



**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA**

Università degli studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Aerospaziale

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE

# **Tornitura assistita da vibrazione ultrasonica per aumentare l'efficienza di deposizione di un rivestimento sol-gel biomedicale applicato alla lega di magnesio AZ31**

Relatore: Prof.ssa Stefania Bruschi

Correlatore: Ing. Rachele Bertolini

Laureando: Marco Scagnolari

Matricola:1183422



# Riassunto

Lo scopo di questa tesi è lo studio del comportamento a corrosione della lega di magnesio AZ31 in ambito biomedicale, in particolare usata per la realizzazione di protesi temporanee biodegradabili all'interno del corpo umano e totalmente biocompatibili. In particolare, si condurranno prove con lo scopo di arginare il problema della corrosione quando la lega è esposta ai fluidi corporei.

Il punto di partenza di tutta l'analisi è il tipo di tornitura che si applica al provino di AZ31. Verranno trattati tre tipi di tornitura: quella convenzionale CT e quella assistita da vibrazione ultrasonica UVT in condizione di lavorazione a secco e criogenica. Seguiranno analisi di rugosità superficiale, di texture e del rivestimento, analisi di spessore al SEM nelle direzioni di taglio e di avanzamento e test di nanodurezza all'interfaccia dei vari campioni per capire se e in che modo la texture influisca sull'adesione del rivestimento

Concludendo, lo scopo finale di tutta la trattazione sarà quello di capire come la texture creata con la tornitura ad ultrasuoni possa influire sui passaggi successivi di rivestimento e quindi cambiare la risposta del materiale a corrosione.



# Indice

## INTRODUZIONE

### **CAPITOLO 1-Generalità sul magnesio e le sue leghe**

- 1.1- Generalità sul magnesio
- 1.2- Impieghi industriali
- 1.3- Tecniche di estrazione e di utilizzo
- 1.4- Leghe di magnesio
- 1.5- Processi di lavorazione principali
- 1.6- Criticità del magnesio
- 1.7- L'ECO-magnesio e la sua produzione
- 1.8- Infiammabilità e resistenza all'ossidazione

### **CAPITOLO 2- Lavorazione per asportazione: Tornitura**

- 2.1- Meccanica della formazione del truciolo
- 2.2- Morfologia del truciolo
- 2.3- Meccanica del taglio ortogonale
- 2.4- Meccanica del taglio obliquo
- 2.5- Aspetti termici
- 2.6- Processo di tornitura convenzionale CT
  - 2.6.1- Parametri e forze di tornitura
  - 2.6.2- Material Removal Rate MRR
- 2.7- Processo di tornitura assistita da vibrazione ultrasonica UVT
  - 2.7.1- Processo di tornitura assistita da vibrazione ultrasonica 1-D

### **CAPITOLO 3- Preparazione dei campioni**

- 3.1- Lega AZ31 ricotta
- 3.2- Lavorazione meccanica
- 3.3- Vantaggi nell'uso di una tecnica di lavorazione ibrida
- 3.4- Progettazione del sistema di raffreddamento
- 3.5- Specifiche dei campioni realizzati

### **CAPITOLO 4- Analisi della superficie lavorata**

- 4.1- Parametri di superficie analizzati
- 4.2- Analisi della texture e dei difetti superficiali
  - 4.2.1- Riassunto delle caratteristiche dei difetti indotti dalla lavorazione

## **CAPITOLO 5- Analisi dei campioni rivestiti**

5.1- Preparazione dei campioni

5.2- Bagnabilità

5.2.1- Prove di bagnabilità

5.3- Rivestimento Sol-gel

5.3.1- Meccanismo Sol-gel

5.3.2- Applicazioni

5.4- Preparazione del Sol-gel e rivestimento dei campioni

5.5- Analisi SEM della morfologia del rivestimento

5.6- Analisi SEM degli spessori del coating

5.6.1- Preparazione dei campioni per l'analisi degli spessori

5.6.2- Risultati analisi degli spessori

5.6.3- Confronto tra spessori e parametri di texture

5.7- Valutazione della durezza all'interfaccia

## **CAPITOLO 6- Conclusioni**

6.1- Risultati

## **CAPITOLO 7- Approfondimenti**

7.1- Microscopio elettronico a scansione

7.1.1- Componenti fondamentali del SEM

7.2- Caratteristiche e realizzazione del sistema UVT

## **APPENDICE A: Tavola di disegno**

## **BIBLIOGRAFIA**

# Elenco delle tabelle

Tabella 1.1: Schema riassuntivo caratteristiche Mg.

Tabella 1.2: Tabella riassuntiva delle principali leghe di magnesio utilizzate.

Tabella 1.3: Quantità residua di CaO nella lega in funzione del tipo di mescolamento adottato.

Tabella 2.1: Variabili indipendenti e dipendenti nei processi di lavorazione per asportazione.

Tabella 2.2: Valori delle costanti a e b in funzione del tipo di utensile.

Tabella 3.1: Relazioni parametri di taglio, tipo di lavorazione e sigla del campione.

Tabella 4.1: Confronto dei valori medi tra campioni CT e UVT con uguali parametri di taglio di tutti i parametri analizzati.

Tabella 4.2: Media e deviazione standard dei parametri ISO e EUR15178N considerati. Quelli evidenziati in rosso sono stati scartati.

Tabella 4.3: Media e deviazione standard dei parametri ISO e EUR15178N considerati per CUVT.

Tabella 4.4: Tabella riassuntiva difetti/anomalie di texture per i campioni CT e UVT.

Tabella 5.1: Angoli di contatto e deviazione standard per i campioni UVT.

Tabella 5.2: Riassunto entità e zone interessate da accumulo.

Tabella 5.3: Media spessori e deviazione standard ottenute.

Tabella 5.4: Media e deviazione standard degli spessori ottenuti per campioni CUVT.

Tabella 5.5: Media e deviazione standard delle nanodurezze all'interfaccia nelle direzioni considerate valide per gli spessori.





# Elenco delle figure

Figura 1.1: Produzione leghe di magnesio anni: 2002-2014.

Figura 1.2: Variazione caratteristiche della lega AZ31 in relazione alla % di alluminio aggiunta.

Figura 1.3: Variazione caratteristiche della lega AZ31 in relazione alla % di terre rare aggiunte.

Figura 1.4: Strato di ossido di magnesio MgO.

Figura 1.5: Schema mescolamento elettromagnetico di ossido di calcio e magnesio.

Figura 2.1: Esempi di lavorazione per asportazione.

Figura 2.2: Rappresentazione schematica del processo di taglio ortogonale con piano di scorrimento (modello di Merchant).

Figura 2.3: Rappresentazione schematica del processo di taglio ortogonale senza piano di scorrimento ben definito.

Figura 2.4: Tipologie di truciolo: (a) truciolo continuo con zona di scorrimento piana e stretta, (b) zona di scorrimento secondaria all'interfaccia utensile-truciolo, (c) truciolo continuo con tagliente di riporto.

Figura 2.5: Tipologie di truciolo: (d) truciolo segmentato, (e) truciolo frammentato discontinuo.

Figura 2.6: (a) Forze agenti sull'utensile nel taglio ortogonale. Si noti che le forze risultanti  $R$  devono essere parallele per ottenere l'equilibrio delle forze. (b) Cerchio delle forze per la determinazione delle varie forze che agiscono nella zona di taglio.

Figura 2.7: Rappresentazione schematica della distribuzione delle tensioni normale e tangenziale all'interfaccia utensile-truciolo.

Figura 2.8: (a) Rappresentazione schematica del taglio obliquo. (b) Vista dall'alto. (c) Forma del truciolo in funzione dell'angolo di inclinazione.

Figura 2.9: Distribuzione tipica della temperatura nella zona di taglio. Si noti la presenza di forti gradienti termici nell'utensile e nel truciolo mentre il pezzo ha una temperatura relativamente bassa.

Figura 2.10: (a) Rappresentazione schematica di un'operazione di tornitura. (b) Rappresentazione delle forze agenti sull'utensile in tornitura.

Figura 2.11: Illustrazione dei piani di lavoro delle varie tipologie di lavorazione UVT.

Figura 3.1: Setup sperimentale per tornitura ad ultrasuoni.

Figura 3.2: Utensile per tornitura ad ultrasuoni non raffreddato.

Figura 3.3: Inserto per UVT con sistema di raffreddamento montato.

Figura 3.4: Disposizione degli ugelli vista laterale (a) e superiore (b).

Figura 4.1: Grafico confronto parametro  $S_a$  per tutti i campioni.

Figura 4.2: Grafico confronto parametro  $S_q$  per tutti i campioni.

Figura 4.3: Grafico confronto parametro  $S_{pk}$  per tutti i campioni.

Figura 4.4: Grafico confronto parametro  $S_{vk}$  per tutti i campioni.

Figura 4.5: Grafico confronto parametro  $S_{dr}$  per tutti i campioni.

Figura 4.6: Grafico confronto parametro  $S_{qd}$  per tutti i campioni.

Figura 4.7: Grafico confronto parametro  $S_{sc}$  per tutti i campioni.

Figura 4.8: Grafico confronto parametro  $S_{ds}$  per tutti i campioni.

Figura 4.9: Texture e profili di  $S_{2C}$  ( $s_x$ ) e  $S_2$  ( $d_x$ ).

Figura 4.10: Grafico andamenti parametri di texture per i campioni UVT.

Figura 4.11: Grafico andamenti parametri di texture per i campioni CUVT.

Figura 4.12: Intera proiezione 2D di area campionata.

Figura 4.13: Immagine ingrandita della superficie precedente.

Figura 4.14: Profilo di rugosità estratto dalla figura 4.11.

Figura 4.15: Zoom zona di picco.

Figura 4.16: Profilo rugosità estratto dalla figura precedente.

Figura 4.17: Zoom difetto: strappo zona di picco.

Figura 4.18: Strappo zona di picco.

Figura 4.19: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

Figura 4.20: Analisi strappo.

Figura 4.21: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

Figura 4.22: Particolare punto non misurato.

Figura 4.23: Profilo in corrispondenza del punto non misurato ( $520 \mu\text{m}$ ).

Figura 4.24: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

Figura 4.25: Immagine e grafico profilo rugosità zona di valle.

Figura 4.26: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

Figura 4.27: Immagine e grafico profilo rugosità texture.

Figura 4.28: Immagine e grafico profilo rugosità texture.

Figura 4.29: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

Figura 4.30: Immagine e grafico profilo rugosità texture.

Figura 4.31: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

Figura 4.32: Immagine e grafico profilo rugosità texture.

Figura 4.33: Immagine e grafico profilo rugosità texture.

Figura 4.34: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

Figura 4.35: Immagine e grafico profilo rugosità texture.

Figura 4.36: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

Figura 4.37: Immagine e grafico profilo rugosità polished.

Figura 4.38: Profilometria e profilo del campione Vc100\_Ap0.1\_CUVT.

Figura 4.39: Profilometria e profilo del campione Vc100\_Ap0.05\_CUVT.

Figura 4.40: Profilometria e profilo del campione Vc200\_Ap0.1\_CUVT.

Figura 4.41: Profilometria e profilo del campione Vc200\_Ap0.05\_CUVT.

Figura 5.1: Microtroncatrice usata per tagliare i campioni.

Figura 5.2: Setup sperimentale per misure di bagnabilità.

Figura 5.3: Confronto angolo di contatto tra CT e UVT fissati i parametri di taglio.

Figura 5.4: Processo Sol-gel con tempra finale opzionale.

Figura 5.5: Operazione di rivestimento (*dip-coating*).

Figura 5.6: disposizione campioni in forno per la sinterizzazione.

Figura 5.7: Immagine SEM coating polished.

Figura 5.8: Immagine SEM coating CT.

Figura 5.9: Immagine SEM coating UVT.

Figura 5.10: Immagini SEM rivestimento S4C direzione Vc (dx) e feed (sx).

Figura 5.11: Confronto zone di massimo accumulo per campioni S2 (sx) e S2C (dx).

Figura 5.12: Confronto zone di massimo accumulo per campioni S6 (sx) e S6C (dx).

Figura 5.13: Confronto accumulo per campioni (da sx) S3, S4 e S4C.

Figura 5.14: Disposizione campioni inglobati.

Figura 5.15: Resina e induritore usati.

Figura 5.16: Esempio immagine SEM con misura dello spessore.

Figura 5.17: Grafico andamento spessori lungo la direzione del feed.

Figura 5.18: Grafico andamento spessori lungo la direzione della velocità di taglio Vc.

Figura 5.19: Confronto spessori lungo le due direzioni analizzate per uno stesso campione.

Figura 5.20: Grafico andamento spessori campioni CUVT lungo la direzione della velocità di taglio.

Figura 5.21: Grafico degli spessori considerati validi.

Figura 5.22: Aspetto rivestimento per campione S4.

Figura 5.23: Aspetto del coating sul campione S4C con ingrandimento a x6000.

Figura 5.24: Andamento spessori campioni UVT.

Figura 5.25: Andamento spessori campioni CUVT.

Figura 5.26: Andamento spessore su campione S1 (CT).

Figura 5.27: Grafico degli spessori considerati validi.

Figura 5.28: Grafico confronto parametro Sdr per tutti i campioni.

Figura 5.29: Grafico confronto parametro Sds per tutti i campioni.

Figura 5.30: Grafico confronto parametro Sqd per tutti i campioni.

Figura 5.31: Grafico confronto parametro Ssc per tutti i campioni.

Figura 5.32: Grafico confronto nanodurezze all'interfaccia per campioni CT, UVT e CUVT.

Figura 7.1: Schema componenti SEM.

Figura 7.2: Schema inserto UVT.

Figura 7.3: Metodo di minima impedenza per la determinazione della lunghezza del sonotrodo.



# Introduzione

Sin dagli inizi del XX secolo, il magnesio ha destato interesse per quanto riguarda molteplici applicazioni. Infatti, è un elemento abbastanza duro e dal peso estremamente contenuto quindi perfetto per applicazioni meccaniche in cui il peso è un fattore decisivo. Però, dal punto di vista applicativo, ha un notevole limite: la sua scarsa resistenza a corrosione in molteplici ambienti, tra cui l'aria.

Per tale ragione, spesso questo tipo di materiale viene accantonato in favore di altri. Dagli inizi del secolo scorso, ricercatori come Staiger, si accorsero subito come il magnesio fosse biocompatibile e quindi ottimo per applicazioni biomedicali sebbene, in ambiente fisiologico, il suo limite principale venga notevolmente enfatizzato.

Nonostante ciò, gli studi dello stesso Staiger e successivamente di altri, come ad esempio quelli condotti da Witte nel 2005, hanno rilevato che il magnesio funge da stimolante per la guarigione ossea. Infatti, all'interfaccia osso-impianto si forma uno strato biomimetico composto da magnesio e fosfato di calcio che dà un notevole input alla guarigione.

Date tali caratteristiche, gli studi sul magnesio per renderlo conforme alle necessità specifiche dei vari ambiti dell'ingegneria sono notevolmente aumentati.

Come già accennato in precedenza, tale materiale risulta particolarmente adatto in ambito biomedicale, automotive e aerospaziale.





# Capitolo 1

## Generalità sul magnesio e le sue leghe

Questo capitolo ha lo scopo di illustrare alcune generalità del magnesio come elemento, delle leghe in cui è elemento principale e altre curiosità necessarie per capire al meglio il motivo per cui tale materiale è così interessante.

### 1.1 Generalità sul magnesio

Il magnesio è l'elemento chimico della tavola periodica degli elementi che ha come simbolo Mg e come numero atomico 12. Il magnesio è l'ottavo elemento più abbondante e costituisce circa il 2% della crosta terrestre; inoltre è il terzo per abbondanza tra gli elementi disciolti nell'acqua di mare dopo ferro (Fe) e ossigeno (O<sub>2</sub>). In natura, per la sua elevata reattività, non esiste allo stato libero, ma si trova combinato con altri elementi. È un metallo alcalino terroso ed è principalmente usato come agente legante nella produzione di leghe alluminio-magnesio.

Il magnesio è essenziale per quasi tutte le specie viventi. Il corpo umano contiene circa 25g di magnesio, contenuto principalmente nelle ossa dove è importante per fini strutturali. Inoltre, è implicato in svariate mansioni, tra cui il funzionamento di più di 300 enzimi, la produzione di proteine e la replicazione del DNA.

Oggi è molto considerato anche per il basso impatto ambientale e quindi in termini di riduzione delle emissioni tossiche in atmosfera nei processi di riciclaggio. Dalla metà degli anni '80 del secolo scorso, ha avuto svariate applicazioni "di nicchia" come nel settore aerospaziale, delle attrezzature sportive e in quello automotive limitatamente alla produzione di componentistica per veicoli da competizione. Un ulteriore svantaggio, oltre a quello della corrosione precoce, è quello che riguarda i costi di produzione molto elevati. Tale svantaggio, però, è stato arginato con l'introduzione di tecniche di lavorazione più economiche come, ad esempio, la pressocolata. Grazie a queste innovazioni si sono potuti progettare nuovi componenti strutturali in lega di magnesio in grado di sostituire le tradizionali parti costruite in acciaio o in alluminio con i conseguenti vantaggi in termini di massa e sollecitazioni ad essa collegate.

Tra i metalli adibiti a funzione strutturale è considerato quello più leggero, infatti, la sua densità è circa un terzo di quella dell'alluminio (1,74 kg/dm<sup>3</sup> alla temperatura di 20 °C).

È possibile riassumere i vantaggi:

1. Leggerezza
2. Disponibilità molto elevata
3. Carico di snervamento paragonabile a quello dell'alluminio
4. Elevata conducibilità termica
5. Buon assorbimento di urti e vibrazioni
6. Scherma onde elettromagnetiche
7. Non è soggetto a stiramento (non si cricca)
8. Riciclabile al 100% senza degrado delle proprietà
9. Elevato rapporto resistenza meccanica/massa

<b>Numero atomico</b>	12
<b>Massa atomica</b>	24.31
<b>Colore</b>	Grigio
<b>Densità</b>	1739 kg/m <sup>3</sup>
<b>Struttura cristallina</b>	Esagonale compatta
<b>Calore di fusione</b>	368 kJ/kg
<b>Temperatura di fusione</b>	650 °C
<b>Calore specifico a T=20 °C</b>	1025 J/(kg K)
<b>Temperatura di ebollizione</b>	1103 °C

Tabella 1.1: Schema riassuntivo caratteristiche Mg.

## 1.2 Impieghi industriali

Il magnesio si pone in competizione con molti materiali polimerici, che oggi, soprattutto nel settore automotive, vengono impiegati sempre di più in sostituzione ai metalli allo scopo di ridurre il peso dei componenti. Rispetto però alle materie plastiche il magnesio possiede le seguenti qualità:

1. Migliori proprietà meccaniche;
2. Resistenza all'invecchiamento;
3. Miglior conducibilità elettrica e termica.

Il problema principale delle leghe di magnesio più comuni è la scarsa resistenza alla corrosione in atmosfera; i componenti esposti all'umidità e agli agenti atmosferici necessitano di rivestimenti superficiali quali anodizzazione, cromatazione o verniciatura con evidenti aggravii sui costi di produzione. Un miglioramento in termini di resistenza all'ossidazione e alla corrosione lo offrono le leghe più recenti che contengono una quantità minima di impurità di Nichel (Ni), Rame (Cu) e Ferro (Fe) e che ottengono prestazioni a

livelli comparabili a molte comuni leghe di alluminio. Le caratteristiche fisiche del magnesio permettono di classificarlo come ottimo metallo da fonderia. Le leghe di magnesio possono essere lavorate per colata, estrusione e forgiatura. Inoltre, risulta un ottimo candidato come materiale lavorabile alle macchine utensili, infatti, si ottengono ottimi risultati anche con velocità di taglio molto elevate. Può essere unito tramite rivetti oppure con i più comuni metodi di saldatura.

### 1.3 Tecniche di estrazione e di utilizzo

Il magnesio è un elemento molto reattivo e quindi non esiste in natura in forma metallica. Viene estratto a partire dai suoi numerosi minerali mediante processi termici o elettrolitici. I primi si basano sulla riduzione dell'ossido di magnesio mediante l'uso di ferrosilice ( $\text{FeSiO}_3$ ) ad alte temperature (1200-1600°C) che porta alla formazione di vapori di metallo puro; una volta distillati, permettono di ottenere magnesio con percentuali di purezza del 99,95%. I processi elettrolitici invece non permettono di raggiungere purezze così elevate (al massimo 99,8%) ma consentono di ottenere maggiori volumi produttivi con un costo inferiore e con un minor impatto ambientale.

L'utilizzo di questo metallo è sempre stato piuttosto limitato. Si deve innanzitutto considerare che solo dalla fine degli anni ottanta è stato possibile mettere a punto dei processi produttivi in grado di fabbricare leghe ad alta purezza e con buona resistenza alla corrosione. Parallelamente l'industria della trasformazione sviluppò interessanti processi di fonderia, essenzialmente di pressocolata, in grado di contenere i costi di produzione.

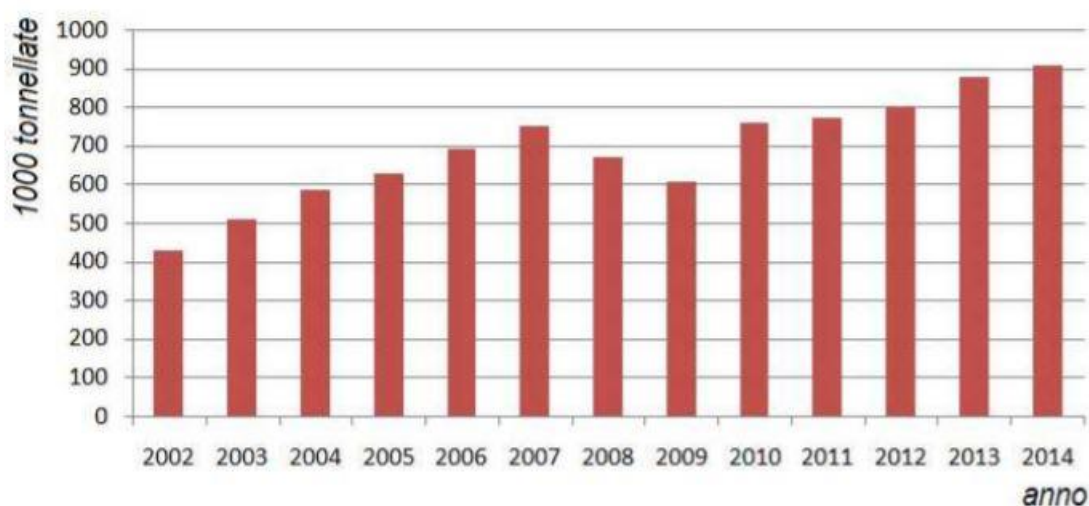


Figura 1.1: Produzione leghe di magnesio anni:2002-2014.

## 1.4 Leghe di magnesio

Sul mercato sono presenti diverse leghe di magnesio, la cui nomenclatura segue regole ben precise dettate da normative di riferimento. Ad esempio, la normativa ASTM identifica ogni lega con una sigla avente cinque caratteri. In prima posizione si riporta la sigla che rappresenta l'elemento chimico in lega principale (cioè in percentuale maggiore) con il magnesio (ad esempio, alluminio, zinco, manganese...) e in seconda posizione l'elemento in lega secondario (cioè in percentuale minore).

A titolo esemplificativo, si riporta la sigla della lega AZ31 che presenta il 3% di alluminio e l'1% di zinco (Zn).

# AZ31

1. Elemento principale della lega (A=alluminio, Z=zinco, E= terre rare, M=manganese, S=silicio, W=ittrio)
2. Elemento secondario della lega
3. Percentuale elemento principale
4. Percentuale elemento secondario
5. Lettera che distingue le leghe con componenti minoritari diversi

Come precedentemente accennato, esistono molteplici leghe di magnesio che hanno applicazioni specifiche in campo industriale. La seguente tabella riassume le principali leghe di magnesio in commercio, la loro composizione, l'utilizzo base e le proprietà meccaniche ed applicazioni.

Descrizione lega	Elementi aggiunti	Utilizzo base	Proprietà e applicazioni
<b>AZ91</b>	9.0%Al, 0.7%Zn, 0.2%Mn	Lega generica da colata	Buona colabilità, buone proprietà meccaniche a T<150°C
<b>AZ31</b>	3.0%Al, 1.0%Zn, 0.13%Mn	Prodotti per lavorazioni	Buona estrudibilità
<b>AM60</b>	6.0%Al, 0.15%Mn	Lega da pressofusione ad alta pressione	Migliore durezza e duttilità rispetto AZ91. Applicazioni strutturali automotive
<b>AM50</b>	Sistema Mg-Al	Lega da colata generica	Buona resistenza, duttilità, assorbimento degli urti e colabilità
<b>AM20</b>	Sistema Mg-Al	Lega da colata	Alta duttilità, durezza, poco processabile per pressofusione
<b>AE42</b>	Mg-4%Al-2%Terre Rare	Lega da colata generica	Bassa colabilità, buona resistenza al creep
<b>AE44</b>	Sistema Mg-Al-Terre Rare(RE)	Lega da colata generica	Migliore resistenza al creep e colabilità rispetto a AE42
<b>ZE41</b>	4.2%Zn, 1.2%RE, 0.7%Zr	Lega da colata	L'aggiunta di RE migliora la resistenza al creep a temperature più alte.
<b>AS21</b>	Sistema Mg-Al-Si	Lega da colata	Per utilizzi a temperatura oltre i 120°C.
<b>AS41</b>	4.2%Al, 1.0%Si	Lega da colata generica	Migliore resistenza al creep rispetto AZ91 a temperature elevate, minore resistenza meccanica.
<b>AJ62</b>	Sistema Mg-Al-Sr	Pressofusione ad alta pressione (HDPC)	Superiore colabilità, resistenza a corrosione e al creep; buona resistenza meccanica e termica.
<b>MRI 153M</b>	Sistema Mg-Al-Ca-Sr	Lega da colata	Per applicazioni ad alta temperatura fino a 150°C.
<b>MRI230D</b>	Sistema Mg-Al-Ca-Sr	Lega da colata	Per applicazioni ad alta temperatura fino a 190°C.

Tabella 1.2: Tabella riassuntiva delle principali leghe di magnesio utilizzate.

Le leghe a base alluminio e zinco sono piuttosto comuni e vengono utilizzate in applicazioni a temperatura ambiente; infatti la presenza dell'alluminio limita la resistenza alle alte temperature anche se favorisce la lavorabilità durante la fase di produzione.

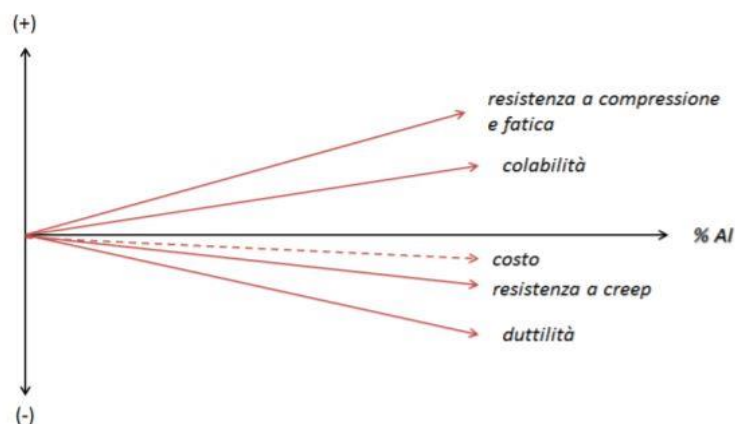


Figura 1.2: Variazione caratteristiche della lega AZ31 in relazione alla % di alluminio aggiunta.

Come evidenziato nella figura precedente, l'aggiunta di alluminio nelle leghe di magnesio migliora la colabilità della lega e quindi la facilità di stampaggio mediante pressofusione; di contro, porta alla riduzione della resistenza al creep, ovvero la resistenza alla deformazione quando il materiale è sottoposto a sforzo costante in condizioni di permanenza ad alta temperatura. Infatti, forma con il magnesio una fase intermetallica,  $Al_{12}Mg_{17}$ , che è fragile e, ad elevate temperature, è termodinamicamente instabile. In questo caso si formano dei precipitati consistenti e dei micro/macro vuoti all'interno della matrice che portano inevitabilmente ad una diminuzione della resistenza della lega. Si risolve questo problema aggiungendo alle leghe di magnesio-alluminio degli altri elementi come calcio (Ca) o terre rare (Re) che, andando a formare con l'alluminio delle nuove fasi intermetalliche, sopprimono la formazione della fase precipitata  $Al_{12}Mg_{17}$ . Di conseguenza la lega migliora le sue proprietà meccaniche ad alta temperatura.

Come riportato nella figura seguente, aggiungendo terre rare alle leghe di magnesio si guadagna in resistenza al creep ma si perde in lavorabilità e quindi si rischia di incorrere in difetti di colata. Non da ultimo, aumentano i costi.

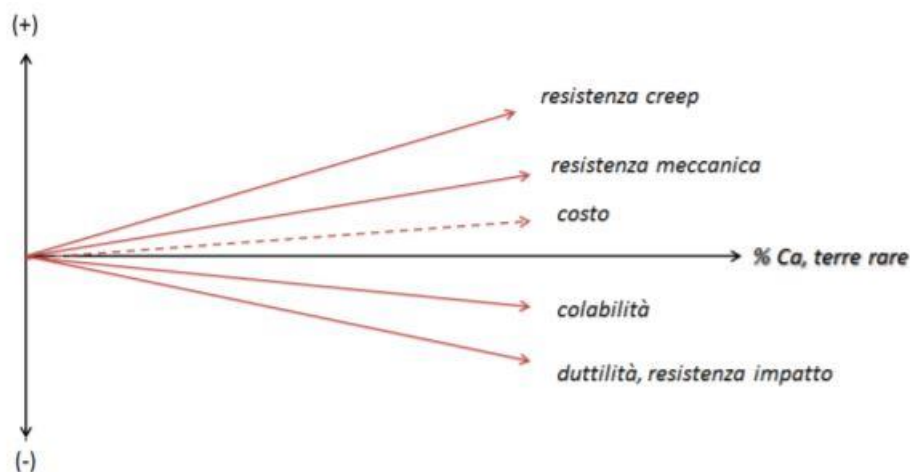


Figura 1.3: Variazione caratteristiche della lega AZ31 in relazione alla % di terre rare aggiunte.

Altri elementi che vengono additivati al magnesio per applicazioni che lavorano a temperature elevate sono Cerio (Ce) e Zirconio (Zr), in lega senza alluminio.

Alcune leghe sono di più recente sviluppo; tra queste, le leghe che presentano come elemento legante primario l'alluminio e, come elemento secondario, silicio (leghe AS), terre rare (leghe AE), calcio (leghe AX), stronzio (Sr) (leghe AJ), zinco e calcio (leghe AZX), calcio e terre rare (leghe MRI), calcio e stronzio (leghe AXJ). Altre tipologie di

nuove leghe sono quelle dove le terre rare sono l'elemento legante primario (leghe WE) e altre a base di terre rare e zinco (leghe MEZ).

## **1.5 Processi di lavorazione principali**

Il processo tecnologico maggiormente utilizzato per ottenere manufatti in magnesio è quello di pressofusione (nota anche col termine inglese *die casting*). Questo processo consiste nell'iniettare ad alta pressione il metallo fuso in uno stampo metallico (acciaio o ghisa). Per garantire l'integrità dello stampo, questo processo permette di lavorare solo leghe di elementi a basso punto di fusione, come alluminio, zinco e magnesio. È un processo completamente automatizzabile che permette di avere un'elevata produttività, alta precisione, buona qualità e la possibilità di ottenere pareti sottili. I costi di avviamento dell'impianto sono però alti e viene perciò utilizzato esclusivamente quando si devono realizzare elevati volumi produttivi così da riuscire ad ammortizzare l'investimento iniziale. Non tutte le leghe di magnesio sono ugualmente idonee ad essere processate con questa tecnica. Quelle più inclini ad essere lavorate con questo processo sono quelle contenenti grandi quantità di alluminio. Leghe come le magnesio-alluminio-zirconio sono assolutamente inadatte ad essere lavorate tramite pressofusione a causa della viscosità che presentano.

In questo caso si ricorre quindi ad altre tipologie di lavorazioni, come, ad esempio, la colata in sabbia o "a cera persa", l'estrusione o la forgiatura. La colata in sabbia è una tecnica molto versatile che permette grande varietà di dimensioni, design e qualità dei prodotti, unitamente ad una buona economicità nella produzione di modeste quantità di pezzi di qualità medio-bassa. A svantaggio di questo metodo vi è l'impossibilità di utilizzarlo per colate di alta precisione a causa dell'impossibilità da parte della sabbia di seguire perfettamente uno stampo complesso e per le inevitabili variazioni dimensionali che si verificano al momento della rimozione dello stesso. La forgiatura è un processo di trasformazione per deformazione plastica di pezzi metallici a sezione varia, solitamente portati ad alta temperatura.

## **1.6 Criticità del magnesio**

Il magnesio avendo un relativo basso punto di fusione (650°C) non richiede un consumo energetico troppo elevato per la sua lavorazione. Però, quando si superano i 500°C e si opera in presenza di ossigeno, si corrode molto velocemente e può bruciare creando scintille. Questo comportamento è legato alla struttura porosa (a quella temperatura) del suo ossido che, diversamente da quanto accade con l'alluminio, non consente la formazione di uno strato superficiale che passiva e protegge l'interno del materiale; viceversa, porta ad

un'ossidazione violenta dell'intera massa, la cui cinetica di reazione è ovviamente favorita dalle alte temperature in gioco.

Per evitare che questo accada, nel processo di pressocolata si utilizzano miscele di aria e gas protettivi che vanno a schermare la superficie del fuso formando uno scudo contro l'ossidazione. Il gas più comunemente utilizzato è esafluoruro di zolfo ( $\text{SF}_6$ ): la protezione del fuso è dovuta allo sviluppo di uno strato passivante di fluoruro di magnesio ( $\text{MgF}_2$ ) e ossido di magnesio ( $\text{MgO}$ ), in cui il fluoruro di magnesio va a riempire la struttura porosa dell'ossido, che contrasta l'ossidazione dell'intero bulk.

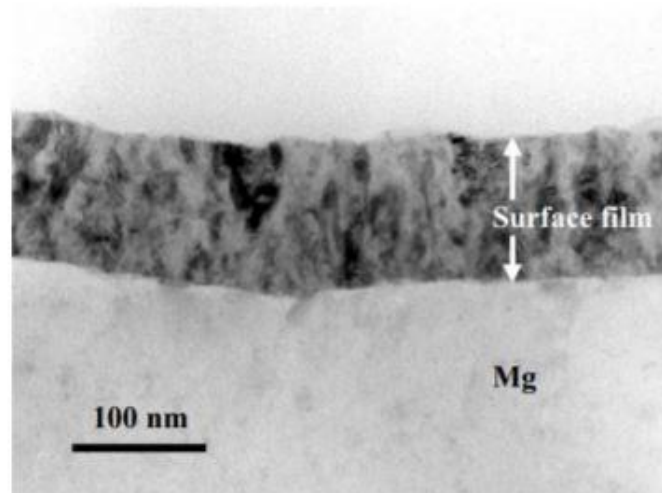


Figura 1.4: Strato di ossido di magnesio  $\text{MgO}$ .

L'esafluoruro di zolfo è un gas inerte e atossico ma presenta delle problematiche ambientali. È infatti un gas serra 23.900 volte più forte dell'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) e ha un tempo di permanenza in atmosfera di 3.000 anni. Attualmente l'impatto che la lavorazione del magnesio ha nel computo totale delle emissioni di esafluoruro di zolfo a livello mondiale è modesto ma un aumento della domanda di questo metallo potrebbe portare a danni consistenti. Per questo motivo la ricerca per gas diversi e/o per tecniche alternative all'utilizzo dell'esafluoruro di zolfo è molto attiva. I primi studi propongono l'utilizzo di una miscela di anidride solforosa ( $\text{SO}_2$ ) e aria. In questo caso lo strato passivante è formato da solfuro e solfato di magnesio ( $\text{MgS}$  e  $\text{MgSO}_4$  rispettivamente). L'anidride solforosa non è un gas serra e ha un tempo di vita praticamente nullo. È però un gas fortemente tossico ed è quindi necessario che la lavorazione avvenga in ambienti completamente stagni. Altro limite dell'anidride solforosa è la sua corrosività che danneggia inevitabilmente gli strumenti di colata. Altre soluzioni sono state testate e brevettate nel corso degli anni ma l'utilizzo di esafluoruro di zolfo rimane la scelta più conveniente sommando le componenti economiche ed ambientali. La tendenza del magnesio all'ossidazione ad alte temperature si presenta anche quando il materiale viene



lavorato alle macchine utensili: le elevate temperature raggiunte localmente possono innescare una combustione e creare seri problemi di sicurezza durante la lavorazione. Per ovviare al problema viene tradizionalmente aggiunto berillio (Be) nel bagno fuso, che forma con il magnesio una lega con minore rischio di infiammabilità durante la lavorazione alle macchine utensili. Il berillio è però un elemento tossico che deve sottostare a rigidi protocolli di sicurezza al fine di salvaguardare la salute degli operatori. Riduce inoltre la riciclabilità del magnesio e limita tutte le sue applicazioni in campo medicale.

## **1.7 L'ECO-magnesio e la sua produzione**

L'ECO-Magnesio è la risposta alla problematica ambientale finora strettamente legata al processo di trasformazione del magnesio. Per garantire un basso impatto ambientale e, nello stesso tempo, sicurezza sul lavoro, la soluzione migliore è quella di ricorrere ad un processo dove l'esaffluoruro di zolfo sia completamente eliminato e utilizzare leghe prive di berillio. Affinché il risultato sia industrialmente utilizzabile, questi cambiamenti non devono peggiorare le proprietà meccaniche del prodotto stampato né aumentare il costo totale del processo. I ricercatori del Korea Institute of Industrial Technology hanno sviluppato una nuova tipologia di lega di magnesio che, per realizzare manufatti in magnesio, permette il processo di pressofusione in aria, in presenza quindi di ossigeno e azoto (N<sub>2</sub>), senza l'aggiunta di gas passivanti. Queste leghe sono entrate nel mercato nel 2011 con il nome commerciale di Environmentally COncscious Magnesium, da cui l'acronimo ECO-Magnesium®.

Le leghe di ECO-Magnesio non sono propriamente delle nuove leghe di magnesio in quanto la composizione elementare dei loro principali componenti è identica a quella delle leghe di magnesio attualmente più diffuse sul mercato. Quello che cambia è il processo produttivo col quale esse vengono ottenute che è per tutte il medesimo. Questo indica che è possibile ottenere la versione ECO-Magnesio di tutte le leghe di magnesio oggi commercializzate. La peculiarità delle leghe di ECO-Magnesio risiede nell'aggiunta di piccole quantità di ossido di calcio durante la fase precedente al processo di colata e stampaggio. L'impiego di ossido di calcio porta innanzitutto dei vantaggi ambientali, legati al processo produttivo, e di sicurezza, associati alle tecniche di lavorazione. Infatti, durante la fase produttiva del lingotto viene utilizzata solo una minima quantità di gas protettivi mentre per i processi di trasformazione, che partono da lingotto o da chip e arrivano al prodotto finito, l'utilizzo di questi gas è totalmente eliminato perché non necessario. Inoltre, l'aggiunta di ossido di calcio permette di affinare il grano cristallino offrendo così un incremento delle prestazioni, in termini meccanici, termici e di ossidazione. La preparazione di queste leghe non è particolarmente complessa e utilizza come materiale di partenza magnesio puro o una delle sue leghe. Questa tecnica viene impiegata solo dalle aziende che producono il magnesio

come materia prima e che lo vendono alle aziende trasformatrici in forma di lingotto o di chip. I vari step del processo sono i seguenti:

1. Portare a fusione il magnesio o una sua lega in atmosfera protetta;
2. Aggiungere l'ossido di calcio alla massa fusa;
3. Mescolare il metallo con l'additivo: durante questa fase l'ossido di calcio reagisce con il magnesio o con la sua lega;
4. Colare la massa fusa in uno stampo;
5. Raffreddare la lega così ottenuta.

Solo durante la primissima fase, che prevede la fusione della massa metallica, viene impiegata una piccola quantità di gas protettivo (solitamente esafluoruro di zolfo o anidride solforosa) che va a proteggere il fuso finché non viene aggiunto l'ossido di calcio. Dal momento che si deve innescare la reazione tra l'ossido di calcio e il magnesio, con il quale va a formare una nuova fase intermetallica, è necessario portare a fusione la lega e permettere così sia un adeguato mescolamento dell'ossido di calcio al suo interno sia un aumento della cinetica di reazione sfruttando le alte temperature in gioco. Inoltre, la temperatura deve essere sufficientemente alta da permettere la fusione omogenea dell'intera massa del metallo, che varia a seconda degli elementi che la compongono, ma non tale da innescare reazioni di auto-ignizione. Pertanto, il magnesio fuso viene di solito portato ad una temperatura di poco superiore ai 600 °C mentre per le leghe si usano invece temperature leggermente inferiori. L'ossido di calcio aggiunto è sotto forma di polvere, la cui dimensione influenza la qualità del processo e del prodotto. Se le dimensioni delle polveri sono inferiori a 0,1 µm l'ossido di calcio viene disperso dai vapori della massa fusa di magnesio, complicandone l'utilizzo. Inoltre, le particelle fini tendono più facilmente ad agglomerarsi tra loro formando cluster di più difficile mescolamento. Particelle invece troppo grandi sono indesiderate in quanto l'area superficiale disponibile per la reazione risulta essere ridotta. Un range ideale è compreso tra 0,1-200 µm in cui si ha a disposizione un'elevata area superficiale per permettere la reazione senza rischiare la formazione di agglomerati di particelle. La quantità di ossido di calcio aggiunto al magnesio può essere compresa in un intervallo tra lo 0,001% e il 30% (m/m). È consigliato di rimanere al di sotto del 30% altrimenti le proprietà fisiche del materiale cambiano drasticamente.

La fase di mescolamento dell'ossido di calcio con il magnesio, o con le sue leghe, è molto importante e richiede tempi che dipendono molto dal volume del metallo fuso e dalla percentuale dell'additivo. Innanzitutto, si è verificato come la reazione di riduzione del calcio ha una resa superiore se avviene sulla superficie anziché all'interno della massa fusa; di conseguenza il mescolamento deve evitare che l'ossido di calcio si uniformi in tutto il

volume del fuso metallico e, viceversa, deve amalgamarlo il più possibile in una zona vicina alla superficie. È preferibile quindi aggiungere un'adeguata quantità di ossido in modo da ricoprire completamente tutta la superficie del metallo fuso. Il mescolamento può essere condotto meccanicamente oppure utilizzando campi elettromagnetici.

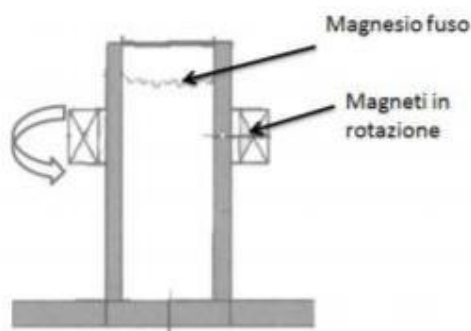


Figura 1.5: Schema mescolamento elettromagnetico di ossido di calcio e magnesio.

Come illustrato nella figura 1.5, in quest'ultimo caso si ricorre a dei magneti che, attraverso un motore elettrico, vengono fatti ruotare attorno alla fornace contenente la massa fusa, creando un campo magnetico a direzione variabile; si ottiene la movimentazione del metallo fuso perché si sfruttano le sue proprietà para-magnetiche, ovvero la capacità di diventare magnetico, allineando i dipoli magnetici, solo in presenza di un campo magnetico e seguendo la sua direzione. Per consentire il mescolamento della sola parte superficiale del fuso, occorre posizionare le palette meccaniche o i magneti in corrispondenza della parte più alta del volume del fuso. Si è verificato che è preferibile un mescolamento effettuato solamente su una porzione pari al 10-20% dell'altezza totale del metallo fuso.

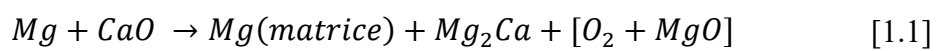
Entrambi i metodi devono fare in modo di evitare la formazione di agglomerati e devono favorire lo sviluppo della reazione dell'ossido con il magnesio. In principio, il mescolamento deve essere protratto fino a quando l'ossido di calcio non è più visibile sulla superficie del metallo fuso. Il controllo della superficie del materiale fuso permette pertanto di conoscere lo stato di avanzamento della reazione e l'efficacia o meno del mescolamento. Inoltre, dato che alcune particelle di ossido di calcio rimangono nella massa fusa senza reagire, nonostante non compaiono più in superficie, il mescolamento viene protratto per un tempo maggiore, in modo da consentire a tutte le particelle dell'additivo di reagire. Il mescolamento è più efficace quando viene svolto contemporaneamente all'aggiunta dell'ossido di calcio e continua fino a quando la reazione di riduzione del calcio non è completa.

La tabella seguente mostra che a parità di concentrazione di ossido di calcio CaO, la quantità residua di CaO nella lega nel caso di mescolamento limitato alla superficie è drasticamente inferiore.

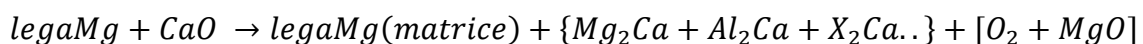
		5% w/w CaO	10% w/w CaO	15% w/w CaO
<b>Percentuale di CaO residua nella lega (% w/w)</b>	Senza mescolamento	4.5	8.7	13.5
	Mescolamento dell'intera massa fusa	1.2	3.1	5.8
	Mescolamento della superficie	0.001	0.002	0.005

Tabella 1.3: Quantità residua di CaO nella lega in funzione del tipo di mescolamento adottato.

A livello di reazione chimica, quello che avviene, soprattutto in superficie, è la riduzione dell'ossido di calcio a calcio, il quale reagisce con il magnesio per formare la fase Mg<sub>2</sub>Ca. L'ossigeno ottenuto dalla riduzione del calcio viene rimosso come gas (O<sub>2</sub>) o sotto forma di "scorie", in combinazione con il magnesio, formando ossido di magnesio.



Se ad essere utilizzata è una lega di magnesio, l'ossido di calcio reagisce anche con gli altri elementi presenti nella soluzione solida. Nel caso dell'alluminio, ad esempio, si ottiene la fase Al<sub>2</sub>Ca. In generale:



Una volta terminata la reazione, si procede con la colata del fuso. Si impiega solitamente uno stampo a temperatura ambiente o preriscaldato, che può essere in materiale metallico, ceramico o a base di grafite. Le tecniche di colata adoperate sono di solito quelle della colata per gravità e in continuo. Infine, il pezzo colato viene lasciato raffreddare a temperatura ambiente e rimosso dallo stampo. Questo processo, che vede quindi l'aggiunta di ossido di calcio alla massa fusa, si differenzia in modo sostanziale dalla tecnica di produzione di leghe di magnesio contenenti calcio come elemento legante.

Infatti, mentre il calcio ha una fortissima tendenza a segregare, l'ossido di calcio, al contrario, si disperde in maniera omogenea all'interno del bulk di magnesio. Non da ultimo, si deve considerare il costo nettamente inferiore dell'ossido di calcio rispetto al metallo puro (circa dieci/venti volte inferiore).

## **1.8 Infiammabilità e resistenza all'ossidazione**

Uno dei problemi che ha sempre caratterizzato e limitato l'utilizzo del magnesio è la sua infiammabilità, soprattutto in fase di lavorazione meccanica, quando si raggiungono localmente elevate temperature. Quest'aspetto, oltre a coinvolgere la sicurezza dei processi di trasformazione, crea diffidenza nei potenziali utilizzatori dei prodotti stampati in magnesio, soprattutto se si opera ad alte temperature. Le leghe di magnesio più diffuse sono quelle con alluminio come elemento legante primario perché offrono buone caratteristiche meccaniche, ottima duttilità e facilità di stampaggio per pressofusione. La presenza dell'alluminio in lega porta però a scarsa resistenza all'ossidazione e tende a favorire la combustione. L'aumento di peso è indice della formazione di ossidi di alluminio e magnesio e quindi di un'avvenuta combustione del metallo; quanto maggiore è il peso del campione, tanto più il composto si ossida, aumentando il pericolo di combustione. Si può quindi notare come, con la quantità di alluminio in lega, aumenta anche il rischio di combustione. La presenza di alluminio fa anche diminuire la temperatura di ignizione e obbliga quindi l'utilizzo della lega a temperature basse. Tradizionalmente per poter impiegare le leghe di magnesio ad alta temperatura ci si affidava a leghe non a base alluminio ma a base di terre rare o di metalli alcalini terrosi (come il berillio e il calcio). Nel primo caso si ottengono prodotti di buona qualità ma dall'elevato costo, nel secondo si ha una diminuzione della fluidità del fuso che incide negativamente sulla sua colabilità, generando difetti di colata. Grazie all'ECO-Magnesio è possibile oggi superare questi limiti e raggiungere buona resistenza all'ossidazione e, di conseguenza, migliori prestazioni termiche.



# Capitolo 2

## Lavorazioni per asportazione:

### Tornitura

Questo capitolo ha lo scopo di illustrare le basi dei processi di tornitura utilizzati e il significato delle terminologie riportate nel corso dell'intera trattazione.

#### 2.1 Meccanica della formazione del truciolo

Nella categoria di lavorazioni per asportazione di truciolo sono presenti:

1. Tornitura cilindrica
2. Troncatura
3. Fresatura periferica
4. Fresatura a cordolo

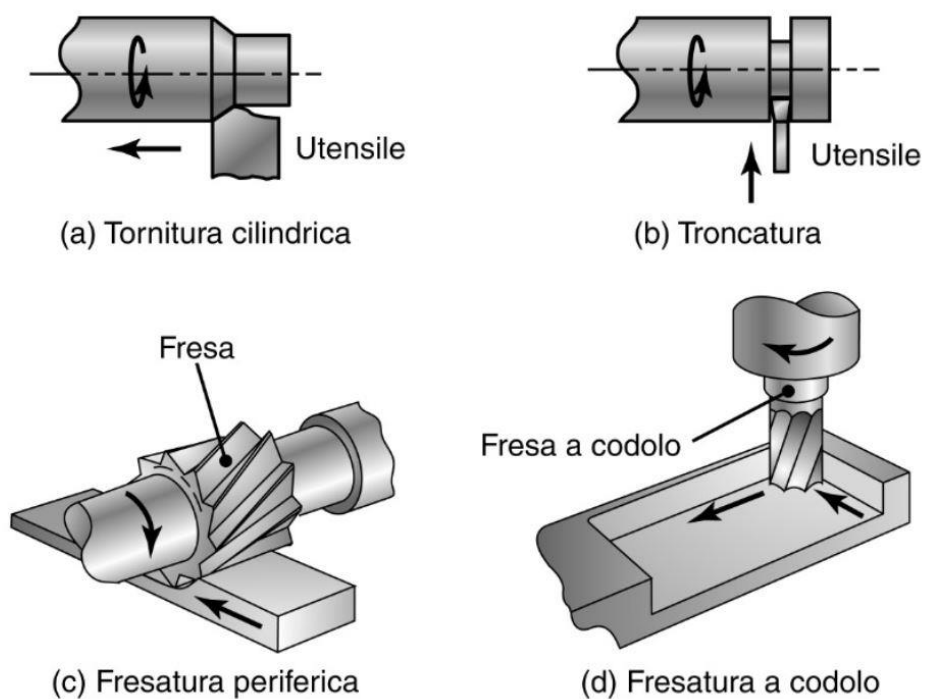


Figura 2.1: Esempi di lavorazione per asportazione.

In genere nelle lavorazioni per asportazione, ed in particolare anche in tornitura, il materiale viene rimosso dalla superficie del pezzo producendo trucioli, come mostrato nella figura 2.2. Il meccanismo di base, che è simile in tutte le operazioni di taglio, può essere rappresentato dal modello bidimensionale di taglio ortogonale. In questo modello, l'utensile si muove lungo il pezzo a una certa velocità (velocità di taglio)  $V_c$ , e profondità di passata  $A_p$ . In corrispondenza dell'utensile si forma il truciolo, mediante scorrimento continuo del materiale lungo il piano di scorrimento. Tale modello sebbene sia una rappresentazione semplificata della realtà viene comunemente utilizzato per schematizzare ciò che avviene, in maniera più complessa, nelle tre dimensioni. Risulta utile distinguere le variabili indipendenti, ovvero quelle su cui è possibile agire arbitrariamente, e quelle dipendenti, che sono invece il prodotto del complesso processo di taglio.

Variabili indipendenti	Variabili dipendenti
Tipo e condizioni utensile	Tipo di truciolo prodotto
Forma, finitura superficiale e affilatura utensile	Forza richiesta ed energia dissipata nel processo di taglio
Materiale pezzo, condizione e temperatura	Innalzamento della temperatura
Parametri di taglio	Usura, scheggiatura e rottura utensile
Eventuali lubrificanti	Finitura e integrità superficiale del pezzo dopo la lavorazione
Caratteristiche macchina utensile: rigidità e smorzamento in primis	
Portautensile e tipo di fissaggio	

Tabella 2.1: Variabili indipendenti e dipendenti nei processi di lavorazione per asportazione.

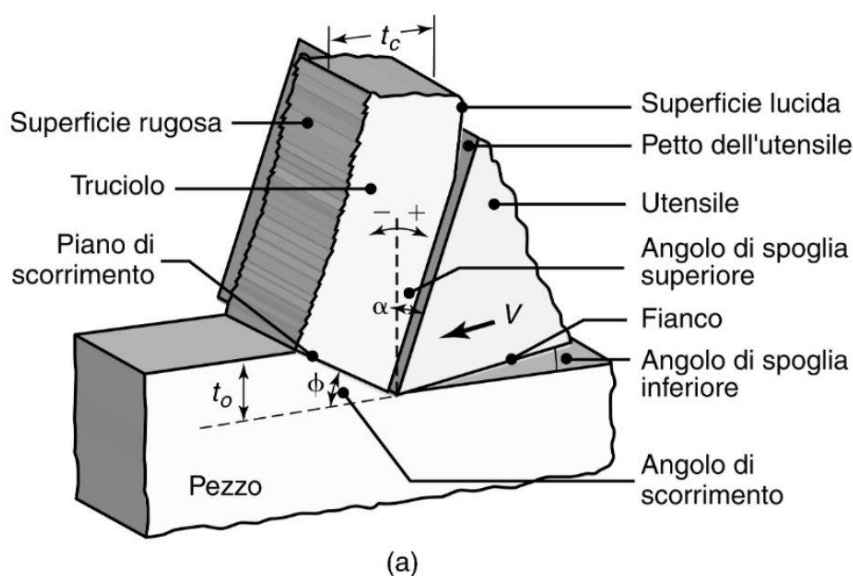


Figura 2.2: Rappresentazione schematica del processo di taglio ortogonale con piano di scorrimento (modello di Merchant).



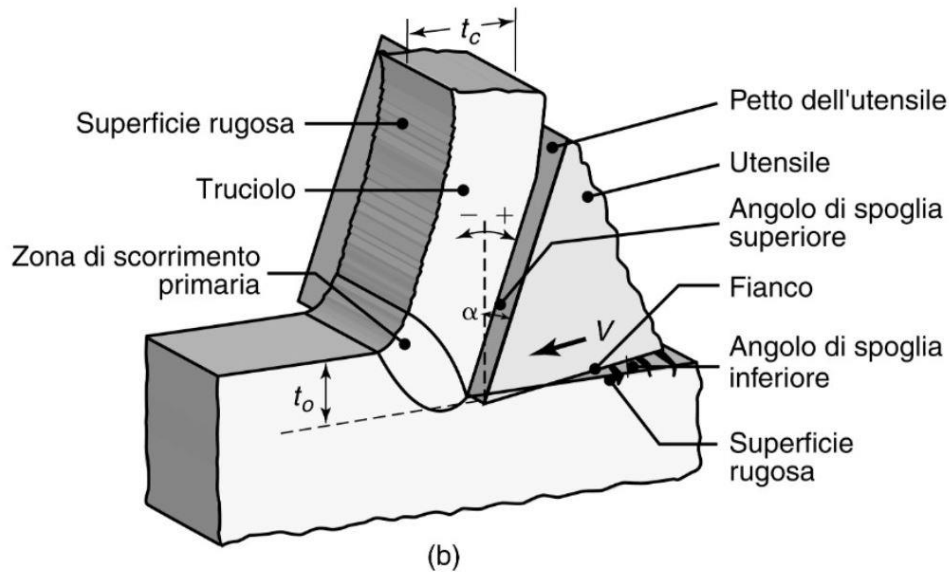


Figura 2.3: Rappresentazione schematica del processo di taglio ortogonale senza piano di scorrimento ben definito.

Nel modello di taglio ortogonale l'utensile è ortogonale alla direzione di taglio. L'utensile presenta un angolo di spoglia superiore,  $\alpha$ , (positivo, nel caso visibile nella figura) e un angolo di spoglia inferiore. Si noti che la somma dell'angolo di spoglia superiore, dell'angolo di spoglia inferiore e dell'angolo di taglio (angolo incluso dell'utensile) è pari a  $90^\circ$ . Lo scorrimento avviene lungo un piano di scorrimento, che forma un angolo  $\phi$ , detto angolo di scorrimento, con la superficie del pezzo. Al di sotto del piano di scorrimento, il pezzo rimane indeformato (con l'eccezione di una piccola deformazione elastica), mentre sopra al piano di scorrimento il truciolo è già formato e si muove verso il petto dell'utensile. A causa del movimento relativo, vi è attrito tra il truciolo e il petto dell'utensile. Lo spessore del truciolo  $t_c$ , si può calcolare a partire da  $A_p$ ,  $\phi$  e  $\alpha$ . Il rapporto tra  $A_p$  e  $t_c$  è noto come rapporto di taglio  $r$ , (o il suo inverso, chiamato fattore di ricalcamento del truciolo) che può essere calcolato come:

$$r = \frac{A_p}{t_c} = \frac{\sin(\phi)}{\cos(\phi - \alpha)} \quad [2.1]$$

Lo spessore del truciolo è sempre maggiore della profondità di passata, pertanto il valore di  $r$  è sempre inferiore all'unità. Nel taglio ortogonale lo spessore del truciolo indeformato,  $t_o$ , e la profondità di passata coincidono; questo in generale non vale per le altre lavorazioni. Poiché lo spessore del truciolo,  $t_c$ , è maggiore dello spessore del truciolo indeformato,  $t_o$ , la velocità del truciolo  $V_{truc}$ , è inferiore alla velocità di taglio  $V_c$ . Per continuità di massa, si ha che:

$$V_c A_p = V_{truc} t_c \quad [2.2]$$

## 2.2 Morfologia del truciolo

La tipologia di trucioli prodotti (cioè la sua morfologia) influenza in modo significativo la finitura superficiale e l'integrità della superficie, ma anche l'intera lavorazione per asportazione. Se si osservano al microscopio dei trucioli reali, prodotti con differenti condizioni di taglio, si possono osservare delle differenze rispetto al modello ideale. Il truciolo presenta due superfici: una che è stata in contatto con il petto dell'utensile, l'altra che rappresenta la superficie originaria del pezzo. La prima ha un aspetto lucido a causa dello sfregamento del truciolo sul petto dell'utensile. La seconda invece non è entrata in contatto con alcun corpo solido e presenta un andamento a gradini, dovuto al meccanismo di scorrimento. Le tipologie principali di truciolo prodotto nelle lavorazioni per asportazione con utensili da taglio sono:

1. Il **truciolo continuo** solitamente si forma con velocità di taglio e angolo di spoglia superiore elevati. La deformazione del materiale avviene lungo una zona di scorrimento molto stretta, chiamata zona di scorrimento primaria. Il truciolo può presentare anche zone di scorrimento secondarie all'interfaccia utensile-truciolo, come conseguenza dei fenomeni di attrito. Come prevedibile, le zone secondarie diventano più spesse all'aumentare dell'attrito tra truciolo e utensile. Il truciolo continuo in generale è associato a una buona qualità superficiale, tuttavia spesso è considerato un fenomeno negativo perché tende ad aggrovigliarsi attorno all'utensile e la lavorazione deve essere interrotta per la sua rimozione. Questo problema, particolarmente rilevante nelle macchine utensili a controllo numerico, può essere ridotto mediante sistemi rompitrucciolo. A causa dell'incrudimento, provocato dalla deformazione per scorrimento, il truciolo diventa più duro, più resistente e meno duttile rispetto al materiale del pezzo. L'aumento di resistenza e durezza dipende dall'entità della deformazione, infatti, al diminuire dell'angolo di spoglia superiore, la deformazione di taglio per scorrimento  $\gamma$  aumenta come dimostrato dalla seguente equazione:

$$\gamma = \cot(\vartheta) + \tan(\vartheta - \alpha) \quad [2.3]$$

E quindi il truciolo diventa più duro e resistente.

2. Il **tagliente di riporto** (BUE, Build Up Edge) si può formare sulla punta dell'utensile durante la lavorazione. Il BUE consiste in strati di materiale del pezzo che si depositano gradualmente sull'utensile. Ad un certo punto il tagliente di riporto diventa instabile e di conseguenza si rompe. La parte superiore del tagliente di riporto viene trascinata via dal truciolo sul petto dell'utensile, mentre la parte inferiore si deposita casualmente sulla superficie lavorata. Il processo di formazione

del tagliente e la sua rottura sono fenomeni che si ripetono continuamente durante la lavorazione. Il tagliente di riporto è molto comune nella pratica ed è uno dei fattori più importanti fra quelli che influenzano negativamente la finitura superficiale e l'integrità della superficie: esso, infatti, modifica la geometria dell'utensile stesso. Ad esempio, il raggio di raccordo dell'utensile aumenta e la finitura superficiale conseguentemente diminuisce. A causa dell'incrudimento e della stratificazione successiva di materiale, la durezza del tagliente di riporto aumenta notevolmente. Quasi sempre il tagliente di riporto è un fenomeno negativo, ad eccezione di quando è sottile e stabile; in tali condizioni, infatti, protegge la superficie dell'utensile. In generale, il tagliente di riporto si riduce o scompare se la velocità di taglio  $V_c$  aumenta, se la profondità di passata  $A_p$  cala, se l'angolo di spoglia superiore  $\alpha$  aumenta, il raggio di punta del tagliente diminuisce e se si usa un lubrorefrigerante efficace.

3. Il **truciolo segmentato** è un tipo di truciolo costituito da un numero di elementi collegati, con alcune zone che presentano deformazione limitata ed altre elevata. Il truciolo ha un aspetto simile ai denti di una sega. Questo tipo di truciolo è tipico dei metalli, come il titanio, che hanno bassa conducibilità termica e una resistenza che diminuisce rapidamente all'aumentare della temperatura.
4. Il **truciolo discontinuo** consiste in segmenti parzialmente collegati. Tale tipologia di truciolo si forma nelle seguenti condizioni:
  - a) Il materiale del pezzo è fragile, poiché non è in grado di sopportare l'elevata deformazione presente nelle lavorazioni di taglio.
  - b) Il materiale del pezzo contiene inclusioni o impurità.
  - c) La velocità di taglio  $V_c$  è troppo bassa o troppo alta.
  - d) La profondità di passata  $A_p$  è elevata o l'angolo di spoglia superiore  $\alpha$  è piccolo.
  - e) La macchina utensile ha scarsa rigidità e uno smorzamento delle vibrazioni non adeguato.
  - f) Non si utilizza un lubrorefrigerante efficace.

Detto ciò, si ha che le forze variano continuamente durante la lavorazione.

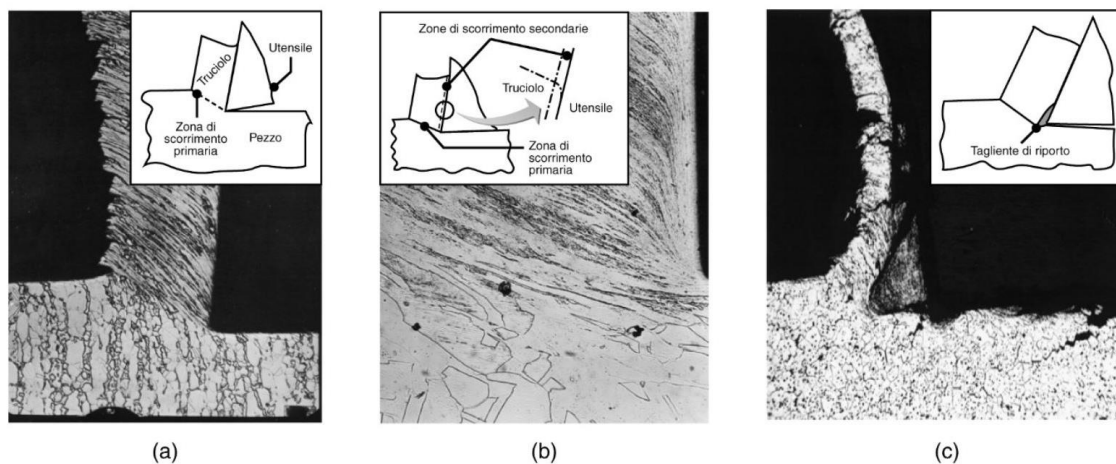


Figura 2.4: Tipologie di truciolo: (a) truciolo continuo con zona di scorrimento piana e stretta, (b) zona di scorrimento secondaria all'interfaccia utensile-truciolo, (c) truciolo continuo con tagliente di riporto.

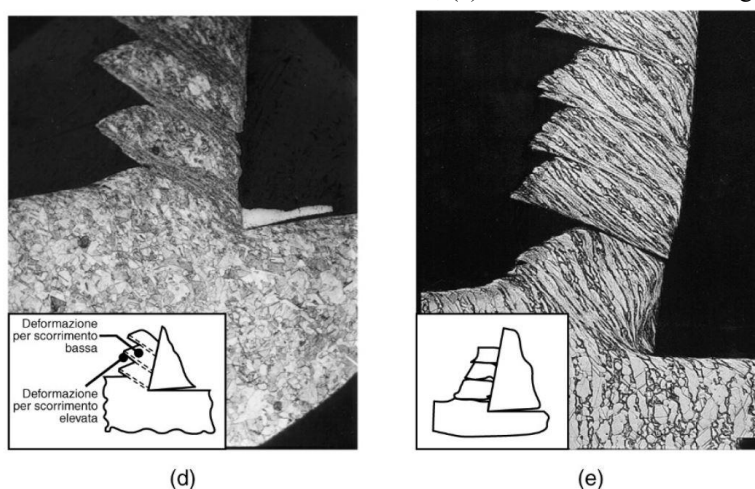


Figura 2.5: Tipologie di truciolo: (d) truciolo segmentato, (e) truciolo frammentato discontinuo.

## 2.3 Meccanica del taglio ortogonale

Anche se nella pratica, compreso nei processi di lavorazione eseguiti nello sviluppo dei campioni necessari allo svolgimento di questa tesi, l'ipotesi di taglio ortogonale non è quasi mai verificata, si ritiene utile per chiarezza e completezza della trattazione illustrare brevemente la meccanica del taglio ortogonale e, in particolare le forze in gioco.

Nelle lavorazioni per asportazione è importante conoscere le forze di taglio e la potenza richiesta per le seguenti ragioni:

1. La potenza richiesta deve essere nota, per consentire la scelta o la progettazione di una macchina utensile adeguata alla particolare applicazione.
2. La conoscenza delle forze di taglio è importante per la corretta progettazione delle macchine utensili, in modo tale che queste siano sufficientemente rigide, in grado di evitare deformazioni eccessive e vibrazioni così da permettere un'adeguata accuratezza dimensionale.

3. Il pezzo deve essere in grado di resistere alla forza di taglio senza eccessive deformazioni al fine di mantenere le tolleranze dimensionali richieste.

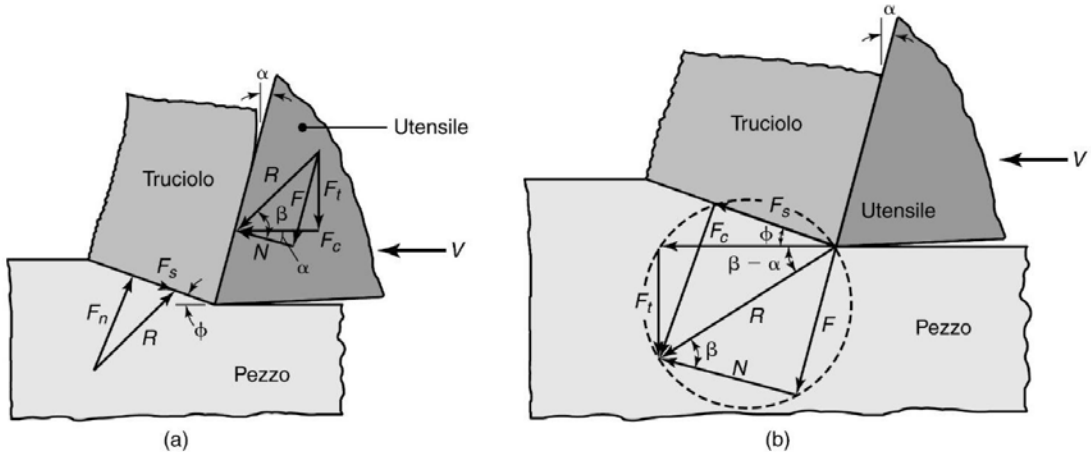


Figura 2.6: (a) Forze agenti sull'utensile nel taglio ortogonale. Si noti che le forze risultanti  $R$  devono essere parallele per ottenere l'equilibrio delle forze. (b) Cerchio delle forze per la determinazione delle varie forze che agiscono nella zona di taglio.

Le forze che agiscono sull'utensile nel taglio ortogonale sono visibili nella Figura 2.6 (a). La forza di taglio  $F_c$  agisce nella direzione della velocità di taglio  $V_c$ . La forza di repulsione  $F_t$  agisce nella direzione perpendicolare alla velocità di taglio ovvero perpendicolare al pezzo. Queste due forze producono una forza risultante  $R$  che si può dividere in due componenti sul petto dell'utensile: una forza di attrito  $F$ , lungo l'interfaccia utensile-truciolo e una forza normale  $N$  perpendicolare a tale interfaccia.

Come riportato in figura, si può dimostrare che la forza di attrito  $F$  è:

$$F = R \sin(\beta) \quad [2.4]$$

E che la forza normale  $N$  vale:

$$N = R \cos(\beta) \quad [2.5]$$

Si noti anche che la forza risultante è bilanciata da una forza uguale e opposta sul piano di scorrimento che si può scomporre in una forza di scorrimento  $F_s$  e in una forza normale a tale piano  $F_n$ . La forza di taglio  $F_c$  si può esprimere come:

$$F_c = R \cos(\beta - \alpha) = \frac{w A_p \tau \cos(\beta - \alpha)}{\sin(\phi) \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad [2.6]$$

Dove  $\tau$  è la tensione tangenziale di scorrimento media nel piano di scorrimento. Il rapporto tra  $F$  e  $N$  è il coefficiente di attrito  $\mu$  all'interfaccia utensile truciolo, mentre l'angolo  $\beta$  è conosciuto come angolo di attrito. Il coefficiente di attrito si può esprimere come:

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan(\beta) = \frac{F_t + F_c \tan(\alpha)}{F_c - F_t \tan(\alpha)} \quad [2.7]$$

Nelle operazioni di taglio dei metalli generalmente assume valori compresi tra 0.5 e 2, ovvero il truciolo incontra una certa resistenza per attrito nello scorrimento sul petto dell'utensile. Il valore tipico delle forze nelle lavorazioni per asportazione è nell'ordine delle poche centinaia di Newton. Tuttavia, le tensioni localizzate nella zona di taglio e le tensioni normali sul petto dell'utensile sono molto elevate, poiché le aree di contatto sono molto piccole. La lunghezza di contatto utensile-truciolo, ad esempio, è tipicamente nell'ordine di 1 mm; l'utensile è quindi soggetto a tensioni molto elevate.

La forza di repulsione ( $F_t$ ) non contribuisce all'energia richiesta dalla lavorazione, tuttavia è importante conoscerne il valore poiché lo stelo dell'utensile, l'attrezzatura di fissaggio del pezzo e la macchina utensile devono essere sufficientemente rigidi per minimizzare le deformazioni causate da tale forza. Ad esempio, se la forza di repulsione è troppo elevata e la macchina utensile non è abbastanza rigida, l'utensile si allontanerà dalla superficie del pezzo. Questo spostamento causerà, a sua volta, la riduzione dell'effettiva profondità di passata, portando a una riduzione dell'accuratezza dimensionale del pezzo ed eventualmente all'insorgenza di vibrazioni. La forza di repulsione è stata disegnata verso il basso e dunque si assume che sia positiva ma non è detto che sia sempre così.

Si può dimostrare che la forza di repulsione può essere diretta verso l'alto (negativa) osservando le seguenti relazioni:

$$F_t = R \sin(\beta - \alpha) \quad [2.8]$$

e

$$F_t = F_c \sin(\beta - \alpha) \quad [2.9]$$

Poiché  $F_c$  è sempre positiva (vedi figura sopra), il segno di  $F_t$  può essere positivo oppure negativo. Pertanto, quando  $\beta > \alpha$ , il segno della  $F_t$  è positivo (verso il basso) e, per  $\beta < \alpha$ , è negativo (verso l'alto). In conclusione, la forza di repulsione sarà rivolta verso l'alto se l'angolo di spoglia superiore è molto elevato e/o l'attrito tra l'utensile ed il truciolo è basso. L'influenza della profondità di passata è ovvia, poiché all'aumentare di  $A_p$ ,  $R$  aumenta e quindi anche  $F_c$ . Ciò richiede maggiore energia per rimuovere l'ulteriore materiale associato alla maggiore profondità di passata.

Le variazioni di direzione e intensità della forza di repulsione sono importanti; in certe condizioni operative, tali variazioni possono portare a instabilità nella lavorazione, in particolare nel caso di macchine utensili poco rigide. Oltre a essere funzione della resistenza del materiale del pezzo, le forze di taglio vengono influenzate anche da altre variabili. Le prove sperimentali dimostrano che la forza di taglio ( $F_t$ ) aumenta all'aumentare della profondità di passata, al diminuire dell'angolo di spoglia e al diminuire della velocità. Un altro importante parametro è il raggio di raccordo del tagliente: maggiore è il raggio (e quindi più usurato è l'utensile), maggiore sarà la forza di taglio. L'evidenza sperimentale suggerisce che, per spessori di taglio nell'ordine di cinque o più volte il raggio

di raccordo, l'effetto dell'arrotondamento del tagliente sulle forze di taglio è trascurabile. La valutazione degli stati tensionali sul petto dell'utensile presenta notevoli difficoltà. Un primo problema è la determinazione accurata della lunghezza di contatto all'interfaccia utensile-truciolo. Tale lunghezza aumenta al diminuire dell'angolo di scorrimento, pertanto la lunghezza di contatto è funzione dell'angolo di spoglia superiore, della velocità di taglio e dei fenomeni di attrito all'interfaccia utensile-truciolo. Un secondo problema è la distribuzione non uniforme delle tensioni sul petto dell'utensile. È stato dimostrato, mediante analisi fotoelastica, che l'effettiva distribuzione delle tensioni è quella visibile nella Figura 2.7:

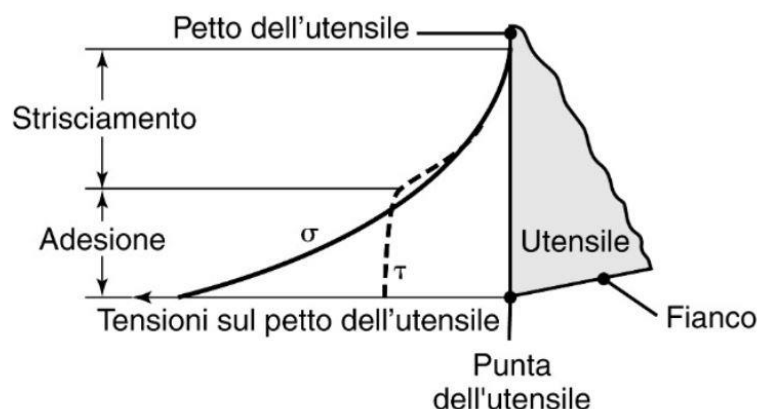


Figura 2.7: Rappresentazione schematica della distribuzione delle tensioni normale e tangenziale all'interfaccia utensile-truciolo.

Si noti che la tensione normale sul petto dell'utensile è massima in corrispondenza della sua punta per poi diminuire rapidamente verso la fine della lunghezza di contatto. La tensione tangenziale ha un andamento simile, ad eccezione del fatto che diventa costante per circa la metà della lunghezza di contatto utensile-truciolo. Questo comportamento può essere giustificato da fenomeni di adesione, per mezzo dei quali la tensione tangenziale raggiunge la tensione di snervamento a taglio del materiale del pezzo. Le zone con fenomeni di adesione sono state osservate sperimentalmente su alcuni trucioli.

## 2.4 Meccanica del taglio obliquo

A differenza di quanto visto fino ad ora nel modello bidimensionale, la maggior parte delle lavorazioni per asportazione utilizza geometrie dell'utensile tridimensionali (condizioni di taglio obliquo). La differenza fondamentale tra il taglio obliquo e quello ortogonale può essere analizzata nella figura seguente.

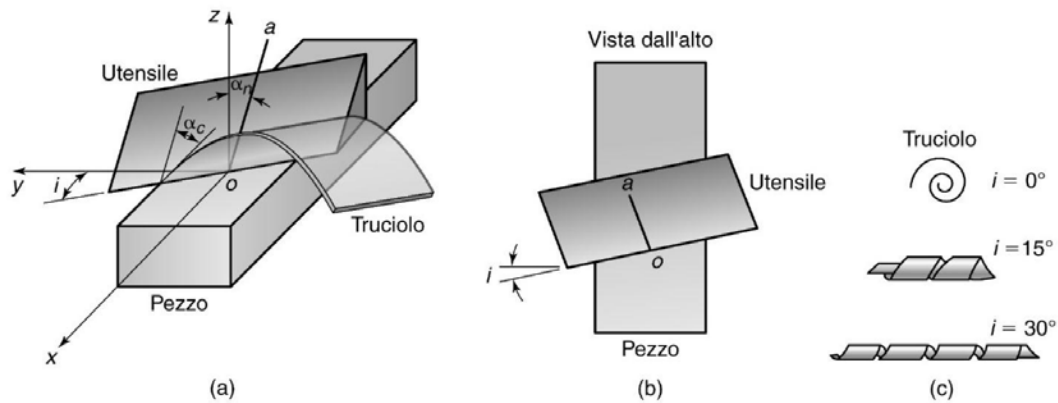


Figura 2.8: (a) Rappresentazione schematica del taglio obliquo. (b) Vista dall'alto. (c) Forma del truciolo in funzione dell'angolo di inclinazione.

Nel taglio ortogonale il tagliente è perpendicolare al movimento dell'utensile e il truciolo scorre sul petto nella stessa direzione in cui si muove l'utensile. Nel taglio obliquo, d'altra parte, il tagliente forma un angolo  $i$ , detto angolo di inclinazione. Come visibile nella figura appena riportata, il truciolo fluisce sul petto dell'utensile formando un angolo  $\alpha_c$  chiamato angolo di deflusso del truciolo, misurato nel piano del petto dell'utensile. L'angolo  $\alpha_n$  è l'angolo di spoglia superiore misurato nella sezione normale rispetto al tagliente (è una caratteristica fondamentale dell'utensile). Tale angolo è l'angolo compreso tra la normale alla superficie del pezzo lavorato  $oz$  e la direzione  $oa$  sul petto dell'utensile. Si noti che il materiale del pezzo si avvicina all'utensile con velocità  $V_c$  e lascia la superficie del pezzo, sotto forma di truciolo, alla velocità  $V_{truc}$ . L'angolo di spoglia superiore effettivo  $\alpha_e$ , misurato nel piano formato dalle due velocità, si può calcolare, sotto l'ipotesi (verificata sperimentalmente) che il truciolo si allontani con un angolo di deflusso  $\alpha_c$  pari all'angolo di inclinazione  $i$ , come:

$$\alpha_e = \sin^{-1}(\sin^{-1}(i) + \cos^2(i) * \sin(\alpha_n)) \quad [2.10]$$

Si noti che  $i$  e  $\alpha_n$  sono calcolati direttamente.

Importante notare che se  $i$  aumenta, aumenta il valore dell'angolo di spoglia superiore effettivo  $\alpha_e$  e quindi il truciolo diventa più lungo e sottile.

## 2.5 Aspetti termici

Come in tutte le altre lavorazioni, l'energia dissipata nelle operazioni per asportazione viene convertita in calore, che, a sua volta, fa aumentare la temperatura nella zona di lavoro. Conoscere l'aumento della temperatura è importante poiché tale aumento:



- a) Influenza negativamente la resistenza, la durezza e la resistenza ad usura dell'utensile.
- b) Provoca variazioni dimensionali nel pezzo lavorato, rendendo difficile il controllo dell'accuratezza dimensionale.
- c) Può causare danneggiamento termico della superficie lavorata, influenzando negativamente le sue proprietà e la durata a fatica.
- d) Introduce gradienti termici nella macchina utensile, causando distorsioni che influenzano negativamente l'accuratezza dimensionale.

La generazione di calore avviene nella zona di scorrimento primaria e nell'interfaccia utensile-truciolo, dove avvengono i fenomeni di scorrimento e attrito sul petto dell'utensile. Il calore, nel caso di utensile usurato, viene anche generato dallo sfregamento della punta dell'utensile sulla superficie lavorata.

Sono stati condotti vari studi sugli aspetti termici nelle lavorazioni per asportazione, basati su metodi di analisi dimensionale e dello scambio termico, usando anche dati sperimentali.

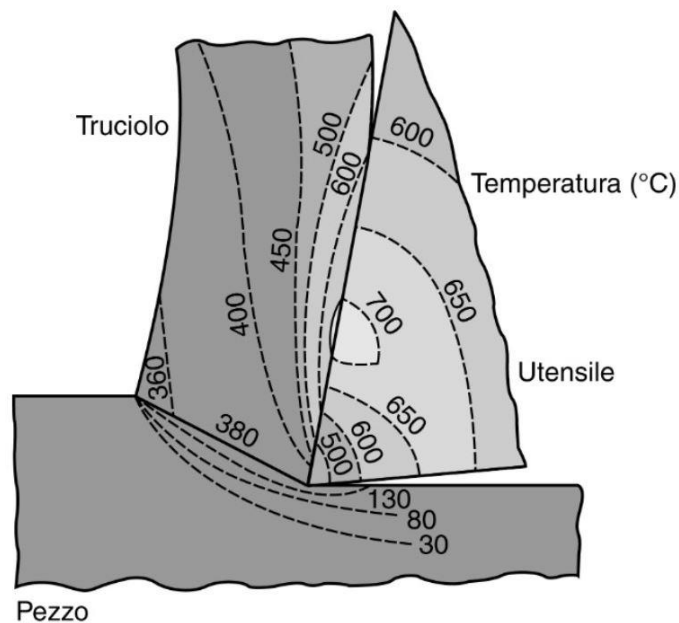


Figura 2.9: Distribuzione tipica della temperatura nella zona di taglio. Si noti la presenza di forti gradienti termici nell'utensile e nel truciolo mentre il pezzo ha una temperatura relativamente bassa.

Nonostante la figura precedente mostri forti gradienti di temperatura nella zona di taglio, la temperatura media nel caso di taglio ortogonale può essere approssimata come:

$$T = \frac{1.2 Y_f}{\rho c} \sqrt[3]{\frac{V_c A_p}{K}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad [2.11]$$

Con:

T: temperatura media dell'interfaccia utensile-truciolo

$Y_f$ : tensione di flusso del materiale del pezzo

$A_p$ : profondità di passata

$\rho c$ : calore specifico volumetrico (densità x calore specifico)

K: diffusività termica del pezzo (rapporto tra conducibilità termica e calore specifico volumetrico)

NOTA: le proprietà indicate dipendono dalla temperatura quindi bisogna inserire valori adeguati al livello di temperatura previsto.

NOTA: le proprietà sopra riportate sono relative al pezzo, infatti, è dimostrato che le proprietà termiche del materiale dell'utensile hanno un'importanza trascurabile rispetto a quelle del pezzo.

Il calore generato nel piano di scorrimento è funzione dell'energia specifica di taglio  $u_s$  e del calore specifico del materiale. Quindi, l'aumento di temperatura è maggiore nella lavorazione di materiali ad alta resistenza e a basso calore specifico, come evidente dalla relazione:

$$\Delta T = \frac{u_{totale}}{\rho c} \quad [2.12]$$

L'aumento di temperatura all'interfaccia utensile-truciolo è, ovviamente, funzione del coefficiente di attrito. L'usura del fianco rappresenta un ulteriore fattore di incremento della temperatura dovuto allo sfregamento tra utensile e superficie lavorata.

Nel caso della tornitura, la temperatura media può essere espressa con:

$$T \propto V_c^a f^b \quad [2.13]$$

con  $a$  e  $b$  costanti.

Utensile	a	b
Carburi metallici	0.2	0.125
Acciaio rapido	0.5	0.375

Tabella 2.2: Valori delle costanti a e b in funzione del tipo di utensile.

Le temperature e la loro distribuzione nella zona di taglio possono essere determinate in vari modi:

- a) Usando termocoppie incorporate nell'utensile o nel pezzo.
- b) Misurando la forza elettromotrice termica all'interfaccia truciolo-utensile.
- c) Usando un pirometro a reazione per misurare la radiazione infrarossa emessa dalla zona di taglio. In questo caso misuro solo la temperatura superficiale.

## **2.6 Processo di tornitura convenzionale CT**

Con il termine tornitura, in genere, ci si riferisce a tutti quei processi che prevedono la rotazione del pezzo durante la sua lavorazione. I processi di tornitura sono molto versatili e permettono di realizzare un'ampia varietà di forme. La principale caratteristica dei pezzi prodotti tramite tornitura è la loro forma assialsimmetrica, tale fattore, infatti, è legato al fatto che il pezzo ruota su sé stesso durante la lavorazione. Tali operazioni vengono condotte con diverse velocità di rotazione del pezzo, profondità di passata  $A_p$ , e avanzamento  $f$ , in funzione dei materiali del pezzo e dell'utensile, dell'accuratezza dimensionale e della finitura superficiale richieste e delle prestazioni della macchina utensile. Le operazioni di sgrossatura vengono condotte con l'obiettivo di asportare grandi quantità di materiale e tipicamente prevedono profondità di passata superiori a 0,5 mm e avanzamento nell'ordine di 0,2-2 mm/giro. Le operazioni di finitura, solitamente, utilizzano profondità di passata e avanzamenti inferiori. Nella maggior parte dei casi le lavorazioni per asportazione consistono in operazioni di sgrossatura per l'ottenimento della forma generale del pezzo, seguite da operazioni di finitura per il raggiungimento della geometria finale.

### **2.6.1 Parametri e forze di tornitura**

I principali parametri di taglio sono 3:

- Velocità di taglio  $V_c$  espressa in mm/min
- Profondità di passata espressa in mm
- Avanzamento (o feed) espresso in mm/giro

Le tre forze principali che agiscono sull'utensile sono:

- la forza di taglio ( $F_c$ )
- la forza radiale ( $F_r$ )
- la forza di avanzamento ( $F_t$ )

La forza di taglio agisce sulla punta dell'utensile e tende a flettere l'utensile. Si noti che tale forza è quella che fornisce l'energia richiesta dall'operazione di taglio. La forza radiale agisce lungo il raggio del pezzo e tende ad allontanare l'utensile dal pezzo. La forza di avanzamento agisce in direzione longitudinale, parallelamente alla direzione di avanzamento. Tali forze sono importanti per la progettazione delle macchine utensili ma anche per la valutazione della flessione degli utensili nel caso di lavorazioni di precisione.

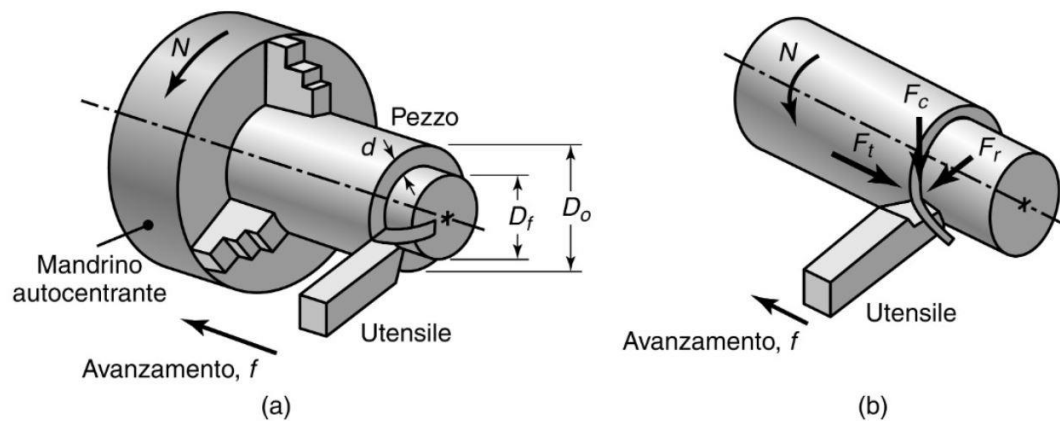


Figura 2.10: (a) Rappresentazione schematica di un'operazione di tornitura. (b) Rappresentazione delle forze agenti sull'utensile in tornitura.

## 2.6.2 Material removal rate MRR

Il MRR (Material Removal Rate) esprime il volume di materiale che viene asportato nell'unità di tempo, espresso in  $\text{mm}^3/\text{min}$ . Difatti per ogni giro del pezzo viene rimosso un anello di materiale con un'area della sezione trasversale pari al prodotto tra l'avanzamento  $f$  e la profondità di passata  $A_p$ . Il volume di tale anello è il prodotto dell'area della sezione per la circonferenza media dell'anello cioè  $2\pi \frac{R_{\text{inizio}} + R_{\text{fine}}}{2}$ .

Definendo la velocità di rotazione del pezzo come  $N$  espressa in giri/min allora si ha:

$$MRR = \pi * D_{\text{medio}} * A_p * f * N \quad [2.14]$$

Il tempo richiesto per la lavorazione di un tratto di lunghezza  $l$  è:

$$t = \frac{l}{f N} \quad [2.15]$$

Tale tempo non comprende i tempi richiesti per l'avvicinamento o l'allontanamento dell'utensile dal pezzo.

## 2.7 Processo di tornitura assistita da vibrazione ultrasonica UVT

La tornitura assistita da vibrazione ultrasonica dell'utensile UVT è un processo di lavorazione ancora oggi in via di esplorazione e viene utilizzata con lo scopo di texturizzare le superfici. Con questa tecnica, la vibrazione ad alta frequenza imposta al tagliente ha importanti conseguenze sia sulla superficie strutturata che sul processo di taglio stesso. È inoltre possibile lavorare materiali fragili quali vetro e ceramica o materiali difficili come il titanio con il vantaggio di diminuire l'usura dell'utensile e quindi di aumentarne il tempo di vita grazie al fatto che la vibrazione permette al tagliente di non essere in contatto costante con il pezzo da lavorare. Oltre a diminuire le temperature in gioco, è possibile anche raggiungere miglioramenti nelle proprietà meccaniche e ottiche. Il modello di superficie dato dall' UVT ha riscontrato un grande interesse nei sistemi tribologici, dove le superfici hanno un ruolo chiave. Infatti, le micro-fossette create dopo l'asportazione di materiale, possono avere un duplice vantaggio:

1. fungere da serbatoio di lubrificante nel caso in cui il pezzo lavorato debba svolgere una funzione in cui è richiesta un elevato tasso di lubrificazione;
2. aumentare la bagnabilità del materiale così da incrementare lo spessore di rivestimento sulla superficie.

In tale tipologia di lavorazione meccanica, il processo di taglio convenzionale è unito a vibrazioni ad alta frequenza e bassa ampiezza per raggiungere i risultati appena indicati. Le frequenze vanno da pochi kilohertz a circa 40 kHz con una predominanza di sistemi che lavorano intorno a 20-30 kHz, mentre le ampiezze variano da qualche micron fino a 100  $\mu\text{m}$ . La lavorazione assistita da vibrazioni si può suddividere in due modelli a seconda della frequenza di vibrazione:

1. **Sistemi risonanti:** se un trasduttore piezoelettrico genera vibrazioni corrispondenti alla frequenza naturale di un sonotrodo a cui è collegato;
2. **Sistemi non risonanti:** in cui i segnali di tensione sinusoidali fanno vibrare il trasduttore ad una frequenza inferiore a quella naturale del sistema.

I sistemi risonanti offrono solo frequenze discrete, inoltre la torretta produce ampiezze di spostamento inferiori a 6  $\mu\text{m}$ , cento volte inferiori a quelle prodotte dalle torrette dei sistemi non risonanti.

Un'ulteriore suddivisione di queste due classi può essere fatta a seconda del movimento dell'inserto vibrante:

1. **movimento lineare** (1D, lavorazione monodimensionale): il sistema lavora su un piano parallelo rispetto al substrato del pezzo, nella stessa direzione della forza di taglio.
2. **movimento ellittico** (2D, lavorazione bidirezionale): l'asse maggiore dell'ellisse è parallelo alla forza di taglio mentre il minore è parallelo alla forza di spinta. In questo caso l'ampiezza della vibrazione nelle due direzioni può o meno corrispondere.
3. **Movimento tridimensionale** (3D-VT)

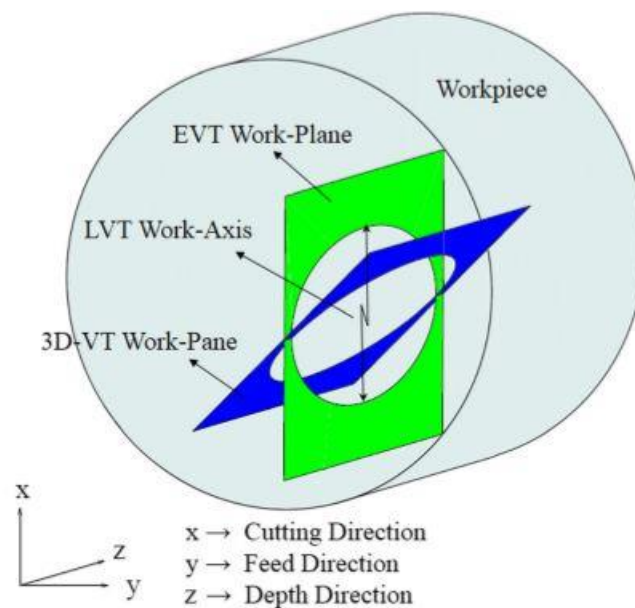


Figura 2.11: Illustrazione dei piani di lavoro delle varie tipologie di lavorazione UVT.

### 2.7.1 Processo di tornitura assistita da vibrazione ultrasonica 1-D

La metodologia UVT 1D è accompagnata da un sistema di coordinate che prevede l'asse X normale rispetto la superficie del pezzo e giace lungo la direzione della profondità di taglio DoC e di vibrazione dell'utensile al contempo. L'asse Y si trova nella direzione di taglio principale, ed infine l'asse Z coincide con la direzione di avanzamento.

Lo strumento vibra armonicamente in una traiettoria lineare, lungo la direzione di taglio nell'asse Y. Una volta fissata la frequenza di vibrazione  $f$ , è possibile delineare una velocità definita velocità critica di taglio. Lo spostamento della punta dello strumento in funzione del tempo può essere descritto dalla seguente equazione:

$$y(t) = A \sin(\omega t) + V_c t \quad [2.16]$$

con:

A: ampiezza di vibrazione;

V<sub>c</sub>: velocità di taglio;

ω: velocità angolare;

f: frequenza di vibrazione [ $\omega = 2\pi f$ ]

Per ottenere la velocità dell'utensile, l'equazione che descrive la posizione è derivata come segue:

$$y'(t) = \omega A \cos(\omega t) + V_c \quad [2.17]$$

Dall'equazione precedente è possibile ottenere la formulazione della velocità di taglio critica precedentemente definita V<sub>c,crit</sub>:

$$V_{c,crit} = 2\pi f A \quad [2.18]$$

Il taglio è continuo se la velocità di taglio V<sub>c</sub> è maggiore di quella critica V<sub>c,crit</sub> mentre diventa intermittente se si verifica: V<sub>c</sub> < V<sub>c,crit</sub>.

Nell'ipotesi di taglio continuo si verifica una variazione armonica della velocità relativa tra l'utensile e il pezzo.

Come ci si può aspettare dall'osservazione dell'espressione y(t), si intuisce che nella direzione di taglio, cioè quella di vibrazione nel caso di UVT-1D, il profilo del pezzo lavorato avrà un andamento sinusoidale. La distanza tra due picchi/valli successivi dipende dalla velocità di taglio V<sub>c</sub> e dalla frequenza f.

$$d_{gap} = \text{dist. tra due valli} = 10^6 * \frac{V_c}{60 * freq} \quad [\mu m] \quad [2.19]$$

Con:

V<sub>c</sub> = velocità taglio [m/min]

freq = frequenza ultrasonica usata [Hz]

Un altro parametro per caratterizzare il ciclo di lavorazione assistito da vibrazioni è il rapporto di velocità orizzontale HSR, ovvero il rapporto tra la velocità del pezzo e la velocità dell'utensile:

$$HSR = \frac{V_c}{V_{c,crit}} \quad [2.20]$$

Per la lavorazione non interrotta il valore HSR è pari o superiore ad uno (HSR ≥ 1).





# Capitolo 3

## Preparazione dei campioni

Questo capitolo spiegherà brevemente come si sono ottenuti i campioni che verranno analizzati nel corso della tesi. Inoltre, verrà redatta una tabella con le sigle che poi si useranno nel corso della trattazione per semplicità.

### 3.1 Lega AZ31 ricotta

La barra di AZ31, prima di essere tornita, subisce una ricottura in forno a 340°C per 3 ore, seguita da un raffreddamento lento a temperatura ambiente.

Il trattamento termico permette di ottenere:

1. **equilibrio strutturale:** trasformazione delle fasi metastabili;
2. **equilibrio meccanico:** riduzione delle tensioni residue interne, incrudimento compreso.

Con tale tecnica si otterrà un materiale più omogeneo poiché si sono eliminati tutti i difetti della struttura cristallina, quindi, viene reso più lavorabile.

### 3.2 Lavorazione meccanica

La barra di AZ31 ricotta ha forma cilindrica e presenta un diametro iniziale di 30 mm. La scelta finale del diametro del pezzo lavorato è estremamente libera ed ininfluente, ma per facilitare prove successive (spiegate in seguito) si decide di realizzare campioni cilindrici di diametro 25.5mm e altezza 6mm. Per realizzare tali campioni, verrà utilizzato un tornio a controllo numerico Mori Seiki™ NL-1500 CNC munito di inserto in carburo di tungsteno rivestito DCGT 11 T3 08-UM GC1105, fornito da Sandvik Coromant™.

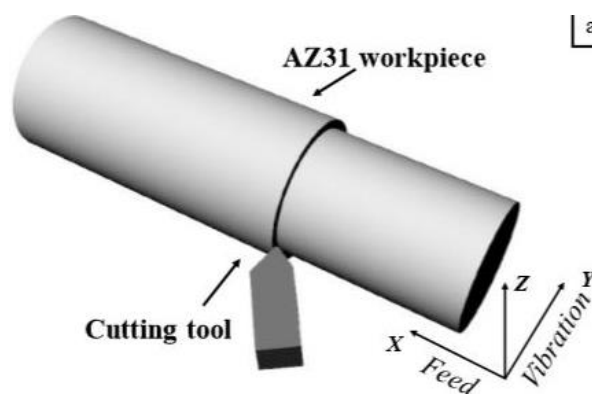




Figura 3.1: Setup sperimentale per tornitura ad ultrasuoni.

### **3.3 Vantaggi nell'uso di una tecnica di lavorazione ibrida**

L'applicazione di sistemi di raffreddamento è molto diffusa nell'ambito delle lavorazioni meccaniche poiché porta a numerosi vantaggi sia in termini puramente tecnici che economici.

L'uso di un sistema di raffreddamento, in particolare, quello criogenico consente di ridurre drasticamente le temperature in gioco durante i processi di taglio. In letteratura, è riportato che l'uso di raffreddamento criogenico mediante azoto liquido comporta una riduzione delle temperature, rispetto alla corrispondente condizione di lavorazione a secco, di circa il 50%. Chiaramente, l'entità della riduzione della temperatura dipende molto dal tipo di tornitura utilizzata, infatti è noto che la tornitura assistita da vibrazione ultrasonica è caratterizzata da temperature minori rispetto alla corrispondente tornitura convenzionale, dai parametri di taglio come già ampiamente descritto nel corso della trattazione e dal tipo di materiale scelto. In linea di massima, il range di diminuzione della temperatura è compreso tra il 40 e 60% in base alle condizioni imposte. Temperature inferiori comportano una miglior accuratezza dimensionale (come confermato in seguito dalle profilometrie), minor adesione di materiale sia sull'utensile sia sul pezzo lavorato e minor usura del tagliente stesso. Ciò comporta che questo dovrà essere cambiato meno frequentemente con conseguenti vantaggi sia in termini di costi (maggior numero di pezzi prodotti con lo stesso utensile) che in termini di stop della catena produttiva per manutenzione (diminuzione tempi morti).

Inoltre, abbassando notevolmente la temperatura si ha un cambiamento della microstruttura del materiale lavorato. In particolare, viene ridotta la dimensione media del grano. Nel nostro caso, questo è un aspetto non trascurabile in quanto una dimensione inferiore del

grano comporta una riduzione della velocità di corrosione del materiale stesso quindi si avrà una resistenza maggiore in ambiente fisiologico a parità di spessore e tipo di rivestimento.

### 3.4 Progettazione del sistema di raffreddamento

Per la tornitura assistita da vibrazione ultrasonica si è utilizzato un utensile non commerciale. Questo, però, non poteva essere utilizzato con alcun tipo di raffreddamento poiché era sprovvisto di un sistema di ugelli che permettessero di convogliare il flusso di refrigerante nella zona desiderata.

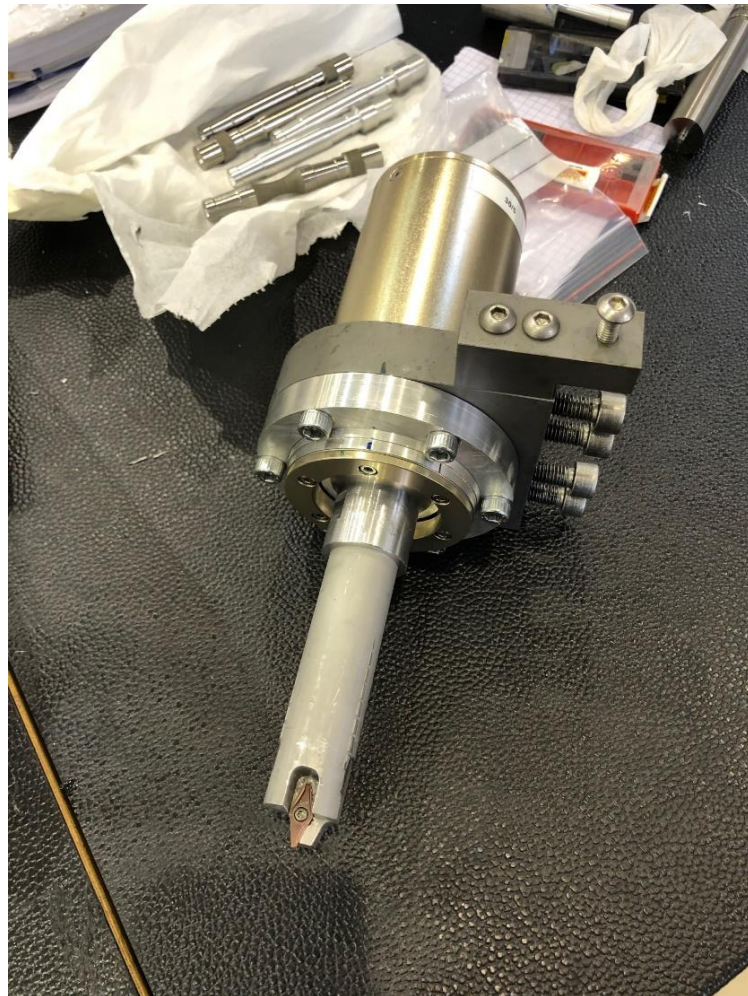


Figura 3.2: Utensile per tornitura ad ultrasuoni non raffreddato.

Si è reso necessario progettare un sistema di ugelli che fosse compatibile con il dispositivo in figura e che avesse determinate caratteristiche:

1. Compattezza: non deve influire sul corretto funzionamento del tornio;
2. Facilità di montaggio e smontaggio;

3. Ampia possibilità di regolare la posizione degli ugelli per direzionare con precisione il getto di azoto;
4. Possibilità di cambiare tagliente senza smontare il sistema;
5. Leggerezza

Date queste restrizioni, in particolare quella dell'elevata possibilità di regolazione, è stata subito scartata l'ipotesi di un sistema monopezzo attaccato direttamente alla torretta del tornio (scelta comunemente utilizzata per la maggior parte degli inserti da taglio).

Il sistema realizzato è quindi composto da due pezzi, uno è il supporto vero e proprio degli ugelli mentre l'altro è un braccio che collega l'inserto al sistema di ugelli. Tale braccio è stato dotato di due asole così da garantire numerose possibilità di personalizzazione del sistema.

Per quanto riguarda gli ugelli, si è deciso di usare due ugelli in rame uno in direzione della superficie appena lavorata e l'altro puntato sul petto dell'utensile (zona soggetta alle temperature massime). Il risultato è il seguente:

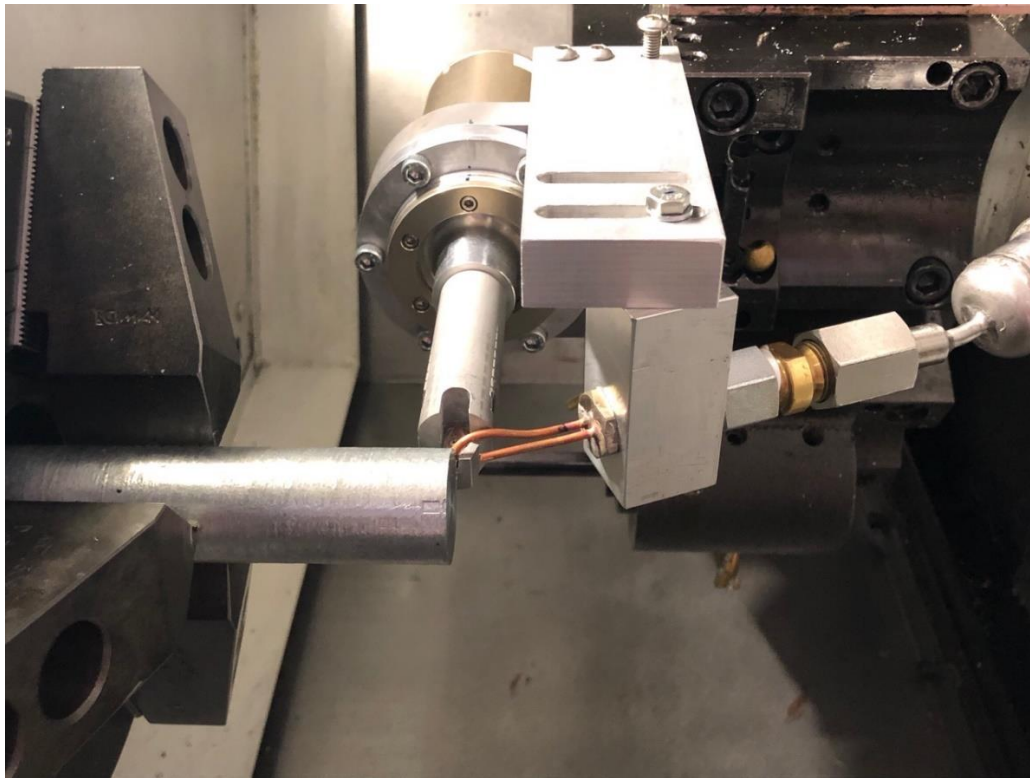


Figura 3.3: Inserto per UVT con sistema di raffreddamento montato.

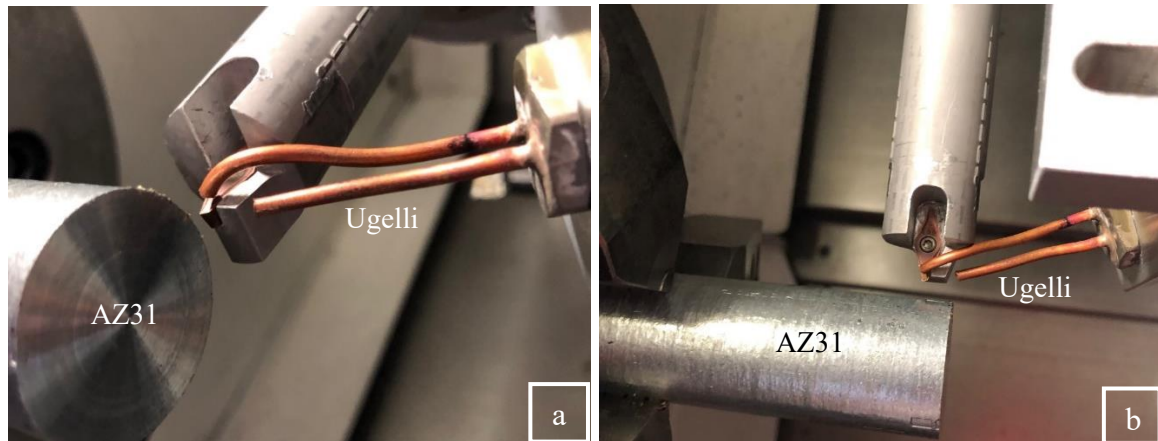


Figura 3.4: Disposizione degli ugelli vista laterale (a) e superiore (b).

### 3.5 Specifiche campioni realizzati

Per la realizzazione dei campioni si è deciso di mantenere il feed costante pari a 0.05 mm/giro e costante sarà mantenuta anche la frequenza di vibrazione per i campioni UVT/CUVT pari 30 kHz. Quindi, oltre al tipo di tornitura applicata, saranno variati velocità di taglio  $V_c$  e profondità di passata  $A_p$ . In ultimo è stato realizzato un campione carteggiato e lucidato a mano con lo scopo di ottenere la più bassa rugosità superficiale possibile.

I casi che saranno in seguito esaminati sono:

Sigla campione	Campione	$V_c$ [m/min]	$A_p$ [mm]	Lavorazione
S1	$V_{c100\_A_p0.1\_CT}$	100	0.1	CT
S2	$V_{c100\_A_p0.1\_UVT}$	100	0.1	UVT
S2C	$V_{c100\_A_p0.1\_CUVT}$	100	0.1	CUVT
S3	$V_{c200\_A_p0.05\_CT}$	100	0.05	CT
S4	$V_{c200\_A_p0.05\_UVT}$	100	0.05	UVT
S4C	$V_{c100\_A_p0.05\_CUVT}$	100	0.05	CUVT
S5	$V_{c100\_A_p0.1\_CT}$	200	0.1	CT
S6	$V_{c100\_A_p0.1\_UVT}$	200	0.1	UVT
S6C	$V_{c200\_A_p0.1\_CUVT}$	200	0.1	CUVT
S7	$V_{c200\_A_p0.05\_CT}$	200	0.05	CT
S8	$V_{c200\_A_p0.05\_UVT}$	200	0.05	UVT
S8C	$V_{c200\_A_p0.05\_CUVT}$	200	0.05	CUVT
Spolished	Polished	Carteggiato e lucidato a mano		

Tabella 3.1: Relazioni parametri di taglio, tipo di lavorazione e sigla del campione.

Solo per i campioni CUVT è stato usato azoto liquido come refrigerante mentre negli altri casi è stata condotta una lavorazione a secco.

Una volta realizzati i campioni sono stati subito lavati in etanolo per 3 minuti in un bagno ad ultrasuoni.

# Capitolo 4

## Caratterizzazione meccanica dei campioni lavorati

Questo capitolo vuole illustrare le variazioni dei parametri superficiali che si sono ottenuti con le varie lavorazioni e gli influssi dei parametri di taglio (velocità di taglio e profondità di passata). Inoltre, saranno analizzati i difetti superficiali che si sono venuti a formare sulla superficie a seguito della lavorazione meccanica.

### 4.1 Parametri di superficie analizzati

Si sono valutati numerosi parametri superficiali con lo scopo di individuare quali di questi potessero fornire indicazioni utili sulla lavorazione adottata e sui parametri di taglio scelti. In particolare, lo scopo è quello di individuare quei parametri che possono fornire informazioni sull'andamento della bagnabilità della superficie lavorata, cioè indicare se un campione è più bagnabile di un altro limitandosi alla valutazione del valore del parametro stesso.

I parametri inizialmente considerati appartengono alla normativa ISO 25178 e sono:

1.  $S_a$  [ $\mu\text{m}$ ]: media aritmetica dell'altezza dei picchi
2.  $S_{ku}$ : kurtosis
3.  $S_{mean}$  [ $\mu\text{m}$ ]
4.  $S_p$  [ $\mu\text{m}$ ]: altezza massima dei picchi
5.  $S_q$  [ $\mu\text{m}$ ]: radice quadrata dell'altezza media
6.  $S_{sk}$ : asimmetria della distribuzione delle altezze
7.  $S_v$  [ $\mu\text{m}$ ]: altezza massima delle valli
8.  $S_z$  [ $\mu\text{m}$ ]: altezza massima della superficie
9.  $S_{pk}$  [ $\mu\text{m}$ ]: altezza del picco ridotta
10.  $S_{vk}$  [ $\mu\text{m}$ ]: profondità della valle ridotta
11.  $S_{qd}$  [ $^\circ/\mu\text{m}$ ]: radice quadrata del gradiente medio di superficie
12.  $S_{dr}$  [%]: rapporto superficie sviluppata

Si sono inoltre considerati i parametri della normativa EUR15178N:

13.  $S_{sc}$  [ $1/\text{mm}$ ]: curvatura media all'apice
14.  $S_{ds}$  [ $1/\text{mm}^2$ ]: numero di picchi per unità di superficie

Per ognuno dei nove campioni prodotti sono stati calcolati questi parametri. Sono state campionate 3 aree di uguale estensione per ogni campione, ogni area analizzata ha fornito un valore dei parametri sopra ed infine sono stati calcolati media e deviazione standard.

Le tabelle sotto riportano i valori medi dei parametri analizzati per ogni coppia di campioni.

<b>Parametro</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	0,49	0,85
Sku	2,27	2,96
Smean [ $\mu\text{m}$ ]	0,00	0,00
Sp [ $\mu\text{m}$ ]	2,16	6,31
Sq [ $\mu\text{m}$ ]	0,60	1,06
Ssk	0,23	0,40
Sv [ $\mu\text{m}$ ]	2,73	3,49
Sz [ $\mu\text{m}$ ]	4,89	9,81
Spk [ $\mu\text{m}$ ]	0,45	1,20
Svk [ $\mu\text{m}$ ]	0,36	0,55
Sqd [ $^{\circ}/\mu\text{m}$ ]	0,11	0,22
Sdr [%]	0,61	2,23
Ssc [ $1/\text{mm}$ ]	56,55	214,67
Sds [ $1/\text{mm}^2$ ]	6676	7618,33

<b>Parametro ISO</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	0,48	0,84
Sku	2,54	3,17
Smean [ $\mu\text{m}$ ]	0,00	0,01
Sp [ $\mu\text{m}$ ]	3,02	18,19
Sq [ $\mu\text{m}$ ]	0,60	1,00
Ssk	0,34	0,46
Sv [ $\mu\text{m}$ ]	2,33	7,72
Sz [ $\mu\text{m}$ ]	5,35	25,91
Spk [ $\mu\text{m}$ ]	0,67	0,92
Svk [ $\mu\text{m}$ ]	0,39	0,48
Sqd [ $^{\circ}/\mu\text{m}$ ]	0,12	0,27
Sdr [%]	0,72	3,22
Ssc [ $1/\text{mm}$ ]	53,66	386,87
Sds [ $1/\text{mm}^2$ ]	6614	10109

<b>Parametri ISO</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	0,35	0,86
Sku	3,10	2,42
Smean [ $\mu\text{m}$ ]	0,00	0,00
Sp [ $\mu\text{m}$ ]	3,71	4,99
Sq [ $\mu\text{m}$ ]	0,43	1,03
Ssk	0,51	0,02
Sv [ $\mu\text{m}$ ]	3,52	4,82
Sz [ $\mu\text{m}$ ]	7,23	9,81
Spk [ $\mu\text{m}$ ]	0,51	0,62
Svk [ $\mu\text{m}$ ]	0,24	0,69



Sqd [ $^{\circ}/\mu\text{m}$ ]	0,10	0,21
Sdr [%]	0,48	1,96
Ssc [1/mm]	50,61	170
Sds[1/mm <sup>2</sup> ]	7281	9748

<b>Parametri</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	0,32	1,16
Sku	3,46	2,30
Smean [ $\mu\text{m}$ ]	0,00	0,00
Sp [ $\mu\text{m}$ ]	5,66	7,16
Sq [ $\mu\text{m}$ ]	0,41	1,40
Ssk	0,71	0,22
Sv [ $\mu\text{m}$ ]	2,15	4,40
Sz [ $\mu\text{m}$ ]	7,81	11,56
Spk [ $\mu\text{m}$ ]	0,70	0,74
Svk [ $\mu\text{m}$ ]	0,23	1,11
Sqd [ $^{\circ}/\mu\text{m}$ ]	0,10	0,19
Sdr [%]	0,48	1,74
Ssc [1/mm]	47,84	156,33
Sds[1/mm <sup>2</sup> ]	6831	9010

Tabella 4.1: Confronto dei valori medi tra campioni CT e UVT con uguali parametri di taglio di tutti i parametri analizzati.

Siccome si vuole vedere quali parametri danno un'idea chiara dei benefici dell'UVT si trascurano quei parametri che forniscono risultati altalenanti, in particolare vengono trascurati:

1. Sku
2. Smean [ $\mu\text{m}$ ]
3. Ssk

Tolti questi primi parametri, si analizza la deviazione standard dei restanti. In particolare, siccome si vuole un parametro unico per ogni campione, allora si trascurano quei parametri che hanno quasi sempre riportato una deviazione standard maggiore di 0,2.

<b>Campione</b>	<b>Parametri ISO</b>	<b>Media</b>	<b>Std</b>
S1	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	0,49	0,00
	<b>Sp [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>2,16</b>	<b>0,88</b>
	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	0,60	0,01
	<b>Sv [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>2,73</b>	<b>0,25</b>
	<b>Sz [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>4,89</b>	<b>1,07</b>
	Spk [ $\mu\text{m}$ ]	0,45	0,05
	Svk [ $\mu\text{m}$ ]	0,36	0,01
	Sqd [ $^{\circ}/\mu\text{m}$ ]	0,11	0,00

	Sdr [%]	0,61	0,03
	Ssc [1/mm]	56,55	3,05
	Sds [1/mm <sup>2</sup> ]	6776	279
S2	Sa [μm]	0,85	0,02
	<b>Sp [μm]</b>	<b>6,31</b>	<b>1,43</b>
	Sq [μm]	1,06	0,02
	<b>Sv [μm]</b>	<b>3,49</b>	<b>0,52</b>
	<b>Sz [μm]</b>	<b>9,81</b>	<b>1,89</b>
	Spk [μm]	1,20	0,03
	Svk [μm]	0,55	0,04
	Sqd [°/μm]	0,22	0,00
	Sdr [%]	2,23	0,06
	Ssc [1/mm]	214,67	8,09
	Sds [1/mm <sup>2</sup> ]	7618	313
S3	Sa [μm]	0,48	0,00
	<b>Sp [μm]</b>	<b>3,02</b>	<b>1,81</b>
	Sq [μm]	0,60	0,00
	<b>Sv [μm]</b>	<b>2,33</b>	<b>0,21</b>
	<b>Sz [μm]</b>	<b>5,35</b>	<b>1,83</b>
	Spk [μm]	0,67	0,05
	Svk [μm]	0,39	0,05
	Sqd [°/μm]	0,12	0,00
	Sdr [%]	0,72	0,01
	Ssc [1/mm]	53,66	1,87
	Sds [1/mm <sup>2</sup> ]	6614	466
S4	Sa [μm]	0,84	0,01
	<b>Sp [μm]</b>	<b>18,19</b>	<b>2,77</b>
	Sq [μm]	1,00	0,01
	<b>Sv [μm]</b>	<b>7,72</b>	<b>6,72</b>
	<b>Sz [μm]</b>	<b>25,91</b>	<b>4,00</b>
	Spk [μm]	0,92	0,05
	Svk [μm]	0,48	0,01
	Sqd [°/μm]	0,27	0,00
	Sdr [%]	3,22	0,11
	Ssc [1/mm]	386,87	26,73
	Sds [1/mm <sup>2</sup> ]	10109	108
S5	Sa [μm]	0,35	0,00
	<b>Sp [μm]</b>	<b>3,71</b>	<b>2,03</b>
	Sq [μm]	0,43	0,00
	<b>Sv [μm]</b>	<b>3,52</b>	<b>2,10</b>
	<b>Sz [μm]</b>	<b>7,23</b>	<b>1,54</b>
	Spk [μm]	0,51	0,02
	Svk [μm]	0,24	0,00
	Sqd [°/μm]	0,10	0,00
	Sdr [%]	0,48	0,00
	Ssc [1/mm]	50,61	2,83

	Sds [1/mm <sup>2</sup> ]	7281	95
S6	Sa [μm]	0,86	0,02
	Sp [μm]	4,99	1,38
	Sq [μm]	1,03	0,03
	Sv [μm]	4,82	0,82
	Sz [μm]	9,81	2,06
	Spk [μm]	0,62	0,02
	Svk [μm]	0,69	0,06
	Sqd [°/μm]	0,21	0,01
	Sdr [%]	1,96	0,18
	Ssc [1/mm]	170,00	16,96
	Sds [1/mm <sup>2</sup> ]	5695	102
S7	Sa [μm]	0,32	0,01
	Sp [μm]	5,66	3,90
	Sq [μm]	0,41	0,01
	Sv [μm]	2,15	1,10
	Sz [μm]	7,81	3,84
	Spk [μm]	0,70	0,03
	Svk [μm]	0,23	0,06
	Sqd [°/μm]	0,10	0,01
	Sdr [%]	0,48	0,05
	Ssc [1/mm]	47,84	2,28
	Sds [1/mm <sup>2</sup> ]	6831	563
S8	Sa [μm]	1,16	0,05
	Sp [μm]	7,16	2,72
	Sq [μm]	1,40	0,05
	Sv [μm]	4,40	0,16
	Sz [μm]	11,56	2,59
	Spk [μm]	0,74	0,05
	Svk [μm]	1,11	0,13
	Sqd [°/μm]	0,19	0,00
	Sdr [%]	1,74	0,06
	Ssc [1/mm]	156,33	8,13
	Sds [1/mm <sup>2</sup> ]	9010	186
S_polished	Sa [μm]	0,13	0,01
	Sp [μm]	4,40	2,34
	Sq [μm]	0,17	0,01
	Sv [μm]	1,74	0,42
	Sz [μm]	6,14	2,70
	Spk [μm]	0,26	0,03
	Svk [μm]	0,15	0,01
	Sqd [°/μm]	0,06	0,01
	Sdr [%]	0,15	0,03
	Ssc [1/mm]	125,42	43,00
	Sds [1/mm <sup>2</sup> ]	1523	858

Tabella 4.2: Media e deviazione standard dei parametri ISO e EUR15178N considerati. Quelli evidenziati in rosso sono stati scartati.

I parametri evidenziati in rosso nella tabella precedente sono stati scartati a causa del loro alto valore della deviazione standard. Come ci si poteva aspettare, i parametri scartati sono parametri locali e non mediati e quindi fortemente influenzati da eventuali difetti derivanti dalla lavorazione meccanica.

Le ultime due tabelle riportano i valori di media e deviazione standard per i parametri della normativa EUR15178N. In questo caso non si è applicato il criterio di accettabilità basato sul valore della deviazione standard minore di 0,2. Le misure sono state tutte accettate poiché, comunque, il valore medio ottenuto è di gran lunga maggiore alle deviazioni standard riscontrate. Importante è far notare che dei parametri selezionati in precedenza ci sono parametri che non danno informazioni utili sulla texture creata sul pezzo (anche se ne sono influenzati) mentre altri riescono ad illustrarne le caratteristiche.

Parametri che non danno informazioni dirette sulla texture sono:

1. Sa [ $\mu\text{m}$ ]
2. Sq [ $\mu\text{m}$ ]
3. Spk [ $\mu\text{m}$ ]
4. Svk [ $\mu\text{m}$ ]

Mentre i parametri specifici della texture e quindi i più interessati per questa tesi sono:

1. Sqd [ $^{\circ}/\mu\text{m}$ ]
2. Sdr [%]
3. Ssc [1/mm]
4. Sds [1/mm<sup>2</sup>]

Per i campioni CUVT sono stati considerati gli stessi parametri, in particolare, i risultati ottenuti sono stati:

<b>Campione</b>	<b>Parametri ISO</b>	<b>Media</b>	<b>Std</b>
S2C	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	1,62	0,02
	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	1,96	0,02
	Spk [ $\mu\text{m}$ ]	1,75	0,05
	Svk [ $\mu\text{m}$ ]	1,05	0,02
	Sqd [ $^{\circ}/\mu\text{m}$ ]	0,56	0,00
	Sdr [%]	12,22	0,16
	Sds [1/mm <sup>2</sup> ]	13165	339
	Ssc [1/mm]	1064,00	1,73
S4C	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	1,78	0,02
	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	2,14	0,03
	Spk [ $\mu\text{m}$ ]	2,08	0,20
	Svk [ $\mu\text{m}$ ]	1,02	0,09
	Sqd [ $^{\circ}/\mu\text{m}$ ]	0,66	0,00
	Sdr [%]	16,50	0,16
	Sds [1/mm <sup>2</sup> ]	14577	760
	Ssc [1/mm]	1236,67	107,13
S6C	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	2,42	0,04

	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	2,77	0,04
	Spk [ $\mu\text{m}$ ]	1,04	0,03
	Svk [ $\mu\text{m}$ ]	0,76	0,02
	Sqd [ $^\circ/\mu\text{m}$ ]	0,46	0,01
	Sdr [%]	8,43	0,27
	Sds [ $1/\text{mm}^2$ ]	8546	139
	Ssc [ $1/\text{mm}$ ]	1079,27	82,92
S8C	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	2,17	0,04
	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	2,57	0,05
	Spk [ $\mu\text{m}$ ]	1,64	0,08
	Svk [ $\mu\text{m}$ ]	1,07	0,01
	Sqd [ $^\circ/\mu\text{m}$ ]	0,46	0,02
	Sdr [%]	8,39	0,56
	Sds [ $1/\text{mm}^2$ ]	9615	511
	Ssc [ $1/\text{mm}$ ]	925,97	31,46

Tabella 4.3: Media e deviazione standard dei parametri ISO e EUR15178N considerati per CUVT.

Per apprezzare meglio gli andamenti dei parametri appena illustrati, si è ritenuto necessario creare grafici che mettessero a confronto tutti i campioni analizzati, in particolare, i campioni CT, UVT e CUVT con le stesse impostazioni di taglio. Per una più facile comprensione, i grafici sono stati realizzati con lo stesso layout e i campioni vi si sono inseriti seguendo sempre lo stesso ordine.

Grafici dei parametri non specifici della texture:

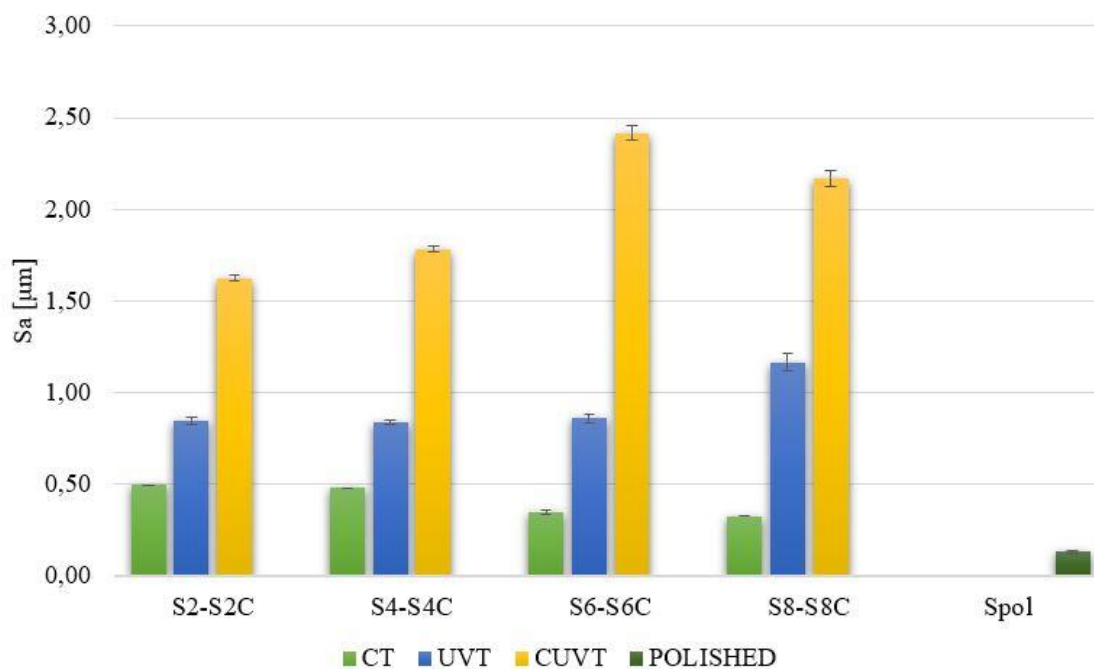


Figura 4.1: Grafico confronto parametro Sa per tutti i campioni.

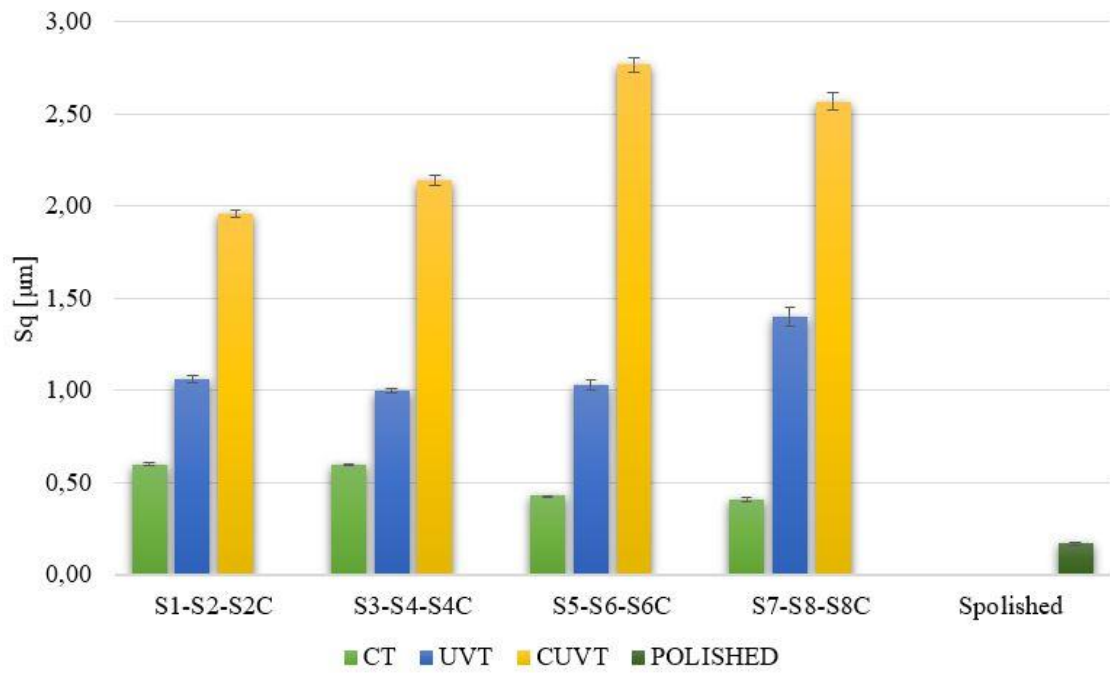


Figura 4.2: Grafico confronto parametro Sq per tutti i campioni.

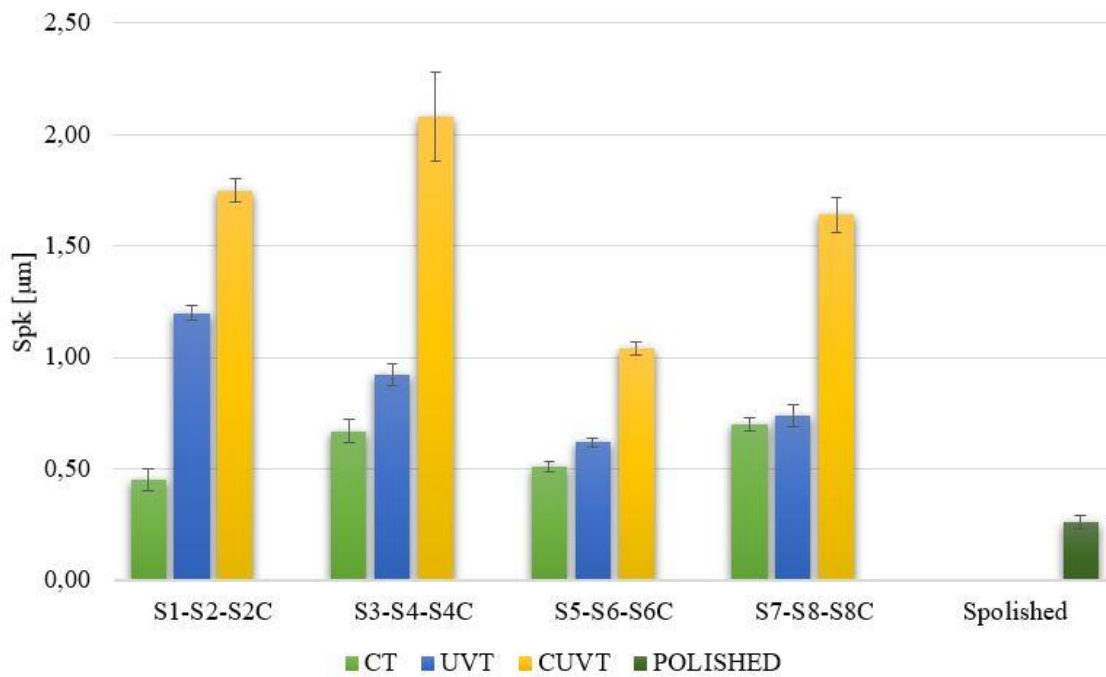


Figura 4.3: Grafico confronto parametro Spk per tutti i campioni.

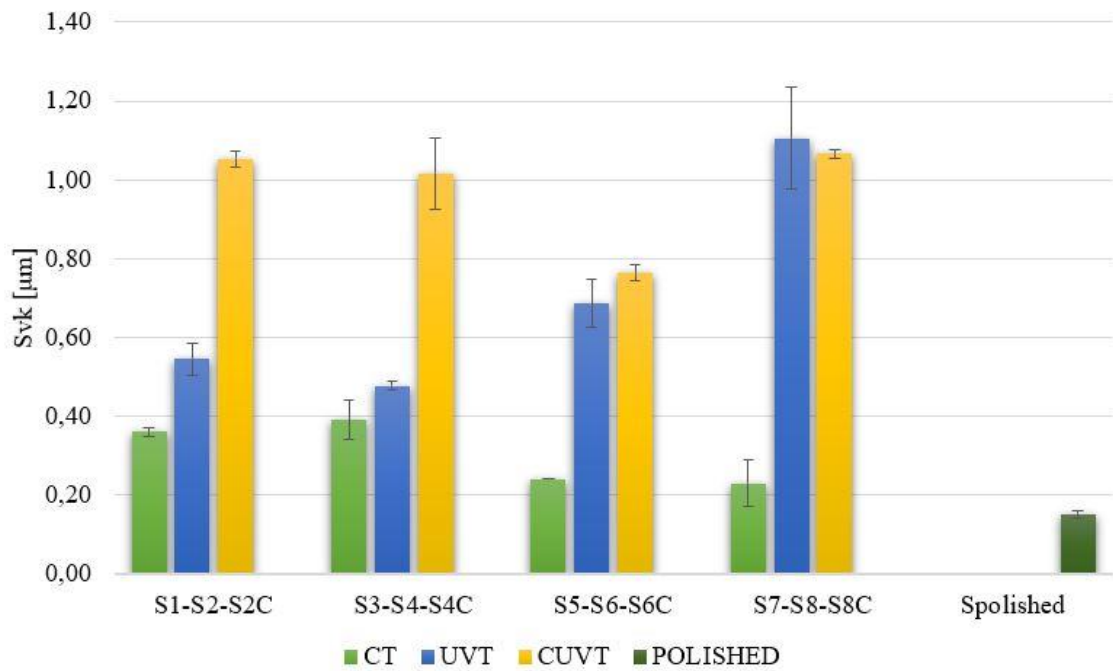


Figura 4.4: Grafico confronto parametro SvK per tutti i campioni.

Per i parametri specifici di texture, i grafici sono:

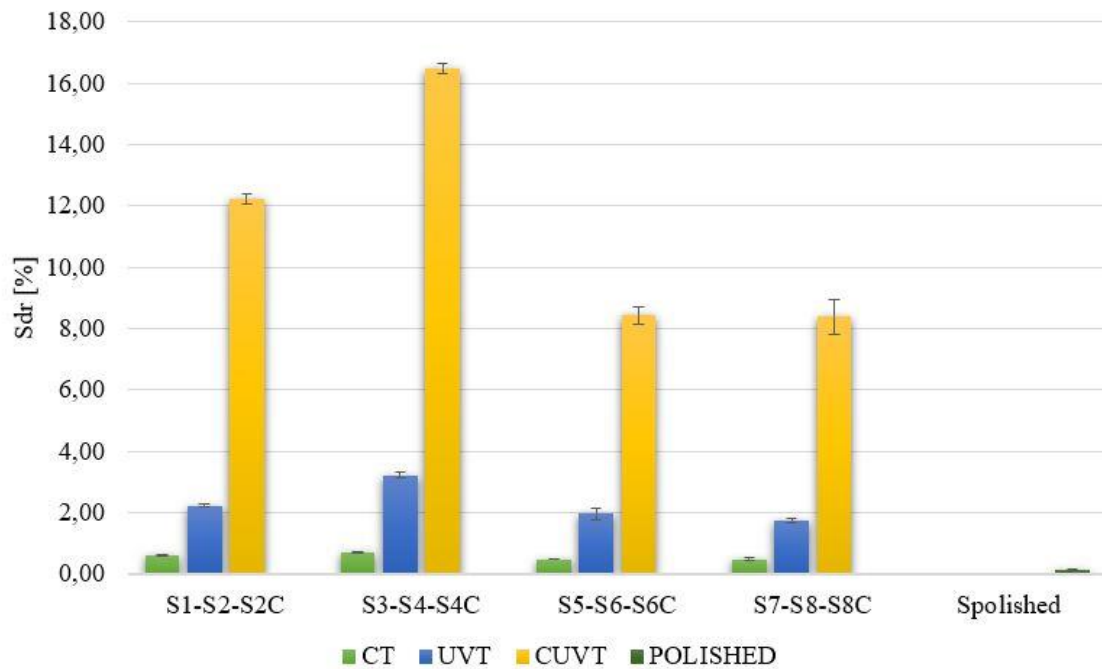


Figura 4.5: Grafico confronto parametro Sdr per tutti i campioni.

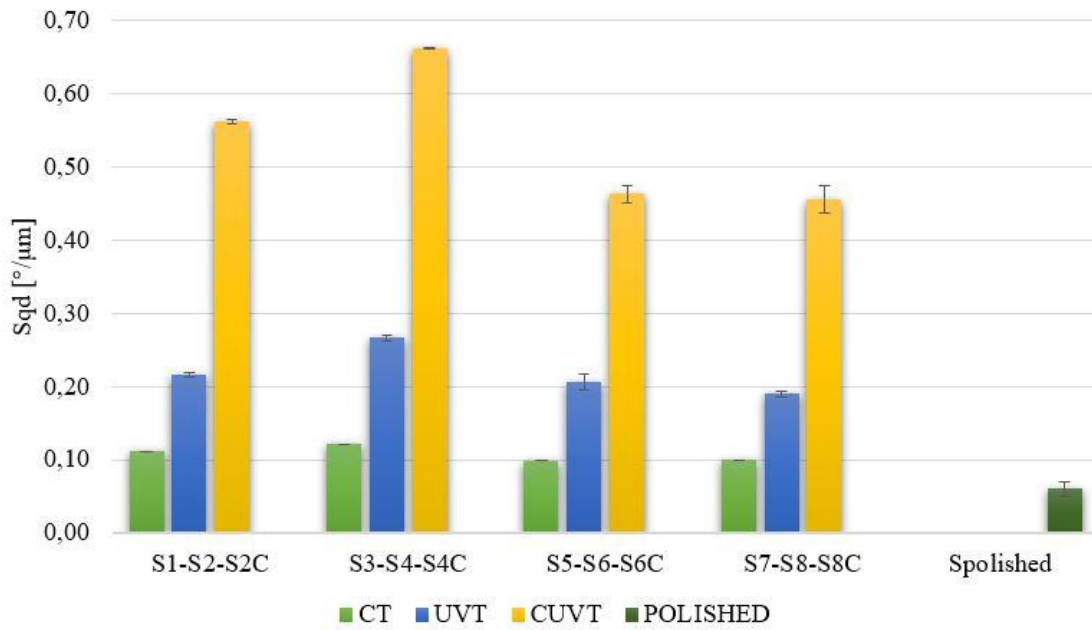


Figura 4.6: Grafico confronto parametro Sqd per tutti i campioni.

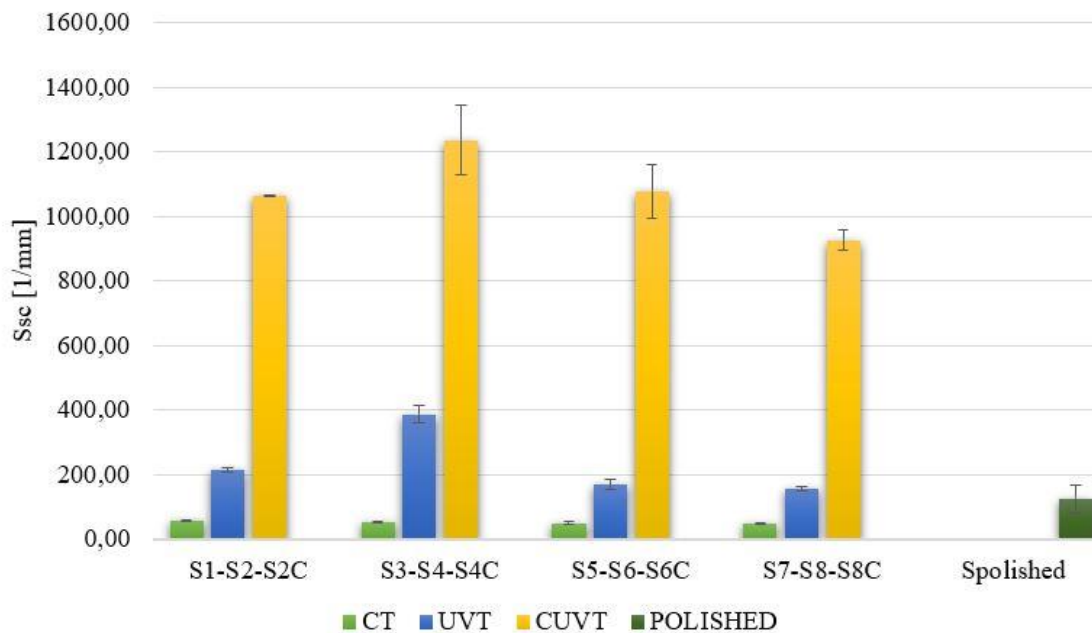


Figura 4.7: Grafico confronto parametro Ssc per tutti i campioni.



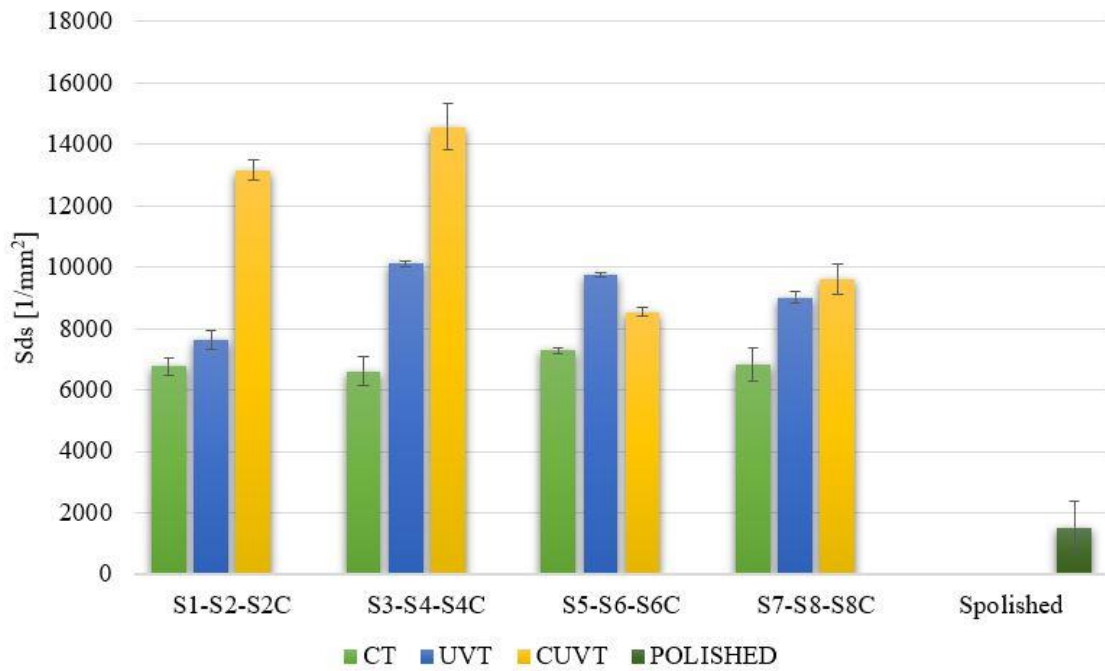


Figura 4.8: Grafico confronto parametro Sds per tutti i campioni.

Dal confronto di questi grafici si può individuare lo stesso andamento per i parametri Sdr, Sqd, Ssc e Sds mentre un andamento quasi casuale per gli altri. In tutti i casi, però, i campioni lavorati con l'assistenza di ultrasuoni durante la tornitura hanno riportato valori più alti in tutti i casi mentre il campione *polished* ha quasi sempre riportato i valori minori. In particolare, il valore nominale più alto lo si è riscontrato per i campioni CUVT. Tale aspetto è imputabile all'aumento della rugosità, del dZ tra picco e valle della texture e alla riduzione della grandezza dei "tasselli" della texture come mostrato in figura 4.9.

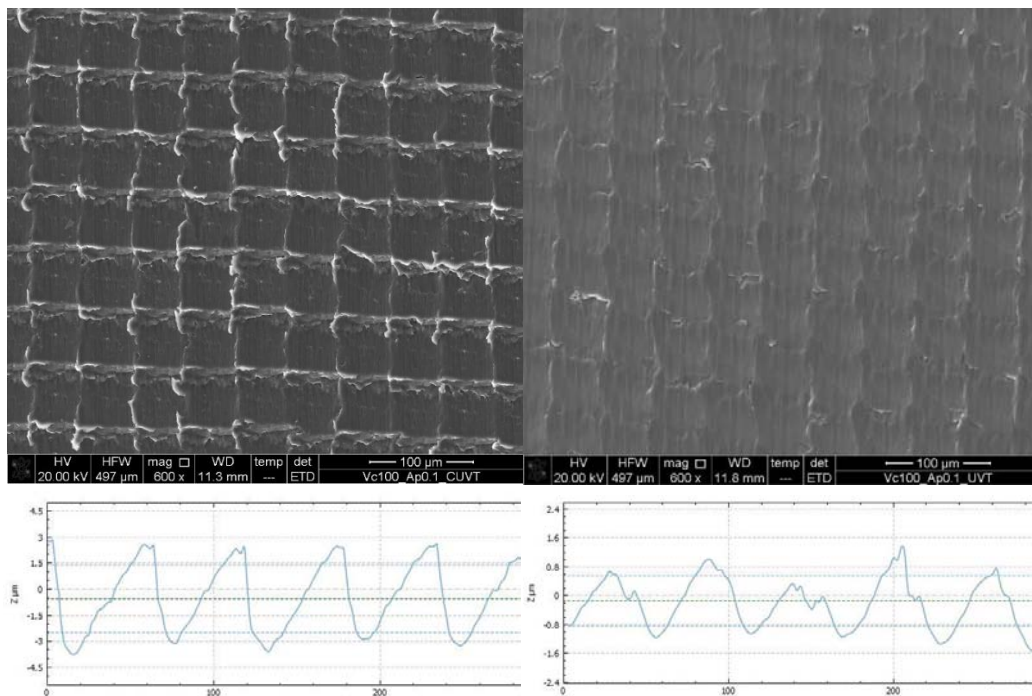


Figura 4.9: Texture e profili di S2C (sx) e S2 (dx).

Di notevole importanza per quanto riguarda la bagnabilità della superficie sarà l'andamento comune "a campana" riscontrato nei parametri identificativi della texture per quanto riguarda i campioni UVT.

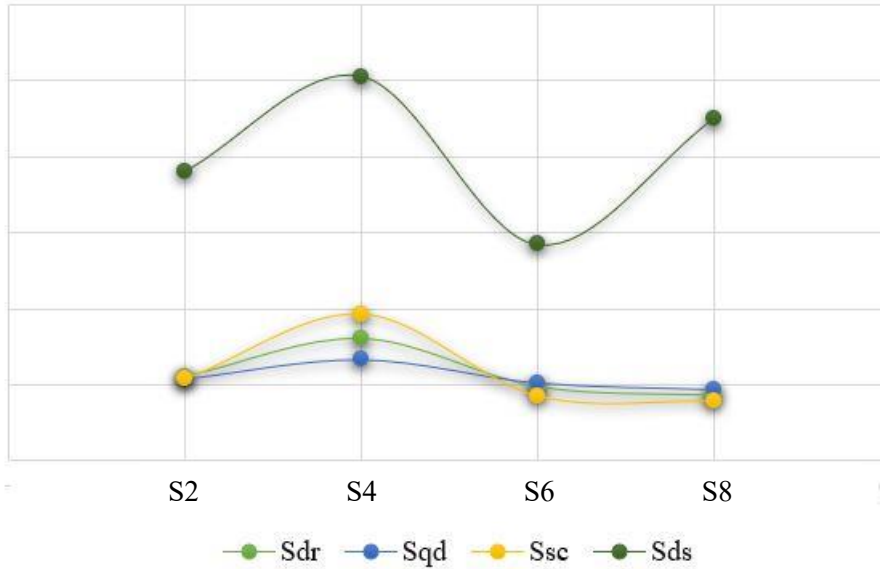


Figura 4.10: Grafico andamenti parametri di texture per i campioni UVT.

Il grafico appena riportato ha il solo scopo di mostrare l'andamento a campana dei parametri di texture riscontrato per i campioni UVT. Analogamente per i CUVT:

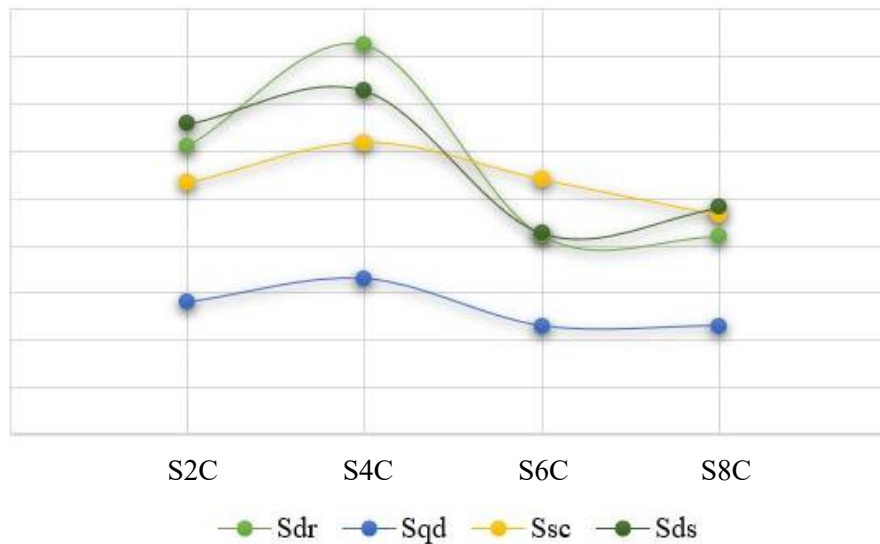


Figura 4.11: Grafico andamenti parametri di texture per i campioni CUVT.

Per ottenere un unico grafico in cui fossero apprezzabili gli andamenti di tutti i parametri è stato necessario scalare i valori reali:

1. Sdr: usato valore reale
2. Sqd: valore reale\*10
3. Sds: valore reale/1000
4. Ssc: valore reale/100.

## 4.2 Analisi della texture e dei difetti superficiali

Qualsiasi lavorazione meccanica, per quanto raffinata possa essere, porta sempre alla formazione di anomalie o difetti imputabili a svariate ragioni legate sia al materiale lavorato che alla natura del processo stesso. Nel nostro caso, i fattori che principalmente influiscono su tale aspetto sono:

1. Parametri di taglio adottati
2. Tipologia di tornitura

È importante notare che tali fattori influenzano in maniera apprezzabile l'andamento delle temperature in gioco. Si ricorda che l'aumento delle temperature porta alla diminuzione della precisione geometrica ottenibile.

Nella seguente analisi sono state riscontrate due tipologie di difetti che interessano unicamente i campioni ottenuti con tornitura convenzionale, queste sono:

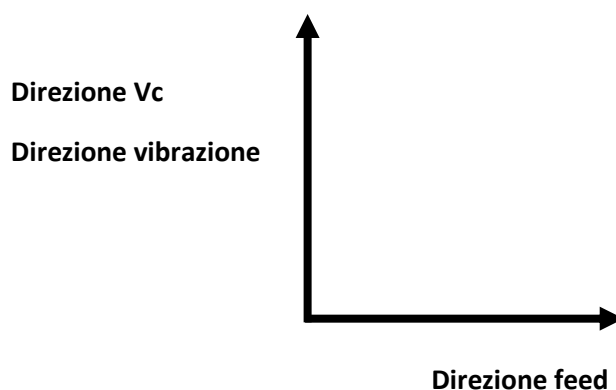
1. Strappi in corrispondenza delle zone di valle
2. Adesioni di materiale in corrispondenza delle zone di picco.

I campioni lavorati con tornitura assistita da ultrasuoni, invece, non mostrano difetti ma unicamente incertezze nella forma della texture.

Nelle pagine successive è riportato come i parametri di taglio adottati e il tipo di tornitura influiscano su tali aspetti.

**NOTA:** La scala colore usata nelle seguenti immagini varia da caso a caso quindi le immagini a prima vista potrebbero ingannare. Per un'analisi più accurata si consiglia di fare fede ai profili di rugosità riportati.

Prima di procedere con l'analisi si vuole specificare la disposizione degli assi:



## S1: Vc100\_Ap0.1\_CT

La figura seguente mostra una porzione di area del campione succitato. Rappresenta la proiezione su un piano, quindi 2D, di una parte di superficie cilindrica del campione. Tale porzione di superficie cilindrica è vista come un rettangolo di 2280  $\mu\text{m}$  x 659.83  $\mu\text{m}$ .

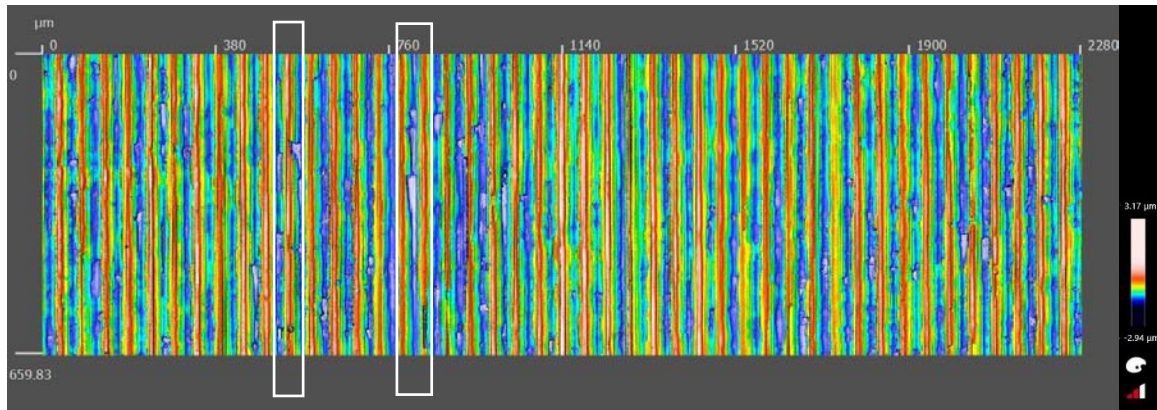


Figura 4.12: Intera proiezione 2D di area campionata.

Come si può notare dalla figura precedente, le aree in giallo/rosso rappresentano dei picchi mentre quelle in blu delle valli. In particolare, nelle zone di valle si ha un colore non uniforme quindi siamo in presenza di non uniformità, in altre parole di difetti. Concentriamoci su questi:

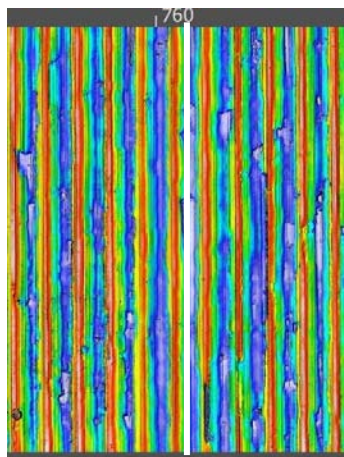


Figura 4.13: Immagine ingrandita della superficie precedente.

La linea bianca verticale indica dove verranno analizzati i profili di rugosità che verranno mostrati nei grafici.

Il grafico dell'andamento del profilo di rugosità corrispondente alla fig. 4.13 è:

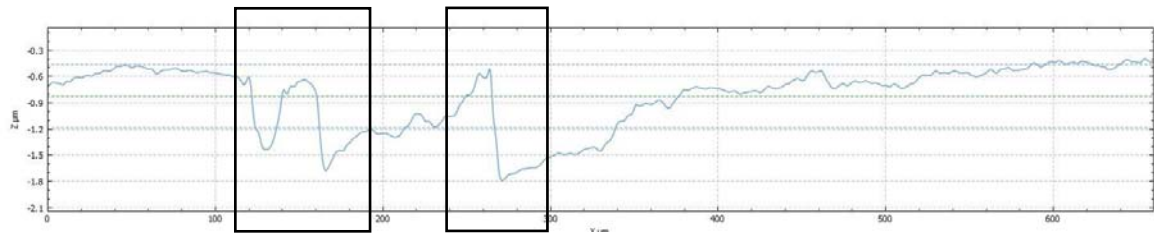


Figura 4.14: Profilo di rugosità estratto dalla figura 4.12.

Come si può notare tra i 100 e 200  $\mu\text{m}$ , si hanno due strappi profondi all'incirca 1.2  $\mu\text{m}$ . Un altro minimo si ha a circa 260  $\mu\text{m}$  lungo l'asse X. Tali zone indicano strappi, non volontariamente ottenuti con il processo di tornitura. Dall'analisi completa del pezzo e anche dalla figura sopra si può notare che tale tipo di difetti sono tipici quasi esclusivamente delle zone di valle. Le zone di picco, invece, hanno difetti minimi e di diversa natura:

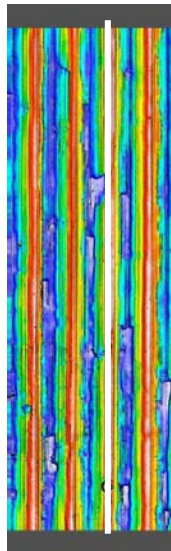


Figura 4.15: Zoom zona di picco.

Il profilo di rugosità ottenuto in questa particolare zona è:

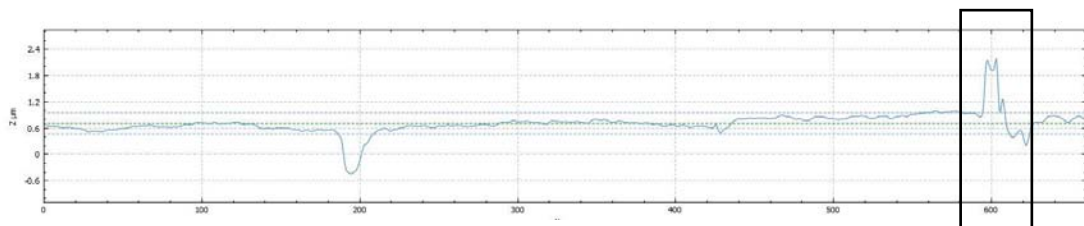


Figura 4.16: Profilo rugosità estratto dalla figura precedente.

In corrispondenza dei 600  $\mu\text{m}$ , si ha un picco di 1.4  $\mu\text{m}$ . Questo tipo di difetto è un accumulo di materiale dovuto al truciolo asportato che, in aggiunta alle alte temperature locali raggiunte durante la lavorazione, causa la saldatura di piccoli frammenti di materiale.

Per quanto in misura molto inferiore rispetto alle zone di valle, anche quelle di picco presentano strappi (in corrispondenza dei 600  $\mu\text{m}$ ) come si può notare in maniera chiara dalle seguenti immagini:

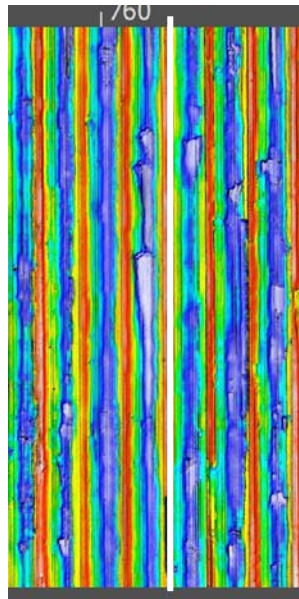


Figura 4.17: Zoom difetto: strappo zona di picco.

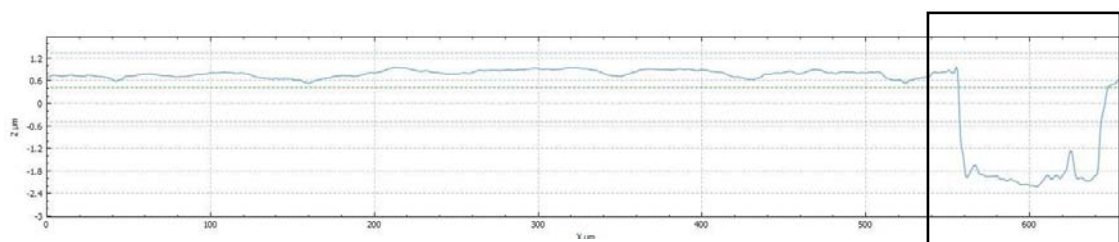


Figura 4.18: Strappo zona di picco.

### S3: Vc100\_Ap0.05\_CT

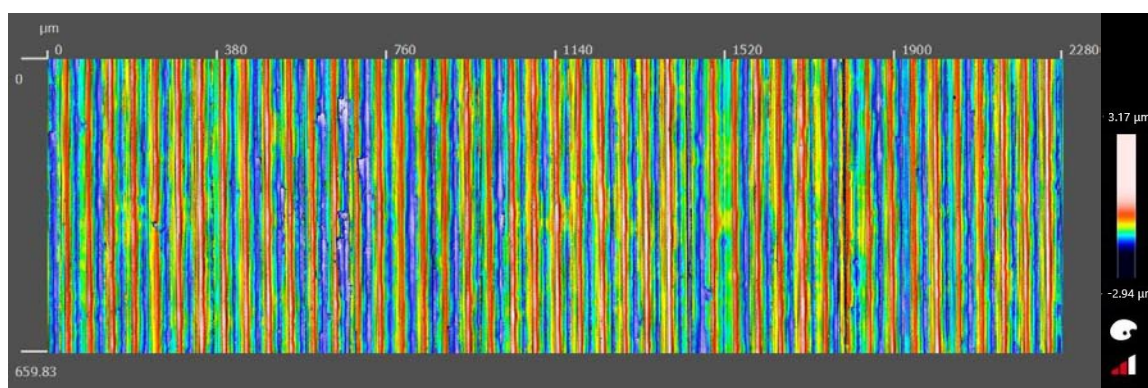


Figura 4.19: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

Già con solo una veloce occhiata si percepisce che una diminuzione della profondità di passata permette di diminuire il numero di difetti. Si nota inoltre che anche in questo caso la maggior parte dei difetti è propria delle zone di valle.

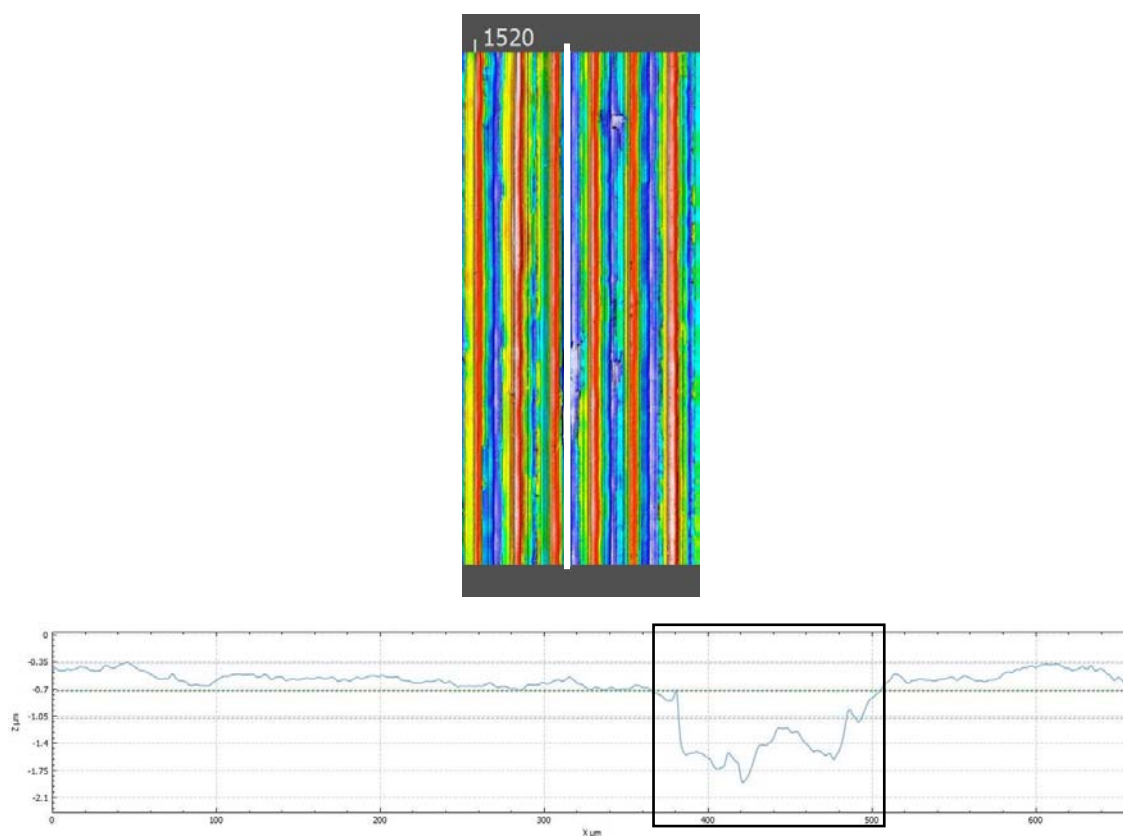


Figura 4.20: Analisi strappo.

Come si nota dal profilo, in corrispondenza dei 450 µm, si ha uno strappo ma, questa volta la profondità è di circa 1 µm. Tale valore è risultato quello tipico assunto dai difetti di questo tipo in questo particolare campione.

## S5: Vc200\_Ap0.1\_CT

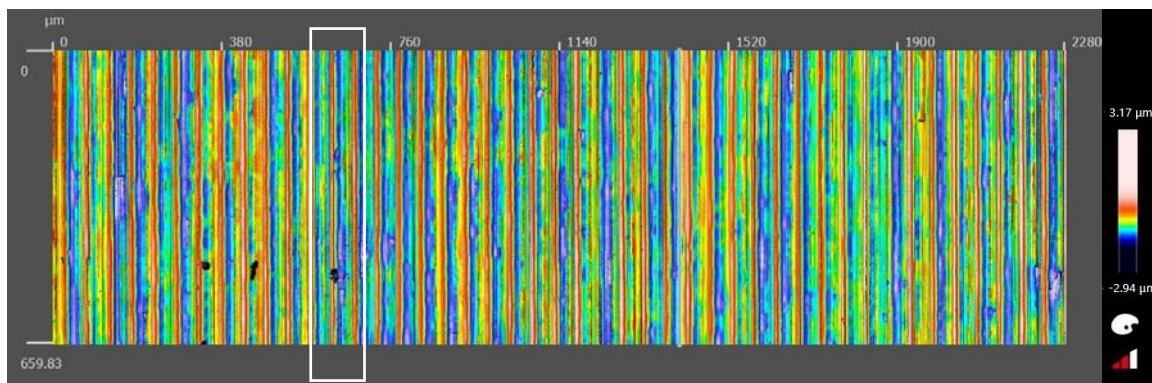


Figura 4.21: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

Dalla figura si evince che l'aumento della velocità di taglio influisce sul numero dei difetti presenti, in particolare, li diminuisce.

Le zone di valle risultano più uniformi anche se, comunque, ne rimangono alcune che presentano strappi come nei casi precedenti. La profondità di tali zone rimane comparabile con quelle dei casi visti finora.

Dalle tre zone di questo campione esaminate, si nota che sono comparsi in corrispondenza dei picchi dei punti non misurati che, in particolare corrispondono a picchi molto marcati.

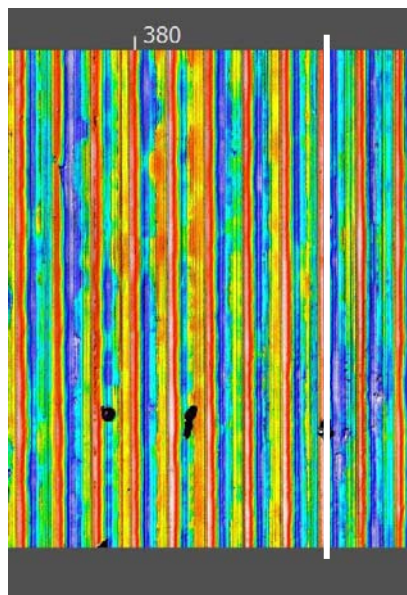


Figura 4.22: Particolare punto non misurato.



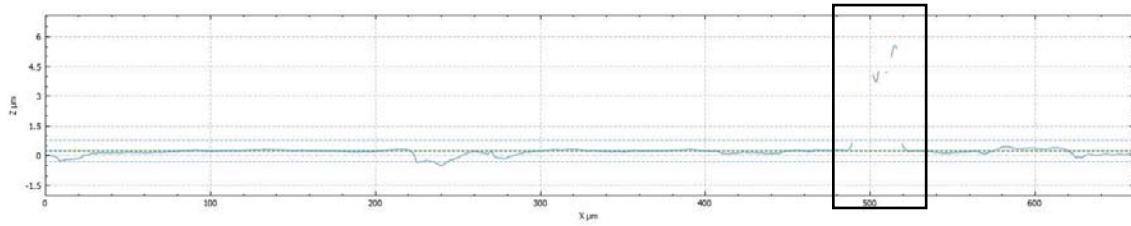


Figura 4.23: Profilo in corrispondenza del punto non misurato (520 μm).

Il picco misura un'altezza superiore ai 5 μm, per tale ragione risulta come un punto non misurato (eccede l'intervallo dei valori di Z analizzati). Proprio a causa del valore così alto, si ritiene che questo picco derivi dalla “saldatura” di un piccolo pezzo di truciolo con la superficie lavorata a causa delle alte temperature in gioco, superiori che negli altri casi, a causa della velocità di taglio imposta (doppia rispetto a prima).

Si ricorda che maggiore è la velocità di taglio, maggiore è la corrispondente forza e quindi maggiori sono le temperature in gioco.

### S7: Vc200\_Ap0.05\_CT

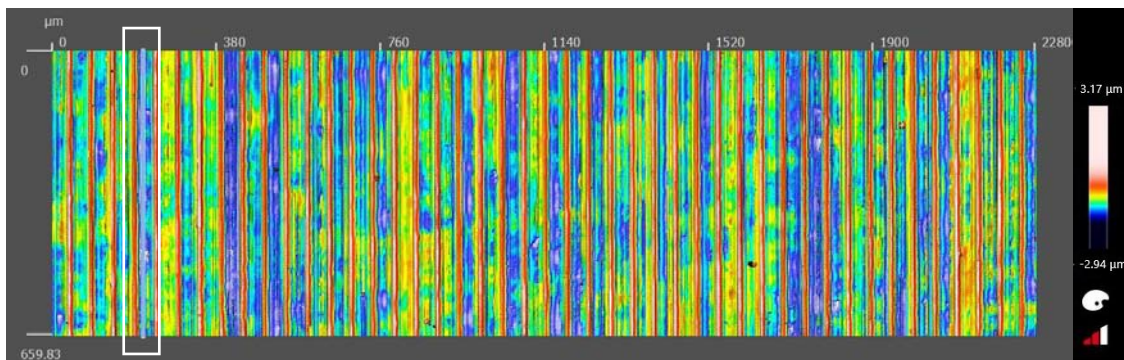
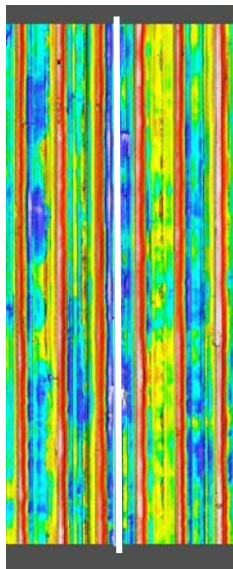


Figura 4.24: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.



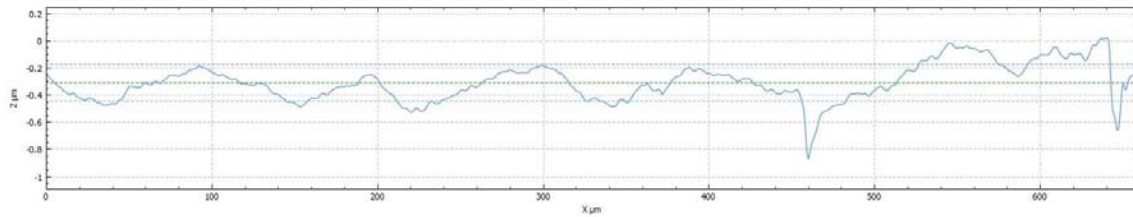


Figura 4.25: Immagine e grafico profilo rugosità zona di valle.

In quest'ultimo caso, come ci si poteva aspettare ricordando le conclusioni tratte per i casi precedenti, si ha un'ulteriore riduzione dei difetti e anche del loro valore nominale. Inoltre, è apprezzabile una certa oscillazione del valore di Z attorno ad un valore medio, questo è spiegato dal fatto che durante il processo di lavorazione sono presenti, inevitabilmente, delle vibrazioni non smorzate che causano questo particolare andamento (andamento presente anche negli altri casi analizzati ma non apprezzabile a causa della scala sull'asse Z usata).

## S2: Vc100\_Ap0.1\_UVT

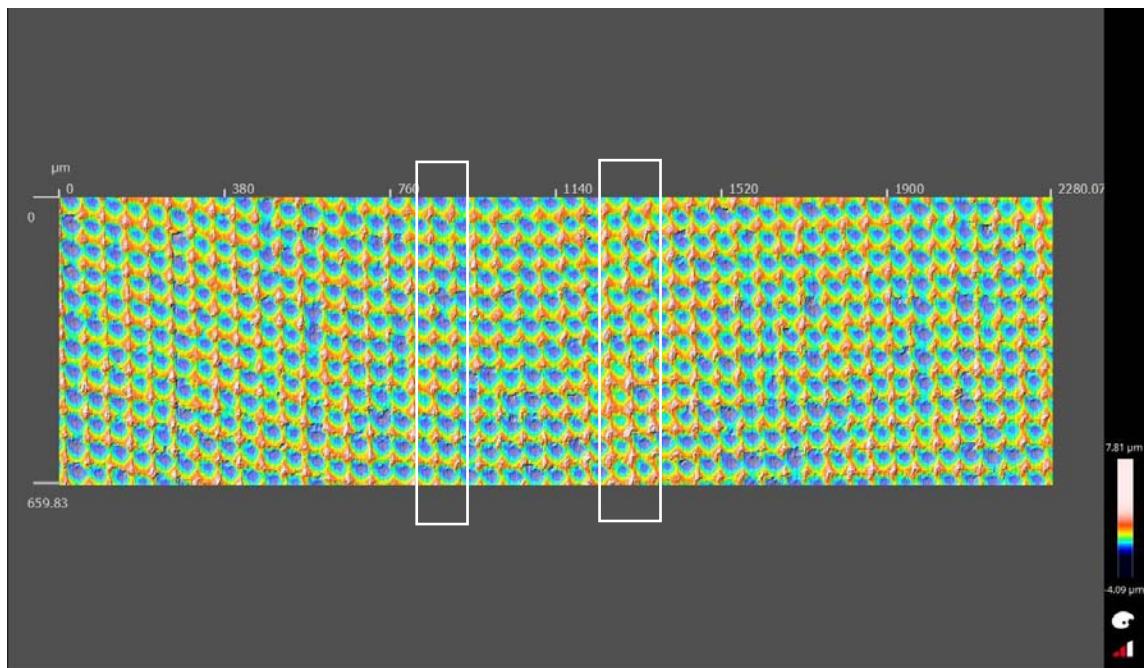


Figura 4.26: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

L'immagine precedente mostra come l'uso di UVT permetta di texturizzare il pezzo lavorato al tornio. Immediatamente si nota la buona uniformità della superficie. Vediamo di analizzare nel dettaglio due zone della superficie che hanno caratteristiche leggermente diverse.

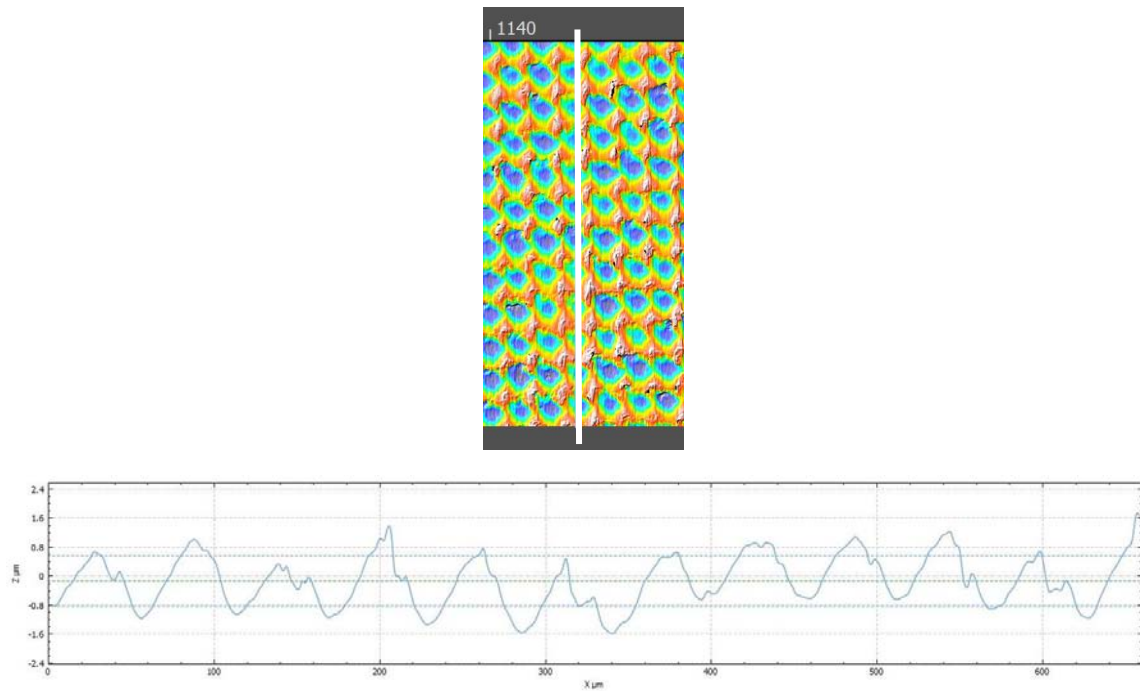


Figura 4.27: Immagine e grafico profilo rugosità texture.

Il profilo di rugosità evidenziato mostra un andamento sinusoidale con picchi ad una distanza di circa  $55 \mu\text{m}$ . Tale distanza dipende dalla velocità di taglio e dalla frequenza (costante nel nostro caso) secondo la relazione:

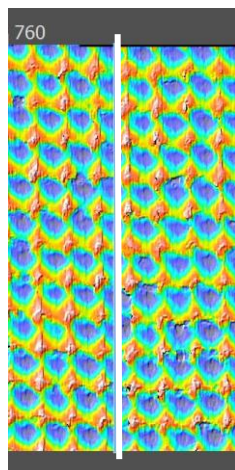
$$d_{gap} = \text{dist. tra due valli} = 10^6 * \frac{V_c}{60 * freq} [\mu\text{m}]$$

Con:

$V_c$  = velocità taglio [m/min]

Freq = frequenza ultrasonica usata [Hz]

Nota: per  $V_c=100\text{m/min}$  e  $freq=30\text{kHz}$  si ha che  $d_{gap}=55 \mu\text{m}$  circa.



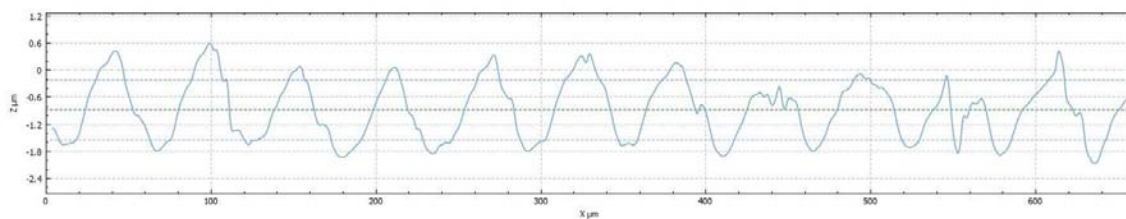


Figura 4.28: Immagine e grafico profilo rugosità texture.

Come si nota, le due zone hanno altezze di picco leggermente diverse (differiscono di 2 μm). Importante sottolineare che, mentre per la tornitura convenzionale, erano le valli ad essere soggette maggiormente a difetti, in questo caso sono i picchi ad essere soggetti a incertezze di forma.

#### S4: Vc100\_Ap0.05\_UVT

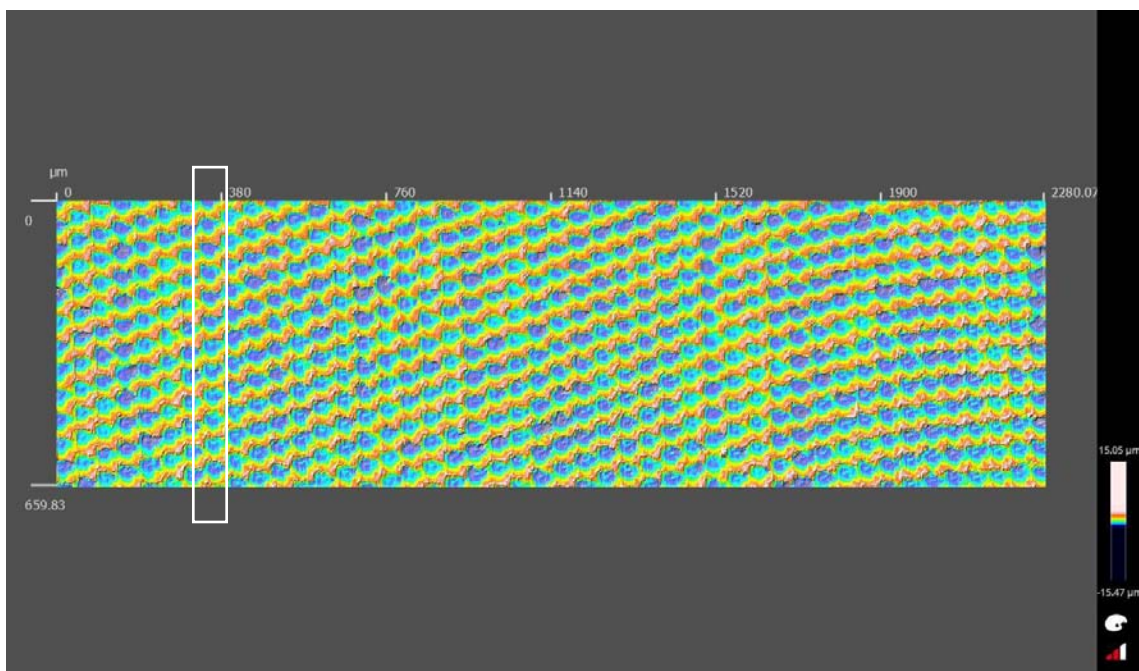


Figura 4.29: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

Da tale raffigurazione, come nel caso CT, si può concludere che la diminuzione della profondità di passata Ap giovi all'uniformità della texture superficiale.

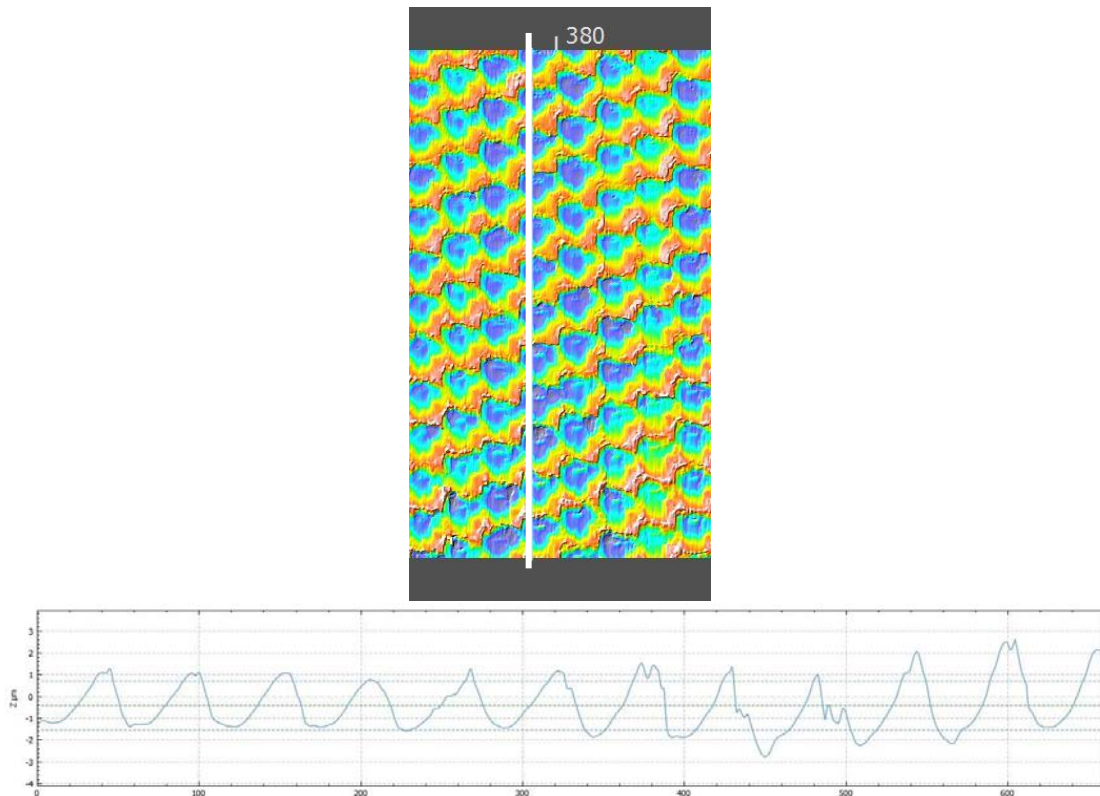


Figura 4.30: Immagine e grafico profilo rugosità texture.

La diminuzione della profondità di passata, inoltre, fa aumentare la curvatura media all'apice fornendo così un picco dalla forma più arrotondata. Tale aspetto è confermato anche dall'analisi dei parametri ISO ricavate dalle misure profilometriche.

### S6: Vc200\_Ap0.1\_UVT

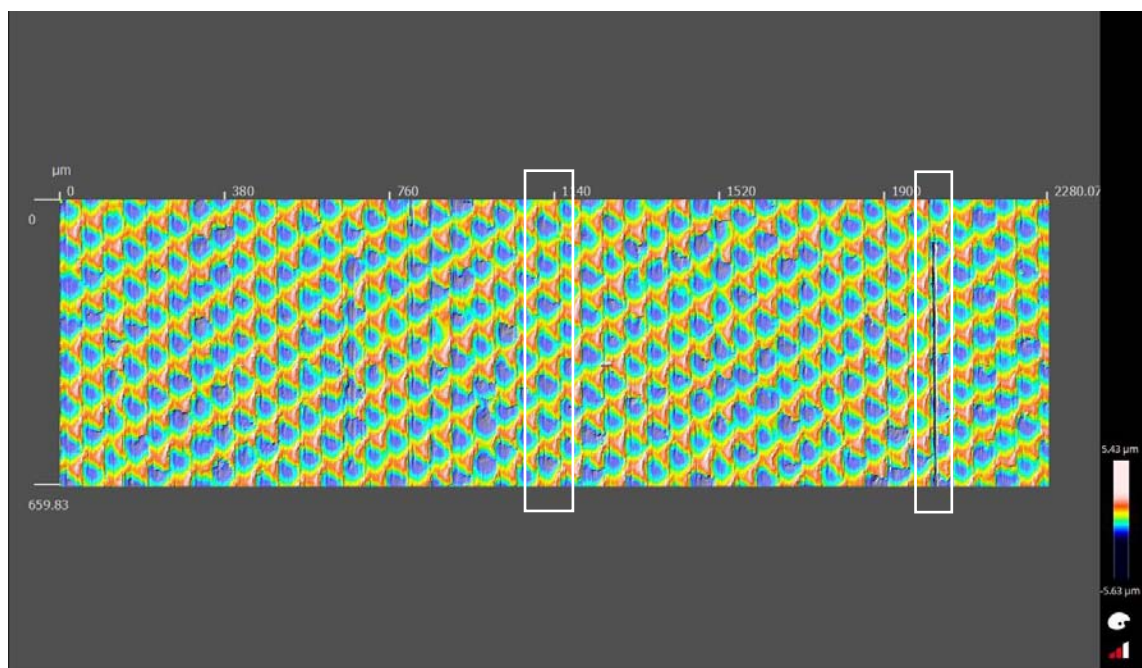


Figura 4.31: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

Come nel caso CT, l'aumento della velocità di taglio porta ad una diminuzione dei difetti. La superficie analizzata risulta essere quasi perfettamente uniforme (texture costante) tranne in singolari casi come quello seguente.

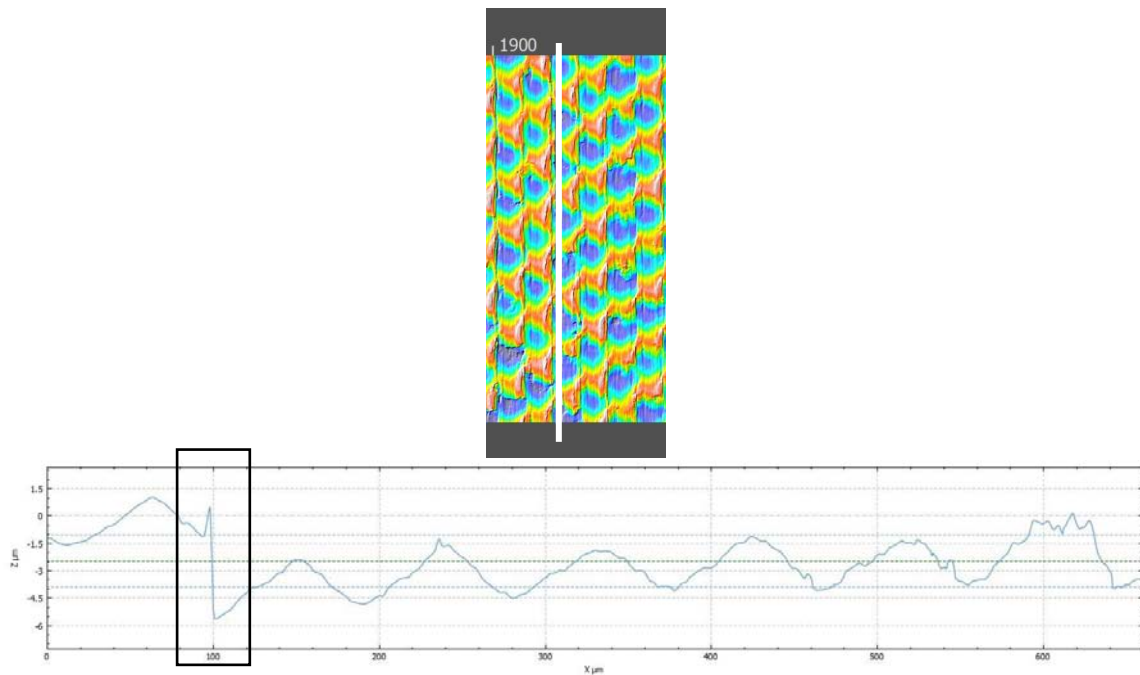


Figura 4.32: Immagine e grafico profilo rugosità texture.

Tale caso risulta un evento singolare e quindi trascurabile. La zona priva di difetti si presenta come segue:

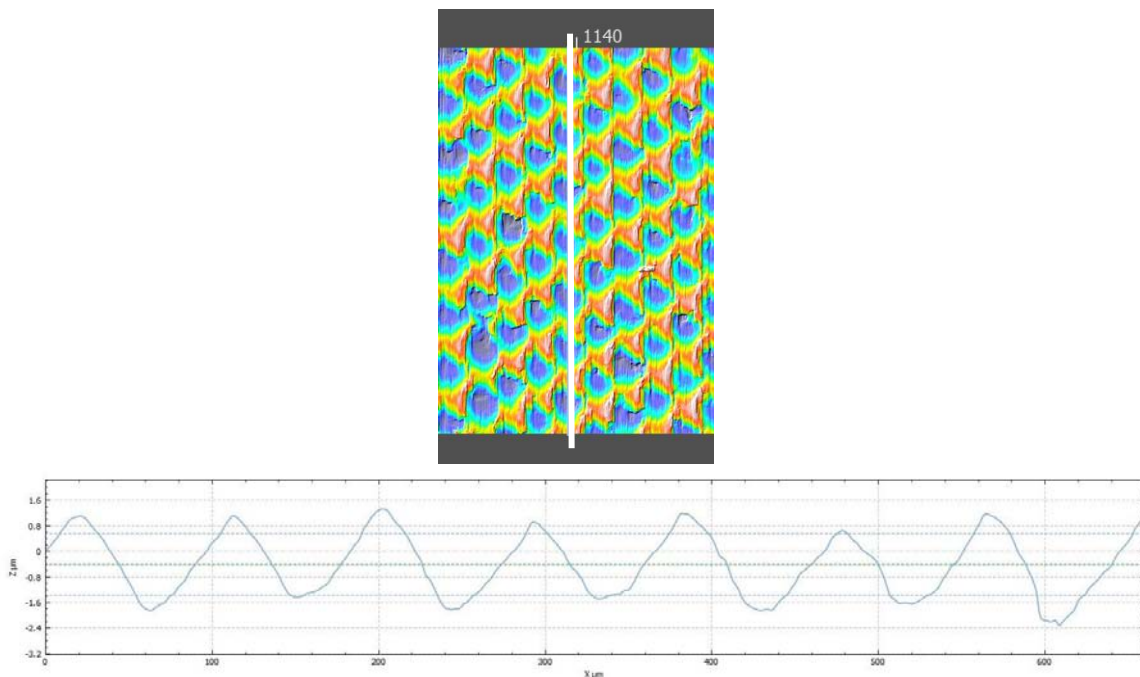


Figura 4.33: Immagine e grafico profilo rugosità texture.

La distanza tra i picchi è aumentata secondo la legge:

$$d_{gap} = \text{dist. tra due valli} = 10^6 * \frac{V_c}{60 * freq} \quad [\mu m]$$

Con:

$V_c$  = velocità taglio [m/min]

Freq = frequenza ultrasonica usata [Hz]

Nota: per  $V_c=200$ m/min e  $freq=30$ kHz si ha che  $d_{gap}=100-110 \mu m$  circa.

### S8: Vc200\_Ap0.05\_UVT

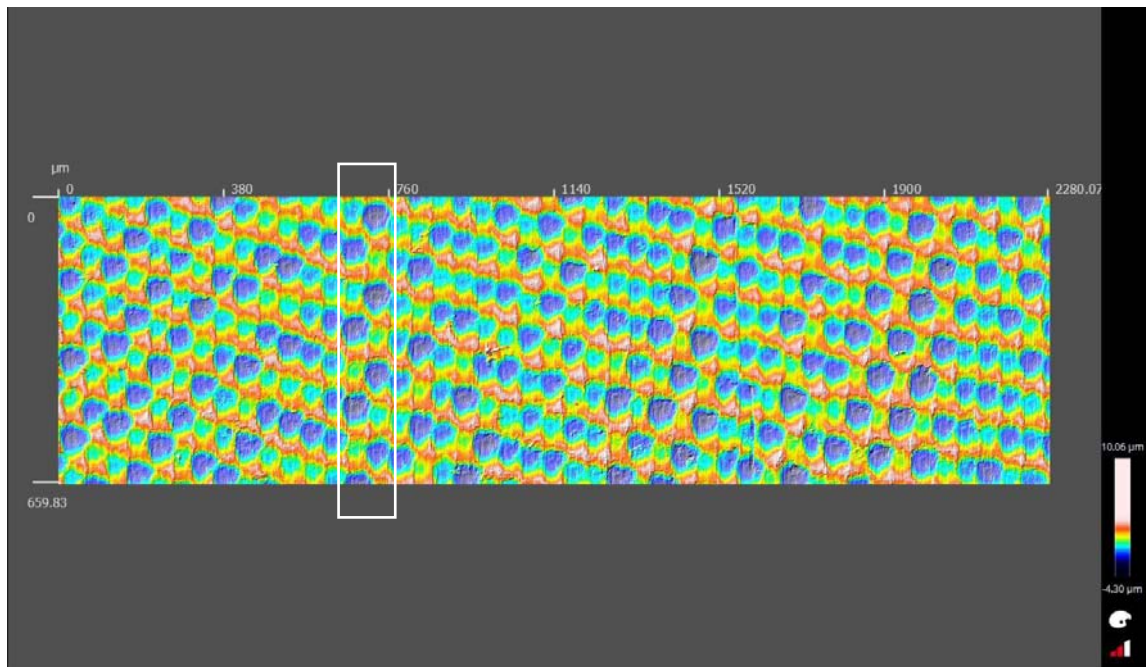


Figura 4.34: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.

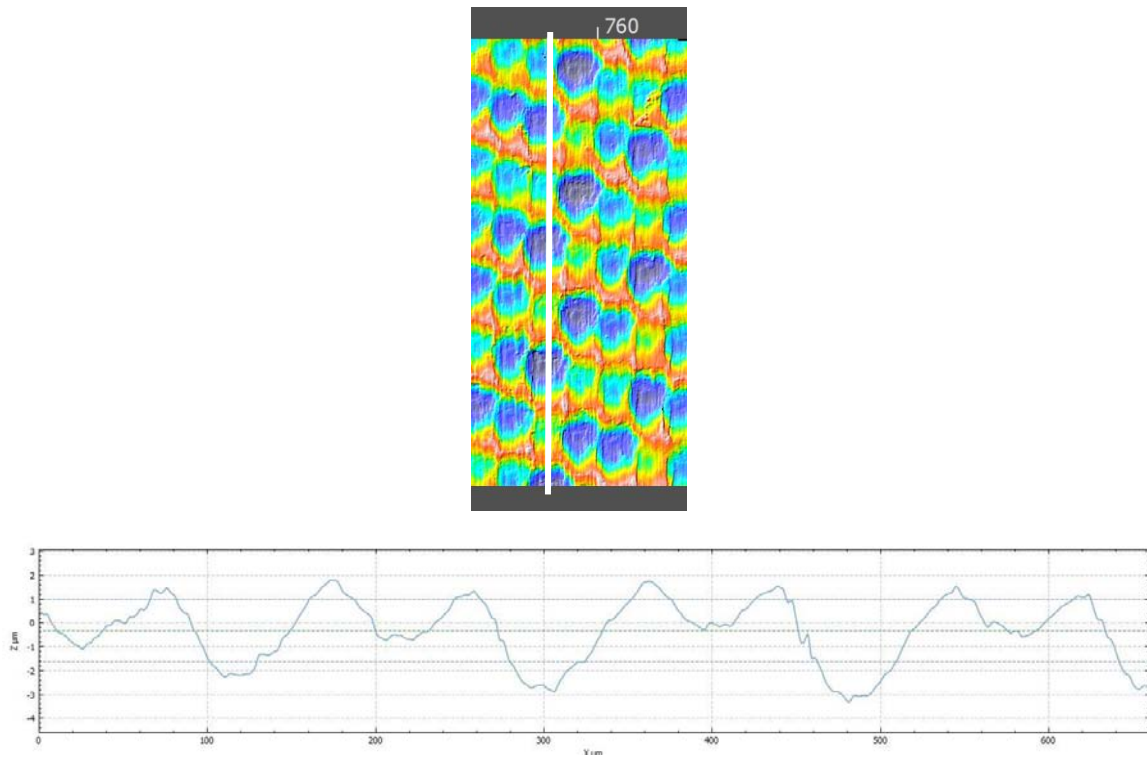


Figura 4.35: Immagine e grafico profilo rugosità texture.

### **SPolished: Campione lucidato a mano**

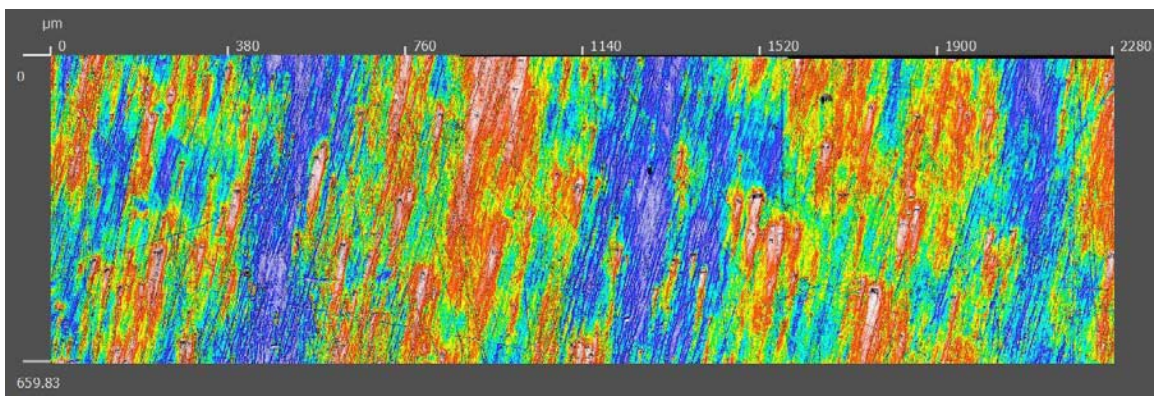


Figura 4.36: Immagine intera zona analizzata del campione specificato nel titolo.



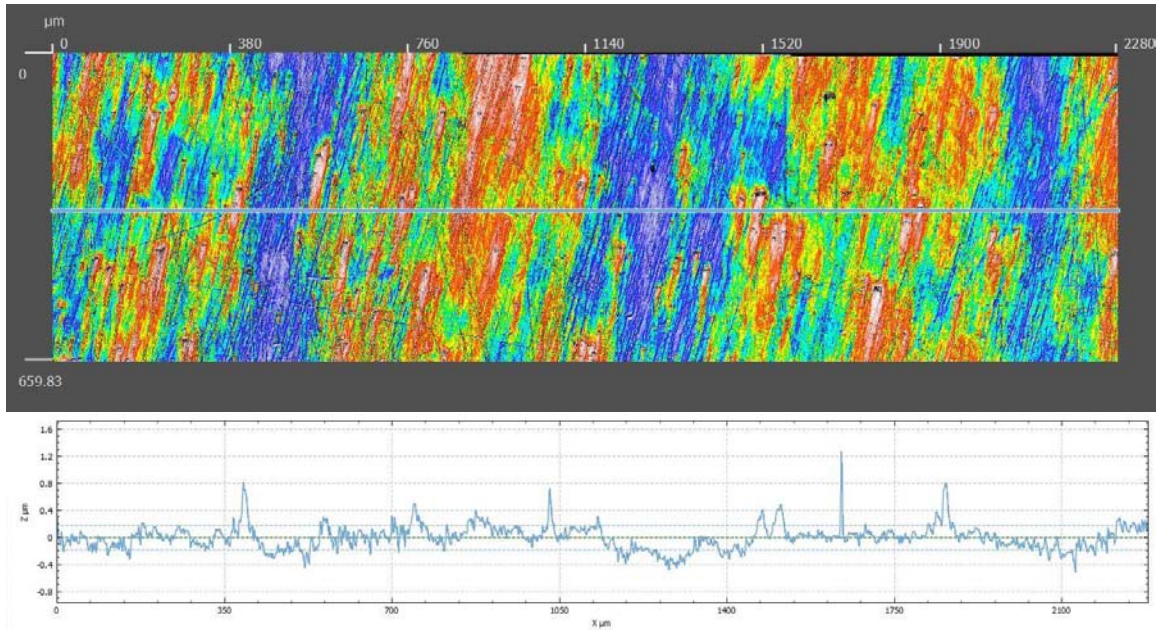
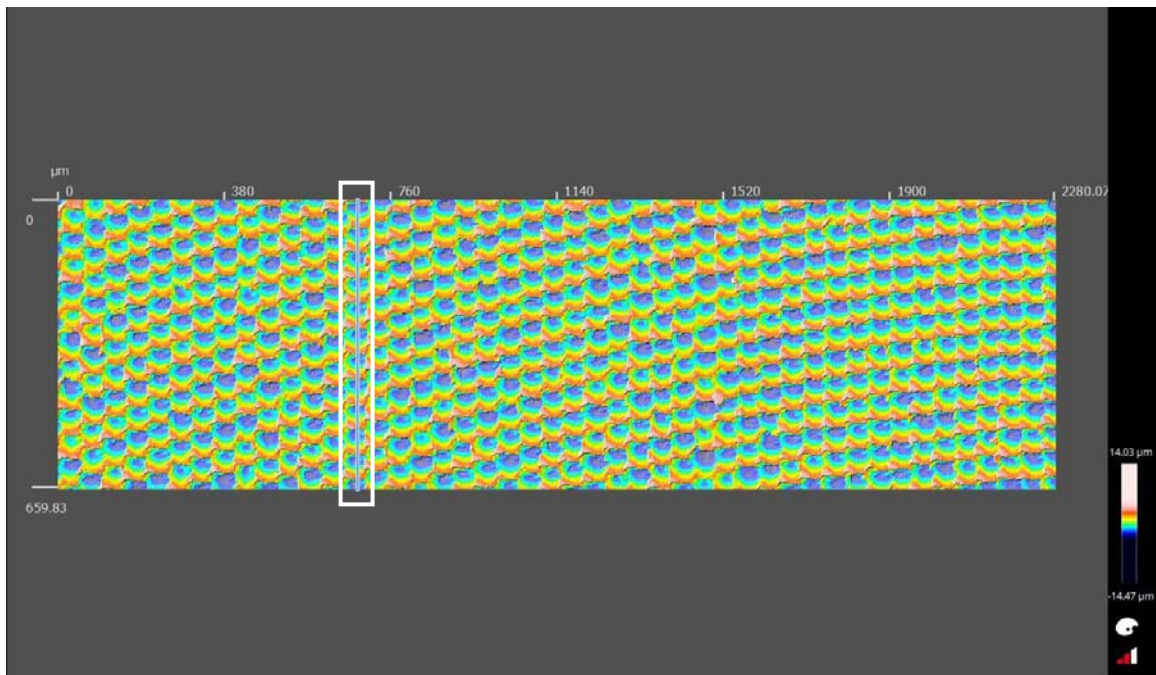


Figura 4.37: Immagine e grafico profilo rugosità polished.

Tale campione è stato lucidato e carteggiato a mano. Risulta molto uniforme poiché lo scopo dei processi di finitura è stato quello di diminuire al massimo la rugosità superficiale. I picchi e le varie non uniformità sono dovute al fatto che è stato finito a mano, quindi, la precisione della lavorazione non poteva essere garantita.

### S2C: Vc100\_Ap0.1\_CUVT



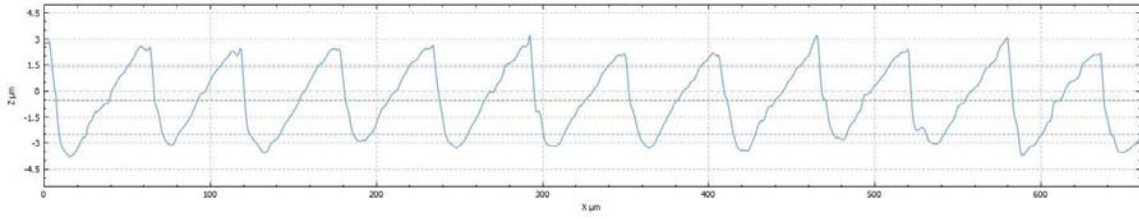


Figura 4.38: Profilometria e profilo del campione Vc100\_Ap0.1\_CUVT.

Dall'immagine precedente, si può notare l'estrema periodicità del profilo con picchi ogni 55  $\mu\text{m}$  come ricavabile dall'equazione (eq:2.19). La forma è regolare e assolutamente priva di difetti.

Non sono stati riscontrati difetti di lavorazione quali strappi o adesioni di materiale.

### S4C: Vc100\_Ap0.05\_CUVT

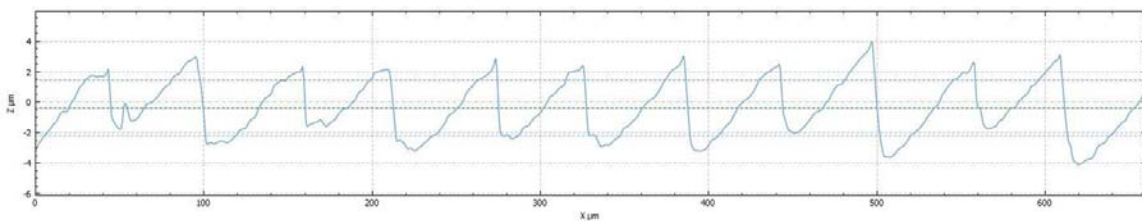
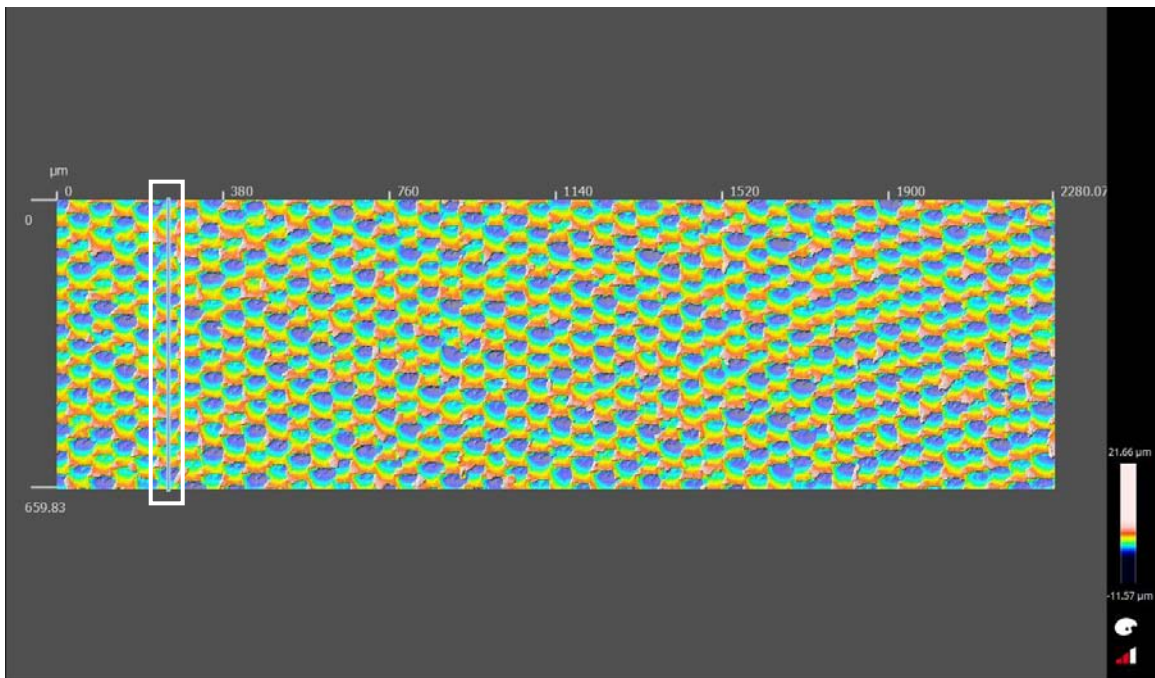


Figura 4.39: Profilometria e profilo del campione Vc100\_Ap0.05\_CUVT.

In questo caso, si rileva qualche imprecisione in più rispetto al campione S2C per quanto concerne la forma del profilo nelle zone di picco in primis mentre la sua periodicità non ha subito alcuna modifica a causa della diminuzione della profondità di passata.

Anche in questo caso, non sono stati riscontrati difetti di lavorazione quali strappi o adesioni di materiale.

### S6C: Vc200\_Ap0.1\_CUVT

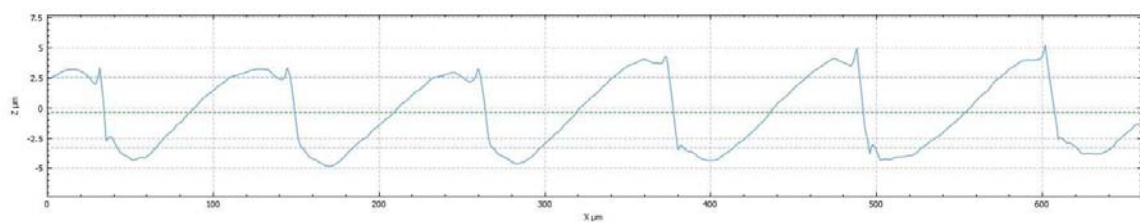
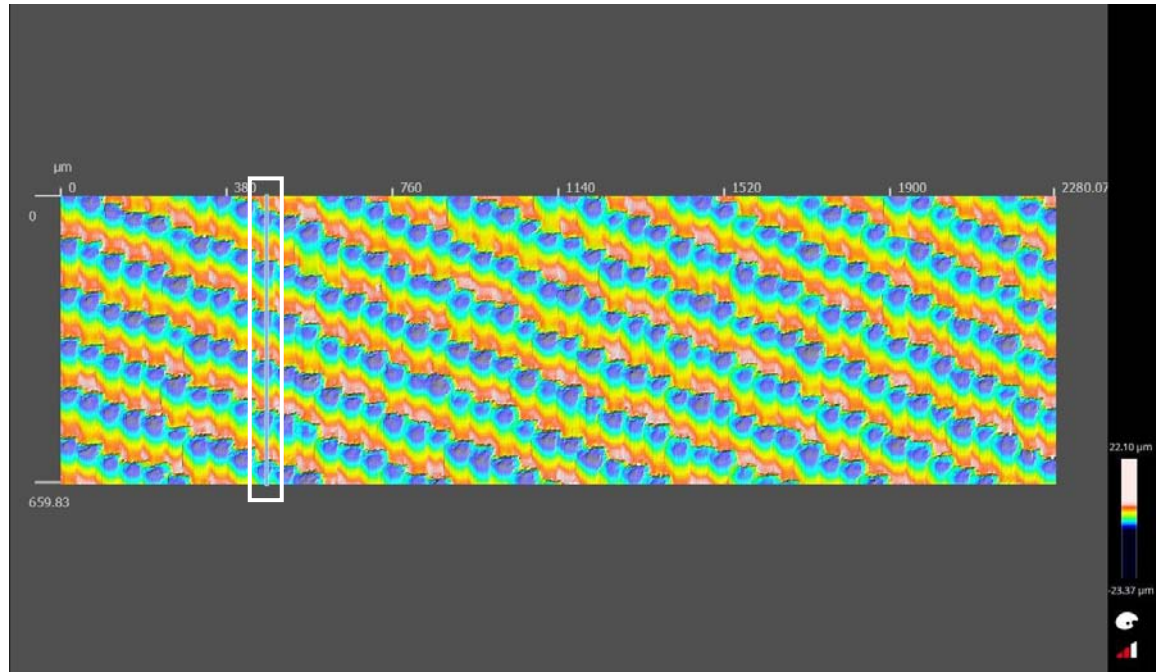


Figura 4.40: Profilometria e profilo del campione Vc200\_Ap0.1\_CUVT.

L'aumento della velocità di taglio  $V_c$  ha migliorato l'uniformità del profilo di rugosità, infatti, le forme dei picchi e delle valli non presentano differenze. Anche la periodicità risulta estrema, in questo caso però si hanno picchi ogni 110  $\mu\text{m}$  (eq:2.19) a causa dell'aumento della velocità di taglio.

## S8C: Vc200\_Ap0.05\_CUVT

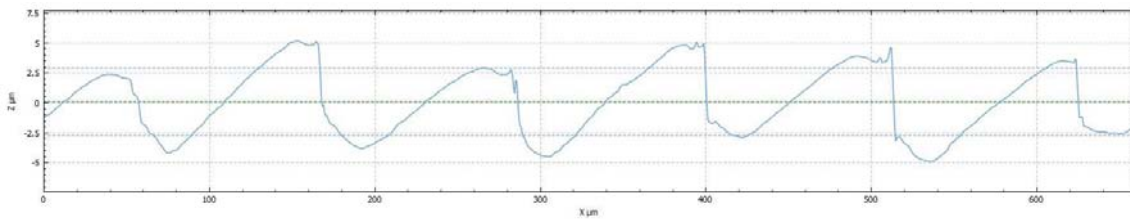
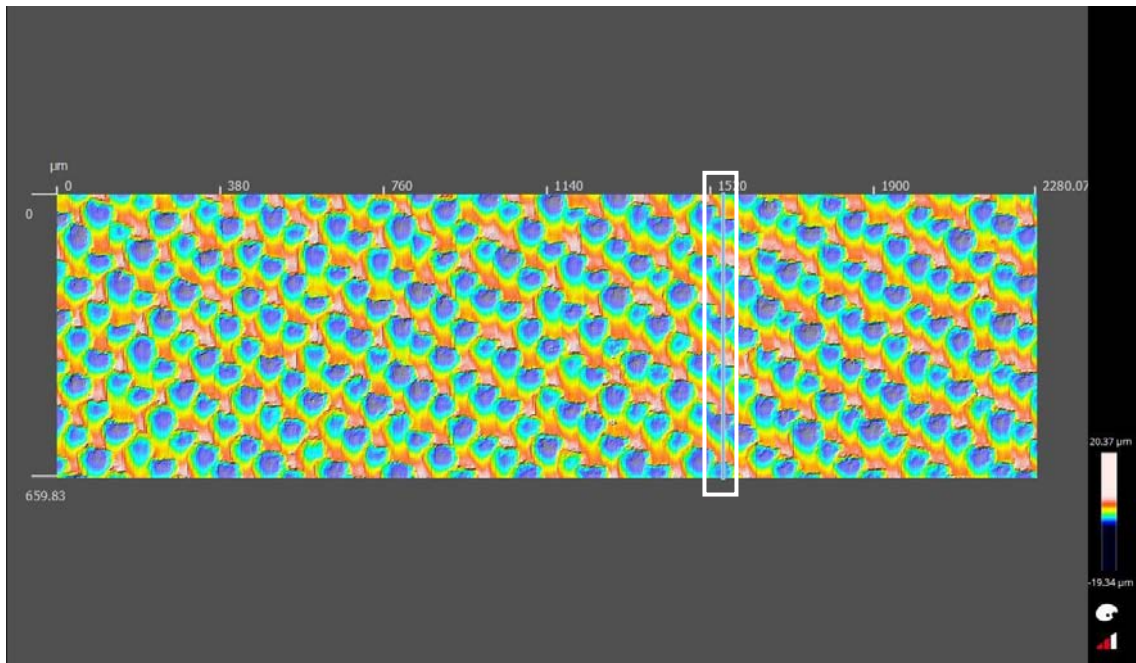


Figura 4.41: Profilometria e profilo del campione Vc200\_Ap0.05\_CUVT.

Come nel caso con velocità di taglio  $V_c=100$  m/min, anche in questo la riduzione della profondità di passata ha portato ad un aumento dell'incertezza di forma dei profili di rugosità.

### 4.2.1 Riassunto delle caratteristiche dei difetti indotti dalla lavorazione

Come già riportato all'inizio del paragrafo 4.2, sono stati riscontrati unicamente per i campioni CT due tipologie di difetti:

1. Strappi: sono i più numerosi e concentrati prevalentemente nelle zone di valle
2. Adesioni di materiale: localizzati solo nelle zone di picco e, comunque, in misura limitata.

I primi diminuiscono all'aumentare della velocità di taglio  $V_c$  e al diminuire della profondità di passata mentre l'entità della seconda tipologia di difetti è direttamente proporzionale alla temperatura raggiunta durante la lavorazione. Le adesioni, infatti, sono presenti solo nei casi con velocità di taglio pari a 200 m/min e raggiungono il picco per il caso con la profondità di passata più alta. Si ricorda che l'aumento della velocità di taglio e della profondità di passata comporta un aumento delle forze in gioco durante la tornitura che si traduce in un incremento delle temperature.

Per i campioni UVT e CUVT non sono stati riscontrati difetti come nei casi precedenti ma solo leggere incertezze sulla forma della texture. Anche per questo tipo di lavorazioni, l'andamento delle incertezze di forma segue quello degli strappi per il caso CT. Ad ogni modo, l'utilizzo di raffreddamento criogenico ha comportato una marcata riduzione di tali incertezze arrivando ai campioni S6C e S8C caratterizzati da una texture "perfette". Nelle tabelle seguenti è riportata una comparativa dei difetti e delle incertezze di forma riscontrati per i vari campioni.

	<b>CT</b>	<b>UVT</b>	<b>CUVT</b>
<b>Texture</b>	No texture	Si texture	Si texture
<b>Aumento <math>V_c</math></b>	Meno difetti	Meno incertezza forma Aumento spaziatura picchi	Meno incertezza forma Aumento spaziatura picchi
<b>Diminuzione <math>A_p</math></b>	Meno difetti	Meno difetti Aumento curvatura media apice picchi	A $V_c=100\text{m/min}$ aumenta mentre diminuisce per $V_c=200\text{ m/min}$
<b>Pari parametri</b>	Più difetti di UVT	No difetti	No difetti Meno incertezza forma texture
<b>Localizzazione difetti</b>	Valli	/	/

Campione	Difetti zona valli	Difetti zona picchi	Asport. anomala	Adesione materiale picchi	Incertezza forma texture	Curvatura media apice
S1	....	..	...	.	/	/
S2	/	/	/	/	....	..
S2C	/	/	/	/	.	.
S3	...	..	...	.	/	/
S4	/	/	/	/	...	...
S4C	/	/	/	/	..	..
S5	../...	..	..	...	/	/
S6	/	/	/	/	....	..
S6C	/	/	/	/	/	...
S7	..	..	.	..	/	/
S8	/	/	/	/	...	..
S8C	/	/	/	/	.	.
<b>Spolished</b>	<b>Difetti minimi</b> dovuti al processo di carteggiatura a mano non troppo uniforme					

	Molto			Poco	Assente
Legenda	....	...	..	.	/

Tabella 4.4: Tabella riassuntiva difetti/anomalie di texture per i campioni CT e UVT.

NOTA: Nella descrizione della superficie dei vari campioni UVT è stato usato il termine difetti. In realtà, data la misura minima di questi, è più corretto definirli come incertezze di forma. Per tale ragione nella tabella appena riportata si nota che per tutti i campioni UVT le caselle indicanti i difetti sono state barrate.

# Capitolo 5

## Analisi dei campioni rivestiti

Questo capitolo ha lo scopo di illustrare tutte le lavorazioni apportate sui campioni per applicare il rivestimento e le analisi con relativo setup per ottenere l'entità dei benefici sulla bagnabilità che la lavorazione mediante tornitura ultrasonica ha causato.

### 5.1 Preparazione dei campioni

Dopo la lavorazione al tornio, i campioni ottenuti sono stati tagliati con una microtroncatrice equipaggiata con una lama da 0.5 mm di spessore e durante il taglio è stata spruzzata in modo continuo acqua per ridurre le temperature durante tutto il processo.



Figura 5.1: Microtroncatrice usata per tagliare i campioni.

Tutti i campioni, immediatamente dopo il taglio, sono stati ripuliti in etanolo per 3 minuti in un bagno ad ultrasuoni.

## 5.2 Bagnabilità

La bagnabilità è il processo che porta a contatto un liquido ed una superficie solida. Ciò avviene in presenza di una fase gassosa o di un'altra fase liquida, immiscibile con la prima, descrivibili in termini generali come fluidi. Il sistema è completamente descritto dall'angolo di contatto  $\theta$  che è definito come l'angolo formato dalla tangente all'interfaccia liquido-fluido, e dalla tangente alla superficie solida, in corrispondenza della linea di contatto tra le tre fasi.

1. Un bassissimo angolo di contatto ( $0^\circ < \theta < 5^\circ$ ) è caratteristico di una superficie superidrofila che letteralmente significa "forte affinità con l'acqua". Tali superfici godono di massima bagnabilità e sono caratterizzate da film continuo e sottile;
2. Un basso angolo di contatto ( $\theta < 90^\circ$ ) descrive una situazione in cui il solido è parzialmente bagnato dal liquido (idrofilicità, nel caso dell'acqua);
3. Un elevato angolo di contatto ( $\theta > 90^\circ$ ) descrive una situazione in cui il solido è poco bagnato (idrofobicità, nel caso dell'acqua).
4. Un angolo di contatto molto elevato ( $90^\circ < \theta < 150^\circ$ ) è caratteristico di una superficie superidrofobica che letteralmente significa "forte paura dell'acqua". Tali superfici non hanno alcuna bagnabilità e favoriscono la formazione di gocce isolate.

Il bilancio delle forze d'interazione tra un liquido ed un solido governano la forma di una goccia sulla superficie: le forze di adesione tendono ad aumentare l'interazione del liquido con la superficie appiattendolo sulla stessa, al contrario le forze di coesione tendono a diminuire l'interazione generando la forma che minimizza l'interazione superficiale, ovvero la sfera.

L'angolo di contatto  $\theta$ , come già detto in precedenza, è quello formato tra l'interfaccia liquido-vapore e solido-liquido. È determinato dal bilancio delle forze di adesione e coesione. La tendenza di una goccia ad appiattirsi sulla superficie aumenta al diminuire dell'angolo di contatto, perciò l'angolo di contatto è una misura inversa della bagnabilità delle superfici.

Il grado di bagnabilità è dipendente dalla tensione superficiale del liquido e dalle varie energie di interfaccia. L'angolo di contatto è compreso fra  $0^\circ$  (bagnabilità completa o perfetta) e  $150^\circ$  (assenza di bagnabilità). Una bagnatura favorevole corrisponde ad un ridotto angolo di contatto: questo dà luogo ad una situazione in cui il fluido ricopre una grande porzione di superficie. Al contrario, una bagnatura non favorevole si riferisce al caso in cui il liquido, non avendo particolare affinità chimica con l'interfaccia solida, forma su di essa delle gocce compatte, cioè con elevato angolo di contatto.



L'equilibrio del processo di bagnabilità a temperatura e pressione costante è raggiunto quando l'energia libera di Gibbs è minima. L'energia libera di Gibbs,  $G$ , nel processo di bagnamento è data da:

$$G = \sigma_{lf}A_{lf} + \sigma_{sl}A_{sl} + \sigma_{sf}A_{sf} = \sigma_{lf}A_{lf} + (\sigma_{sl} - \sigma_{sf})A_{sl} + \sigma_{sf}A_{tot} \quad [5.1]$$

dove  $A_{lf}$ ,  $A_{sl}$  e  $A_{sf}$  sono l'area di interfaccia liquido-fluido, solido-liquido, e solido-fluido rispettivamente, e  $A_{tot}$  è l'area totale della superficie solida ( $A_{tot}=A_{sl}+A_{sf}=\text{costante}$ ).

Nel caso di una superficie solida ideale, l'energia di bagnamento di Gibbs, in funzione dell'angolo di contatto geometrico, ha un solo minimo. L'angolo di contatto corrispondente a tale minimo è definito angolo di contatto ideale. Se le tensioni superficiali sono costanti su tutta l'interfaccia, l'angolo di contatto ideale coincide con l'angolo di contatto risultante dall'equazione di Young.

Ad ogni modo, come già Gibbs era stato in grado di notare, il valore delle tensioni superficiali in prossimità della linea di tripla interfaccia possono discostarsi dai valori delle singole interfacce misurabili lontani dalla linea. Infatti, ciascuna delle tre fasi può influenzare l'interazione tra le altre due nelle immediate vicinanze della linea di contatto. L'effetto maggiore è riscontrabile nell'interazione solido-liquido alla linea di contatto, dove la tensione superficiale di interfaccia è controllata dalla superficie solida (a causa della sua maggiore densità).

Gibbs propose che questa tripla mutua interazione potesse essere descritta dal concetto di tensione di contatto  $\tau$ , che è stata successivamente espressa in forma analitica per il sistema solido-liquido-fluido secondo la:

$$\cos(\theta_{id}) = \cos(\theta_Y) - \frac{\tau}{r_b \sigma_l} \quad [5.2]$$

Un altro metodo per descrivere questo effetto è di considerare  $\sigma_l$  come funzione della distanza dal solido, piuttosto che come una proprietà costante. Sebbene l'approccio della tensione di contatto sembri più conveniente, i due modelli devono essere in principio equivalenti.

L'ordine di grandezza della tensione di contatto è stato oggetto di dibattito, ma nella letteratura più recente è stato ristretto a  $10^{-9}$ - $10^{-11}$ N. Ciò significa che l'effetto della tensione di contatto è trascurabile per sistemi che abbiano raggio di curvatura dell'ordine dei micrometri. Perciò per i sistemi macroscopici, l'angolo di contatto ideale è praticamente coincidente con l'angolo di contatto definito dall'equazione di Young.

## 5.2.1 Prove di bagnabilità

Come già detto, lo scopo della lavorazione affiancata da vibrazione ultrasonica UVT è quello di aumentare la bagnabilità della superficie così che riesca a depositarsi uno strato di coating più spesso durante la fase di rivestimento.

La misura dell'angolo di contatto per valutare la bagnabilità dei cilindri lavorati AZ31 è stata eseguita applicando una tecnica di caduta statica sessile. Di seguito l'apparato sperimentale:

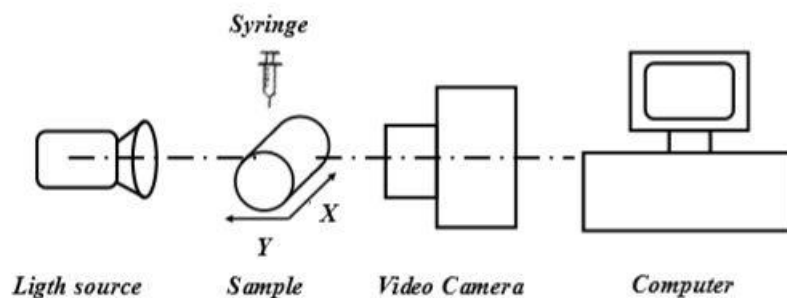


Figura 5.2: Setup sperimentale per misure di bagnabilità.

Il setup è composto da: una siringa micrometrica per formare una goccia di liquido, una sorgente luminosa alogena, regolabile in intensità, per illuminare il campione e una telecamera Prosilica GTTM per l'acquisizione delle immagini. Prima di misurare, i campioni sono stati puliti in un bagno ad ultrasuoni per 15 minuti per rimuovere eventuali residui. È stata utilizzata una goccia di acqua distillata di 10  $\mu\text{l}$  di volume che è stata lasciata cadere sulla superficie laterale del campione cilindrico. Le misurazioni sono state condotte a temperatura ambiente ( $25^{\circ}\text{C}$ ), ripetute otto volte per ciascuna condizione di lavorazione per garantire la ripetibilità e infine è stato calcolato il valore medio. Le immagini della vista dall'alto delle goccioline cadute sui campioni sono state acquisite anche mediante il profiler ottico con un obiettivo 10x NikonTM.

Gli angoli di contatto delle goccioline d'acqua sulle superfici realizzate con CT (campione S3) e UVT (campione S4) sono riportati in figura. Risultati simili sono stati trovati per le altre condizioni di taglio e, quindi, non sono qui riportati. La vista dall'alto della goccia mostra che la goccia assume una configurazione più isotropa nel caso di superfici UVT, coprendo in modo più omogeneo la superficie lungo la direzione di taglio. La forma della goccia d'acqua è simmetrica lungo le direzioni di avanzamento e vibrazione, mentre nel caso di CT è allungata lungo la direzione della velocità di taglio  $V_c$ . Ciò significa che l'UVT contribuisce alla formazione di una superficie più isotropa, poiché la goccia d'acqua tende a rimanere sferica, senza deformarsi lungo una direzione preferenziale. Il comportamento alla bagnabilità dipende principalmente da due fattori:

1. L'energia superficiale che, a sua volta, dipende sia dalla composizione chimica della superficie e dalle caratteristiche meccaniche della superficie.
2. Dalla topografia della superficie.

I materiali caratterizzati da un'elevata energia superficiale sono più idrofili (poiché la loro superficie ha bisogno di più energia per rompere i legami molecolari tra la superficie e il liquido in contatto).

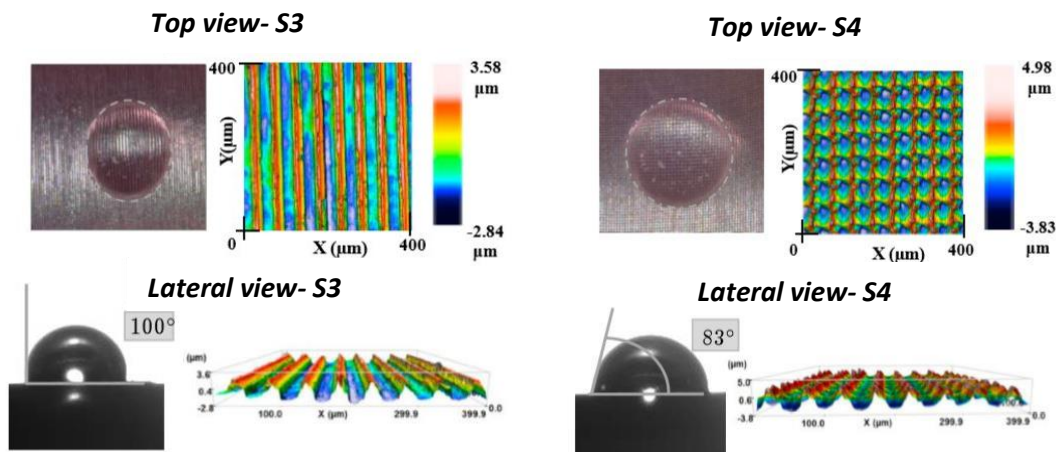


Figura 5.3: Confronto angolo di contatto tra CT e UVT fissati i parametri di taglio.

Tuttavia, non sono state rilevate differenze sensibili tra le proprietà meccaniche dei campioni CT e UVT. Pertanto, l'energia di superficie non ha un ruolo in questo contesto. Il secondo fattore è la topografia della superficie, quindi la creazione di una texture superficiale omogenea permette di diminuire l'angolo di contatto e quindi aumentare la bagnabilità.

Come si può vedere, UVT ha contribuito ad aumentare la bagnabilità abbassando l'angolo di contatto (100° per CT e 83° per UVT). Tale caso è il migliore ottenuto. Gli altri casi hanno riportato angoli di contatto leggermente maggiori ma, in ogni caso, la tornitura UVT ha sempre migliorato la bagnatura di circa un 15%.

I risultati ottenuti per i campioni UVT sono stati:

<b>Sigla campione</b>	<b>S2</b>	<b>S4</b>	<b>S6</b>	<b>S8</b>
Angolo contatto [°]	95	83	99	90
Dev. Stand. [°]	1.4	2.4	1.9	1.8

Tabella 5.1: Angoli di contatto e deviazione standard per i campioni UVT.

Ricordando che la bagnabilità è inversamente proporzionale all'angolo di contatto, l'andamento di questi risultati è in accordo con quello dei parametri di texture trovati a seguito delle analisi condotte al profilometro.

Si ritiene, inoltre, importante specificare che a causa della forma cilindrica del campione la misura dell'angolo di contatto (vista laterale) è stata possibile condurla solo in direzione

parallela all'asse del campione stesso. Inoltre, tale non planarità della superficie ha introdotto degli errori sistematici dovuti alla curvatura costante del campione uguale per tutti i campioni visto che la geometria è la stessa e degli errori casuali dovuti all'incertezza di posizionamento della goccia d'acqua sulla superficie lavorata.

### 5.3 Rivestimento Sol-gel

Per sol-gel si intende la preparazione di un materiale ceramico in genere ossidi di metalli. Il processo consiste nella preparazione di un sol, la sua trasformazione in gel (gelation) e la rimozione del solvente. Il sol può essere prodotto da precursori inorganici e organici e può consistere in dense particelle di ossido o in ammassi polimerici. Il sol è una sospensione colloidale di particelle solide all'interno di un liquido definito anche colloide. Tali particelle solide hanno diametri compresi tra 1 nm e 1  $\mu\text{m}$  quindi le forze gravitazionali sono trascurabili e le interazioni sono dominate da forze a breve raggio, come quelle di Van der Waals. In breve, si parla di colloide quando si vuole definire una miscela intermedia tra una soluzione omogenea e una dispersione eterogenea.

In ambito scientifico, si definisce come gel una sostanza che si trova in una fase liquida continua e che contiene uno scheletro solido che è anch'esso continuo.

Per la realizzazione di questo tipo di rivestimenti si parte da una soluzione colloidale, quindi dal sol. I suoi precursori sono elementi ben definiti, quali alcossidi di metalli o metalloidi (ad esempio alcossisilani) o da sali (ad esempio cloruri, nitrati, acetati). Gli alcossidi metallici sono precursori molto utilizzati perché reagiscono molto bene e istantaneamente con l'acqua.

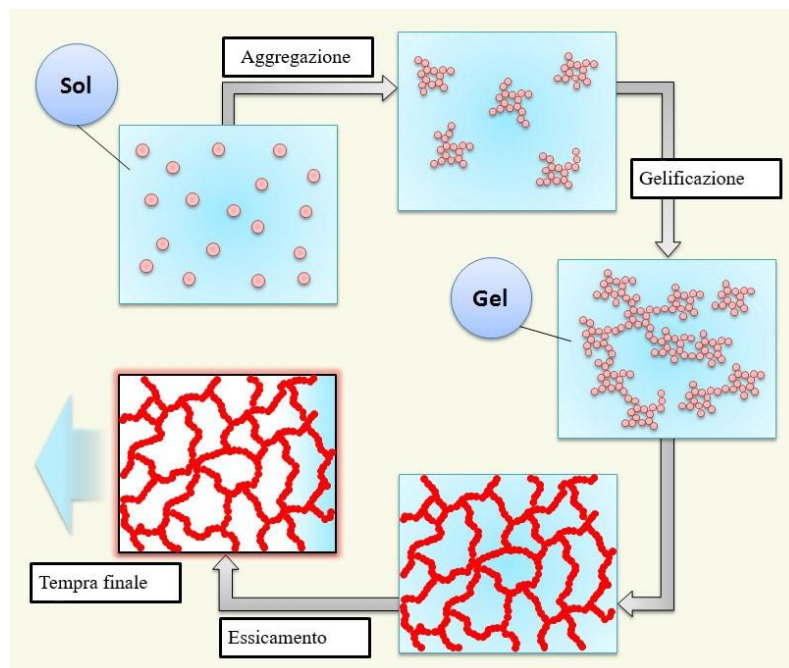
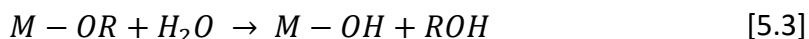


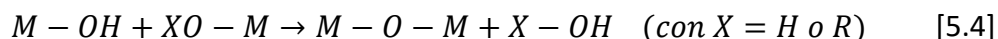
Figura 5.4: Processo Sol-gel con tempra finale opzionale.

### 5.3.1 Meccanismo Sol-gel

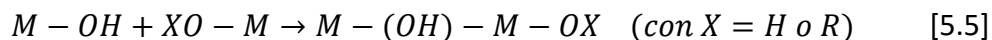
Tipici precursori per il processo sol-gel si presentano in forma di  $M(OR)_n$ ,  $MX_n$ ,  $R'-M(OR)_{n-1}$ , dove  $M$  rappresenta un centro metallico e  $n$  è il suo stato di ossidazione.  $X$  e  $OR$  sono invece comuni gruppi uscenti presenti in sali metallici o alcossidi metallici, come ad esempio l'anione cloruro negli alogenuri metallici, mentre  $R'$  è un qualsiasi gruppo organico legato al centro metallico via legami covalenti (Si-C, Sn-C) o tramite leganti di coordinazione ( $M = Ti, Zr...$ ). Il processo sol-gel implica il collegamento dei centri metallici, con la generazione in soluzione di polimeri osso- o idrosso-metallici. Il meccanismo di formazione prevede in primo luogo l'idrolisi di un gruppo alcossi o la deprotonazione di una molecola d'acqua collegata al centro metallico che porta ad un idrossido:



A questo punto la specie idrossido formata può reagire con altri centri metallici tramite reazione di condensazione per la formazione di un oligomero. La condensazione può avvenire per ossolazione, con la formazione di un ponte osso e l'eliminazione di acqua o alcol:



La condensazione può avvenire in alternativa anche per olazione con la formazione di un ponte idrossido:



Quest'ultima reazione avviene quando il metallo può avere una coordinazione maggiore della valenza, come nel caso di  $Ti(IV)$ ,  $Zr(IV)$ , o simili. Nella maggior parte dei processi sol-gel, la struttura inorganica è formata da successive idrolisi e condensazioni. La struttura, la connettività e la morfologia della rete inorganica finale sono influenzate ampiamente dal contributo relativo delle 3 reazioni. Gli idrosso-osso-polimeri formati esibiscono una grande varietà di strutture, dagli arrangiamenti ramificati agli ammassi compatti a seconda delle condizioni intrinseche (le caratteristiche metalliche del centro come coordinamento, acidità, labilità...) o estrinseca (condizioni di reazione controllabili come solvente, contenuto d'acqua, pH, catalizzatori, tempo di reazione...). La crescita di queste strutture può essere controllata, ad esempio per avvelenamento o per limitazione dell'aggregazione. Alcune di queste strutture possono crescere o aggregare fino a raggiungere dimensioni macroscopiche, cattura di solventi e piccoli monomeri, ottenendo così gel. In controllo chimico delle reazioni di attivazione e polimerizzazione consente il controllo sulla forma dei polimeri o colloidi inorganici, nonché sulla loro compatibilità (ad esempio interazioni idrofobiche/idrofiliche) con controparti biologiche. I precursori  $R'-M(OR)_{n-1}$  possono

anche essere utilizzati per co-condensare con altri precursori quali  $M(OR)_n$  o  $MX_n$ , o di modificare la superficie di entità inorganica, ottenendone un cambiamento delle proprietà.

### 5.3.2 Applicazioni

Il primo processo sol-gel ad essere stato brevettato fu quello dovuto a Geffcken, inventato nel 1939 per una compagnia tedesca produttrice di lastre di vetro per finestre. Negli anni 1950 fu sviluppato un processo sol-gel per la produzione di polveri radioattive di  $UO_2$  e  $ThO_2$  per combustibili nucleari, utilizzando così particelle poco disperdibili nell'ambiente. La ricerca nell'ambito dei sol-gel ebbe il suo maggiore sviluppo durante gli anni '90, quando si ebbe un grosso picco di pubblicazioni al riguardo.

Il processo sol-gel viene utilizzato per ottenere diverse tipologie di materiali funzionali, ad esempio:

1. rivestimenti,
2. polveri ceramiche,
3. monoliti,
4. fibre ceramiche,
5. membrane inorganiche,
6. aerogel.

La chimica dei sol-gel rappresenta quindi un approccio notevolmente versatile per la fabbricazione di questi materiali.

Le applicazioni dei prodotti sol-gel derivati sono numerose e varie. Uno dei più grandi campi di applicazione riguarda la produzione di film sottili, depositabili su un substrato solido tramite rivestimento per rotazione (spin-coating) o rivestimento per immersione (dip-coating). Altri metodi includono lo spruzzo, l'elettroforesi, la stampa a getto di inchiostro o il rivestimento capillare. I rivestimenti ottici, rivestimenti protettivi e decorativi, e componenti ottico-elettronici possono essere applicati a vetri, metalli e altri tipi di substrato sfruttando questi metodi.

Attraverso processi in cui il sol viene fatto gelificare in uno stampo, e successivamente trattato termicamente, si possono ottenere dei pezzi ceramici o vetrosi densi con caratteristiche proprietà analoghe a quelle riscontrate in materiali vetrosi ottenuti per raffreddamento di un fuso, con il vantaggio di poter determinare a priori dimensioni e tolleranze senza successive lavorazioni meccaniche. Ad esempio, in questo modo si possono ottenere specchi e lenti utilizzati in ottica.

Facendo rientrare la viscosità di un sol all'interno di un definito intervallo di valori è possibile ottenere fibre ottiche e fibre ceramiche, utilizzate rispettivamente come sensori ottici e isolanti termici.

Polveri ceramiche e ultrafini si possono ottenere per precipitazione. Queste polveri a singolo o multiplo componente possono essere lavorate in particelle di dimensioni inferiori al micron che trovano applicazione in odontoiatria e nell'ambito biomedico. Polveri composite sono state brevettate per la produzione di erbicidi e prodotti chimici agrari. Utilizzando un processo sol-gel è anche possibile ottenere polveri abrasive utilizzate in vari processi di finitura.

Una delle più importanti applicazioni del processo sol-gel riguarda la sintesi delle zeoliti. Altri elementi (metalli, ossidi metallici) possono essere facilmente incorporati nel prodotto finale e il sol così ottenuto risulta molto stabile.

Altri prodotti fabbricati con questo processo includono varie membrane ceramiche per la microfiltrazione, ultrafiltrazione, nanofiltrazione, pervaporazione e osmosi inversa.

Essiccando il gel a basse temperature (25-100 °C) è possibile ottenere matrici solide porose chiamate xerogel. Se invece la fase liquida viene rimossa dal gel in condizioni supercritiche è possibile ottenere un aerogel, materiale altamente poroso e caratterizzato da densità estremamente bassa.

## **5.4 Preparazione del Sol-gel e rivestimento dei campioni**

Ritornando al nostro caso, come già detto, lo scopo è quello di utilizzare la lega di magnesio AZ31 in ambito biomedicale. Per tale ragione, si è optato per un rivestimento a base di calcio Ca e fosforo P che è totalmente biocompatibile, come riportato nell'articolo di Bo Niu "Effects of sintering temperature on the corrosion behaviour of AZ31 alloy with Ca-P sol-gel coating".

Il rivestimento, quindi, sarà composto da:

1. 9.85 g di nitrato di calcio ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )
2. 1.78 g di pentossido di fosforo  $\text{P}_2\text{O}_5$

Queste due sostanze sono state scelte come precursori di Ca e P e sciolti separatamente in 25 ml di etanolo anidro. Il precursore di Ca è stato aggiunto goccia a goccia al precursore P e quindi agitato ulteriormente per 30 minuti. L'ammoniaca è stata utilizzata per regolare il pH della soluzione a 6. Quindi, la soluzione miscelata è stata lasciata riposare per 24 ore a temperatura ambiente per ottenere una soluzione trasparente.

Una volta pronta la soluzione, con la tecnica del *dip-coating* sono stati rivestiti tutti i campioni. In questa fase il parametro più importante è la velocità di estrazione del campione dalla soluzione. Abbiamo settato per tale input una frequenza di 33.333 Hz che equivale a 2 cm/min. Una volta rivestiti tutti i campioni, sono stati posizionati in forno per la sinterizzazione. In questa fase i campioni vengono riscaldati a 300°C per 1 ora dopodiché sono stati lasciati in forno a raffreddare per 24 ore a forno spento e quindi estratti a temperatura ambiente. La temperatura massima è stata raggiunta alla velocità di 5°/min.

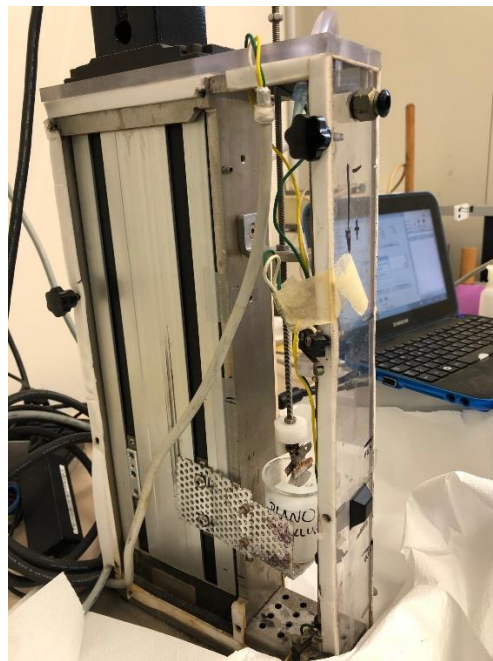


Figura 5.5: Operazione di rivestimento (*dip-coating*).



Figura 5.6: disposizione campioni in forno per la sinterizzazione.



## 5.5 Analisi SEM della morfologia del rivestimento

Dopo aver completato le operazioni di rivestimento, si è ritenuto opportuno analizzare qualitativamente al SEM se e in che modo la presenza della texture influenzi la disposizione del coating.

Le analisi hanno riportato che la texture superficiale influisce, assieme ad altri fattori, in modo non trascurabile sulla morfologia del rivestimento.

Analizziamo ora tre immagini relative alla superficie rivestita di un campione ottenuto per tornitura convenzionale CT, il corrispondente realizzato mediante tornitura assistita da vibrazione ultrasonica UVT e quello lucidato.

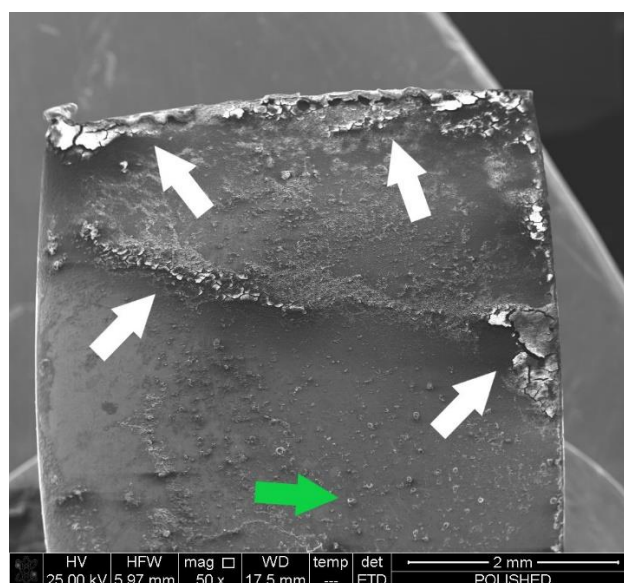


Figura 5.7: Immagine SEM coating polished.

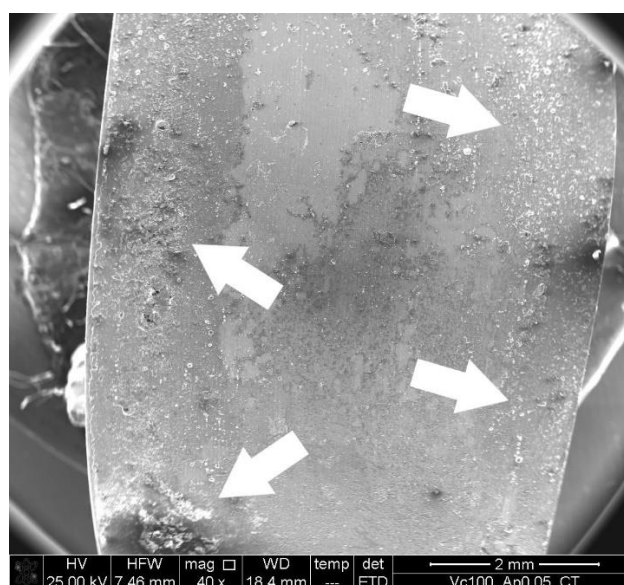


Figura 5.8: Immagine SEM coating CT.

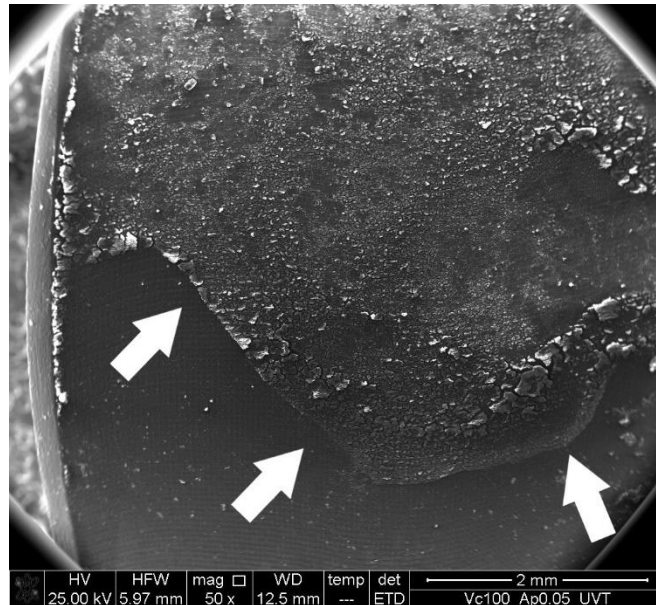


Figura 5.9: Immagine SEM coating UVT.

Dall'analisi delle immagini precedenti si conclude che i principali responsabili della diversa morfologia del coating sono:

1. La lavorazione meccanica applicata al pezzo e quindi anche i difetti;
2. Il tipo di coating;
3. L'orientazione del pezzo durante la sinterizzazione in forno.

Si può notare che il campione CT presenta zone di accumulo ovunque sulla superficie del pezzo, come evidenziato in figura dalle frecce bianche. Il campione UVT mostra una netta linea di demarcazione tra zona di accumulo e zona "ottimale". Questo fattore conferma che nei campioni UVT la bagnabilità è maggiore rispetto agli altri casi (lucidato e CT) e quindi si ottiene uno spessore di rivestimento maggiore. Questo fatto implica che la formazione di accumulo non sia dovuta solo a difetti superficiali dovuti alla lavorazione meccanica (che influiscono sul comportamento del rivestimento) ma bensì quasi unicamente alla disposizione in forno (vedi figura 5.6) e al tipo di coating troppo denso per scivolare via. Si può notare come nella zona con tali difetti si sia in presenza di crepe dovute al trattamento in forno a causa dello spessore molto elevato caratteristico di tale porzione di campione. Infine, in questo campione, così come nel polished, si può notare che le zone di bordo, notoriamente quelle più soggette a difetti dovuti alla lavorazione, sono quelle maggiormente interessate a questo particolare fenomeno. Infine, il campione lucidato presenta fenomeni di accumulo limitati. Tale fatto è imputabile alla bagnabilità minima (cioè spessore di rivestimento minimo) propria del campione e quindi questo aspetto favorisce il deflusso del coating. Nelle zone di bordo si ha accumulo massimo mentre nella zona centrale tali fenomeni sono puntuali (vedere freccia verde nella figura 5.7).

Non si è notato particolare influsso dei parametri di taglio sul fenomeno appena descritto.

L'analisi è stata condotta anche per i campioni CUVT, le seguenti foto sono state scattate al SEM a bassi ingrandimenti:

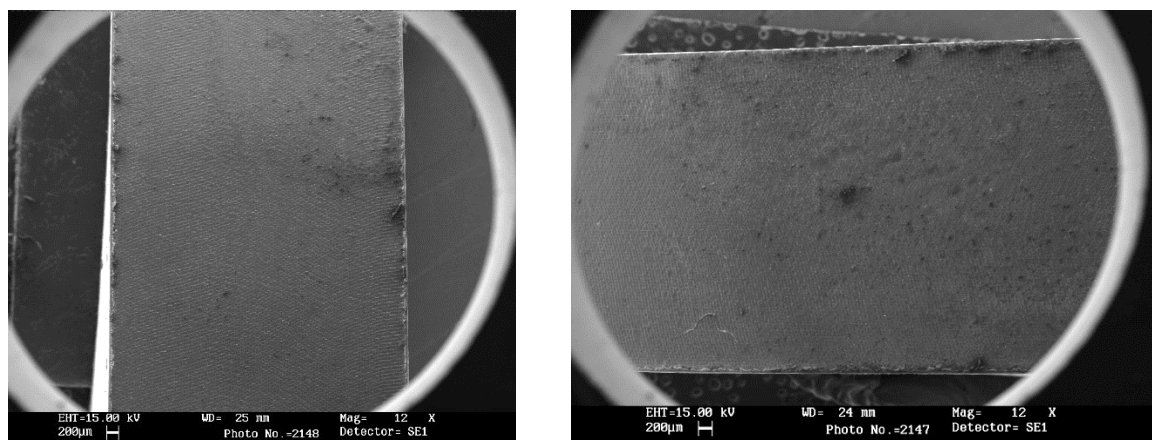


Figura 5.10: immagini SEM rivestimento S4C direzione Vc (dx) e feed (sx).

Come è evidente dalla figura 5.10, i campioni sono praticamente privi di accumulo. Si può notare un minimo di accumulo ai bordi del campione a causa della presenza inevitabile di bava a causa delle operazioni di taglio. Tale zona, però, non influirà nelle misure di spessore poiché verrà eliminata con le operazioni di preparazione del campione.

Per completezza si ritiene opportuno paragonare alcune immagini SEM che riportino le differenze per quanto concerne l'accumulo per campioni CUVT e UVT.

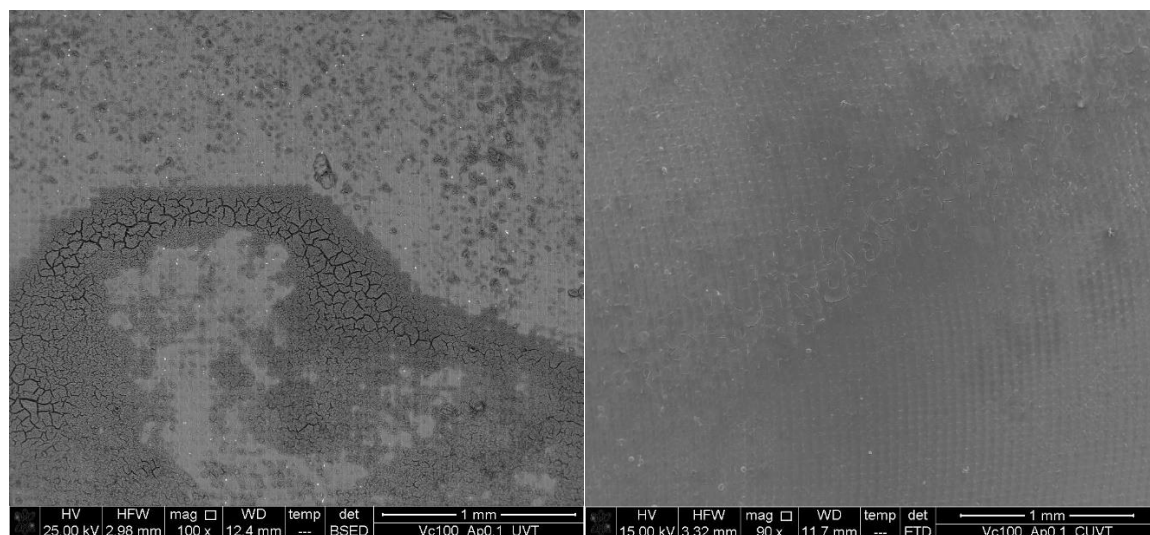


Figura 5.11: Confronto zone di massimo accumulo per campioni S2 (sx) e S2C (dx).

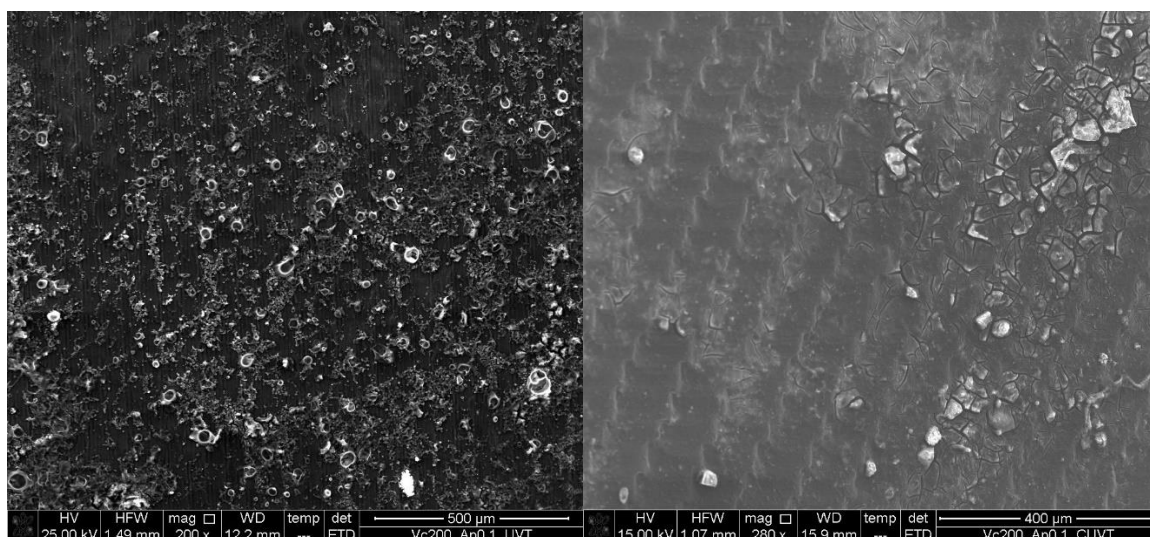


Figura 5.12: Confronto zone di massimo accumulo per campioni S6 (sx) e S6C (dx).

È evidente dalle immagini appena riportate che, per i campioni analizzati in questa tesi, i tre principali fattori che influiscono sull'accumulo (sia quantità che aspetto) sono:

1. **Spessore rivestimento:** più è spesso il rivestimento minore è l'influsso della morfologia della texture. Ciò favorisce notevolmente il movimento di eccessi di rivestimento che non rimangono più sulla superficie. Quindi, maggiore è lo spessore del rivestimento minore è la presenza di accumulo.
2. **Uniformità della texture:** eventuali non uniformità della texture possono fungere da appiglio per il rivestimento causando l'innescio di zone di accumulo.
3. **Disposizione in forno:** la disposizione in forno durante il processo di essiccazione del rivestimento ha influssi apprezzabili solo per i campioni UVT. Per i campioni CT che presentano ovunque accumulo e per i campioni CUVT che praticamente non ne presentano tale fattore non è apprezzabile.

Da ciò si può quindi concludere che i campioni CUVT sono praticamente estranei da fenomeni di accumulo. Inoltre, la texture introdotta dalla tornitura ad ultrasuoni, sia in condizioni di lavorazione a secco che criogeniche, permette al coating di non crepare durante l'essiccazione in forno con notevoli vantaggi in termini di resistenza a corrosione.

Riassumendo quanto appena detto:

Lavorazione	Entità accumulo	Zona interessata	Zone maggior accumulo	Zone minor accumulo
CT	Elevato	Ovunque	/	/
UVT	Medio	Lato appoggio	Molto+crepe	Nulla
CUVT	Minimo	Bordi/centro	Minimo	Assente
POLISHED	Basso	Bordi	Molto	Puntuale

Tabella 5.2: Riassunto entità e zone interessate da accumulo.

Si ritiene importante paragonare le varie tipologie di campioni con gli stessi parametri di taglio così da fornire un esempio chiaro di come il processo di lavorazione e la texture creata possa influire sul fenomeno appena descritto:

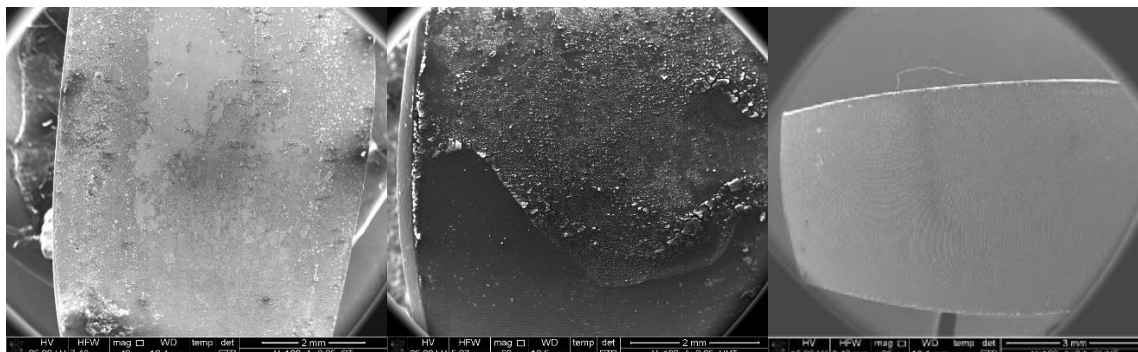


Figura 5.13: Confronto accumulo per campioni (da sx) S3, S4 e S4C.

## 5.6 Analisi SEM degli spessori del coating

### 5.6.1 Preparazione campioni per l'analisi degli spessori

A questo punto vi vuole analizzare l'andamento degli spessori del coating nella direzione della velocità di taglio  $V_c$ , cioè la direzione interessata dalla vibrazione per i campioni UVT/CUVT, e nella direzione di avanzamento (feed).

Per compiere queste osservazioni si devono disporre i campioni in modo che siano visibili tali direzioni. Si è deciso di inglobare tutti i campioni in resina epossidica disponendoli come nella figura seguente:

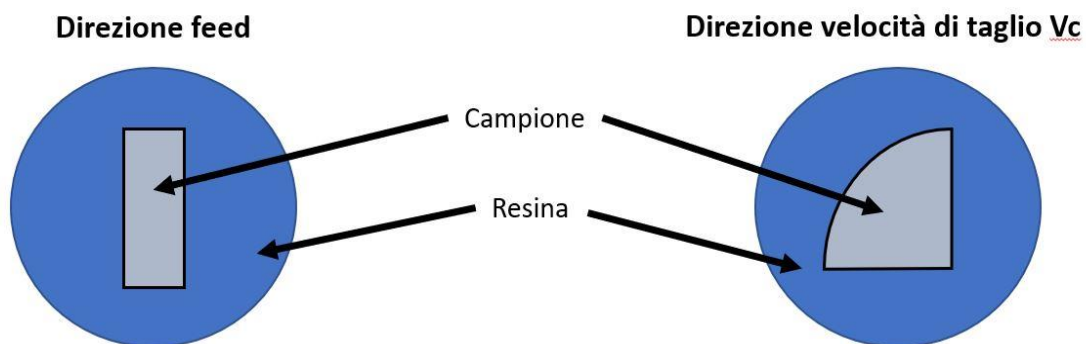


Figura 5.14: Disposizione campioni inglobati.

Prima di essere inglobati, però, si è optato di dorare la superficie da analizzare per evitare che il rivestimento potesse reagire con la resina. I campioni sono stati dorati per 30 secondi alla velocità di deposizione di 3 ångström/sec.

Come già accennato per inglobarli si è usata una resina epossidica (Epoxy 1000) e relativo induritore in rapporto 5:1 e poi lasciata solidificare per 24 ore.



Figura 5.15: Resina e induritore usati.

Una volta estratti i campioni inglobati, si è proceduto alla carteggiatura con carte abrasive di grana via via minore (dalla 800 alla 4000) e alla lucidatura con panni da 6 µm (polveri a base di allumina in soluzione acquosa) e 1 µm (pasta diamantata). A termine di tale procedura si sono dorate per 15 sec (3 ångström/sec) le superfici appena lucidate per aumentare la conduzione della superficie della resina (non conduttiva). L'ultimo step è fondamentale per le osservazioni al SEM poiché è necessario far scaricare a terra gli elettroni che bombardano la superficie del campione durante la sua osservazione.

## 5.6.2 Risultati analisi degli spessori

Per valutare l'andamento degli spessori sono state condotte più misure (almeno 3) per ogni caso da analizzare così da poter valutare il valore medio e la deviazione standard dello spessore del coating per ogni singolo caso osservato. Dall'analisi SEM si sono ricavate immagini come quella seguente:

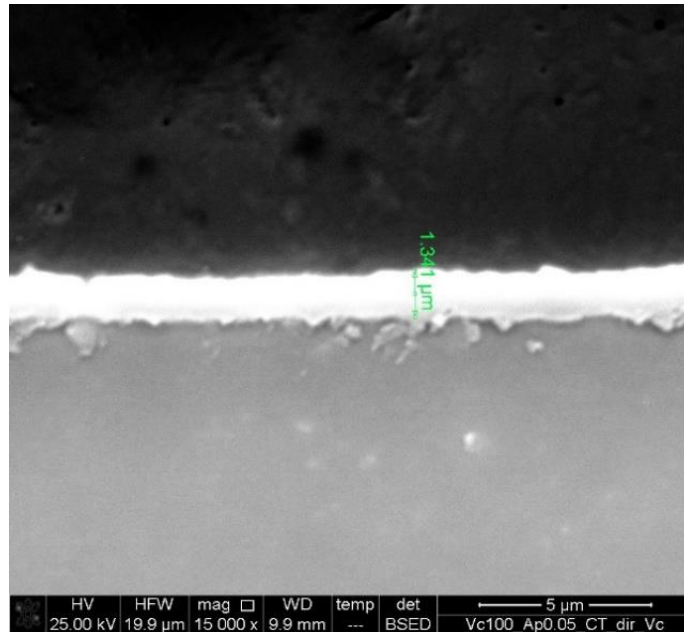


Figura 5.16: Esempio immagine SEM con misura dello spessore.

Per condurre tali osservazioni è stata utilizzata la sonda “*back-scattered*” che è in grado di rilevare il numero atomico delle diverse zone del campione osservate e tradurle a video con una scala di grigi. Zone con numero atomico maggiore sono rappresentate come zone più chiare mentre quelle con numero atomico inferiore vengono proiettate con un grigio via via più scuro. Data tale caratteristica, questo tipo di sonda era quella più idonea per l’analisi da effettuare permettendoci di ottenere una distinzione chiara tra substrato, rivestimento e resina.

Sigla campione	Campione	Direzione analizzata	Media [μm]	Deviazione standard [μm]	Num. Mis Accettate
S1	Vc100_Ap0,1_CT	Vel_taglio	2,2	0,5	3 di 3
		Feed	6,1	0,5	2 di 3
S2	Vc100_Ap0,1_UVT	Vel_taglio	1,3	0,2	3 di 3
		Feed	3,1	0,2	2 di 3
S3	Vc100_Ap0,05_CT	Vel_taglio	1,6	0,2	5 di 6
		Feed	1,9	0,2	4 di 4
S4	Vc100_Ap0,05_UVT	Vel_taglio	4,1	0,0	3 di 3
		Feed	1,5	0,9	3 di 4
S5	Vc200_Ap0,1_CT	Vel_taglio	1,7	0,4	2 di 3
		Feed	1,2	0,2	3 di 3
S6	Vc200_Ap0,1_UVT	Vel_taglio	1,8	0,4	3 di 3
		Feed	2,3	0,5	2 di 3
S7	Vc200_Ap0,05_CT	Vel_taglio	4,9	0,3	4 di 4

		Feed	1,1	0,1	3 di 3
S8	Vc200_Ap0,05_UVT	Vel_taglio	4,2	0,7	5 di 5
		Feed	3,3	0,4	3 di 4
Spolished	POLISHED	Vel_taglio	0,7	0,1	4 di 4
		Feed	1,0	0,2	3 di 3

Tabella 5.3: Media spessori e deviazione standard ottenute.

Alcune delle misure ricavate sono state considerate non valide e quindi escluse poiché hanno riportato un valore molto diverso dal valore medio a causa di accumuli (spessore molto elevato) o di asportazioni involontarie di rivestimento durante la preparazione del campione.

Per vedere chiaramente gli andamenti degli spessori riportati in tabella si è deciso di introdurre i risultati ottenuti in un grafico nel quale si è inserita la deviazione standard come barra di errore.

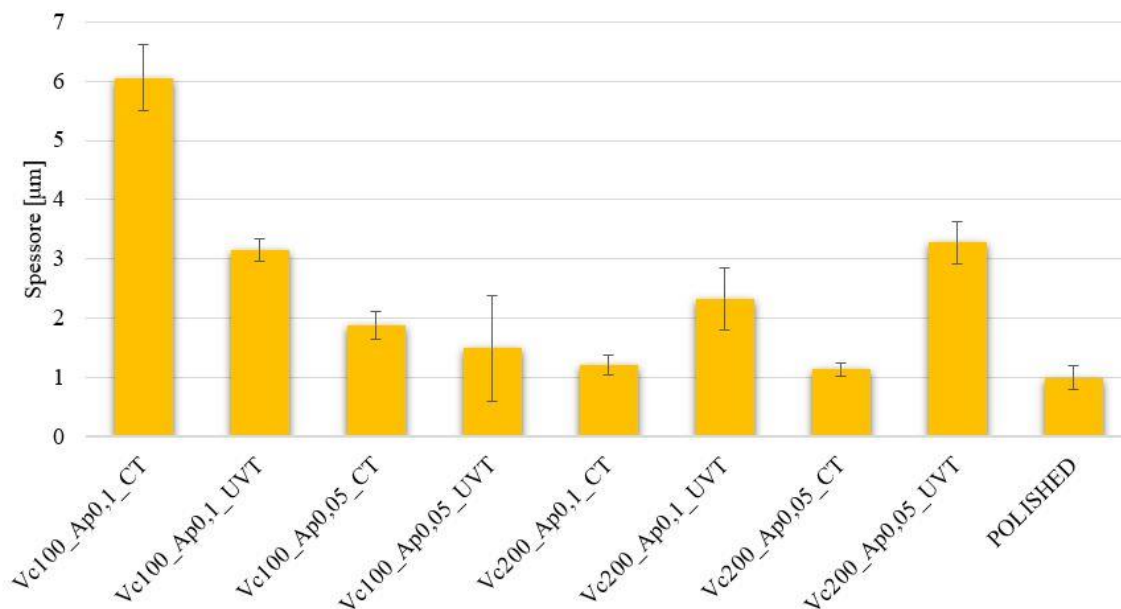


Figura 5.17: Grafico andamento spessori lungo la direzione del feed.



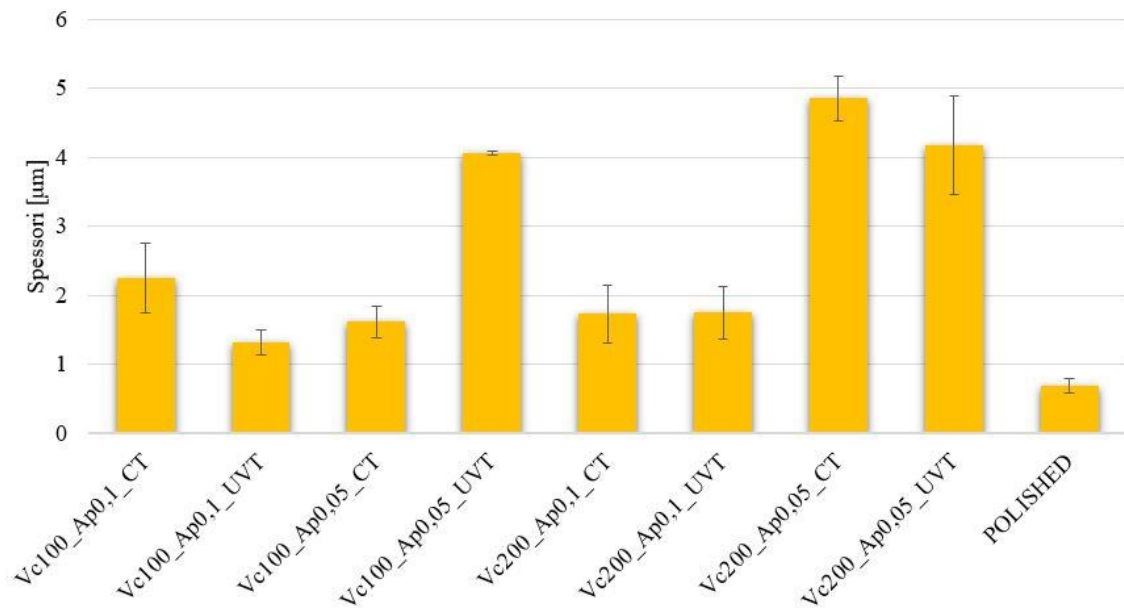


Figura 5.18: Grafico andamento spessori lungo la direzione della velocità di taglio Vc.

A questo punto confrontiamo gli spessori ottenuti nelle due direzioni a parità di campione:

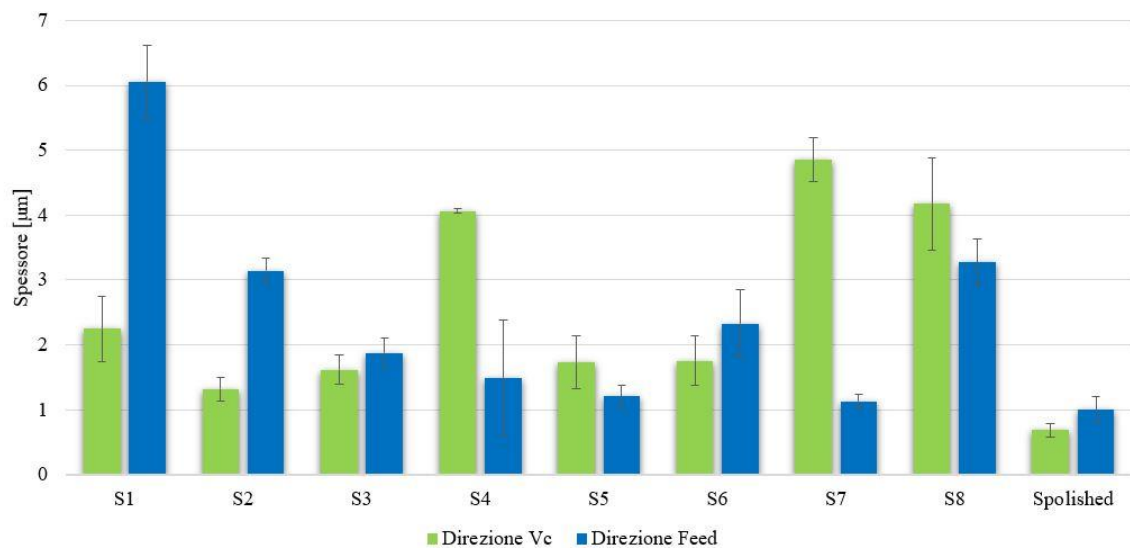


Figura 5.19: Confronto spessori lungo le due direzioni analizzate per uno stesso campione.

Dai grafici appena visti e dalla tabella precedente si può vedere come i valori tra una direzione e l'altra siano molto diversi e non vi sia un andamento comune.

A questo punto è necessario imporre un'ipotesi:

**IPOTESI:** Per ogni campione, lo spessore nella direzione della velocità di taglio  $V_c$  e quello nella direzione del feed sono UGUALI.

Tale affermazione è veritiera approssimando la superficie del coating e quella del provino «nudo» a superfici coassiali perfettamente cilindriche. L'ipotesi, inoltre, è concessa visto che considero la media e la deviazione standard dei vari valori ottenuti e poiché lo scopo di tale analisi è il confronto con i parametri ISO scelti che sono valori mediati sull'intera superficie.

Nasce quindi spontaneamente la domanda: quale dei due spessori è quello giusto?

I fattori di scelta sono stati:

1. Valore della deviazione standard (il più basso)
2. Numero di misure considerate valide
3. Valore di spessore sensato

Per quanto riguarda i campioni CUVT, gli spessori ottenuti dalla media delle 5 misure per campione effettuate sono:

Sigla	Campione	Dir. analizzata	Media [ $\mu\text{m}$ ]	Std [ $\mu\text{m}$ ]
S2C	Vc100_Ap0.1_CUVT	Vel_taglio	3.3	1.3
S4C	Vc100_Ap0.05_CUVT	Vel_taglio	6.0	1.8
S6C	Vc200_Ap0.1_CUVT	Vel_taglio	2.7	1.8
S8C	Vc200_Ap0.05_CUVT	Vel_taglio	3.4	0.7

Tabella 5.4: Media e deviazione standard degli spessori ottenuti per campioni CUVT.

La figura 5.15 riporta l'andamento degli spessori riscontrati per i vari parametri di taglio adottati.

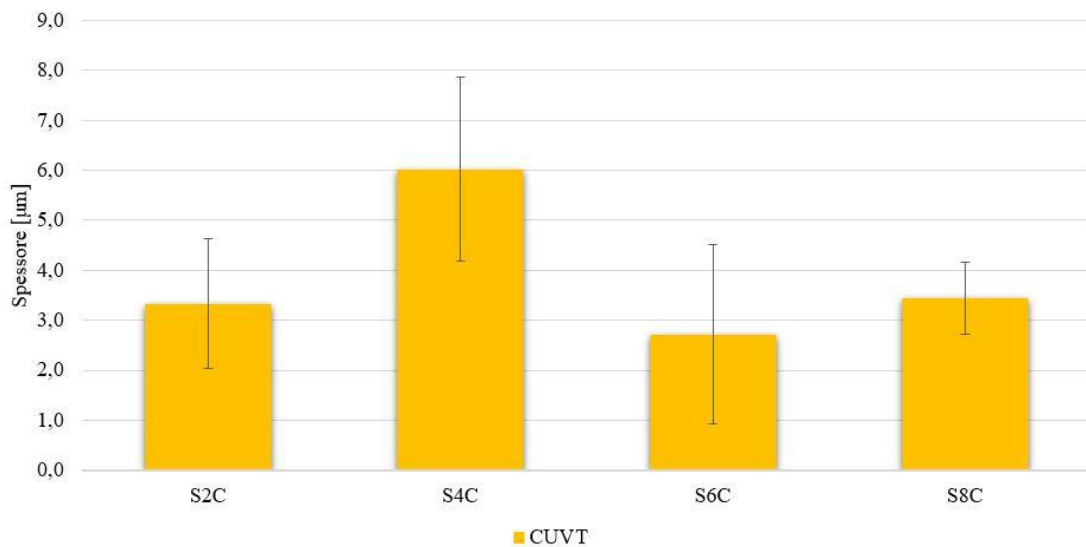


Figura 5.20: Grafico andamento spessori campioni CUVT lungo la direzione della velocità di taglio.

A questo punto non resta altro che confrontare come le diverse lavorazioni, a parità di parametri di taglio imposti, influiscano sullo spessore del rivestimento e quindi sulla bagnabilità del substrato. Nella figura 5.21, vengono rappresentati in verde chiaro i campioni CT, in blu quelli UVT, in giallo i CUVT e in verde scuro il campione lucidato a mano.

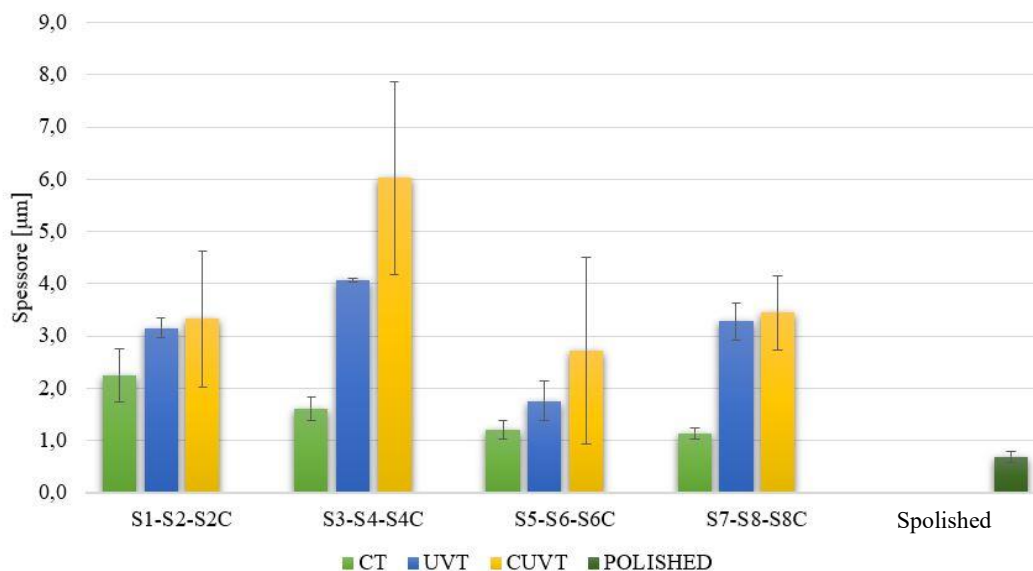


Figura 5.21: Grafico degli spessori considerati validi.

Per quanto riguarda l'analisi dei campioni ottenuti con raffreddamento criogenico, la deviazione standard elevata riportata dalle misure di spessore effettuate è una diretta conseguenza dell'andamento del rivestimento. Infatti, per i campioni CUVT, che riportano spessori di coating più elevati rispetto ai campioni UVT, il rivestimento non segue più la forma dei profili della texture ma la sua superficie risulta abbastanza omogenea, quindi è normale che in corrispondenza delle zone di picco della texture si rilevi uno spessore inferiore mentre in quelle di valle si ottenga un valore decisamente superiore. Tale fenomeno è chiaramente evidenziato dalle immagini seguenti:

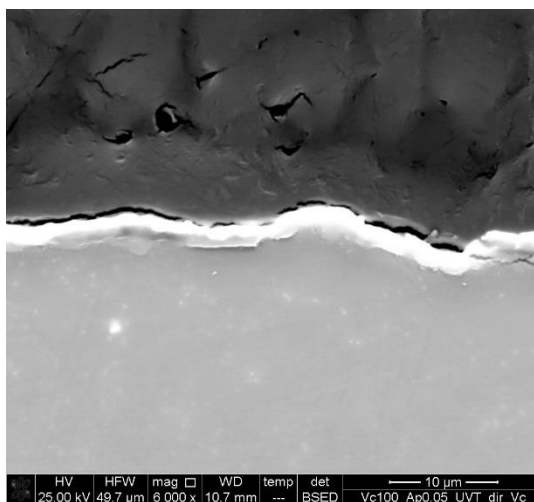


Figura 5.22: Aspetto rivestimento per campione S4.

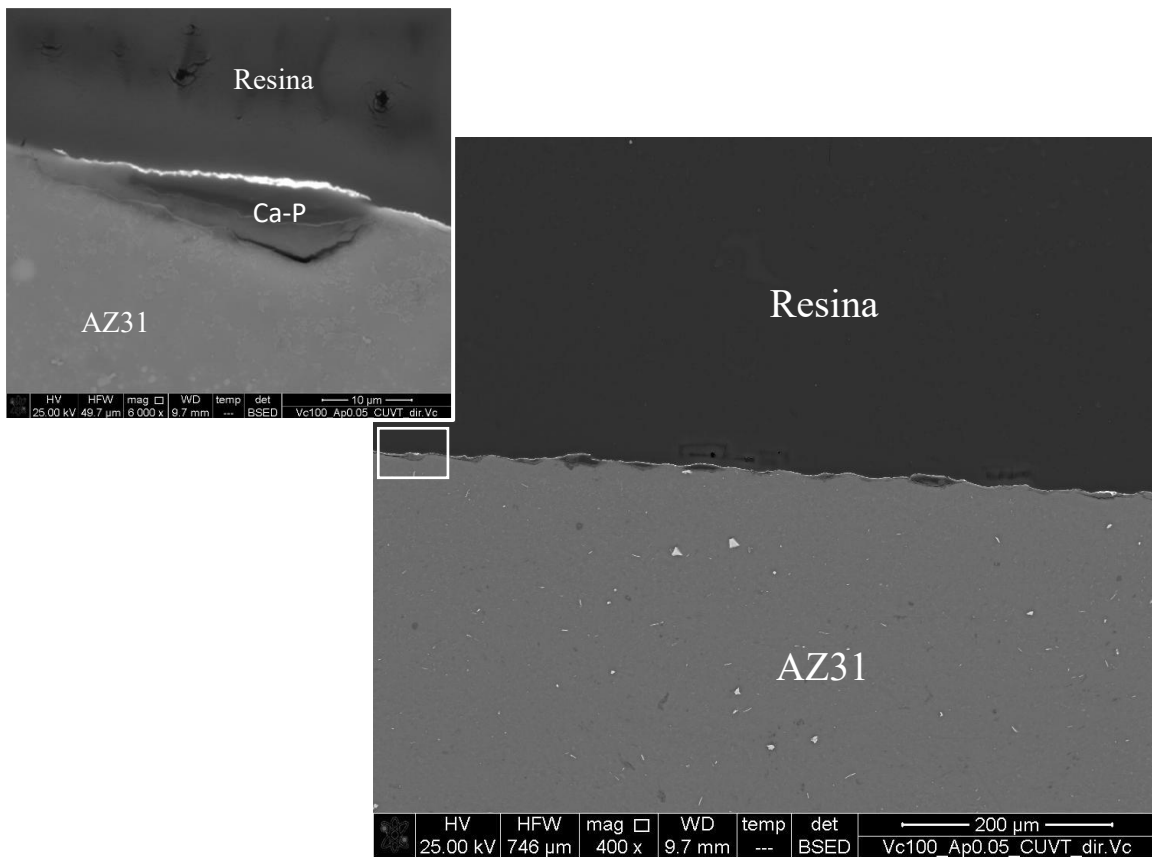


Figura 5.23: Aspetto del coating sul campione S4C con ingrandimento a x6000.

Per chiarezza si ritiene utile riportare di seguito uno schema dell'andamento degli spessori del coating rispetto a quello del substrato nei vari casi in esame. Per i campioni UVT si ha:

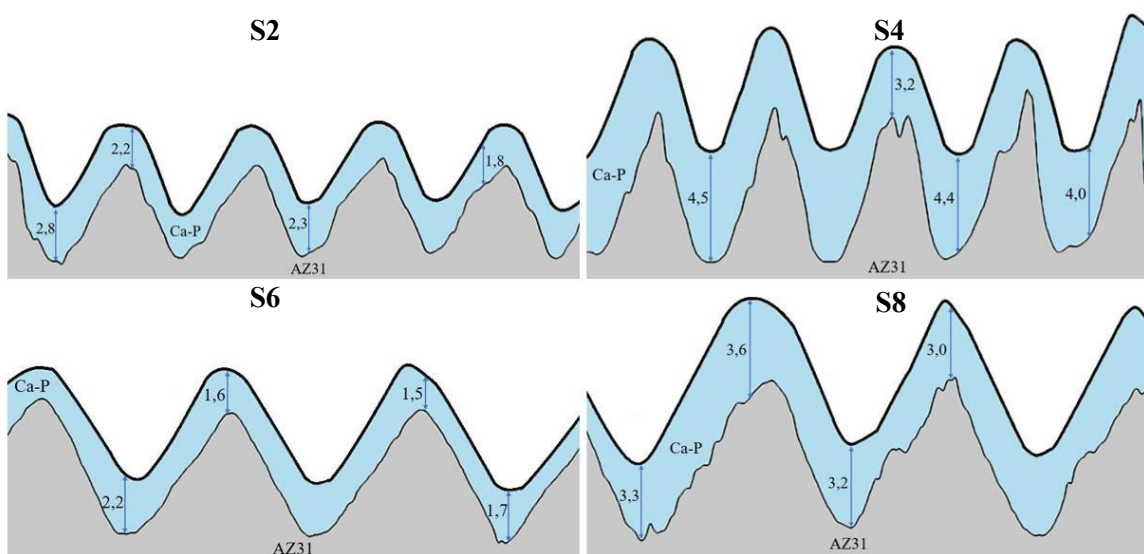


Figura 5.24: Andamento spessori campioni UVT.

Analogamente per i campioni CUVT:

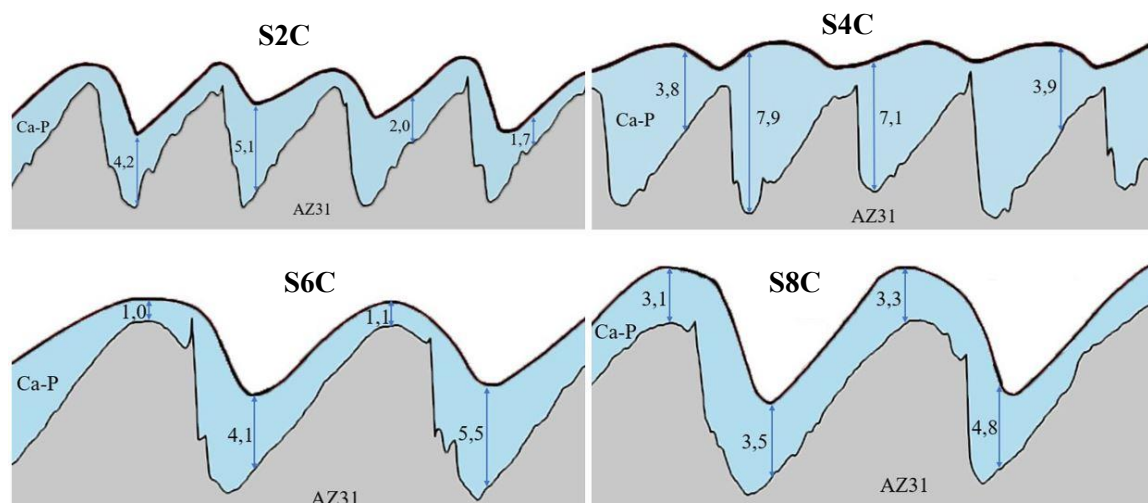


Figura 5.25: Andamento spessori campioni CUVT.

Osservando la figura 5.24 e la 5.25 è evidente quanto appena riportato. I campioni ottenuti con lavorazione a secco (fig. 5.24) presentano grande omogeneità nello spessore del rivestimento, infatti, i valori degli spessori tra zone di picco e di valle differiscono in misura molto limitata. Come conseguenza la deviazione standard riportata è piccola. Per i campioni CUVT, invece, le zone di valle sono caratterizzate da spessori molto più elevati rispetto a quelle di picco portando ad una deviazione standard decisamente superiore rispetto a quella dei corrispettivi campioni UVT. È fondamentale comunque sottolineare che gli schemi riportati descrivono tutto il corrispondente campione e non particolari zone di esso. Per completezza si riporta anche l'andamento dello spessore di un campione CT.

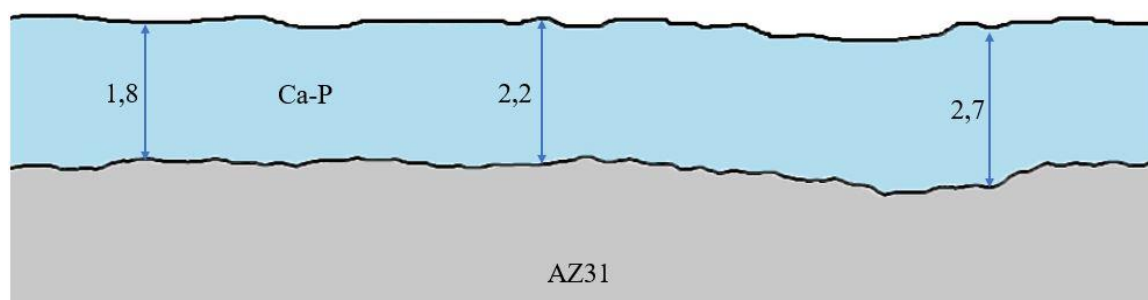


Figura 5.26: Andamento spessore su campione S1 (CT).

L'andamento riscontrabile negli altri campioni ottenuti tramite tornitura convenzionale è molto simile a quello di figura 5.26. A differenza degli UVT e dei CUVT, come già detto in precedenza, lo spessore di rivestimento non è assolutamente omogeneo a causa di accumuli molto marcati, crepe ecc. Quindi la figura precedente rappresenta una porzione ideale e non la totalità del campione.

### 5.6.3 Confronto tra spessori e parametri di texture

Ora confrontiamo l'andamento dei parametri di texture trattati nel capitolo 4.1.1 con gli spessori validi descritti nel paragrafo precedente.

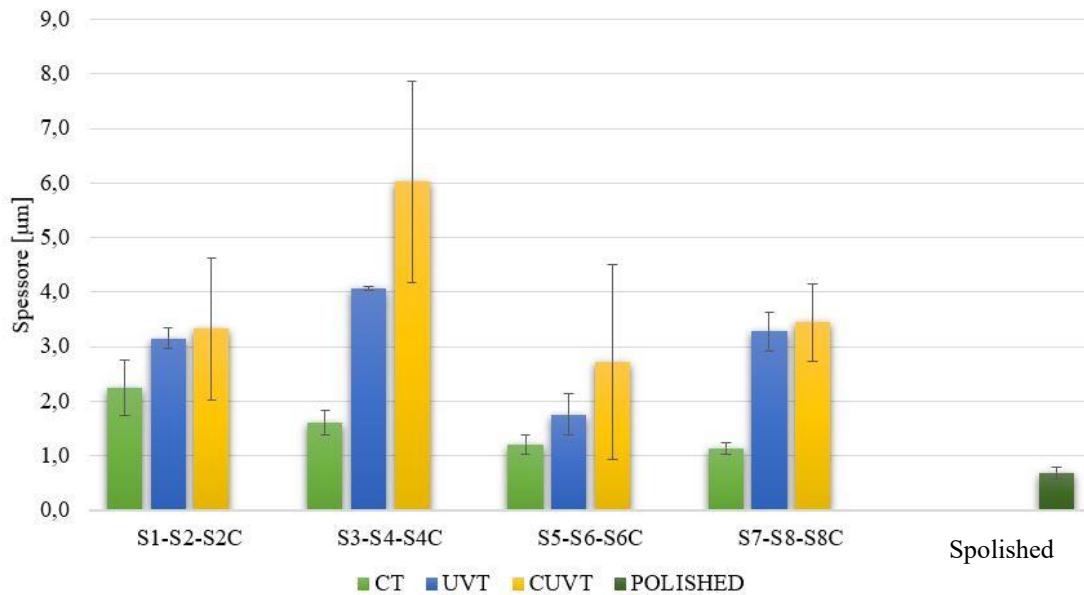


Figura 5.27: Grafico degli spessori considerati validi.

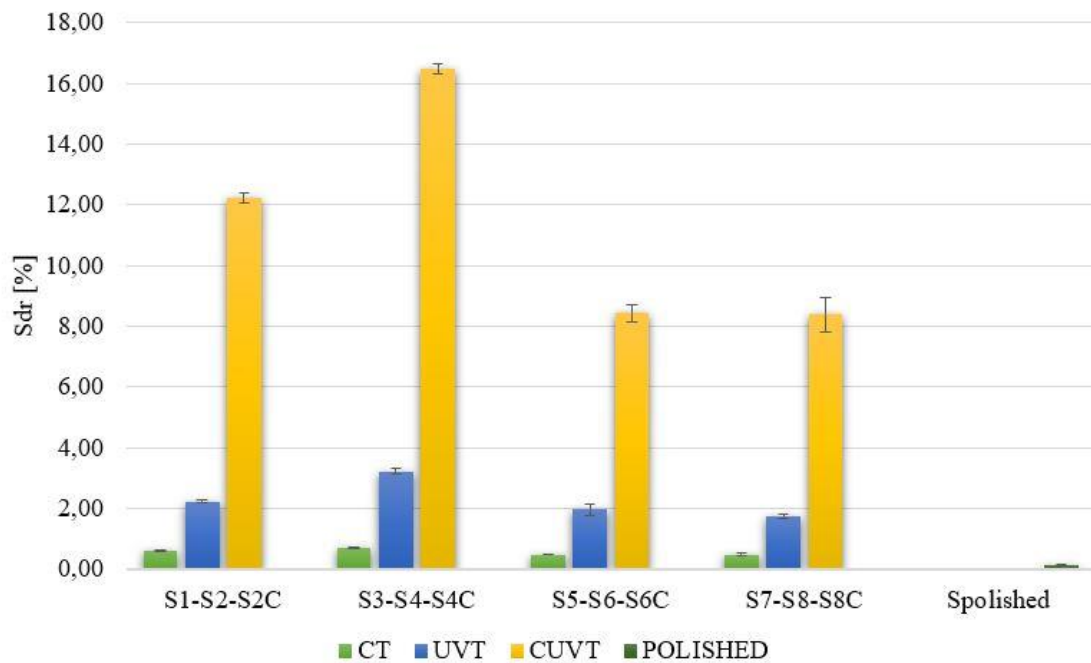


Figura 5.28: Grafico confronto parametro Sdr per tutti i campioni.

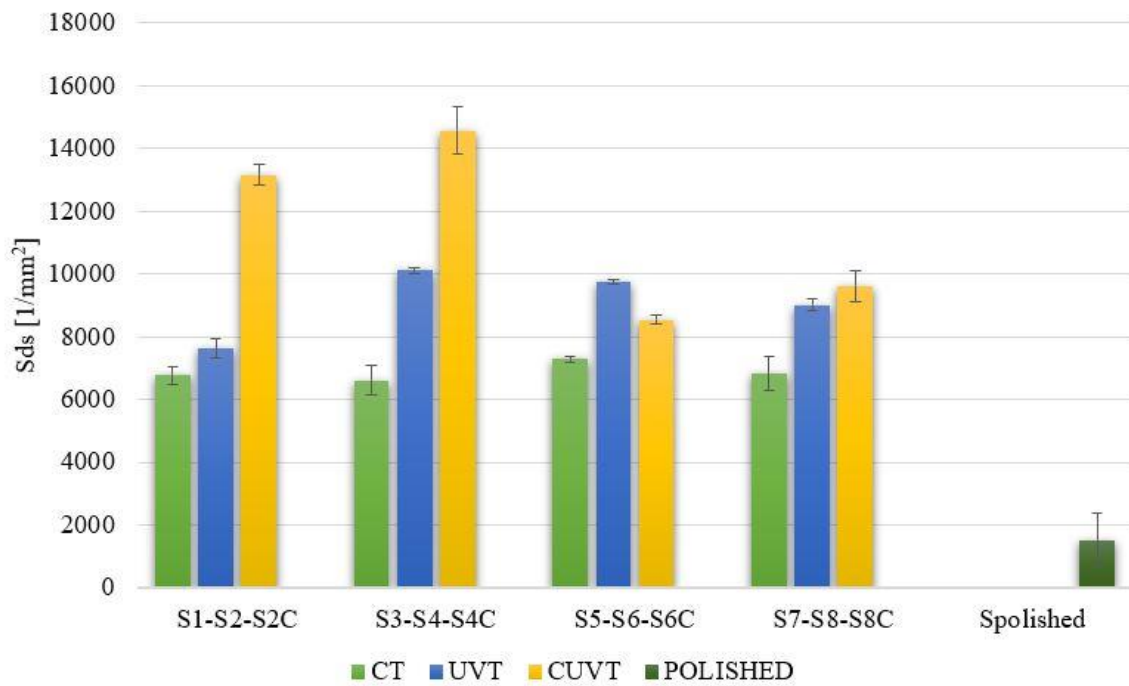


Figura 5.29: Grafico confronto parametro Sds per tutti i campioni.

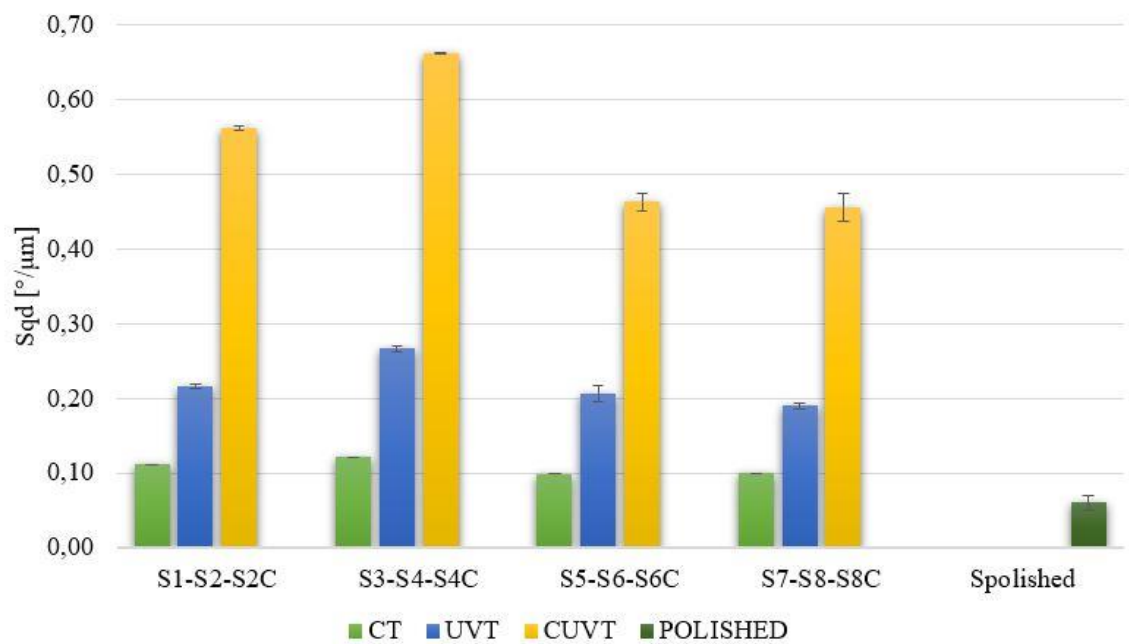


Figura 5.30: Grafico confronto parametro Sqd per tutti i campioni.

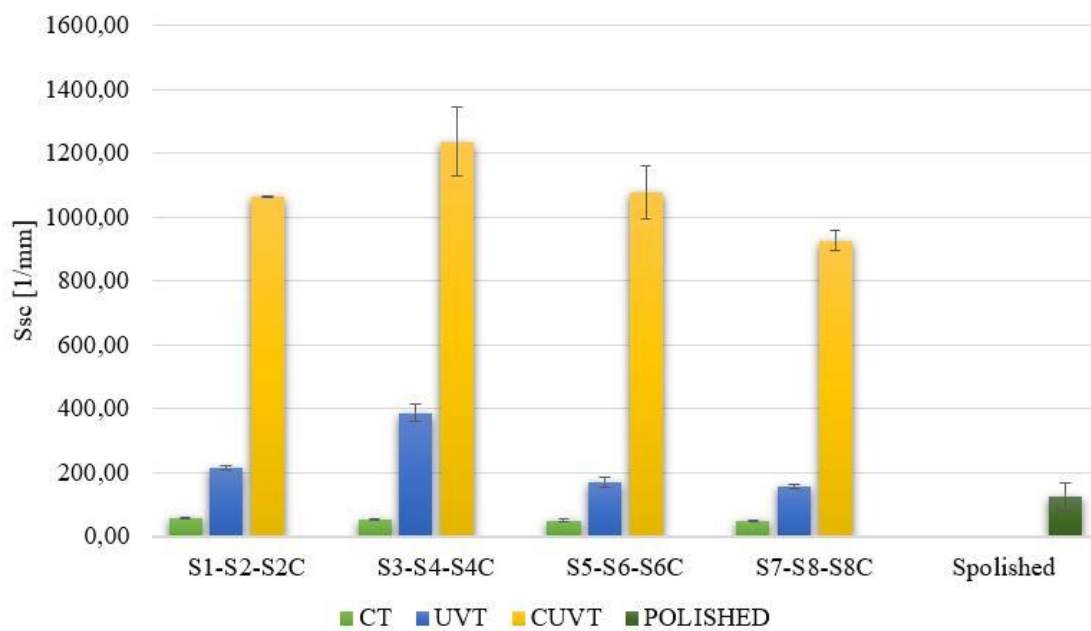


Figura 5.31: Grafico confronto parametro Ssc per tutti i campioni.

Dall'analisi dei parametri di texture si ricava che:

1. Valori molto simili per i campioni CT
2. Andamento a campana centrato su S4 e S4C per i campioni UVT/CUVT
3. Valori più alti per i campioni CUVT, seguiti da UVT e infine da CT
4. Valore del campione polished sono sempre i più bassi

Per quanto riguarda gli spessori si nota lo stesso andamento di base che abbiamo appena osservato sui parametri superficiali, ma con qualche piccola differenza:

1. Andamento leggermente decrescente degli spessori per i campioni CT
2. Il campione S6 ha un valore più basso di quello ottenuto per S8 mentre per rispettare l'andamento a campana dovrebbe avere valore compreso tra quello ottenuto per S4 e quello per S8.

Prima di portare le conclusioni, è utile ricordare:

1. I parametri di texture analizzati sono valori mediati su una superficie di area  $2280\mu\text{m} \times 659.83\mu\text{m}$  (nel caso in esame).
2. I valori dei parametri riportati in questa tesi sono ricavati dalla media delle misure ottenute in 3 zone diverse del campione. (3 misure per ogni campione)
3. I parametri di texture non sono influenzati dai difetti del coating o dalla preparazione del campione
4. Gli spessori qui riportati sono la media di al massimo 6 misure PUNTUALI.



5. Gli spessori sono funzione della forma della texture e non di una sola sua caratteristica.

Detto questo è evidente che il valore degli spessori risulta molto più sensibile ad errori rispetto a quello dei parametri. Quindi, l'andamento leggermente decrescente per i campioni CT e lo spessore ottenuto per S6 che non rispetta l'andamento a campana osservato possono essere imputati alla natura delle misure condotte.

Si può, dunque, affermare che gli spessori e i parametri di texture ricavati hanno lo stesso andamento quindi dall'osservazione di questi ultimi possiamo già portare alcune conclusioni sulla bagnabilità e quindi sullo spessore del rivestimento.

## 5.7 Valutazione della durezza all'interfaccia

Arrivati a questo punto, una domanda che sorge spontanea è: come e in che modo la texture creata sul pezzo influisce sull'adesione del rivestimento sul substrato?

Per valutare tale aspetto sono state condotte delle nanodurezze all'interfaccia utilizzando una punta di Berkovich montata su un nanoindentatore iMicro™ (Nanomechanics Inc) e imponendo un carico massimo di 10 mN. L'output fornito dal sistema è la durezza espressa in GPa. Sono state condotte 5 misure per campione per le quali è stata calcolata la media e la deviazione standard. Per quanto riguarda la durezza della lega AZ31, i test sul materiale, condotti nella parte centrale del campione, hanno riportato  $0.74 \pm 0.02$  GPa per i campioni realizzati a secco mentre  $0.86 \pm 0.06$  GPa che risulta essere circa un 8% superiore rispetto alla precedente per i CUVT.

Sigla	Campione	Nanodurezza [GPa]	Std [GPa]	Direzione
S1	Vc100_Ap0,1_CT	0,49	0,08	Vc
S2	Vc100_Ap0,1_UVT	0,79	0,16	Feed
S2C	Vc100_Ap0,1_CUVT	0,69	0,06	Vc
S3	Vc100_Ap0,05_CT	0,12	0,02	Vc
S4	Vc100_Ap0,05_UVT	0,98	0,10	Vc
S4	Vc100_Ap0,05_CUVT	0,85	0,12	Vc
S5	Vc200_Ap0,1_CT	0,38	0,08	Feed
S6	Vc200_Ap0,1_UVT	0,47	0,19	Vc
S6C	Vc200_Ap0,1_CUVT	0,31	0,05	Vc
S7	Vc200_Ap0,05_CT	0,46	0,12	Feed
S8	Vc200_Ap0,05_UVT	0,53	0,15	Feed
S8C	Vc200_Ap0,05_CUVT	0,37	0,15	Vc
Polished	Polished	0,28	0,08	Feed

Tabella 5.5: Media e deviazione standard delle nanodurezze all'interfaccia nelle direzioni considerate valide per gli spessori.

NOTA: le direzioni analizzate sono state specificate per chiarire che tali prove sono state condotte lungo gli spessori di rivestimento considerati validi così da evitare eventuali errori dovuti alla presenza di accumulo.

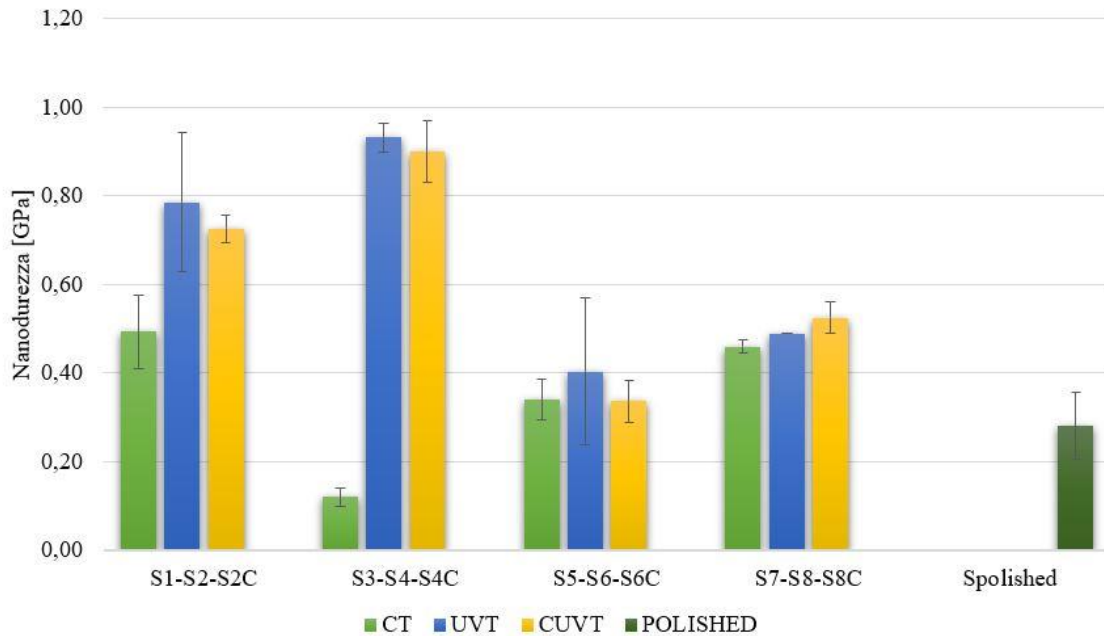


Figura 5.32: Grafico confronto nanodurezze all'interfaccia per campioni CT, UVT e CUVT.

Il grafico in figura 5.32 riporta l'andamento delle nanodurezze all'interfaccia ricavate per tutti i campioni realizzati. Si può notare che, per i campioni CT i valori nanodurezza riscontrati sono simili tra loro (tranne per S3) mentre quelli ricavati per i campioni UVT e CUVT seguono l'andamento a campana mostrato dai parametri di texture e dagli spessori. Si può quindi concludere che anche la forza del legame tra substrato e rivestimento dipende dal suo spessore che a sua volta dipende dalla texture creata e, in particolare, riporta lo stesso andamento dei parametri di texture considerati.

# Capitolo 6

## Conclusione

Questo capitolo ha lo scopo di illustrare i risultati ottenuti nel corso di tutta la trattazione.

### 6.1 Risultati

L'obiettivo dello studio condotto è stato quello di migliorare l'efficienza di deposizione di un rivestimento biomedicale su un substrato di lega di magnesio AZ31 e, inoltre, quello di trovare un legame tra i parametri di rugosità superficiale e la bagnabilità del materiale e quindi anche con lo spessore del rivestimento applicato. Si sono analizzati tutti i parametri della normativa ISO 25178 e alcuni della normativa EUR15178N. I parametri che hanno destato particolare interesse a tale lo scopo sono stati quattro parametri di texture:

1.  $S_{qd}$  [ $^{\circ}/\mu\text{m}$ ]: radice quadrata del gradiente medio della superficie
2.  $S_{dr}$  [%]: rapporto tra superficie reale e ideale
3.  $S_{sc}$  [ $1/\text{mm}$ ]: curvatura media all'apice
4.  $S_{ds}$  [ $1/\text{mm}^2$ ]: numero di picchi per unità di area

Tali parametri hanno riportato un andamento molto simile tra loro e sovrapponibile con quello riportato dall'analisi degli spessori, in particolare, il valore di questi parametri di texture è direttamente proporzionale allo spessore di rivestimento ottenuto.

Si sono, inoltre, analizzati due fattori chiave per la resistenza a corrosione di un materiale rivestito, in particolare: la morfologia del rivestimento, quindi la presenza o meno di accumulo o crepe, e la nanodurezza all'interfaccia tra substrato e rivestimento per valutarne l'adesione.

In primis, le immagini ottenute tramite analisi SEM a bassi ingrandimenti hanno riportato che l'accumulo sui campioni è funzione di diversi fattori:

1. **Spessore rivestimento:** più è spesso il rivestimento minore è l'influsso della morfologia della texture. Ciò favorisce notevolmente il movimento di eccessi di rivestimento che non rimangono più attaccati alla superficie. Quindi, maggiore è lo spessore del rivestimento minore è la presenza di accumulo.
2. **Uniformità della texture e difetti:** eventuali non uniformità nella forma della texture e difetti introdotti con la tornitura possono fungere da appiglio per il rivestimento causando l'innescio di zone di accumulo.
3. **Disposizione in forno:** la disposizione in forno durante il processo di essiccazione del rivestimento ha influssi apprezzabili solo per i campioni UVT. Per i campioni

CT che presentano ovunque accumulo e per i campioni CUVT che praticamente non ne presentano tale fattore non è apprezzabile.

È fondamentale indicare che anche il tipo di coating e la metodologia di deposizione incidono sull'entità di tale fenomeno, ma, nel nostro caso, essendosi mantenuti questi due aspetti costanti non sarebbe corretto dire che i risultati ottenuti siano stati influenzati da ciò. Inoltre, è emerso da tale analisi che la texture creata sia nei campioni CUVT che in quelli UVT nelle zone esenti da accumulo permette al coating di non crepare con ovvi vantaggi per quanto concerne la resistenza a corrosione.

Per quanto riguarda l'adesione del rivestimento al substrato, le prove di nanodurezza all'interfaccia hanno fornito lo stesso andamento ottenuto per i parametri di texture e per gli spessori. L'unica differenza riportata riguarda il valore nominale di queste, infatti, le nanodurezze ottenute per i campioni CUVT hanno un valore molto simile a quelle ottenute per i campioni UVT sebbene i parametri e gli spessori abbiano riportato valori inferiori per questi ultimi. In ogni caso, l'adesione del rivestimento ha riportato un significativo incremento per i campioni texturizzati rispetto a quelli ottenuti per tornitura convenzionale.

Concludendo, il processo di tornitura assistita da vibrazione ultrasonica affiancata da raffreddamento criogenico ha fornito i risultati migliori. Dall'analisi dei difetti superficiali è stato riscontrato che l'utilizzo di tale processo produttivo elimina del tutto gli strappi e le adesioni di materiale osservate nei campioni CT (già comunque non presenti nei campioni UVT) e diminuisce fino ad annullare, a seconda dei parametri di taglio imposti, le incertezze di forma della texture caratteristiche dei campioni UVT. Come già detto in precedenza, la lavorazione CUVT ha permesso di ottenere valori massimi dei parametri di texture sopra riportati e quindi di spessore di rivestimento depositato. L'aumento dello spessore e la diminuzione delle imperfezioni della forma della texture hanno permesso di ottenere campioni non affetti da fenomeni di accumulo se non in forma quasi del tutto trascurabile.

# Capitolo 7

## Approfondimenti

Questo capitolo ha lo scopo di illustrare in maniera esaustiva al lettore alcune delle tecnologie e processi di analisi utilizzati.

### 7.1 Microscopio elettronico a scansione

Il microscopio elettronico a scansione, comunemente indicato con l'acronimo SEM dall'inglese *Scanning Electron Microscope*, è un tipo di microscopio elettronico. Tale microscopio non sfrutta la luce come sorgente di radiazioni. Il fascio viene generato da una sorgente elettronica, tipicamente un filamento in tungsteno, che emette un flusso di elettroni primari concentrato da una serie di lenti elettromagnetiche e deflesso da una lente obbiettivo. Quest'ultima, oltre a rifocalizzare ulteriormente il fascio, impone allo stesso una deflessione controllata, in modo da permettere la scansione di aree del campione. Uno dei possibili effetti prodotti dall'interazione fra l'elettrone e la materia è rivelato e trasformato in segnale elettrico che, trattato e amplificato, viene modulato in segnale televisivo: 1 pixel di un monitor monocromatico è associato ad 1 punto del campione ed è tanto più luminoso quanto più intenso è il segnale. L'ingrandimento è dato dal rapporto fra le dimensioni dell'immagine e le dimensioni della regione su cui è stata effettuata la scansione, in generale, tale strumento può fornire ingrandimenti fino a x200.000. Questi elettroni sono catturati da uno speciale rivelatore e convertiti in impulsi elettrici che vengono inviati in tempo reale, ad un monitor dove viene eseguita simultaneamente una scansione analogica. Il risultato è un'immagine in bianco e nero ad elevata risoluzione (circa 2.5 nm) e grande profondità di campo, che ha caratteristiche simili a quelle di una normale immagine fotografica. Per questa ragione le immagini SEM sono immediatamente intelligibili ed intuitive da comprendere. Il microscopio elettronico a scansione può ottenere immagini che appaiono quasi tridimensionali anche di oggetti relativamente grandi.

Il SEM deve operare in vuoto spinto (pressioni inferiori a  $10^{-3}$  Pa) per permettere la produzione e il campione deve essere conduttivo e messo a terra, in modo da poter allontanare dalla zona di analisi ogni possibile accumulo di carica che renderebbe impossibile l'osservazione. Campioni non conduttivi possono comunque essere osservati al SEM operando rivestimenti metallici, disidratando i campioni umidi oppure eseguendo l'operazione in maniera rapida in modo tale da evitare che l'accumulo di cariche vada a surriscaldare l'oggetto in questione. Si ricorda che nel nostro caso solo il magnesio è

conduttivo mentre resina epossidica e coating non lo sono, per tale ragione, si sono dorati i campioni cioè è stato applicato un rivestimento metallico (oro) conduttivo.

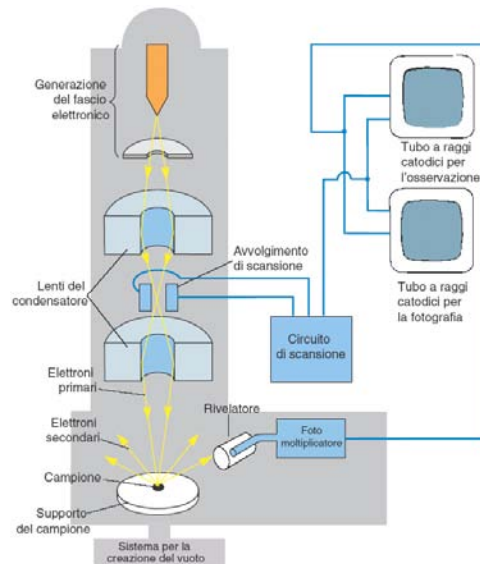


Figura 7.1: Schema componenti SEM.

## 7.1.1 Componenti fondamentali del SEM

### 1. Sorgente elettronica

La sorgente elettronica, definita anche Gun, genera il fascio tramite estrazione di elettroni e accelerazione degli stessi. La quasi totalità delle sorgenti elettroniche funzionano per effetto termoionico, anche se esistono sorgenti che sfruttano fenomeni quantistici come il *Field Emission*.

Le sorgenti sono caratterizzate da una serie di grandezze che ne misurano le prestazioni e le capacità:

- **Diametro di cross-over  $d_0$** : è il diametro del fascio all'estrazione. La risoluzione sarà maggiore tanto più piccolo è il  $d_0$ .
- **Variatione energetica all'estrazione  $\Delta E_{est}$** : è la massima differenza di energia degli elettroni estratti. Valori elevati possono portare ad aberrazioni cromatiche dopo focalizzazione.

- **Brillanza  $\beta$** : parametro legato all'intensità del fascio espresso in  $A \cdot cm^{-2} \cdot srad^{-1}$ , valori elevati di brillanza sono richiesti per microanalisi chimiche accurate. Talvolta la brillanza elevata può favorire fenomeni di diffrazione.

## 2. Lenti elettromagnetiche

Nel SEM è presente un sistema di lenti elettromagnetiche che come delle lenti ottiche permettono la focalizzazione del fascio, riducendone il diametro. Sono costituite da un traferro toroidale avvolto da spire che creano un campo magnetico in grado di interagire e deflettere gli elettroni del fascio. Tra le lenti sono interposte delle aperture, che filtrano gli elettroni riducendo le dimensioni del fascio. L'ultima lente funge da obiettivo ed è caratterizzata da un sistema di bobine che permette la deflessione dell'asse del fascio, realizzando la scansione. La messa a fuoco delle lenti avviene modificando la tensione di eccitazione delle bobine (EHT) e la distanza del campione (WD). Dopo la focalizzazione, un SEM convenzionale con sorgente termoionica può arrivare ad avere un fascio del diametro di 5 - 10 nm, mentre un SEM con sorgente puntuale anche a 1 - 2 nm. La risoluzione è intrinsecamente legata al diametro del fascio: fasci molto piccoli portano a risoluzioni elevate.

## 3. Rilevatori

Le interazioni tra elettrone e campione vengono lette da appositi rivelatori. A seconda della natura, energia e lunghezza d'onda permettono di ricavare informazioni utili all'analisi del campione.

- **Rivelatore Everhart-Thorley:**

Permette la rivelazione degli elettroni secondari. È montato in direzione inclinata rispetto al fascio ed è caratterizzato da una gabbia metallica su cui viene applicata una tensione di circa 200 V. Questa permette di catturare gli elettroni secondari e di condurli in un canale, chiamato *light guide*, in cui l'energia degli elettroni viene trasferita a dei fotoni che verranno letti da un fotomoltiplicatore. Il segnale, una volta filtrato ed amplificato, viene portato al monitor.

- **Rivelatore BSET:**

Permette la rivelazione degli elettroni retrodiffusi, definiti anche Back-Scattered Electron. È montato in corrispondenza della lente obiettivo ed è costituito da una giunzione p-n rivestita da una lamina d'oro. Come già spiegato precedentemente, questo tipo di sonda evidenzia i diversi numeri atomici delle varie zone del campione mostrandoli come una scala di grigi. Per tale ragione tale rivelatore è stato scelto per l'analisi di spessore fatta.

- **Altri tipi di rivelatore:**

Sono spesso montati anche altri tipi di rivelatori che permettono di effettuare analisi differenti. Ad esempio:

1. EDS e WDS
2. Rivelatore di elettroni Auger
3. EBSD

Nei SEM convenzionale l'osservazione del campione può avvenire principalmente in due modalità: per rilevazione degli elettroni secondari o per rivelazione dei retrodiffusi.

- **Volume di interazione**

L'elettrone è molto più piccolo degli atomi di cui è costituito il campione, per cui l'interazione non riguarderà solo la superficie colpita dal fascio ma anche gli strati sottostanti. Si definisce perciò un volume di interazione. La geometria del volume è fortemente influenzata dalla natura degli atomi del campione, in particolar modo dal numero atomico  $Z$ : campioni con atomi con  $Z$  basso, presenteranno un volume con geometria "a pera", stretto in superficie e che tende ad allargarsi in profondità. Al crescere di  $Z$  gli elettroni penetreranno sempre di meno il campione, portando ad una riduzione del volume di interazione e ad una geometria simile ad una calotta sferica. Gli elettroni rilevati dai sensori possono provenire da profondità diverse del volume di interazione e di conseguenza riportare informazioni differenti. Si distinguono 4 zone principali da cui provengono 4 tipologie di elettroni differenti:

1. Elettroni Auger: provengono dalle zone più superficiali (1-5 nm di profondità) e sono rilasciati per effetto Auger. Hanno energie comprese fra i 50 - 1000 eV e possono essere sfruttati in microanalisi.
2. Elettroni secondari: avendo energie comprese fra 0 e 50 eV, provengono dagli strati superficiali del campione massivo (5-50 nm). Interessano un volume di interazione ridotto.
3. Elettroni retrodiffusi: hanno energie prossime a quella del fascio primario (20-30 keV) e possono, di conseguenza, emergere da regioni più profonde del volume d'interazione (dell'ordine di alcune centinaia di nm).
4. Raggi X: I raggi X caratteristici emergono dalla regione più profonda del volume d'interazione (dell'ordine di alcuni micron), con risoluzione spaziale povera rispetto ai segnali precedenti. Vengono impiegati in microanalisi.



- **Elettroni retrodiffusi o elettroni di backscattering**

Date le dimensioni elevate del volume di provenienza degli elettroni retrodiffusi, l'osservazione risulta di scarsa risoluzione. Tuttavia, l'interazione stessa permette di differenziare gli elettroni retrodiffusi in funzione del numero atomico  $Z$  degli atomi con cui gli elettroni hanno interagito. Elettroni retrodiffusi da atomi con  $Z$  alto daranno origine ad un segnale più intenso. Sul monitor quindi le fasi con  $Z$  più elevato compariranno più chiare, mentre quelle costituite da atomi con  $Z$  più piccolo più scure. L'osservazione con gli elettroni retrodiffusi permette quindi di riconoscere le diverse fasi e costituenti del campione, con una perdita rilevante di risoluzione e della tridimensionalità dell'immagine fornita dall'osservazione degli elettroni secondari.

- **Elettroni secondari**

La rivelazione degli elettroni secondari permette un'osservazione ad alta risoluzione del campione. Il ristretto volume di interazione permette di rilevare anche i più piccoli dettagli con risoluzione fino a 5 nm. La profondità di campo dell'osservazione con gli elettroni secondari è molto elevata, permettendo di mettere a fuoco superfici fortemente rugose e tridimensionali. Ciò permette l'osservazione di campioni massivi tridimensionali sia ad alti che a bassi ingrandimenti, creando immagini con una forte tridimensionalità. Il rivelatore Everhart-Thorley permette inoltre di catturare anche una quota parte di elettroni retrodiffusi. Questo permette all'osservazione tramite elettroni secondari di poter differenziare fasi con atomi diversi, anche se in misura minore rispetto all'osservazione tramite elettroni retrodiffusi.

## **7.2 Caratteristiche e realizzazione del sistema UVT**

Il Sistema di UVT utilizzato in questa tesi è composto da: un trasduttore piezoelettrico, un sonotrodo, l'utensile da taglio e un sistema meccanico di ancoraggio alla torretta rotante del tornio Mori-Seiki NL-1500 CNC<sup>TM</sup>. Il trasduttore di Langevin usato è di tipo *bolt-clamped*: due anelli piezoelettrici sono precaricati sotto l'azione di due coni in alluminio troncati e una testa cilindrica in acciaio. La lunghezza totale del sonotrodo, in prima approssimazione, è indipendente dalla forma ed è, assieme alla velocità del suono nel mezzo, l'unico parametro che identifica la frequenza naturale di risonanza del sistema. Inoltre, la frequenza naturale di risonanza deve combaciare, con una tolleranza di circa mezzo kHz, con la frequenza di risonanza del trasduttore. Per raggiungere tale scopo, si è usato un metodo iterativo sperimentale basato sulla modellazione preliminare del comportamento del sonotrodo. L'utensile da taglio è fissato saldamente al supporto in alluminio tramite un foro filettato.

Di seguito viene riportato uno schema del sistema UVT in cui sono evidenziate le varie componenti.

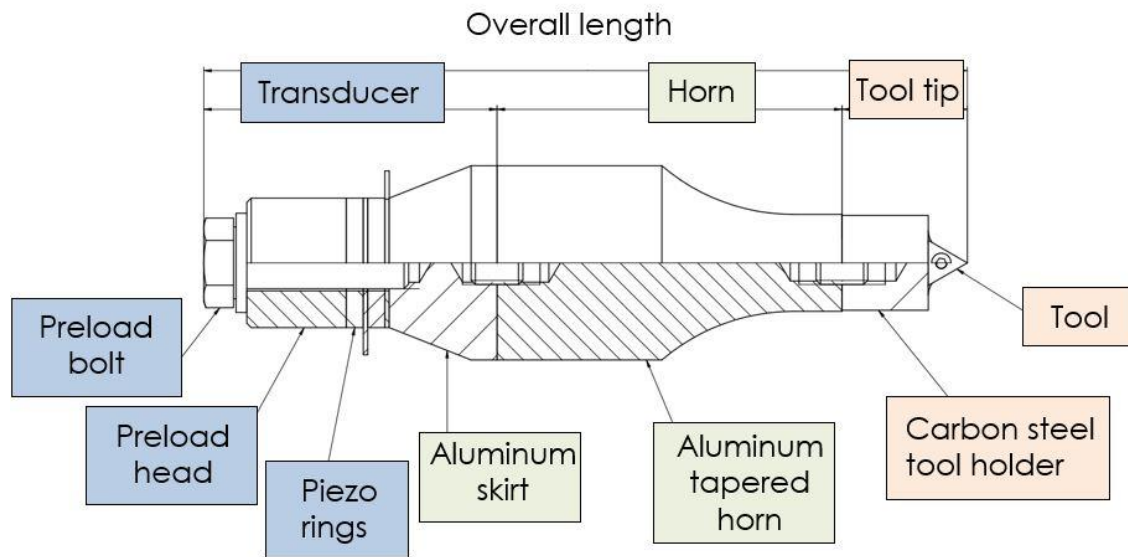


Figura 7.2: Schema inserto UVT.

Prima della realizzazione del sistema è stato utilizzato un codice agli elementi finiti in ambiente NASTRAN per analizzare la vibrazione del sistema e del sonotrodo. Il metodo dell'impedenza minima, invece, è stato sfruttato per verificare l'accoppiamento della frequenza del sonotrodo con quella del trasduttore. Tale metodo consiste nel monitoraggio di una corrente elettrica attraverso una resistenza di 100 Ohm in serie al trasduttore piezoelettrico e all'oscilloscopio a due canali Tektronix TBS1052B<sup>TM</sup>. La corrente, dipendente dalla frequenza, è variabile mentre la potenza è fornita da un generatore di segnale Siglenet SDG800<sup>TM</sup> predisposto per generare un segnale *sine sweep* di 4 V<sub>pp</sub> ad ampiezza costante che parte da 20 kHz fino ai 40 kHz per una durata totale di 100 microsecondi. L'andamento della corrente registrato dall'oscilloscopio mostra picchi e valli che rappresentano le frequenze minime e massime frequenze dell'impedenza rispettivamente.

La lunghezza totale del sonotrodo deve essere inferiore a quella del punto di impedenza minima localizzato in corrispondenza della frequenza naturale del trasduttore misurata precedentemente. Tale metodo permette di identificare in pochi passaggi la lunghezza corretta del corno ma non fornisce informazioni utili sul valore reale dell'impedenza.

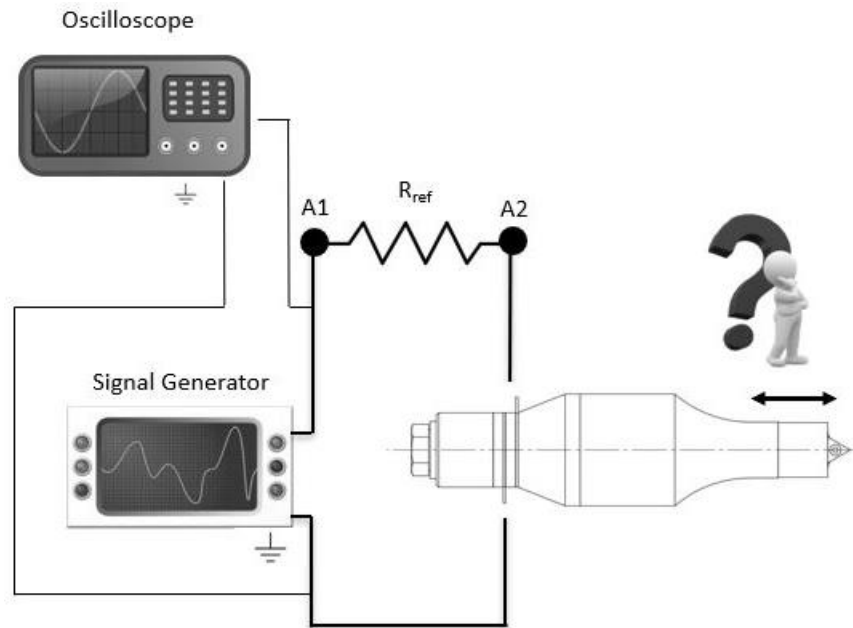


Figura 7.3: Metodo di minima impedenza per la determinazione della lunghezza del sonotrodo.

Il valore dell'impedenza del sistema costituito da trasduttore, sonotrodo e inserto contro lo spettro di frequenza è un parametro fondamentale per la definizione del design. Con lo scopo di valutare l'impedenza dell'insieme formato da sonotrodo e trasduttore piezoelettrico, si valuta il voltaggio e la differenza di fase tra i due canali dell'oscilloscopio. Il primo canale monitora la caduta del voltaggio a cavallo del sistema sonotrodo-trasduttore piezoelettrico collegato in serie ad una resistenza di 100 Ohm mentre il secondo canale è semplicemente collegato ai poli del trasduttore. Il generatore del segnale fornisce un segnale sinusoidale di cui è possibile variare manualmente il periodo. Tale periodo viene variato nell'intorno della frequenza di minima impedenza che è stata già calcolata in precedenza. In questo modo, è possibile creare un grafico dell'impedenza in funzione della frequenza. Da tale grafico si ricava un'impedenza minima di 86 Ohm in corrispondenza dei 30 kHz che, infatti, sarà quella utilizzata per la realizzazione di tutti i campioni UVT e CUVT.

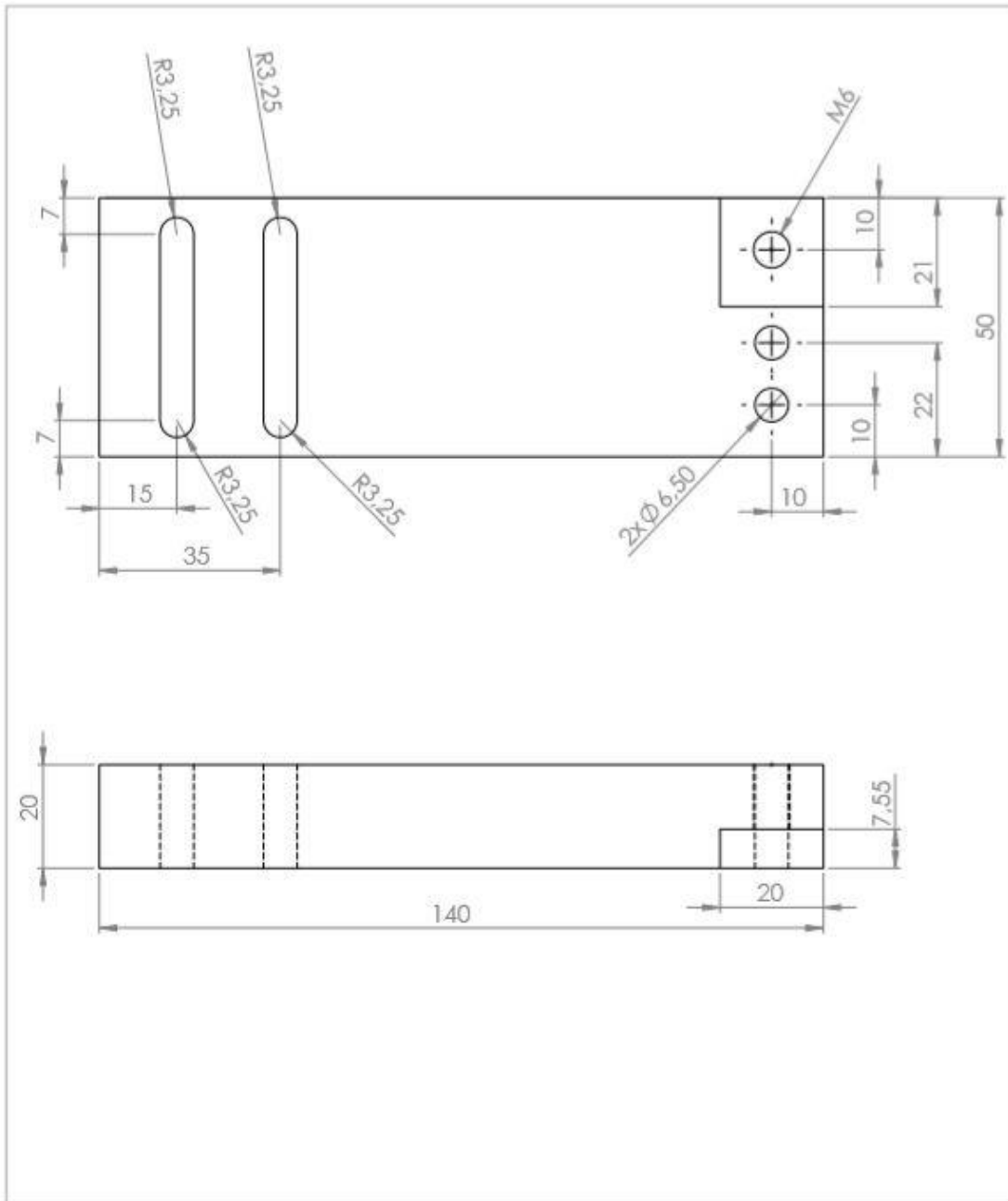


# Appendice A

## Tavole di disegno

Nelle pagine seguenti vengono riportate le tavole relative alla progettazione dell'impianto di raffreddamento criogenico per l'inserto del tornio utilizzato per la tornitura assistita da vibrazione ultrasonica presente al laboratorio Te.Si. di Rovigo.

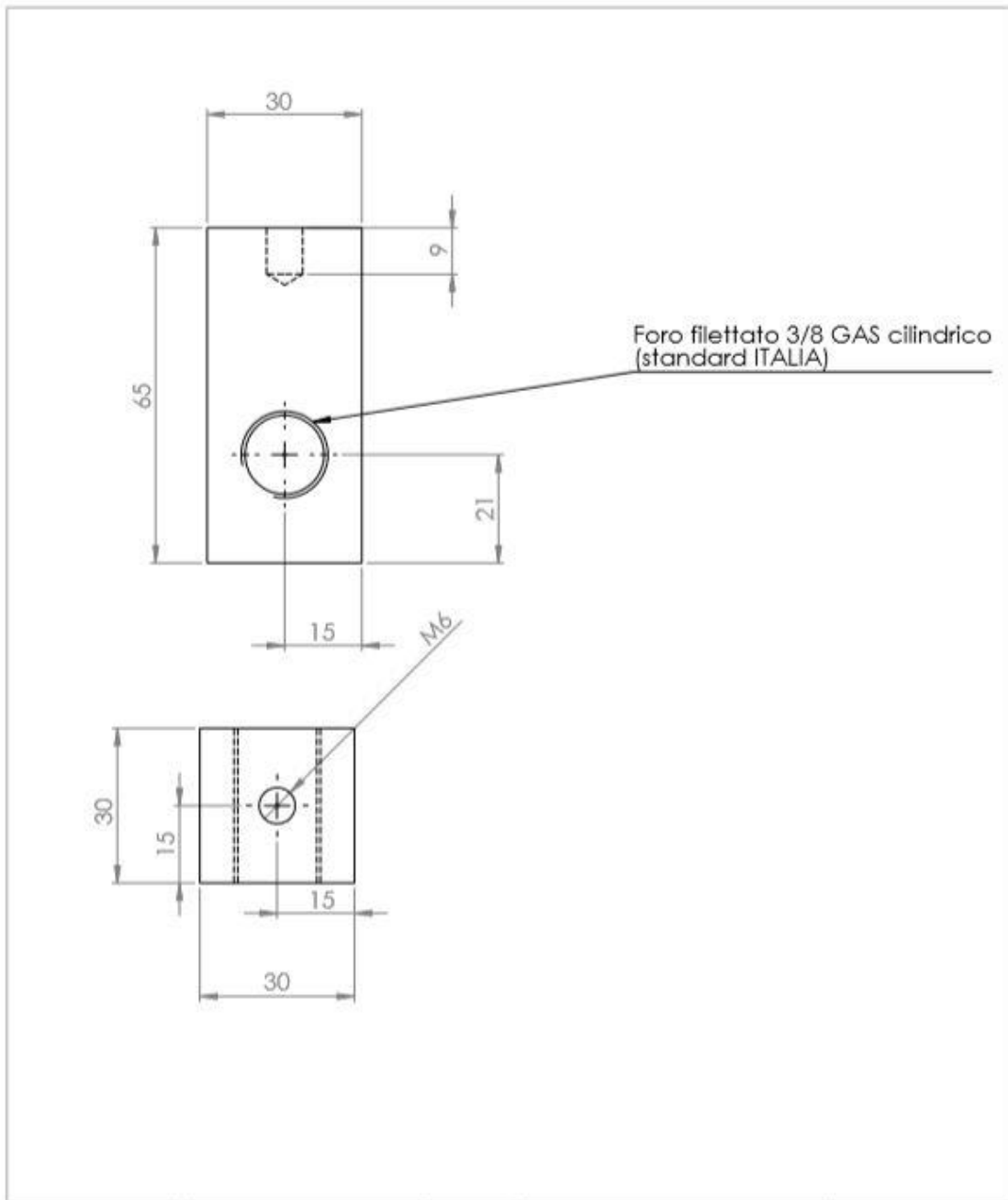




SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:		SBAVATURA E INTERROTTIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
DISEGNATO		NOME		PRIMA		DATA		TITOLO:	
VERIFICATO								Supporto cryo per UVT	
APPROVATO									
FATTO								N. DISEGNO	
QUALITÀ								Disegno1	
								A4	
								MATERIALE: Alluminio	
								SCALA: 1:1	
								FOGLIO 1 DI 1	







SE NON SPECIFICATO: QUOTE IN MILLIMETRI; FINITURA SUPERFICIE: TOLLERANZE: LINEARE: ANGOLARE:		FINITURA:		SEALATURA E INTERSEZIONE DEI BORDI NETTI		NON SCALARE IL DISEGNO		REVISIONE	
DISEGNATO		NOME		PRIMA		DATA		TITOLO:	
VERIFICATO								Supporto ugelli	
APPROVATO									
FATTO								N. DISEGNO	
QUALITÀ								Disegno2	
								A4	
				MATERIALE				SCALA: 1:1	
				Alluminio				FOGLIO 1 DI 1	
				PESO: \$PRPSHEET(Peso)					



# Bibliografia

- [1] R. Bertolini et al. “Ultrasonic Vibration Turning to Increase the Deposition Efficiency of a Silica-based Sol-Gel Coating” in *Procedia Manufacturing* 34 (2019) 101–109
- [2] H. Nouri Hosseinabadi et al. “Creating micro textured surfaces for the improvement of surface wettability through ultrasonic vibration assisted turning” in *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018) 96:2825–2839.
- [3] S. Amini et al. “Experimental study on effect of micro textured surfaces generated by ultrasonic vibration assisted face turning on friction and wear performance” in *Applied surface science* 390 (2016) 633-648.
- [4] Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid e Stefania Bruschi. «Tecnologia meccanica». In: (2014).
- [5] Bo Niu et al. “Effects of sintering temperature on the corrosion behavior of AZ31 alloy with Ca-P sol-gel coating” in *Journal of Alloys and Compounds* 665 (2016) 435-442.
- [6] H. Hornberger et al. “Biomedical coatings on magnesium alloys – A review” in *Acta Biomaterialia* 8 (2012) 3442-2455.
- [7] Mohamed N.A. Nast et al. “Sensitivity Analysis of cryogenic Cooling on Machining of Magnesium Alloy AZ31B-O” in *CIRP* 31 (2015) 264-269.
- [8] Mohd Danish et al. “Thermal analysis during turning of AZ31 magnesium alloy under dry and cryogenic conditions” in *Int J Adv Manuf Technol* (2017) 91:2855–2868.
- [9] Z. Pu et al. “Analysis of Surface Integrity in Dry and Cryogenic Machining of AZ31B Mg Alloys” in *Advanced Materials Research Vol. 223* (2011) pp 439-448.
- [10] Z. Pu et al. “Controlling the biodegradation rate of magnesium-based implants through surface nanocrystallization induced by cryogenic machining”.
- [11] D. Umbrello et al. “The effects of Cryogenic Cooling on Surface Integrity in Hard Machining” in *Procedia Engineering* 19 (2011) 371-376.
- [12] Navneet Khanna et al. “Effect of Hybrid Machining Techniques on Machining Performance of In-House Developed Mg-PMMC”

- [13] B. Lauwers. “Surface Integrity in Hybrid Machining Processes” in *Procedia Engineering* 19 (2011) 241-251.
- [14] J.C. Outeriro et al. “Process Mechanics and Surface Integrity Induced by Dry and Cryogenic Machining of AZ31B-O Magnesium Alloy” in *Procedia CIRP* 8 (2013) 487-492.
- [15] InnovaFVG, “Le potenzialità di impiego dell’ECO-magnesio in ambito industriale”.
- [16] Varun Sharma et al. “Recent advances in ultrasonic assisted turning: A step towards sustainability”.
- [17] C. Jeffrey Brinker et al. “Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing” in 1990.
- [18] John D. Wright et al. “Sol-Gel Materials: Chemistry and Applications”.
- [19] L. L. Hench et al. “The Sol-Gel Process” in *Chem. Rev.* (1990) 33-72.
- [20] Plinio Innocenzi. “The Sol to Gel Transition”, Springer, 2016.
- [21] E. Di Iorio et al. “Design and development of an ultrasonic vibration assisted turning system for machining bioabsorbable magnesium alloys” in *Procedia CIRP* 77 (2018) 324-327