rotazione (centro del pezzo) indipendentemente dall'orientamento del montaggio.

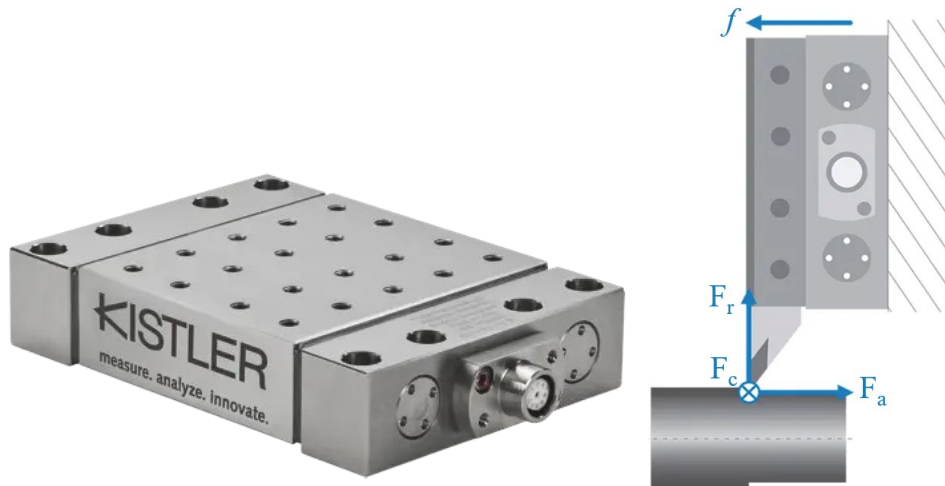


Figura 3.13: Dinamometro multicomponente 9129AA della ditta Kistler® e scomposizione delle forze di taglio. Fonte: [61]

Per la misurazione delle forze si è usata una configurazione, schematizzata in figura 3.14, composta da dinamometro, fissato alla torretta del tornio con apposito adattatore, e un amplificatore di carica *LabAmp 5167A* della ditta *Kistler®*. Il dinamometro è collegato all'amplificatore tramite un cavo a 3 conduttori, modello *1687B* della ditta *Kistler®*. Il segnale di forze digitalizzato viene acquisito da un computer, collegato all'amplificatore con cavo di rete ethernet, tramite l'utilizzo del software *Dynoware*.

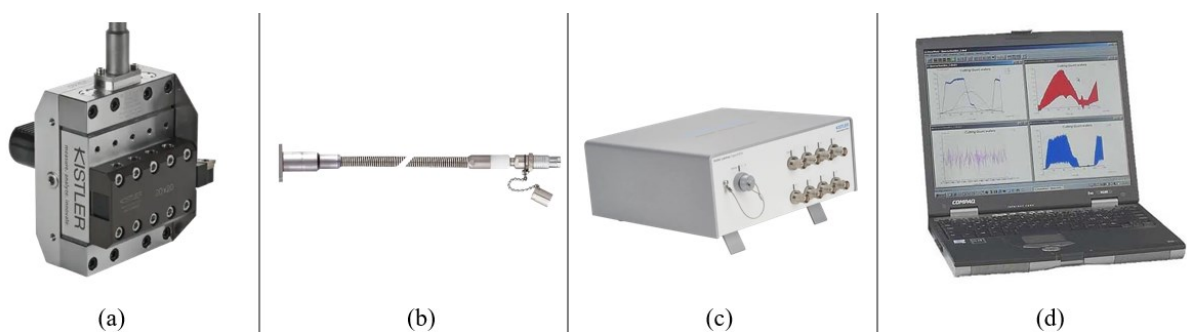


Figura 3.14: Diagramma schematico per la misura delle forze: (a) Dinamometro Kistler® 9129AA con sistema modulare con adattatore per teste portautensili, di tipo a torretta, per la misurazione delle tre forze di taglio F_c , F_r , F_a durante la tornitura; (b) cavo di collegamento a 3 conduttori con guaina in acciaio Kistler® 1687B; (c) amplificatore di carica LabAmp Kistler® 5167A; (d) computer con software Dynoware. Fonte: [61]

3.3 Tipologia di truciolo

Le varie tipologie di truciolo che si formano durante il processo di asportazione influenzano significativamente la finitura e l'integrità superficiale. Il truciolo è composto da due superfici: la prima, che è entrata in contatto con il petto dell'utensile, appare lucida a causa dello sfregamento; la seconda, che rappresenta la superficie originaria del pezzo, presenta un andamento a gradini dovuto al meccanismo di scorrimento. Le diverse morfologie che il truciolo può assumere, illustrate in figura 3.15, sono:

- Truciolo continuo
- Truciolo con tagliente di riporto
- Truciolo segmentato
- Truciolo discontinuo

Il truciolo continuo si forma con alte velocità di taglio e angoli di spoglia superiore elevati. La deformazione del materiale si concentra nella zona di scorrimento primario. Al di sotto di questa zona, il pezzo rimane quasi indeformato, eccetto per una piccola deformazione elastica. L'attrito all'interfaccia utensile-truciolo crea zone di scorrimento secondarie, che aumentano con l'attrito. In alcuni casi, la deformazione nella zona di scorrimento primaria si estende, influenzando il materiale sotto la superficie lavorata, soprattutto con materiali duttili a bassa velocità di taglio e angoli di spoglia ridotti. Questo può portare a scarsa finitura superficiale e tensioni residue. Il truciolo continuo, sebbene associato a una buona qualità superficiale, è negativo poiché tende ad aggrovigliarsi attorno all'utensile. Velocità di taglio elevate e angoli di spoglia superiore ampi riducono la deformazione del materiale, e quindi favoriscono la formazione di truciolo continuo.

Il tagliente di riporto (BUE) è costituito da strati di materiale del pezzo che si accumulano gradualmente sulla punta dell'utensile. Quando diventa instabile, il tagliente di riporto si rompe: la parte superiore viene trascinata via dal truciolo, mentre la parte inferiore si deposita sulla superficie lavorata. Questo fenomeno si ripete continuamente. La durezza del tagliente di riporto aumenta notevolmente a causa dell'incrudimento e della stratificazione del materiale. Il tagliente di riporto altera la geometria dell'utensile e peggiora la finitura superficiale e l'integrità della superficie lavorata. I principali fattori che causano la formazione del BUE sono l'adesione del materiale del pezzo sul petto dell'utensile e la tendenza all'incrudimento del materiale. È possibile ridurre o eliminare il BUE intervenendo sui parametri di taglio, ad esempio aumentando la velocità di taglio, diminuendo la profondità di passata, aumentando l'angolo di spoglia superiore, utilizzando un raggio del tagliente minore e impiegando un lubrorefrigerante efficace.

Il truciolo segmentato è costituito da un numero di elementi collegati, con alcune zone che presentano deformazione elevata ed altre limitata, tipico di metalli con bassa conducibilità termica e resistenza che diminuisce rapidamente all'aumentare della temperatura, come le leghe di titanio e di nichel. Il truciolo ha un aspetto simile ai denti una sega.

Il truciolo discontinuo è costituito da segmenti parzialmente collegati. La sua formazione è solitamente dovuta alla fragilità del materiale, che non è in grado di sopportare l'elevata deformazione presente nelle lavorazioni di taglio. Parametri che influenzano la sua formazione possono essere la presenza di impurità e inclusioni, velocità di taglio molto basse o molto alte, profondità di passata elevate o angolo di spoglia superiore piccolo. Questo processo di formazione è discontinuo, con variazioni costanti delle forze durante la lavorazione. Se le macchine utensili hanno una scarsa rigidità, un'inadeguata capacità di smorzamento delle vibrazioni o non viene utilizzato un fluido lubrorefrigerante efficace, si può verificare la formazione di questo tipo di truciolo, che compromette la finitura superficiale e l'accuratezza dimensionale.

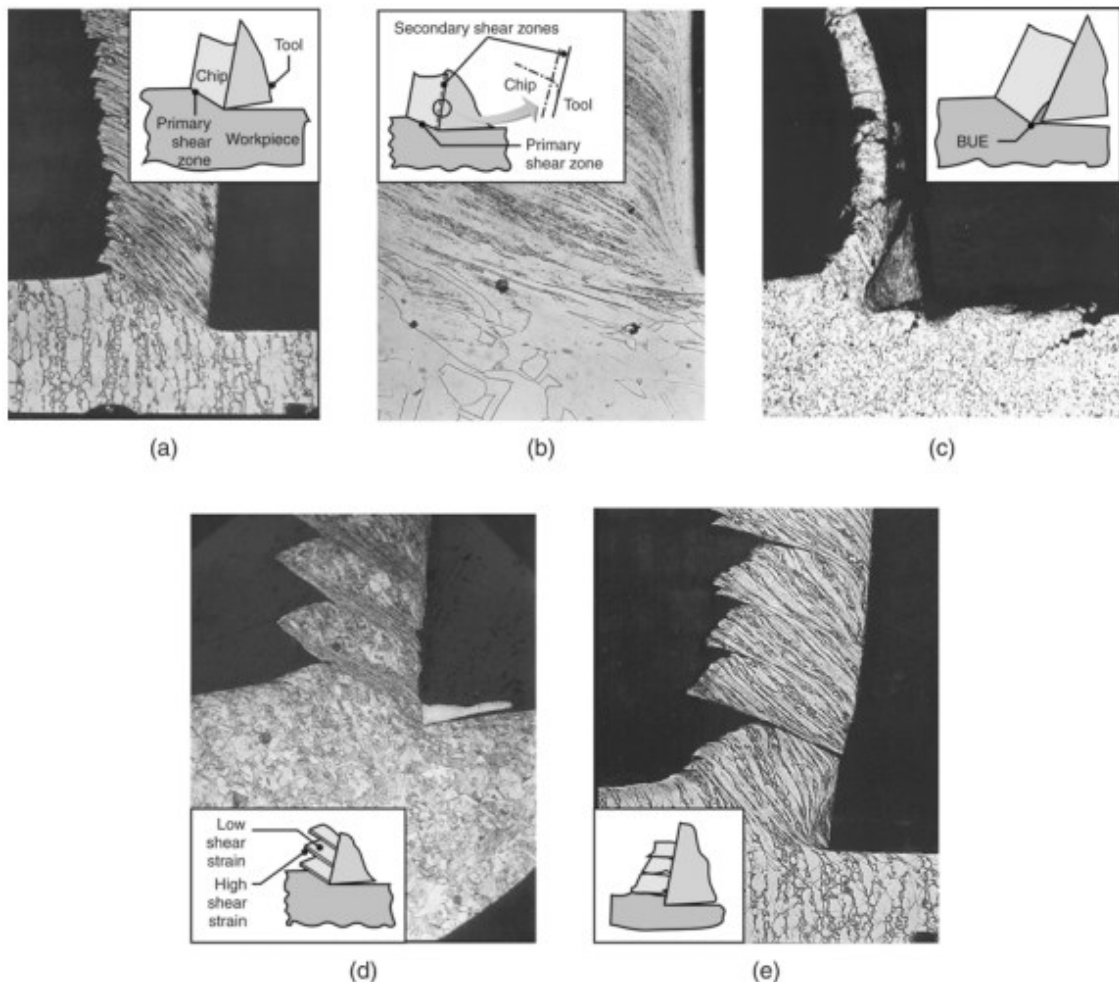


Figura 3.15: Principali tipologie di truciolo prodotto nelle lavorazioni per asportazione e loro micrografie: (a) truciolo continuo con zona di scorrimento primaria stretta e rettilinea, (b) zona di scorrimento secondaria all'interfaccia utensile-truciolo, (c) truciolo continuo con tagliente di riporto, (d) truciolo segmentato, (e) truciolo frammentato discontinuo. Fonte: [9]

3.3.1 Lavorabilità, considerazioni sul materiale di lavoro

La lavorabilità di un materiale valuta la facilità con cui può essere lavorato, considerando durata dell'utensile, finitura superficiale, forza e potenza necessarie, e tipo di truciolo prodotto. Dipende dalla composizione chimica, struttura e compatibilità con gli utensili. Materiali come ferro, alluminio, titanio, nichel, cobalto e rame, e le loro leghe, presentano differenze nelle caratteristiche di lavorabilità a causa delle loro diverse proprietà chimiche e fisiche. Inoltre, acciai con la stessa composizione chimica possono avere diverse lavorabilità se presentano differenti strutture metallografiche.

Il ferro puro è molto morbido da lavorare, la deformazione associata alla formazione del truciolo è grande (piccolo angolo di scorrimento e basso rapporto di taglio) e l'attrito con l'utensile è relativamente alto. La sua lavorabilità può essere migliorata mediante lavorazione a freddo (deformazione plastica a temperatura inferiore di 650 °C) o mediante raffinamento della dimensione della microstruttura prima della lavorazione [12]

3.4 Lubrorefrigeranti e influenza della temperatura

La potenza consumata nella lavorazione meccanica si trasforma principalmente in calore vicino al bordo tagliente dell'utensile, aumentando la temperatura dell'utensile, del truciolo e del pezzo lavorato. Il calore è generato principalmente in due zone di deformazione plastica: la zona primaria, davanti al bordo tagliente, e la zona secondaria adiacente all'interfaccia tra truciolo e utensile, dove viene generato calore aggiuntivo a causa dell'attrito. La temperatura di taglio all'interfaccia utensile ha un notevole impatto sullo stato fisico della superficie lavorata. Alterazioni superficiali, come lo stress residuo termico, la deformazione plastica, l'ossidazione e la trasformazione strutturale metallografica possono verificarsi a causa dei carichi termici e/o meccanici durante la lavorazione.[13] I fluidi lubrorefrigeranti sono usati nelle lavorazioni per asportazione con l'obiettivo di raffreddare la zona di taglio, ridurre l'attrito e usura, aumentare la durata degli utensili e ridurre le forze in gioco. Un fluido lubrorefrigerante può essere prevalentemente un refrigerante o un lubrificante. I fluidi lubrorefrigeranti presentano un problema di natura biologica e ambientale, dal momento che è necessario un opportuno riciclo e smaltimento, aumentando i costi della lavorazione.

Le lavorazioni per asportazione a secco, che non utilizzano refrigeranti o lubrificanti, possono ridurre i problemi ambientali, ma comportano temperature maggiori e usura dell'utensile più rapida. Solitamente le lavorazioni a secco sono associate con le lavorazioni ad alta velocità, visto che elevate velocità di taglio consentono di trasferire una quantità maggiore di calore al truciolo. [9]

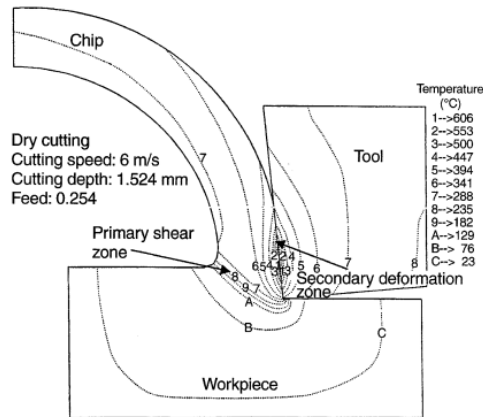


Figura 3.16: Zona di generazione di calore e distribuzione della temperatura di taglio utilizzando come esempio il taglio a secco dell'acciaio a basso tenore di carbonio. Fonte: [13]

3.4.1 Tornitura criogenica

Una recente tecnica per ridurre l'impatto ambientale nella lavorazione dei metalli è l'uso di azoto liquido come refrigerante. Iniettato tramite ugelli all'interfaccia utensile-pezzo, l'azoto liquido (LN₂) abbassa la temperatura, migliorando la durezza e durata dell'utensile e rendendo i trucioli più fragili e facili da rimuovere dalla zona di taglio, facilitando anche il loro riciclo. [9]

Le funzioni principali del raffreddamento criogenico con azoto liquido includono la rimozione efficace del calore dalla zona di taglio, la modifica delle caratteristiche di attrito tra utensile e truciolo, e il cambiamento delle proprietà del pezzo lavorato e dell'utensile.

Le strategie di raffreddamento criogenico comprendono:

- congelamento del pezzo lavorato;
- distribuzione del criogeno all'interfaccia utensile/truciolo o utensile/pezzo;
- raffreddamento dell'utensile da taglio. L'obiettivo di questo metodo è raffreddare la zona di taglio, in particolare l'interfaccia utensile-truciolo, con azoto liquido utilizzando degli ugelli (figura 3.17). L'azoto liquido viene applicato al tagliente e al fianco principale dell'utensile, dove il materiale viene tagliato e si forma la temperatura massima [14];
- raffreddamento del truciolo;

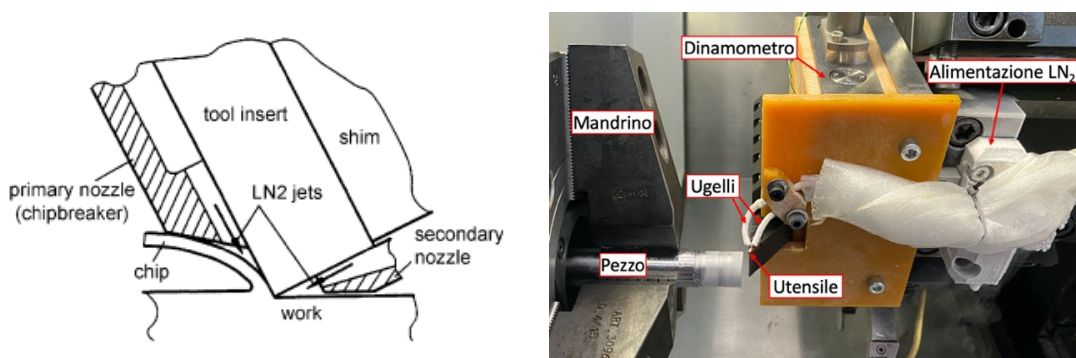


Figura 3.17: Diagramma schematico del sistema di ugelli per azoto liquido e configurazione della tornitura criogenica. Fonte: [14]

Il sistema di alimentazione dell'azoto liquido è stato progettato appositamente per la tornitura e con particolare cura per garantire il funzionamento del dinamometro durante il suo utilizzo. Gli ugelli, realizzati in rame e saldobrasati su un porta-ugelli in ottone, hanno un diametro interno di 0,9 mm. Questi ugelli sono montati su un porta-ugelli e su una piastra in resina, per isolare termicamente il dinamometro. Il porta-ugelli è avvitato su un apposito supporto, fissato alla torretta portautensili.

L'azoto è immagazzinato in un contenitore dewar e mantenuto alla pressione di 15 bar. Il dewar, figura 3.18, è un contenitore isolato termicamente con un'intercapedine sottovuoto, progettato principalmente per immagazzinare gas criogenici. L'azoto liquido è posizionato nel fondo del contenitore, in equilibrio con il suo gas.

Per ottenere azoto in forma gassosa, l'azoto liquido viene fatto passare in una serpentina detta vaporizzatore, al di fuori del serbatoio interno, nella quale si riscalda e vaporizza.

Per utilizzare l'azoto in forma liquida, questo viene prelevato dal fondo e portato alla valvola "2". La pressione del liquido è determinata dalla pressione del gas che lo sovrasta. Questa può essere regolata estraendo azoto liquido, facendolo evaporare all'interno di una apposita serpentina posta all'esterno del contenitore interno e reintroducendolo dall'alto sotto forma di gas. Questo processo è controllato per mantenere costante la pressione, evitando variazioni che potrebbero influire sulla qualità del processo di lavorazione, come la tornitura. L'azoto liquido è convogliato agli ugelli attraverso un tubo flessibile metallico, anch'esso isolato tramite vuoto. A monte del tubo flessibile è presente un'elettrovalvola normalmente chiusa, controllata manualmente tramite pulsanti di avvio e arresto, che regola il flusso di refrigerante verso gli ugelli.

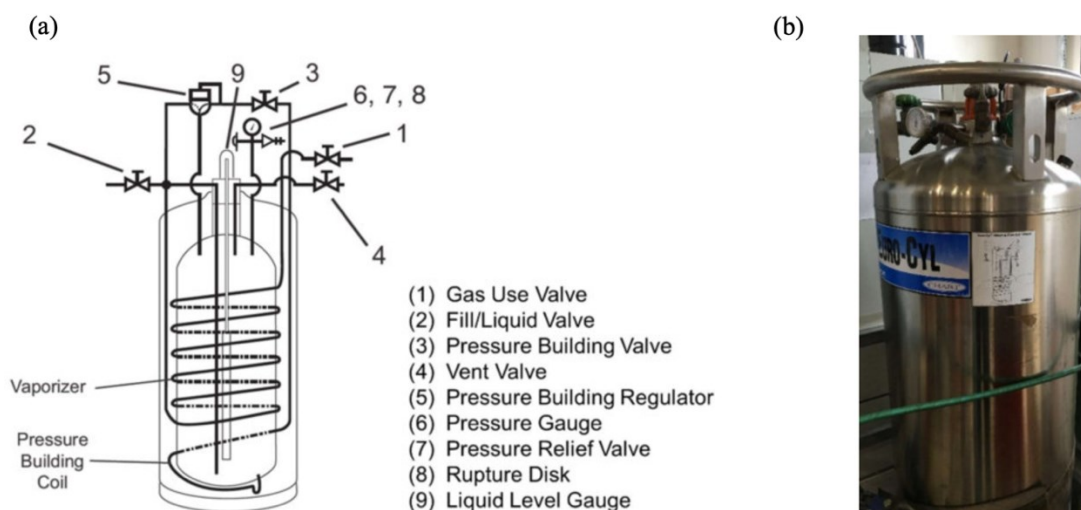


Figura 3.18: Contenitore dewar per azoto liquido. (a) schema di funzionamento. (b) contenitore utilizzato durante la tornitura criogenica.

Dato l'assenza di studi specifici sulla lavorazione per asportazione del truciolo con raffreddamento criogenico del ferro puro, ci si è basati sulla lavorazione di materiali che presentano caratteristiche simili.

Acciai a basso tenore di carbonio, come AISI-SAE 1010, presentano una transizione duttile-fragile data dalla presenza di ferrite nella microstruttura. Come il ferro puro, questi acciai soffrono di una scarsa lavorabilità a causa della difficoltà nel rompere i trucioli, oltre ad essere duttili e con bassa durezza. Mediante raffreddamento a getto criogenico è stata osservata una riduzione dell'attrito tra il petto dell'utensile e il truciolo rispetto alle condizioni a secco, questo perché il materiale è reso più duro e per la formazione di un cuscinetto fluido/gassoso che fornisce un effetto lubrificante, che assorbe anche il calore. [13,14]

La diminuzione del coefficiente di attrito, nella lavorazione dell'acciaio al carbonio S45C, è attribuita alla minore facilità con cui le asperità si deformano alle più basse temperature. Questo effetto tribologico riduce l'area di contatto effettivo e quindi la forza di attrito adesiva (figura 3.19). [48]

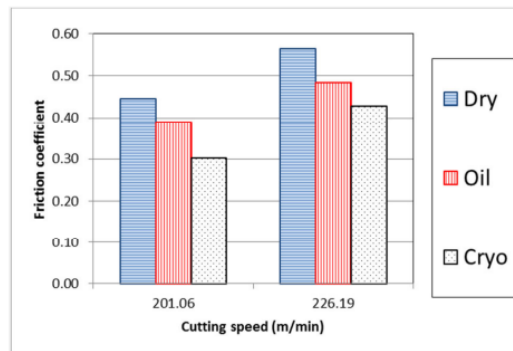


Figura 3.19: Coefficiente di attrito per la lavorazione dell'acciaio al carbonio S45C. Fonte: [48]

Al contrario di quanto avviene per materiali considerati difficili da lavorare, come il Titanio e sue leghe, nella lavorazione criogenica di leghe di alluminio si osserva una diminuzione delle forze di taglio con l'applicazione di azoto liquido rispetto alla lubrificazione tradizionale, questo per un effetto di riduzione dell'attrito all'interfaccia utensile-truciolo (figura 3.20). [49,53]

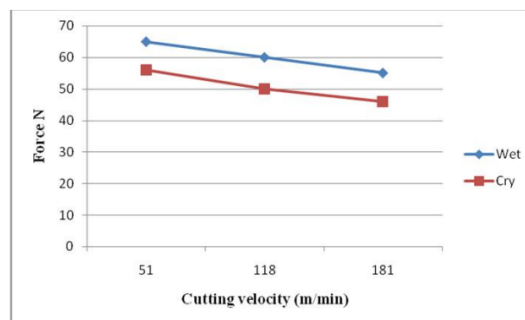


Figura 3.20: Forza di taglio, per lega di alluminio 7075, al variare della velocità di taglio, avanzamento 0,079 mm/giro. Fonte: [49]

3.5 Usura degli utensili da taglio

L'usura è un fenomeno di perdita progressiva di materiale superficiale. Nelle lavorazioni meccaniche, si manifesta principalmente sugli utensili da taglio e sugli stampi. Sebbene di solito degradi la superficie, può anche avere un effetto positivo di riduzione della rugosità superficiale eliminando i picchi delle asperità. [9] I tipi di usura, come labbro di usura, cratere di usura e scheggiatura del tagliente, sono influenzati da vari fattori, tra cui i materiali dell'utensile e del pezzo, la geometria dell'utensile, i fluidi lubrificanti e i parametri di processo (velocità di taglio, avanzamento e profondità di passata).

La norma internazionale ISO 3685 [15] definisce:

- usura dell'utensile: il cambiamento della forma dell'utensile rispetto alla sua forma originale, durante il taglio, causato dalla graduale perdita di materiale dell'utensile o dalla deformazione.
- Misura dell'usura dell'utensile: una dimensione da misurare per indicare la quantità di usura dell'utensile

Per misurare l'usura, il tagliente principale è diviso in quattro zone, come mostrato in figura 3.21:

- Zona C: la parte curva del tagliente all'angolo dell'utensile.
- Zona B: la parte restante dritta del tagliente tra la zona C e la zona A.
- Zona A: il quarto della lunghezza del tagliente usurato più lontano dall'angolo dell'utensile.
- Zona N: si estende oltre l'area di contatto reciproco tra l'utensile e il pezzo lavorato per circa 1-2 mm lungo il tagliente principale.

La larghezza dell'usura del fianco (labbro di usura) VB_B deve essere misurata all'interno della zona B del bordo di taglio nel piano P_s perpendicolare al tagliente principale. La larghezza del piano di usura del fianco deve essere misurata dalla posizione del tagliente principale originale.

Il ferro puro è un materiale tipicamente facile da lavorare ma con un'elevata plasticità e tenacità. L'incrudimento e la deformazione plastica tendono ad essere seri, e il ferro puro aderisce facilmente alla faccia dell'utensile formando uno strato di riporto (BUL) e un tagliente di riporto (BUE), il che porta a un'usura rapida dell'utensile. [19,22]

Nel processo di tornitura del ferro puro, la forma principale di usura dell'utensile è l'usura per adesione e l'usura per fatica, accompagnate da usura abrasiva e usura per diffusione. [20,21]

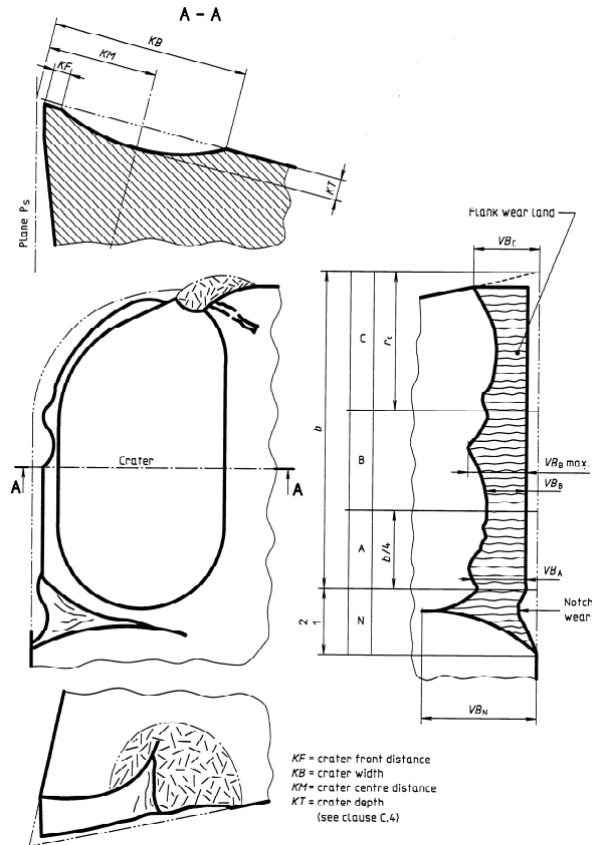


Figura 3.21: alcuni tipi di usura negli utensili da taglio per tornitura. Fonte: [15]

3.6 Tornitura dei campioni

3.6.1 Scelta degli utensili

Per tornire i campioni, sono stati impiegati inserti in metallo duro rivestito (HC) con deposizione PVD di nitruro di alluminio e titanio (TiAlN). Il modello di inserto utilizzato è il *VCEX 11 03 01-LF 1125* (figura 3.22), appartenente alla famiglia *CoroTurn®107* della ditta *Sandvik Coromant™*.

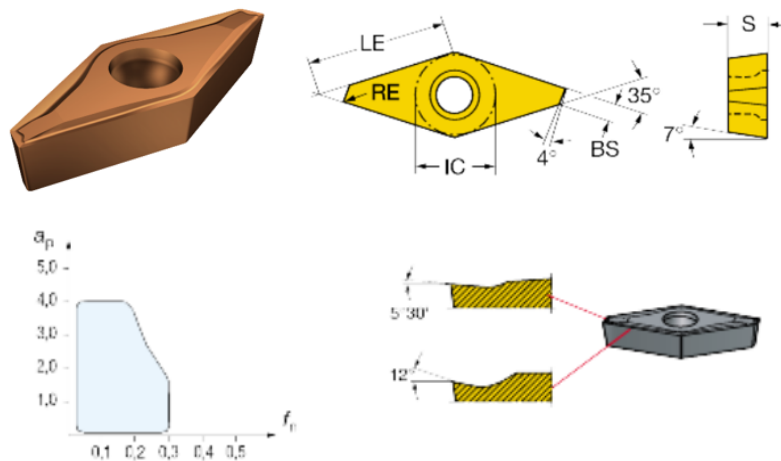


Figura 3.22: Inserti per tornitura *CoroTurn®107 VCEX 11 03 01-LF 1125* della ditta *Sandvik Coromant™* e grafico con parametri di taglio ottimali consigliati. Fonte: [23]

Questo tipo di inserti è adatto a lavorare materiali della classe ISO P, ossia il gruppo degli acciai. È la categoria di materiali più ampia nel settore del taglio dei metalli e spazia da materiali non legati a materiali fortemente legati; comprende i getti di acciaio e gli acciai inossidabili ferritici e martensitici. La lavorabilità è normalmente buona ma può variare di molto a seconda della durezza del materiale, del tenore di carbonio, ecc. [24].

La geometria e i parametri di taglio consigliati dal produttore sono forniti solo per i materiali ISO M, ossia acciai inossidabili legati con un minimo del 12% di cromo, riportati in tabella 3.2. Questi valori sono stati presi di riferimento per la scelta dei parametri di taglio utilizzati nelle prove di tornitura.

Caratteristica	Valore
numero di taglienti	2
forma dell'inserto	V: rombica 35°
raggio di punta, R	0,1 mm
angolo di spoglia superiore, α	5,5°
angolo di spoglia inferiore, ζ	7°
materiale del substrato	HC
rivestimento	PVD TiAlN+TiAlN
Parametri di taglio per materiali ISO M	Valore
profondità di passata, d	1 mm (0,05-4)
avanzamento al giro, f	0,1 mm/giro (0,01-0,3)
velocità di taglio, V	205 m/min (205-125)

Tabella 3.2: caratteristiche e parametri di taglio consigliati per gli inserti CoroTurn® 107 VCEX 11 03 01-LF 1125 della ditta Sandvik Coromant™. Fonte: [23]

Prima di iniziare le operazioni di tornitura, è stata effettuata una selezione degli inserti da impiegare. Questa selezione è stata fatta per garantire che gli inserti rispettassero le specifiche dimensionali dichiarate dal produttore e che il rivestimento superficiale mantenesse un certo livello di integrità. La valutazione della qualità dei taglienti è stata effettuata tramite osservazione al SEM. La procedura di analisi con il microscopio a scansione elettronica è descritta nel § 2.2.1.6. Gli inserti, essendo conduttivi, sono assicurati alla tavola porta campioni con del nastro biadesivo al carbonio. Gli inserti, avendo due taglienti principali, sono classificati con una numerazione crescente e con denominazione A e B. In breve, la procedura di preparazione e analisi:

- Lavare ad ultrasuoni per circa 3 minuti in un becher contenente alcool denaturato trasparente.
- Estrarre gli inserti utilizzando esclusivamente guanti in nitrile, evitando di toccare direttamente la zona da esaminare.
- Asciugare con un phon.
- Applicare del nastro biadesivo al carbonio sulla tavola porta campioni, rimuovere la pellicola protettiva con l'ausilio di pinzette e disporre gli inserti.
- Regolare l'altezza degli inserti a circa 10 mm dalle lenti del microscopio.

- Eseguire le analisi selezionando il detector più appropriato (BSED o ETD) e impostare la tensione di lavoro del filamento e la dimensione del fascio.

La figura 3.23 mostra gli inserti posizionati all'interno del SEM per la valutazione dello stato del petto, e la numerazione di questi nella loro scatola.

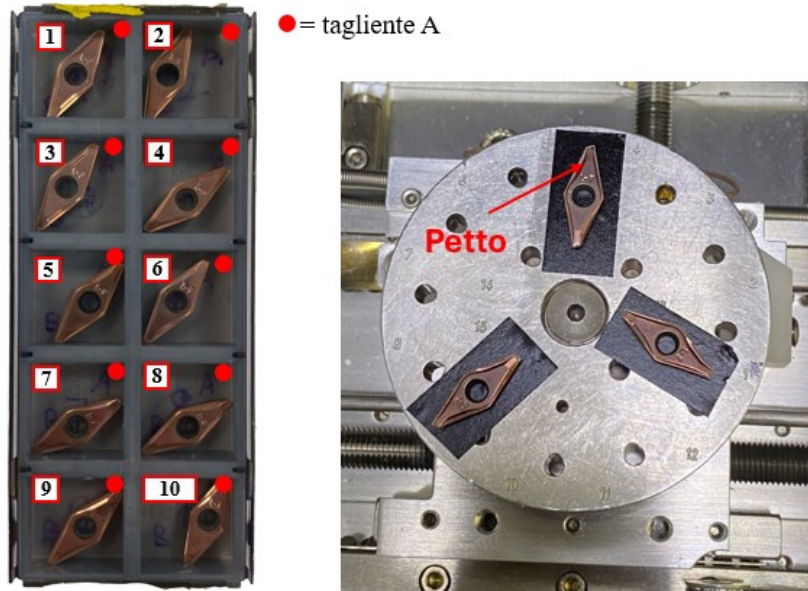


Figura 3.23: Numerazione degli inserti per tornitura e disposizione di questi nella tavola porta campioni del SEM FEI Quanta 450, presso il laboratorio Te.Si. di Rovigo, Università degli studi di Padova.

3.6.2 Parametri di lavorazione

Nel laboratorio Te.Si di Rovigo dell'Università degli studi di Padova è presente un centro di tornitura a due assi, modello *NL1500MC/500* della ditta *DMG MORI SEIKI™* con una torretta porta utensili a 12 posizioni equipaggiabili con utensile per tornitura e frese. Il tornio a controllo numerico è raffigurato in figura 3.24 e le sue principali caratteristiche tecniche in tabelle 3.3.

Potenza rete [kw]	Potenza motore [kW]	V. max. mandrino [giri/min]	Corsa asse X [mm]	Corsa asse X [mm]	Corsa contropunta [mm]	N° stazioni utensile	V. max. utensile [giri/min]
23,5	11	6000	260	590	564	12	6000

Tabella 3.3: Principali caratteristiche tecniche del tornio *NL1500MC/500* della ditta *DMG MORI SEIKITM*. Fonte: [60]



Figura 3.24: Torno a controllo numerico NL1500MC/500 della ditta DMG MORI SEIKI™.

Sono state tornite 3 serie di campioni denominati Crio, Lubr e Secco, rispettivamente utilizzando azoto liquido, un lubrificante tradizionale e a secco. Ogni tagliente dell'inserto è stato usato una sola volta per realizzare un solo provino. I parametri di taglio per la fase di finitura, indipendentemente dalla lubrificazione, sono:

- Profondità di passata: $d = 0,25 \text{ mm}$
- Avanzamento al giro: $f = 0,05 \text{ mm/giro}$
- Tre velocità di taglio, scelte all'interno dell'intervallo consigliato dal produttore degli inserti: $V = 110, 165, 220 \text{ m/min}$

Per ogni serie e per ogni velocità di taglio si è scelto di eseguire due campioni. La codifica dei campioni è stata impostata nel modo seguente:

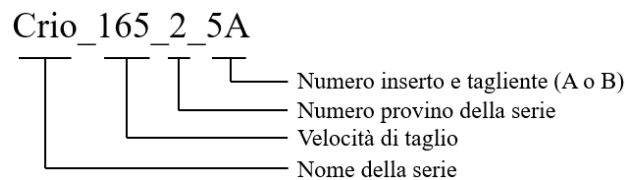


Figura 3.25: Sistema di codifica dei campioni.

Si è deciso di ottenere dopo la lavorazione di tornitura dei campioni cilindrici di diametro 18 mm e altezza 8 mm , a partire da uno spezzone di barra di diametro 20 mm . La tornitura è stata divisa in quattro fasi, figura 3.26:

- 1) Sgrossatura, eseguita per preparare gli spezzone di barra alle successive prove di tornitura. In questa fase si è voluto rimuovere lo strato ossidato di materiale presente sulla barra fornita dal produttore.
Sono state eseguite due passate con profondità $d = 0,25\text{ mm}$, avanzamento $f = 0,04\text{ mm/giro}$ e velocità di taglio $V = 240\text{ m/min}$, utilizzando un utensile da taglio sacrificale, non designato alla valutazione dell'operazione di taglio, e lubrificazione a base acqua. Il diametro della barra viene ridotto da 20 mm a 19 mm .
- 2) Troncatura per creare dei solchi di scarico. Lo scopo di questa fase è andare a creare dei solchi ad intervalli regolari di 12 mm (8 mm per il campione e 4 mm di spessore dell'utensile da troncatura). Il diametro della barra, all'interno dei solchi, viene portato da 19 mm a $17,3\text{ mm}$. Lo spezzone è così suddiviso per facilitare la successiva fase di finitura, in modo che l'operazione di asportazione interessi solo gli 8 mm del campione.
- 3) Finitura, in cui si ottiene il diametro finale dei campioni. Sono state eseguite due passate con profondità $d = 0,25\text{ mm}$, avanzamento $f = 0,05\text{ mm/giro}$. La lavorazione è eseguita con i 3 diversi tipi di lubrificazione, criogenico, lubrificazione e a secco, e al variare della velocità di taglio $V = 110, 165, 220\text{ m/min}$. Il tratto interessato dalla lavorazione è di 8 mm , preventivamente preparato dalla precedente fase di troncatura. Ad ogni velocità si sono eseguiti 2 campioni, per un totale di 18 campioni. Il diametro della barra viene portato da 19 mm a 18 mm . Nella fase di finitura, la seconda passata è quella che viene utilizzata per lo studio delle forze, visto che è l'ultima operazione che conferisce i parametri superficiali che saranno in seguito analizzati.
- 4) Troncatura per separare il campione dalla barra.

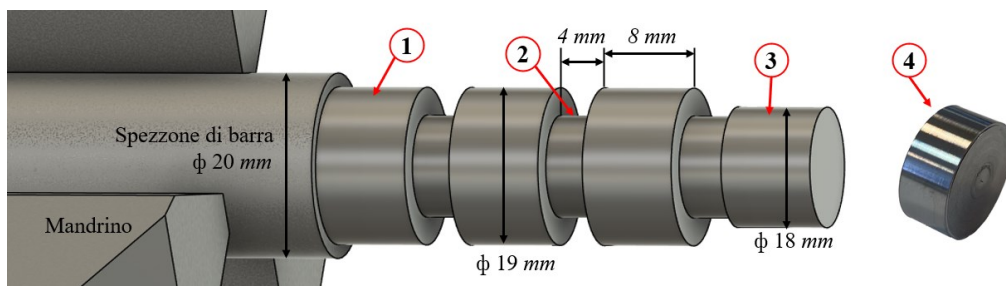


Figura 3.26: Schema delle fasi di tornitura e campione reale ottenuto dalla lavorazione con lubrificante.

CAPITOLO 3: Tornitura

Il lubrorefrigerante utilizzato è applicato sul petto dell'utensile tramite un ugello, ed è composto da una miscela di acqua e olio sintetico al 5% (rapporto di diluizione 1:20).

Per il raffreddamento criogenico si è scelta la modalità di raffreddamento dell'utensile, ossia l'azoto liquido è applicato attraverso due ugelli sul petto e sul fianco principale dell'utensile, dove il materiale viene tagliato e si forma la temperatura massima (figura 3.27).

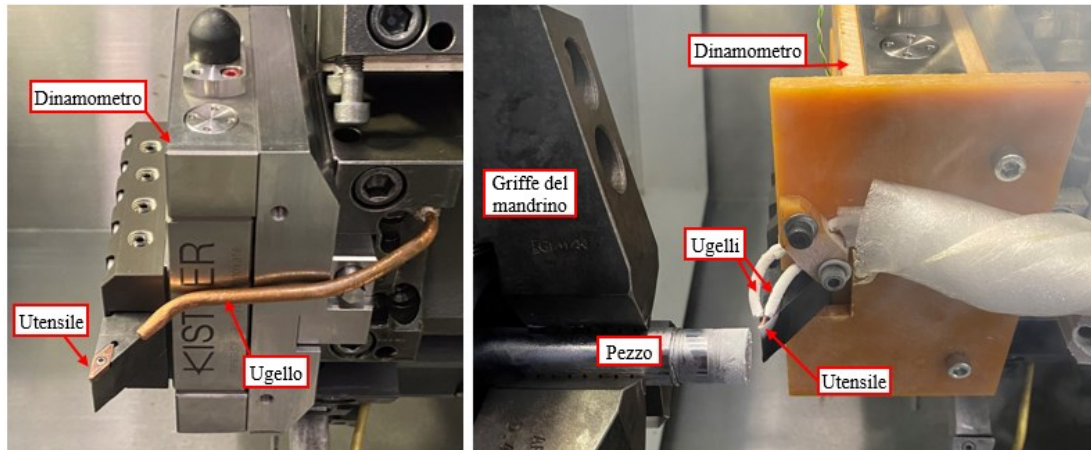


Figura 3.27: Configurazione della tornitura con lubrificante a base d'acqua e con azoto liquido. Per il raffreddamento criogenico è stata usata una resina per isolare termicamente il dinamometro multicomponente 9129AA della ditta Kistler®.

Nome della serie	Velocità di taglio [m/min]	Numero provino	Numero inserto
Crio	110	1	7A
		2	2B
	165	1	7B
		2	11B
	220	1	9B
		2	11A
Lubr	110	1	12A
		2	13B
	165	1	12B
		2	14A
	220	1	13A
		2	14B
Secco	110	1	15A
		2	5B
	165	1	16A
		2	15B
	220	1	16B
		2	2A

Tabella 3.4: Campioni torniti delle serie Crio, Lubr e Secco.

3.7 Risultati forze di taglio

Le forze di taglio sono state misurate come descritto nel §3.2.4, per la passata finale di finitura. Il segnale acquisito può essere elaborato direttamente tramite il software di misura *Dynoware*. In questa trattazione si è deciso di elaborare i dati grezzi con un programma *Matlab*. Le forze misurate con il dinamometro contengono frequenze di disturbo, ad esempio quelle dovute alla corrente elettrica o all'eccentricità del pezzo. Questi disturbi possono influire negativamente sull'accuratezza delle misurazioni e sull'analisi dei dati. Per identificare e gestire queste frequenze di disturbo, si può applicare una Trasformata di Fourier Rapida (FFT) al segnale misurato. La FFT trasforma il segnale dal dominio del tempo al dominio delle frequenze, permettendo di vedere a quali frequenze il segnale è presente. Ad esempio, se il disturbo è causato dalla corrente elettrica, sarà visibile un picco a 50 Hz. Una volta individuate le frequenze di disturbo, si può applicare un filtro passa basso per rimuovere tali interferenze dal segnale. Il filtro passa basso permette alle frequenze inferiori alla frequenza di *cutoff* di passare, mentre attenua le frequenze superiori, inclusi i disturbi indesiderati. (figura 3.28).

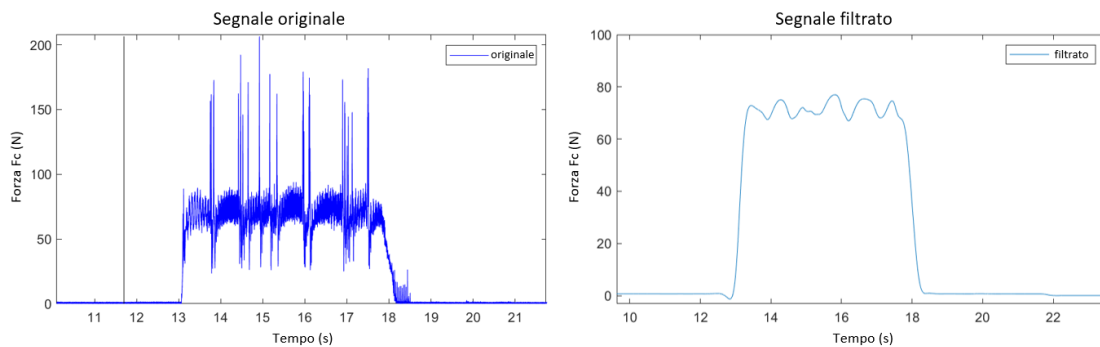


Figura 3.28: Segnale originale della forza di taglio, per la passata di finitura, e segnale ottenuto dopo l'applicazione di un filtro passa-basso a 5Hz.

Dopo l'acquisizione delle tre componenti delle forze di taglio, si è utilizzata la relazione 3.17 per il calcolo della forza normale, F_t , per il caso di taglio obliquo, e la relazione 3.13 e 3.9 per il calcolo dell'angolo di attrito e del coefficiente di attrito all'interfaccia truciolo e utensile. I risultati delle 3 serie di lubrificazione sono riportati in tabella 3.5. L'andamento delle tre componenti delle forze di taglio, e del coefficiente di attrito, è visibile in figura 3.29.

CAPITOLO 3: Tornitura

Serie	Velocità di taglio [m/min]	F _c [N]	Dev.St.* F _c	F _a [N]	Dev.St. F _a	F _r [N]	Dev.St. F _r	F _t [N]	μ	Dev.St. μ
Secco	110	71,59	3,20	49,21	3,10	27,33	1,54	56,29	0,955	0,030
	165	61,55	1,91	43,73	1,73	25,09	1,14	50,41	0,994	0,018
	220	55,03	0,72	38,16	0,62	20,86	0,64	43,49	0,960	0,012
Lubr	110	50,48	1,76	29,09	1,18	19,17	0,93	34,84	0,842	0,012
	165	47,15	0,70	33,32	0,85	17,41	0,57	37,59	0,968	0,022
	220	45,16	1,13	32,85	1,10	16,99	0,75	36,99	0,994	0,020
Crio	110	58,77	2,43	35,70	1,00	26,27	2,16	44,32	0,917	0,010
	165	42,34	0,53	27,12	0,32	15,38	0,62	31,18	0,896	0,010
	220	41,29	0,36	26,29	0,25	17,69	0,37	31,69	0,933	0,007

$$\text{Deviazione Standard} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \text{ dove } \bar{x} = \text{media}, n = \text{numero di campioni}$$

Tabella 3.5: Forze di taglio per i campioni torniti, F_c = forza di taglio, F_a = forza di avanzamento, F_r = forza radiale, F_t = forza normale, risultante di F_a e F_r, μ = coefficiente di attrito.

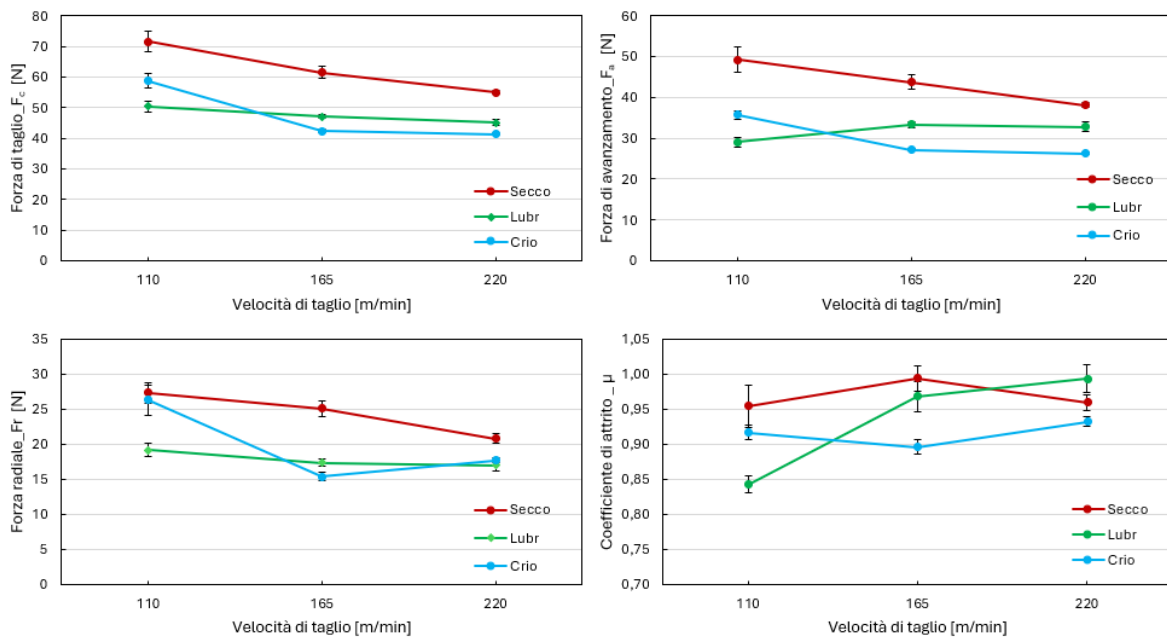


Figura 3.29: Confronto delle componenti delle forze di taglio e del coefficiente di attrito per le 3 serie di lubrificazione al variare delle velocità di taglio.

Nella serie a secco è evidente che le forze di taglio sono costantemente superiori alle altre serie, a causa della mancanza di lubrificazione e dell'aumento dell'attrito. La forza di taglio principale nella serie a secco è maggiore del 29%, 23% e 18% rispetto al caso di lubrificazione e del 18%, 31% e 25% rispetto al caso di raffreddamento criogenico, rispettivamente alla velocità 110, 165 e 220 m/min. Allo stesso modo, anche la forza di resistenza all'avanzamento è superiore del 41%, 24% e 14% rispetto alla condizione di lubrificazione e del 27%, 38% e 31% rispetto alla condizione di raffreddamento criogenico.

Indipendentemente dalla strategia di lubrorefrigerazione adottata, la forza di taglio F_c diminuisce all'aumentare della velocità di taglio. Raddoppiando la velocità di taglio da 110 m/min a 220 m/min si osserva una diminuzione della forza di taglio del 12% nella condizione con lubrificazione, del 30% nella condizione a secco e del 42% nella condizione con raffreddamento criogenico.

Questo è dovuto sia alla ridotta deformazione dei grani che all'aumento della temperatura, che porta a un ammorbidimento termico del materiale.[16,25,48] All'aumentare della velocità di taglio i grani non hanno tempo di deformarsi, il piano di inizio deformazione OL, vedi figura 3.30, si avvicina sempre più al piano OM fino al punto in cui il grano entra ed esce dai confini della zona di deformazione senza aver sentito l'influenza delle tensioni di scorrimento. Questo aspetto è positivo perché minore è la deformazione subita dal truciolo, più facilmente questo evacua dalla zona di taglio con conseguente diminuzione delle forze in gioco (figura 3.31).

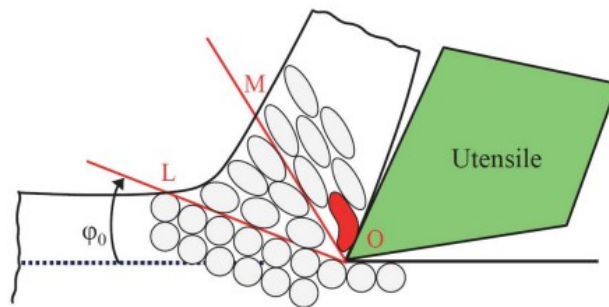


Figura 3.30: Schema fenomenologico della zona di deformazione primaria. Fonte: [16]

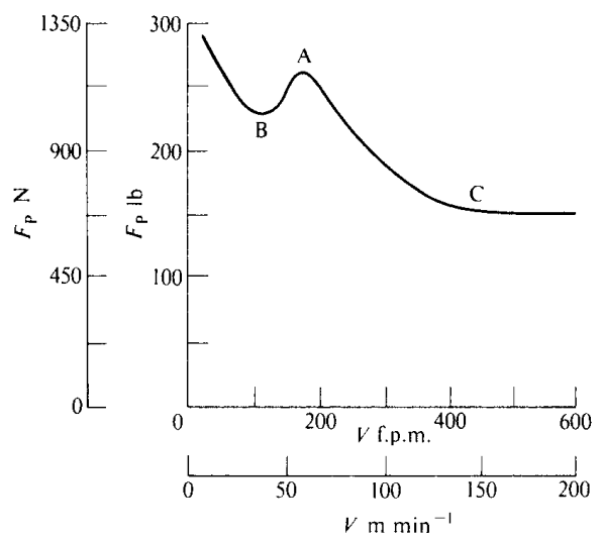


Figura 3.31: Variazione della forza di taglio principale con la velocità di taglio. Materiale lavorato: acciaio AISI 1008; materiale dell'utensile: acciaio rapido M-2 (HSS); avanzamento 0,15 mm/giro; angolo di spoglia: 10°; angolo di attacco: 5°; raggio di punta: 0,13 mm; profondità di taglio: 2,54 mm; fluido da taglio: nessuno. Fonte: [12]

La tornitura con raffreddamento criogenico trova applicazione soprattutto nella lavorazione delle leghe difficili da lavorare come le leghe di Titanio, in cui l'elevata resistenza a trazione, la durezza e la bassa conducibilità termica causano un importante aumento delle temperature locali e un'usura precoce degli utensili. Il raffreddamento criogenico viene utilizzato per migliorare la stabilità termica del processo, mantenendo l'utensile e il materiale lavorato a temperature più basse, riducendo l'usura dell'utensile e migliorando la qualità superficiale. Di contro, la lavorazione criogenica di questi materiali tende ad aumentare le forze di taglio poiché il materiale lavorato diventa più duro e resistente alle deformazioni successive a causa dell'incrudimento superficiale [13, 14, 25, 64].

Nel caso studio analizzato, alla velocità inferiore la forza di taglio nella serie con raffreddamento criogenico è maggiore del 14% rispetto alla serie con lubrificazione. Aumentando la velocità di taglio, si osserva che la forza di taglio per la condizione criogenica è inferiore del 9-11% rispetto a quella con lubrificazione. Lo stesso effetto qualitativo è riscontrato nelle altre due componenti della forza, radiale e di avanzamento, all'aumentare della velocità di taglio. A differenza delle leghe difficili da lavorare, il ferro puro è generalmente facile da lavorare grazie alla sua struttura omogenea e la sua duttilità, richiedendo quindi minori forze di taglio. Inoltre, ha una buona conducibilità termica, che mitiga l'effetto di incrudimento superficiale.

Osservando il coefficiente di attrito tra truciolo e petto dell'utensile, si nota come la serie a secco abbia un coefficiente di attrito maggiore del 3-10% rispetto a quella con raffreddamento criogenico. Come individuato per le forze di taglio, si osserva un'inversione del coefficiente di attrito tra la serie criogenica e quella con lubrificazione. Alla velocità inferiore, il coefficiente di attrito della serie lubrificata è inferiore del 9% rispetto alla condizione criogenica. Tuttavia, all'aumentare della velocità di taglio, l'effetto di lubrificazione diminuisce e il coefficiente di attrito della serie lubrificata aumenta del 6-7% rispetto a quella criogenica.

Anche se nella condizione con lubrificazione la forza di taglio principale diminuisce, la forza di resistenza all'avanzamento aumenta del 13% all'aumentare della velocità di taglio da 110 a 165 *m/min*; questo incremento può spiegare l'aumento del coefficiente di attrito nello stesso intervallo di velocità. Questo comportamento è contrario alle altre due serie di lubrorefrigerazione. Pertanto, la modifica delle proprietà del pezzo data dal raffreddamento criogenico altera le caratteristiche di attrito all'interfaccia utensile-truciolo. Si osserva un effetto di lubrificazione maggiore rispetto all'applicazione di un lubrificante a base d'acqua, facilitando la lavorazione di asportazione del truciolo, migliorando l'efficienza e riducendo le forze di taglio richieste.

3.8 Morfologia dei trucioli

Le osservazioni sulla formazione del truciolo possono fornire importanti indicazioni sul cambiamento delle condizioni di taglio o sulla variazione della lavorabilità del pezzo. Il truciolo formatosi durante il processo di taglio presenta caratteristiche strettamente legate al materiale del pezzo, al materiale dell'utensile, alla geometria dell'utensile e alle condizioni di taglio.

Per determinare la tipologia di truciolo, si utilizzano analisi sperimentali. Durante le prove di tornitura, i trucioli ottenuti sono stati raccolti e classificati seguendo le linee guida della normativa ISO 3685 [15]. Questa normativa presenta un sistema di codifica per i tipi di truciolo più comunemente osservati, come descritto nella tabella 3.6. Le immagini dei trucioli sono state acquisite utilizzando una fotocamera digitale e sono rappresentate nella tabella 3.7.

La morfologia dei trucioli rimane invariata a tutte le condizioni di taglio; si osserva prevalentemente un truciolo elicoidale che può variare da un aspetto aggrovigliato a uno più corto. Durante la lavorazione a secco, sono stati prodotti trucioli con un colore tendente al violaceo-blu scuro. Questo indica la formazione di ossidi sulla superficie del truciolo, come risultato dell'esposizione del metallo ad elevate temperature. Uno studio sul taglio ortogonale del ferro puro stima una temperatura media del truciolo di 365°C. [67] Considerando il processo di tempra ed osservando la figura 3.32, è ipotizzabile che la temperatura raggiunta dal truciolo durante la lavorazione a secco sia di circa 300 °C. La differenza di temperatura stimata può essere attribuibile ai diversi parametri di taglio,

La dimensione dei trucioli diminuisce passando dalla condizione di lavorazione a secco a quella con lubrificazione, sia in termini di lunghezza che di diametro dell'elica. Questa riduzione è ancora più evidente quando si utilizza il raffreddamento criogenico. La dimensione dei trucioli è quindi influenzata dalla temperatura durante la lavorazione. Questi risultati indicano che il raffreddamento criogenico ha un effetto positivo nel controllo della temperatura durante il processo di taglio, limitando il surriscaldamento del materiale e garantendo trucioli più corti.

	°C
Grey Green	330
Grey Blue	320
Light Blue	310
Wedgewood Blue	300
Dark Blue	290
Violet	280
Purple	270
Red Brown	260
Yellow Brown	250
Dark Yellow	240
Yellow	230
Straw	220
Light Yellow	210

Figura 3.32: Tabella colori per l'acciaio al variare delle temperature di tempra. Fonte: [65]

CAPITOLO 3: Tornitura









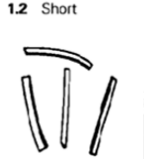
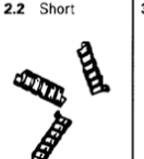



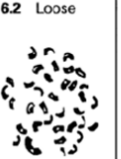
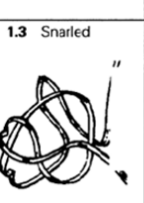
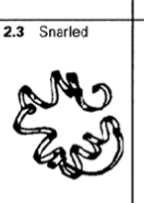


Chip forms							
1 Ribbon chips ¹⁾	2 Tubular chips ¹⁾	3 Spiral chips	4 Washer-type helical chips ¹⁾	5 Conical helical chips ¹⁾	6 Arc chips ²⁾	7 Elemental chips	8 Needle chips
1.1 Long 	2.1 Long 	3.1 Flat 	4.1 Long 	5.1 Long 	6.1 Connectec 		
1.2 Short 	2.2 Short 	3.2 Conical 	4.2 Short 	5.2 Short 	6.2 Loose 		
1.3 Snarled 	2.3 Snarled 		4.3 Snarled 	5.3 Snarled 			

Tabella 3.6: Codifica numerica della tipologia di trucioli più comuni. Fonte: [15]










V [m/min]	Secco	Lubrificazione	Criogenico
110	 10 mm	 10 mm	 10 mm
165	 10 mm	 10 mm	 10 mm
220	 10 mm	 10 mm	 10 mm

Tabella 3.7: Confronto dei trucioli per le tre serie di lubrificazione, le immagini sono state ottenute con una fotocamera digitale.

3.9 Confronto dello stato degli inserti

Dopo l'operazione di tornitura è stato valutato lo stato di usura, tramite la misurazione del labbro di usura, parametro VB_b , descritto nel §3.5. e del petto dell'utensile. Il fenomeno di usura più comune sul petto dell'utensile è il cratere di usura, che si forma nel punto di contatto tra l'utensile e il truciolo, insieme alla formazione del BUE (Built-Up Edge), ovvero il tagliente di riporto. In Appendice A sono riportate le immagini acquisite al SEM del petto degli inserti nuovi e dopo l'operazione di tornitura. Dalla loro analisi non si è riscontrato nessuno dei fenomeni di usura tipici del petto. Pertanto, sarà utilizzato il labbro di usura come parametro di confronto tra le varie condizioni di lubrificazione. Le misure dei labbri di usura dei fianchi degli utensili per le due ripetibilità, suddivise per serie e velocità di taglio, sono riportate nelle figure 3.33, 3.34 e 3.35. Si noti che la misura del labbro di usura è effettuata nel tratto del tagliente dritto, situato all'interno della profondità di passata $d=250 \mu\text{m}$ e dopo la parte curva dell'angolo del tagliente con raggio di punta $R=100 \mu\text{m}$.

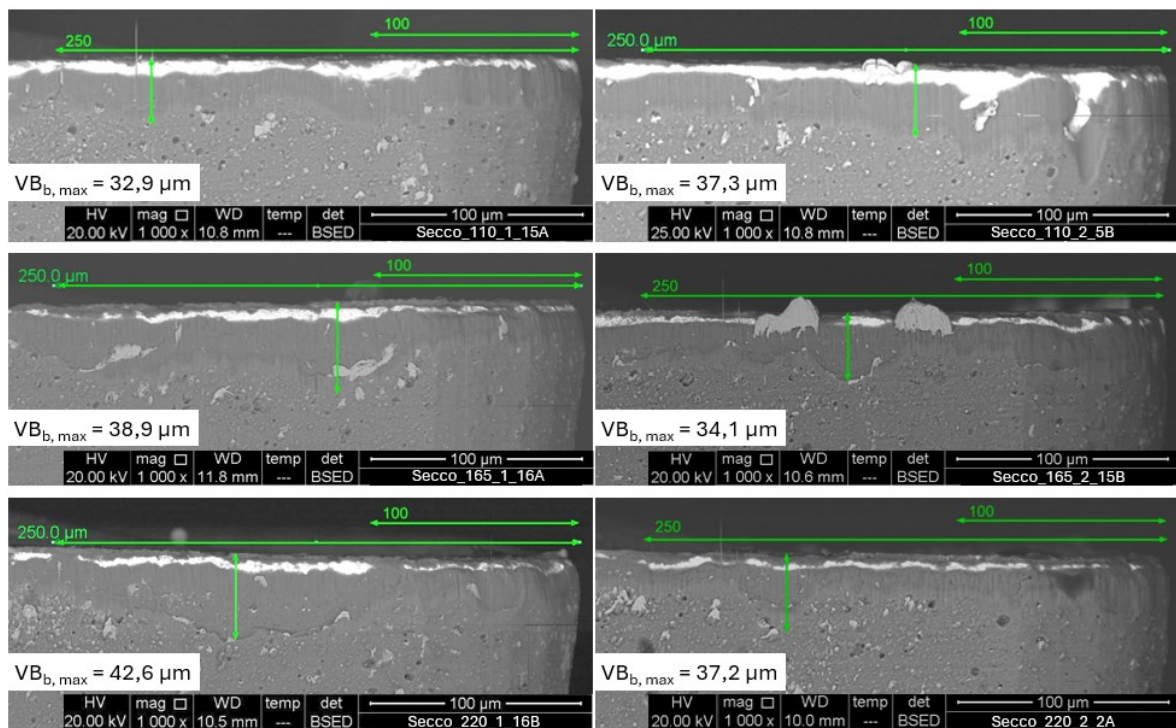


Figura 3.33: Confronto del labbro di usura massimo, $VB_{b, \max}$, per la serie Secco. Due inserti per velocità di taglio: 110, 165 e 220 m/min, rispettivamente in alto, centro e in basso. Le immagini del fianco dell'inserto sono state ottenute con il SEM, detector BSED e ingrandimento 1000x.

CAPITOLO 3: Tornitura

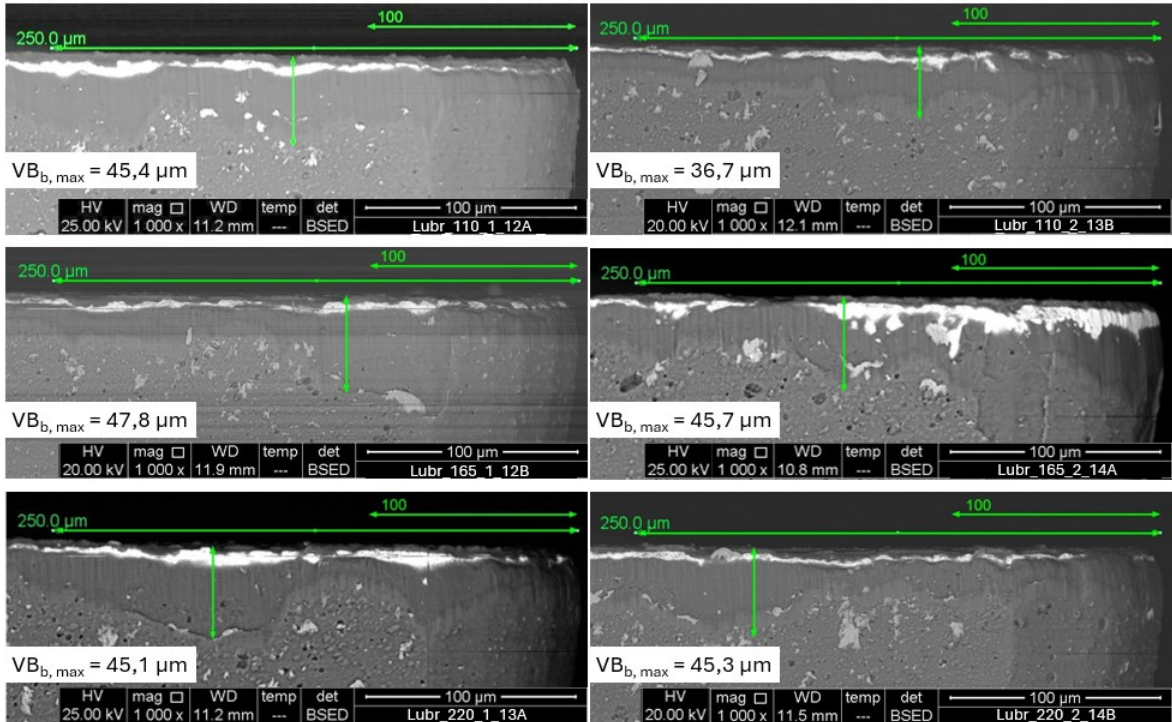


Figura 3.34: Confronto del labbro di usura massimo, $VB_{b,max}$, per la serie Lubr. Due inserti per velocità di taglio: 110, 165 e 220 m/min, rispettivamente in alto, centro e in basso. Le immagini del fianco dell'inserto sono state ottenute con il SEM, detector BSED e ingrandimento 1000x.

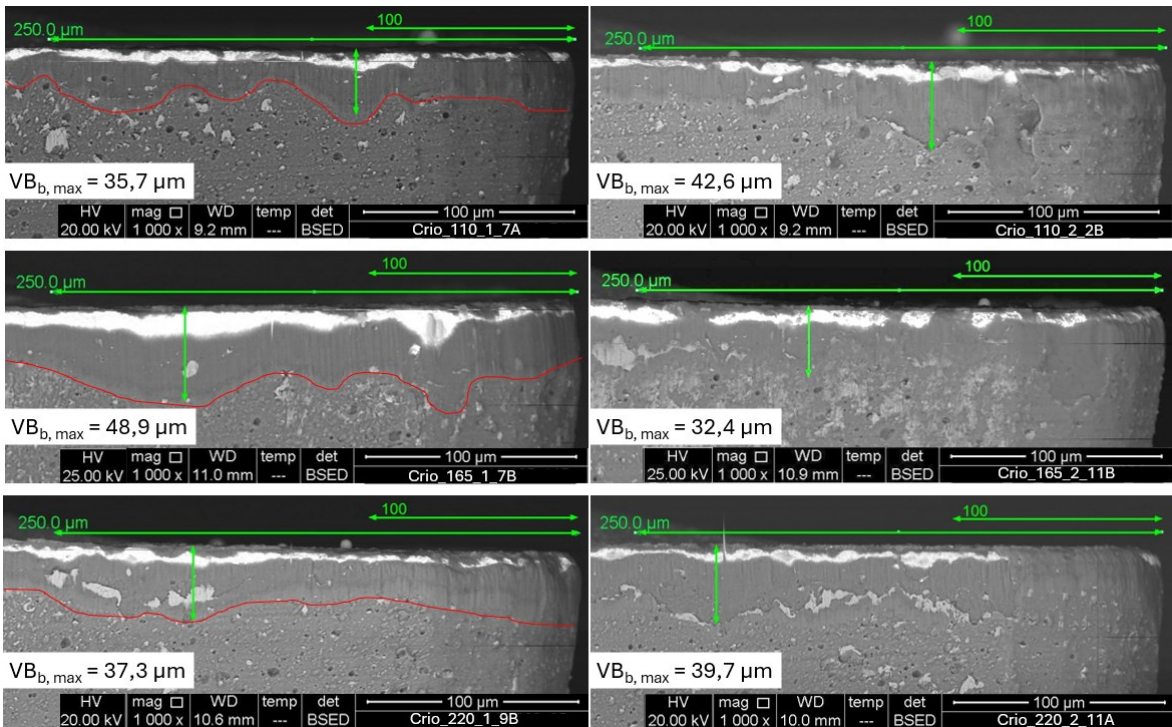


Figura 3.35: Confronto del labbro di usura massimo, $VB_{b,max}$, per la serie Crio. Due inserti per velocità di taglio: 110, 165 e 220 m/min, rispettivamente in alto, centro e in basso. La linea rossa sta ad indicare la transizione tra rivestimento nuovo ed usurato. Le immagini del fianco dell'inserto sono state ottenute con il SEM, detector BSED e ingrandimento 1000x.

Come anticipato, il fenomeno di usura per il ferro puro è principalmente dovuto ad abrasione e adesione [19,20,21]. Utilizzando il rilevatore BSED per ottenere immagini composizionali al SEM, è possibile visualizzare immagini in scala di grigi dove le aree più scure rappresentano elementi con peso atomico minore, come il rivestimento dell'inserto, mentre quelle più chiare corrispondono a elementi con peso atomico maggiore, come il substrato sotto il rivestimento. L'abrasione completa del rivestimento con esposizione del substrato è limitata a circa $10 \mu m$ per tutti gli inserti. Per la valutazione del labbro di usura, si è considerato il punto di transizione tra il rivestimento nuovo e l'inizio dell'usura, come evidenziato in figura 3.35. Dato che il tempo di lavorazione per ogni inserto è breve, approssimativamente 20 secondi, e la lavorazione è mirata alla finitura, i valori massimi della larghezza del labbro di usura sono molto al di sotto del valore considerato come fine vita, definito dalla normativa ISO 3685 pari a $300 \mu m$. Come mostrato in figura 3.36 i valori del labbro di usura sono comparabili tra le diverse serie di lubrificazione. Inoltre, l'aumento della velocità di taglio non comporta un aumento dell'usura.

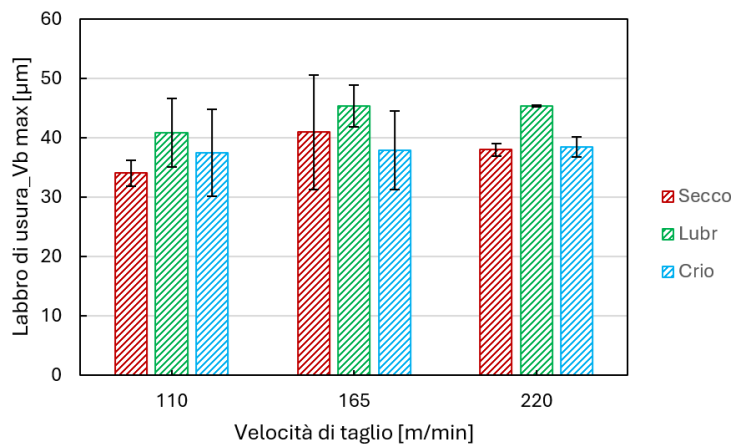


Figura 3.36: Labbro di usura $VB_{b, max}$ degli inserti in funzione della velocità di taglio e della strategia di lubrorefrigerazione adottata nella tornitura del ferro puro.

CAPITOLO 4

FINITURA E INTEGRITÀ SUPERFICIALE

4.1 Introduzione

La finitura e l'integrità superficiale rappresentano aspetti fondamentali nella lavorazione meccanica e nella produzione ingegneristica, influenzando direttamente le prestazioni e la durata dei componenti lavorati. La finitura superficiale non solo determina l'accuratezza dimensionale dei pezzi, ma incide anche sulle loro proprietà meccaniche.

Mentre la finitura superficiale descrive la geometria dello strato superficiale, l'integrità superficiale comprende un insieme più ampio di proprietà, come la durata a fatica e la resistenza alla corrosione, fortemente influenzate dalla natura della superficie prodotta.

La finitura superficiale si riferisce alla qualità della superficie prodotta, espressa in termini di rugosità e ondulazione. Una buona finitura superficiale è essenziale per garantire l'accuratezza dimensionale e la funzionalità dei componenti. [8]

L'integrità superficiale, d'altra parte, è un concetto più ampio che include la finitura superficiale, ma si estende anche ad altri aspetti critici come assenza di crepe, cambiamenti chimici, danni termici e tensioni residue.

Esaminando in profondità la superficie di un pezzo metallico si può osservare come questa sia costituita da diversi strati [9]. La porzione di metallo più interna è detta substrato metallico, o metallo base. Sopra di esso esiste uno strato di materiale che è stato deformato plasticamente e incrudito dai processi di lavorazione. Il risultato è allora quello di avere una superficie con proprietà diverse da quelle del substrato (figura 4.1). Sopra lo strato incrudito può svilupparsi anche uno strato amorfo o di Belby, che consiste in una struttura microcristallina o amorfa. Questo strato può essere generato da alcune lavorazioni di taglio o di finitura in cui gli strati superficiali più esterni vengono fusi e subito raffreddati bruscamente. [9]

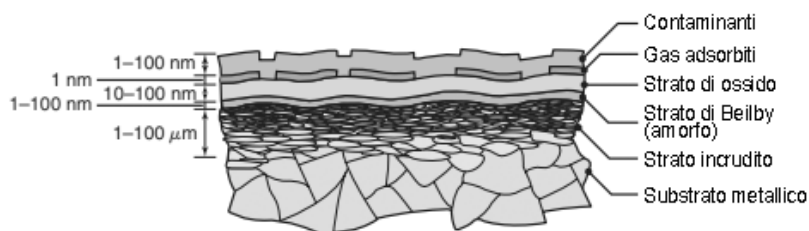


Figura 4.1: Schema di una sezione della superficie di un metallo.
Lo spessore di ciascuno strato dipende dal processo di lavorazione e dall'ambiente. Fonte: [9]

Durante i processi di lavorazione, si verificano diversi difetti che possono compromettere l'integrità superficiale dei materiali. Questi difetti sono spesso il risultato di una combinazione di fattori, tra cui difetti nella materia prima, metodologie di produzione inadeguate e un controllo insufficiente dei parametri di processo. Questo può portare a un aumento eccessivo di tensioni e temperature, creando un ambiente favorevole alla formazione di difetti. Tra i principali difetti superficiali riscontrati nella pratica industriale vi sono cricche, craterizzazioni, pieghe, grinze, bave, scalfitture, inclusioni, corrosioni intergranulari, zone termicamente alterate, trasformazioni microstrutturali, deformazioni plastiche e tensioni residue. [9]

La qualità superficiale ottenuta dalle tre condizioni di lubrificazione, raffreddamento criogenico, lubrificazione ad inondazione e a secco, sono messe a confronto tramite le misure di rugosità e difettologia delle superfici.

L'influenza del metodo di lavorazione sulla modifica delle proprietà del materiale, meccaniche e magnetiche, è stata osservata tramite le misure dell'SPD layer (strato di deformazione plastica severa) e microdurezza, all'allontanarsi della superficie lavorata.

4.2 Rugosità superficiale

La rugosità superficiale è una misura delle irregolarità microscopiche presenti sulla superficie di un pezzo lavorato. Queste irregolarità possono essere causate da diversi fattori durante il processo di tornitura, come:

- Utensile da taglio: la sua geometria, compreso il raggio di punta e angolo di spoglia, la sua affilatura e usura.
- Parametri di taglio: velocità di taglio, avanzamento e profondità di taglio. Una velocità di taglio più alta tende a produrre superfici più lisce, mentre un avanzamento maggiore e profondità di taglio maggiori possono aumentare la rugosità.
- Rigidità e stabilità della macchina utensile: vibrazioni e instabilità possono causare irregolarità indesiderate.
- Deformazioni plastiche: durante il taglio, il materiale del pezzo subisce deformazioni plastiche che possono manifestarsi come microscopiche ondulazioni o piccole depressioni sulla superficie.
- Effetto del tagliente di riporto (BUE): il fenomeno di accumulo di materiale sulla punta dell'utensile può causare segni di scalfittura e irregolarità.
- Residui di lavorazione: detriti che si depositano sulla superficie del pezzo.

In un'operazione di tornitura, così come in altri processi di taglio, l'utensile lascia un profilo a spirale sulla superficie lavorata mentre si sposta attraverso il pezzo, come mostrato nella figura 4.2. È evidente che all'aumentare dell'avanzamento f e al diminuire del raggio R della punta

dell'utensile, i solchi di lavorazione diventano più evidenti. È possibile dimostrare che la rugosità superficiale in questo caso è determinata da:

$$R_t = \frac{f^2}{8R} \quad (4.1)$$

La rugosità media aritmetica può essere espressa come

$$Ra = \frac{R_t}{4} = \frac{f^2}{32R} \quad (4.2)$$

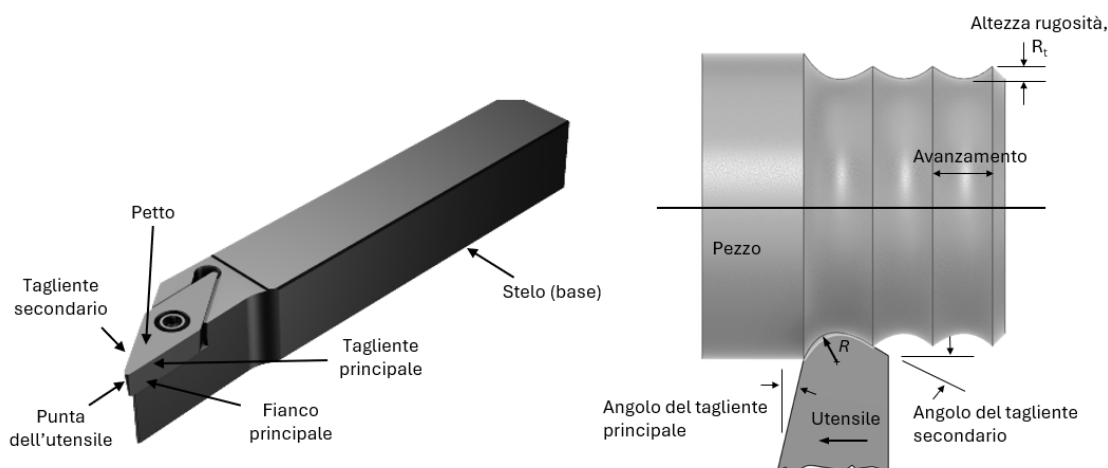


Figura 4.2: Utensile da tornitura e i solchi lasciati dalla sua punta, che determinano la rugosità superficiale.

4.2.1 Difettologia della superficie

Nella valutazione della finitura superficiale si è deciso di osservare la superficie lavorata tramite l'utilizzo del microscopio a scansione elettronica. Vista l'alta duttilità e tenacità del ferro puro, l'incrudimento tende ad essere significativo e questo porta alla formazione del tagliente di riporto (BUE), che può influenzare negativamente la superficie, ad esempio con la formazione di difetti superficiali quali graffi, ondulazioni dovute a deformazioni plastiche, trucioli rotti. [22]

La preparazione del campione tornito segue la stessa procedura eseguita per gli inserti nel §3.5, ed è poi posizionato nel SEM in modo tale che la superficie lavorata sia perpendicolare al fascio di elettroni.

I principali difetti riscontrati, visibili nelle figure 4.3, 4.4 e 4.5, includono ondulazioni, adesione, strappi e solchi di lavorazione irregolari. Le ondulazioni laterali dei picchi sono generate dalla deformazione plastica del materiale causata dal movimento dell'utensile.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

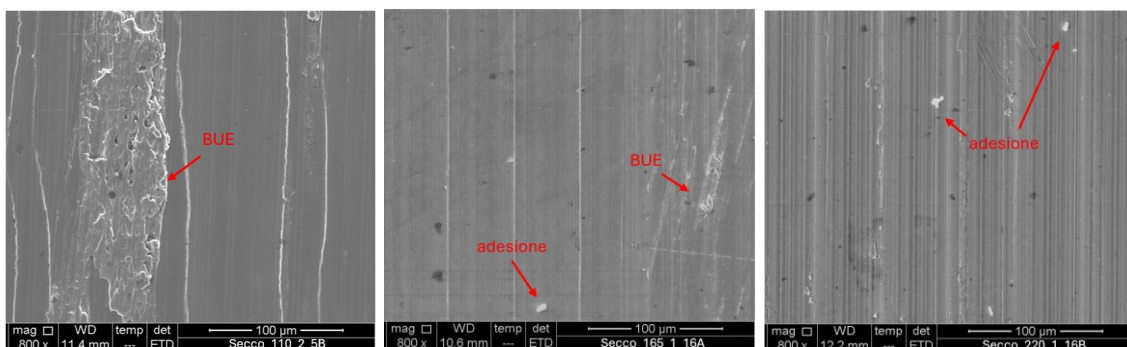


Figura 4.3: Confronto tra superfici dei campioni per la serie a secco; velocità di taglio 110, 165, 220 m/min, rispettivamente da sinistra a destra. Immagini SEM ETD 800x.

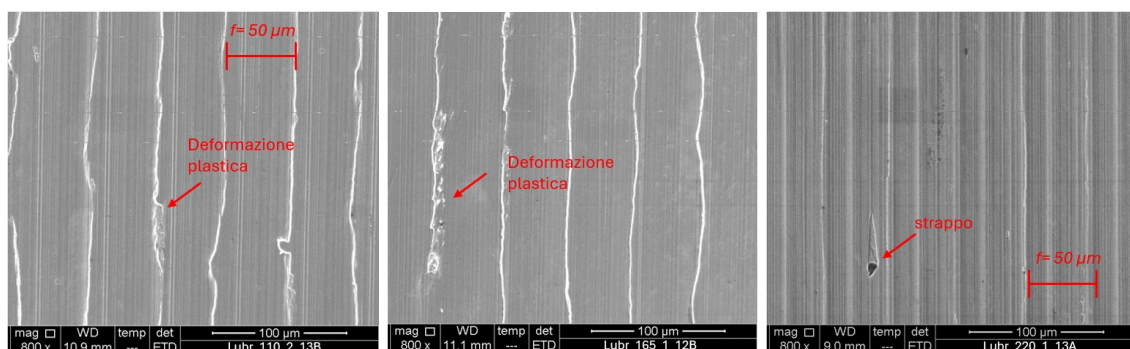


Figura 4.4: Confronto tra superfici dei campioni per la serie con lubrificazione; velocità di taglio 110, 165, 220 m/min, rispettivamente da sinistra a destra. Immagini SEM ETD 800x.

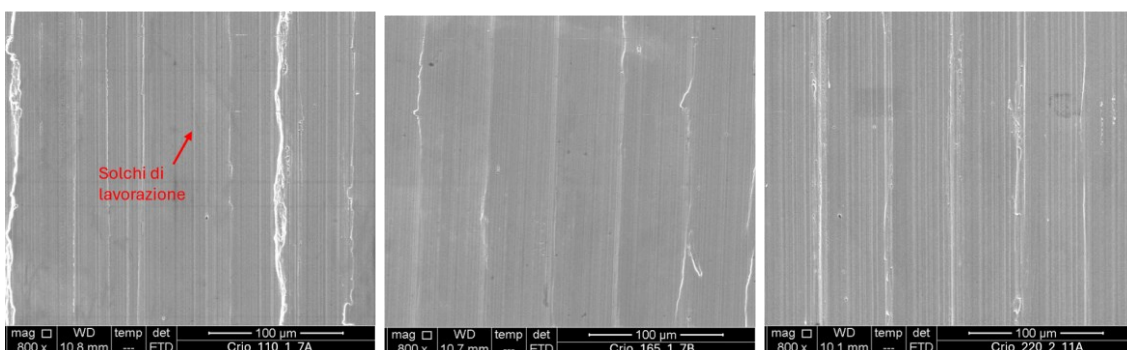


Figura 4.5: Confronto tra superfici dei campioni per la serie con raffreddamento criogenico; velocità di taglio 110, 165, 220 m/min, rispettivamente da sinistra a destra. Immagini SEM ETD 800x.

Nella lavorazione a secco, figura 4.3, i difetti superficiali sono deformazioni plastiche, quindi ondulazioni e picchi deformati, lacerazioni a causa del tagliente di riporto (BUE) e materiale adesivo. A tutte le velocità di taglio, il carico termico elevato induce un comportamento più viscoso del materiale e una maggiore deformazione plastica.

I difetti indotti dalla lavorazione con lubrificazione, figura 4.4, sono principalmente ondulazioni dei picchi, ben pronunciate e con frequenza di $50 \mu\text{m}$ pari all'avanzamento della tornitura. Questo difetto si può attribuire ad un effetto di bordo legato allo scorrimento del materiale sotto la parte più esterna del tagliente in lavorazione.

La serie con raffreddamento criogenico, figura 4.5, si distingue per la minore presenza di difetti dovuti a BUE e materiale adeso, con ondulazioni meno pronunciate e solchi di lavorazione regolari. La riduzione della temperatura legata all'utilizzo del refrigerante spiega l'attenuazione di questi fenomeni termicamente attivati.

Alle velocità inferiore, i solchi di lavorazione nella condizione a secco sono meno evidenti rispetto alle altre due condizioni. Inoltre, la serie a secco e lubrificata presentano maggiori deformazioni plastiche e BUE rispetto alla serie criogenica.

Alla velocità intermedia, queste differenze rimangono ancora valide, con la lavorazione criogenica che presenta la superficie migliore.

Alla velocità superiore, le morfologie delle superfici nelle condizioni a secco e lubrificata tendono ad assomigliarsi, e le ondulazioni avvengono con frequenza maggiore di $50 \mu m$. Strappi e materiale adeso sono ancora presenti; pertanto, la superficie con meno difetti rimane quella lavorata con raffreddamento criogenico.

4.2.2 Misure di rugosità

Indipendentemente dal processo produttivo impiegato, le superfici degli oggetti presentano caratteristiche uniche di topografia superficiale, comunemente indicate come tessitura superficiale o stato della superficie [10]. Queste caratteristiche possono essere misurate e definite in termini di difetti o imperfezioni, quali irregolarità casuali, direzione delle irregolarità, quindi la direzione predominante dell'andamento dei solchi di lavorazione, ondulazione, errori micro-geometrici di lunghezza d'onda intermedia tra gli errori di forma, e rugosità. La rugosità consiste in errori micro-geometrici di lunghezza d'onda inferiore all'ondulazione, la quale può essere espressa per mezzo di parametri di spaziatura e altezza, calcolata sui picchi e le valli del profilo di rugosità.



Figura 4.6: Schema e terminologia dello stato della superficie. Fonte: [9]

La rugosità è valutata tramite l'utilizzo di un profilo superficiale, ossia il risultato dell'intersezione della superficie reale con un piano specificato, o piano di rilievo, come in figura 4.7.

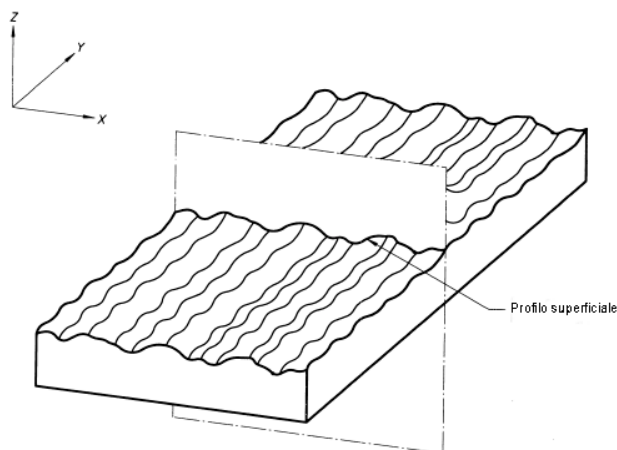


Figura 4.7: Rappresentazione della superficie reale e del profilo superficiale o profilo reale. Fonte: [10]

Il profilo di rugosità deriva dal profilo superficiale, dopo la soppressione delle componenti di lunghezza d'onda legate all'ondulazione, ed è definito basandosi su la lunghezza di campionamento. Da questo si ricavano i parametri R, secondo ISO 4287, di rugosità (allo stesso modo si potrebbe ottenere un profilo di ondulazione e ricavarne i parametri W, di ondulazione) [10].

Il metodo del profilo superficiale può essere utile per mostrare un cambiamento nel processo di produzione, ma molte più informazioni funzionali sulla superficie possono essere ottenute da un'analisi della topografia superficiale areale, ottenute tramite l'impiego di profilometri ottici 3D. La rugosità può anche essere espressa con parametri di superficie S.

Un recente studio su metodi di lavorazione non convenzionali su acciai elettrici non orientati ha dimostrato una correlazione con l'ordine del deterioramento magnetico e la rugosità superficiale areale (S_a). Questo parametro non rivela la causa del deterioramento, bensì fornisce intuizioni a livello macroscopico sui tipi di stress presenti, basandosi sulle caratteristiche della superficie tipiche di ciascun metodo di lavorazione. [65]

4.2.3 Parametri areali del profilo

4.2.3.1 Parametri R

I parametri R sono calcolati dal profilo di rugosità, dove l'asse x è delle ascisse e asse z quello delle ordinate.

- Ra : rappresenta la media aritmetica del valore assoluto delle ordinate $Z(x)$ di un profilo all'interno della lunghezza di base l_r .

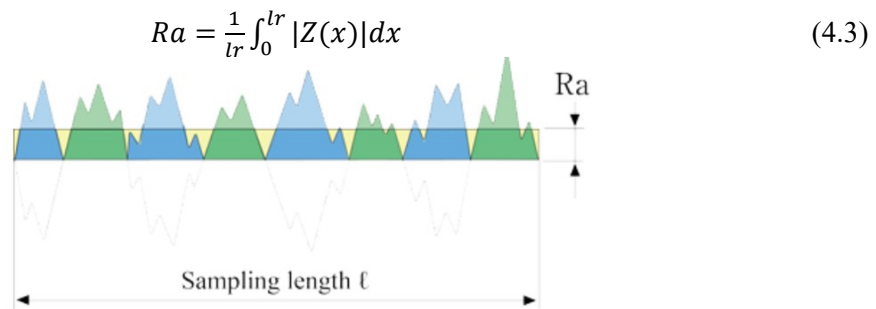


Figura 4.8: Definizione del parametro Ra . Fonte: [11]

- Rsk : rappresenta l'asimmetria del profilo all'interno della lunghezza di base l_r .

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^3(x) dx \quad (4.4)$$

- Se $Rsk=0$: il profilo è simmetrico rispetto alla linea media (distribuzione normale)
- Se $Rsk>0$: deviazione sotto la linea media, profilo dominato da picchi
- Se $Rsk<0$: deviazione sopra la linea media, profilo dominato da valli

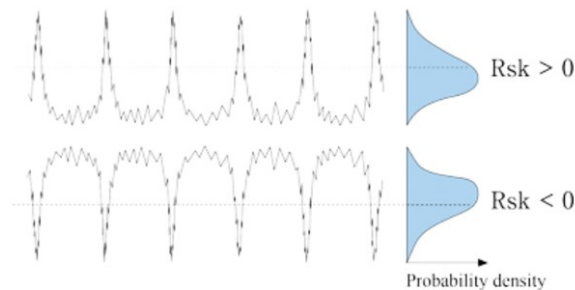


Figura 4.9: Definizione del parametro Rsk . Fonte: [11]

- Rku : rappresenta la geometria della punta dei picchi di un profilo all'interno della lunghezza di base lr .

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^4(x) dx \quad (4.5)$$

- Se $Rku=3$: distribuzione normale
- Se $Rku>3$: distribuzione dei picchi è con profilo appuntito
- Se $Rku<3$: distribuzione dei picchi è con profilo arrotondato

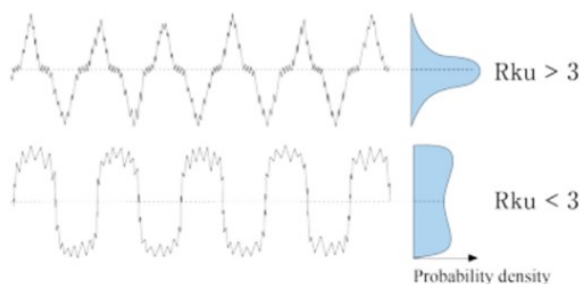


Figura 4.10: Definizione del parametro Rku . Fonte: [11]

4.2.3.2 Parametri S

I parametri S sono come i parametri R ma estesi alla superficie valutata. Per il confronto tra le diverse lubrificazioni, sono stati scelti i seguenti parametri, poiché descrivono la simmetria e la forma dei picchi del profilo di rugosità.

- Sa : altezza media aritmetica.

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy \quad (4.6)$$

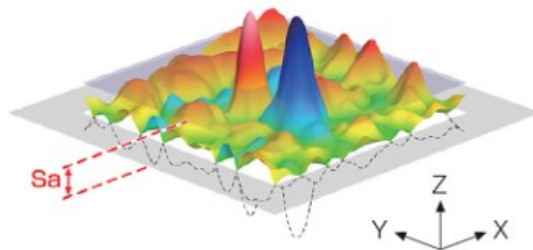


Figura 4.11: Definizione del parametro Sa . Fonte: [11]

- Ssk : asimmetria (skewness)

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \frac{1}{A} \iint_A Z^3(x, y) dx dy \quad (4.7)$$

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

- Se $Ssk=0$: il profilo è simmetrico rispetto alla linea media (distribuzione normale)
- Se $Ssk>0$: deviazione sotto la linea media, dominato da picchi
- Se $Ssk<0$: deviazione sopra la linea media, dominato da valli

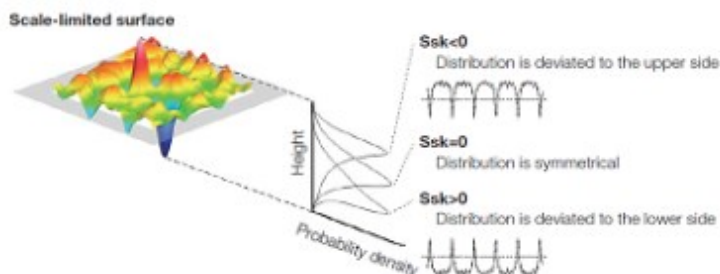


Figura 4.12: Definizione del parametro Ssk . Fonte: [11]

- Sku : curtosi

$$Sku = \frac{1}{sq^4} \frac{1}{A} \iint_A Z^4(x, y) dx dy \quad (4.8)$$

- Se $Sku=3$: distribuzione normale
- Se $Sku>3$: distribuzione dei picchi è con profilo appuntito
- Se $Sku<3$: distribuzione dei picchi è con profilo arrotondato

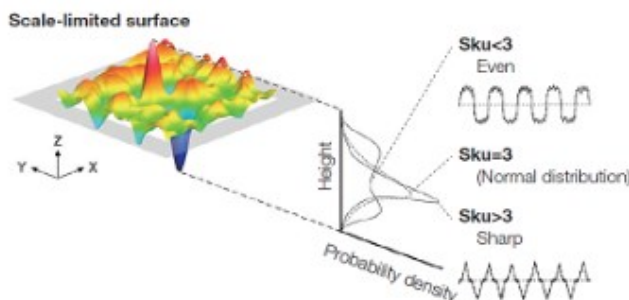


Figura 4.13: Definizione del parametro Sku . Fonte: [11]

4.2.4 Attrezzatura e metodi

4.2.4.1 Profilometro ottico 3D

Per effettuare le misurazioni della rugosità sia del profilo che della superficie, è stato utilizzato un profilometro ottico 3D, il modello *S Neox* della *Sensofar Metrology*TM, disponibile presso il laboratorio Te.Si. di Rovigo. Per garantire che le vibrazioni esterne non influiscano sulle misurazioni, lo strumento è stato posizionato su una base di isolamento antivibrante *Halcyonics*

Micro 60 M6/25 della *Accurion GmbH*. Nella figura 4.11 è rappresentata l'intera postazione, che comprende anche il computer dotato dei software per l'acquisizione ed elaborazione dei dati, *SensoSCAN S neox* e *SensoVIEW* della *Sensofar Metrology*TM, e una console con joystick per controllare la testa dello strumento.

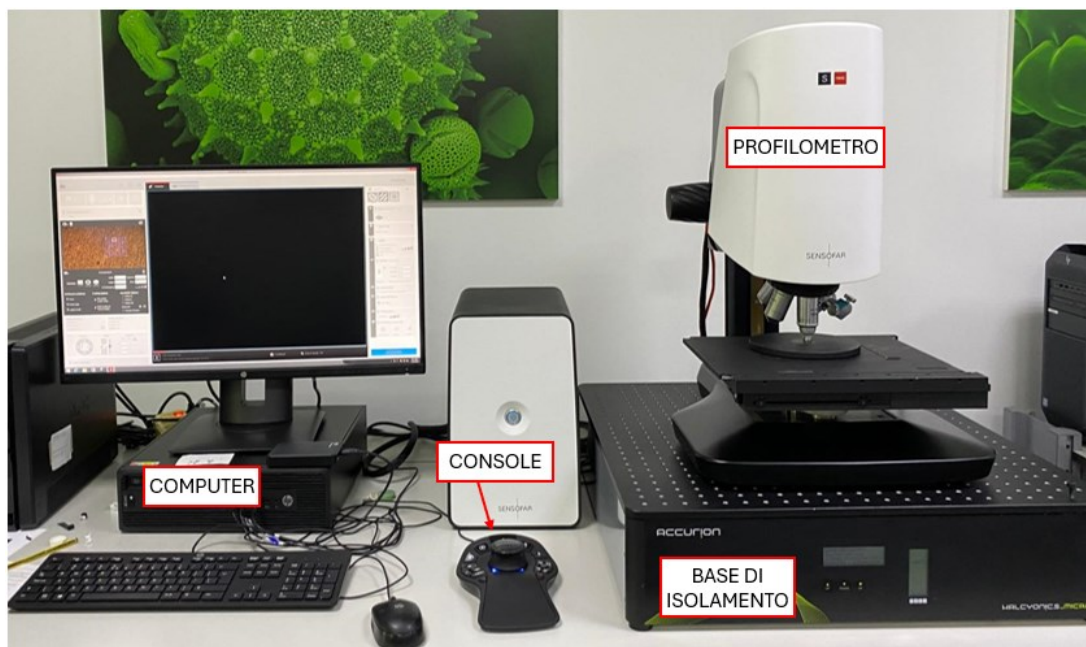


Figura 4.14: Postazione con computer e software, console di controllo, base di isolamento antivibrante e profilometro ottico 3D per misure di rugosità.

Gli obiettivi utilizzati per le analisi sono il *Nikon*TM *L Plan EPI 2,5x*, per una prima messa a fuoco e poi *Nikon*TM *TU Plan Fluor EPI 20x* per la misurazione della rugosità.

4.2.4.2 Acquisizione della superficie

Le misure di rugosità sono state eseguite su 3 zone diverse per tutti e 18 i campioni. I campioni sono stati lavati in una vasca ad ultrasuoni con etanolo al 99,9%. Successivamente, i componenti sono stati fissati in una piccola morsa posizionata sulla tavola porta campioni del profilometro, che è servita solo come supporto, consentendo l'allineamento orizzontale dei campioni. (figura 4.15)

Il software permette di acquisire dimensioni di superficie multipli di un'area base, che misura $0,88\text{ mm} \times 0,66\text{ mm}$. Si è deciso di acquisire una zona di dimensioni $3,11\text{ mm} \times 0,66\text{ mm}$, costituita da quattro aree base con una sovrapposizione tra di esse di almeno il 15%. L'area scelta varia anche in base al calcolo dei parametri R del profilo. Questo è effettuato sulla lunghezza di valutazione, suggerita dalla norma ISO 4288 in base al parametro RS_m per profili periodici, come il caso della tornitura.

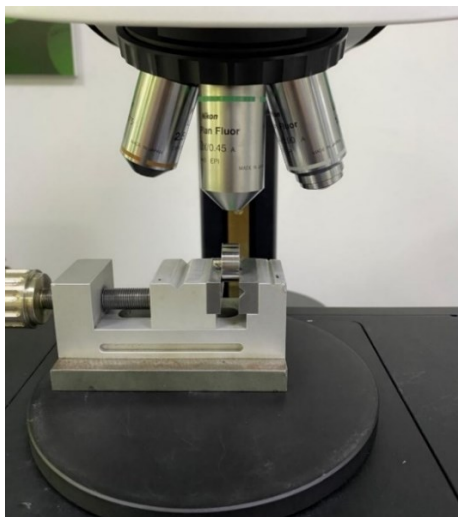


Figura 4.15: Acquisizione della superficie di un campione con obiettivo 20x. Il componente è allineato in orizzontale grazie ad una morsa.

La procedura di acquisizione prevede di:

- Lavare il campione in vasca ultrasuoni per 3 min con etanolo al 99%
- Asciugare i campioni con phon. La superficie non deve essere toccata, o se necessario, farlo indossando con guanti in nitrile
- Posizionare il campione, con supporto, sotto il profilometro. Software *SensoSCAN* operativo, luce led 530 nm
- Effettuare una prima messa a fuoco con obiettivo 2,5x
- Pre-acquisizione dell'intera superficie, per agevolare la fase successiva di scansione
- Messa a fuoco fine con obiettivo 20x
- Corretto posizionamento sulla zona interessata e impostazione delle dimensioni dell'area da acquisire, 3,11 mm x 0,66 mm
- Determinazione dei limiti di scansione in z
- Scansione del profilo 3D, modalità *confocal*
- Verifica della superficie acquisita, in figura 4.23 è riportato un esempio di scansione dove la superficie è centrata nella mezzaria del provino, facilitando le successive fasi di elaborazione.

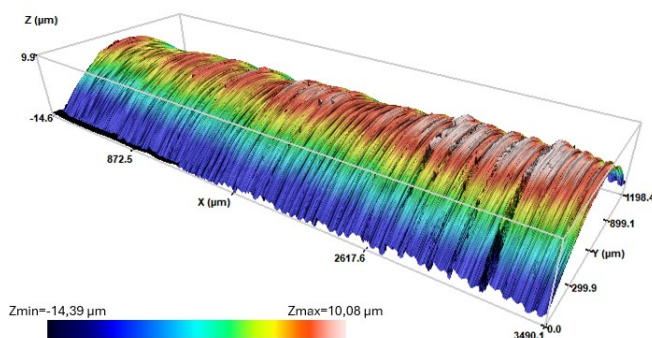


Figura 4.16: Superficie acquisita con il profilometro ottico 3D. Crio_110_1_7A.

4.2.4.3 Elaborazione delle acquisizioni

Le superfici acquisite con il profilometro ottico 3D sono state elaborate con il software *SensoVIEW* della *Sensofar Metrology*TM. La prima operazione eseguita è quella della rimozione dell'errore di forma, dovuto dalla geometria cilindrica dei campioni, con lo strumento "form removal" e utilizzando la funzione "cylinder". Durante la scansione è possibile ottenere punti della superficie non acquisiti correttamente e che compaiono nella superficie come picchi anomali. Questi possono influenzare negativamente la misura di rugosità e pertanto sono stati eliminati usando lo strumento "threshold". Per la determinazione dei parametri R è necessario estrarre un profilo, da una sezione longitudinale della superficie da analizzare, e applicare i filtri gaussiani λ_s e λ_c , secondo normativa. Il primo esclude tutte le lunghezze d'onda inferiori ad un certo valore, ritenendole rumore di fondo. Il secondo, detto *cut-off*, esclude le lunghezze superiori ad un certo valore, uguale alla lunghezza di base. Per profili periodici, il filtro di *cut-off* è legato alla lunghezza media degli elementi del profilo, ossia il parametro RSm , calcolato come:

$$RSm = f \cdot 1\text{giro} = 0,05 \text{ mm} \quad (4.9)$$

Dunque, la distanza tra i solchi lasciati dall'utensile corrisponde con l'avanzamento al giro f . Per la determinazione della lunghezza di base del profilo si usa la tabella 4.1, secondo la norma UNI EN ISO 4288.

RSm [mm]	Lunghezza di base l_r [mm]	Lunghezza di valutazione l_n [mm]
$0,013 < RSm \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4
$0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < RSm \leq 4$	8	40

Tabella 4.1: Lunghezza di base del profilo e lunghezza di valutazione in funzione del parametro RSm . Fonte: [47]

Si adotta una lunghezza di base, corrispondente al filtro λ_c , di 0,25 mm. La lunghezza di valutazione è di 1,25 mm. Visto che questa lunghezza è ampiamente contenuta nell'area acquisita, si è scelto di usare lo strumento "crop" per selezionare un'area più ristretta del profilo, 2,0 mm x 0,6 mm, così da rimuovere possibili effetti di bordo. (figura 4.17)

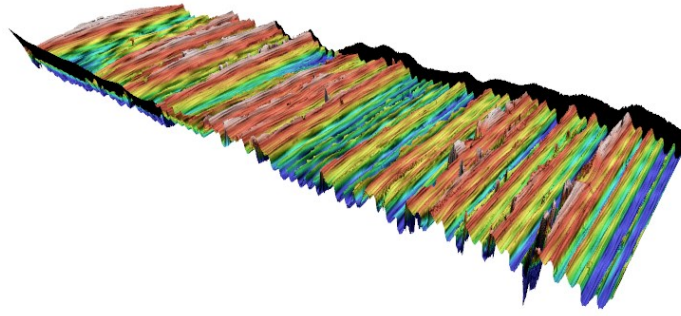


Figura 4.17: Superficie ottenuta mediante rimozione dell'errore di forma con un polinomio di grado 3. Sono visibili effetti di bordo.

Il software dà la possibilità di calcolare i parametri di rugosità R utilizzando con lo strumento apposito “ISO 4287”, dopo avere selezionato una sezione del profilo, ed impostando il valore di *cut-off*. Analogamente per i parametri di rugosità S si usa lo strumento “ISO 25178”, mantenendo il valore di *cut-off* a 0,25 mm. I parametri S hanno un maggior significato statistico rispetto agli equivalenti parametri di profilo R, poiché contengono più punti di dati, e una mappa areale è una rappresentazione più accurata della superficie reale. Pertanto, si è scelto di utilizzare i parametri S per confrontare le diverse condizioni di lubrorefrigerazione. [9].

4.2.5 Risultati rugosità

Le topografie estratte dall'acquisizione delle superfici, con dimensioni 400 μm x 400 μm , sono riportati nelle figure 4.18, 4.19 e 4.20. Si osservano solchi di tornitura (feed marks) ben definiti nella condizione di lubrificazione e raffreddamento criogenico, mentre sono meno evidenti nella condizione a secco. La distanza tra i feed marks è di circa 0,05 mm, che corrisponde all'avanzamento f impostato durante la lavorazione.

I parametri areali S, ottenuti con la normativa ISO 25178, suddivisi per serie di lubrorefrigerazione e velocità di taglio, sono riportati in tabella 4.2 e nelle figure 4.21, 4.22 e 4.23.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

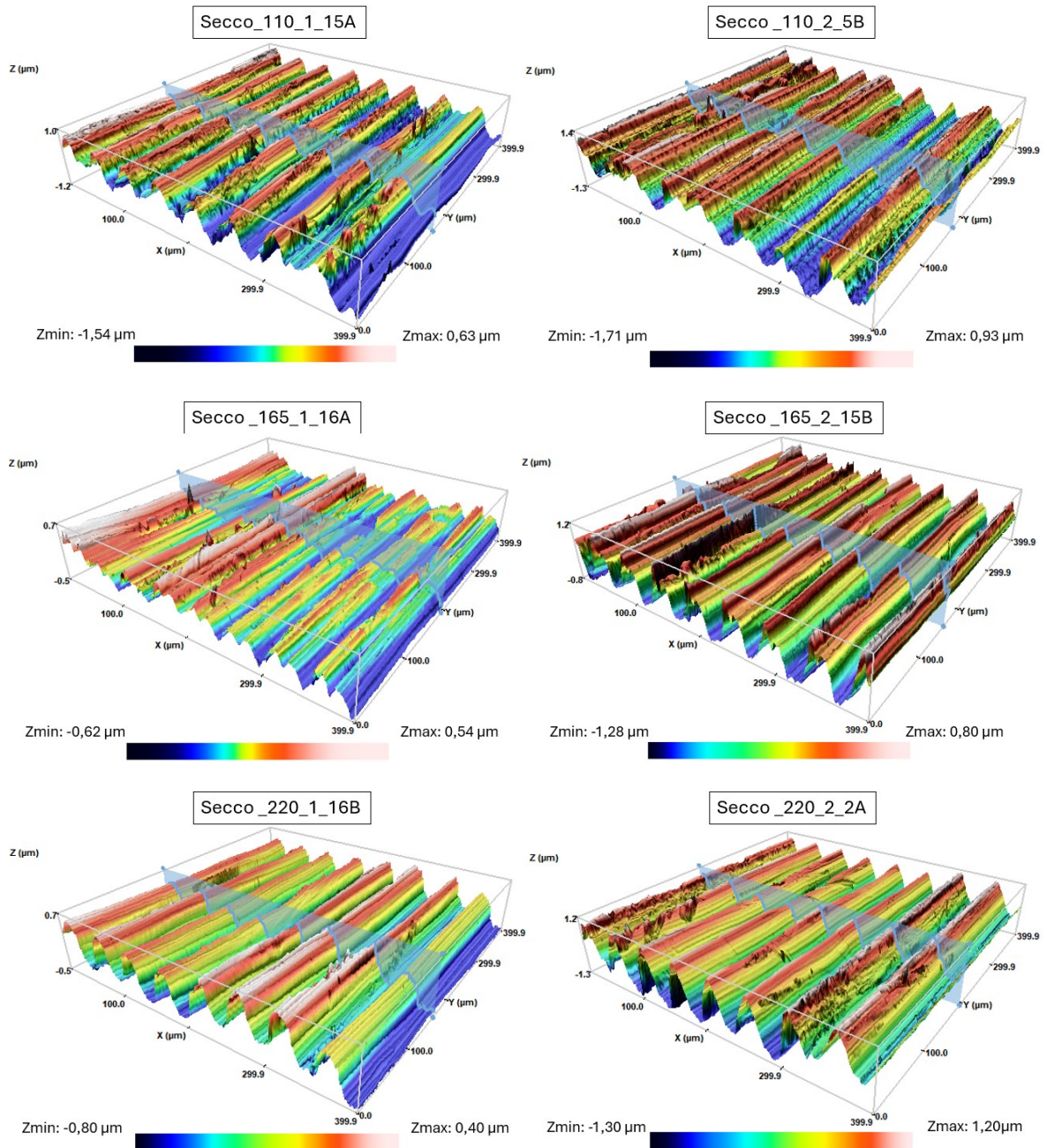


Figura 4.18: Superficie estratta dalla scansione con profilometro ottico 3D dei campioni per la serie a secco al variare della velocità di taglio.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

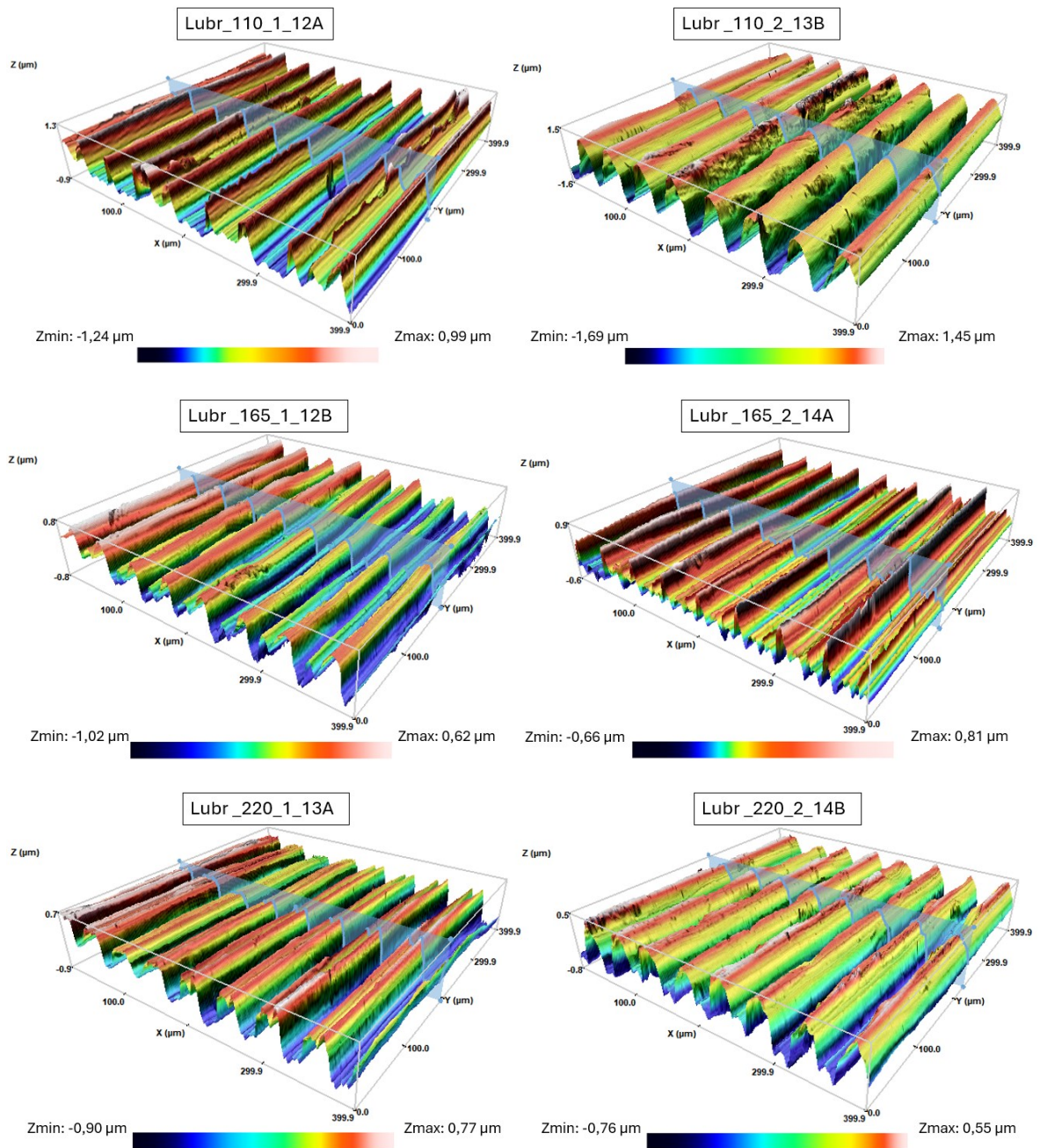


Figura 4.19: Superficie estratta dalla scansione con profilometro ottico 3D dei campioni per la serie lubrificata al variare della velocità di taglio.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

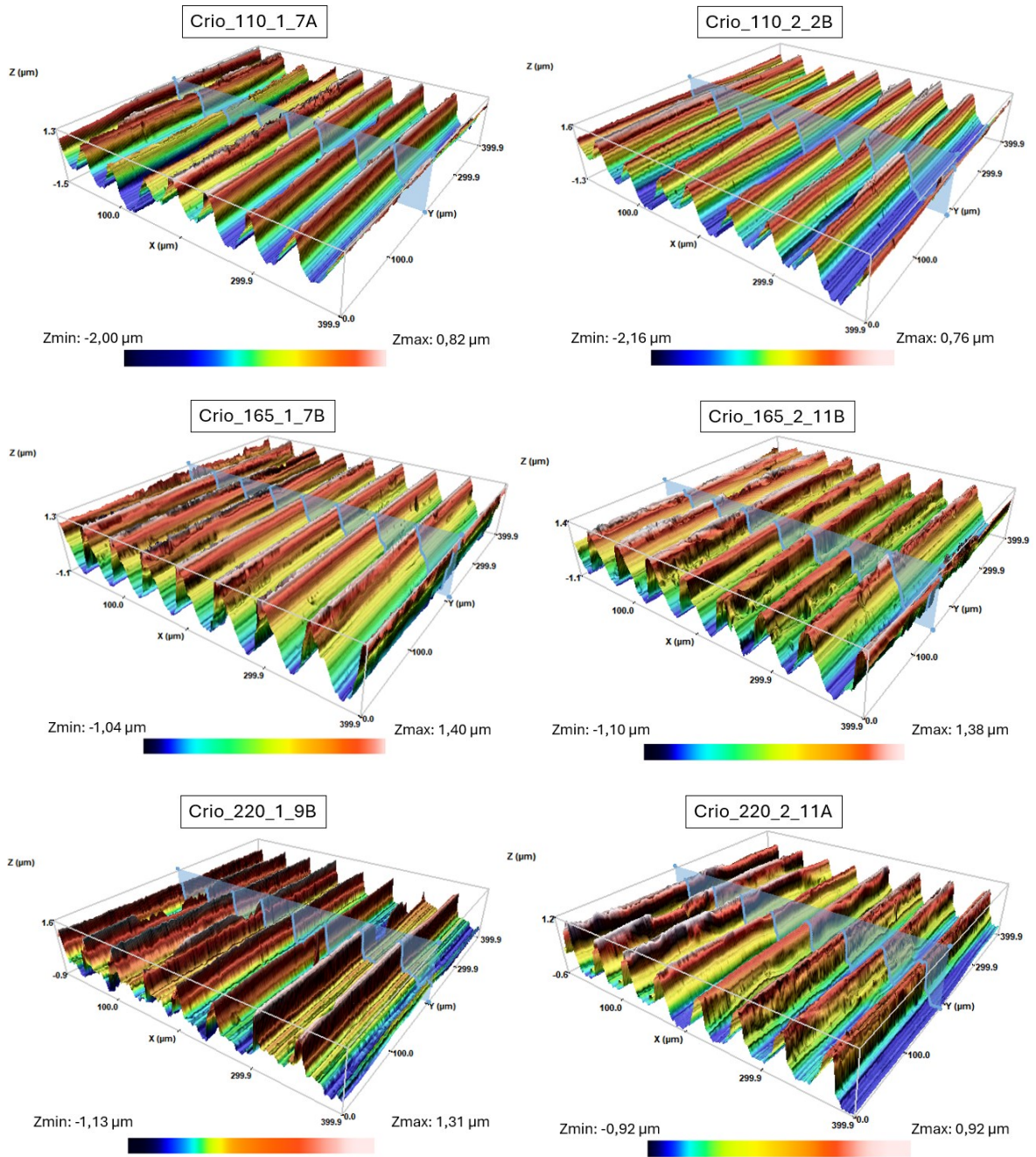


Figura 4.20: Superficie estratta dalla scansione con profilometro ottico 3D dei campioni per la serie con raffreddamento criogenico al variare della velocità di taglio.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

Serie	Sa [μm]	Dev.St. Sa	Ssk	Dev. St. Ssk	Sku	Dev. St. Sku
Secco_110	0,39	0,08	-0,15	0,26	2,98	0,52
Secco_165	0,37	0,07	-0,05	0,05	2,06	0,18
Secco_220	0,27	0,04	0,05	0,16	2,52	0,54
Lubr_110	0,39	0,03	0,14	0,56	3,04	0,83
Lubr_165	0,29	0,09	0,16	0,62	3,01	0,72
Lubr_220	0,24	0,08	-0,13	0,22	1,97	0,30
Crio_110	0,62	0,01	0,01	0,04	2,48	0,28
Crio_165	0,63	0,01	0,29	0,02	1,76	0,02
Crio_220	0,29	0,01	-0,46	0,05	3,41	0,15

Tabella 4.2: Parametri di rugosità superficiale per i campioni delle tre serie al variare della velocità di taglio.

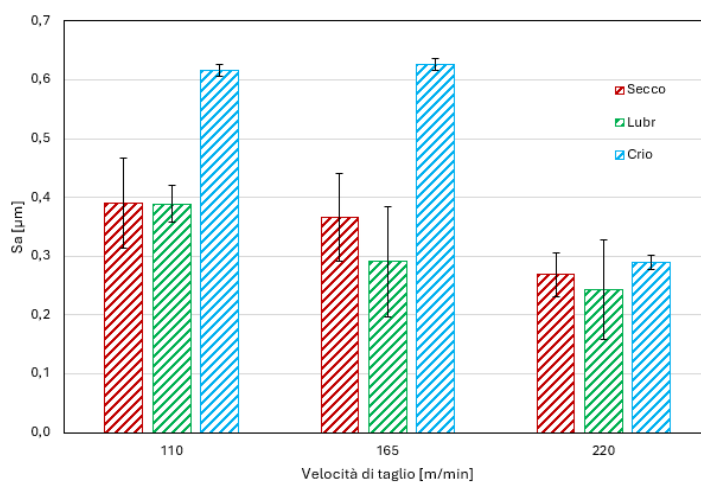


Figura 4.21: Parametro superficiale di rugosità Sa per le tre condizioni di lubrorefrigerazione al variare della velocità di taglio.

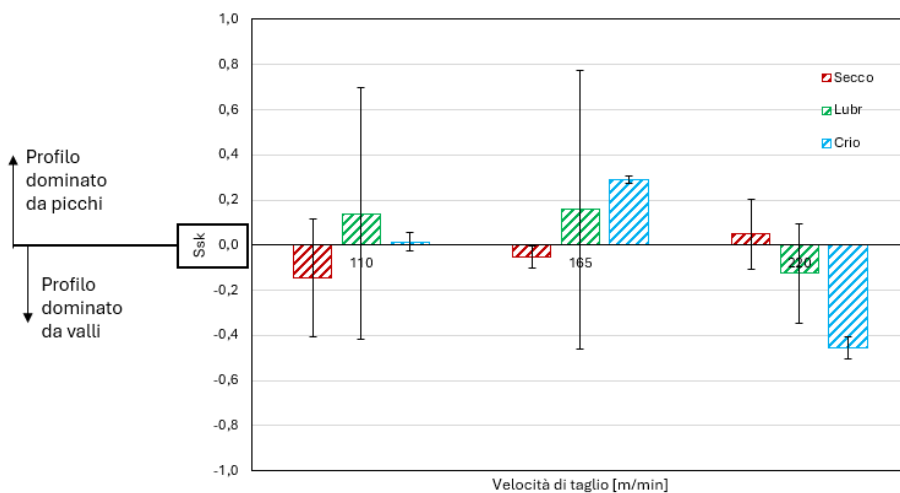


Figura 4.22: Parametro superficiale di rugosità Ssk per le tre condizioni di lubrorefrigerazione al variare della velocità di taglio.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

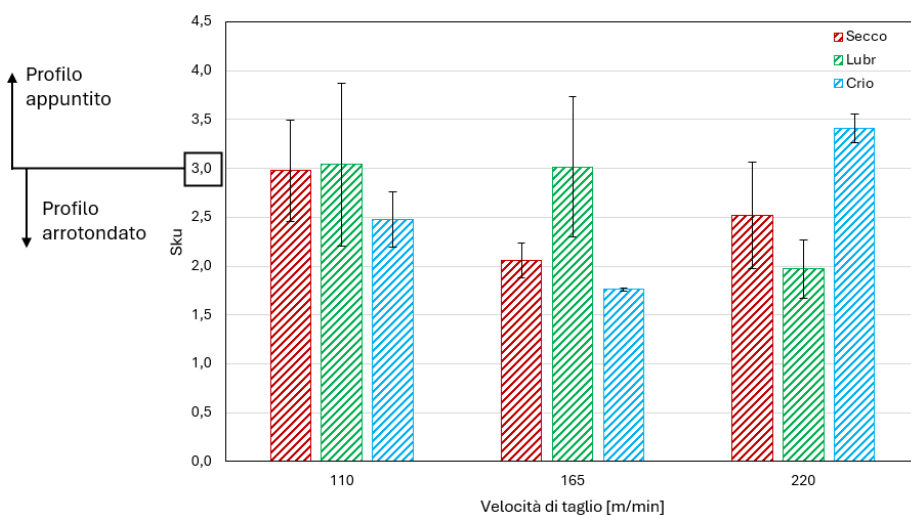


Figura 4.23: Parametro superficiale di rugosità S_{sk} per le tre condizioni di lubrorefrigerazione al variare della velocità di taglio.

Osservando il parametro di rugosità superficiale media S_a , figura 4.21, le condizioni di lubrorefrigerazione che mostrano una migliore finitura superficiale sono quelle con lubrificazione ad inondazione e a secco, le quali sono statisticamente comparabili. Alle velocità inferiori, il raffreddamento criogenico ha comportato una rugosità superficiale media S_a maggiore del 37% e 54% rispetto alla condizione di lubrificazione, e del 37% e 41% rispetto alla condizione a secco. Alla velocità superiore, questa differenza si riduce, rimanendo comunque maggiore del 16% rispetto alla condizione lubrificata e del 7% rispetto alla condizione a secco. La variabilità è maggiore per le serie con lubrificazione e a secco; pertanto, alla velocità di 220 m/min , il parametro di rugosità S_a per la serie criogenica è comparabile con le altre condizioni.

In tutte e tre le serie vi è una diminuzione del parametro di rugosità media superficiale all'aumentare della velocità di taglio. Nel raddoppiare la velocità di taglio da 110 m/min a 220 m/min , la rugosità superficiale cala del 53% per il raffreddamento criogenico, del 37% per la condizione con lubrificazione e del 31% per la serie a secco.

Con un aumento delle forze di taglio, come avviene nella lavorazione a secco, ci si aspetterebbe un peggioramento della rugosità superficiale. Tuttavia, il parametro S_a risulta minore per la lavorazione a secco e maggiore per la lavorazione con raffreddamento criogenico, dove sono state misurate le minori forze di taglio. Il parametro di rugosità S_{sk} , figura 4.22, descrive la distribuzione dei picchi del profilo di rugosità. Per le serie lubrificate emerge un andamento del profilo simmetrico, e non si nota una variazione significativa con l'aumento della velocità di taglio. Tuttavia, per la condizione a secco, si nota come a velocità minori il profilo sia dominato da valli, mentre per la condizione con raffreddamento criogenico questo sia dominato da picchi. L'elevato carico termico nella serie a secco induce un comportamento più viscoso del materiale, che, come osservato dalla morfologia della superficie al SEM nella figura 4.3, porta ad un appiattimento dei picchi dovuto a maggiori deformazioni plastiche, correlate all'aumento della

forza di taglio e a un attrito maggiore. Al contrario, con il raffreddamento criogenico, si osservano picchi più regolari, poiché le temperature di lavorazione rimangono basse e stabili, comportando forze minori e un minor attrito.

Il parametro *Sku* fornisce informazioni sulla forma dei picchi del profilo di rugosità. Tuttavia, non sembra esserci un andamento caratteristico influenzato dalla condizione di lubrificazione o dalla velocità di taglio, ma piuttosto una grande variabilità.

4.3 Caratterizzazione meccanica della superficie del ferro puro lavorato

Durante le operazioni di lavorazione, la superficie del pezzo viene esposta a energie termiche e meccaniche che possono portare all'incrudimento del materiale, con conseguente aumento della durezza e diminuzione della duttilità. Questi effetti termici (alta temperatura e rapido raffreddamento) e meccanici (elevato stress e deformazione) sono le principali cause delle alterazioni microstrutturali nel materiale, così come delle trasformazioni di fase e delle deformazioni plastiche.

4.3.1 Strato di deformazione plastica severa

La deformazione indotta dalla lavorazione sulla superficie è chiamata deformazione plastica severa della superficie. Come risultato del processo di rimozione del materiale si genera uno strato di deformazione plastica severa, SPD layer (severe plastic deformation layer, figura 4.24).

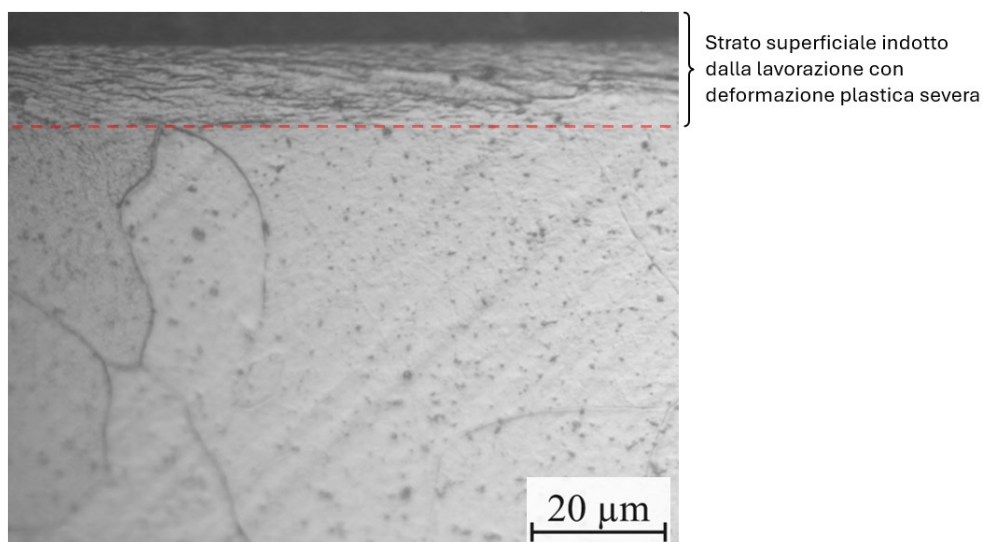


Figura 4.24: Strato di deformazione plastica severa.

Serie a secco, velocità di taglio 165 m/min. Ingrandimento 500x LM.

Va notato che lo spessore di questo strato dipende da molti parametri, come le proprietà termiche e meccaniche del materiale di lavoro, le condizioni di taglio (raffreddamento, lubrificazione, ecc.),

i parametri di taglio (velocità di taglio, avanzamento e profondità di taglio) e le geometrie dell'utensile da taglio (angolo di spoglia, raggio di punta, ecc.).

Durante i processi di lavorazione si generano velocità di deformazione e temperature molto elevate. Anche se la temperatura più alta è registrata nell'area di contatto tra l'utensile e il truciolo, lo strato superficiale del materiale lavorato è anch'esso influenzato dalle temperature generate. [62]

Nelle figure 4.25, 4.26 e 4.27 sono riportate le immagini ottenute al microscopio ottico, seguendo la procedura illustrata nel § 2.2.3, della microstruttura dei campioni inglobati dopo la tornitura, con evidenziato lo strato di deformazione plastica severa. Sono state eseguite 10 misure per ogni campione ed è stata poi calcolata una media, con deviazione standard, riportate in tabella 4.3 e riassunte in figura 4.28.

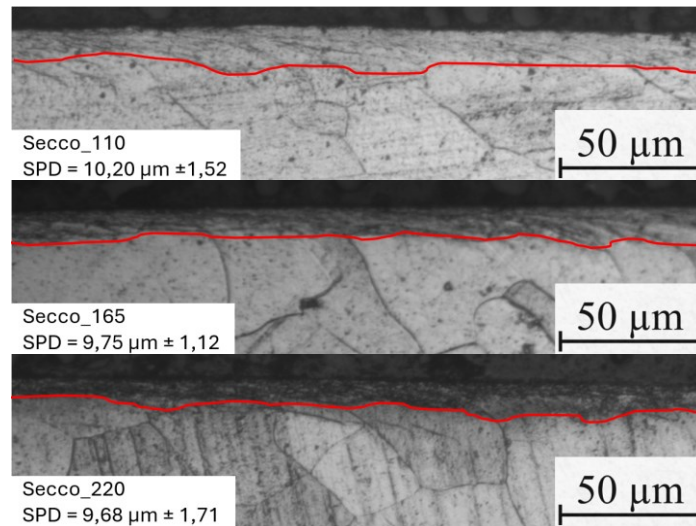


Figura 4.25: Strato di deformazione plastica severa, serie a secco, velocità di taglio 110, 165 e 220 m/min. Ingrandimento 200x LM.

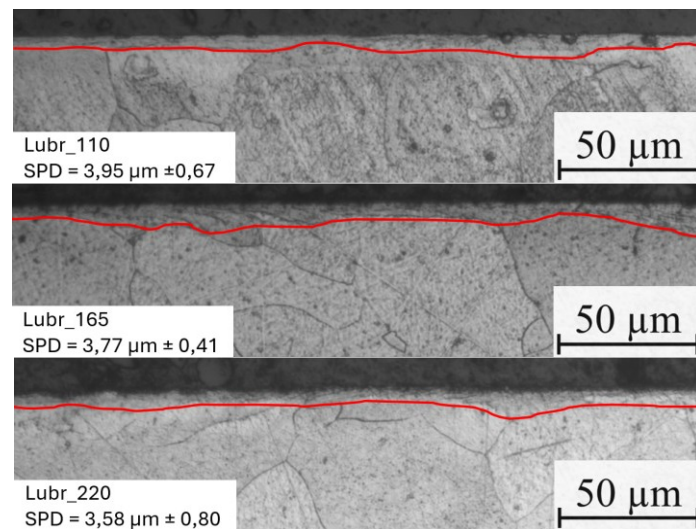


Figura 4.26: Strato di deformazione plastica severa, serie con lubrificazione, velocità di taglio 110, 165 e 220 m/min. Ingrandimento 200x LM.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

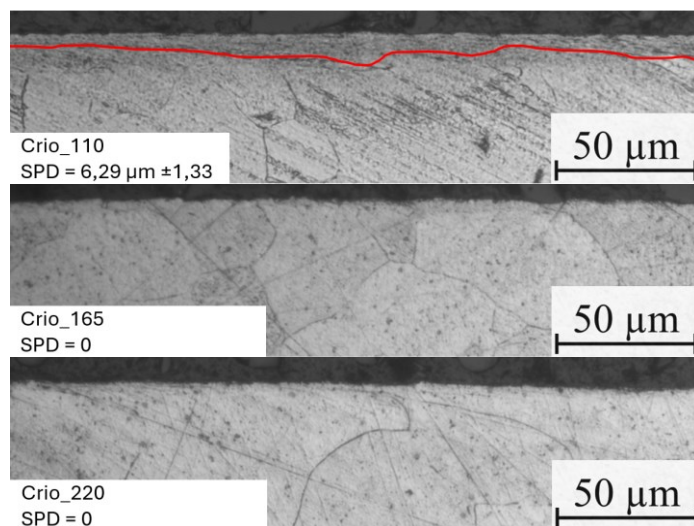


Figura 4.27: Strato di deformazione plastica severa, serie con raffreddamento criogenico, velocità di taglio 110, 165 e 220 m/min. Ingrandimento 200x LM.

Serie	SPD layer [μm]	Dev.St.
Secco_110	10,20	1,52
Secco_165	9,75	1,12
Secco_220	9,68	1,71
Lubr_110	3,96	0,67
Lubr_165	3,77	0,41
Lubr_220	3,58	0,80
Crio_110	6,29	1,33
Crio_165	0	-
Crio_220	0	-

Tabella 4.3: Spessore dello strato di deformazione plastica severa, SPD layer, per le tre serie di lubrorefrigerazione al variare della velocità di taglio.

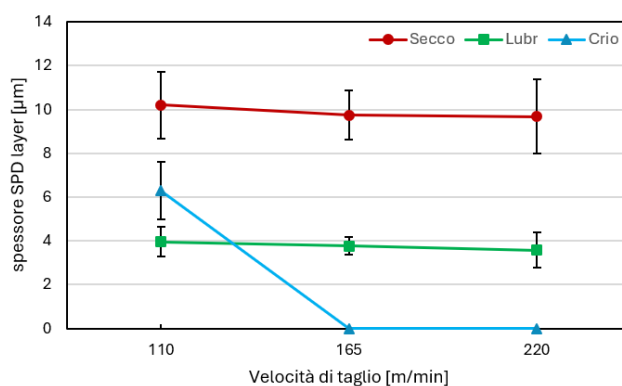


Figura 4.28: Spessore dello strato di deformazione plastica severa per le tre condizioni di lubrorefrigerazione al variare della velocità di taglio.

L'andamento dello strato di deformazione plastica, mostrato in figura 4.28, è analogo all'andamento delle forze di taglio, dato che lo strato deformato è influenzato dalla temperatura e dalla velocità di deformazione. [55]

La condizione di lavorazione più severa, ossia quella a secco, comporta uno spessore maggiore rispetto alle altre condizioni di lubrorefrigerazione. Questo è dovuto alle maggiori deformazioni imposte al materiale.

Per la condizione lubrificata lo spessore dello strato deformato è inferiore alla condizione a secco poiché l'effetto termico è mitigato dall'effetto di raffreddamento del lubrificante.

Il raffreddamento criogenico durante la lavorazione è noto per il suo effetto di incrudimento superficiale, il quale aumenta la durezza e la resistenza del materiale alle deformazioni successive. [13,14,25]. Nella condizione di raffreddamento criogenico, alla velocità di taglio di 110 m/min, si osserva uno strato di deformazione dovuto all'effetto di incrudimento. Man mano che la velocità di taglio aumenta, si nota una localizzazione della deformazione da taglio e persino una diminuzione dello spessore dello strato di deformazione plastica severa. [26,27,28,29,54] Questa diminuzione, e scomparsa, dello strato alterato è associata all'effetto di lubrificazione dell'azoto liquido, che ha contribuito anche a ridurre le forze di taglio rispetto alle altre due condizioni di lubrorefrigerazione, come già discusso nella sezione dedicata §3.7.

L'aumento dello spessore dello strato di deformazione ha un'influenza sui processi di magnetizzazione dei domini, poiché l'aumento delle dislocazioni significa un aumento dei siti di ancoraggio. Questo implica che la lavorazione a secco e con lubrificazione contribuiscono ad aumentare le perdite del ciclo di isteresi magnetica. Il raffreddamento criogenico, soprattutto alle più alte velocità, è in grado di mantenere inalterata la microstruttura superficiale e quindi le proprietà magnetiche.

4.3.2 Durezza

Nel processo di lavorazione, il materiale nella zona di deformazione primaria viene trascinato nella direzione di taglio. A causa dell'incrudimento nello strato deformato, la durezza della superficie è superiore rispetto a quella del metallo di base e diminuisce con l'aumentare della profondità dalla superficie, fino a raggiungere il valore di durezza del materiale di base ad una certa profondità. [22,28,62]

4.3.2.1 Microdurezza

Le prove di microdurezza possono essere utilizzate per quantificare l'effetto dell'incrudimento al variare della distanza dalla superficie.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

Come descritto nel capitolo §2.3, nello specifico in figura 2.18, la distanza tra due impronte successive deve essere di 3 volte la loro diagonale media. La normativa EN ISO 6507-1 prevede inoltre che la prima impronta dalla superficie libera sia ad una distanza pari di 2,5 volte la diagonale media dell'impronta. In queste prove, tale condizione non può essere rispettata. Dopo alcune sperimentazioni, si è deciso di valutare la microdurezza al variare della distanza dalla superficie lavorata, seguendo una composizione come quella illustrata in figura 4.29. Le impronte vengono disposte in diagonale, in modo che la distanza tra due impronte successive sia mantenuta a 3 volte la loro diagonale, evitando così che la deformazione plastica di un'impronta possa influire sulla successiva. La distanza massima di valutazione dalla superficie lavorata è stata determinata sperimentalmente e fissata a $200\ \mu\text{m}$, poiché in tutte le condizioni di lubrorefrigerazione si raggiunge la microdurezza del materiale di base a una distanza inferiore. Si è deciso di valutare la variazione della microdurezza ogni $20\ \mu\text{m}$, e ogni misurazione è stata ripetuta tre volte per ogni velocità di lavorazione. La media dei valori di durezza, calcolata utilizzando la relazione 2.2, è stata riportata nelle tabelle 4.4, 4.5, 4.6.

La procedura adottata è quella descritta nel capitolo §2.3, dopo aver prelevato una sezione del campione tornito secondo lo schema di figura 2.11. Si è utilizzato il microdurometro *Miniload 2* della ditta *Leitz*TM con un carico di $50\ \text{gf}$ e tempo di penetrazione di 30 secondi. Per la misura delle diagonali si è usato il microscopio ottico *DMR Leica*[®] e il software *Zeiss ZEN core*.

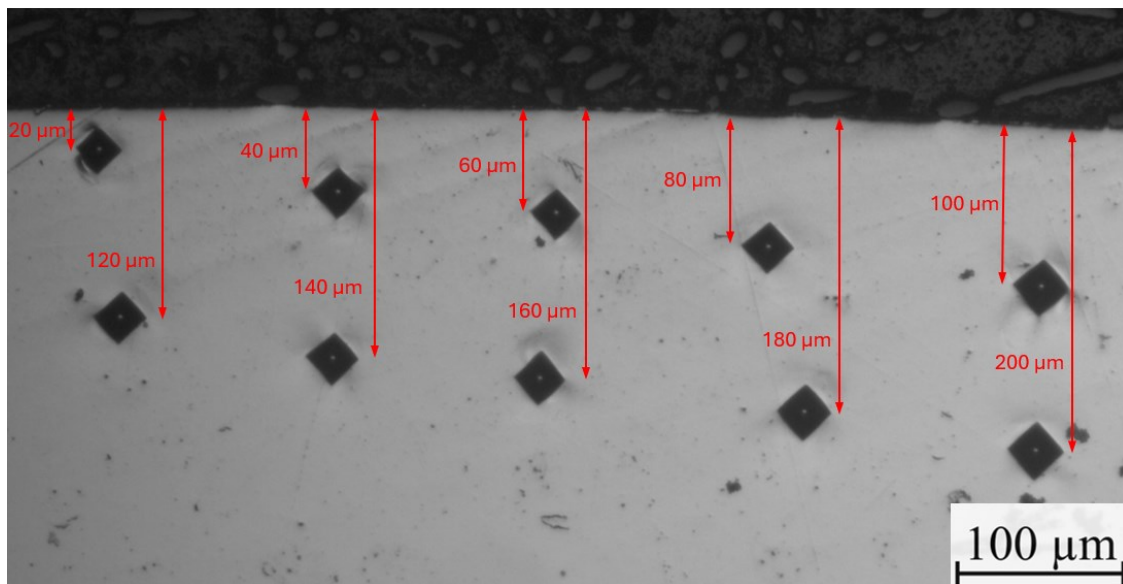


Figura 4.29: Composizione delle misure di indentazione eseguite con carico di $50\ \text{gf}$ per $30\ \text{s}$, campione tornito serie *Secco* a velocità di taglio $165\ \text{m/min}$, sezione trasversale. Ingrandimento $100\times\ \text{LM}$.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

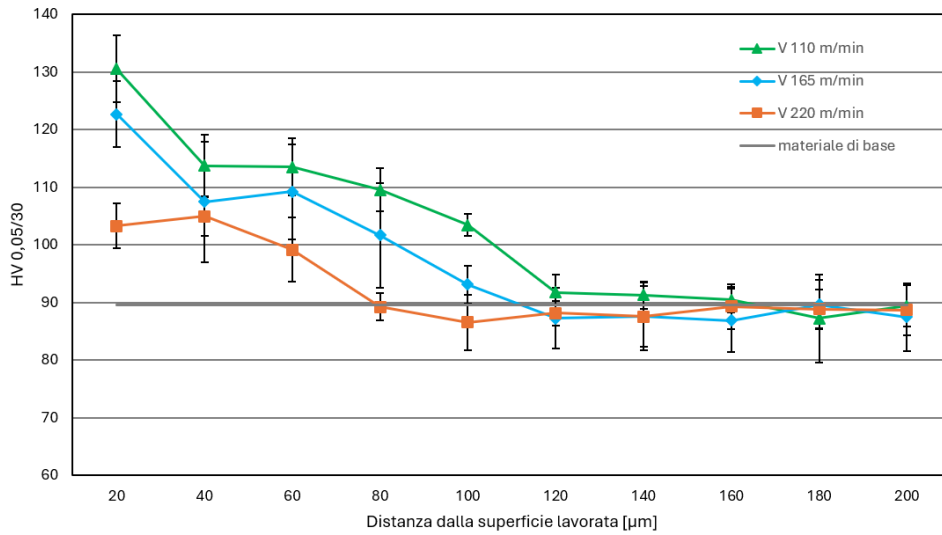


Figura 4.30: Confronto delle misure di microdurezza per la serie a secco all'aumentare della distanza dalla superficie lavorata. Lo spezzone di Ferro Puro ARMCO® ha una durezza di 89,67 HV_{0,05/30}.

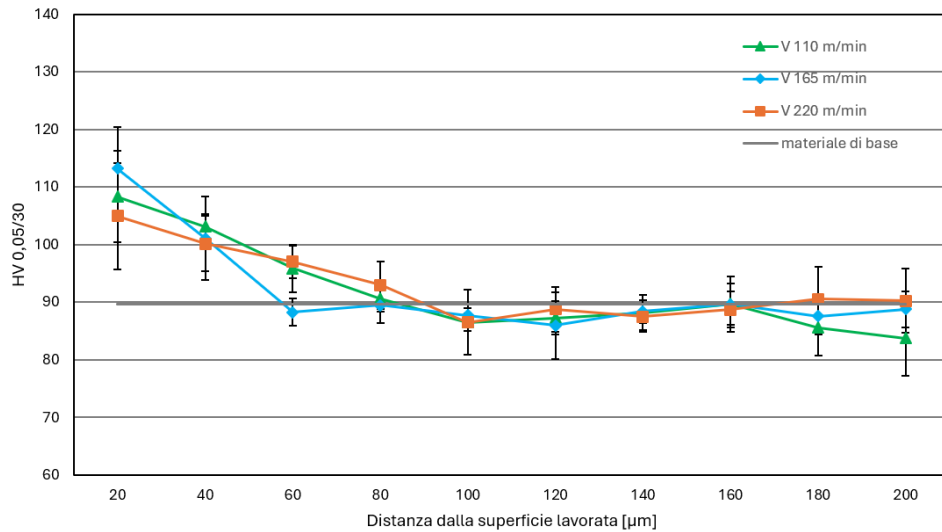


Figura 4.31: Confronto delle misure di microdurezza per la serie con lubrificazione all'aumentare della distanza dalla superficie lavorata. Lo spezzone di Ferro Puro ARMCO® ha una durezza di 89,67 HV_{0,05/30}.

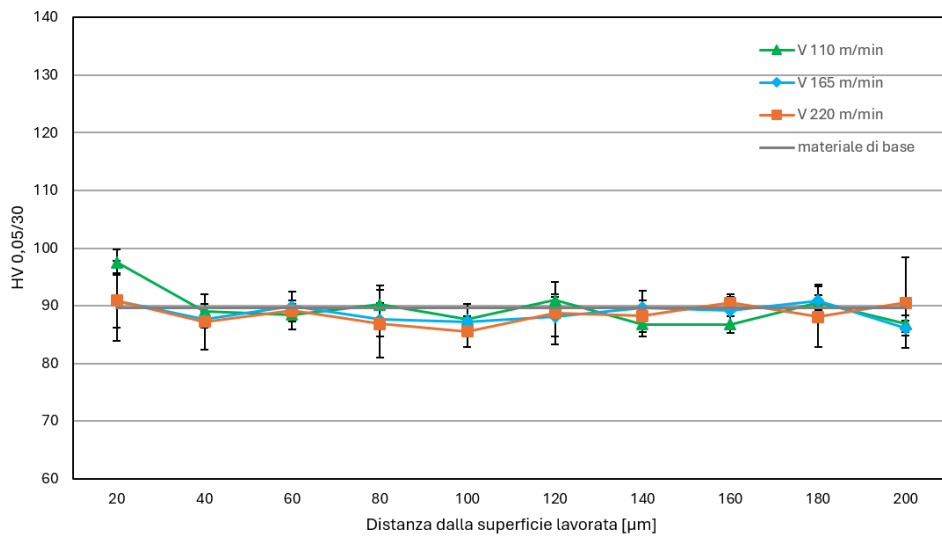


Figura 4.32: Confronto delle misure di microdurezza per la serie con raffreddamento criogenico all'aumentare della distanza dalla superficie lavorata. Lo spezzone di Ferro Puro ARMCO® ha una durezza di 89,67 HV_{0,05/30}.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

Serie	Secco_110		Secco_165		Secco_220	
	HV 0,05/30	Dev. St.	HV 0,05/30	Dev. St.	HV 0,05/30	Dev. St.
Distanza dalla superficie lavorata [μm]						
20	130,56	5,84	122,68	5,69	103,28	3,90
40	113,78	5,32	107,50	10,42	104,96	3,30
60	113,50	4,96	109,23	8,29	99,20	5,62
80	109,58	3,70	101,68	9,09	89,29	2,41
100	103,46	1,95	93,13	3,24	86,56	4,75
120	91,79	3,12	87,29	5,22	88,20	2,15
140	91,29	2,36	87,61	5,89	87,60	5,23
160	90,51	2,21	86,90	5,45	89,30	3,84
180	87,30	7,63	89,66	4,23	88,90	3,35
200	84,43	3,58	85,40	5,85	86,74	4,46

Tabella 4.4: Misure di microdurezza Vickers per la serie a secco, sezione trasversale, all'aumentare della distanza della superficie lavorata.

Serie	Lubr_110		Lubr_165		Lubr_220	
	HV 0,05/30	Dev. St.	HV 0,05/30	Dev. St.	HV 0,05/30	Dev. St.
Distanza dalla superficie lavorata [μm]						
20	108,36	7,97	113,19	7,23	104,99	9,25
40	103,17	2,18	101,12	7,20	100,22	4,76
60	95,93	4,13	88,27	2,34	97,05	2,83
80	90,63	2,23	89,46	3,12	93,01	4,14
100	86,49	5,65	87,73	1,28	86,54	1,58
120	87,30	2,90	85,96	5,82	88,80	3,86
140	88,10	3,18	88,40	1,96	87,48	2,32
160	89,70	4,86	89,64	3,62	88,76	3,13
180	85,60	4,78	87,58	3,15	90,55	5,69
200	83,80	6,49	88,79	3,11	90,28	5,54

Tabella 4.5: Misure di microdurezza Vickers per la serie con lubrificazione sezione trasversale, all'aumentare della distanza della superficie lavorata.

Serie	Crio_110		Crio_165		Crio_220	
	HV 0,05/30	Dev. St.	HV 0,05/30	Dev. St.	HV 0,05/30	Dev. St.
Distanza dalla superficie lavorata [μm]						
20	97,56	2,20	90,87	4,71	90,90	6,97
40	89,08	1,24	87,60	1,39	87,20	4,83
60	88,43	2,56	89,86	2,65	89,10	1,18
80	90,20	3,26	87,60	2,90	86,85	5,86
100	87,63	2,61	87,20	1,00	85,52	2,64
120	90,94	1,05	88,10	3,49	88,72	5,45
140	86,78	2,15	89,70	2,86	88,20	2,76
160	86,75	1,49	89,10	2,92	90,51	1,07
180	90,50	1,27	90,85	2,80	88,07	5,25
200	86,84	1,47	86,10	1,34	90,51	7,82

Tabella 4.6: Misure di microdurezza Vickers per la serie con raffreddamento criogenico, sezione trasversale, all'aumentare della distanza della superficie lavorata.

Dalla figura 4.30 si evince che la serie a secco presenta un incrudimento maggiore rispetto alle altre serie. La prima impronta, effettuata a $20\ \mu\text{m}$ dalla superficie lavorata, mostra una microdurezza maggiore rispetto al materiale di base del 31%, 27% e 13%, rispettivamente alle velocità di taglio di 110, 165 e $220\ \text{m/min}$. Questo è attribuibile all'aumento delle dislocazioni generate durante la lavorazione. L'incremento della durezza si estende fino a una profondità di $120\ \mu\text{m}$ dalla superficie lavorata. Tuttavia, aumentando la velocità di taglio a $220\ \text{m/min}$, questa profondità si riduce a $80\ \mu\text{m}$.

Lo stesso fenomeno è osservabile nella figura 4.31 per la serie lubrificata. La prima impronta mostra un incremento della microdurezza rispetto al materiale di base del 17%, 21% e 15%, rispettivamente alle velocità di taglio di 110, 165 e $220\ \text{m/min}$. Lo strato influenzato dalla lavorazione si estende fino a una profondità di $80\ \mu\text{m}$ dalla superficie lavorata, e con l'aumento della velocità a $220\ \text{m/min}$ fino a $60\ \mu\text{m}$.

Osservando invece la figura 4.32, per la serie con raffreddamento criogenico, l'aumento della microdurezza è solo associato alla velocità di taglio inferiore, con un aumento del 8% rispetto al materiale di base, e con uno strato alterato di circa $40\ \mu\text{m}$.

Un aumento della velocità di taglio ha comportato una diminuzione del valore massimo di microdurezza, analogamente a quanto osservato con le forze di taglio.

Nel confronto tra le diverse serie, si nota che la lavorazione a secco provoca un aumento più significativo della microdurezza superficiale, interessando uno spessore maggiore rispetto alle altre condizioni. Un fenomeno analogo è stato osservato per lo strato di deformazione plastica. L'uso del lubrorefrigerante convenzionale sembra mitigare parzialmente questo effetto, provocando una densità di dislocazioni e uno strato di deformazione severa inferiore rispetto alla condizione a secco. Diversamente, il raffreddamento criogenico si dimostra efficace nel ridurre o eliminare l'influenza della lavorazione sullo stato di dislocazioni del materiale. Solo alla velocità di $110\ \text{m/min}$ l'influenza della lavorazione sul materiale è rilevabile; alle velocità superiori, questo effetto scompare, analogamente a quanto osservato per lo strato di deformazione plastica.

Dato che con l'aumento della durezza, la forza coercitiva cresce, rendendo più difficile l'inversione delle pareti dei domini magnetici, si deduce che la lavorazione a secco porta ad un degrado delle proprietà magnetiche maggiore rispetto alla condizione con lubrificazione e con raffreddamento criogenico. Sebbene la condizione con lubrificazione sia più efficace della lavorazione a secco nel preservare le proprietà magnetiche, non è altrettanto efficiente quanto il raffreddamento criogenico nel mantenere inalterate le caratteristiche magnetiche del prodotto.

4.3.2.2 Nanoindentazione

Poiché nelle prove di microdurezza sono stati introdotti errori di misura a causa del mancato rispetto delle distanze minime dalla superficie libera del pezzo, si è deciso di valutare la durezza, al variare della distanza dalla superficie lavorata, utilizzando il nanoindentatore descritto nel §2.3.2. La distanza massima di valutazione dalla superficie lavorata è stata determinata sperimentalmente e fissata a $200\ \mu\text{m}$, La variazione della durezza è valutata ogni $20\ \mu\text{m}$, la composizione delle impronte è visibile in figura 4.33. Si utilizza il metodo *ISO 14577 Constant Loading Rate Indentation* e i parametri di prova utilizzati, impostati tramite il software *InView*, sono riportati in tabella 4.7

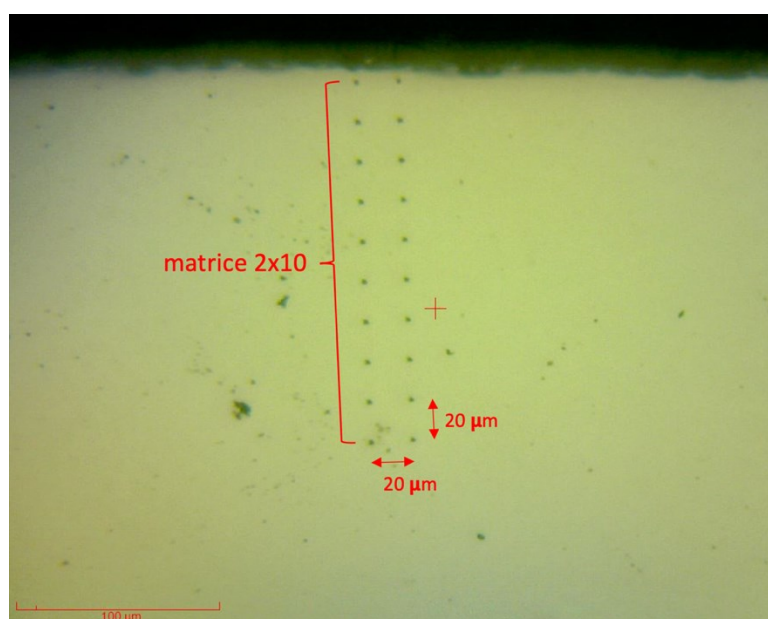


Figura 4.33: Composizione delle misure di nanoindentazione, visualizzata con la telecamera presente all'interno dello strumento iMicro Nanoindenter.

Nome	Valore
Distanza di avvicinamento alla superficie [<i>nm</i>]	2000
Velocità di avvicinamento alla superficie [<i>nm</i>]	100
Carico target [<i>mN</i>]	10
Tempo di caricamento [<i>s</i>]	30
Tempo di permanenza [<i>s</i>]	10

Tabella 4.7: Parametri per misure di nanoindentazione.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

Le misure di durezza effettuate con il nanoindentatore, come illustrato nelle figure 4.34, 4.35 e 4.36, confermano i risultati ottenuti dalle misurazioni di microdurezza.

La lavorazione a secco incrudisce la superficie lavorata in maniera più marcata rispetto alle altre condizioni di lubrorefrigerazione, con uno strato alterato di circa 100-140 μm , a seconda della velocità di taglio. La durezza della prima impronta è superiore del 31-37% rispetto al materiale di base.

La lavorazione con lubrificazione comporta un aumento della durezza del 24-30% rispetto al materiale di base, con uno spessore incrudito di 60-100 μm , in funzione della velocità di taglio.

La lavorazione con raffreddamento criogenico produce uno strato incrudito di circa 20-40 μm , con un incremento della durezza del 8-16% rispetto al materiale di base.

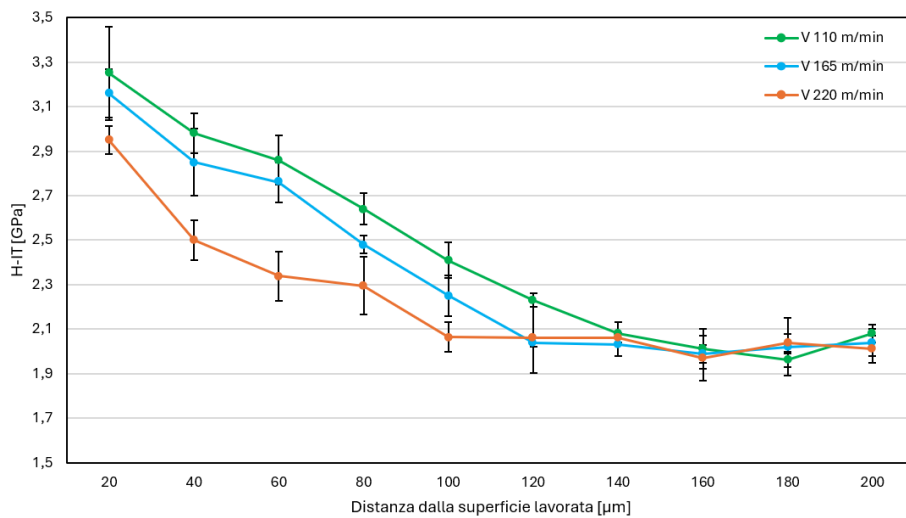


Figura 4.34: Confronto delle misure di durezza dell'impronta per la serie a secco, all'aumentare della distanza dalla superficie lavorata, eseguite con il nanoindentatore.

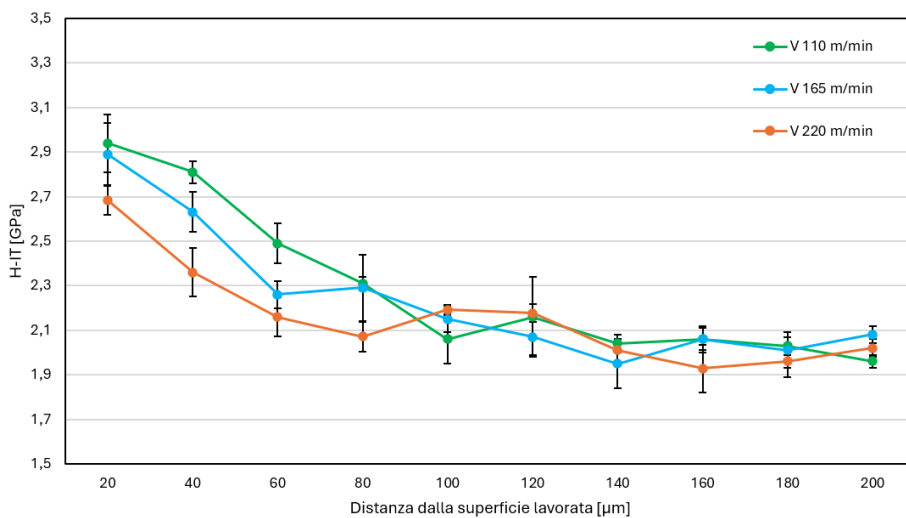


Figura 4.35: Confronto delle misure di durezza dell'impronta per la serie con lubrificazione, all'aumentare della distanza dalla superficie lavorata, eseguite con il nanoindentatore.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

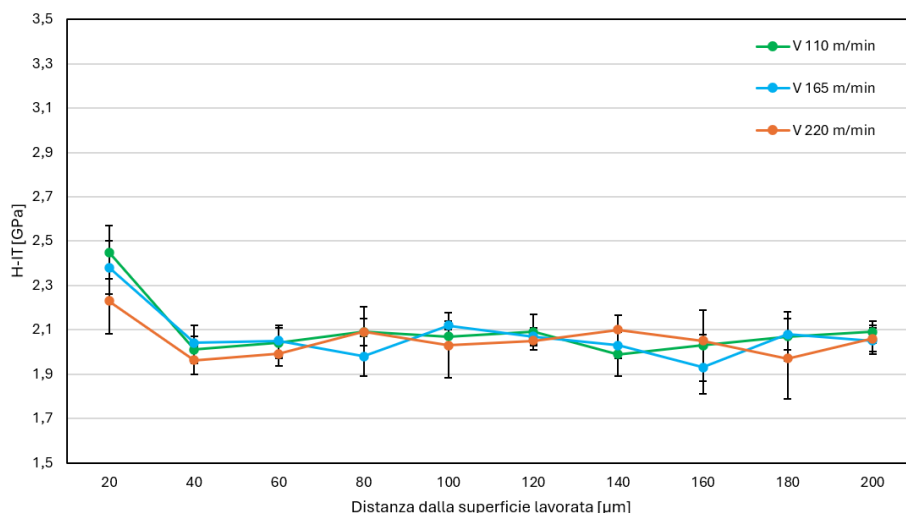


Figura 4.36: Confronto delle misure di durezza dell'impronta per la serie con raffreddamento criogenico, all'aumentare della distanza dalla superficie lavorata, eseguite con il nanoindentatore.

Serie	Secco_110		Secco_165		Secco_220	
	H-IT [GPa]	Dev. St.	H-IT [GPa]	Dev. St.	H-IT [GPa]	Dev. St.
Distanza dalla superficie lavorata [μm]						
20	3,25	0,21	3,16	0,11	2,95	0,06
40	2,98	0,09	2,85	0,15	2,50	0,09
60	2,86	0,11	2,76	0,09	2,34	0,11
80	2,64	0,07	2,48	0,04	2,30	0,13
100	2,41	0,08	2,25	0,09	2,06	0,07
120	2,23	0,03	2,04	0,02	2,06	0,16
140	2,08	0,05	2,03	0,05	2,06	0,02
160	2,01	0,09	1,99	0,04	1,97	0,10
180	1,96	0,03	2,02	0,13	2,04	0,04
200	2,08	0,04	2,04	0,06	2,01	0,06

Tabella 4.8: Misure di durezza dell'impronta per la serie a secco, sezione trasversale, all'aumentare della distanza della superficie lavorata.

Serie	Lubr_110		Lubr_165		Lubr_220	
	H-IT [GPa]	Dev. St.	H-IT [GPa]	Dev. St.	H-IT [GPa]	Dev. St.
Distanza dalla superficie lavorata [μm]						
20	2,94	0,13	2,89	0,14	2,68	0,06
40	2,81	0,05	2,63	0,09	2,36	0,11
60	2,49	0,09	2,26	0,06	2,16	0,09
80	2,31	0,03	2,29	0,15	2,07	0,07
100	2,06	0,11	2,15	0,06	2,19	0,02
120	2,16	0,18	2,07	0,08	2,18	0,04
140	2,04	0,04	1,95	0,11	2,01	0,05
160	2,06	0,06	2,06	0,05	1,93	0,11
180	2,03	0,04	2,01	0,08	1,96	0,07
200	1,96	0,03	2,08	0,04	2,02	0,04

Tabella 4.9: Misure di durezza dell'impronta per la serie con lubrificazione sezione trasversale, all'aumentare della distanza della superficie lavorata.

CAPITOLO 4: Finitura e integrità superficiale

Serie	Crio_110		Crio_165		Crio_220	
	H-IT [GPa]	Dev. St.	H-IT [GPa]	Dev. St.	H-IT [GPa]	Dev. St.
20	2,45	0,12	2,38	0,12	2,23	0,15
40	2,01	0,06	2,04	0,08	1,96	0,06
60	2,04	0,07	2,05	0,07	1,99	0,05
80	2,09	0,06	1,98	0,09	2,09	0,11
100	2,07	0,04	2,12	0,02	2,03	0,15
120	2,09	0,08	2,07	0,04	2,05	0,01
140	1,99	0,10	2,03	0,06	2,10	0,07
160	2,03	0,16	1,93	0,12	2,05	0,03
180	2,07	0,11	2,08	0,07	1,97	0,18
200	2,09	0,05	2,05	0,06	2,06	0,06

Tabella 4.10: Misure di durezza dell'impronta per la serie con raffreddamento criogenico, sezione trasversale, all'aumentare della distanza della superficie lavorata.

CAPITOLO 5

CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi si è valutata l'influenza delle operazioni di tornitura su componenti in *Ferro Puro ARMCO*[®], materiale ad alta purezza utilizzato in applicazioni magnetiche in corrente continua.

Il materiale, fornito da AK Steel International, come barra tonda laminata a caldo con diametro di 20 mm, è stato caratterizzato microstrutturalmente mediante misure di microdurezza Vickers secondo la normativa ISO 6507-1, ottenendo un valore stimato di $89,67 HV \pm 2,92$. La microstruttura è risultata completamente ferritica, con una dimensione media dei grani di $47,87 \mu m \pm 27,06$.

Successivamente, sono stati eseguiti i processi di tornitura su spezzoni della barra originale per ottenere campioni di diametro 18 mm ed altezza 8 mm. Sono state utilizzate tre diverse strategie di lubrificazione: criogenica con azoto liquido, tradizionale a base acquosa e a secco. La tornitura è stata eseguita con un approccio in due fasi: inizialmente è stata eseguita una passata di grossatura per rimuovere il materiale in eccesso e preparare la superficie per la passata successiva di finitura. È proprio questa fase di finitura che è stata oggetto di studio in questa trattazione. La tornitura è stata eseguita con utensili in carburo di tungsteno con doppio rivestimento di TiAlN al PVD, con forma romboidale e raggio di punta di 0,1 mm, adatti per operazioni di finitura. Ogni inserto ha due taglienti, ognuno utilizzato per la creazione di un singolo campione. Inoltre, è stata studiata l'influenza della velocità di taglio sui parametri di lavorazione. I parametri di taglio utilizzati sono stati selezionati all'interno del range consigliato dal produttore degli utensili: velocità di taglio di 110, 165 e 220 m/min, profondità di passata di 0,25 mm e avanzamento per giro di 0,05 mm, utilizzando un tornio *DMG MORI SEIKI*[™].

Il lubrorefrigerante tradizionale è composto da un'emulsione al 5% di olio semisintetico (rapporto di diluizione 1:20) e i provini così ottenuti sono stati denominati Lubr. I provini Crio sono stati invece torniti con azoto liquido spruzzato direttamente sul petto e sul fianco dell'utensile. I campioni lavorati a secco sono stati denominati Secco.

Le forze di taglio durante la tornitura sono state misurate con un dinamometro della ditta *Kistler*[®], permettendo di calcolare anche il coefficiente di attrito tra il truciolo e il petto dell'utensile.

Nella serie a secco, tutte e tre le componenti delle forze sono superiori rispetto alle altre due serie. La forza di taglio F_c , in particolare, è maggiore del 18-29% rispetto al caso di lubrificazione e del 18-31% rispetto al caso di raffreddamento criogenico. Questo aumento della forza nella serie a secco è attribuibile a un maggiore attrito. Il coefficiente di attrito è compreso tra 0,955 e 0,994.

Con l'aumento della velocità da 110 *m/min* a 220 *m/min*, si osserva una diminuzione della forza di taglio del 30%, causata da una riduzione della deformazione dei grani e da un effetto di ammorbidimento termico del materiale.

Nella serie con lubrificazione, la forza di taglio alla velocità inferiore è minore del 14% rispetto alla serie criogenica. Tuttavia, con l'aumento della velocità di taglio, la forza diventa maggiore del 9-11% rispetto al caso criogenico. Inoltre, la diminuzione della forza di taglio con l'aumento della velocità da 110 *m/min* a 220 *m/min* è solo del 12%. Osservando la forza di avanzamento, questa non diminuisce come negli altri due casi, ma aumenta. Questo aumento è legato a un incremento dell'attrito: il coefficiente di attrito, che inizialmente è a valori bassi di 0,842, cresce successivamente a 0,968 e 0,994 con l'aumentare della velocità.

Nella serie con raffreddamento criogenico, alla velocità inferiore la forza di taglio è maggiore del 14% rispetto alla serie con lubrificazione mentre a velocità superiori diminuisce. Al raddoppiare della velocità da 110 *m/min* a 220 *m/min* la forza diminuisce del 42%. La struttura omogenea e la buona conducibilità termica del ferro puro mitigano l'effetto di incrudimento del raffreddamento criogenico, mantenendo basse le forze di taglio necessarie alla lavorazione. Il coefficiente di attrito è costantemente inferiore rispetto alla serie a secco con valori compresi tra 0,896 e 0,933.

I trucioli formati durante la tornitura sono stati raccolti e analizzati secondo la normativa ISO 3685. Mostrano caratteristiche comuni come forma elicoidale, con aspetto variabile tra corti e aggrovigliati. Nei campioni lavorati a secco sono stati riscontrati trucioli con colorazione violaceo-blu scuro, indicativa del raggiungimento di temperature elevate durante la lavorazione. La dimensione media dei trucioli è maggiore rispetto alle altre condizioni di lubrorefrigerazione, e aumenta con l'aumentare della velocità di taglio.

Nella serie con lubrificazione, la dimensione dei trucioli è diminuita rispetto alla serie a secco; inoltre, anche il diametro dell'elica è minore, indicativo delle minori temperature raggiunte durante la lavorazione.

Con il raffreddamento criogenico, la morfologia dei trucioli non cambia drasticamente, ma si nota una notevole riduzione della loro lunghezza e del diametro dell'elica. Questo indica che il raffreddamento criogenico ha un effetto positivo nel controllo della temperatura durante il processo di taglio.

Dopo le operazioni di tornitura, lo stato di usura degli inserti è stato valutato osservando il petto e il fianco principale al SEM. Poiché non sono stati rilevati fenomeni di usura sul petto dell'utensile, come ad esempio il cratere di usura, il criterio di confronto scelto è stato quello del labbro di usura nella zona dritta del tagliente, zona B secondo ISO 3685. È stato riscontrato che i principali meccanismi di usura di abrasione e adesione sono presenti in tutte le condizioni di lubrificazione e velocità di taglio. L'abrasione del rivestimento ha esposto il substrato in carburo

di tungsteno degli inserti. La larghezza dell'usura è risultata comparabile in tutti i casi, a circa 10 μm dal tagliente. Pertanto, è stata valutata la larghezza del labbro di usura a partire dal punto di transizione tra rivestimento nuovo ed usurato. Nonostante ciò, i valori misurati sono tra loro comparabili, circa 40 μm , e molto inferiori al valore di fine vita stabilito dalla normativa, ovvero 300 μm . Inoltre, l'aumento della velocità di taglio non ha portato a variazioni del labbro di usura. Poiché i valori di usura sono contenuti e simili tra le serie di prove, si può ritenere che ci sia una limitata interferenza dello stato di usura sulle prestazioni del processo di lavorazione.

Le superfici lavorate sono state esaminate al SEM per condurre un'indagine dei difetti superficiali. Diverse irregolarità possono formarsi durante il processo di tornitura a causa delle deformazioni plastiche, del tagliente di riporto dell'utensile e della scelta dei parametri di taglio. Nella serie a secco, i difetti superficiali riscontrati includono ondulazioni dei picchi, dovute alle deformazioni plastiche, lacerazioni e materiale adeso, come conseguenza del tagliente di riporto dell'utensile, essendo fenomeni termicamente attivati. L'aumento della velocità di taglio riduce in parte le irregolarità dei picchi e le superfici presentano deformazioni plastiche minori.

La serie con lubrificazione presenta principalmente difetti di ondulazione dei picchi, con frequenza regolare alle velocità più basse. I solchi di lavorazione sono regolari e solo alle velocità superiori, a causa dell'aumento dell'attrito, sono visibili difetti come strappi e adesione di materiale.

Nella serie con raffreddamento criogenico, i difetti superficiali sono minori. Le ondulazioni sono più visibili alla velocità di taglio inferiore, dove la forza di taglio è alta.

A tutte le velocità di taglio, la condizione con raffreddamento criogenico presenta la superficie migliore.

La finitura superficiale dei campioni lavorati è stata valutata tramite misure di rugosità al profilometro ottico 3D, evidenziando una migliore rugosità superficiale media (S_a) per la serie con lubrificazione e a secco, con misure statisticamente comparabili a tutte le velocità di taglio. Il raffreddamento criogenico, alle velocità di taglio di 110 m/min e 165 m/min , ha un valore di S_a maggiore del 37% e 54% rispetto alla condizione di lubrificazione, e del 37% e 41% rispetto alla condizione a secco. Alla velocità di taglio di 220 m/min , le tre condizioni di lubrorefrigerazione sono comparabili: per i campioni Crio, $S_a = 0,29 \mu m$; per i campioni Lubr, $S_a = 0,24 \mu m$; per i campioni Secco, $S_a = 0,27 \mu m$.

Solitamente, forze di taglio più elevate sono indicative di un peggioramento della finitura superficiale. Nella lavorazione a secco, il carico termico elevato induce un comportamento più viscoso del materiale e una maggiore deformazione plastica. Pertanto, il parametro S_a risulta minore rispetto alla condizione con raffreddamento criogenico. Osservando il parametro S_{sk} , che descrive l'asimmetria del profilo, si può notare che alle velocità di taglio inferiori il profilo per la

condizione a secco è dominato da valli. Questo comporta un effetto di appiattimento del profilo di rugosità, dovuto alle maggiori deformazioni, all'attrito e alle forze maggiori. Il parametro S_{sk} per la serie criogenica denota un profilo dominato da picchi, e come osservato nelle immagini al SEM, questi sono regolari, date le minori forze di taglio e il minor attrito.

Durante la lavorazione, la superficie subisce delle deformazioni che possono portare all'incrudimento del materiale, con conseguente modifica delle proprietà meccaniche e magnetiche. L'influenza del metodo di lavorazione è stata valutata inizialmente osservando lo strato di deformazione plastica severa. Dai campioni lavorati sono stati prelevati dei sotto campioni ed inglobati. Successivamente, è stato utilizzato un Microscopio Ottico, dopo attacco chimico con *Nital* al 3%, per l'osservazione dettagliata delle strutture microscopiche e delle caratteristiche della superficie.

L'andamento dello strato di deformazione plastica è analogo all'andamento delle forze di taglio, poiché maggiori sono le deformazioni imposte al materiale. Nella condizione a secco, lo spessore dello strato deformato è di circa $10\ \mu m$, mentre nella condizione con lubrificazione è di circa $4\ \mu m$. Questa riduzione dello spessore è dovuta alle minori deformazioni subite dai grani del materiale e all'effetto termico ridotto grazie alla presenza del lubrificante.

La lavorazione con raffreddamento criogenico è nota per il suo effetto di incrudimento superficiale. Alla velocità di $110\ m/min$, si osserva uno strato deformato con uno spessore di circa $6\ \mu m$. A velocità più elevate, si verifica una localizzazione della deformazione e una riduzione dello spessore dello strato di deformazione plastica severa, influenzata positivamente dall'effetto di raffreddamento e di lubrificazione dell'azoto liquido, che contribuisce anche a ridurre le forze di taglio rispetto alle altre condizioni di lubrorefrigerazione.

Le prove di durezza sono un utile indicatore dell'incrudimento e delle deformazioni causate dal processo di lavorazione, poiché l'incrudimento comporta un aumento della durezza del materiale.

La variazione della microdurezza è stata valutata a diverse distanze dalla superficie lavorata.

Nella serie a secco le misurazioni della microdurezza hanno evidenziato un incrudimento superficiale più marcato, interessando uno strato di circa $120\ \mu m$ dalla superficie lavorata. Questo conferma quanto osservato per lo spessore di deformazione plastica severa e per le misure di rugosità, indicando maggiori deformazioni imposte al materiale, maggiore attrito e forze di taglio. La prima impronta, effettuata a $20\ \mu m$ dalla superficie lavorata, mostra un aumento della durezza rispetto al materiale di base del 31%, 27% e 13%, rispettivamente alle velocità di taglio di 110, 165 e $220\ m/min$.

Anche nella condizione con lubrificazione è presente un incrudimento superficiale, seppur minore rispetto alla condizione a secco, estendendosi per circa $80\ \mu m$ dalla superficie lavorata. La prima

impronta mostra un aumento della microdurezza rispetto al materiale di base del 17%, 21% e 15%, rispettivamente alle velocità di taglio di 110, 165 e 220 *m/min*.

Nella serie con raffreddamento criogenico, l'incrudimento superficiale è osservato solo alla velocità di taglio di 110 *m/min*, dove sono presenti le forze di taglio più elevate per la serie Crio, interessando uno spessore di circa 40 μm . L'aumento della microdurezza è dell'8% rispetto al materiale di base.

Per quanto riguarda le proprietà magnetiche, un aumento della durezza e dello spessore dello strato di deformazione plastica porta ad una maggiore densità di dislocazioni e di siti di ancoraggio per i movimenti delle pareti dei domini magnetici. Più il movimento delle pareti dei domini è ostacolato, più la permeabilità magnetica è bassa e le perdite sono maggiori. Di conseguenza, la lavorazione a secco tende a deteriorare le proprietà magnetiche, mentre l'utilizzo del raffreddamento criogenico si dimostra efficace nel ridurre le perdite magnetiche.

In conclusione, la condizione ottimale di taglio è risultata essere quella con raffreddamento criogenico alla velocità di 220 *m/min*, poiché ha richiesto forze minori, ha prodotto valori di rugosità superficiale accettabili e ha garantito una qualità superiore della superficie. Il controllo della temperatura di lavorazione risulta più efficace nel mantenere basso il coefficiente di attrito, producendo trucioli più corti durante il processo. Inoltre, sia lo strato di deformazione plastica severa che le misurazioni di durezza indicano che il processo di lavorazione con raffreddamento criogenico è il più idoneo per ridurre la densità di dislocazioni nel materiale, mantenendo inalterate le proprietà magnetiche del ferro puro precedenti alla lavorazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.V. Boniardi, A. Casaroli – *Metallurgia degli acciai – parte prima*, 2017, Editore Lucefin S.p.A.
- [2] Sito ditta AK Steel International, <https://www.aksteel.it/prodotti/ferro-puro-armco/>
- [3] <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/>
- [4] https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html
- [5] <https://www.alfatest.it/tecniche/sem-microscopia-elettronica-scansione/>
- [6] EN ISO 6507-1
- [7] ASTM E384-17
- [8] R. Leach – *Characterisation of Areal Surface Texture*, 2013, Editore Springer
- [9] S. Kalpakjian, S.R. Schmidt – *Manufacturing Engineering & Technology*, 2014, Editore Pearson Education
- [10] EN ISO 4287
- [11] [https://www.olympus-ims.com/it/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms\[focus\]=cmsContent14708](https://www.olympus-ims.com/it/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms[focus]=cmsContent14708)
- [12] Milton C. Shaw – *Metal Cutting Principles, second edition*, 2005, Editore Oxford University Press
- [13] Shane Y. Hong, Zhibo Zhao (1999) – *Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in Cryogenic machining, Clean Products and Processes* 1 107–116, Springer-Verlag
- [14] Yakup Yildiz, Muammer Nalbant (2008) – *A review of Cryogenic cooling in machining processes*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48:947–964
- [15] EN ISO 3685
- [16] A. Fortunato, A. Ascari, E. Liverani – *Tecnologia meccanica, introduzione alle macchine utensili*, 2022, Editore Società Editrice Esculapio s.r.l.
- [17] R.J. Fields, T. Weerasooriya & M.F. Ashby (1980) – *Fracture-mechanisms in pure iron, two austenitic steels, and one ferritic steel*, *Metallurgical Transactions A* 11:333-347
- [18] X. Yang, B. Zhang, Q. Bai, R. Kang, J. Tang (2022) – *Effect of grain size on subsurface characterization of pure iron subjected to orthogonal cutting*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 120:5893-5806
- [19] Y. Chen, J. Kong, Z. Zhang, D. Du (2022) – *Investigation on wear characteristics of cemented carbide tools in finish turning spherical shells of pure iron*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 119:4951-4961
- [20] J. Kong, Z. Xia, D. Xu, N. He (2016) – *Investigation on notch wear mechanisms in finish turning pure iron material with uncoated carbide tools under different cooling/lubrication conditions*, *Int J Adv Manuf Technol* 86:97-105
- [21] X. Dongming, C. Hui, K. Jingxing (2014) – *Study on application of lubrication technology in turning pure iron*, *Material Science Forum* 770:116-119
- [22] X. Liu, F. Zhang, J. Liu, J. Zhang, Y. Chen, Z. Zhang, H. Shen, J. Kong, J. Sun (2020) – *Atmospheric pressure plasma-assisted precision turning of pure iron material*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106:5187-5197
- [23] Sito della Sandvik Coromant™, <https://www.sandvik.coromant.com/it-it/product-details?c=VCEX%2011%2003%2001L-F%20%20%20%201125&m=5755902>
(13/05/2024)

BIBLIOGRAFIA

- [24] Sito della Sandvik Coromant™, <https://www.sandvik.coromant.com/it-it/knowledge/materials/workpiece-materials> (13/05/2024)
- [25] Kirsch, B., Aurich, J.C., Gutzeit, K., von Harbou, E., Hasse, H., Müller, R. (2024) – *Creating Surface Morphologies by Cryogenic Machining*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, Cham.
- [26] D. Umbrello, S. Yang, O.W. Dillon, Jr and I.S. Jawahir (2012) – *Effect of Cryogenic cooling on surface layer alteration in machining of AISI 52100 steels*, Materials Science and Technology 28:1320-1330
- [27] S.E.D. Xavier, S. Delijaicov, A.de Farias, M.S. Filho and G.F. Batalha (2011) – *Investigation on the surface integrity and tool wear in Cryogenic machining*, International conference of advances in materials and processing technologies.
- [28] F. Klocke, L. Settineri, D. Lung, P.C. Priarone, M. Arft (2013) – *High performance cutting of gamma titanium aluminides: influence of lubricoolant strategy on tool wear and surface integrity*, Wear 302:1136-1144
- [29] M. Meyers, K. Chawla – *Mechanical Behavior of Materials, second edition*, 2009, Cambridge University Press
- [30] John A. Schey – *Introduction to manufacturing processes, second edition*, 1988, McGraw-Hill Book Co.
- [31] P. Zotto, S. La Russo, P. Sartori – *Fisica generale, elettromagnetismo – ottica*, 2017, Edizioni La Dotta
- [32] Satish V. Kailas, Material Science - Chapter. 16 Magnetic Properties, Dept. of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science.
- [33] The Quanta FEG 200, 400, 600 – Users Operation Manual (2003), 4022 290 22211 1st Edition 31/03/2003, FEI Company.
- [34] Leitz Miniload Hardness Tester 721-1f, Ernst Leitz Wetzlar GmbH, Germania.
- [35] Leica DMR Instructions, 5th edition, issued in 2000 by Leica Microsystems Wetzlar GmbH, Ernst-Leitz-Strasse D-35578 Wetzlar (Germany)
- [36] F.J.G. Landgraf, M. Emura, K. Ito, P.S.G. Carvalho (2000) – *Effect of plastic deformation on the magnetic properties of non-oriented electrical steels*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 215-216:94-96
- [37] K. Trapp, L. Käfer, D. Bähre (2015) – *Effects of machining ferromagnetic materials on magnetic property changes*, Procedia Manufacturing 1:721-727
- [38] E. Ferrara, E. Olivetti, F. Fiorillo, E. Forton, L. Martino, L. Rocchino (2014) – *Microstructure and magnetic properties of pure iron for cyclotron electromagnets*, Journal of alloys and compounds 615:291-295
- [39] P. Arpaia, M. Buzio, A. Liccardo, A. Pentella, R. Principe, P.M. Ramos (2018) – *Magnetic properties of pure iron for the upgrade of the LHC superconducting dipole and quadrupole magnets*, IEEE transactions on magnetics 55:1-4
- [40] S. Sgobba – *Physics and measurements of magnetic materials*, CERN
- [41] R.C. O’Handley – *Modern magnetic materials, principles and applications*, 1999, John Wiley & Sons, INC.
- [42] F. Fiorillo, G. Bertotti, C. Appino, M. Pasquale (2016) – *Soft Magnetic Materials*, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering.
- [43] J.M. Makar, B.KI. Tanner (2000) – *The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels*, Journal of magnetism and magnetic materials 222:291-304

BIBLIOGRAFIA

- [44] A. Al-Timimy, G. Vakil, M. Degano, P. Giangrande, C. Gerada, M. Galea (2018) – *Considerations on the effects that core material machining has on an electrical machine's performance*, IEEE transactions on energy conversion 33:1154-1163
- [45] S. Takahashi, S. Kobayashi, H. Kikuchi, Y. Kamada, K. Ara (2006) – *Analysis of minor hysteresis loops of cold rolled low carbon steel*, IEEE transactions on magnetics 42:3782-3784
- [46] T. Wang, P. Duan, J. Wang, X. Wang, Y. Qiao (2023) – *Effect of Criogenic cooling on cutting surface integrity and surface functional properties of 6061 aluminum alloy*, Journal of physics: conference series 2459
- [47] EN ISO 4288: 1998
- [48] T.C. Yap, Sivarao, C.S. Lim, J.W. Leau (2015) – *Surface roughness and cutting forces in Criogenic turning of carbon steel*, Journal of engineering science and technology 10:911-920
- [49] V. Muthuraman, S. Arunkumar (2017) – *Experimental evaluation of machining parameters in machining of 7075 aluminium alloy with Criogenic liquid nitrogen coolant*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 183
- [50] Y. Zhang, Z. Wang, Y. Wang, Z. Zhang, Y. Zhang (2015) – *A study on the relationship between hardness and magnetic properties of ultra-high strength steel*, Advanced Materials Research 1063:78-81
- [51] V. Jančárik, P. Palček, K. Hilko (2023) – *Change in magnetic properties of low carbon steel after heat treatment*, AIP Conference Proceedings 2778
- [52]
- [53] H. Kikuchi, K. Ara, Y. Kamada, S. Kobayashi (2009) – *Effect of microstructure changes on barkhausen noise properties and hysteresis loop in cold rolled low carbon steel*, IEEE transactions on magnetics 45:2744-2747
- [54] L. Gu (2023) – *Study on white layer formation during machined surface evolution in high-speed machining of rail steel*, The international journal of advanced manufacturing technology, 125:2503-2516
- [55] B.J. Griffiths (1987) – *Mechanisms of white layer generation with reference to machining and deformation processes*, Journal of tribology 109:525-530
- [56] Sina Ebnesajjad – *Surface treatment of materials adhesive bonding – second edition*, 2014, Elsevier
- [57] <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/optical-microscopy/preparation.php>
- [58] X. Yang, B. Zhang, Q. Bai, M. Zheng, J. Tang (2020) – *Grain size influence on chip formation in high-speed machining of pure iron*, The international journal of advanced manufacturing technology 108:1357-1366
- [59] G. Su, Y. Liu, X. Xiao, J. Du, P. Zhang, X. Shen (2021) – *Influences of stress state, temperature, and strain rate on ductility of pure iron*, Journal of materials engineering and performance 30:2036-2046
- [60] *Catalogo Rigid and Precise CNC Lathe NL Series (2012), DMG MORI CO., LTD*
- [61] Sito della Kistler®, <https://www.kistler.com/IT/it/cp/dinamometri-multicomponente-9129a/P0000606>
- [62] Y. Kaynak, T. Lu, I.S. Jawahir (2014) – *Criogenic machining-induced surface integrity: a review and comparison with Secco, MQL, and Lubr-cooled machining*, Machining science and technology 18:149-198
- [63] C. Dorn, L. Bibelot, K. Danas (2021) - *Experiments and numerical implementation of a boundary value problem involving a magnetorheological elastomer layer subjected to a nonuniform magnetic field*, Journal of applied mechanics 88:1-12

BIBLIOGRAFIA

- [64] S.Y. Hong, Y. Ding, W. Jeong (2001) – *Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V*, International journal of machine tools & manufacture 41:2271-2285
- [65] K. Winter, Z. Liao, R. Ramanathan, D. Axinte, G. Vakil, C. Gerada (2021) – *How non-conventional machining affects the surface integrity and magnetic properties of non-oriented electrical steel*, Material & Design 210:1-19
- [66] ISO 14577-1:2015
- [67] J. Kong, T. Zhang, D. Du, F. Wang, F. Jiang, W. Huang (2021) – *The development of FEM based model of orthogonal cutting of pure iron*, Journal of manufacturing processes 64:674-683

APPENDICE A

ANALISI AL SEM DEGLI UTENSILI

In questa appendice vengono riportate le immagini del petto degli inserti, acquisite prima e dopo la tornitura. Il substrato dell'inserto è composto di metallo duro rivestito (HC) con deposizione PVD di nitruro di alluminio e titanio (Tale). Il modello di inserto utilizzato è il *VCEX 11 03 01-LF 1125*, appartenente alla famiglia *CoroTurn®107* della ditta *Sandvik Coromant™*. Questi presentano una geometria romboidale, con un angolo di 35° , e un raggio di punta di $0,1\text{ mm}$. Ogni inserto ha due taglienti, denominati A e B, e per la loro individuazione si è usato il seguente sistema di codifica:

5A
└─── Numero inserto e tagliente (A o B)

Figura A.1: Sistema di codifica degli inserti da taglio.

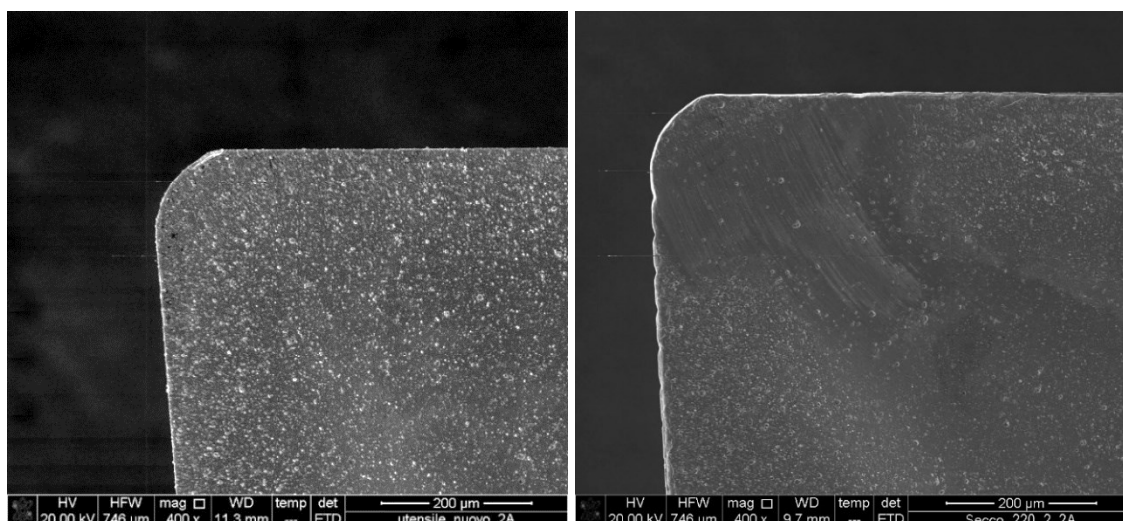


Figura A.2: Inserto nuovo ed usato, 2A. Immagine SEM ETD 400x.

APPENDICE A: Analisi al SEM degli utensili

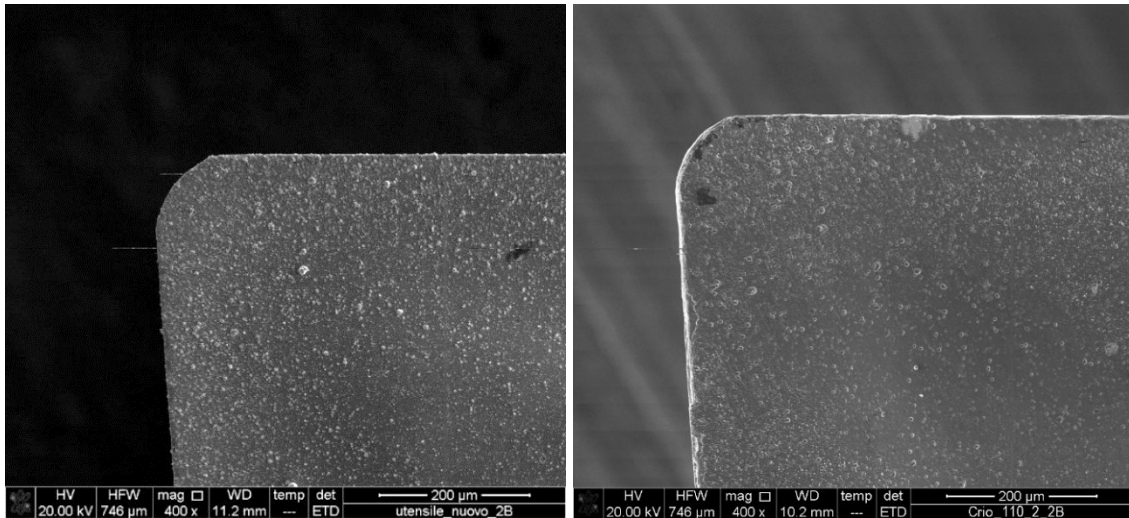


Figura A.3: Inserto nuovo ed usato, 2B. Immagine SEM ETD 400x.

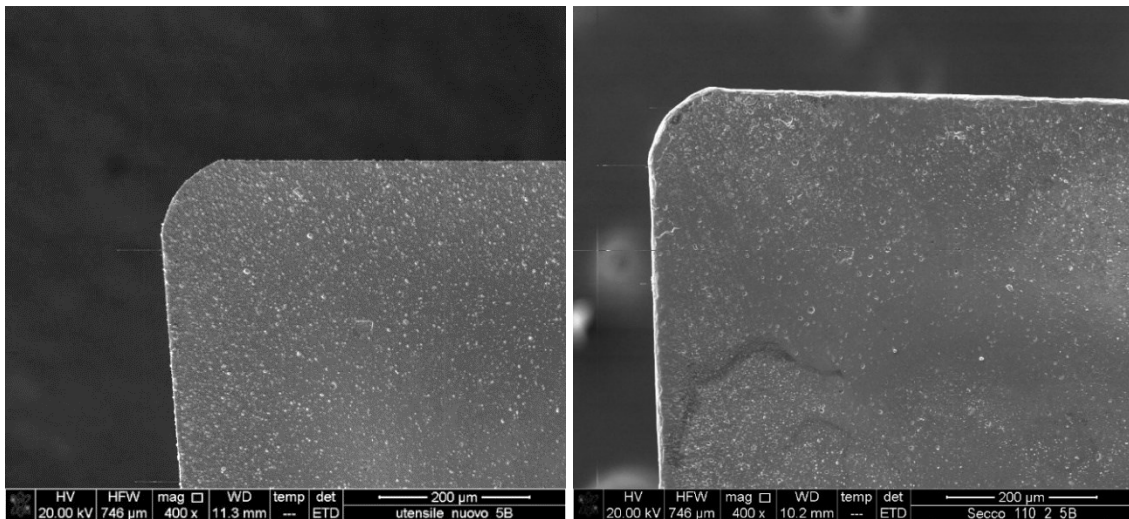


Figura A.4: Inserto nuovo ed usato, 5B. Immagine SEM ETD 400x.

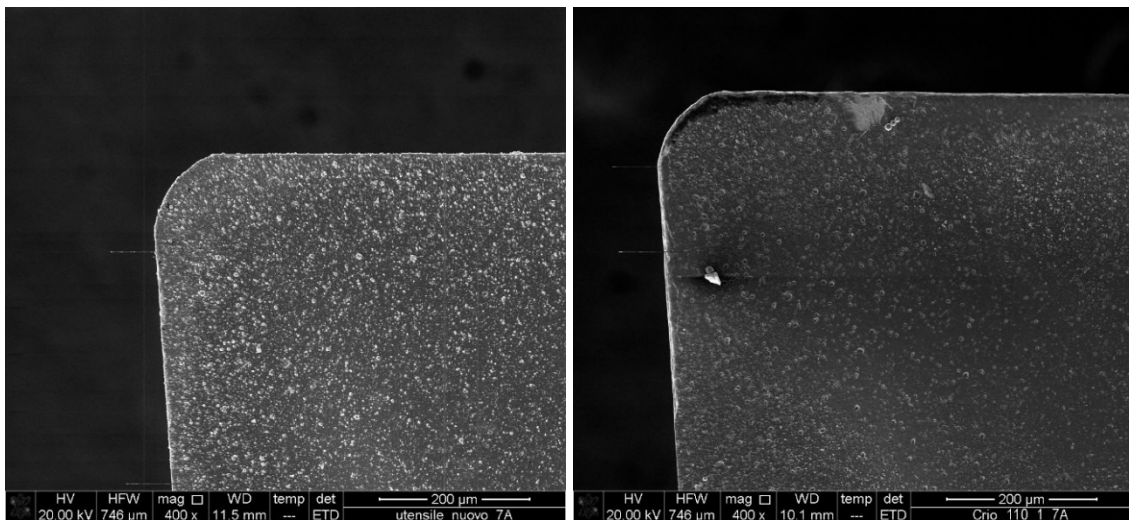


Figura A.5: Inserto nuovo ed usato, 7A. Immagine SEM ETD 400x.

APPENDICE A: Analisi al SEM degli utensili

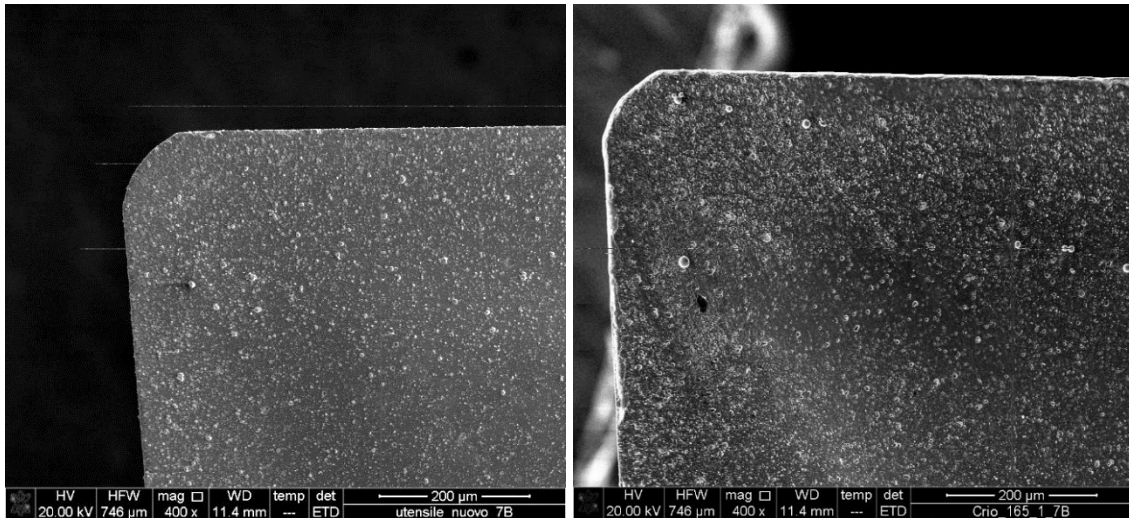


Figura A.6: Inserto nuovo ed usato, 7B. Immagine SEM ETD 400x.

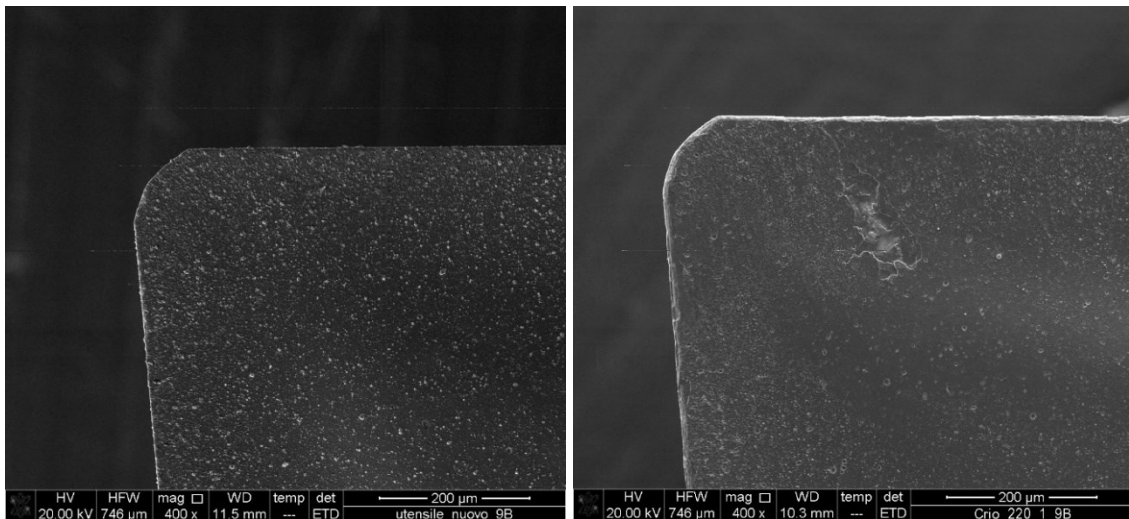


Figura A.7: Inserto nuovo ed usato, 9B. Immagine SEM ETD 400x.

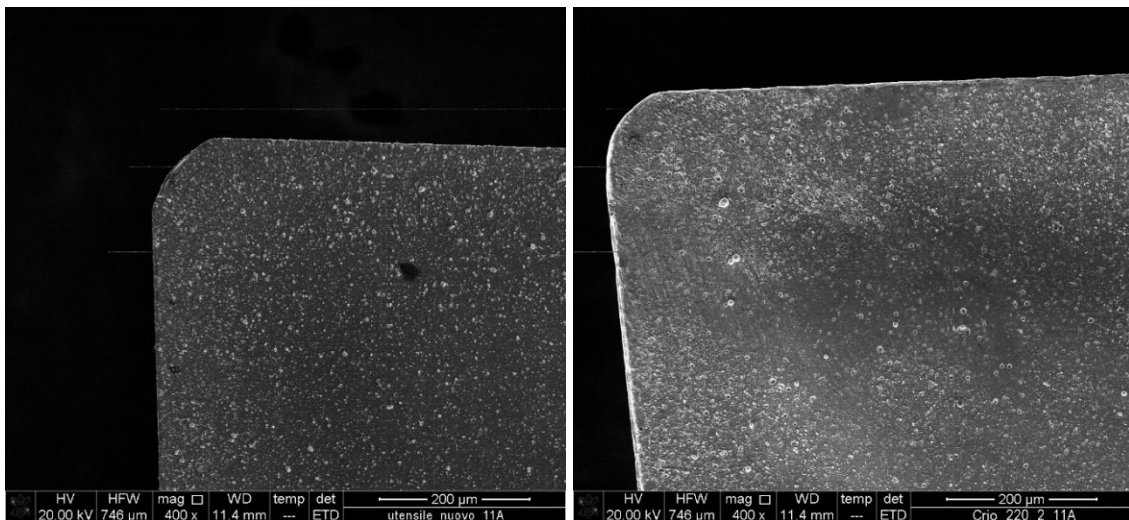


Figura A.8: Inserto nuovo ed usato, 11A. Immagine SEM ETD 400x.

APPENDICE A: Analisi al SEM degli utensili

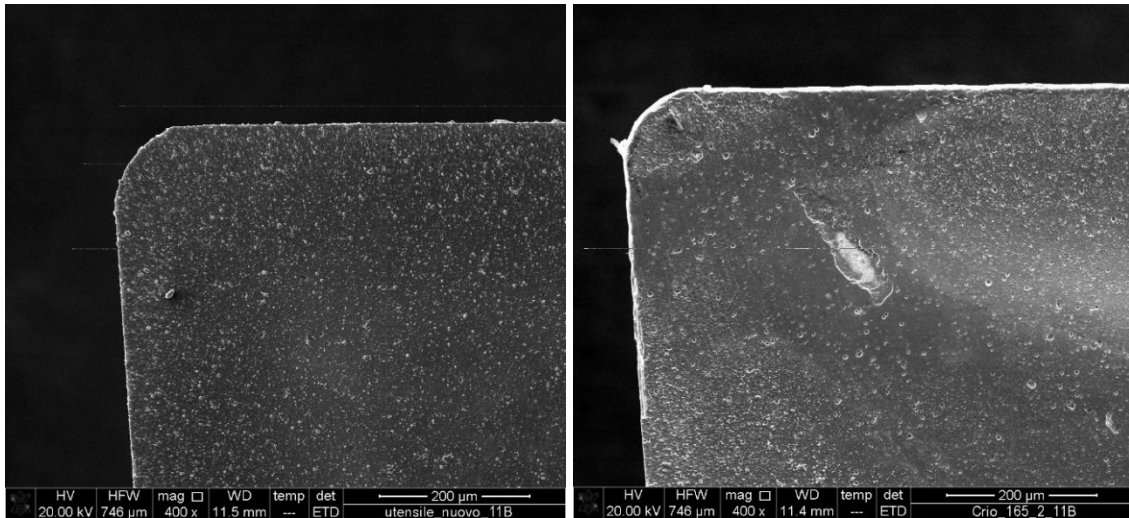


Figura A.9: Inserto nuovo ed usato, 11B. Immagine SEM ETD 400x.

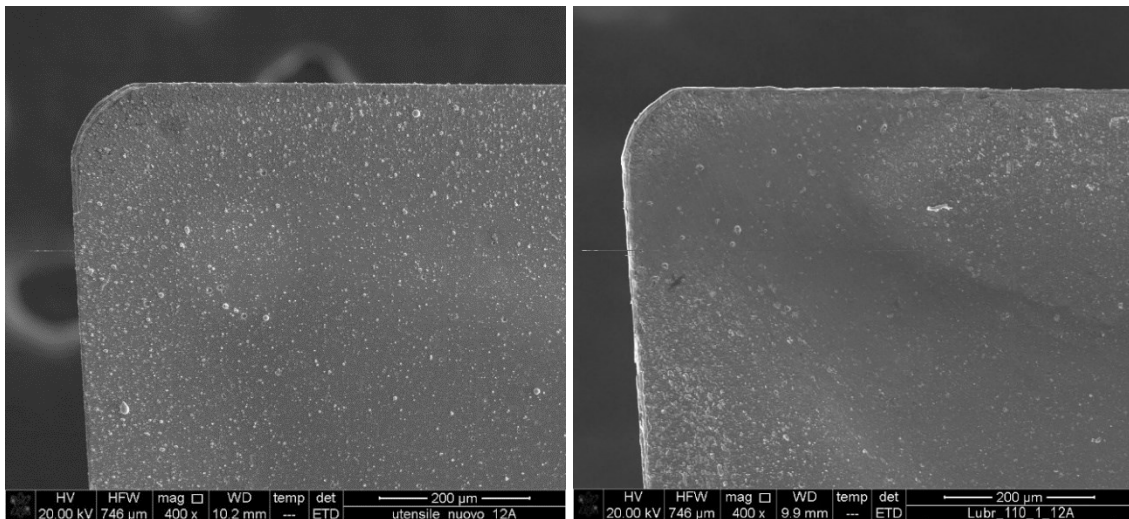


Figura A.10: Inserto nuovo ed usato, 12A. Immagine SEM ETD 400x.

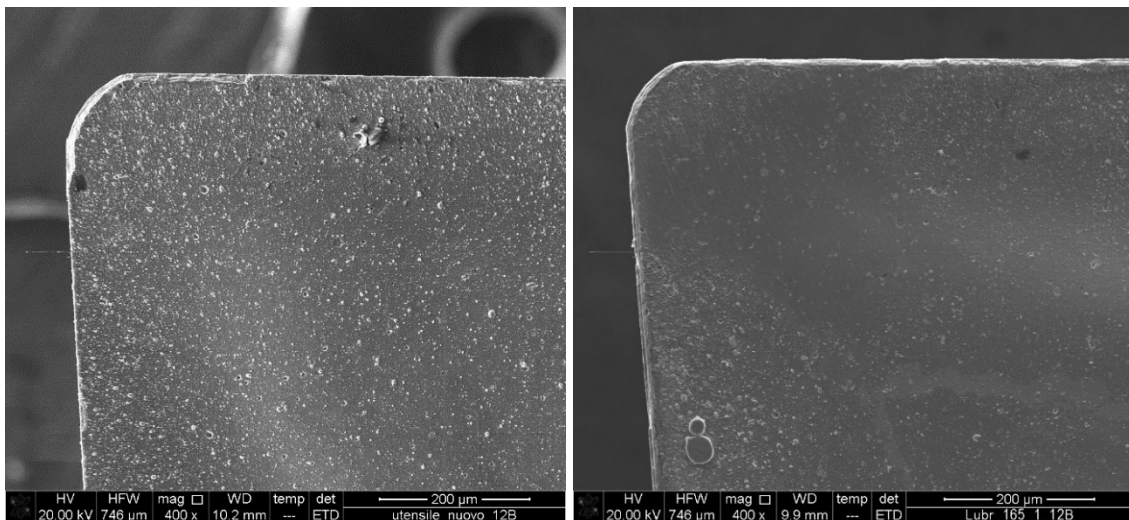


Figura A.11: Inserto nuovo ed usato, 12B. Immagine SEM ETD 400x.

APPENDICE A: Analisi al SEM degli utensili

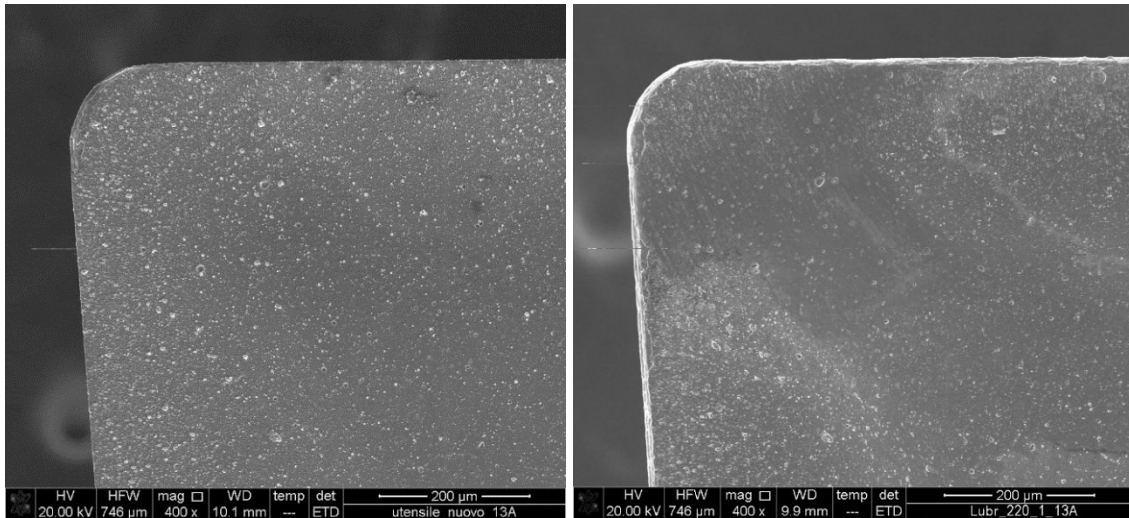


Figura A.12: Inserto nuovo ed usato, 13A. Immagine SEM ETD 400x.

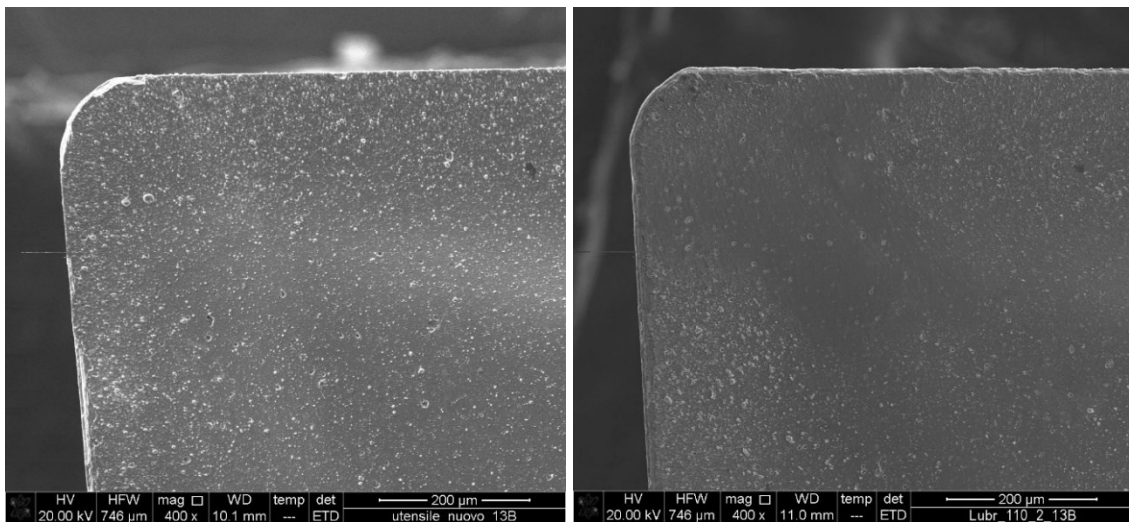


Figura A.13: Inserto nuovo ed usato, 13B. Immagine SEM ETD 400x.

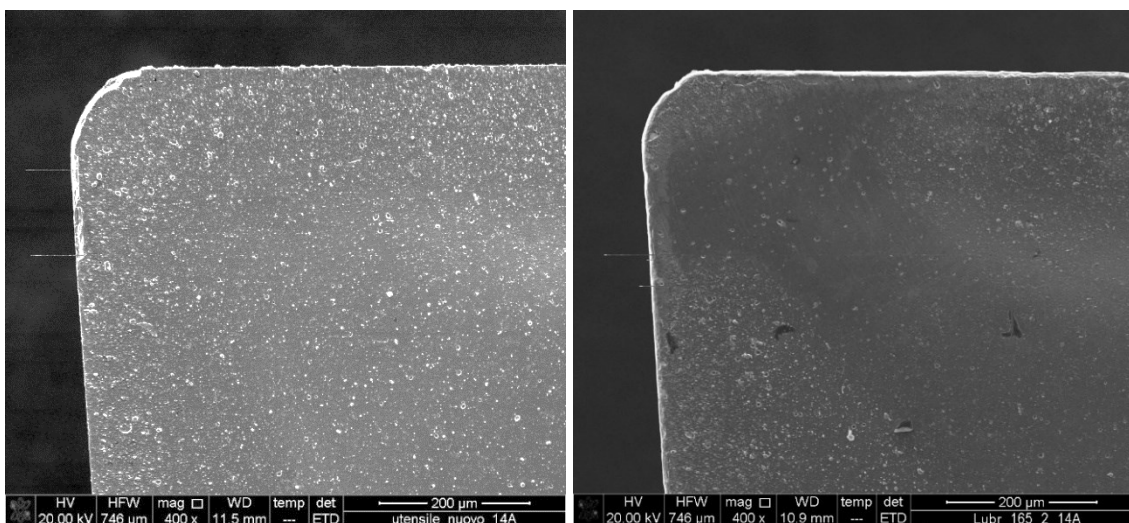


Figura A.14: Inserto nuovo ed usato, 14A. Immagine SEM ETD 400x.

APPENDICE A: Analisi al SEM degli utensili

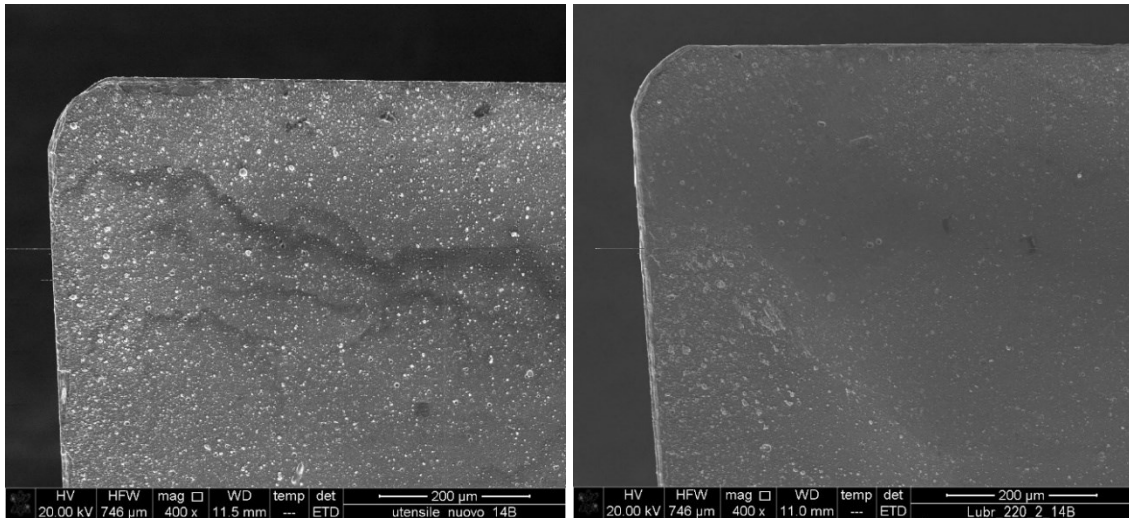


Figura A.15: Inserto nuovo ed usato, 14B. Immagine SEM ETD 400x.

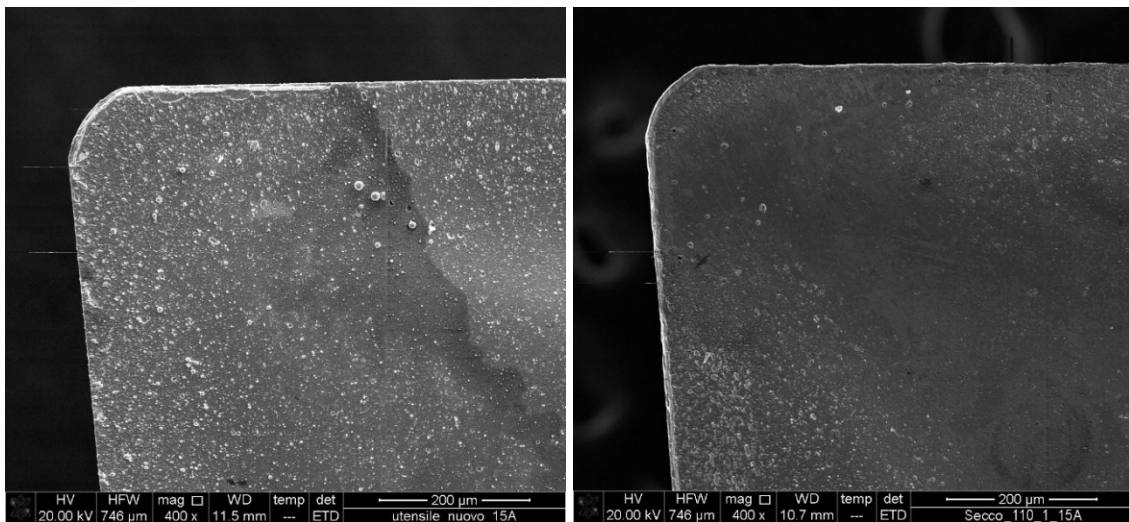


Figura A.16: Inserto nuovo ed usato, 15A. Immagine SEM ETD 400x.

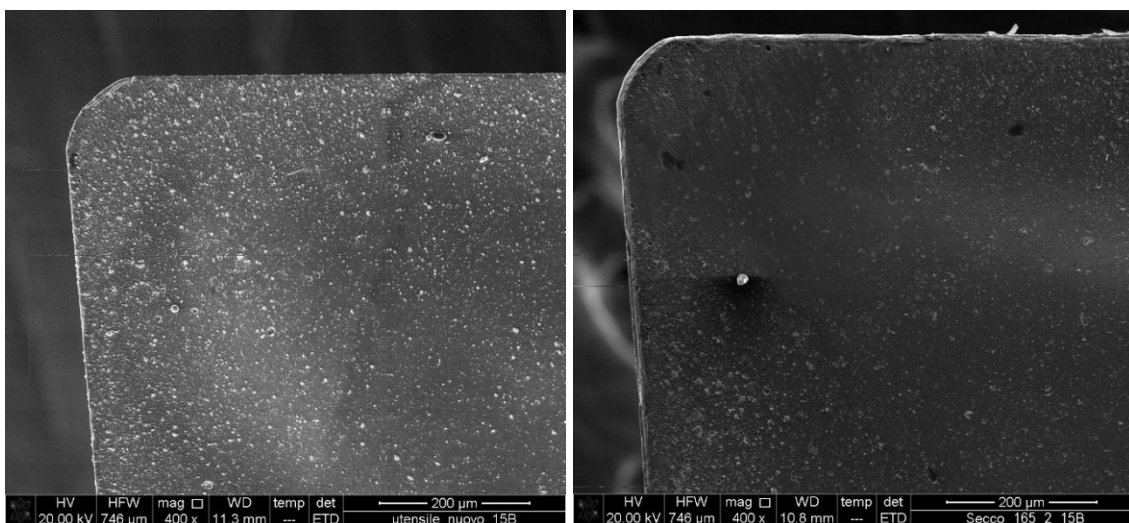


Figura A.17: Inserto nuovo ed usato, 15B. Immagine SEM ETD 400x.

APPENDICE A: Analisi al SEM degli utensili

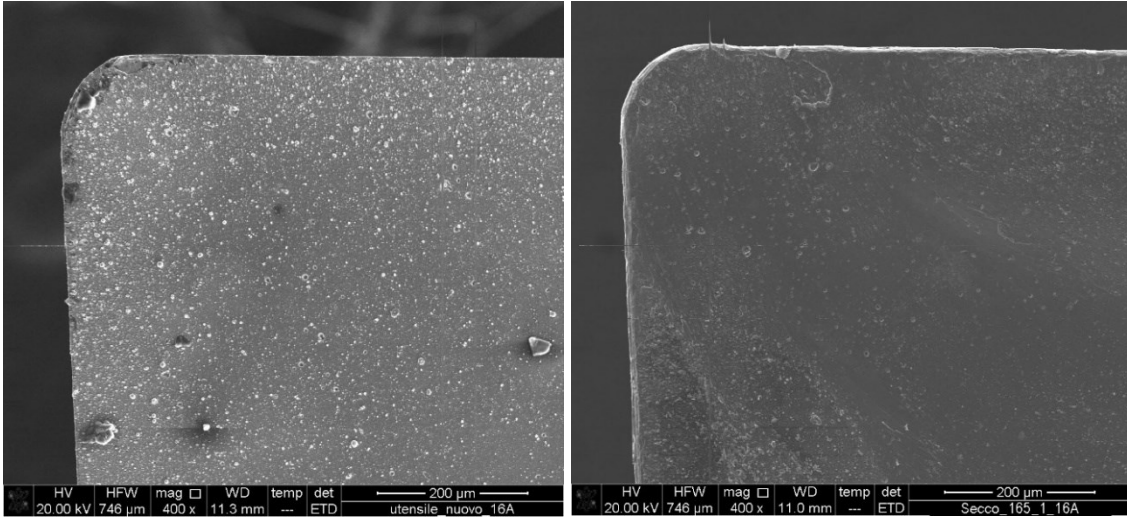


Figura A.18: Inserto nuovo ed usato, 16A. Immagine SEM ETD 400x.

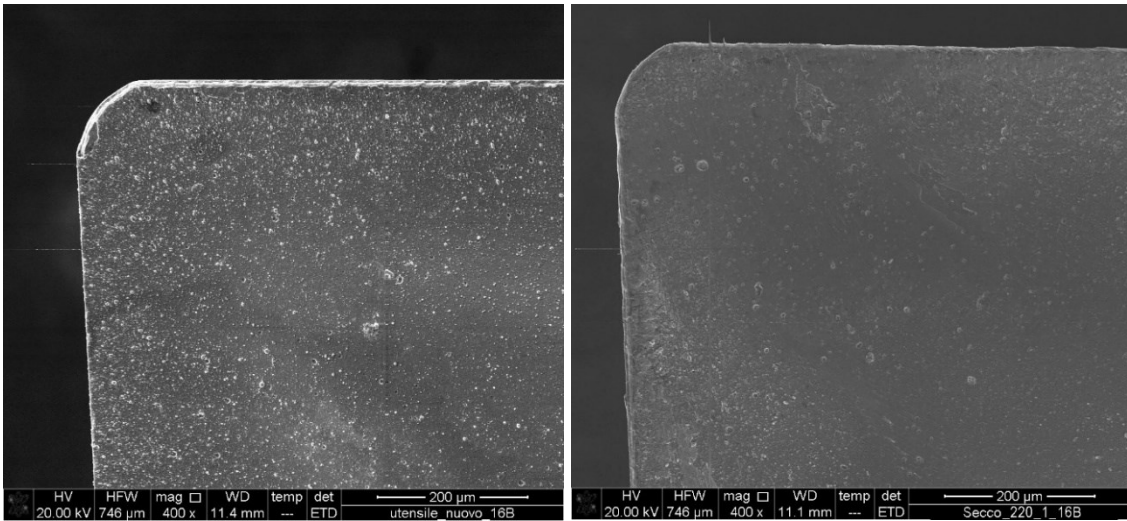


Figura A.19: Inserto nuovo ed usato, 16B. Immagine SEM ETD 400x.

