



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DEI MATERIALI

**Tesi di Laurea Magistrale in  
Ingegneria dei Materiali**

**TECNICHE IBRIDE DI  
LUBRIFICAZIONE/REFRIGERAZIONE ATTE  
ALL'INCREMENTO DELLA LAVORABILITÀ IN  
TORNITURA DELLA LEGA TI6AL4V**

*Relatore: Prof.ssa Stefania Bruschi*

*Correlatore: Ing. Stefano Sartori*

*Laureando: Daniele Verbaro*

ANNO ACCADEMICO 2016 – 2017



# Riassunto

Questo studio è volto a migliorare la lavorabilità in semifinitura della lega di titanio Ti6Al4V per mezzo dell'utilizzo di lubrificanti e refrigeranti non convenzionali.

Un'attenzione particolare all'eco-sostenibilità delle strategie ha portato ad indagare l'efficacia di tecniche prive di contaminanti quali azoto liquido (LN<sub>2</sub>), anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), azoto gassoso refrigerato (N<sub>2</sub>) e di tecniche a minimo utilizzo di lubrificante quali lubrificazione minimale (MQL) e lubrificazione solida con grafite (MQC + grafite).

Nel dettaglio i test di lavorabilità sono stati condotti in tornitura cilindrica mantenendo costante sia il tempo di lavorazione che il set di parametri di taglio (velocità di taglio, profondità di taglio ed avanzamento). Le analisi post-lavorazione mirate alla definizione della lavorabilità sono state condotte analizzando sia l'usura dell'utensile che la surface integrity del lavorato. Infine uno studio analitico della capacità refrigerante dei principali refrigeranti utilizzati è stato condotto nell'ottica di interpretare e confrontare i diversi risultati sperimentali ottenuti.



# Indice

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 1 - LEGA DI TITANIO Ti6Al4V.....</b>	<b>5</b>
1.1    NORMATIVA.....	6
1.2    AMBITO BIOMEDICALE.....	7
<b>CAPITOLO 2 - LAVORAZIONE ALLE MACCHINE UTENSILI.....</b>	<b>11</b>
2.1    TORNITURA CILINDRICA .....	11
2.2    CONCETTO DI LAVORABILITÀ.....	12
2.2.1 <i>Meccanismi di usura dell'utensile</i> .....	13
2.2.2 <i>Integrità superficiale</i> .....	16
2.2.2.1    Rugosità.....	16
2.2.2.2    Strato deformato.....	16
2.2.2.3    Difetti superficiali .....	17
2.3    FLUIDI DI TAGLIO.....	18
<b>CAPITOLO 3 - STATO DELL'ARTE TECNICHE DI LUBRO-REFRIGERAZIONE .....</b>	<b>21</b>
3.1    LUBRIFICANTI E REFRIGERANTI NON CONVENZIONALI .....	21
3.1.1 <i>Tecniche di refrigerazione</i> .....	21
3.1.2 <i>Tecnica di lubrificazione minimale</i> .....	22
3.1.3 <i>Tecniche di lubrificazione solida</i> .....	22
<b>CAPITOLO 4 - APPARATO SPERIMENTALE .....</b>	<b>25</b>
4.1    TORNITURA.....	25
4.2    ANALISI POST-PROCESSO .....	26
4.2.1    SEM.....	26
4.2.1.1    Rilevatore BSED (BSE).....	27
4.2.1.2    Rilevatore ETD .....	29
4.2.1.3    Rilevatore EDS .....	29
4.2.2 <i>Profilometro ottico</i> .....	30
4.3    IMPIANTI DI LUBRIFICAZIONE E REFRIGERAZIONE .....	32
4.3.1 <i>Azoto liquido (LN2)</i> .....	32
4.3.2 <i>Anidride carbonica (CO2)</i> .....	33
4.3.3 <i>Sistema Cryofluid® (N2)</i> .....	34
4.3.4    MQL .....	36
4.3.5    MQL additivato con grafite .....	37

4.3.6	<i>Tecniche combinate di lubro-refrigerazione</i> .....	38
4.3.7	<i>Tecniche di riferimento</i> .....	38
<b>CAPITOLO 5 - RISULTATI</b> .....		<b>41</b>
5.1	USURA DELL'UTENSILE .....	41
5.1.1	<i>Usura del petto</i> .....	41
5.1.1.1	Usura adesiva .....	44
5.1.1.2	Profilo del cratere d'usura .....	45
5.1.1.3	Profondità cratere d'usura .....	53
5.1.2	<i>Usura del fianco</i> .....	55
5.1.2.1	Usura abrasiva VBc .....	55
5.2	INTEGRITÀ SUPERFICIALE .....	59
5.2.1	<i>Rugosità e topografia</i> .....	59
5.2.2	<i>Strato deformato</i> .....	62
5.2.3	<i>Difetti superficiali</i> .....	66
5.3	CAPACITÀ REFRIGERANTE.....	67
5.3.1	<i>Azoto liquido</i> .....	68
5.3.2	<i>Azoto gassoso</i> .....	69
<b>CONCLUSIONI</b> .....		<b>73</b>
<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b> .....		<b>79</b>
<b>INDICE FIGURE</b> .....		<b>82</b>
<b>INDICE TABELLE</b> .....		<b>84</b>
<b>INDICE GRAFICI</b> .....		<b>85</b>

# Introduzione

Le eccellenti proprietà delle leghe di titanio come l'elevato rapporto resistenza-peso, la capacità di mantenere un'elevata resistenza anche alle alte temperature, resistenza chimica, ottima biocompatibilità e resistenza all'usura rendono questo materiale sempre più competitivo in diversi settori incoraggiandone la ricerca.

Queste leghe all'avanguardia sono utilizzate soprattutto nella produzione di componenti in campo aerospaziale, chimico e biomedicale [1] [2]. Nonostante tali vantaggi, sono classificate come materiali difficili da tagliare (DTC) a causa della loro bassa conducibilità termica, elevata reattività chimica e basso modulo di Young; caratteristiche queste che portano ad un aumento della temperatura nella zona di taglio con drastica riduzione della vita dell'utensile e di conseguenza anche della qualità della superficie lavorata [3].

L'obiettivo che si è posto questo studio è di migliorare la lavorabilità della lega di titanio Ti6Al4V mediante l'uso di tecniche di lubro-refrigerazione alternative, eco-sostenibili rispetto a quelle attualmente in uso.

Le strategie convenzionali utilizzate per migliorare la lavorabilità e mantenere bassi i costi di produzione consistono nell'utilizzare fluidi di taglio di origine sintetica, che, penetrando nell'area di contatto fra truciolo-utensile e utensile-pezzo sono in grado di rimuovere efficacemente il calore generato (effetto refrigerante), ridurre il coefficiente di attrito (effetto lubrificante), e di favorire lo scorrimento e la rottura del truciolo. Tuttavia, l'ampio uso di grandi quantità di emulsioni sintetiche costituite da oli minerali solleva importanti questioni ambientali in termini di recupero e smaltimento, di costi connessi ai processi di pulizia post lavorazione del prodotto finito e dall'aumento dei tempi di produzione, soprattutto per quanto riguarda l'ambito biomedicale [4]. Negli ultimi anni, il principio di sostenibilità ambientale ha spinto le aziende manifatturiere verso l'adozione di fluidi lubrificanti a più basso impatto ambientale anche se la soluzione comunemente accettata consiste nel lavorare a secco, soluzione questa che abbassa notevolmente i costi legati alla pulizia ma che porta ad una drastica riduzione sia della vita dell'utensile che della qualità del componente, nonché un aumento dei costi di produzione dovuti ai maggiori fermi macchina. Una strategia alternativa, oggi ampiamente accettata grazie alla sua competitività economica, è rappresentata dalla lubrificazione minimale (*minimum quantity lubrication*, MQL), che consiste

nell'applicazione di olio biodegradabile, nebulizzato in aria compressa, nella zona di taglio. I costi di approvvigionamento e smaltimento sono ridotti date le basse portate (tra i 50 ml/h e i 200 ml/h), diversi ordini grandezza inferiore rispetto alla lubrificazione tradizionale [5] [6]. Sebbene l'MQL presenti adeguate caratteristiche lubrificanti, ha una capacità di raffreddamento ridotta che non consente una riduzione significativa delle temperature generate e, quindi, dei meccanismi d'usura dell'utensile termicamente attivati (adesione, diffusione).

Un altro approccio, volto a migliorare le prestazioni di lavorazione, consiste nel ridurre la temperatura della zona di taglio utilizzando fluidi a bassa temperatura. L'uso dell'azoto liquido (LN<sub>2</sub>) e dell'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) risulta particolarmente interessante poiché sono metodi "puliti" in quanto non lasciano contaminati sul pezzo dopo la lavorazione, inoltre sono sicuri e atossici oltre a non presentare alcun rischio per l'ambiente [7]. Diversi studi hanno dimostrato come l'uso di LN<sub>2</sub> e di CO<sub>2</sub> nella lavorazione di leghe di titanio, porti a significativi miglioramenti nella vita dell'utensile rispetto al taglio a secco, inoltre consentono di utilizzare tassi più elevati di asportazione di materiale (*Material Removal Rates*, MRR) [8] [9]. Nel complesso, le soluzioni di raffreddamento che adottano l'utilizzo di refrigeranti a bassa temperatura determinano significativi miglioramenti in termini di usura e integrità superficiale (*surface integrity*), ma le loro proprietà lubrificanti non risultano paragonabili alle tecniche convenzionali [10].

Alcuni lavori hanno già dimostrato i vantaggi dell'utilizzo delle tecniche ibride fra MQL e LN<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub> durante lavorazioni di sgrossatura delle leghe di titanio e di nichel [11] [12], ma non sono state indagate per il caso di semifinitura o finitura dove la qualità finale richiesta del prodotto è nettamente superiore.

Un'altra tecnica di lubrificazione non convenzionale con ottime potenzialità in questo tipo di lavorazioni è la lubrificazione solida. Le particelle solide oltre a fungere da lubrificante migliorano la conducibilità termica del fluido additivato [13], quindi il potere refrigerante, senza però incorrere nei problemi causati dal criogenico e con costi di impianto e di approvvigionamento molto contenuti.

In questo lavoro, ognuna di queste tecniche è stata sperimentata mantenendo fissi sia il tempo di lavorazione che i parametri di taglio. La lavorabilità è stata definita valutando sia l'utensile misurandone sia il labbro d'usura che la profondità del cratere, che la qualità superficiale del pezzo lavorato in termini di rugosità e topografia superficiale, strato deformato e difetti superficiali.

---

I risultati delle tecniche prese singolarmente o combinate sono stati messi a confronto con quelle di riferimento costituite dalle condizioni di taglio a secco e lubrificazione convenzionale.



# Capitolo 1

-

## Lega di titanio Ti6Al4V

Le prove effettuate si sono concentrate su un unico tipo di materiale: la lega bifasica di titanio Ti6Al4V allo stato ricotto.

Le leghe alfa-beta contengono sia elementi alfa stabilizzanti che beta stabilizzanti; queste leghe possono essere rinforzate con trattamento termico o con lavorazioni termo-meccaniche.

Generalmente, quando si desidera un rinforzo, le leghe vengono raffreddate rapidamente a partire da alta temperatura (nel range di temperature di stabilità alfa-beta o anche sopra la temperatura di beta transus). Questo “trattamento di solubilizzazione” è seguito da un trattamento a temperatura intermedia (invecchiamento o ageing) per produrre la giusta miscela di prodotti alfa e beta trasformati; in tal modo queste leghe possono essere lavorate mentre il materiale è ancora duttile e, successivamente, subiscono il trattamento termico che permette di rinforzare il materiale. La risposta al trattamento termico dipende dalla velocità di raffreddamento adottata a partire dalla temperatura di solubilizzazione e, quindi, può essere legata alle dimensioni della sezione.

Le leghe alfa-beta hanno un'alta resistenza ma sono meno formabili delle leghe alfa; la saldatura per fusione si ottiene con efficienze del 100%. Questa classe di leghe di titanio incide su oltre il 70% di tutto il titanio impiegato commercialmente.

Dal punto di vista microstrutturale, i costituenti alfa, quelli rimasti beta e quelli trasformati in beta possono esistere in diverse forme: equiassica, aciculare o come combinazione di questi due. Le strutture equiassiche si formano durante la lavorazione della lega nel range di temperature alfa-beta e durante la ricottura a basse temperature; le strutture acicolari, invece, hanno origine da lavorazioni o da trattamenti termici a temperature prossime alla beta transus, seguiti da rapido raffreddamento. Il rapido raffreddamento dalle alte temperature nel range alfa-beta si traduce nella formazione di strutture primarie di alfa equiassiche e secondarie di beta trasformato.

In questo studio questo materiale è stato lavorato partendo dallo stato “*wrought*”, vale a dire il semilavorato ottenuto tramite processo fusorio, rifuso sotto vuoto per eliminare gli elementi volatili, forgiato in barre e infine ricotto per ottenere la struttura equiassica. Questo

tipo di prodotto è il più comune commercialmente per Ti6Al4V per l'ambito biomedicale e aeronautico.

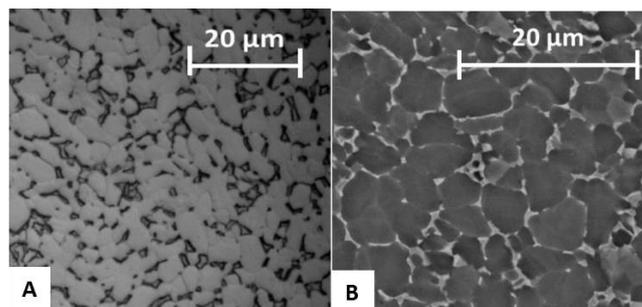
## 1.1 Normativa

Il materiale utilizzato è una lega di titanio bifasica disponibile in commercio: Ti6Al4V ELI (grado 23) [14] che è molto simile al Ti6Al4V (grado 5), ma a differenza di quest'ultimo ha contenuti molto ridotti di ossigeno, azoto, carbonio e ferro (Tabella 1.1), è quindi caratterizzato da un contenuto molto basso di elementi interstiziali il che rende più duttile il materiale e porta un più elevato sforzo di frattura [15].

*Tabella 1.1 Ti6Al4V ELI composizione chimica.*

N	C	H	Fe	O	Al	V	Ti
≤0.05	≤0.08	≤0.012	≤0.25	≤0.13	5.5 - 6.50	3.5 - 4.5	Balance

La lega è stata fornita in barre di 50 mm di diametro allo stato ricotto da Sandvik™ Bioline [16]. La Figura 1.1 mostra la microstruttura di questa lega prima della lavorazione: la Figura 1.1.a è ottenuta al microscopio ottico, la Figura 1.1.b tramite microscopio elettronico a scansione (SEM) tramite sonda BSE (Backscattered Electron). Dall'analisi metallografica si evince una struttura equiassica ricristallizzata nel processo di ricottura, la fase beta è l'8% ed è distribuita ai bordi dei grani alfa.



*Figura 1.1 Ti6Al4V microstruttura materiale non lavorato: A) Immagine di microscopia ottica, e B) immagine BSED-SEM*

Le proprietà meccaniche sono riportate in Tabella 1.2, si tratta di una lega DTC (*difficult-to-cut*), infatti valori elevati di resistenza e ridotto allungamento a rottura sono caratteristici di questi materiali di difficile lavorabilità.

*Tabella 1.2 Proprietà meccaniche del Ti6Al4V in stato di fornitura (Sandvik Bioline foglio di dati [17])*

	<b>E</b> <b>(GPa)</b>	<b>UTS</b> <b>(MPa)</b>	<b>Y<sub>s</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>Allungamento</b> <b>(%)</b>
<b>Ti6Al4V</b>	118	940	870	15,0

## 1.2 Ambito biomedicale

La biocompatibilità e la biofunzionalità sono requisiti fondamentali che un dato materiale deve possedere per poter essere utilizzato in applicazioni che prevedono un contatto diretto con l'organismo umano.

Un materiale per essere biocompatibile non deve creare interazioni sfavorevoli all'ambiente biologico a cui viene a contatto, nello specifico non deve interferire o arrecare danno alle attività fisiologiche.

Un biomateriale è tale in un determinato contesto, data la complessità del corpo umano piccole variazioni possono determinare il successo o il fallimento dell'impianto.

Ricordiamo che qualsiasi materiale provoca e contemporaneamente subisce una reazione dall'organismo, in base a queste interazioni si potranno avere:

- Materiali biostabili, non subiscono trasformazioni chimiche/fisiche
- Materiali biodegradabili, subiscono variazioni chimiche/fisiche le quali li porta a scomparire nel tempo;
- Materiali bioinerti, generano bassissime interazioni con l'ambiente organico;
- Materiali bioattivi, instaurano interazioni forti (tipo chimico) con l'ambiente;
- Materiali biorassorbibili.

Per l'uso medico un materiale biodegradabile deve essere anche biorassorbibile, condizione questa che se non verificata può provocare serie patologie.

La biofunzionalità invece esprime la capacità di sostituire un dato organo, tessuto o funzione nel modo più prossimo all'originale senza creare scompensi.

Per soddisfare la biofunzionalità invece è necessario che le proprietà del materiale si avvicinino il più possibile a quelle del tessuto da rimpiazzare (Tabella 1.3).

**Tabella 1.3** Proprietà meccaniche del femore umano

	Corticale (longitudinale)	Corticale (tangenziale)	Spugnoso
Modulo di Young [GPa]	17	12	0,1
Sforzo a rottura [MPa]	130	60	2
Allungamento a rottura [%]	3	1	2,5
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	2	2	1

Si evidenzia che per l'osso non esiste la resistenza massima a fatica poiché eventuali microfratture vengono riparate autonomamente dall'organismo stesso.

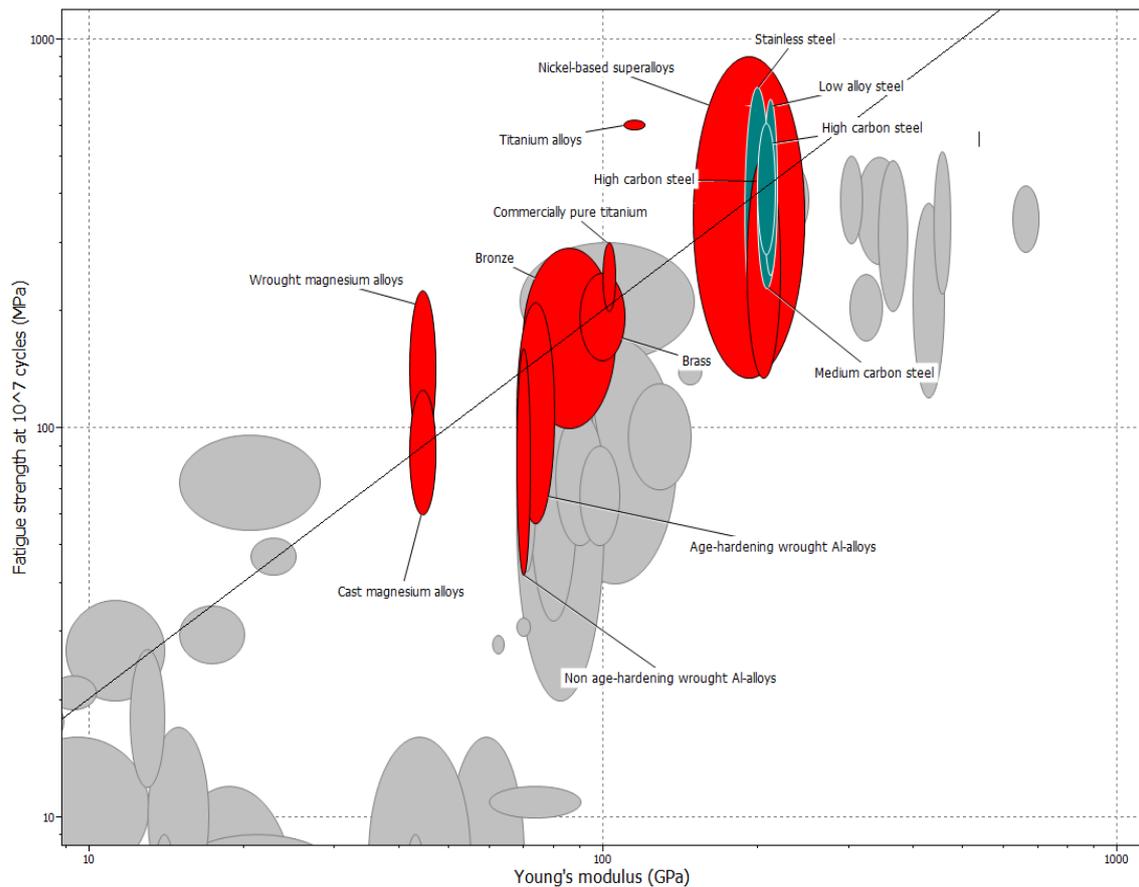
Tali proprietà andranno confrontate con quelle delle leghe ritenute idonee, sarà quindi necessario un modulo elastico prossimo a quello dell'osso da sostituire, un'elevata resistenza meccanica e a fatica e una bassa densità, tali parametri possono essere raggruppati nel fattore di biofunzionalità BF, dove  $BF = \sigma_f/E$  ( $\sigma_f$  rappresenta il carico massimo a fatica ed E il modulo di Young). Date le considerazioni fatte possiamo approssimare lo sforzo a rottura del femore umano a quello di rottura longitudinale per cui il suo indice BF risulta uguale a  $7,6 \times 10^{-3}$ .

**Tabella 1.4** Proprietà meccaniche dei biomateriali, con relativo indice di biofunzionalità (BF)

	E (GPa)	YS (MPa)	$\sigma_f$ (MPa)	%EL	BF $10^{-3}$
FeCrNiMo (316L)	210	450	250	40	1,2
CoCr (as cast)	200	500	300	8	1,5
CoNiCr (as wrought)	220	850	500	20	2,3
TiAl6V4	102	900	550	13	5,2
TiAl5Fe2,5	102	900	550	15	5,2
cp-Ti	100	300	200	40	1,8
Cp-Ta	200	300	200	40	1,3
Cp-Nb	120	250	150	70	1,3

La retta di selezione, individuata dall'equazione (1), avrà pendenza pari a uno. Il materiale più efficiente sarà quello con posizione nel grafico più in alto a sinistra.

$$\ln \sigma_f = \ln BF + \ln E \quad (1)$$



**Grafico 1.1** Grafico prodotto tramite software CES che mette in relazione il carico massimo a fatica e il modulo di Young

Dalla Tabella 1.4 e dal Grafico 1.1 si può affermare che i materiali più performanti appartengono alla famiglia delle leghe di titanio e in particolare la lega Ti6Al4V.

L'avanguardia della tecnologia di produzione di protesi con questa lega è rappresentato dall'*additive manufacturing* che ha sostituito in molte realtà produttive le tecnologie tradizionali di produzione. Il motivo di tale successo risiede nella possibilità di ottenere prodotti finiti o quasi, aventi geometrie anche estremamente complesse, con una quantità esigua di scarti. Il vero punto limitante di questa tecnologia è la sua bassa produttività, di conseguenza viene esclusivamente utilizzata in quei settori in cui si hanno piccoli lotti produttivi con geometrie complesse e variabili oppure in produzioni di prodotti su misura.

L'idea di base di tale tecnologia è di creare il prodotto partendo direttamente dal suo disegno CAD 3D, la macchina non fa altro che ricostruire l'oggetto disegnato piano dopo piano depositando il materiale sotto forma di polvere e successivamente, attraverso un laser (*selective laser melting*, SLM) o un fascio d'elettroni (*electron beam melting*, EBM), portandolo alla sinterizzazione.



# Capitolo 2

-

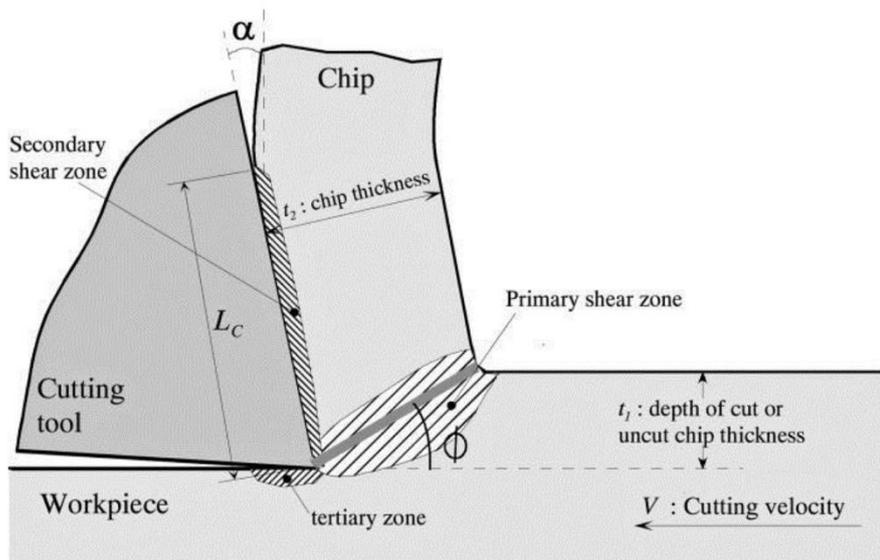
## Lavorazione alle macchine utensili

Al fine di limitare il più possibile le variabili la lavorazione meccanica è stata la più semplice possibile cioè la tornitura cilindrica.

### 2.1 Tornitura cilindrica

La lavorazione di taglio tramite tornitura [18] è una delle lavorazioni meccaniche più utilizzate in produzione. I pezzi prodotti con i processi primari di formatura richiedono spesso ulteriori lavorazioni per raggiungere le tolleranze dimensionali e la finitura superficiale richiesti, questo viene spesso ottenuto per mezzo della tornitura.

Questo tipo di lavorazione consente l'asportazione di materiale mediante formazione di truciolo, il meccanismo avviene secondo il modello di taglio ortogonale (schematizzato in **Figura 2.1**).



*Figura 2.1 Schematizzazione del taglio ortogonale*

L'utensile, di materiale più duro di quello da lavorare, scorre aderente al pezzo (posto in rotazione da un mandrino con velocità periferica  $V_c$ ) e ne provoca la deformazione plastica

nella porzione di materiale a cui va incontro fino ad asportarla, il processo è fortemente esotermico a causa degli attriti generati.

Nel processo le principali variabili indipendenti sono:

- tipo di utensile e sue condizioni;
- forma dell'utensile, finitura superficiale e suo grado di affilatura;
- materiale del pezzo, sue condizioni, temperatura a cui avviene la lavorazione;
- parametri di taglio: velocità, avanzamento profondità di passata;
- tipo di fluidi lubrorefrigeranti se utilizzati;
- caratteristiche della macchina utensile (rigidezza e smorzamento);
- porta utensile e attrezzature di fissaggio.

Le variabili dipendenti sono:

- tipologia di truciolo prodotto;
- forza richiesta ed energia dissipata nel processo di taglio;
- innalzamento della temperatura del pezzo, del truciolo e dell'utensile;
- usura, scheggiatura e rottura dell'utensile;
- finitura e integrità superficiale del pezzo dopo lavorazione.

## 2.2 Concetto di lavorabilità

La lavorabilità di un materiale è di solito definita in termini di quattro fattori:

1. vita dell'utensile;
2. finitura superficiale e integrità superficiale della parte lavorata;
3. forza e potenza richiesta;
4. livello di difficoltà nel controllo del truciolo.

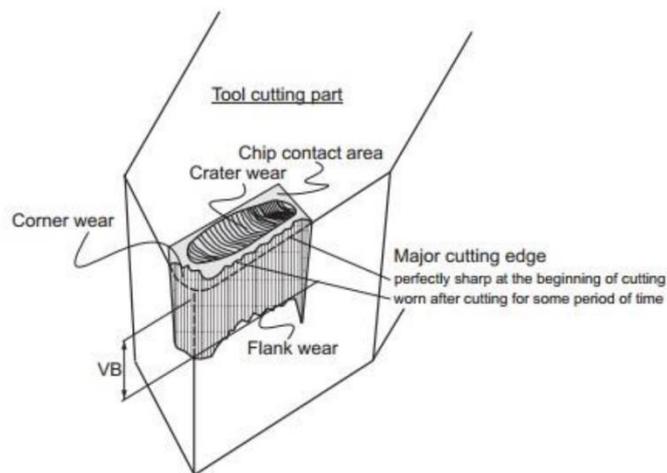
Pertanto, una buona lavorabilità significa una buona finitura e integrità superficiale, durata dell'utensile, bassi attrito e potenza. Mentre per quanto riguarda il controllo del truciolo, un truciolo fine e continuo può interferire tornando nella zona di taglio creando difetti, aumento di temperatura e una superficie lavorata irregolare.

A causa della complessità delle operazioni di taglio, è difficile stabilire quali rapporti definiscano quantitativamente la lavorabilità di un determinato materiale. Nella lavorazione industriale, la durata degli utensili e la rugosità superficiale sono generalmente considerati i fattori più importanti, anche se non vengono più utilizzati molto a causa della loro natura qualitativa e fuorviante, negli anni sono stati individuati indici approssimativi di lavorabilità che sono ormai disponibili per ogni tipo di materiale e condizione.

Questi indici sono correlati, oltre che al materiale, a parametri quali: velocità di taglio, avanzamento, profondità di taglio, tipo di utensile e forma e tipo di fluido da taglio. [18]

### 2.2.1 Meccanismi di usura dell'utensile

Gli utensili devono incidere il materiale lavorato senza scalfirsi, per questo motivo devono essere costituiti da materiali di maggiore durezza, un esempio tipico è il carburo di tungsteno con una piccola percentuale di cobalto che funge da legante. Spesso vengono rivestiti tramite PVD con uno o più strati di materiali resistenti all'usura. Nonostante tutti gli accorgimenti gli utensili si usurano a causa dallo scorrimento con il truciolo usurando il petto (*crater wear*, cratere d'usura) e con la superficie lavorata usurando il fianco (*flank wear*, labbro di usura) (Figura 2.2).



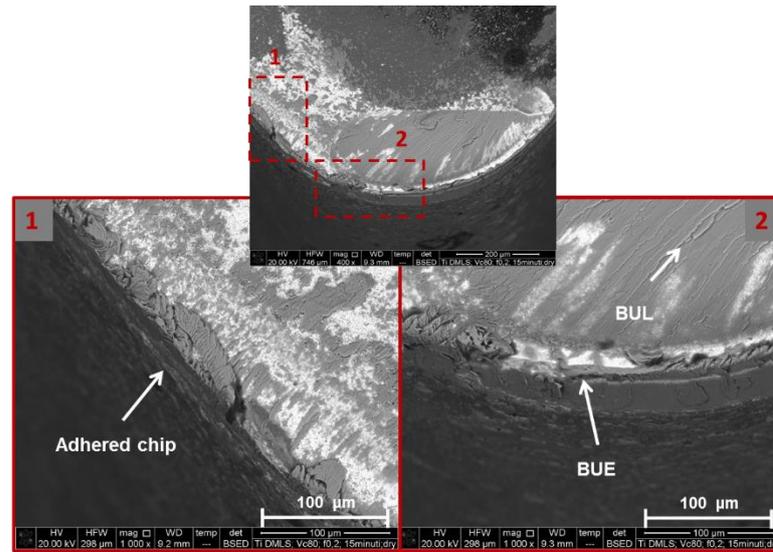
**Figura 2.2** Usura dell'utensile [19]

I principali meccanismi di usura sono:

- Usura abrasiva: determinata dallo scorrimento del truciolo sul petto dell'utensile; è dovuta all'incrudimento subito dal materiale in lavorazione e da eventuali inclusioni più dure. È accentuata dall'innalzamento della temperatura della zona di taglio dovuto alla deformazione plastica e all'attrito fra le superfici. Per minimizzare l'usura abrasiva, la durezza delle superfici in moto relativo deve essere la più alta possibile e i materiali devono essere scelti in modo da non essere affini in modo da non favorirne la relativa diffusione.

Le superfici devono essere ben lubrificate, in modo da ridurre il coefficiente d'attrito, la rugosità superficiale deve essere la più bassa possibile in modo che le asperità siano più frequenti e meno elevate, infine le forze in gioco tra le superfici in moto devono essere le più basse possibili.

- Usura adesiva: dovuta alla micro-saldatura di porzioni di truciolo sul petto dell'utensile, in prossimità del tagliente, determinata dalla forza di compressione del truciolo sul petto. Il materiale saldato nella zona di formazione del petto forma il BUL (*build-up-layer*) e contribuisce a formare il cratere d'usura, quello aderito nei pressi dello spigolo forma il tagliente di riporto BUE (*Build-Up-Edge*) che altera l'angolo di spoglia superiore, con aumento delle forze di taglio che ne determinano il distacco con possibile strappo di porzioni di utensile (Figura 2.3).



**Figura 2.3** Materiale aderito sull'utensile: 1) Truciolo aderito; 2) BUL sul petto, BUE sul tagliente

- Usura diffusiva: attivata dalle temperature elevate; consiste nella diffusione di specie atomiche dal truciolo (BUL) verso l'utensile e viceversa a causa della diversa concentrazione di elementi. Il trasporto per diffusione, dipende dall'affinità chimica e la struttura dei materiali, temperatura e dal gradiente di diffusione delle specie che si diffondono.

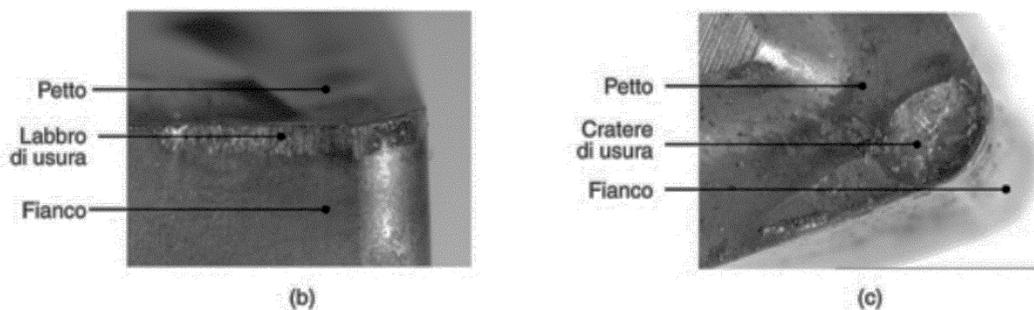
La vita di un utensile da taglio è determinata dalla quantità di usura che si è verificata sul profilo dell'utensile e che riduce l'efficienza del taglio a un livello inaccettabile o che causa il cedimento dello strumento.

L'usura graduale avviene principalmente nelle seguenti forme:

- Usura sul fianco
- Cratere di usura
- Usura ad intaglio
- Tagliente di riporto
- Deformazione plastica
- Microfessurazioni

Il petto dell'utensile è la zona dove il truciolo appena formato scorre sull'utensile prima di essere evacuato, in un primo tratto il fenomeno dominante nell'interfaccia truciolo-utensile è quello adesivo che combinato alle alte temperature innesca la diffusione vale a dire il secondo fenomeno principale di usura del petto. La diffusione agisce principalmente a scapito del cobalto cioè il legante del substrato, questo infragilisce la matrice dell'utensile portando estrazione di carburi di tungsteno e formazione del cratere. Il cratere di usura consiste in una cavità sul petto dell'utensile formata dall'azione del truciolo che striscia sulla superficie. Pressioni, temperature elevate e affinità chimica caratterizzano l'interfaccia truciolo-utensile, contribuendo all'azione di usura. Il cratere può essere misurato nella sua profondità o nella sua sezione.

Il labbro di usura si verifica sul fianco principale dell'utensile. Essa è causata dallo strisciamento tra la superficie del pezzo generata dall'operazione di taglio e la parte del fianco immediatamente adiacente al tagliente. L'usura del fianco è misurata dall'ampiezza del labbro di usura medio ( $VB$ ) o massimo ( $VB_{max}$ ).



**Figura 2.4** Usura dell'utensile: fianco (b); petto (c) [20]

Per stabilire in modo oggettivo la durata dell'utensile occorre fissare dei criteri di usura, è possibile farlo utilizzando parametri facilmente misurabili in funzione di:

- limiti di tolleranza dimensionale ammissibili sul pezzo in lavorazione, poiché la presenza del labbro di usura sul raccordo tra i taglienti genera un diametro tornito maggiore rispetto a quello di un utensile nuovo;
- limiti ammissibili sul grado di rugosità superficiale del pezzo lavorato, perché alcune forme di usura provocano un peggioramento della finitura superficiale;
- gradi di usura massimo ammissibile sul fianco dell'utensile;
- grado di usura massimo ammissibile sul petto dell'utensile;
- intervalli di tempo definiti.

Tra i diversi parametri che si possono misurare al fine di quantificare l'usura, solo due sono accettati dallo standard per determinare la vita utile dell'utensile e gli stessi che si devono considerare in un test di lavorabilità:  $VB$  e  $VB_{max}$ .

## 2.2.2 Integrità superficiale

L'integrità superficiale del materiale lavorato è definita come l'insieme dei fattori geometrici e microstrutturali che lo caratterizzano. Tra fattori ne caratterizzano la bontà: rugosità superficiale, strato deformato, difetti superficiali.

### 2.2.2.1 Rugosità

La misura di rugosità si effettua rilevando il profilo ottenuto mappando l'oggetto con un piano normale alla superficie e con direzione ortogonale all'orientamento principale dei solchi.

Il grado di finitura superficiale è particolarmente importante poiché influenza molte proprietà, fra le quali:

- usura;
- resistenza meccanica, a fatica, alla corrosione;
- aspetto estetico.

Il parametro scelto per tale valutazione è l'indice di rugosità  $R_a$ , rappresenta la media aritmetica delle distanze dei punti dalla linea media di riferimento espressa in  $\mu\text{m}$  (Figura 2.5), ed è calcolata come:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx$$

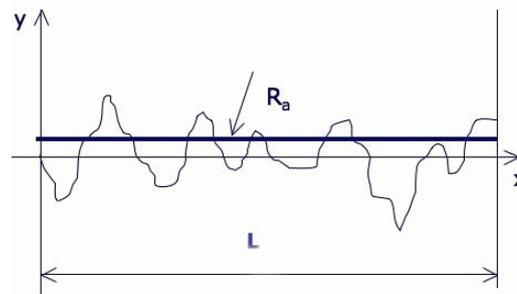


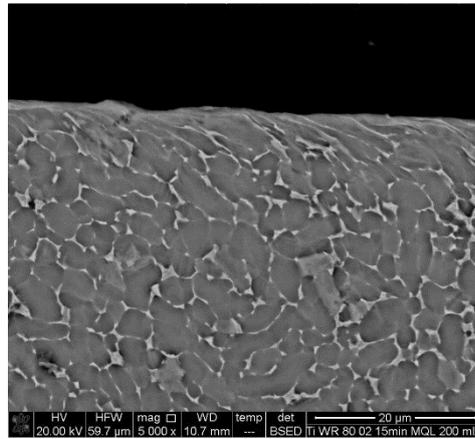
Figura 2.5 Esempio di profilo e indice di rugosità  $R_a$

### 2.2.2.2 Strato deformato

La maggiore minaccia per l'integrità superficiale deriva dalla deformazione plastica del pezzo durante la lavorazione, ed è per questo essenziale studiare gli effetti di questa deformazione (Figura 2.6).

La deformazione plastica della zona superficiale è causata da molti parametri come i parametri di taglio (velocità di taglio, avanzamento, profondità di passata), i parametri che riguardano l'utensile (angolo di spoglia superiore, forma dell'utensile, rivestimento, usura) e caratteristiche del pezzo lavorato (tipo di materiale, dimensione dei grani).

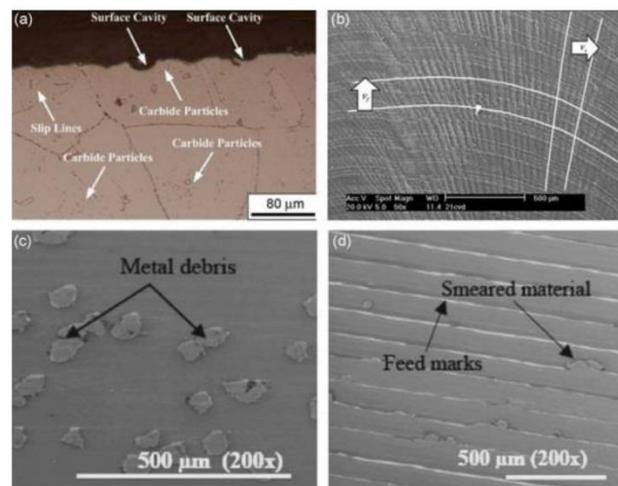
Molte ricerche hanno riscontrato che la maggior causa della deformazione plastica riguarda proprio il materiale che viene lavorato. Inoltre è stato riscontrato che stress termici e meccanici contribuiscono a una maggiore deformazione plastica.



*Figura 2.6 Deformazione dello strato superficiale del campione lavorato con MQL*

### 2.2.2.3 Difetti superficiali

In letteratura sono riportati diversi tipi di difetti superficiali [21] della superficie lavorata: graffiature superficiali, fessurazioni, segni di avanzamento, strappi superficiali, formazione di uno strato di truciolo, detriti di micro-trucioli, grani deformati, cavità superficiali, zone di scorrimento, materiale ripiegato sulla superficie (alcuni esempi sono riportati in Figura 2.7). Anche l'utensile contribuisce alla difettosità, infatti si possono spesso trovare particelle di carburi aderiti alla superficie lavorata.



*Figura 2.7 Difetti superficiali [21]*

Durante le lavorazioni è fondamentale ottimizzare le condizioni di taglio per minimizzare la presenza di difetti superficiali. Tuttavia non possono essere mai eliminate completamente perciò si deve trovare il giusto compromesso per minimizzarne la presenza.

## 2.3 Fluidi di taglio

I fluidi di taglio sono ampiamente utilizzati nelle operazioni di taglio per ottenere i seguenti risultati:

- ridurre l'attrito e l'usura, migliorando così la durata dell'utensile e la finitura superficiale del pezzo;
- raffreddare la zona di taglio, migliorando così la durata degli utensili (Figura 2.8) e riducendo la distorsione termica del pezzo;
- ridurre le forze e il consumo di energia;
- spazzare via il truciolo dalla zona di taglio, evitando così che il truciolo interferisca con il processo di taglio;
- proteggere la superficie lavorata dalla possibile corrosione generata dall'ambiente.

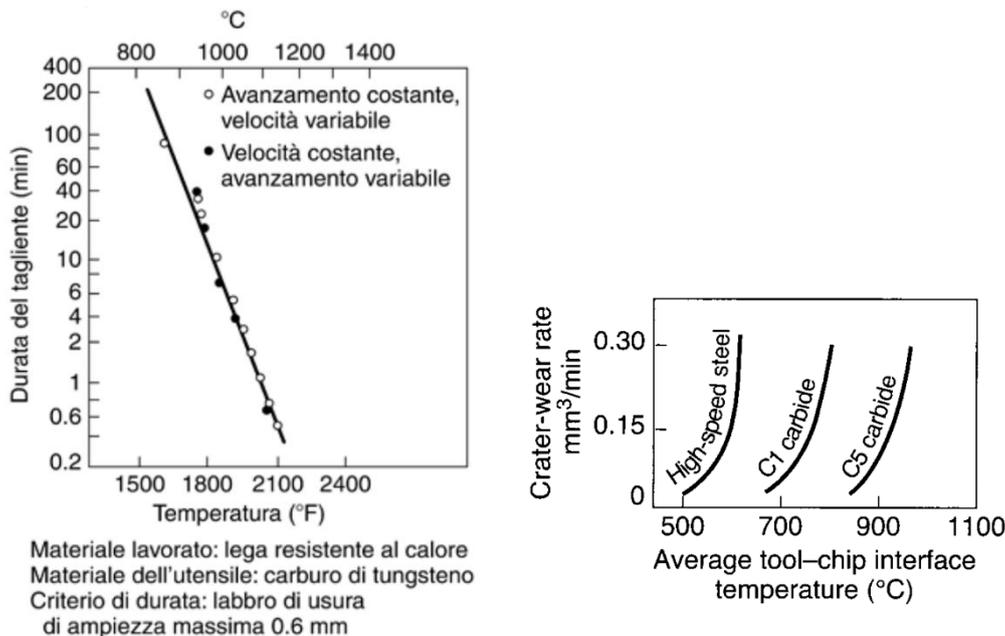


Figura 2.8 Vita dell'utensile vs picco di temperatura dell'utensile [20]

A seconda del tipo di lavorazione, il fluido di taglio necessario può essere un liquido refrigerante, un lubrificante o entrambi. L'efficacia dei fluidi di taglio dipende da un certo numero di fattori, come il tipo di lavorazione, il materiale dell'utensile e del pezzo da lavorare, la velocità di taglio e il metodo di applicazione. L'acqua è un eccellente refrigerante e può ridurre efficacemente le alte temperature sviluppate nella zona di taglio. Tuttavia, l'acqua non è un lubrificante efficace, quindi, non riduce l'attrito. Inoltre, può causare l'ossidazione di pezzi e componenti della macchina utensile. La necessità di un fluido di taglio dipende dalla gravità dell'operazione di lavorazione particolare, che può essere definita come

il livello delle temperature e delle forze incontrate e la capacità del materiale dell'utensile di sopportarli, la facilità con la quale i trucioli prodotti possono essere rimossi dalla zona di taglio e quanto efficacemente i fluidi possano essere applicati nella regione corretta sull'interfaccia del utensile-truciolo. Le severità relative di processi di lavorazione specifici, in ordine crescente di gravità, sono i seguenti: segatura, tornitura, fresatura, foratura, taglio di ingranaggi, taglio e taglio a filo. Esistono tuttavia operazioni in cui l'azione di raffreddamento dei fluidi da taglio può essere dannosa. È stato dimostrato che i fluidi di taglio possono causare un truciolo più arricciato e quindi concentrare il calore più vicino alla punta dell'utensile, riducendone la vita utile.

A partire dalla metà degli anni '90, c'è stata una tendenza importante verso la lavorazione quasi asciutta, cioè un utilizzo minimo di fluidi da taglio, oltre che verso la lavorazione a secco. Azione di taglio-fluido. Non è molto chiaro come un fluido di taglio possa penetrare nella zona del petto dell'utensile e influenzare un processo di taglio continuo. Gli studi hanno dimostrato che il fluido raggiunge l'interfaccia utensile-truciolo passando dai lati del truciolo attraverso l'azione capillare della rete di interconnessione delle asperità superficiali dell'interfaccia. A causa della piccola dimensione di questa rete capillare, il fluido di taglio deve avere una piccola dimensione molecolare e possedere caratteristiche adeguate di bagnabilità (tensione superficiale). Ad esempio, il grasso non può essere un lubrificante efficace nella lavorazione, ma gli oli a basso peso molecolare sospesi in acqua (emulsioni) sono molto efficaci. [18]



# Capitolo 3

-

## Stato dell'arte tecniche di lubro-refrigerazione

L'azione combinata della lubrificazione e refrigerazione nella lavorazione al taglio è nota da tempo, ma solo da pochi anni la ricerca si è soffermata in modo particolare sulla refrigerazione tramite nuovi metodi ecosostenibili e della loro combinazione.

### 3.1 Lubrificanti e refrigeranti non convenzionali

#### 3.1.1 Tecniche di refrigerazione

Due soluzioni refrigeranti a basso impatto ambientale sono rappresentate da azoto liquido (LN<sub>2</sub>) e da anidride carbonica a “neve” (CO<sub>2</sub>). I due gas differiscono notevolmente rispetto al meccanismo di refrigerazione: la CO<sub>2</sub> viene stoccata come liquido in un serbatoio di media pressione (circa 57 bar) a temperatura ambiente, e, quando si espande all'uscita dell'ugello, subisce passaggio di fase parziale trasformandosi in una miscela di fase gassosa e solida finemente dispersa, portando la temperatura della miscela fino a circa -78,5 °C. Al contrario, l'LN<sub>2</sub> viene stoccato in un serbatoio isolato termicamente ad una pressione di circa 20 bar e all'uscita del condotto si porta alla temperatura di evaporazione a pressione atmosferica, cioè -196 °C [22].

Diversi studi hanno dimostrato che l'uso di LN<sub>2</sub> e di CO<sub>2</sub> nella lavorazione di leghe di titanio, porta a significativi miglioramenti della vita dell'utensile rispetto al taglio a secco, inoltre consentono di utilizzare ratei più elevati di asportazione di materiale (*Material Removal Rates*, MRR) [8] [9]. La maggior parte della ricerca lavora sull'LN<sub>2</sub> analizzando come i parametri di taglio (profondità di passata, avanzamento e velocità di taglio), la posizione e dimensione degli ugelli, geometrie e tipo di rivestimento dell'inserto influenzino i meccanismi di usura dell'utensile e la qualità della superficie lavorata [23] [24]. Lo stesso approccio sperimentale è stato applicato per la CO<sub>2</sub> e per entrambi i metodi sono risultate forze di taglio inferiori ed una finitura superficiale migliore rispetto all'utilizzo di altri gas [25]. Nel complesso, le soluzioni di raffreddamento che adottano l'utilizzo di refrigeranti a bassa temperatura determinano significativi miglioramenti in termini di usura e integrità

superficiale (*surface integrity*), ma le loro proprietà lubrificanti non risultano paragonabili a quelle molto migliori dei lubrificanti da taglio convenzionali [10]. Nonostante i numerosi vantaggi evidenziati, l'applicazione industriale di questi metodi è limitata dal costo oneroso dell'impianto (serbatoio e tubi coibentati, messa in sicurezza dell'impianto) e dai possibili altri problemi causati dalle temperature drastiche raggiunte (distorsioni termiche e danneggiamento dei componenti).

Un'attenzione particolare va posta inoltre alla temperatura del refrigerante, questo perché temperature troppo basse, tipiche dell'LN<sub>2</sub>, possono portare ad un'inversione di tendenza portando effetti negativi sia in termini di usura che di integrità superficiale [26].

### 3.1.2 *Tecnica di lubrificazione minimale*

Una strategia di lubrificazione alternativa, oggi ampiamente accettata grazie alla sua competitività economica, è rappresentata dalla lubrificazione a minima quantità di lubrificante (*minimum quantity lubrication*, MQL) anche detta lubrificazione minimale, che consiste nella proiezione di olio biodegradabile, nebulizzato in aria compressa, nella zona di taglio. La piccola quantità di lubrificante combinato all'uso di oli lubrificanti biodegradabili riduce notevolmente l'impatto ambientale e i costi di smaltimento, soprattutto considerando che la portata di olio durante la lavorazione è compresa tra 50 ml/h e 200 ml/h, diversi ordini grandezza inferiore rispetto alla lubrificazione tradizionale che ha una portata di decine di litri per ora [5] [6].

Precedenti studi hanno ottenuto risultati simili a quelli ottenuti tramite lubrificazione convenzionale con emulsioni, e in ogni caso migliorativi rispetto al taglio a secco [27].

Sebbene l'MQL presenti adeguate caratteristiche lubrificanti, ha una capacità di raffreddamento ridotta che non consente una riduzione significativa delle temperature generate e, quindi, dei meccanismi di usura dell'utensile attivati termicamente. Questo inconveniente è particolarmente rilevante in sgrossatura in cui la maggior parte dell'olio evapora o viene degradato prima di raggiungere la zona di taglio, mentre la tecnica di MQL può rappresentare una buona soluzione in caso di semifinitura/finitura in cui la temperatura generata nella zona di taglio è nettamente inferiore.

### 3.1.3 *Tecniche di lubrificazione solida*

La lubrificazione solida è effettuata mediante la proiezione di una sospensione di particelle solide in acqua o in olio (per esempio tramite MQL) direttamente sull'utensile. Le particelle offrono un duplice contributo: migliorano la lubrificazione vera e propria e nel caso di miscelazione con olio ne migliorano la conducibilità termica.

Sono state studiate soluzioni con aggiunta di particelle di MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>, TiN e grafite, dimostrando miglioramenti nella formazione del film di lubrificante [28] [29]. Le temperature di taglio influenzano la scelta del tipo di lubrificante solido, e sotto i 500°C la grafite si rivela una fra le migliori soluzioni [30], quindi fra le più indicate per lavorazioni poco gravose come la semifinitura.



# Capitolo 4

-

## Apparato sperimentale

Per le analisi sono stati usati principalmente due strumenti: SEM e profilometro ottico. Per quanto riguarda invece l'applicazione dei refrigeranti e dei lubrificanti sono stati utilizzati diverse apparecchiature, alcune già presenti sul mercato altre prototipi.

### 4.1 Tornitura

La lavorazione meccanica di taglio in tornitura cilindrica è stata effettuata con un tornio NL1500 CNC Mori-Seiki™ (Figura 4.1) in grado di mantenere costante la velocità di taglio con la riduzione del diametro mentre l'utensile penetra radialmente nel pezzo all'aumentare del numero di giri.



*Figura 4.1* tornio NL1500 CNC Mori-Seiki™

L'inserti utilizzati nello studio sono costituiti da una matrice in carburo di tungsteno rivestiti in TiAlN forniti da Sandvik™ (CNMG 120404-SM1105), caratterizzati da un raggio di 0,4 mm, angolo di spoglia superiore di 7° e angolo di spoglia inferiore di 0°. L'utensile è stato fissato sul porta-utensile Sandvik™ PCLNR 2020K 12 con angolo di approccio di 95°.

**Tabella 4.1** Principali dati di tornio ed utensile

<b>Attrezzatura</b>	<b>Codice</b>	<b>Descrizione</b>
<b>Tornio</b>	Mori Seiki™ XL 500	Lunghezza max lavorabile: 1200 mm N° giri massimo: 4000 giri/min Diametro max: 200 mm
<b>Porta-utensile</b>	Sandvik™ PCLNR 2020K 12	angolo di approccio di 95°
<b>Inserto</b>	Sandvik™ CNMG120404-SM 1105	Substrato in WC a grana fine con 6% di Co per elevata durezza a caldo e buona resistenza alla deformazione plastica. Rivestimento in TiAlN per PVD Buona tenacità, usura sul fianco uniforme e prestazioni elevate. raggio di 0,4 mm angolo di spoglia superiore di 7° angolo di spoglia inferiore di 0°

In un precedente studio [31] i migliori risultati in termini di usura dell'utensile si sono ottenuti con i parametri di taglio riportati in Tabella 4.2 gli stessi parametri sono stati utilizzati in questo studio.

**Tabella 4.2** Parametri di taglio per le prove di tornitura

<b>Parametri di taglio</b>	
Velocità di taglio (m / min)	80
Avanzamento (mm / giro)	0,2
Profondità di passata (mm)	0.25

Le lavorazioni sono state condotte per un tempo fissato di 15 minuti, utilizzando un utensile nuovo per ogni prova.

## 4.2 Analisi post-processo

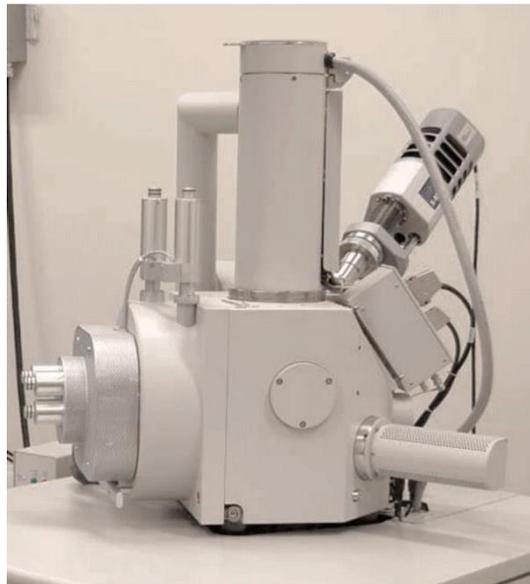
Al fine di valutare la lavorabilità della lega di titanio con differenti processi sperimentati è stato utilizzato il microscopio elettronico a scansione SEM e il profilometro ottico 3D per analizzare l'usura dell'utensile e l'integrità superficiale del materiale lavorato.

### 4.2.1 SEM

Il microscopio elettronico a scansione (SEM) utilizza come sorgente un fascio di elettroni, emessi da un filamento di tungsteno, focalizzato sul campione tramite campi magnetici

regolabili. Il campione eccitato dal fascio riemette onde e particelle che vengono rilevate dai sensori posti nella camera di analisi, il tutto viene fatto in una camera portata precedentemente in alto vuoto (10<sup>-5</sup> Torr). Ne risulta un'immagine simile a quella ottenuta con i microscopi ottici ma in bianco e nero, con una risoluzione nettamente maggiore (intorno ai 5 nm) e un'ottima profondità di campo. [32]

Il SEM utilizzato in questo studio è un FEI QUANTA 450TM (Figura 4.2) equipaggiato con rilevatore BSED ed ETD; le analisi sono state condotte secondo la norma l'ISO3685: 1993 [33].



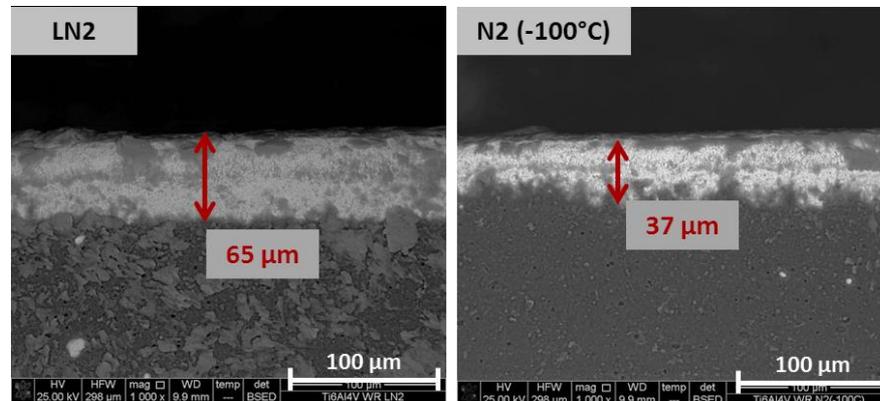
*Figura 4.2 SEM FEI QUANTA 450<sup>TM</sup>*

#### 4.2.1.1 Rilevatore BSED (BSE)

Il rilevatore BSED (*backscattered electrons detector*) sfrutta gli elettroni retrodiffusi, che sono elettroni ad alta energia, originari del fascio primario, che vengono riflessi dal materiale dopo essere penetrati in profondità nel campione. La loro interazione con gli atomi è proporzionale al peso atomico di quest'ultimi, ne risulta un'immagine con zone più chiare in corrispondenza degli atomi ad alto peso molecolare e viceversa tendenti al nero per atomi più leggeri (Figura 4.5 A). Questo tipo di rilevatore è indicato per un'indagine della distribuzione dei diversi elementi ed è stato utilizzato in questo studio per due tipi di indagine:

- valutazione dell'usura dell'utensile: labbro di usura del fianco e cratere per il petto. Prima di essere analizzato l'utensile è stato pulito tramite esposizione agli ultrasuoni in immersione di alcol etilico per circa 10 minuti; La misurazione del labbro di usura (*flank wear*, VBc) è stata effettuata a partire dall'immagine frontale del fianco, dalla tangente alla zona non usurata del petto

(dimensione originale del tagliente) è stata misurata la lunghezza perpendicolare che intercorreva fino al substrato ancora intatto (Figura 4.3), il dato è stato preso in più punti in una larghezza di 400  $\mu\text{m}$  e la media è riportata negli istogrammi che seguono.



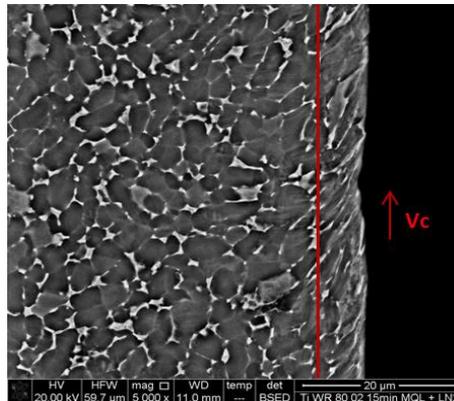
**Figura 4.3** Labbro di usura dell'utensile dopo lavorazione con LN2 e N<sub>2</sub> gassoso (-100°C)

La vita dell'utensile è solitamente definita in base a questo parametro: in riferimento alla norma ISO 3685 [34] lo spessore medio dello strato abrasivo VBc (area bianca visibile nella Figura 4.3) non deve superare il valore di 300  $\mu\text{m}$  per operazioni di tornitura, questo limite è ulteriormente abbassato a 100  $\mu\text{m}$  nel caso di operazioni di finitura per materiali DTC al fine di garantire una superficie accettabile. Nelle lavorazioni effettuate in questo studio questo limite non è mai stato superato.

Misura dello strato deformato (Figura 4.4): il campione lavorato subisce una distorsione dello strato superficiale. Il pezzo lavorato è stato troncato trasversalmente, il campione ottenuto è stato inglobato in resina epossidica e lucidato tramite carte abrasive e panni imbevuti di silice colloidale in soluzione con acqua ossigenata. I campioni lucidati sono stati attaccati chimicamente con reagente "Kroll" al fine di evidenziare i bordo-grano e quindi lo strato deformato (incrudito), secondo la norma di riferimento ASTM E407-70 [35] e, infine, analizzata al SEM con rilevatore BSED (Figura 4.4). Lo strato deformato è visibile in quanto i grandi in prossimità della superficie presentano una direzionalità determinata dalla direzione di taglio mentre la matrice sottostante presenta una grana equiassica.

Questa porzione di materiale avrà caratteristiche chimiche e fisiche diverse dal resto della matrice, in semifinitura non raggiungono temperature tali da provocare alterazioni microstrutturali o transizioni di fase (servirebbero 995°C circa), ma quello che si verifica è solo una deformazione che provoca un incrudimento e rende più dura la superficie del materiale e meno adatto a lavorazioni successive, al

contrario uno strato più spesso di materiale incrudito può essere una condizione vantaggiosa se il pezzo va messo in opera senza altre lavorazioni portando beneficio alla resistenza ad usura e fatica.

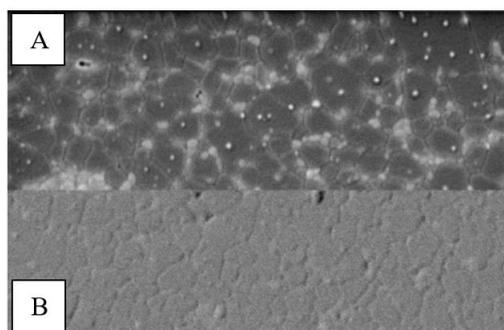


**Figura 4.4** Strato deformato dopo lavorazione di semifinitura al tornio con lubrificazione combinata MQL + LN2

#### 4.2.1.2 Rilevatore ETD

Il rilevatore ETD capta gli elettroni a bassa energia (<50eV) che sono gli elettroni secondari riemessi dal materiale dal guscio k dopo urto anelastico con il fascio di elettroni primari. Data la loro bassa energia gli unici elettroni che riescono a raggiungere il rilevatore sono quelli nel primo strato di pochi nanometri di materiale, questa caratteristica rende questo tipo di rilevazione ottimale per la topografia del campione (fino a 0,5 nm di risoluzione) e al contrario del BSED non risente particolarmente del peso atomico degli elementi. Ne risulta un'immagine più definita e con una colorazione omogenea (Figura 4.5 B).

Questo tipo di rilevatore è stato utilizzato, in questo studio, per l'analisi topografica del campione lavorato e nella ricerca delle difettosità.



**Figura 4.5** Immagine acquisita al microscopio SEM: A) con rilevatore BSED; B) con rilevatore ETD [36]

#### 4.2.1.3 Rilevatore EDS

Il rilevatore EDS è basato sulla spettroscopia dei raggi x, il materiale eccitato dal fascio di elettroni riemette raggi x derivanti dal riassetamento elettronico interno all'atomo e la

frequenza di questi raggi è tipica per ogni elemento, ne consegue che questo rilevatore è in grado di individuare la composizione chimica in una delimitata zona superficiale del materiale.

In questo studio il rilevatore in questione è stato utilizzato nell'analisi dell'usura del petto dell'utensile per distinguere con sicurezza: il rivestimento (TiAlN), il substrato di carburo di tungsteno (WC) e il materiale aderito composto da titanio.

#### 4.2.2 Profilometro ottico

Il profilometro ottico è uno strumento che permette di ottenere il profilo superficiale e di misurarne la rugosità senza entrare in contatto con il campione.

Per oggetti di piccole dimensioni, come l'utensile, il profilometro utilizza la tecnica confocale, ricostruendo il profilo determinando la coordinata di profondità tramite movimento del punto focale fino ad individuarne l'altezza.

Vantaggi del profilometro ottico:

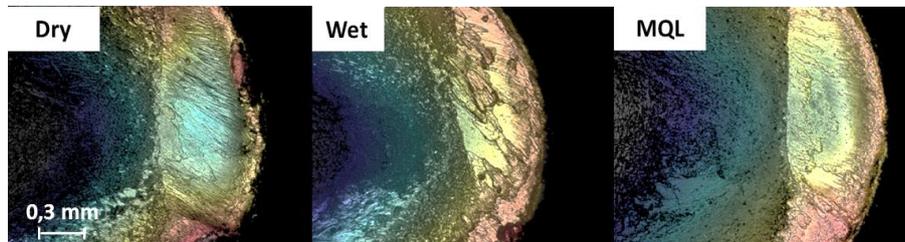
- velocità: per piccoli passi e piccole aree di scansione, poiché la sonda non a contatto con la superficie, le velocità di scansione sono dettate dalla luce riflessa dalla superficie e dalla velocità dell'elettronica di acquisizione;
- affidabilità: il profilometro ottico non tocca la superficie e pertanto non può danneggiare la superficie;
- Risoluzione: varia da pochi micron ai decimi di micron. [37].



**Figura 4.6** Profilometro ottico 3D Sensofar Plu-Neox™

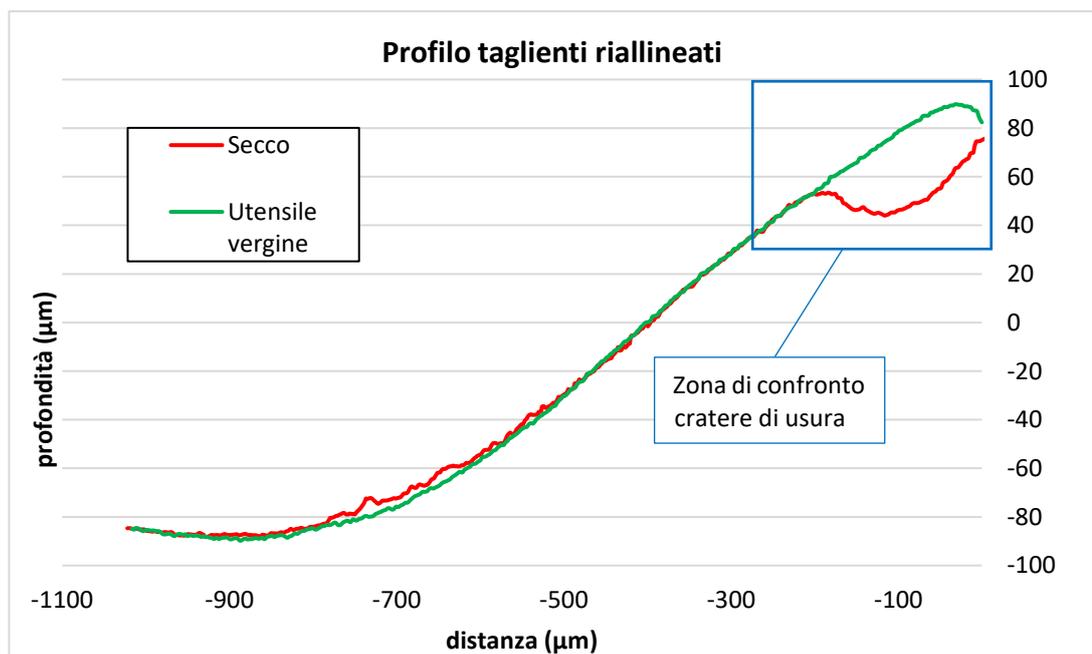
Il profilometro ottico 3D usato in questo studio è il modello Sensofar Plu-NeoxTM (Figura 4.6), ed è stato utilizzato per:

- tracciare il profilo dell'utensile dopo ogni lavorazione, l'acquisizione produce una superficie tridimensionale (Figura 4.7) dalla quale è poi stata estratta una sezione centrale per il confronto fra i vari utensili.



**Figura 4.7** Ricostruzione 3D tramite profilometro ottico del petto dell'utensile usurato

Per rendere questi dati confrontabili i profili sono stati allineati in modo da far coincidere la parte del profilo non usurato (Grafico 4.1), i dati così ottenuti sono stati messi a confronto.

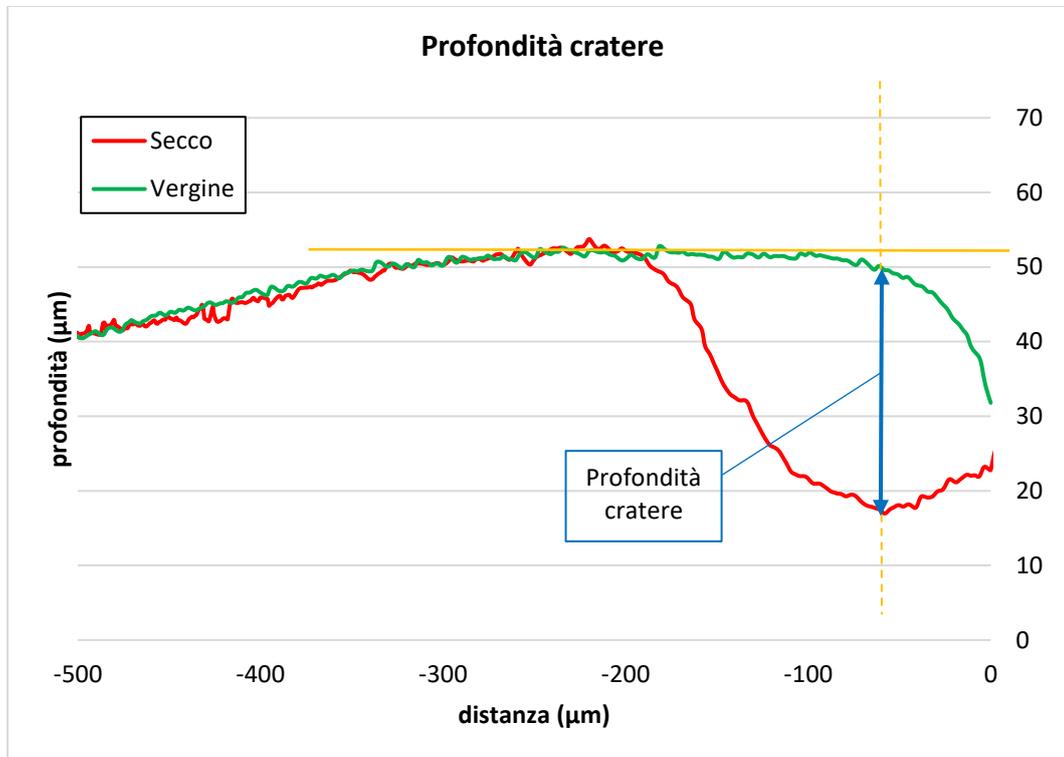


**Grafico 4.1** Profilo utensili: riallineamento vergine con lavorazione a secco

Al fine di garantire la ripetibilità della misura è stato utilizzato un supporto, appositamente progettato e prodotto in matrice polimerica tramite stampaggio 3D, sul quale l'utensile è stato posizionato in battuta con le pareti in modo da avere un riferimento uguale per tutte le misurazioni;

- Misurare la profondità massima del cratere di usura e la sua distanza dal fianco dell'utensile. I dati del profilo sono stati nuovamente elaborati per ruotare il profilo

fino a posizionare orizzontalmente il tratto di petto dell'utensile non usurato. La misurazione del cratere è stata effettuata lungo la perpendicolare alla tangente al petto dell'utensile e quantificata come massimo della distanza fra il profilo usurato e quello vergine corrispondente alla stessa coordina (Grafico 4.2).



*Grafico 4.2 Misura della profondità del cratere taglio a secco*

- tracciare la topografia della superficie lavorata e misurarne la rugosità che è stata ottenuta seguendo la norma ISO4287: 1996 [38]. I parametri utilizzati nella rilevazione sono stati: filtro cut-off pari a 0,25 mm e lunghezza di misura di 1,25 mm.

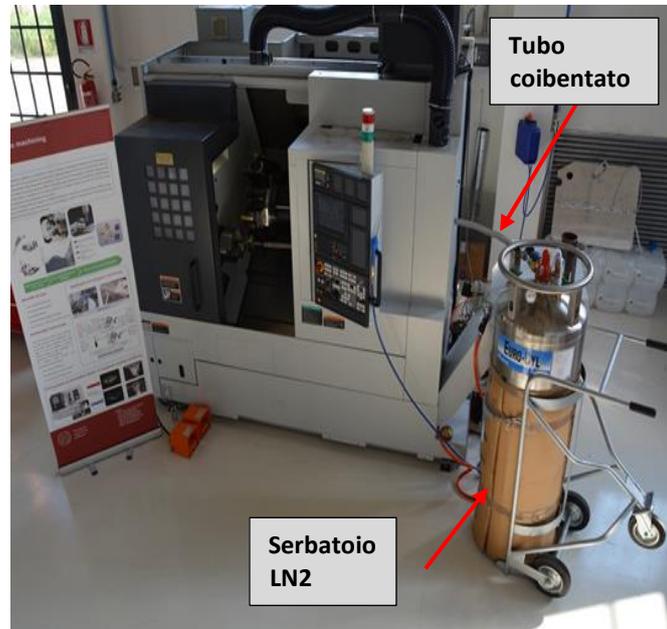
### 4.3 Impianti di lubrificazione e refrigerazione

I fluidi di adduzione per la lubro-refrigerazione si possono categorizzare in refrigeranti e lubrificanti, di seguito è riportato il meccanismo di funzionamento e la disposizione sperimentale di ogni tecnica.

#### 4.3.1 Azoto liquido (LN2)

L'azoto liquido è un refrigerante molto potente, la sua temperatura di ebollizione a pressione atmosferica è di  $-196,82^{\circ}\text{C}$ . Viene stoccato in serbatoi criogenici coibentati da 200 litri (Figura 4.8), con un sistema interno che permette il graduale sfiato di una piccola parte di azoto in forma gassosa permettendo il mantenimento della temperatura interna vicina a

quella di ebollizione e la pressione intorno ai 15 bar. Durante le lavorazioni il liquido è stato portato fino alla zona di taglio con un tubo criogenico giuntato con una piastra fissata alla torretta del tornio, appositamente progettata in modo da convogliare il fluido in due ugelli in rame direzionabili di diametro interno di 0,9 mm (Figura 4.9). In questo caso il flusso di LN2 è stato misurato essere di 4 l/min.

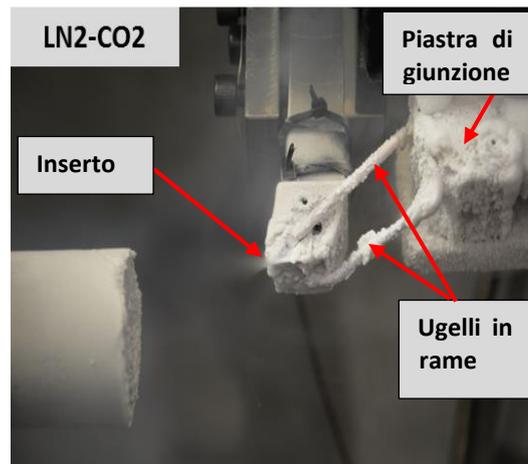


*Figura 4.8 Serbatoio azoto liquido e collegamento all'impianto*

### 4.3.2 Anidride carbonica (CO<sub>2</sub>)

La refrigerazione tramite anidride carbonica è resa possibile dall'abbassamento di temperatura del fluido che si raggiunge nel passaggio dal liquido in pressione nel serbatoio alla miscela di solido disperso e gas ("neve") a pressione atmosferica. La termodinamica della CO<sub>2</sub> infatti prevede che sia stabile a temperatura ambiente nella fase liquida alla pressione di 57 bar con cui è stoccata nel serbatoio, nelle condizioni di pressione ambientale, invece, la fase liquida, non più termodinamicamente prevista, si trasforma in una miscela di fase solida e gassosa alla temperatura misurata sperimentalmente di -78,5 °C.

Il fluido è stato portato dal serbatoio fino alla zona di taglio (nello stesso modo utilizzato per l'LN2 e mostrato nella Figura 4.8) tramite un tubo coibentato, giuntato con una piastra fissata alla torretta del tornio, appositamente progettata in modo da convogliare il fluido in due ugelli in rame direzionabili di diametro interno di 0,9 mm (Figura 4.9).



*Figura 4.9* Dettaglio della zona di taglio con ugelli in rame per la fuoriuscita dei refrigeranti ( $CO_2$  o  $LN_2$ )

I due ugelli sono stati direzionati in modo da raggiungere rispettivamente la zona del petto e la zona del fianco dell'utensile, ma comunque in modo da non ostacolare le operazioni di taglio. Prima di iniziare la lavorazione di tornitura il refrigerante è stato lasciato scorrere a vuoto per qualche minuto in modo da dare il tempo a tutta la linea di raffreddarsi, cioè fino a quando la temperatura del fluido all'uscita (misurata tramite una termocoppia appropriata a questo range di temperature (Figura 4.10) non ha raggiunto la temperatura di  $-78,5^{\circ}C$ . Durante la tornitura il flusso di  $CO_2$  è stato misurato essere 2,3 l/min.

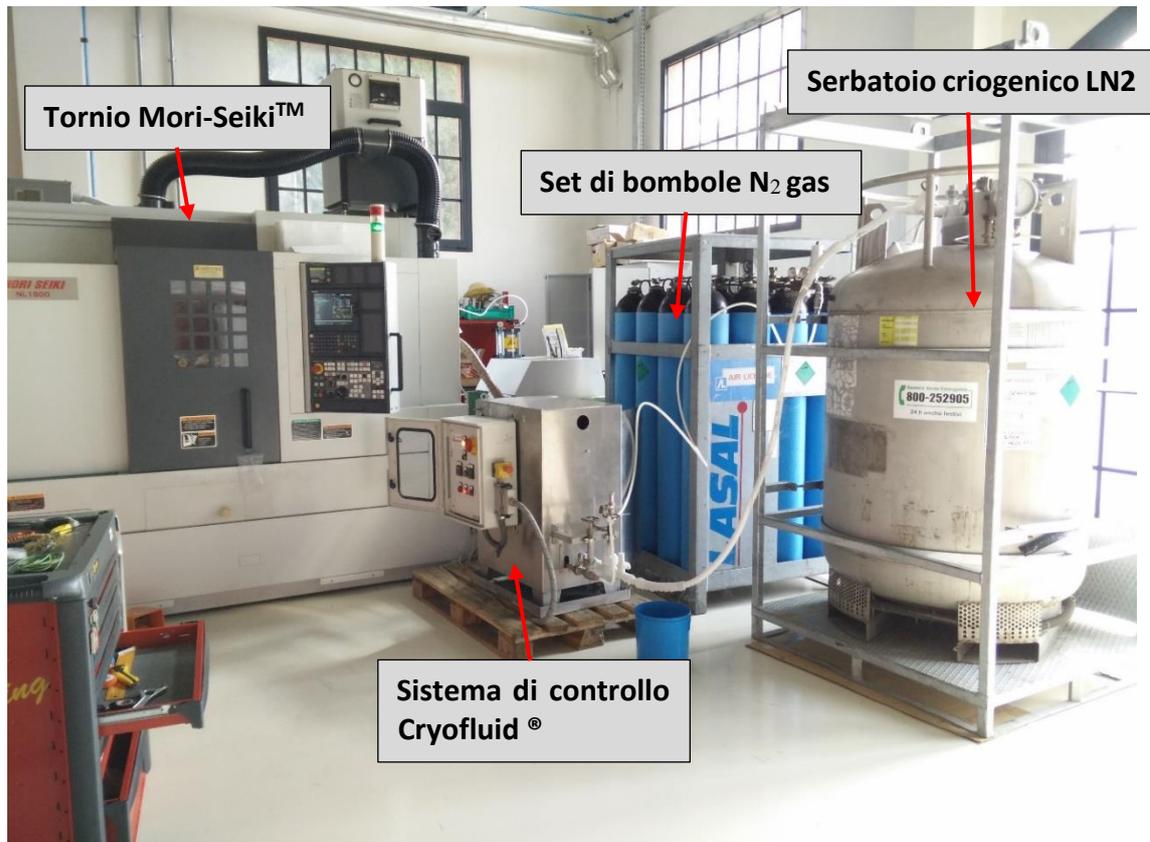


*Figura 4.10* Misurazione della temperatura del refrigerante tramite termocoppia

### 4.3.3 Sistema Cryofluid<sup>®</sup> ( $N_2$ )

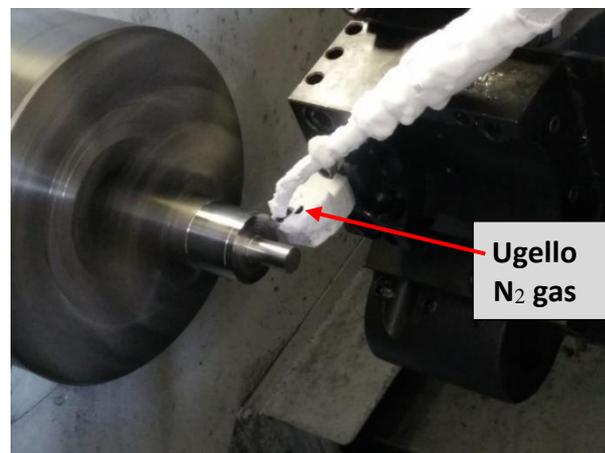
Il controllo della temperatura del fluido refrigerante è stato reso possibile da un'apparecchiatura sperimentale Cryofluid<sup>®</sup> denominata fornita dall'azienda Air Liquid (Figura 4.11). In questo caso il refrigerante è costituito da azoto gassoso ottenuto dalla miscelazione controllata di azoto liquido e gassoso in un serbatoio isolato termicamente. L'apparecchiatura di controllo retroattivo costituito da un PLC mantiene la pressione di

uscita del gas intorno ai  $2,5 \pm 1$  bar e ne permette la regolazione della temperatura con precisione del grado centigrado nel range  $0^{\circ}\text{C} \div -150^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 4.11** Da sinistra a destra: Torno Mori-Seiki, Sistema di controllo Cryofluid®, Set di bombole di azoto gassoso (N<sub>2</sub>), Serbatoio criogenico di azoto liquido (LN<sub>2</sub>)

Il sistema è stato alimentato da un set di 16 bombole di azoto gassoso a 60 bar collegate in parallelo e da un serbatoio criogenico di azoto liquido mantenuto a 15 bar. All'uscita dall'apparecchio di controllo il gas è stato portato fino all'utensile con un tubo coibentato e fatto fluire sull'utensile attraverso un ugello di diametro interno di 4 mm (Figura 4.12).



**Figura 4.12** Operazione di tornitura con refrigerazione ad azoto gassoso tramite sistema Cryofluid

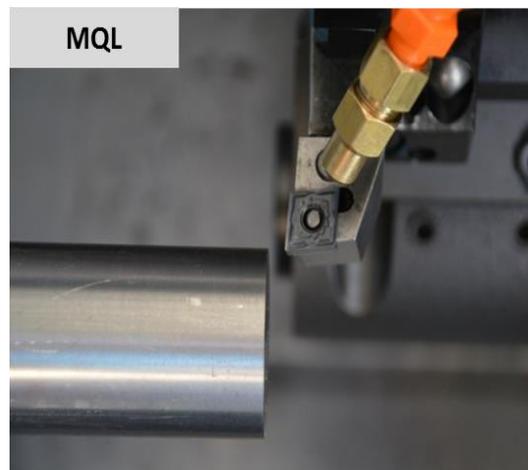
#### 4.3.4 MQL

La tecnologia di minima lubrificazione (*minimum quantity lubrication*, MQL) ha l'obiettivo di ridurre al minimo l'uso di lubrificante per le lavorazioni di taglio. Questo è reso possibile nebulizzando olio di origine vegetale (Bechem® Berecut MQL A20) in un flusso di aria compressa.



**Figura 4.13** Sistema MQL, composto da serbatoio, manometro, sistema di regolazione del flusso di olio e della pressione

L'apparecchiatura utilizzata in questo studio è stata fornita da Dropsa® (Figura 4.13), il macchinario è composto da un serbatoio per l'olio lubrificante, un sistema di controllo del flusso e della pressione dell'aria, è alimentato con aria compressa a 7 bar, in uscita un tubo coassiale porta olio e aria separatamente per poi essere miscelati sull'ugello montato su un braccio snodabile (Figura 4.14) e fissato alla torretta del tornio per mezzo di un magnete. Il flusso dell'olio in uscita è stato mantenuto fra i 50 ml/h e i 200 ml/h nelle diverse prove.

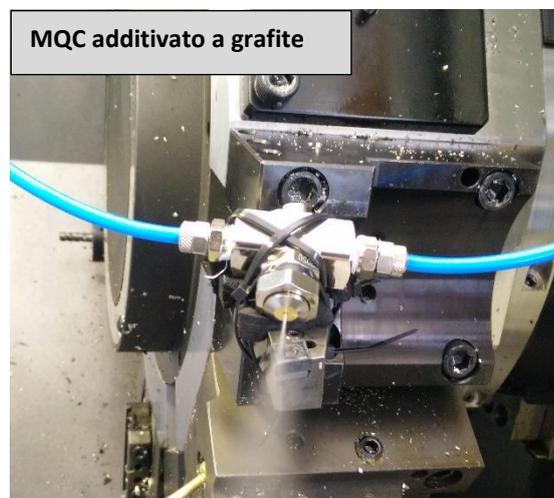


**Figura 4.14** Dettaglio dell'utensile con ugello MQL

### 4.3.5 MQC additivato con grafite

Per la sperimentazione della lubrificazione solida la grafite, in particelle micrometriche, è stata aggiunta all'acqua in modo da ottenere miscele al 5%, 10% e 15% di grafite in peso. La proiezione della miscela nebulizzata sull'utensile è stata possibile sfruttando l'effetto venturi: un apposito ugello, presente in commercio e normalmente utilizzato per lubrificazioni nella fabbricazione di lamiera, è duplicemente alimentato da aria compressa a 7 bar e da un pescante immerso nel serbatoio della miscela acqua-grafite. La conformazione dell'ugello permette di creare una depressione nel tubo pescante proporzionale alla pressione dell'aria e all'apertura dell'apertura frontale dell'ugello. Conoscendo l'altezza relativa del serbatoio rispetto all'ugello, la viscosità della miscela e gli altri parametri descritti è possibile stimare la portata di miscela proiettata attraverso tabelle fornite dal produttore dell'apparecchio, portata confermata a posteriori dalla misurazione del consumo effettivo del liquido nel serbatoio, in questa sperimentazione è stata settata a 4 l/h.

Il getto di miscela è di forma conica e l'apertura di uscita è stata posta a 2,5 cm dall'utensile, come consigliato dalle specifiche tecniche dell'ugello, al fine di ottenere una copertura uniforme di tutta la zona di lavorazione dell'utensile (Figura 4.15).

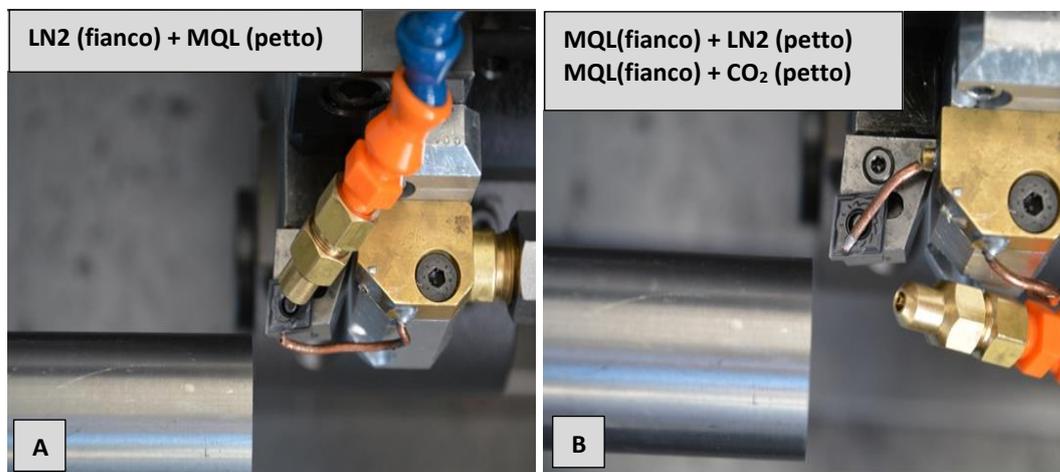


**Figura 4.15** Utensile con ugello venturi in funzione per lubrificazione solida

### 4.3.6 Tecniche combinate di lubro-refrigerazione

L'analisi preliminare dei meccanismi di usura dell'utensile ha evidenziato che i fenomeni dominanti sono diffusione, abrasione e adesione. L'abrasione caratterizza l'usura del fianco frontale dell'utensile, mentre diffusione e adesione sono critiche nella formazione del cratere sul petto dell'utensile [31]. Le temperature più elevate si raggiungono nella zona del petto [18, p. 572] favorendo i fenomeni di diffusione, per questo la disposizione sperimentale è stata studiata in modo che i refrigeranti (LN<sub>2</sub>, azoto gassoso raffreddato, CO<sub>2</sub>) raggiungano in maniera efficace questa zona. L'abrasione, sensibile al coefficiente d'attrito, è stata minimizzata portando al fianco dell'utensile i lubrificanti (MQL).

Queste ipotesi sono state verificate testando la lubrificazione combinata di LN<sub>2</sub> e MQL in entrambe le configurazioni possibili: LN<sub>2</sub> petto + MQL fianco e viceversa (Figura 4.16).



**Figura 4.16** Disposizione degli ugelli per ottenere: A) la lubrificazione tramite LN<sub>2</sub> sul fianco e la lubrificazione MQL sul petto dell'utensile; B) lubrificazione MQL sul fianco e la refrigerazione LN<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> sul petto dell'utensile

Verificata questa ipotesi le successive tecniche combinate: MQL + N<sub>2</sub> e MQL + CO<sub>2</sub>, sono state eseguite dirigendo l'MQL sul fianco dell'utensile in modo da ottimizzarne la lubrificazione, mentre N<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> sono state insufflate in direzione del petto per sfruttarne la caratteristica refrigerante oltre all'ulteriore vantaggio rappresentato dalla capacità di evacuazione del truciolo provocata dagli alti flussi e pressioni dei due gas.

### 4.3.7 Tecniche di riferimento

Come riferimento sono state utilizzate le tecniche di taglio più usate per questo tipo di materiale: “a secco” e lubrificazione convenzionale. Con taglio a secco si intende la lavorazione senza alcun tipo di lubrificante o refrigerante, questo provoca durante la lavorazione arricciamento del truciolo che torna nella zona di taglio costringendo a interromperla per effettuare l'evacuazione manuale, questo a causa delle alte temperature. La

lubrificazione convenzionale consiste nell'inondare la zona di taglio con un'apposita miscela di acqua e 5% di olio da taglio commercialmente disponibile (Monroe<sup>®</sup> Astro-Cut HD XBP), l'impianto per questo tipo di lubrificazione è già incorporato nel tornio Mori-Seiki<sup>TM</sup>, gli ugelli sono montati direttamente sulla torretta e direzionabili sull'utensile. La proiezione del fluido è effettuata ad una pressione di 3 bar ed una portata di 225 l/h. Un sistema di ricircolo interno ripesca l'emulsione utilizzata, la filtra e la riporta all'utensile in modo da minimizzare i consumi.



# Capitolo 5

-

## Risultati

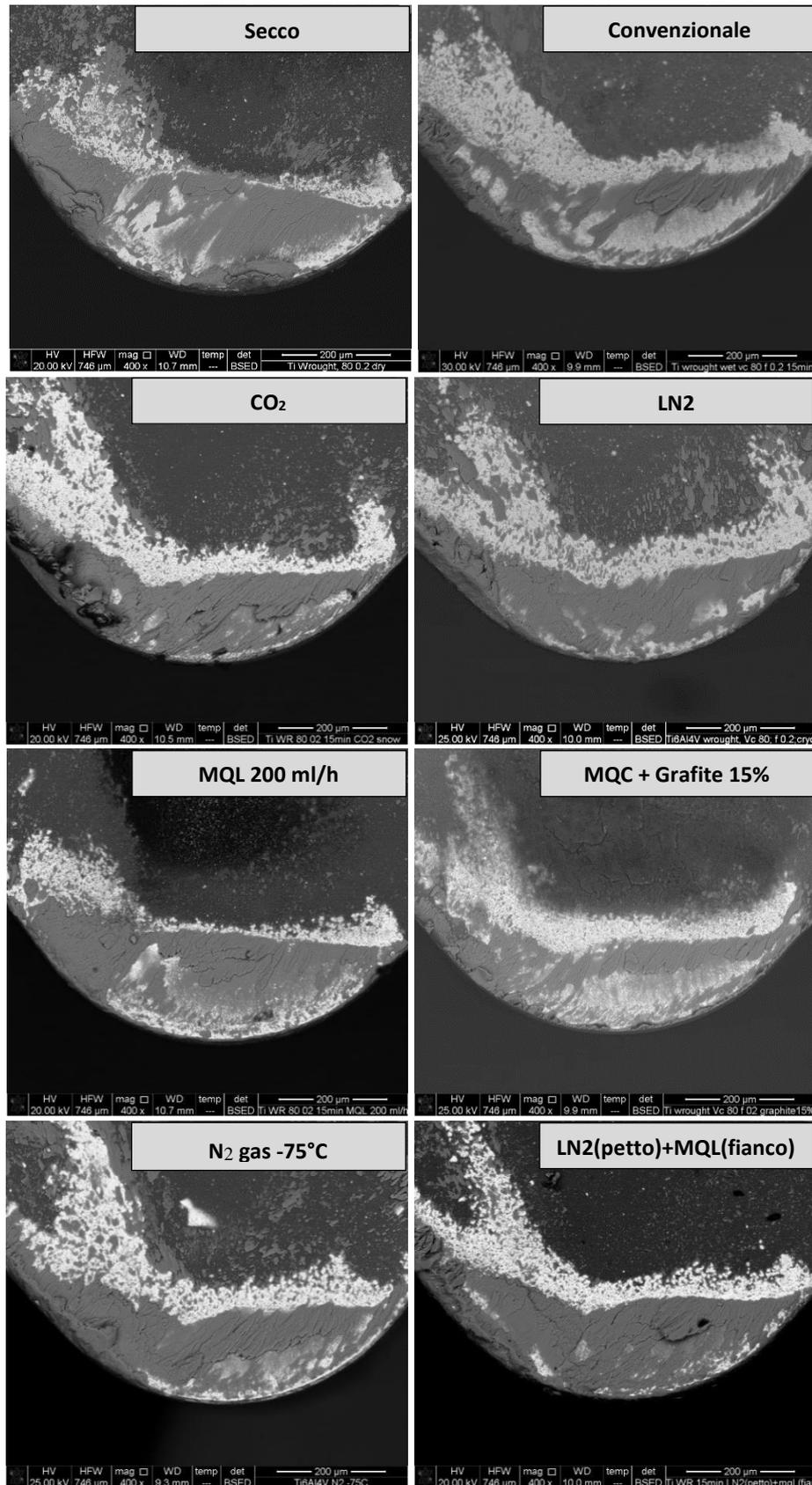
Al fine di valutare la lavorabilità della lega di titanio nelle diverse condizioni di lubrificazione, utensile e materiale lavorato sono stati analizzati per mezzo del microscopio SEM e profilometro ottico previa opportuna preparazione.

### **5.1 Usura dell'utensile**

L'usura dell'utensile è localizzata principalmente sul petto e sul fianco, attraverso diversi meccanismi tipici, portando rispettivamente a formazione del cratere di usura e del labbro di usura (VB).

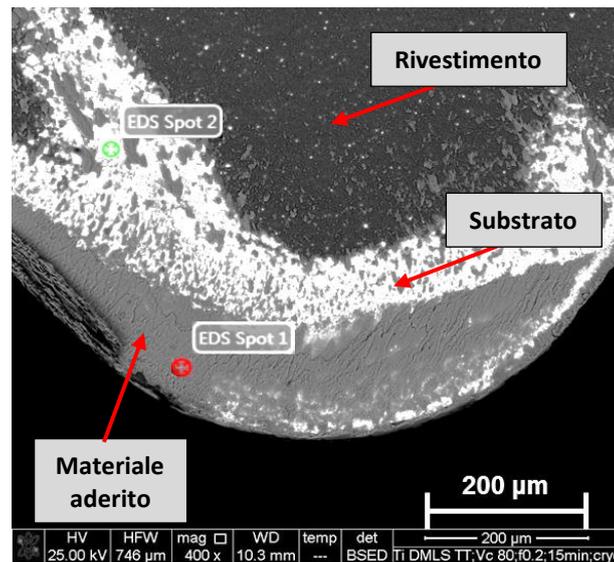
#### *5.1.1 Usura del petto*

Al termine della lavorazione di taglio, l'utensile è stato analizzato al SEM con rilevatore BSED e le immagini acquisite con un ingrandimento di 400x. La Figura 5.1 mette a confronto il petto di alcuni degli utensili dopo le diverse condizioni di taglio.



*Figura 5.1* Immagini SEM del petto degli utensili che hanno lavorato con le diverse tecniche di lubro-refrigerazione.

Dalle analisi EDS riportate in Tabella 5.1 e dalle immagini della Figura 5.1 possiamo individuare tre zone distinte sul petto dell'utensile: in alto, con colorazione più scura, è ancora presente il rivestimento dell'utensile quindi questa è la zona non usurata dell'utensile; procedendo verso lo spigolo inferiore appare una semi-luna di colorazione più chiara, in questa zona il rivestimento è stato completamente usurato e il substrato di carburo di tungsteno è stato messo a nudo; in prossimità della parte inferiore, con colorazione di grigio intermedia alle due precedenti, si trova il materiale aderito che è rimasto saldato al petto durante la lavorazione.

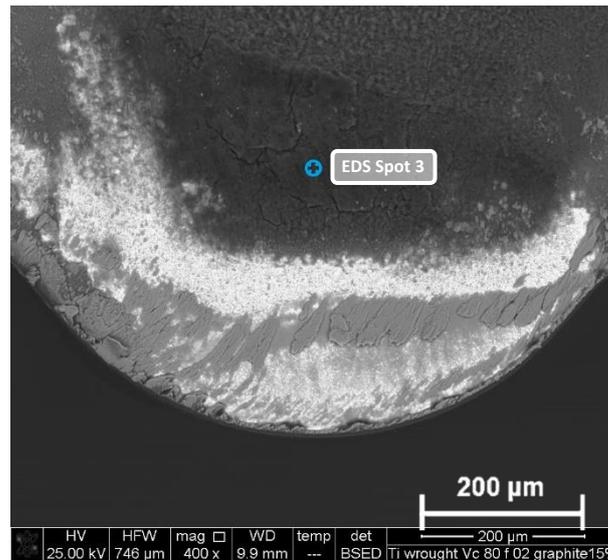


**Figura 5.2** Petto dell'utensile dopo lavorazione  $N_2$  e punti (spot) di analisi EDS

**Tabella 5.1** Risultati della composizione % acquisiti con sonda EDS dei punti indicati in **Figura 5.2**

# Spot	W	Co	Ti	Al	V
1	10.19	0.64	77.31	5.76	6.1
2	86.63	6.79	4.22	1.95	0.41

Una differenza particolare individuata al SEM fra i diversi tipi di lubrificazione è quella della lubrificazione solida, la quale presenta un accumulo di grafite nella parte più vicina alla parte centrale dell'utensile, che si tratti effettivamente di carbonio è stato confermato tramite analisi EDS (Figura 5.3) i cui risultati sono riportati nella Tabella 5.2.



**Figura 5.3** Petto dell'utensile dopo lavorazione con MQC + grafite 15% e punto di analisi EDS (spot 3)

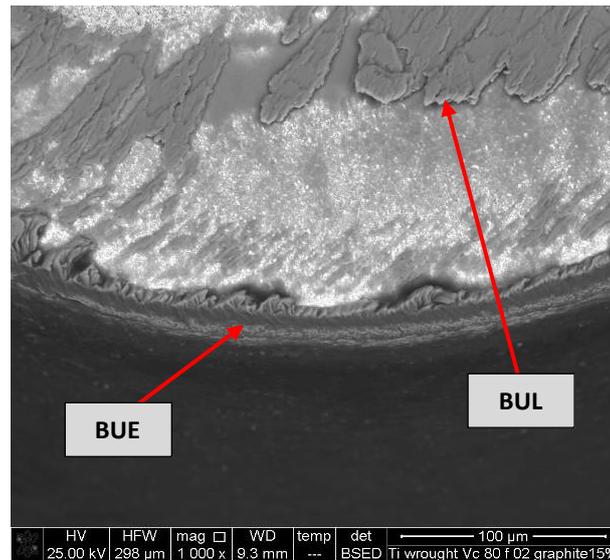
**Tabella 5.2** Risultati EDS del materiale depositato sull'utensile nella lavorazione MQC con grafite 15% (**Figura 5.3**)

# Spot	C	Si	O	F	Ti
3	65.58	21.78	12.36	-	-

#### 5.1.1.1 Usura adesiva

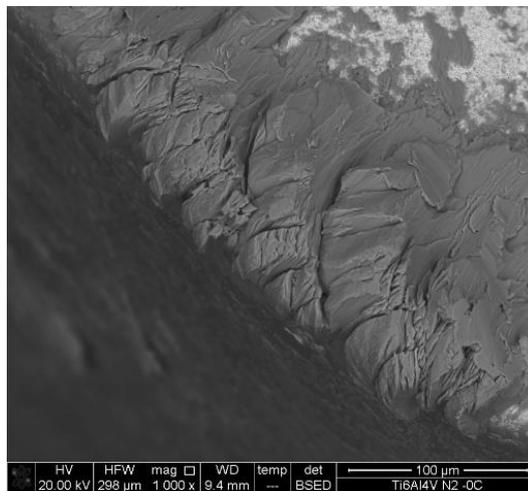
Dalle immagini riportate in Figura 5.1 si nota subito come sia presente per tutte le lavorazioni materiale aderito in corrispondenza del cratere (BUL), questo materiale concorre al fenomeno di diffusione impoverendo in particolar modo il cobalto dall'utensile, infragilendolo e in seguito, quando le forze di taglio ne causano il distacco, strappano via parte del carburo sottostante contribuendo alla formazione del cratere.

Altrettanto frequente è la formazione del tagliente di riporto (BUE), che protegge il tagliente dall'usura abrasiva ma al contempo ne degrada le proprietà tramite diffusione e innalza le forze di taglio fino ad arrivare al distacco insieme ad una porzione di utensile. Ne è un esempio il caso della lubrificazione solida con grafite riportato in Figura 5.4.



*Figura 5.4* Tagliante di riporto dell'utensile dopo lavorazione con MQC

In ultimo, meno dannoso dei primi due, ma comunque altrettanto ampiamente riscontrato per ogni forma di lubrificazione, materiale aderito nella zona decentrata del tagliante, in corrispondenza del percorso preferenziale di scorrimento del truciolo. Nella Figura 5.5 è riportato un particolare dell'utensile che riscontra questo fenomeno dopo lavorazione con azoto gassoso a  $-75^{\circ}\text{C}$ .

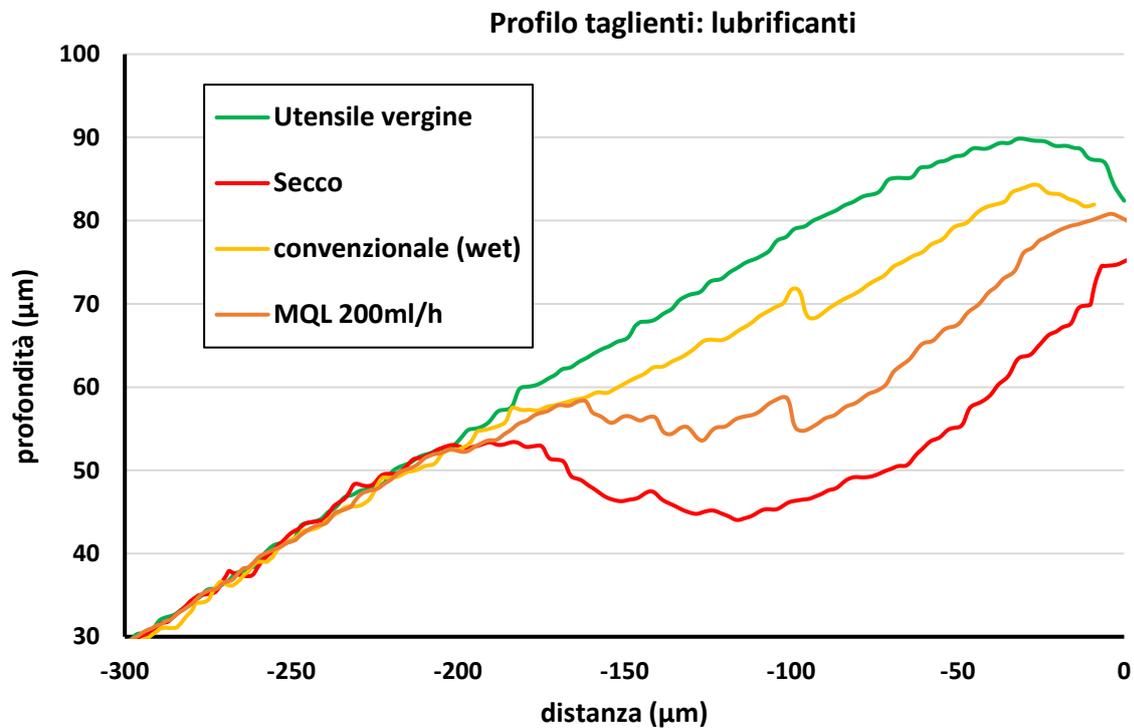


*Figura 5.5* Materiale aderito all'utensile dopo la lavorazione con azoto gassoso  $0^{\circ}\text{C}$

#### 5.1.1.2 Profilo del cratere d'usura

Date le poche informazioni ricavabili dalle acquisizioni al SEM si è reso necessario utilizzare un metodo molto più preciso di acquisizione dei dati rispetto al petto dell'utensile, questo è stato reso possibile con il profilometro ottico. Il profilo del petto di ogni utensile è stato scansionato e i risultati messi a confronto con il profilo dell'utensile non usurato.

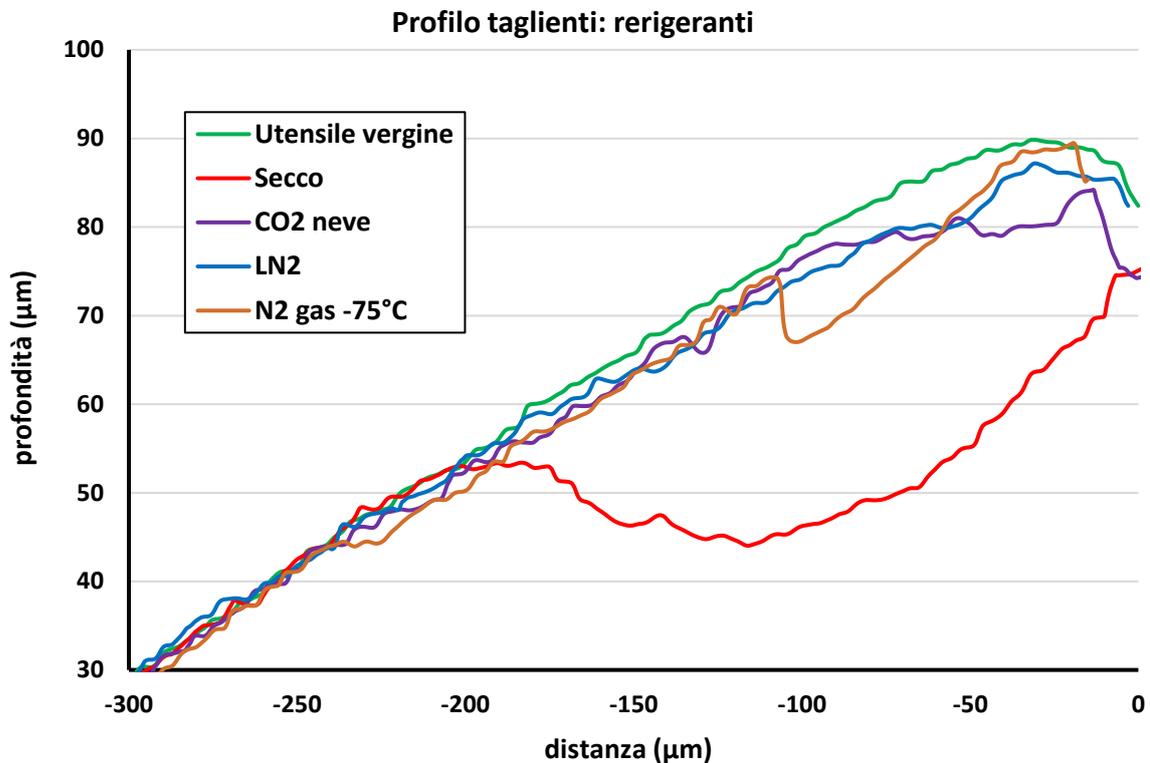
Il primo confronto è fra le tecniche lubrificanti, per quanto riguarda l'MQL sono state testate portate di olio comprese fra i 50 e i 200 ml/h, la variazione non ha prodotto grandi differenze di usura e nel Grafico 5.1 è riportato il profilo che ha riportato i migliori risultati, cioè quello con portata 200 ml/h.



*Grafico 5.1 Profilo taglienti con tecniche di lubrificazione: MQL e convenzionale*

La portata di 200 ml/h per il sistema MQL è stata utilizzata anche nelle successive sperimentazioni, l'usura del petto con quest'ultima tecnica di lubrificazione rimane intermedia fra la lavorazione a secco e lubrificazione convenzionale ma è da considerarsi comunque un ottimo risultato dato che impiega un flusso di diversi ordini di grandezza minore rispetto a quest'ultima, inoltre, la grande quantità di acqua presente nella lubrificazione classica fornisce un notevole apporto refrigerante che l'MQL non è in grado di dare.

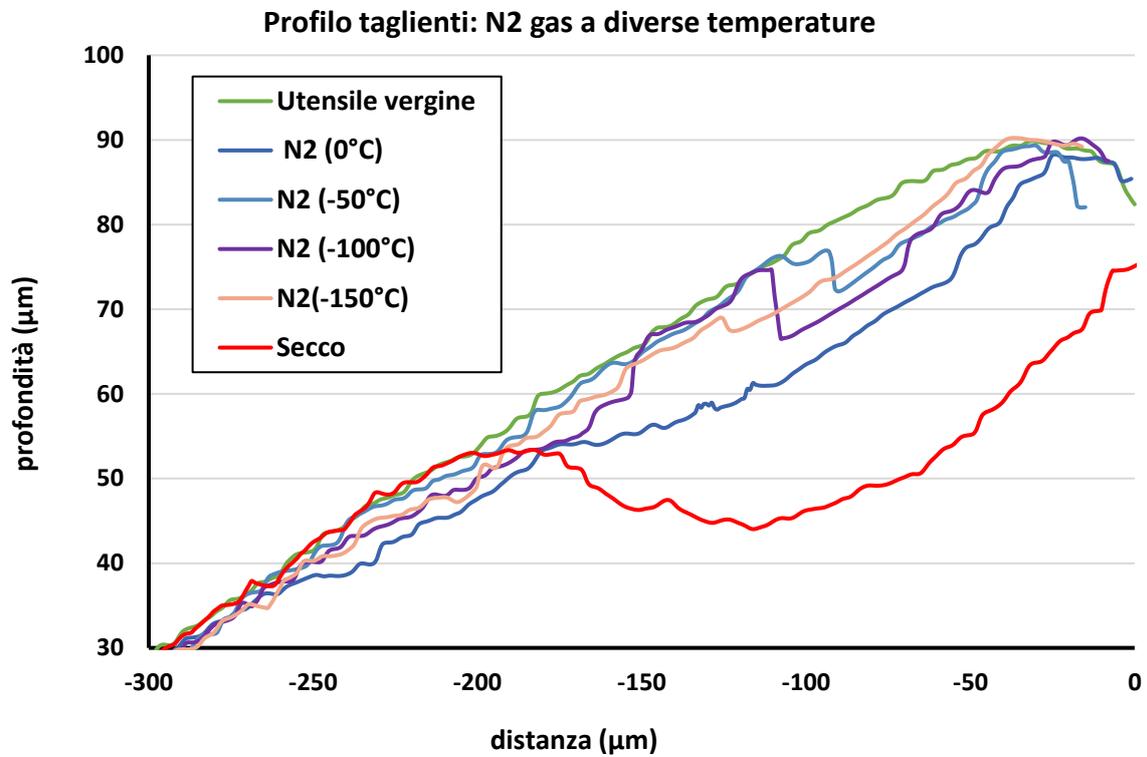
Per quanto riguarda i refrigeranti, come atteso, per tutti si ottengono ottimi risultati e il consumo del petto è notevolmente ridotto (Grafico 5.2).



*Grafico 5.2 Profilo taglienti con tecniche di refrigerazione: CO<sub>2</sub>, LN<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> gas*

Solo con la refrigerazione gassosa a temperature più alte di  $-75^{\circ}\text{C}$  si comincia a formare cratere, mentre con CO<sub>2</sub> e LN<sub>2</sub> si presenta un'usura uniforme della zona interessata al taglio. Fra questi ultimi due refrigeranti la CO<sub>2</sub> causa una perdita maggiore della geometria del tagliente. Le differenze sono rese meno apprezzabili dal materiale aderito (Figura 5.4 e Figura 5.5) che distorce quello che è il vero profilo del petto (in particolare nella zona più interna del cratere e sul naso dell'utensile), ne è un esempio la curva del N<sub>2</sub> gassoso a  $-75^{\circ}\text{C}$  in cui il profilo presenta alcuni picchi inverosimili che non vanno presi in considerazione nelle considerazioni sull'usura.

L'effetto della temperatura del refrigerante è stata indagata con la comparazione dell'azoto gassoso alle temperature intermedie fra 0°C e -150°C (Grafico 5.3).



*Grafico 5.3 Profili taglienti: N<sub>2</sub> gas alle diverse temperature*

La variazione del profilo alle diverse temperature dell'N<sub>2</sub> gassoso ha dato prestazioni più performanti al diminuire della temperatura e al contempo ha mostrato che scendendo oltre i -100°C il profilo non risente in maniera significativa della variazione di temperatura

Il lubrificante solido miscelato in acqua (MQC) è stato testato in varie percentuali dal 5%, 10% e 15% in peso ed ha prodotto risultati simili fra loro in termini di usura del petto dell'utensile, qui di seguito è riportato il profilo ottenuto con sospensioni di grafite al 15% in acqua ed è confrontato con gli altri lubrificanti.

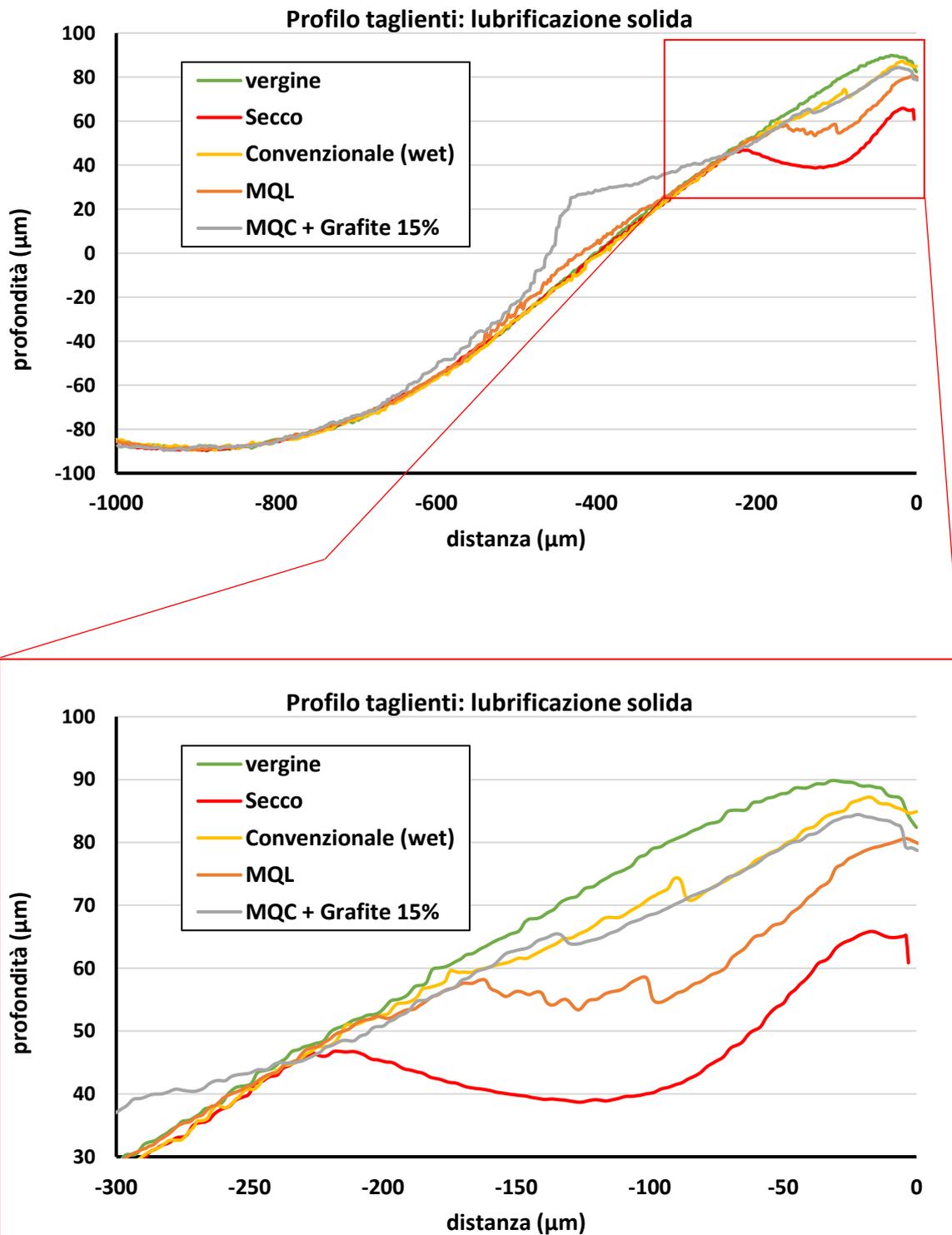
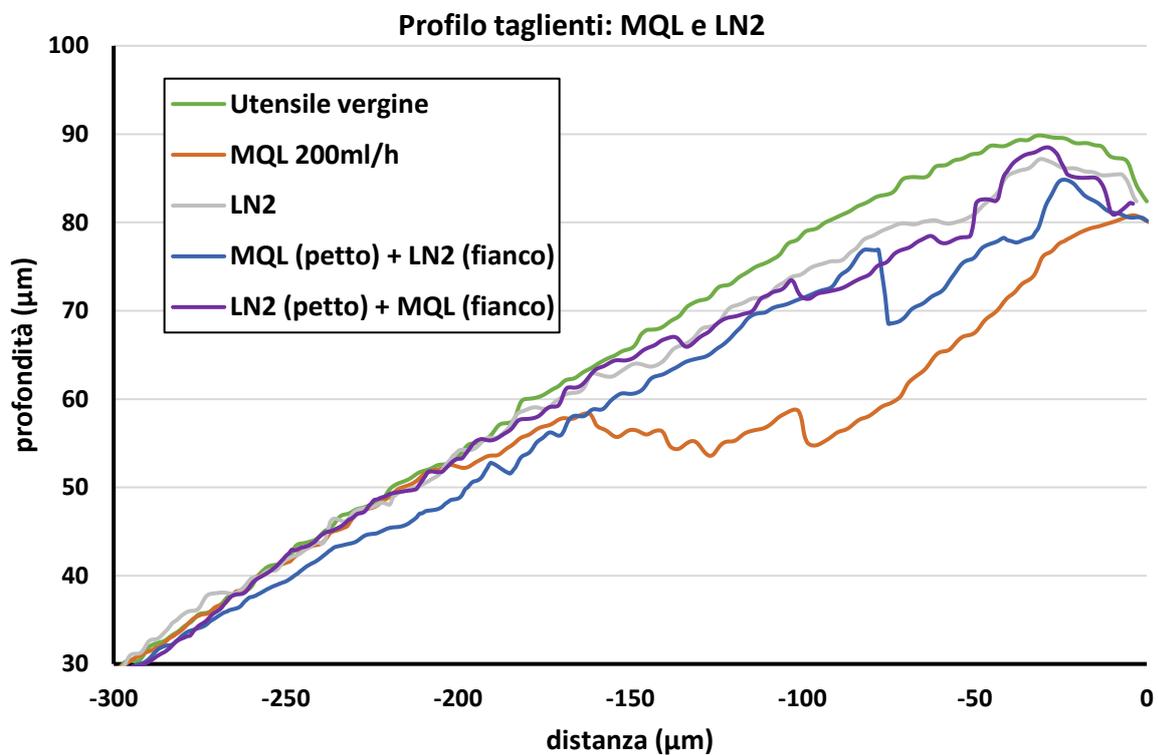


Grafico 5.4 Profili taglienti: lubrificazione solida con dettaglio della zona del cratere

Come già riscontrato in precedenza, la presenza di deposito di grafite altera il profilo del tratto non usurato del petto, l'allineamento e comunque reso possibile dal primo tratto di utensile come si vede nel Grafico 5.4. L'effetto dell'MQC addizionato a grafite ha prodotto risultati molto simili alla lubrificazione solida e migliorativi rispetto all'MQL grazie al contributo refrigerante fornito dall'acqua.

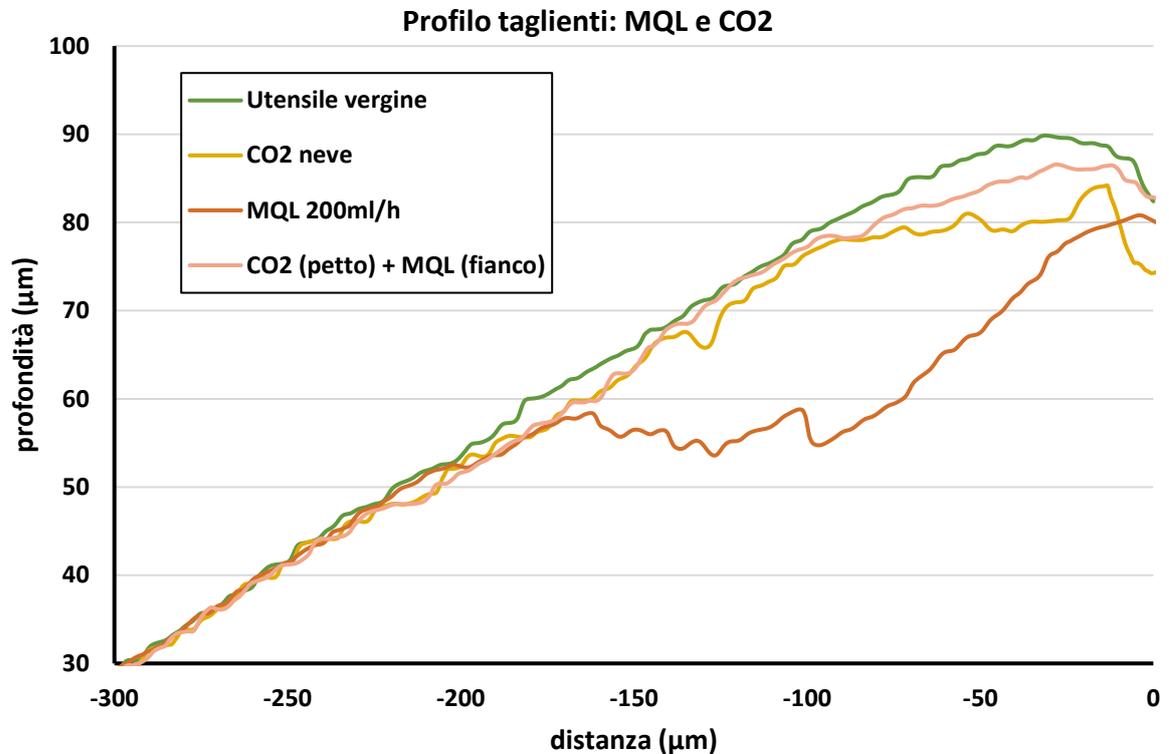
Infine sono stati analizzate le lubrificazioni combinate, per prima cosa è stata verificata l'ipotesi per cui i refrigeranti sono più efficaci sul petto rispetto ai lubrificanti, utilizzando LN2 e MQL, posizionando i rispettivi ugelli in direzione del petto e del fianco, e invertendoli nella prova successiva.



**Grafico 5.5** Profili tagliente: tecniche combinate, confronto inversione degli ugelli

La differenza dei diversi posizionamenti è mostrata nel Grafico 5.5 e conferma le ipotesi, anche se il divario non è molto, questo è probabilmente dovuto al grande potere refrigerante dell'azoto liquido che riesce ad abbassare la temperatura del petto dell'utensile per conduzione anche se è proiettato sul fianco.

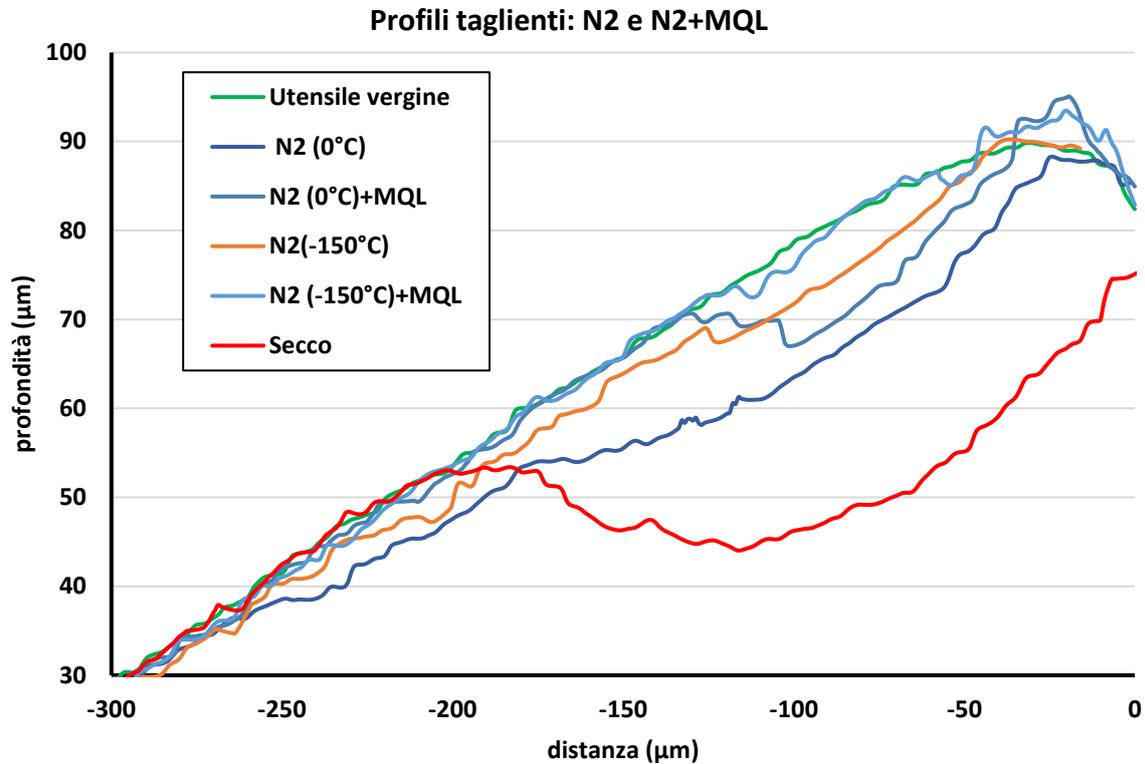
Verificata questa ipotesi la disposizione degli ugelli per le successive sperimentazioni di lubrificazione combinata sono state mantenute con refrigerante sul petto e lubrificante sul fianco.



*Grafico 5.6 Profili taglienti: tecnica combinata CO<sub>2</sub> + MQL*

La combinazione di CO<sub>2</sub> con MQL non porta a rilevanti differenze nel cratere che rimane praticamente assente ma ha ottimi effetti sulla geometria dell'utensile, infatti si può notare nel Grafico 5.6 che il naso dell'utensile rimane molto più simile a quello dell'utensile vergine.

L'azoto gassoso è stato testato in combinazione con l'MQL in temperature comprese fra gli 0 e i -150 °C, nel Grafico 5.7 sono riportati i confronti alle temperature più significative.

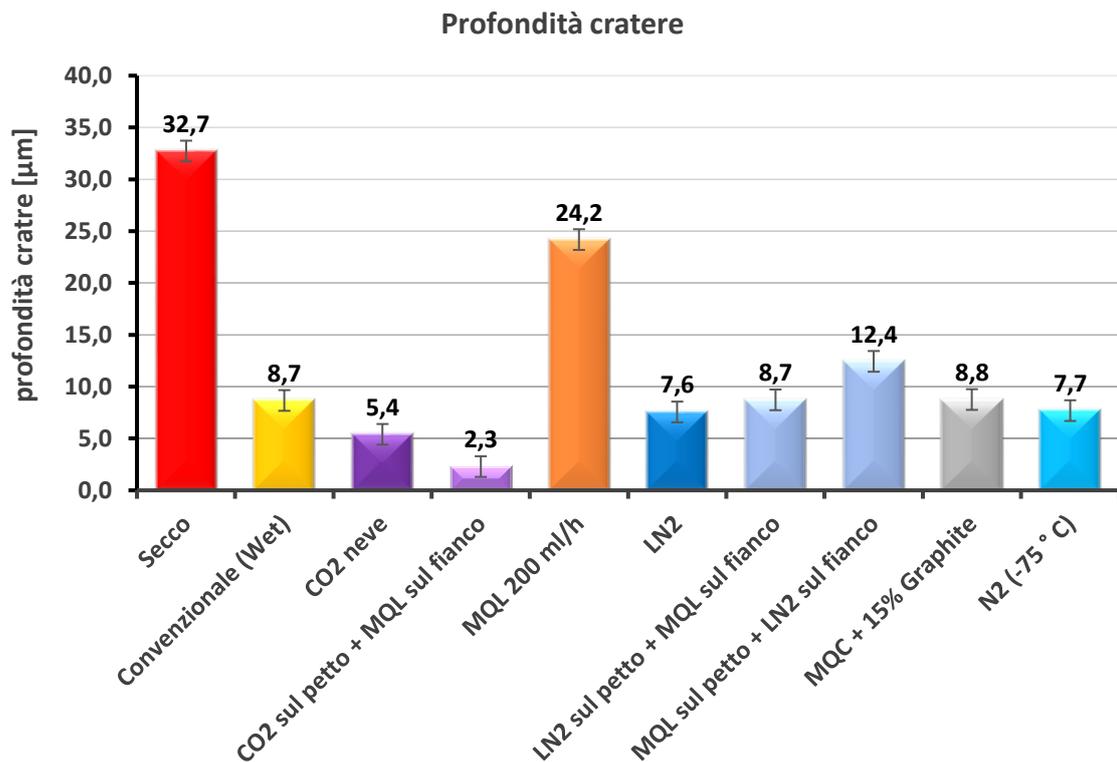


*Grafico 5.7 Profili taglienti: N<sub>2</sub> gas e combinazione con MQL*

Il Grafico 5.7 mostra che la combinazione del refrigerante con MQL porta ad un generale ad una minore usura del petto rispetto al solo refrigerante, la differenza in ogni caso risulta piccola, a conferma del fatto che l'usura del petto è maggiormente influenzata dalla refrigerazione piuttosto che la lubrificazione, il miglioramento è probabilmente in grossa parte connesso al fatto che il minor attrito garantito dal lubrificante porta ad una minor produzione di calore nella formazione del truciolo, contribuendo indirettamente alla refrigerazione.

### 5.1.1.3 Profondità cratere d'usura

Un dato quantitativo relativo all'usura del petto è stato ottenuto effettuando una misurazione della profondità del cratere e della sua distanza dal naso dell'utensile, dove non è presente il cratere è stata comunque misurata la massima differenza intercorsa fra l'utensile non usurato e quello dopo la lavorazione. Le misure ottenute sono riportate nella Tabella 5.3 confrontate nel Grafico 5.8.



*Grafico 5.8 Confronto profondità crateri*

*Tabella 5.3 Profondità crateri di usura e distanza dal bordo dell'utensile*

<b>Tipo di lubrificazione</b>	<b>Profondità crateri [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>distanza dal naso [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
Secco	32,7	-58,4
Convenzionale (Wet)	8,7	-69,8
CO <sub>2</sub> neve	5,4	-101,2
CO <sub>2</sub> sul petto + MQL sul fianco	2,3	-39,4
MQL 200 ml/h	24,2	-55,1
LN2	7,6	-44,3
LN2 sul petto + MQL sul fianco	8,7	-50,0
MQL sul petto + LN2 sul fianco	12,4	-53,0
MQC + 5% Grafite	12,2	-42,2
MQC + 10% Grafite	11,7	-39,6
MQC + 15% Grafite	8,8	-37,1
N <sub>2</sub> (0 ° C)	8,4	-92,5
N <sub>2</sub> (-25 ° C)	7,9	-71,3
N <sub>2</sub> (-50 ° C)	8,1	-69,4
N <sub>2</sub> (-75 ° C)	7,7	-57,3
N <sub>2</sub> (-100 ° C)	6,2	-67,0
N <sub>2</sub> (-125 ° C)	6,2	-54,3
N <sub>2</sub> (-150 ° C)	4,9	-45,9

La massima profondità di cratere è stata trovata in assenza di lubrificazione e misura 32  $\mu\text{m}$ , seguita dalla condizione meno refrigerante, cioè MQL, per il quale si è ottenuta una riduzione del cratere del 41,5% rispetto alla prima, mentre per il taglio convenzionale si è arrivati ad una riduzione del 74,6%.

Le migliori prestazioni si ottengono con la refrigerazione a CO<sub>2</sub>, sia da solo che in combinazione con l'MQL dove il cratere è stato completamente eliminato, e con azoto gassoso a bassa temperatura per i quali si ottengono valori prossimi ai 5  $\mu\text{m}$ . Ottime prestazioni sono state ottenute anche con LN2 puro dove la riduzione del cratere arriva al 76,9% rispetto al taglio a secco. Il confronto LN2 + MQL nelle due diverse disposizioni degli ugelli conferma che la refrigerazione del petto porta maggiori benefici. Tutte le condizioni di azoto gassoso refrigerato hanno dato ottimi risultati, migliori della condizione di lubrificazione convenzionale, si nota inoltre che l'andamento è migliorativo man mano che si abbassa la temperatura dagli 0 ai -100°C, a temperature ulteriormente più basse non si trovano più sostanziali differenze.

Il cratere si forma in genere nella zona di transizione fra usura adesiva e di scorrimento, dai dati raccolti (Tabella 5.3) si può notare che i refrigeranti oltre a diminuire la profondità del cratere lo spostano verso il bordo dell'utensile, tendenza che si palesa quando vengono

invertite le posizioni degli ugelli nella lubrificazione combinata MQL + LN2, per la quale la minima distanza si ottiene con LN2 sul petto. La misura riportata nella Tabella 5.3 è stata fatta in modo da trovare la distanza fra il naso dell'utensile e la massima profondità del cratere. In generale i valori variano da un massimo di 126  $\mu\text{m}$  riscontrato per il taglio a secco a valori di circa 60  $\mu\text{m}$  per i refrigeranti passando per 95  $\mu\text{m}$  circa per i lubrificanti.

### **5.1.2 Usura del fianco**

L'usura del fianco in semifinitura si concentra sulla parte frontale dell'utensile, cioè nella zona di curvatura del tagliente, tutti i campioni hanno dimostrato un labbro di usura omogeneo quindi si è ritenuto opportuno tenere conto del valore medio di spessore (VBc).

#### **5.1.2.1 Usura abrasiva VBc**

La misurazione della VBc è stata effettuata a partire dall'immagine frontale del fianco (Figura 5.6) acquisita al SEM con rilevatore BSED.

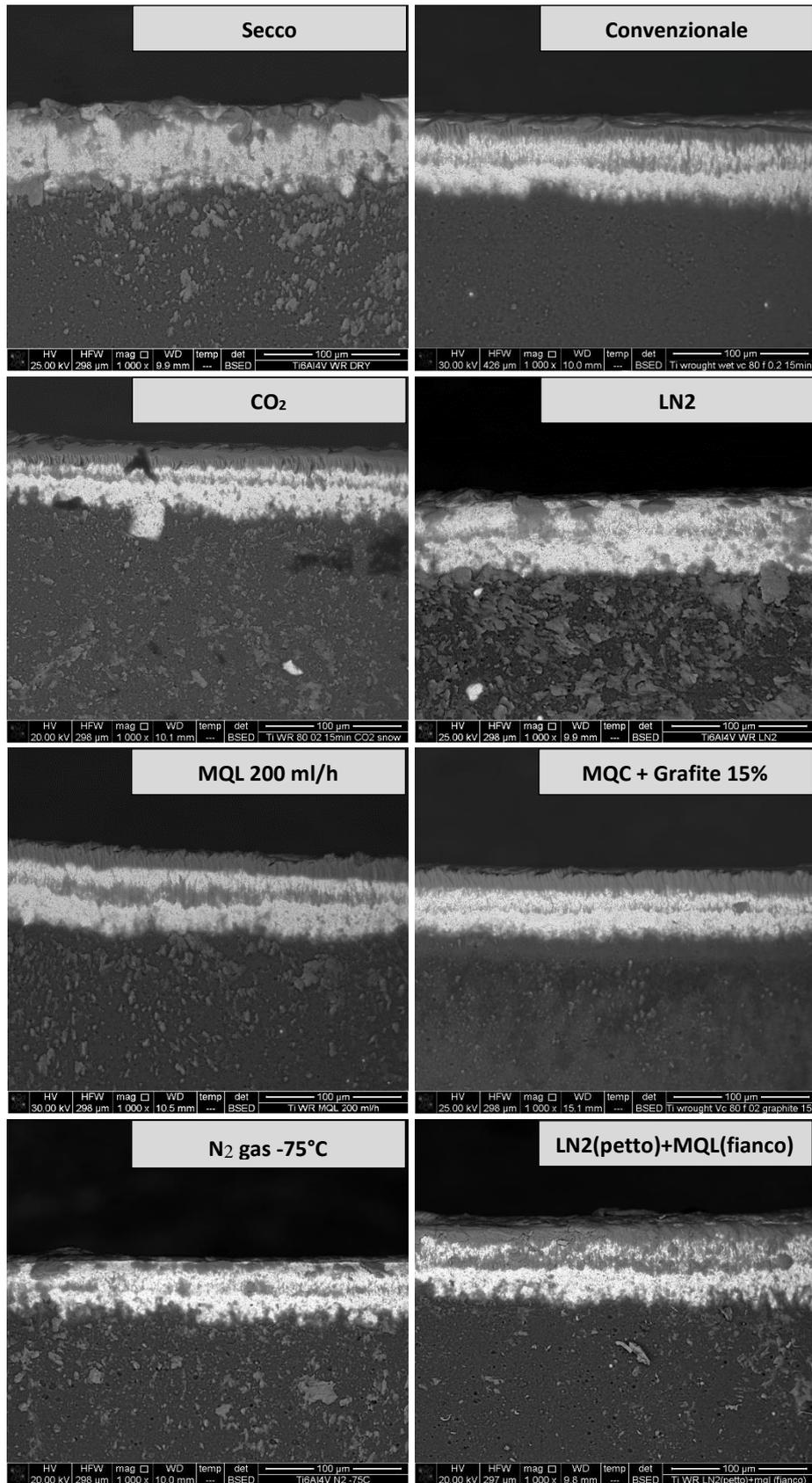
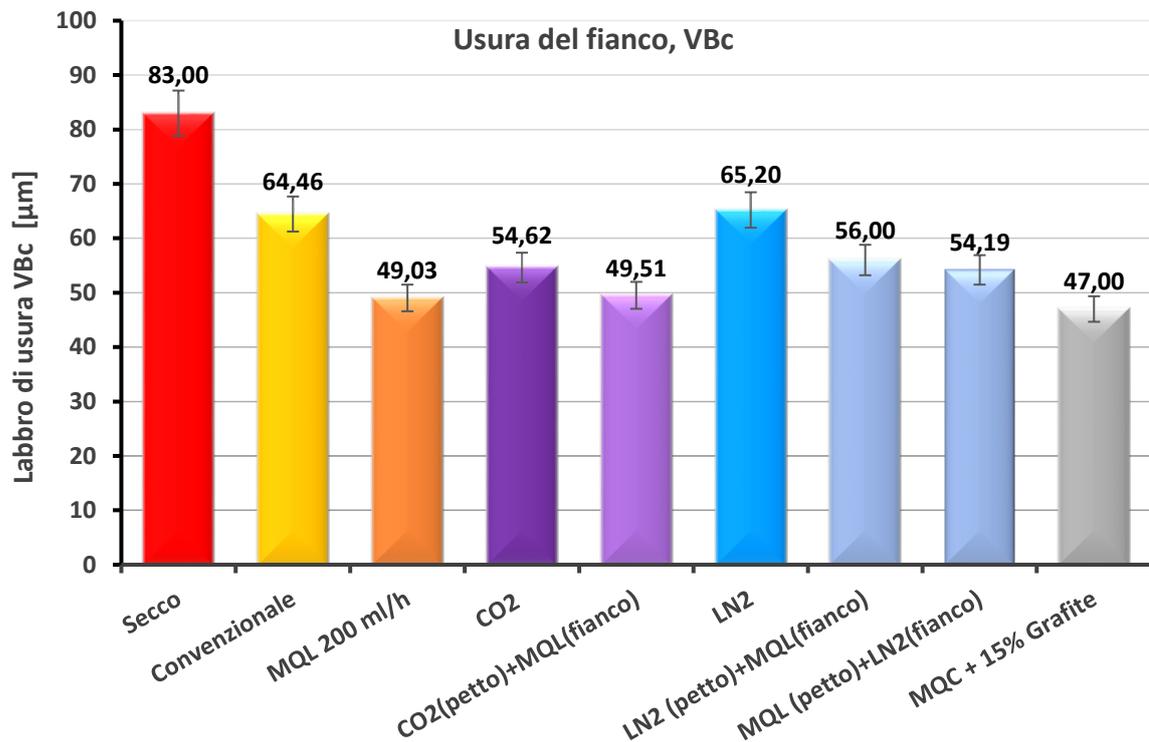


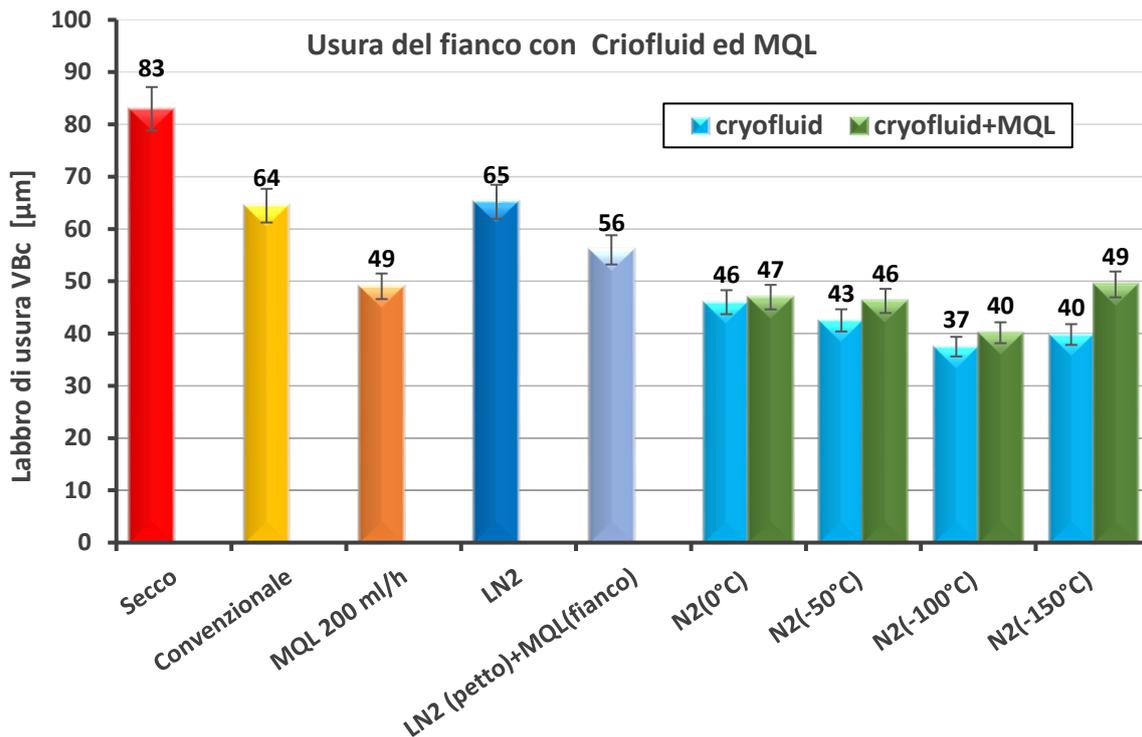
Figura 5.6 Fianco dell'utensile acquisita al SEM con rilevatore BSED per le diverse condizioni di lubrificazione

I valori di misura dell'usura del fianco (VBc) sono riportati nei grafici: Grafico 5.9 e Grafico 5.10.



*Grafico 5.9 Confronti usura del fianco: labbro di usura, VBc*

In questo primo confronto si nota che per quanto concerne al labbro di usura l'MQL offre i migliori risultati in assoluto, anche migliori della lubrificazione convenzionale, la spiegazione può essere dovuta alla maggior concentrazione di lubrificante che non è diluito in acqua ed evidenzia, inoltre, che la quantità di lubrificante effettivamente necessario è molto minore rispetto a quella usata nella lubrificazione convenzionale. La riduzione dell'usura del fianco con MQL risulta essere del 33% rispetto alla condizione di taglio a secco. Anche l'MQC con grafite ha prodotto risultati sorprendenti simili all'MQL, a dimostrazione che l'effetto refrigerante dell'acqua e lubrificante della grafite sono un'eccezionale combinazione per questo tipo di usura. Al contrario l'azoto liquido riduce i meccanismi adesivi ma si assesta su valori simili alla lubrificazione convenzionale producendo un labbro di usura di circa 65 µm, la CO<sub>2</sub> ottiene risultati migliori, probabilmente grazie all'alta pressione di erogazione che riduce i fenomeni di aderenza. Tutte le lubrificazioni ibride hanno portato un miglioramento grazie all'MQL senza però mai raggiungere i risultati della lubrificazione MQL pura.



**Grafico 5.10** Confronti usura del fianco: labbro di usura, VBc

I risultati più sorprendenti si sono però ottenuti tramite refrigerazione con azoto gassoso, che ha prodotto, da solo risultati ancora migliori dell'MQL mentre quando è stato combinato con quest'ultimo non ha prodotto i risultati attesi, che invece si sono riportati verso la condizione dell'MQL, probabilmente perché flusso di gas ad alta velocità e pressione ha reso vano il contributo del lubrificante. I migliori risultati sono stati ottenuti a  $-100^{\circ}\text{C}$  con un miglioramento del 43% rispetto alla lubrificazione con azoto liquido, al di sotto di questa temperatura i risultati peggiorano confermando che temperature troppo drastiche favoriscono questo tipo di usura invece che migliorarla, coerentemente con il fatto che il materiale indurito dalla temperatura oppone un'alta forza al passaggio dell'utensile.

In nessuna delle condizioni sono state riscontrate scheggiature o "notch wear" (abrasione a "V" che tipica della sgrossatura e si forma ai lati del labbro di usura).

Tutti i valori misurati sono riportati nella Tabella 5.4.

Tabella 5.4 Labbro di usura, VBc

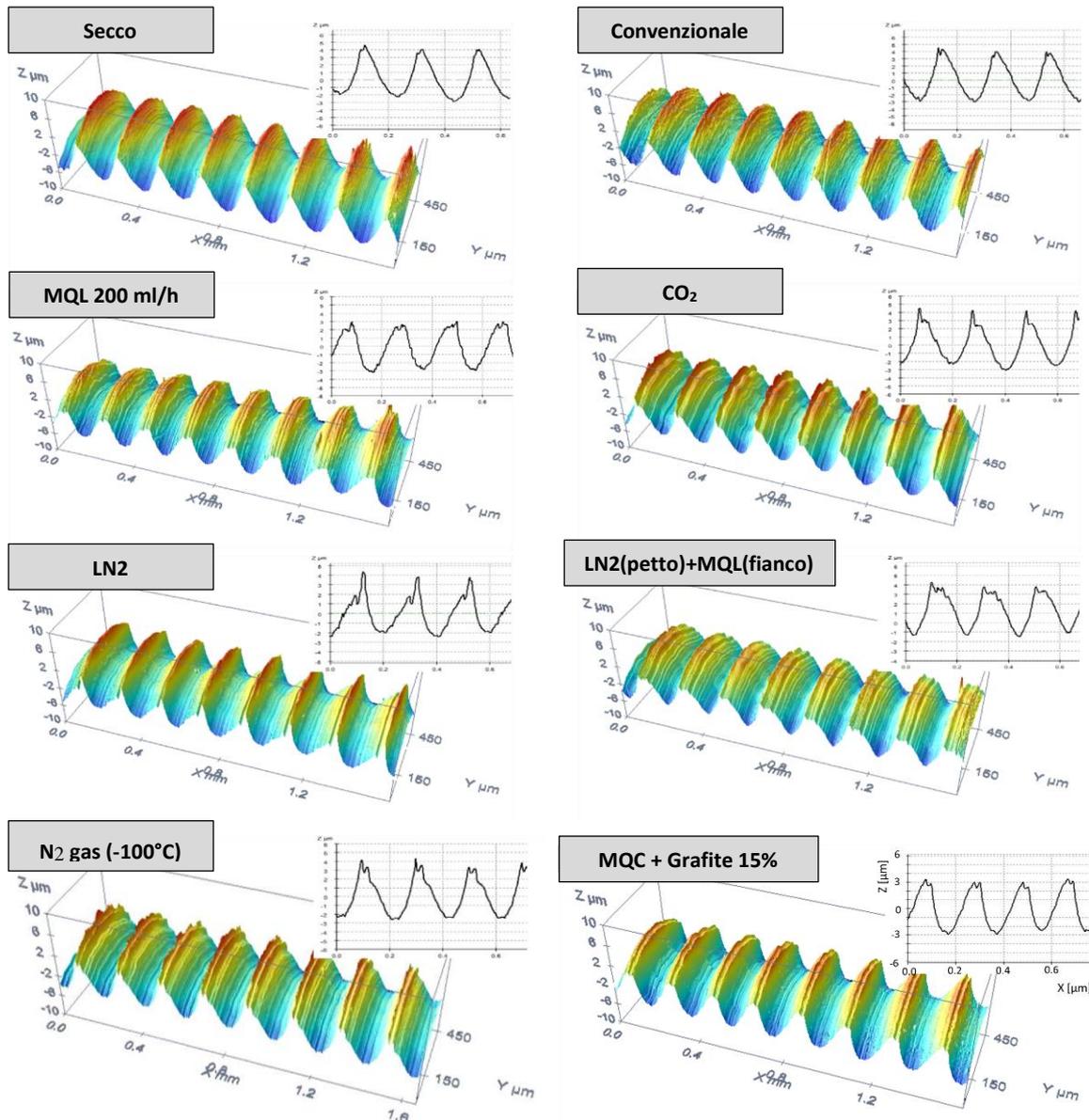
Tipo di lubrificazione	labbro d'usura [ $\mu\text{m}$ ]	deviazione standard [ $\mu\text{m}$ ]
Secco	83	3
Convenzionale	64	3
MQL 200 ml/h	49	2
CO <sub>2</sub>	55	3
CO <sub>2</sub> (petto)+MQL(fianco)	50	2
LN <sub>2</sub>	65	3
LN <sub>2</sub> (petto)+MQL(fianco)	56	3
MQL (petto)+LN <sub>2</sub> (fianco)	54	3
N <sub>2</sub> (0°C)	46	2
N <sub>2</sub> (-25°C)	46	2
N <sub>2</sub> (-50°C)	43	2
N <sub>2</sub> (-75°C)	41	2
N <sub>2</sub> (-100°C)	37	2
N <sub>2</sub> (-125°C)	39	2
N <sub>2</sub> (-150°C)	40	2
N <sub>2</sub> (0°C) + MQL	47	2
N <sub>2</sub> (-50°C) + MQL	46	2
N <sub>2</sub> (-100°C) + MQL	40	2
N <sub>2</sub> (-150°C) + MQL	49	2
MQC + 5% Grafite	48	2
MQC + 10% Grafite	46	2
MQC + 15% Grafite	47	2

## 5.2 Integrità superficiale

La lavorazione di semifinitura influisce in modo importante sulla qualità superficiale del pezzo lavorato, il processo di taglio altera la topografia superficiale, nonché le caratteristiche meccaniche e metallurgiche. Per questi motivi in questo studio è stata posta l'attenzione su tre caratteristiche rilevanti: rugosità e topografia generale, lo spessore dello strato deformato nella lavorazione e infine i difetti superficiali.

### 5.2.1 Rugosità e topografia

La topografia del pezzo lavorato è stata indagata per mezzo del profilometro ottico 3D, per ogni campione è stato acquisito il profilo in un'area di 1,25 mm per 0,25 mm, nell'immagini della Figura 5.7 sono riportate sia le immagini 3D che il profilo 2D di alcuni dei diversi tipi di lubrificazioni.



**Figura 5.7** 3D e 2D delle topografie superficiali dei campioni lavorati nelle diverse condizioni

Le superfici dei campioni presentano i tipici “*feed-mark*” generati dai successivi passaggi dell’utensile durante la lavorazione, la conformazione di questi picchi è influenzata dall’usura dell’utensile e dal refrigerante utilizzato. Come si può vedere nella Figura 5.7 le condizioni di refrigerazione spinta generano un profilo più frastagliato, si possono notare nel profilo generato dall’LN2, CO<sub>2</sub> e con l’azoto gassoso raffreddato oltre i -100°C, l’azoto liquido presenta in aggiunta i tipici picchi a doppia punta.

Il valore della rugosità Ra è stato ottenuto al profilometro ottico con cinque campionamenti in diversi punti della superficie del pezzo lavorato. I risultati sono riportati nella Tabella 5.5 e nei due grafici: Grafico 5.11 e Grafico 5.12.

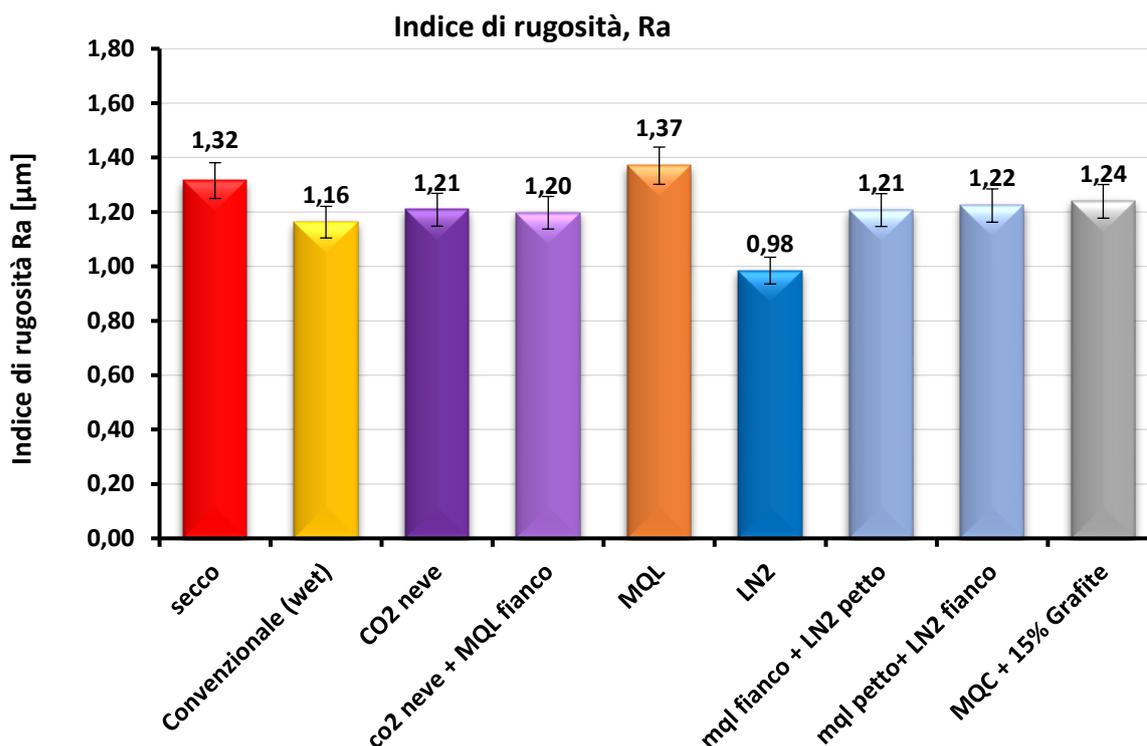


Grafico 5.11 Confronto indice di rugosità Ra

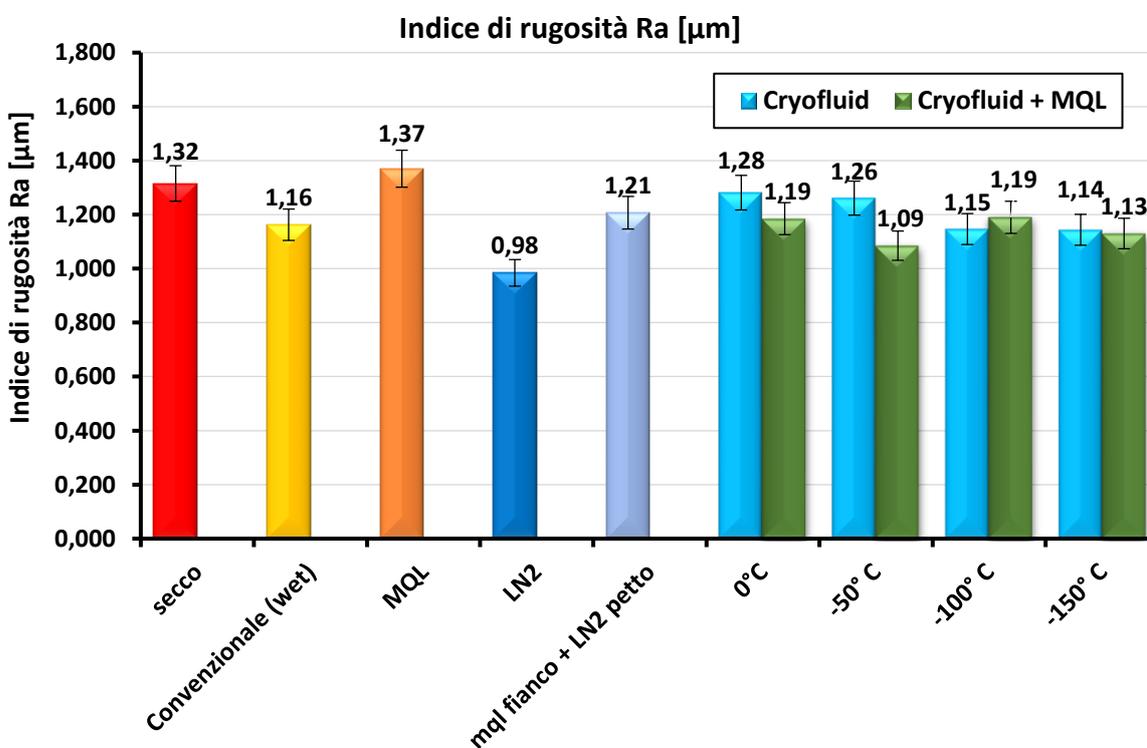


Grafico 5.12 Confronto indice di rugosità Ra

I migliori risultati dell'indice di rugosità Ra si sono ottenuti con la lavorazione effettuata con azoto liquido le peggiori invece sono state ottenute a secco, MQL e con azoto gasso a

qualsiasi temperatura che hanno portato ad un peggioramento del 27% rispetto all'LN2. Le condizioni di lubrificazione combinata hanno portato valori intermedi di rugosità compresi fra 1,085  $\mu\text{m}$  e 1,224  $\mu\text{m}$ , così come le condizioni di lubrificazione convenzionale e tramite CO<sub>2</sub> da sole.

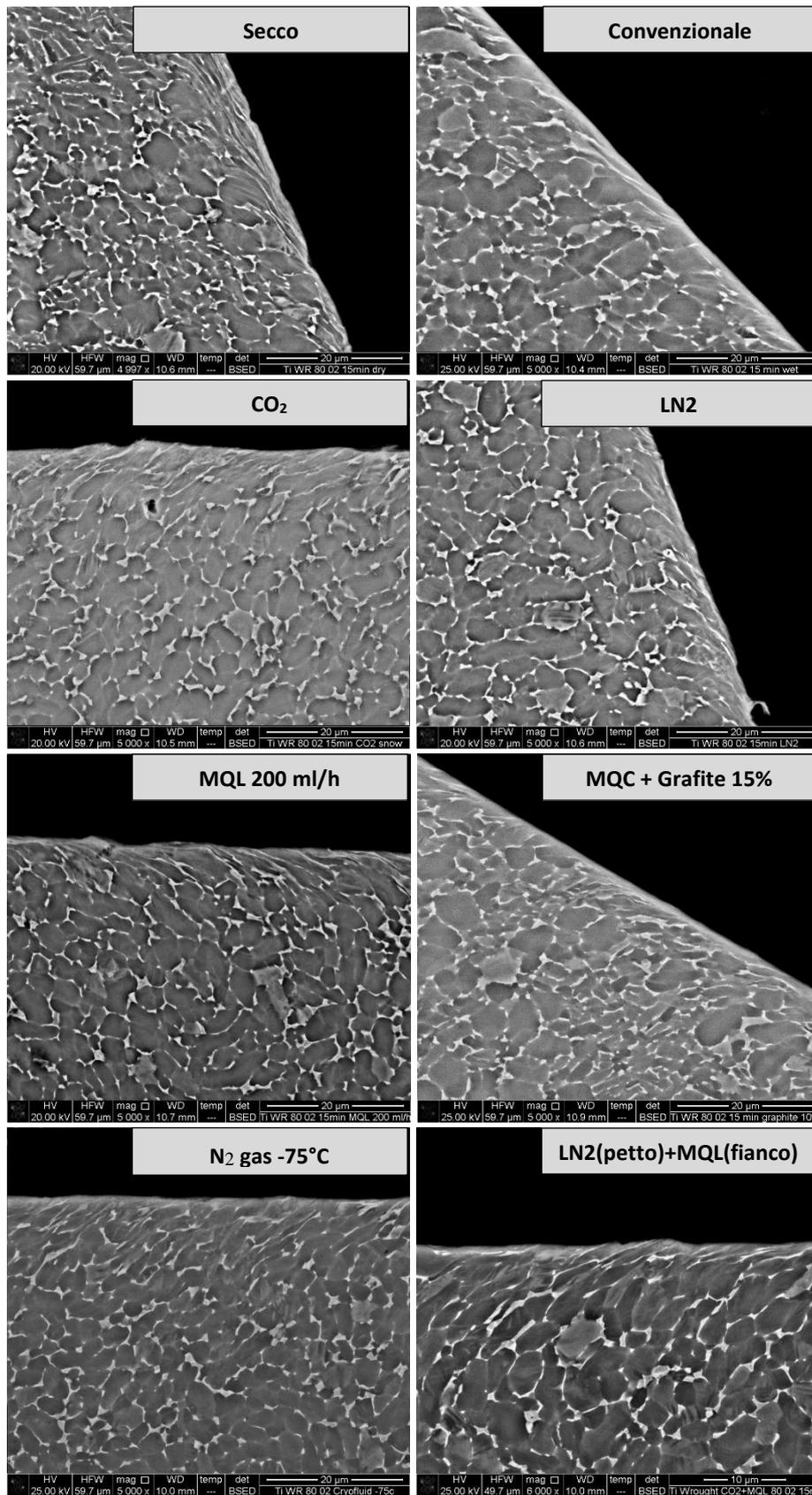
Tutti valori di misurazione sono riportate nella Tabella 5.5.

*Tabella 5.5 Indice di rugosità*

<b>Tipo di lubrificazione</b>	<b>media Ra: [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>deviazione standard [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
secco	1,315	0,026
Convenzionale (wet)	1,163	0,023
CO <sub>2</sub> neve	1,208	0,024
CO <sub>2</sub> neve + MQL fianco	1,197	0,024
MQL	1,370	0,027
LN2	0,984	0,020
MQL fianco + LN2 petto	1,207	0,024
MQL petto+ LN2 fianco	1,224	0,024
N <sub>2</sub> gas-0° C	1,281	0,026
N <sub>2</sub> gas-25° C	1,327	0,027
N <sub>2</sub> gas-50° C	1,261	0,025
N <sub>2</sub> gas-75° C	1,157	0,023
N <sub>2</sub> gas-100° C	1,146	0,023
N <sub>2</sub> gas-125° C	1,153	0,023
N <sub>2</sub> gas-150° C	1,144	0,023
N <sub>2</sub> gas-0° C + MQL	1,185	0,024
N <sub>2</sub> gas-50° C + MQL	1,085	0,022
N <sub>2</sub> gas-100° C + MQL	1,190	0,024
N <sub>2</sub> gas-150° C + MQL	1,130	0,023
MQC + 5% Grafite	1.328	0.026
MQC + 10% Grafite	1.217	0.031
MQC + 15% Grafite	1.239	0.015

### 5.2.2 Strato deformato

L'entità dello stato deformato sul materiale lavorato è stato misurato dalle acquisizioni al SEM con rilevatore BSED della sezione trasversale del campione lavorato, nella Figura 5.8 sono riportate alcune delle immagini delle diverse lavorazioni.



*Figura 5.8 Immagini SEM strato deformato del materiale lavorato con i diversi tipi di lubrificazione*

I le misure ottenute sono riportate nei grafici: Grafico 5.13 e Grafico 5.14.

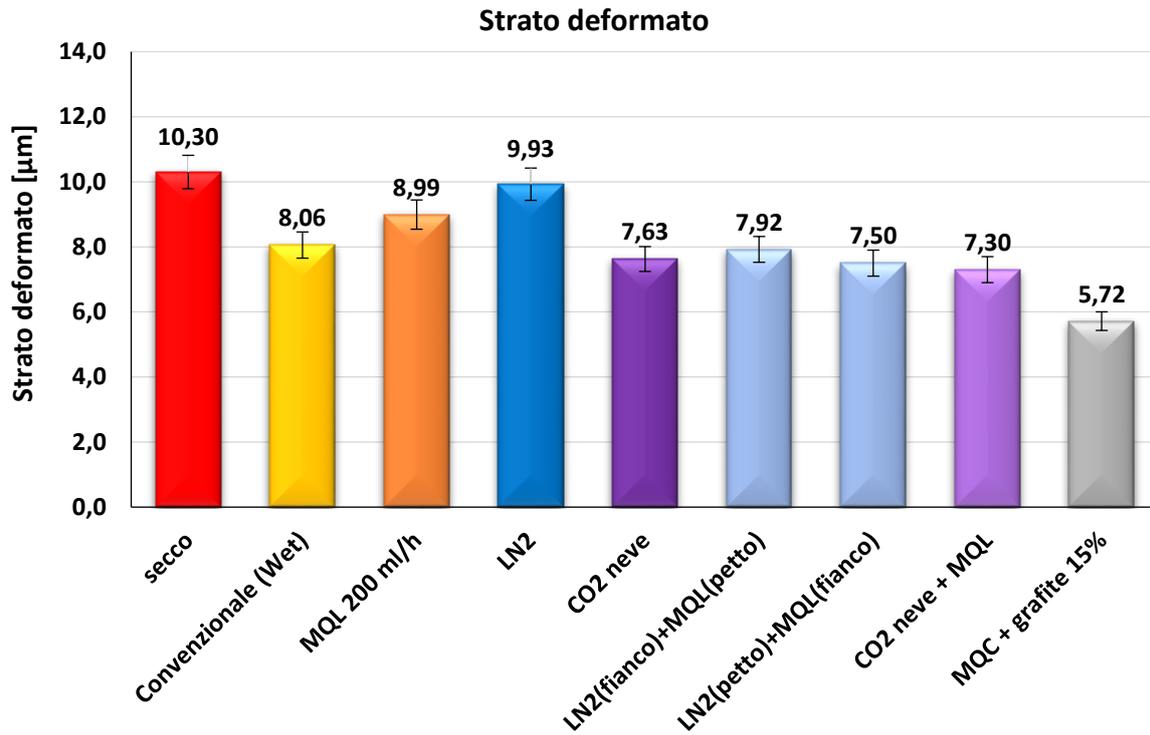


Grafico 5.13 Confronto strato deformato

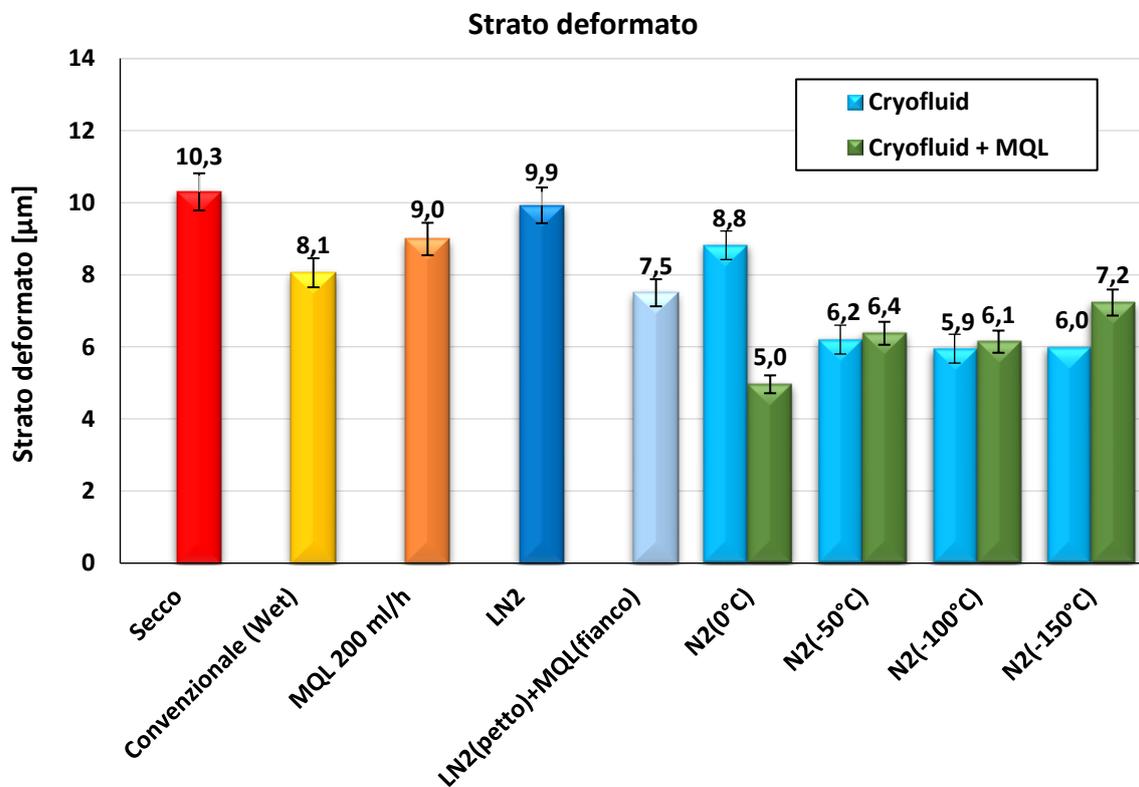


Grafico 5.14 Confronto strato deformato

Come previsto i peggiori risultati si sono ottenuti con il taglio a secco con uno strato deformato di 10,3  $\mu\text{m}$  di spessore: l'assenza di raffreddamento determina un aumento di temperatura, responsabile della plasticizzazione del materiale e dell'aumento di attrito, portando una maggior porzione del materiale a deformarsi. Applicando LN2 le drastiche temperature portano allo stesso risultato ma per cause opposte: il materiale a temperature criogeniche non rilascia completamente le tensioni meccaniche con la deformazione dei primi micron di materiale, queste vengono quindi trasmesse anche agli strati più interni deformandoli.

Le più basse dimensioni di strato incrudito si ottengono sorprendentemente con grafite e azoto gassoso raffreddato sotto i  $-25^{\circ}\text{C}$  arrivando a valori compresi fra i 5 e i 6  $\mu\text{m}$ , quindi una diminuzione del 50% circa dello spessore.

La combinazione delle tecniche con MQL ha portato miglioramenti in tutti i casi tranne i  $-150^{\circ}\text{C}$  e in particolare ha ridotto di molto la deformazione della condizione dell'azoto gassoso raffreddato a  $0^{\circ}\text{C}$  fino a renderlo paragonabile alla grafite. Tutti i dati sono raccolti nella Tabella 5.6.

*Tabella 5.6 Strato deformato*

<b>Tipo di lubrificazione</b>	<b>strato deformato [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>deviazione standard [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
secco	10,30	0,51
Convenzionale (Wet)	8,06	0,40
MQL 200 ml/h	8,99	0,45
LN2	9,93	0,50
CO <sub>2</sub> neve	7,63	0,38
LN2(fianco)+MQL(petto)	7,92	0,40
LN2(petto)+MQL(fianco)	7,50	0,40
CO <sub>2</sub> neve + MQL	7,30	0,40
grafite 15%	5,72	0,29
N <sub>2</sub> (0°C)	8,82	0,39
N <sub>2</sub> (-25°C)	7,50	0,15
N <sub>2</sub> (-50°C)	6,20	0,12
N <sub>2</sub> (-75°C)	6,71	0,19
N <sub>2</sub> (-100°C)	5,95	0,47
N <sub>2</sub> (-125°C)	5,62	0,29
N <sub>2</sub> (-150°C)	5,99	0,57
N <sub>2</sub> 0°C +MQL	4,96	0,36
N <sub>2</sub> -50°C +MQL	6,38	0,33
N <sub>2</sub> -100°C +MQL	6,14	0,29
N <sub>2</sub> -150°C +MQL	7,23	0,22

I risultati nel complesso portano a concludere che lo strato incrudito è abbassato solo da una corretta combinazione di lubrificazione e refrigerazione tale da abbassare le temperature ma senza spingersi criogeniche come per il caso dell'LN2.

### 5.2.3 Difetti superficiali

Un'analisi qualitativa al SEM con rivelatore ETD ha permesso di identificare i principali difetti tipici delle lavorazioni di tornitura, ne sono riportati alcuni esempi in Figura 5.9.

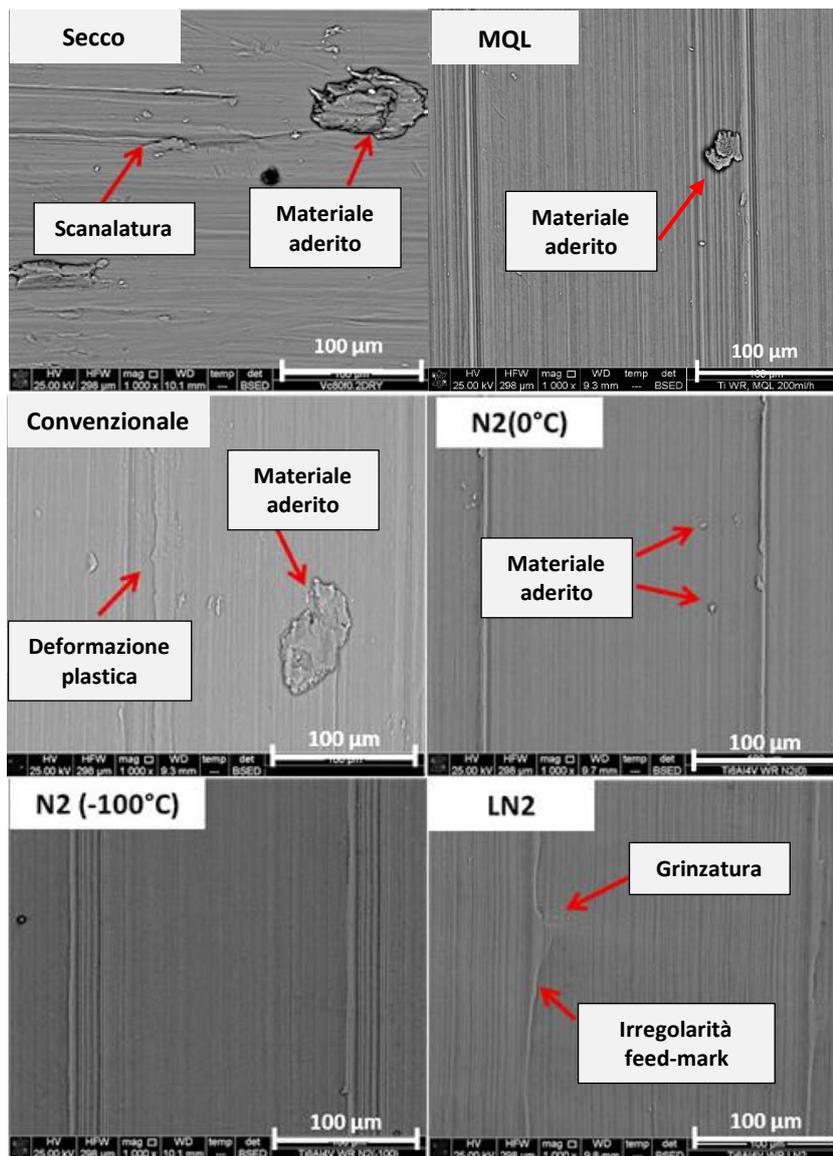


Figura 5.9 Principali tipi di difetti riscontrati sui campioni lavorati nelle diverse condizioni

Le diverse tipologie di difettosità si possono categorizzare a seconda del meccanismo che li ha generati:

- Alte temperature: provocano una bassa conducibilità termica e portano ad avere particelle risaldate sulla superficie, il materiale aderito può provenire da truciolo risaldata o da un reflusso laterale di taglio (*side-flow*).
- Basse temperature: provocano un calo della plasticità della lega che porta a difetti come irregolarità dei “*feed-mark*”, “*side flow*”, grinze (*wrinkles*) e strappi.

I difetti maggiormente riscontrati sono originati da materiale aderito, il campione lavorato a secco ha mostrato la maggior frequenza di questo tipo di difetti e di più grande dimensione, mentre le superfici particolarmente esenti si sono riscontrate con le lavorazioni con azoto liquido, azoto gassoso con temperature inferiori ai  $-100^{\circ}\text{C}$  e con grafite. La seconda categoria di difetti, cioè quelli generati a basse temperature, si sono riscontrati in maniera importante solo con la refrigerazione con LN2, in particolare le irregolarità dei *feed-mark* e le grinze. I campioni per i quali si sono trovati meno difetti in generale sono stati quelli lavorati tramite lubrificazione solida.

### 5.3 Capacità refrigerante

Fino a questo momento i refrigeranti sono stati caratterizzati solo in base alla temperatura a cui venivano proiettati sull’utensile, ma in realtà questo non è l’unico parametro da tenere in considerazione. Il peso di questi parametri si è riscontrato particolarmente con l’azoto gassoso che, nonostante sia stato testato fino a temperature prossime a quelle dell’azoto liquido (LN2), rispettivamente  $-150^{\circ}\text{C}$  contro i  $-196^{\circ}\text{C}$  del liquido, raramente ha prodotto risultati simili in termini di integrità superficiale e usura dell’utensile.

Per questo motivo si è ritenuto opportuno effettuare una modellazione analitica al fine di stimare la quantità di energia termica asportata nell’unità di tempo (potenza termica) generata alle diverse temperature per l’azoto gassoso per poi confrontarla con quella generata dall’azoto liquido.

La potenza termica è in primo luogo proporzionale, oltre che alla temperatura, alla pressione e all’area dell’apertura dell’ugello; quindi alla portata del fluido, alla sua densità e al suo calore specifico.

La potenza termica  $\dot{Q}$ , così definita, è stata calcolata secondo l’equazione (1), con unità di misura (KW) e corrisponde alla massima potenza termica che il fluido può assorbire durante la lavorazione.

$$\dot{Q} = \dot{m}Q \quad (1)$$

Dove  $\dot{m}$  rappresenta la portata di massa (kg/s), e  $Q$  il calore scambiato dal sistema con l'ambiente (kJ).

I parametri più importanti per i calcoli sono riportati nella Tabella 5.7.

*Tabella 5.7 Parametri dell'azoto per il calcolo della potenza termica*

Refrigerante	$\Delta p$ (bar)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg / m <sup>3</sup> )
LN2 (-196 °)	15	1.27x10 <sup>-6</sup>	808,5
N <sub>2</sub> (-100 ° C)	2,5	2.83x10 <sup>-5</sup>	3.528

Per il calcolo sono state poste le seguenti ipotesi:

- Sistema stazionario;
- Perdite di carico trascurabili;
- Tutto il fluido si porta a temperatura ambiente (20°C) e pressione atmosferica (1 bar).

I modelli utilizzati per questo calcolo sono:

- Densità del gas calcolata con Van Der Waals per sistemi subcritici;
- Velocità del fluido calcolata con Bernulli;
- Portata termica valutata come energia termica scambiata dalla massa del fluido che scorre in un secondo;
- Calori specifici calcolati con formule parametriche [39]

### 5.3.1 Azoto liquido

Per il calcolo della potenza termica assorbita dal LN2 per prima cosa è stata calcolata la velocità  $v$  (m/s) in uscita del fluido tramite l'equazione di Bernulli (2):

$$v = \sqrt{2 * 9,81 * \frac{\Delta P}{\rho * 9,81}} \quad (2)$$

$\Delta P$  è la differenza di pressione fra serbatoio e ambiente (Pa),  $\rho$  è la densità dell'azoto liquido (kg/m<sup>3</sup>) e  $v$  la velocità del liquido in uscita (m/s).

La portata volumetrica  $V$  (m<sup>3</sup>/s) è calcolata come (3):

$$\dot{V} = v * A \quad (3)$$

Dove  $A$  è l'area di apertura dell'ugello (m<sup>2</sup>).

La portata di massa  $\dot{m}$  (kg/s) è data da (4):

$$\dot{m} = \dot{V} * \rho \quad (4)$$

L'azoto liquido all'uscita dall'ugello si porta a pressione ambiente con un processo che possiamo approssimare a laminazione e quindi isoentalpico. Da questo punto il riscaldamento segue un'isobara, per cui dalla termodinamica il calore scambiato corrisponde alla variazione di entalpia che a sua volta è calcolata come somma di quella assorbita dalla trasformazione di fase liquido gas e quella per il passaggio dalla temperatura di ebollizione ( $\Delta H_{ev}$ ) a quella ambiente tutto moltiplicato per la portata di massa al fine di ottenere la potenza termica (5). Per semplicità si è utilizzato un  $c_p$  medio fra quello a temperatura ambiente e quella iniziale:

$$\dot{Q} = (c_p * \Delta T + \Delta H_{ev}) * \dot{m} \quad (5)$$

### 5.3.2 Azoto gassoso

Anche in questo caso il contributo entalpico della laminazione può essere trascurato e non esiste più il contributo del passaggio di fase, mentre l'entropia assorbita dal gas durante il riscaldamento si calcola nello stesso modo utilizzato per l'azoto liquido ma considerando le diverse temperature di partenza (quindi un diverso  $c_p$  medio,  $c_p'$ ). La stima della portata di massa, non essendo un liquido incomprimibile, non si può ricavare tramite la legge di Bernulli, perciò per il calcolo è stata utilizzata l'equazione semi-empirica (6) che descrive l'efflusso di un gas che fuoriesce da un tubo.

$$\dot{m} = A * C * p_0 * \sqrt{\frac{PM * \gamma}{T_0 * R} \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{(\gamma + 1)(\gamma - 1)}} \quad (6)$$

Dove  $A$  corrisponde all'area dell'ugello,  $C$  è una costante corrispondente a 0,8 per il deflusso critico [39],  $p_0$  e  $T_0$  sono pressione e temperatura iniziali all'interno della conduzione, cioè quelle impostate nel sistema Cryofluid,  $PM$  è il peso molecolare dell'azoto gassoso ( $N_2$ ),  $R$  la costante universale dei gas e infine  $\gamma$  è una costante correlata alla struttura molecolare del gas, nel caso di un gas bi-atomico come l' $N_2$  vale 1,4.

La potenza termica  $\dot{Q}$  in questo caso vale (7)

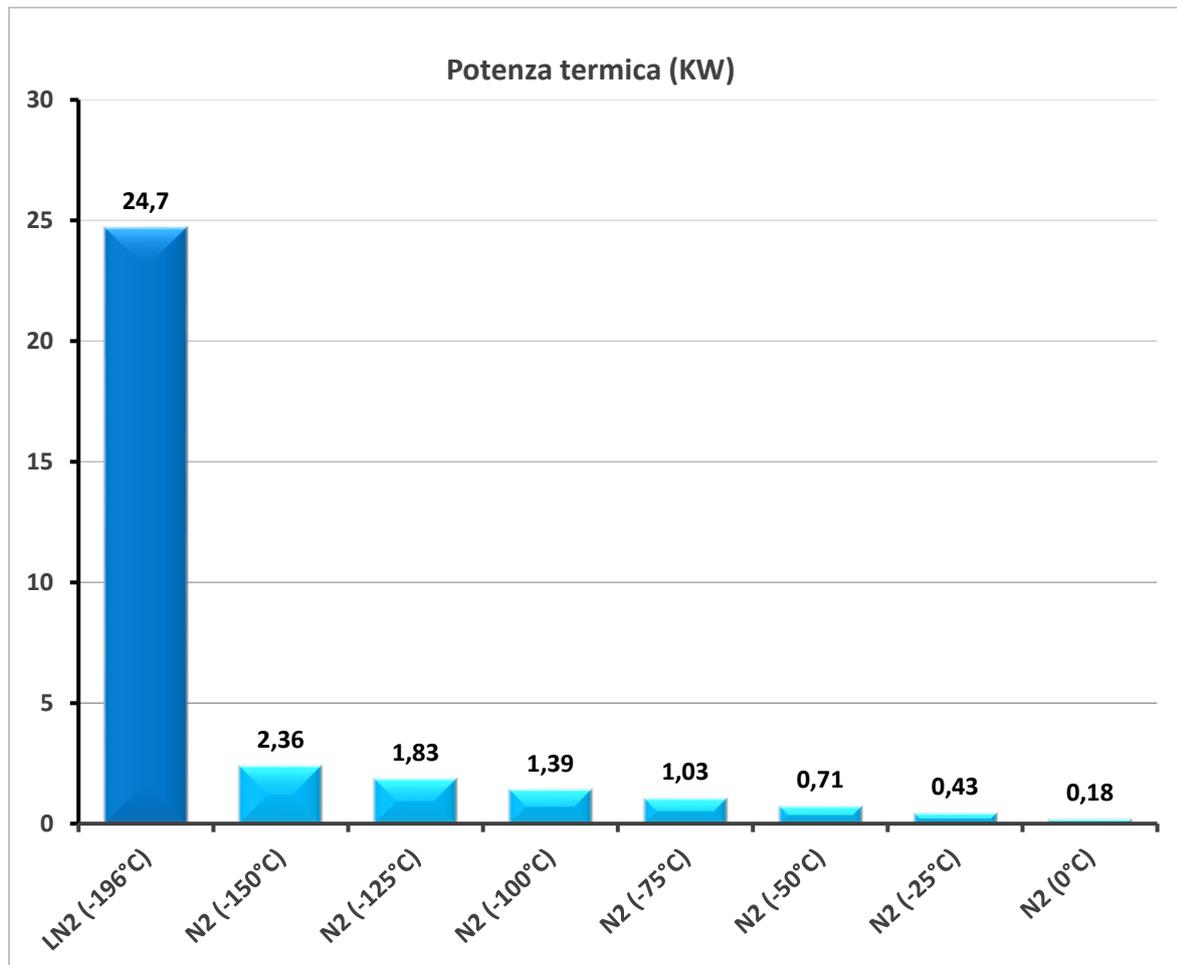
$$\dot{Q} = (c_p' * \Delta T) * \dot{m} \quad (7)$$

I dati di entropia ottenuti sono stati confermati ricavandoli utilizzando il sito del NIST [40].

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 5.8.

**Tabella 5.8** Potenze termiche refrigeranti  $N_2$  gassoso e LN2

Refrigerante	$\Delta H^*$ (kJ/kg)	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{Q}$ (kW)
LN2 (-196°C)	425,61	0,058	24,7
$N_2$ (-150°C)	176,53	0,0134	2,36
$N_2$ (-125°C)	150,24	0,0122	1,83
$N_2$ (-100°C)	124,06	0,0112	1,39
$N_2$ (-75°C)	97,95	0,0105	1,03
$N_2$ (-50°C)	71,88	0,0099	0,71
$N_2$ (-25°C)	45,83	0,0094	0,43
$N_2$ (0°C)	19,79	0,0089	0,18



**Grafico 5.15** Potenze termiche refrigeranti:  $N_2$  gas e LN2

Si possono confrontare questi dati con la potenza necessaria per il taglio la quale fornisce l'energia necessaria a creare le nuove superficie ma che per la quasi totalità viene dissipata sotto forma di calore.

La potenza  $P$  (KW) è calcolabile come il prodotto del “*material removal rate*” MRR (8) ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) moltiplicata per l'energia specifica di taglio per questo tipo utensile e materiale  $u_t$  ( $\text{KJ}/\text{m}^3$ ) [18], come mostrato nell'equazione (9).

$$MRR = f * d * v_c \quad (8)$$

Dove  $f$  è l'avanzamento (m),  $d$  la profondità di passata (m) e  $v_c$  la velocità di taglio (m/s), questi dati sono riportati nella Tabella 4.2.

$$P = MRR * u_t \quad (9)$$

Per le lavorazioni effettuate in questo studio la potenza necessaria risulta di 200W, quindi maggiore della potenza termica massima assorbibile dalla condizione di refrigerazione dell'azoto gassoso a 0°C. In realtà le potenze refrigeranti calcolate non sono totalmente spendibili nel raffreddamento dell'utensile, infatti solo una piccola parte del flusso va effettivamente ad incidere sulla zona di taglio e inoltre non vi rimane il tempo effettivamente necessario per portarsi a temperatura ambiente (come da ipotesi). Il dato reale quindi sarà minore di quello calcolato e basandosi sui risultati delle prove, nelle quali si è notato un viraggio degli effetti fra i -75 e i -100 °C, probabilmente è proprio con queste condizioni di refrigerazione che si riesce a raggiungere l'asportazione circa totale del calore generato.

La seconda considerazione che scaturisce dall'osservazione del Grafico 5.15 è che anche se la differenza di temperatura tra la condizione dell'azoto liquido (-196°C) e la refrigerazione ad azoto gassoso (-150°C) è di soli 46°C la differenza di potenza termica è di circa 22 KW, vale a dire 22 volte maggiore della differenza che intercorre fra la refrigerazione ad azoto gassoso a -150°C e a -100°C. Questa enorme differenza con l'LN2 giustifica le differenze di effetti riscontrate e deriva principalmente da due fattori: la portata di massa che è circa 5 volte superiore a quella gassosa, e dall'entalpia di evaporazione che da sola fornisce circa 8 KW di potenza termica.



# Conclusioni

Tale lavoro si prefigge l'obiettivo di migliorare la lavorabilità della lega Ti6Al4V mediante l'utilizzo di tecniche di lubrificazione e refrigerazione non convenzionali. Le strategie prese in esame sono state scelte in base alle loro caratteristiche di eco-sostenibilità che le rendono interessanti sia dal punto di vista economico (riduzione dei costi smaltimento dei fluidi da taglio esausti) che per la possibilità di ottenere superfici pulite esenti da inquinanti e contaminanti, caratteristica quest'ultima essenziale per i componenti destinati al settore biomedicale.

Le strategie di lubrificazione e refrigerazione sono state applicate in operazioni di semi-finitura in tornitura cilindrica, mantenendo costanti i parametri di taglio e i tempi di lavorazione. La valutazione della lavorabilità è stata effettuata analizzando sia l'usura dell'utensile che l'integrità superficiale del pezzo lavorato (strato deformato, rugosità e topografia superficiale, difetti superficiali).

Il lavoro svolto ha evidenziato come i principali meccanismi responsabili dell'usura dell'utensile siano l'adesione e la diffusione, responsabili della formazione del cratere sul petto e l'abrasione del fianco.

Le prove hanno dimostrato come l'utilizzo dei refrigeranti criogenici, (per l'azoto gassoso solamente per i casi aventi temperatura inferiore ai  $-50^{\circ}\text{C}$ ) portano ad una notevole riduzione delle dimensioni del cratere, con il miglior risultato riscontrato per il caso della  $\text{CO}_2$ , dove non si è rilevato alcun cratere. Tali osservazioni confermano la natura termicamente attivata di tale meccanismo, i refrigeranti utilizzati garantiscono una corretta asportazione del calore generato inibendo o riducendo la diffusione e l'adesione tra il materiale costituente l'utensile e pezzo in lavorazione. L'usura residua riscontrata è da attribuirsi all'azione abrasiva legata allo scorrimento del truciolo sul petto dell'utensile.

Per quanto riguarda l'usura del fianco l'abrasione è stata ridotta abbassando il coefficiente di attrito tramite l'uso di opportuni lubrificanti, i migliori risultati sono stati riscontrati utilizzando le strategie MQL e MQC implementata mediante l'aggiunta di grafite.

Anche in questo caso l'usura è sensibile alle temperature, valori troppo bassi, come nel caso dell'azoto liquido, determinano un indurimento del materiale con risultati di poco inferiori rispetto alla condizione di lavorazione a secco dove invece le alte temperature prodotte

innescano fenomeni di adesione che si ripercuotono negativamente innalzando il coefficiente d'attrito. Il giusto compromesso è stato riscontrato utilizzando l'azoto gassoso, alla temperatura di  $-100^{\circ}\text{C}$ , condizione per la quale si è riusciti ad inibire il calore prodotto senza però indurire eccessivamente il materiale. A conferma di ciò, la misura dello strato deformato al di sotto della superficie lavorata ha mostrato un andamento simile, i peggiori risultati sono stati riscontrati per la condizione a secco, l'MQL e per quella adoperante l'azoto liquido, i migliori risultati invece per i casi refrigerati sia con l'azoto gassoso che con l'MQC additivato.

L'indice di rugosità superficiale  $R_a$  non mostra grandi variazioni fra le diverse tecniche adottate attestandosi attorno al valore di  $1,2\ \mu\text{m}$ , solamente per il caso a secco e LN2 sono state riscontrate delle sostanziali differenze, nel primo caso un aumento di  $R_a$  legato alla perdita dimensionale del tagliente in seguito all'elevata usura del fianco mentre per la refrigerazione criogenica un leggero calo molto probabilmente causato dalla contrazione termica del materiale che riduce il valore reale di profondità di passata.

Tuttavia l'analisi topografica della superficie lavorata evidenzia per quest'ultima condizione, come le basse temperature portano alla formazione di difetti come i doppi feed-mark, irregolarità nei segni di tornitura, mancanza di planarità e altre difettosità conseguenti (wrinkles) alla mancata plasticizzazione del materiale.

Nell'ottica di implementare la lavorabilità si è proceduto alla creazione di tecniche ibride combinando le tecniche di pura refrigerazione (LN2) con quelle di pura lubrificazione (MQL), inizialmente ci si è adoperati per individuare la miglior disposizione degli ugelli nell'ottica di massimizzare i vantaggi delle rispettive tecniche, solo successivamente i diversi refrigeranti sono stati testati in sostituzione all'azoto liquido

Il miglior risultato si è riscontrato refrigerando il petto dell'utensile e lubrificando il fianco così come era prevedibile dai risultati precedenti. La combinazione del lubrificante con LN2 e  $\text{CO}_2$  ha prodotto sensibili miglioramenti riducendo il labbro d'usura e lo spessore dello strato incrudito mentre l'utilizzo dell'azoto gassoso non ha portato migliorie rispetto al caso iniziale basato sulla pura refrigerazione.

Per giustificare i risultati ottenuti si è ritenuto opportuno effettuare un calcolo analitico della capacità di asportazione del calore dell'azoto liquido e di quello gassoso, la definizione di un unico parametro legato alla pressione, temperatura e portata del fluido considerato, ha permesso di confrontare le diverse tecniche e i diversi effetti si sull'usura che sulla surface integrity.

I risultati mostrano come l'azoto ha un potere refrigerante di un ordine di grandezza più grande rispetto al caso gassoso, l'elevato sotto-raffreddamento giustifica la presenza dei difetti legati al calo di duttilità tipici del caso LN2 che invece non sono stati riscontrati utilizzando l'azoto gassoso anche alla temperatura di  $-150^{\circ}\text{C}$

In particolare il range di temperatura fra  $-75^{\circ}\text{C}$  e  $-100^{\circ}\text{C}$  ha mostrato i migliori risultati complessivi, sia in termini di usura dell'utensile che di integrità superficiale, la sua capacità refrigerante dimostra di essere sufficiente ad eliminare tutti i problemi derivanti dal calore generato in lavorazione ma non sufficiente a indurire il materiale e quindi causare problemi come l'innalzamento delle forze di taglio e tutto ciò che ne comporta, purtroppo la sua combinazione con l'MQL non ha prodotto ulteriori miglioramenti, rivelandosi inefficace o addirittura peggiorativo.

La lubrificazione solida tramite l'aggiunta di grafite alla tecnica MQC ha prodotto dei risultati molto promettenti, soprattutto considerato il suo costo minimo. I dati evidenziano che questa tecnica rappresenta un buon compromesso fra refrigerazione e lubrificazione, mantiene bassa l'usura dell'utensile e produce una superficie con pochi difetti e un piccolo strato deformato. In conclusione non si può dire che sia stata trovata una tecnica, singola o combinata, nettamente migliore delle altre, la scelta del lubro-refrigerante dipende dalle caratteristiche che deve avere il pezzo lavorato in funzione della sua futura applicazione, ad esempio con l'azoto liquido si ottiene una bassa rugosità e un alto strato incrudito, fattori che portano ad un'elevata resistenza a fatica rendendo questa tecnica un ottimo candidato per il settore biomedicale. Un compromesso più economico per la stessa applicazione è rappresentato dall'azoto gassoso refrigerato, che, oltre a rimanere un metodo che non necessita di pulizia del prodotto, incrementa la vita dell'utensile non alterando eccessivamente il materiale in lavorazione. In applicazioni dove invece si vuole massimizzare la produzione le tecniche  $\text{CO}_2$  + MQL e MQC + grafite rappresentano l'ottimo dati i loro ottimi risultati in termini di riduzione dell'usura dell'utensile.

Studi futuri andranno nella direzione della definizione di una combinazione della lubrificazione solida con MQL, sia con la proiezione da ugelli separati direttamente sull'utensile sia miscelando direttamente la grafite e il lubrificante dell'MQL nel serbatoio.

L'azoto gassoso ha portato ottimi risultati ma nulla fa pensare che, in prossimi studi, gli stessi non si possano ottenere refrigerando aria al posto dell'azoto utilizzando le stesse apparecchiature ma riducendo nettamente i costi.

In generale gli studi effettuati in questa tesi hanno fornito un'ampia panoramica delle potenzialità dei moderni metodi di lubro-refrigerazione, ma molto lavoro si può ancora fare

per ognuna delle tecniche viste, per esempio completando lo studio con la misurazione delle forze di taglio o delle tensioni residue indotte nel materiale lavorato. Anche da un punto di vista analitico si può completare la panoramica della capacità refrigerante delle tecniche partendo dall'indagine fatta in questo studio per azoto liquido e gassoso.

Infine, si può ampliare l'applicabilità dei risultati variando altri parametri come quelli di taglio, geometria e rivestimento dell'utensile e i tempi di lavorazione per esempio portando a fine vita l'utensile e confermando che i meccanismi determinanti siano quelli analizzati in questo studio.





# Riferimenti Bibliografici

- [1] R. Boyer, «An overview on the use of titanium in the aerospace industry, Materials Science and Engineering,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 103-114, 1996.
- [2] A. R. A. A. G. M. Geethe, «Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants- A review,» *Progress in Material Science* 54, pp. 397-425, 2009.
- [3] J. B. Y. Y. E.O. Ezegwu, «An overview of the machinability of aeroengine alloys,» *Journal of Materials Processing Technology* 134, pp. 233-253, 2003.
- [4] F. P. B. D. A. Hosseini Tazehkandi, «Experimental investigation on removing cutting fluid from turning of Inconel 725 with coated carbide tools,» *Journal of Cleaner Production* 80, p. 271–281, 2014.
- [5] M. D. N. S. V.S. Sharma, «Cooling techniques improved productivity in turning,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49, pp. 435-453, 2009.
- [6] P. F. N. Boubekri, «A technology enabler for green machining: minimum quantity lubrication (MQL),» *Journal of Manufacturing Technology and Management* 21(5), pp. 556-566, 2015.
- [7] M. R. Q. Y. S. Debnath, «nvironmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review,» *Journal of Cleaner Production* 83, pp. 33-47, 2014.
- [8] S. P. A. C. K.A. Venugopal, «Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling,» *Wear* 262, pp. 1071-1078, 2007.
- [9] J. K. S. S. S. P. M. D. M.J. Bermingham, «observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic machining Ti-6Al-4V,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 51, pp. 500-511, 2011.
- [10] M. K. E. A. O. Cakir, «Comparison of gases applications to wet and dry cutting in turning,» *Journal of Material Processing Technology* 153-154, pp. 35-41, 2004.
- [11] A. R. A. F.-A. J. B. L. L. d. L. O. Pereira, «Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304,» *Journal of Cleaner Production* 139, pp. 440-449, 2016.
- [12] P. C. A. T. O. J. V. A. R. L. N. L.-d.-L. O. Pereira, «The use of hybrid CO<sub>2</sub>+MQL in machining operations,» *Procedia Engineering* 132, pp. 492-499, 2015.
- [13] N. A. e. al., «International Journal of Heat and Mass Transfer Recent progress on the application of nanofluids in minimum quantity lubrication machining : A review,» *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 108, pp. 79-89, 2017.

- [14] ASTM F1472 Standard specification for wrought Titanium-6Aluminium-4Vanadium alloy for surgical implant applications (UNS R56400).
- [15] «Ti6Al4V ELI Titanium Alloy,» [Online]. Available: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-ELI-Titanium-Alloy.pdf>. [Consultato il giorno 12 6 2017].
- [16] «Sandvik Bioline Ti6Al4V ELI (Bar),» [Online]. Available: <http://www.hyperion.sandvik.com/en/materials-center/material-datasheets/bar-and-hollow-bar/bar/sandvik-bioline-ti6al4v-eli/>. [Consultato il giorno 6 2017].
- [17] Sandvik Bioline Ti6Al4V ELI materials datasheet.
- [18] S. S. H. M. S. Kalpakjian, MANUFACTURING ENGINEERING AND TECHNOLOGY (VI edizione), 2009.
- [19] V. Marinov, «Manufacturing Technology,» *Tool Wear and Tool Life*.
- [20] S. Bruschi, *Dispense del corso di Tecnologia meccanica, università di Padova*, 2017.
- [21] T. O. Durul Ulutan, «Machining induced surface integrity in titanium and nic kel alloys: A review,» *International Journ al of Machine Tools & Manufacture*, pp. 250-280, 2011.
- [22] M. R. Q. Y. S. Debnath, «Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review,» *Journal of Cleaner Production* 83, pp. 33-47, 2014.
- [23] M. A. A.A Khan, «Improving tool life using cryogenic cooling,» *Journal of Materials Processing Technology* 196, pp. 149-154, 2008.
- [24] M. P. K. B. Dilip Jerold, «The influence of cryogenics coolant in machining of Ti-6Al-4V,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 135, 2013.
- [25] D. B. C. Machai, «Machining of  $\beta$ -titanium alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow,» *Journal of Material Processing Technology* 211, pp. 1175-1183, 2011.
- [26] V. D. S. T. N. A. Shokrani, «Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti – 6Al – 4V titanium alloy,» *J. Manuf. Process.*, vol. 21, p. 172–179, 2016.
- [27] N. K. M. a. A. M. Dhar, «Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI–4340 steel,» *Journal of Materials Processing Technology* 172, pp. 299-304, 2006.
- [28] N. S. K. R. a. P. V. Rao, «Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, p. 89–198, 2006.

- [29] M. B. S. Á. R. M. a. W. F. S. R. R. Moura, «The effect of application of cutting fluid with solid lubricant in suspension during cutting of Ti-6Al-4V alloy,» *Wear*, vol. 332–333, p. 62–771, 2015.
- [30] Y. J. J. H. B. P. a. Q. F. F. J. F. Yang, «Influence of service temperature on tribological characteristics of self-lubricant coatings: A review,» *Front. Mater. Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 28-39, 2013.
- [31] S. B. A. G. P. B. A. Bordin, «Analysis of tool wear in cryogenic machining of additive manufactured Ti6Al4V alloy,» *Wear 2015.*, 328-329, 89-99.
- [32] D. Stokes, *Principles and Practice of Variable Pressure: Environmental Scanning Electron Microscopy (VP-ESEM)*.
- [33] *ISO 3685. 1993. Tool life testing with single-point turning tools.*
- [34] *ISO 3685. 1993. Tool life testing with single-point turning tools, 1993..*
- [35] *ASTM E407-70 Standard test method for microetching metals and alloys, 1989.*
- [36] «File:SEM SE vs BE Zr Al.png,» [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:SEM\\_SE\\_vs\\_BE\\_Zr\\_Al.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:SEM_SE_vs_BE_Zr_Al.png). [Consultato il giorno 13 6 2017].
- [37] K. S. L. Blunt, *Three Dimensional Surface Topography*, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [38] *ISO 4287:1197, Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: profile method - terms, definitions and surface texture parameters.*
- [39] R. P. D. Green, *Perry's chemical engineers' handbook*, Mc Grow-Hill Education, 2007.
- [40] «NIST Chemistry WebBook,» [Online]. Available: <https://www.nist.gov/chemistry/>.
- [41] D. B. Christian Machai, «Machining of beta-titanium-alloy Ti–10V–2Fe–3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow,» *Journal of Materials Processing Technology*, , 2011.

# Indice Figure

Figura 1.1 Ti6Al4V microstruttura materiale non lavorato: A) Immagine di microscopia ottica, e B) immagine BSED-SEM .....	6
Figura 2.1 Schematizzazione del taglio ortogonale.....	11
Figura 2.2 Usura dell'utensile [19] .....	13
Figura 2.3 Materiale aderito sull'utensile: 1) Truciolo aderito; 2) BUL sul petto, BUE sul tagliente .....	14
Figura 2.4 Usura dell'utensile: fianco (b); petto (c) [20].....	15
Figura 2.5 Esempio di profilo e indice di rugosità Ra.....	16
Figura 2.6 Deformazione dello strato superficiale del campione lavorato con MQL.....	17
Figura 2.7 Difetti superficiali [21] .....	17
Figura 2.8 Vita dell'utensile vs picco di temperatura dell'utensile [20] .....	18
Figura 4.1 tornio NL1500 CNC Mori-Seiki™ .....	25
Figura 4.2 SEM FEI QUANTA 450™ .....	27
Figura 4.3 Labbro di usura dell'utensile dopo lavorazione con LN2 e N <sub>2</sub> gassoso (-100°C) .....	28
Figura 4.4 Strato deformato dopo lavorazione di semifinitura al tornio con lubrificazione combinata MQL + LN2.....	29
Figura 4.5 Immagine acquisita al microscopio SEM: A) con rilevatore BSED; B) con rilevatore ETD [36].....	29
Figura 4.6 Profilometro ottico 3D Sensofar Plu-Neox™ .....	30
Figura 4.7 Ricostruzione 3D tramite profilometro ottico del petto dell'utensile usurato....	31
Figura 4.8 Serbatoio azoto liquido e collegamento all'impianto .....	33
Figura 4.9 Dettaglio della zona di taglio con ugelli in rame per la fuoriuscita dei refrigeranti (CO <sub>2</sub> o LN2).....	34
Figura 4.10 Misurazione della temperatura del refrigerante tramite termocoppia.....	34
Figura 4.11 Da sinistra a destra: Tornio Mori-Seiki, Sistema di controllo Cryofluid®, Set di bombole di azoto gassoso (N <sub>2</sub> ), Serbatoio criogenico di azoto liquido (LN <sub>2</sub> ).....	35
Figura 4.12 Operazione di tornitura con refrigerazione ad azoto gassoso tramite sistema Cryofluid .....	35
Figura 4.13 Sistema MQL, composto da serbatoio, manometro, sistema di regolazione del flusso di olio e della pressione .....	36

---

Figura 4.14 Dettaglio dell'utensile con ugello MQL .....	36
Figura 4.15 Utensile con ugello venturi in funzione per lubrificazione solida .....	37
Figura 4.16 Disposizione degli ugelli per ottenere: A) la lubrificazione tramite LN2 sul fianco e la lubrificazione MQL sul petto dell'utensile; B) lubrificazione MQL sul fianco e la refrigerazione LN2/CO <sub>2</sub> sul petto dell'utensile.....	38
Figura 5.1 Immagini SEM del petto degli utensili che hanno lavorato con le diverse tecniche di lubro-refrigerazione.....	42
Figura 5.2 Petto dell'utensile dopo lavorazione N <sub>2</sub> e punti (spot) di analisi EDS .....	43
Figura 5.3 Petto dell'utensile dopo lavorazione con MQC + grafite 15% e punto di analisi EDS (spot 3) .....	44
Figura 5.4 Tagliente di riporto dell'utensile dopo lavorazione con MQC .....	45
Figura 5.5 Materiale aderito all'utensile dopo la lavorazione con azoto gassoso 0°C.....	45
Figura 5.6 Fianco dell'utensile acquisita al SEM con rilevatore BSED per le diverse condizioni di lubrificazione .....	56
Figura 5.7 3D e 2D delle topografie superficiali deli campioni lavorati nelle diverse condizioni .....	60
Figura 5.8 Immagini SEM strato deformato del materiale lavorato con i diversi tipi di lubrificazione.....	63
Figura 5.9 Principali tipi di difetti riscontrati sui campioni lavorati nelle diverse condizioni .....	66

# Indice tabelle

Tabella 1.1 Ti6AL4V ELI composizione chimica .....	6
Tabella 1.2 Proprietà meccaniche del Ti6Al4V in stato di fornitura (Sandvik Bioline foglio di dati [17]).....	7
Tabella 1.3 Proprietà meccaniche del femore umano .....	8
Tabella 1.4 Proprietà meccaniche dei biomateriali, con relativo indice di biofunzionalità (BF) .....	8
Tabella 4.1 Principali dati di tornio ed utensile.....	26
Tabella 4.2 Parametri di taglio per le prove di tornitura .....	26
Tabella 5.1 Risultati della composizione % acquisiti con sonda EDS dei punti indicati in Figura 5.2 .....	43
Tabella 5.2 Risultati EDS del materiale depositato sull'utensile nella lavorazione MQC con grafite 15% (Figura 5.3).....	44
Tabella 5.3 Profondità crateri di usura e distanza dal bordo dell'utensile .....	54
Tabella 5.4 Labbro di usura, VBc .....	59
Tabella 5.5 Indice di rugosità .....	62
Tabella 5.6 Strato deformato .....	65
Tabella 5.7 Parametri dell'azoto per il calcolo della potenza termica .....	68
Tabella 5.8 Potenze termiche refrigeranti N <sub>2</sub> gassoso e LN <sub>2</sub> .....	70

# Indice Grafici

Grafico 1.1 Grafico prodotto tramite software CES che mette in relazione il carico massimo a fatica e il modulo di Young .....	9
Grafico 4.1 Profilo utensili: riallineamento vergine con lavorazione a secco .....	31
Grafico 4.2 Misura della profondità del cratere taglio a secco .....	32
Grafico 5.1 Profilo taglienti con tecniche di lubrificazione: MQL e convenzionale.....	46
Grafico 5.2 Profilo taglienti con tecniche di refrigerazione: CO <sub>2</sub> , LN <sub>2</sub> e N <sub>2</sub> gas.....	47
Grafico 5.3 Profili taglienti: N <sub>2</sub> gas alle diverse temperature.....	48
Grafico 5.4 Profili taglienti: lubrificazione solida con dettaglio della zona del cratere .....	49
Grafico 5.5 Profili tagliente: tecniche combinate, confronto inversione degli ugelli.....	50
Grafico 5.6 Profili taglienti: tecnica combinata CO <sub>2</sub> + MQL.....	51
Grafico 5.7 Profili taglienti: N <sub>2</sub> gas e combinazione con MQL .....	52
Grafico 5.8 Confronto profondità crateri .....	53
Grafico 5.10 Confronti usura del fianco: labbro di usura, VBc.....	57
Grafico 5.11 Confronti usura del fianco: labbro di usura, VBc.....	58
Grafico 5.12 Confronto indice di rugosità Ra .....	61
Grafico 5.13 Confronto indice di rugosità Ra .....	61
Grafico 5.14 Confronto strato deformato .....	64
Grafico 5.15 Confronto strato deformato .....	64
Grafico 5.16 Potenze termiche refrigeranti: N <sub>2</sub> gas e LN <sub>2</sub> .....	70