



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in ingegneria meccanica

**Usura negli ugelli utilizzati nei processi di stampa
3D di materiali compositi rinforzati con fibre corte
di carbonio**

**Nozzle wear in 3D printing processes of short
carbon fiber-reinforced composite materials**

Relatore: Chiar.mo
Prof. Forcellese Archimede

Tesi di Laurea di:
Frezza Alessandro

Correlatore: Chiar.ma
Prof.ssa Simoncini Michela

A.A. 2020/2021

INDICE

INTRODUZIONE	3
1. Generalità sull'Additive Manufacturing.....	4
1.1 <i>Vat Polymerization</i>	6
1.2 <i>Material Jetting</i>	8
1.3 <i>Binder Jetting</i>	9
1.4 <i>Powder Bed Fusion</i>	9
1.4.1 <i>Selective Laser Sintering</i>	10
1.4.2 <i>Selective Laser Melting o Direct Metal Laser Sintering</i>	11
1.4.3 <i>Electron Beam Melting</i>	12
1.5 <i>Direct Energy Deposition</i>	13
1.6 <i>Sheet Lamination</i>	14
1.7 <i>Material Extrusion</i>	21
2. Generalità sull'usura negli utensili	26
2.1 <i>Labbro d'usura</i>	29
2.2 <i>Cratere d'usura</i>	30
2.3 <i>Legge di Taylor</i>	33
3. materiali e procedure sperimentali.....	35
3.1 <i>Materiali</i>	35

3.2	<i>Procedure sperimentali</i>	42
4.	Risultati	49
4.1	<i>Evidenze riscontrate dalle acquisizioni allo stereomicroscopio</i>	49
4.2	<i>Risultati delle prove di trazione</i>	68
5.	Conclusioni	73
	Ringraziamenti	75
6.	Riferimenti	77

INTRODUZIONE

La stampa tridimensionale, nota anche con il nome di stampa 3D, rappresenta la parola chiave per quel che riguarda il mondo dei processi di fabbricazione dei materiali, ed ha recentemente acquisito notevole importanza nell'ambito della ricerca per la scienza dei materiali. Tale tecnologia, negli ultimi anni, ha sperimentato una crescita significativa, e si prevede possa definire una rivoluzione nell'industria manifatturiera, in particolare per la realizzazione di materiali ad alte prestazioni di prossima generazione. La stampa mediante tecnica FDM (Fused Deposition Modeling) di materiali compositi rinforzati con fibre corte di carbonio è una pratica che recentemente ha catturato l'attenzione di molti, per via del fatto che attraverso il loro impiego si riescono ad ottenere prodotti leggeri e resistenti ad un costo contenuto, con tempi di produzione ridotti, e che richiedono un uso ridotto delle lavorazioni post-processo, abbattendo difatti la produzione di sfridi. Un importante aspetto legato all'uso di questa tecnologia, ma non ancora analizzato, riguarda il legame che unisce le proprietà meccaniche del prodotto ottenuto, al grado di usura dell'ugello, che rappresenta un importante nodo da chiarire ed approfondire, per poter comprendere meglio le cause comportate dal fenomeno dell'usura che il passaggio di materiale ad alta temperatura definisce sull'ugello. Attraverso questo studio sistematico, ci si propone di scoprire quali meccanismi regolino il fenomeno, analizzando il grado di usura di un ugello utilizzato per la stampa 3D di carbon PA e correlandolo alle proprietà meccaniche dei prodotti elaborati.

1. Generalità sull'Additive Manufacturing

La prima modalità di realizzazione mediante l'apposizione di materiale strato su strato di un oggetto tridimensionale attraverso l'ausilio di un sistema di disegno assistito dal calcolatore (CAD) è stata la prototipazione rapida, sviluppata negli anni '80 per realizzare modelli e parti di prototipi. Tale tecnologia è stata concepita per venire incontro alle esigenze manifestate dagli ingegneri, i quali necessitavano di un sistema meno costoso e più semplice che consentisse loro di rendere reale ciò che inizialmente era solo un'idea. La prototipazione rapida è uno dei primi esempi di manifattura additiva (in inglese AM, Additive Manufacturing) che consente di ottenere non solo modelli, ma anche parti stampate. La forma di prototipazione rapida che negli ultimi decenni ha trovato più ampia diffusione è la stampa 3D, un processo di manifattura additiva che consente di ottenere prodotti dall'elevata complessità geometrica, altrimenti impossibili da realizzare, a basso costo e con tempi ridotti.

Anche se attualmente non ha ancora trovato impiego nel settore manifatturiero, è una tecnologia che viene utilizzata in ambiti come, ad esempio, quello medico, scientifico, didattico e molti altri, con lo scopo di acquisire importanti informazioni. Si tratta inoltre di una tecnologia che ha alla base del suo funzionamento l'uso di materiale che può essere solido, liquido, o sotto forma di polveri.

La fabbricazione e le prestazioni definite dall'AM possono variare in base ai meccanismi e agli scopi dei singoli processi di assemblaggio. L'ASTM (American Society for Testing and Materials) International, un'organizzazione statunitense che si occupa di definire normative, definisce le varie tecnologie di fabbricazione additiva, suddividendole in famiglie di processi, quali:

- **Vat Polymerization;**
- **Material Jetting;**
- **Binder Jetting;**
- **Powder Bed Fusion;**
- **Direct Energy Deposition;**
- **Sheet Lamination;**
- **Material Extrusion.**

L'impiego di una specifica tecnologia dipende da una serie di parametri, quali il tipo di materiale, la resistenza meccanica e la finitura superficiale desiderata del pezzo, la velocità di produzione, l'investimento necessario e il costo finale.

1.1 Vat Polymerization

La **Vat Polymerization** è un processo che sfrutta un raggio di luce laser che, colpendo in modo selettivo, attiva la polimerizzazione di una resina di fotopolimero sensibile alla luce, contenuta in una vasca, strato dopo strato. All'interno della vasca è situata una piattaforma orizzontale che ha la capacità di salire o scendere ed ha la finalità di supportare la parte in costruzione abbassandosi di uno step ogni volta che viene completata la solidificazione di un singolo strato. Un altro elemento che concorre alla funzionalità di tale tecnologia, come citato di sopra, è la sorgente luminosa, la quale, direzionando il fascio lungo la traiettoria che percorre l'intera sezione dell'oggetto tramite uno specchio in rapido movimento, attiva il fotopolimero. Questa tecnica viene utilizzata se si intende conferire agli oggetti prodotti una risoluzione elevata: consente infatti di ottenere strati il cui spessore può variare dagli 0,01 agli 0,15 millimetri, difatti definendo una finitura superficiale molto liscia. I tipi di sorgente luminosa che è possibile sfruttare possono essere o un laser puntiforme che fotopolimerizza punto per punto la sezione o un proiettore che attiva il polimero su tutta la sua sezione in modo uniforme: mentre il primo viene utilizzato per la Stereolitografia (SLA), il secondo invece viene destinato alla Digital Light Processing (DLP). SLA e DLP sono le due principali tecnologie di Vat Polymerization [1].

Nella figura 1 è possibile osservare le varie schematizzazioni delle metodologie con le quali la Vat Polymerization può avvenire.

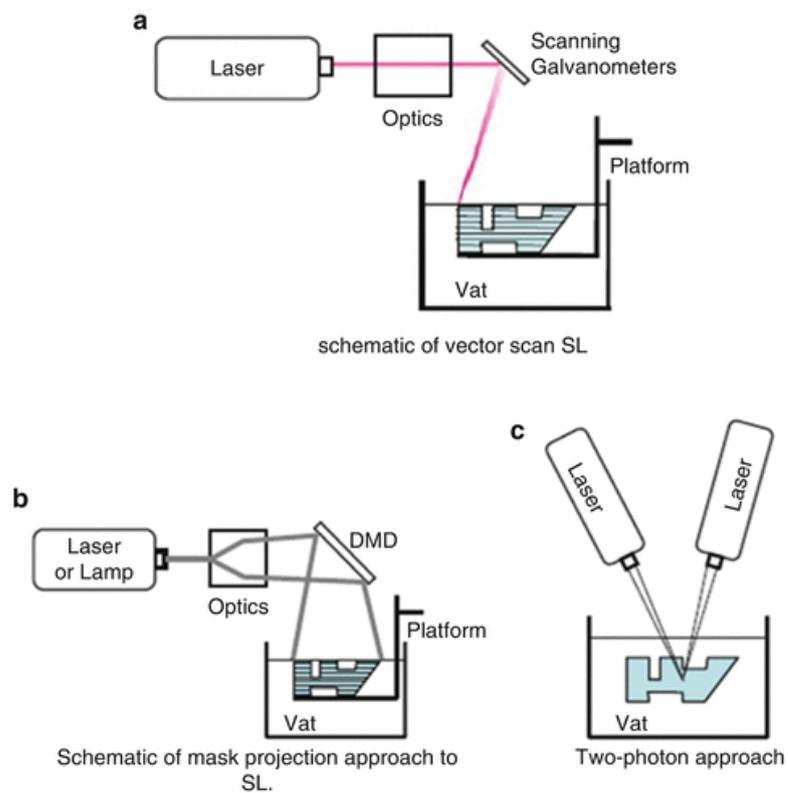


Figura 1 schematizzazione di tre processi di fotopolimerizzazione.

1.2 Material Jetting

Il **Material Jetting** è una tecnica il cui principio di funzionamento sfrutta una testina di stampa simile a quelle delle stampanti inkjet bidimensionali, che consolida materiale allo stato liquido come cera, resine acriliche e fotopolimero attivato da una fonte di luce UV. I primi due vengono utilizzati nella tecnologia Multi Jet Modelling, mentre l'ultimo menzionato viene utilizzato per la tecnologia Polyjet. Le stampanti utilizzate per la Multi Jet Modelling e per la Polyjet sono anche in grado di depositare un secondo materiale, solubile, utilizzato per realizzare gli elementi di supporto a perdere. È possibile osservare che le parti realizzate sono di elevato livello estetico e, nel caso di alcuni fotopolimeri e resine, possiedono medio-alte proprietà meccaniche [1].

In figura 2 è possibile individuare una schematizzazione della tecnologia sopracitata.

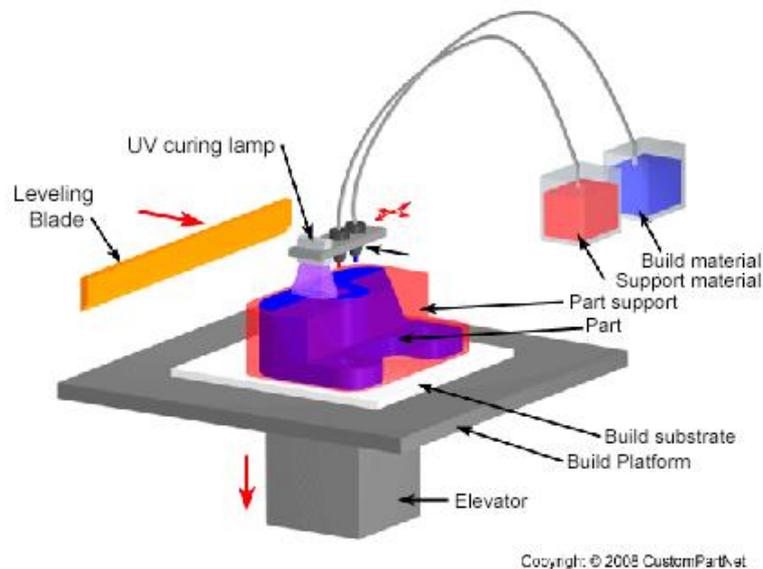


Figura 2 schema semplificato della Material Jetting.

1.3 Binder Jetting

La **Binder Jetting** sfrutta un legante chimico per unire in maniera puntiforme e progressiva i singoli granelli di un letto omogeneo di polvere, senza che avvenga il rilascio di materiale di costruzione, come osservato nelle altre tecnologie. Avviene che durante il processo la polvere non trattata dal legante rimane sospesa sullo strato sottostante e viene rimossa al termine del procedimento, per far sì che possa essere riutilizzata. I materiali che possono essere trattati con questa tecnica sono polveri plastiche, compositi e polveri metalliche. I pezzi realizzati attraverso questa metodologia sono generalmente molto porosi e piuttosto fragili, risultando però molto più economici rispetto alle altre tecnologie e adatti a tal proposito per essere utilizzati come modelli estetici, con finalità dimostrative [1].

1.4 Powder Bed Fusion

Powder Bed Fusion (PBF) è il nome della tecnologia attraverso la quale l'energia termica sfruttata fonde e solidifica, strato dopo strato, una determinata porzione di un letto di polvere disposto su un piano in grado di traslare in direzione verticale. Tale piano, muovendosi verso il basso ogni qualvolta viene completato uno strato, viene coadiuvato dall'azione di un elemento mobile orizzontale che deposita nuova polvere per lo strato successivo. È importante inoltre sottolineare che la polvere non processata, al termine del processo di stampa, viene recuperata per poi essere riutilizzata per una stampa successiva [1].

Le principali tecnologie che utilizzano i principi della Powder Bed Fusion sono:

- Selective Laser Sintering (SLS);
- Direct Metal Laser Sintering (DMLS) o Selective Laser Melting (SLM);
- Electron Beam Melting (EBM).

1.4.1 Selective Laser Sintering

La **Selective Laser Sintering** si serve di un laser fisso il cui fascio viene direzionato verso uno specchio mobile in modo tale da colpire la polvere, che viene sinterizzata, così da permetterle di legarsi ai granelli circostanti con legami molecolari. Per il mantenimento delle alte temperature nelle zone circostanti la parte in fase di realizzazione sono presenti, al di sopra della piattaforma di costruzione, dei riscaldatori ad infrarossi, così come sopra le cartucce di alimentazione, con il fine di preriscaldare la polvere prima che questa venga sparsa sulla superficie di costruzione. In alcuni casi la piattaforma di costruzione può essere riscaldata anche con riscaldatori resistivi disposti attorno al piano su cui avviene la lavorazione. I materiali utilizzabili dalla SLS possono essere diversi e molteplici, come i polimeri, i materiali compositi, le ceramiche e alcune leghe metalliche [1]. Nella figura 3 è possibile osservare lo schema di funzionamento di tale tecnologia.

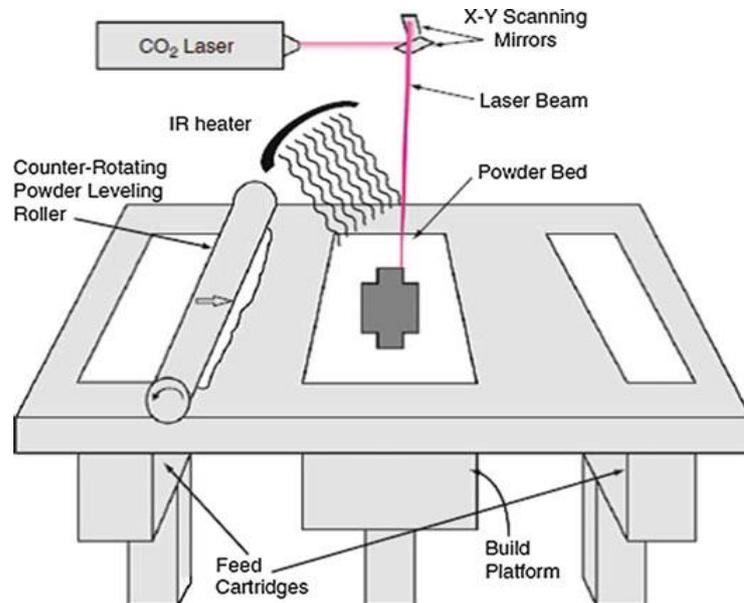


Figura 3 schematizzazione del processo di Selective Laser Sintering.

1.4.2 Selective Laser Melting o Direct Metal Laser Sintering

La SLM o DMLS, rappresentata schematicamente nella figura 4, analogamente alla tecnologia SLA, sinterizza la polvere, ma diversamente da questa, i singoli granelli vengono fusi in un pezzo monolitico. Tuttavia, sarà possibile utilizzare solo polveri metalliche pure, e quindi non additivate [1].

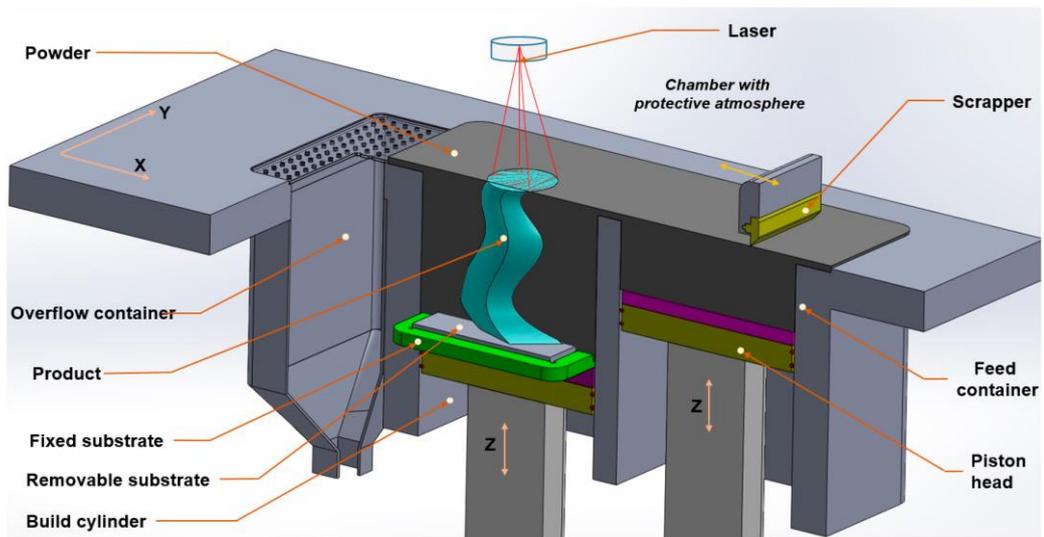


Figura 4 schema di funzionamento della SLM o DMLS.

1.4.3 Electron Beam Melting

L'**EBM**, descritta nella figura 5, è una tecnologia che sfrutta un fascio di elettroni come fonte di energia termica. Prima che questi colpiscano il letto di polvere, vengono direzionati lungo la traiettoria impostata, facendoli passare tra due magneti a forma di anello. Anche questa tecnica risulta essere utilizzabile solo con polveri metalliche pure e dunque non additivate.

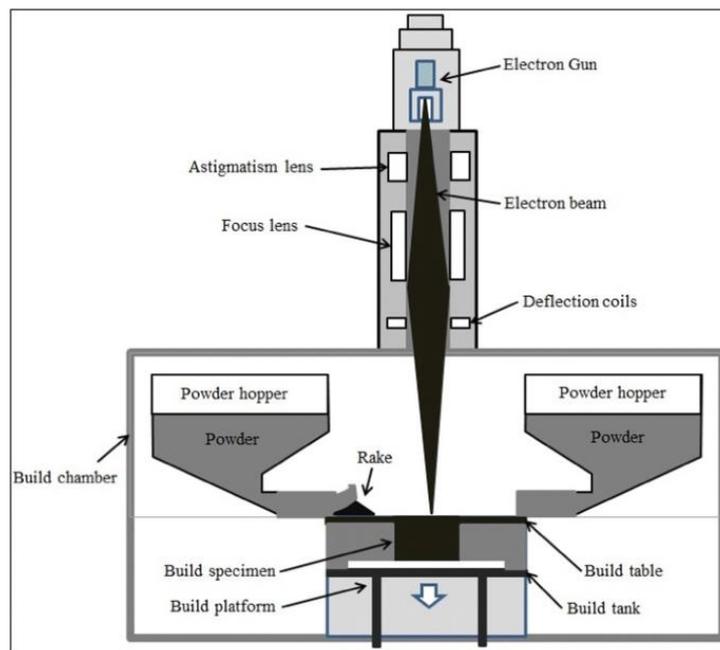


Figura 5 schematizzazione della EBM.

Il grado di porosità che viene definito nei pezzi prodotti tramite tecnica SLS risulta inoltre essere maggiore rispetto a quello definito dalle tecniche che sfruttano la fusione, come la SLM e la EBM, e pertanto rappresenta il motivo per il quale le proprietà meccaniche degli stampati realizzati attraverso la sinterizzazione (SLS) siano peggiori rispetto a quelle degli altri ottenuti mediante le altre tecniche sopracitate [1].

1.5 Direct Energy Deposition

La **DED** consiste nell'erogazione di polvere metallica contemporaneamente ad un gas di protezione e al laser attraverso un ugello. Il ruolo del gas di protezione, inerte, è quello di trasportare la polvere, che viene soffiata lungo la traiettoria del fascio laser in modo selettivo, così da consentire la deposizione solo dove è necessario. Il principio mediante il quale avviene la deposizione consiste nell'indurre tramite l'energia del laser la parziale fusione delle particelle del metallo, che fondono completamente solo a contatto con il bagno di fusione, creando così un legame metallico tra la polvere e il substrato. La procedura, descritta nella figura 6, avviene seguendo lo schema di movimento del substrato o del laser in modo tale da consentire al bagno di fusione di solidificarsi, e di produrre così una piccola zona rialzata di metallo solido chiamata traccia. La tecnologia principale che fa uso di questa procedura è la Laser Metal Deposition (LMD) [1].

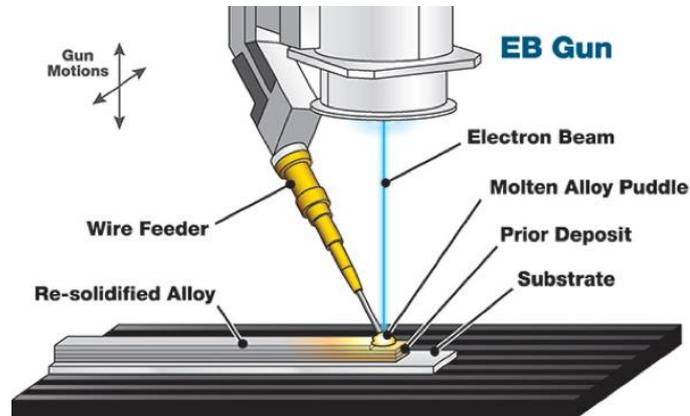


Figura 6 schematizzazione della LMD.

1.6 Sheet Lamination

La **Sheet Lamination** è una delle prime tecnologie di Additive Manufacturing ad essere state commercializzate (risale infatti al 1991). Consiste nella realizzazione di un processo di laminazione strato su strato di fogli di materiale cartaceo, ciascuno dei quali rappresenta uno strato di sezione trasversale del modello CAD della parte, che successivamente vengono tagliati attraverso un laser a CO₂. In questo tipo di lavorazione, il cui esempio è visibile nella figura 7, la porzione di foglio che non è contenuta nella parte finale viene tagliata in cubi attraverso un'operazione di taglio trasversale. Nel tempo sono stati sviluppati metodi che sfruttano altri materiali da costruzione ed altre strategie di taglio. A causa del principio di costruzione, vengono tagliati solo i contorni esterni, e i fogli possono essere o tagliati e poi impilati, o prima impilati e poi tagliati [2].

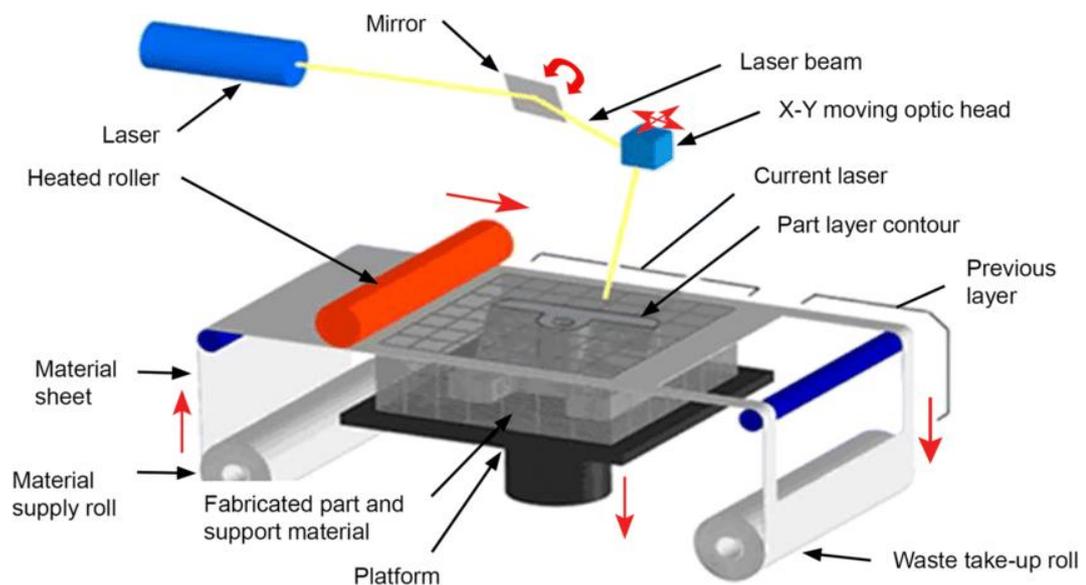


Figura 7 rappresentazione schematica della Sheet Lamination.

La suddivisione dei processi avviene in base al meccanismo con il quale avviene l'incollaggio degli strati:

- Incollaggio o incollaggio adesivo;
- Termosaldatura;
- Bloccaggio (Clamping);
- Saldatura ad ultrasuoni.

Incollaggio o incollaggio adesivo

Le tecniche di Sheet Lamination più popolari hanno incluso un materiale di costruzione cartaceo incollato con un adesivo a base polimerica che inizialmente era sviluppata utilizzando carta adesiva simile alla carta da macellaio adoperata per avvolgere la carne. Lo spessore dei fogli si estende tra i 0,07 mm e i 0,2 mm. Potenzialmente qualsiasi materiale in fogli che può essere tagliato con precisione utilizzando un laser o una taglierina meccanica e che possa essere incollato può essere utilizzato per la realizzazione di parti.

Un'ulteriore classificazione che è possibile effettuare per descrivere questi processi viene definita in base all'ordine in cui i fogli vengono incollati e tagliati. In alcuni di questi il laminato viene incollato prima al substrato e poi viene realizzata la forma della sezione trasversale; in altri casi accade che il laminato è sottoposto prima a taglio e poi ad incollaggio al substrato.

Il primo, chiamato "**bond-then-form**", prevede che si susseguano tre fasi nel seguente ordine: collocazione del laminato, incollaggio al supporto e taglio effettuato seguendo il contorno da recidere. I primi macchinari realizzavano questa pratica tramite l'uso di fogli adesivi di materiale avvolti in rotoli. L'incollaggio tra gli strati avviene tramite lo scioglimento

dell'adesivo indotto dal passaggio, in corrispondenza della superficie di ciascun laminato ogni volta che ognuno di questi viene depositato, di un rullo riscaldato. Un laser (o in alcuni casi un coltello da taglio meccanico) progettato per tagliare in profondità della quantità dello spessore di un singolo strato recide il contorno della sezione trasversale seguendo le informazioni relative allo svolgimento di tale operazione. Il materiale inutilizzato viene lasciato in sede come materiale di supporto ed è tagliato a dadini usando un motivo a tratteggio incrociato in piccoli pezzi rettangolari chiamati "tessere" o "cubi". Questo processo di unione e di taglio si ripete fino al totale completamento della parte, che, dopo essere stata realizzata, viene sottoposta a lavorazioni successive. I pezzi tratteggiati di materiale in eccesso vengono separati dalla parte utilizzando gli strumenti che vengono adoperati di norma nelle operazioni di taglio di legname (pratica che prende il nome di "decubing"). Poiché risulta difficoltosa la rimozione delle parti in eccesso a freddo, o si ricorre al riscaldamento dell'elemento mediante l'utilizzo di un forno per qualche istante, prima dell'operazione di decubing, oppure dopo la realizzazione si procede alla suddetta rimozione. È stato possibile osservare che l'applicazione dei principi della laminazione "bond-then-form" risulta essere, per la fabbricazione di parti in metallo, ceramica e materiali compositi, eseguibile con successo.

I principali vantaggi di questa tecnologia sono:

- Basso ritiro, ridotte tensioni residue e minori problemi di distorsione riscontrati durante il processo;
- Quando vengono utilizzati come materia prima dei fogli di carta, il prodotto che si ottiene è simile al compensato, e perciò risulta facilmente sottoponibile alle operazioni di finitura;
- Consente la rapida fabbricazione di parti di grandi dimensioni;
- Possono essere utilizzati vari tipi di materiali per la costruzione, come fogli cartacei o polimerici e nastri caricati contenenti metallo o ceramica;
- Materia prima facile da maneggiare, non tossica e stabile;
- Bassi costi di processo, di funzionamento delle macchine e dei materiali rispetto agli altri sistemi di AM.

La laminazione di fogli in carta, invece, ha diverse limitazioni, tra cui:

- La maggior parte dei prodotti realizzati con i fogli di carta necessita di un rivestimento al fine di prevenire l'assorbimento di umidità e una condizione di usura eccessiva;
- Il controllo del livello di precisione della parte lungo la direzione "z" risulta difficoltoso (a causa dei fenomeni del rigonfiamento o dell'incoerenza dello spessore del foglio);
- Proprietà meccaniche e termiche non omogenee a causa della presenza della colla utilizzata per legare uno strato all'altro;

- Risulta difficoltoso definire i dettagli nelle parti di piccole dimensioni poiché il processo di decubing viene attuato manualmente.

Generalmente, le parti ottenute tramite laminazione di fogli di carta vengono applicate prevalentemente in settori in cui sono spesso usati modelli in legno, o in applicazioni in cui la maggior parte delle caratteristiche geometriche è rivolta verso l'alto. Esempi di applicazioni di questo tipo di tecnica sono la colata in sabbia e la mappatura topografica tridimensionale-in cui ciascuno strato rappresenta una particolare quota della mappa.

Il secondo, chiamato “**form-then-bond**”, è utilizzato maggiormente per realizzare parti di materiale metallico o ceramico i cui fogli vengono termosaldati e viene coinvolto prevalentemente nell'ambito della ricerca. Tale approccio facilita la costruzione di parti che hanno geometrie e canali interni, altrimenti impossibili da ottenere con la tecnologia “bond-then-form”, per via del fatto che il materiale in eccesso è solido, e quindi la parte che lo costituisce, presente in corrispondenza delle cavità da ricavare, non può essere rimossa una volta avvenuto l'incollaggio (ammenché non venga praticato un taglio che renda le cavità comunicanti con l'esterno). Un altro vantaggio legato all'uso di tale tecnologia riguarda l'assenza di rischi legati al taglio di strati da non coinvolgere nella suddetta operazione, contrariamente ai processi “bond-then-form”, in cui il processo di recisione viene attuato dopo che lo strato è stato depositato su quello precedente; la regolazione della potenza del laser o il controllo della pressione del coltello risulta essere quindi meno impegnativa. Le operazioni di decubing che comportano una perdita di tempo e aumentano il rischio di danni, inoltre, sono assenti in questa pratica. Tuttavia, questi processi richiedono supporti esterni per la costruzione di elementi sporgenti; alcuni tipi di utensili o sistemi di allineamento vengono utilizzati per assicurare uno strato nuovo appena saldato a quelli precedentemente depositati;

o un supporto flessibile in grado di posizionare con precisione del materiale indipendentemente dalla geometria [2].

Termosaldatura

In tutto il mondo, numerose organizzazioni sono riuscite ad applicare con successo la termosaldatura alla laminazione di parti metalliche funzionali e ad utensili. È stato evidenziato che le lamiere metalliche termosaldate sono particolarmente utili per la realizzazione di elementi, quali parti metalliche ed utensili complessi che presentano cavità interne e/o canali di raffreddamento. Nonostante siano state ampiamente studiate, le tecniche di Sheet Lamination non hanno ottenuto un grande successo a livello commerciale. Ciò è principalmente dovuto al fatto che i processi di “bond-then-form” richiedono l’applicazione di numerose pratiche post-processo per attuare la rimozione di materiali di supporto, e che i processi di “form-then-bond” risultano difficili da automatizzare quando si parla di fabbricazione di parti costituite da geometrie complesse. Sempre parlando di “form-then-bond”, un altro problema riscontrabile riguarda il fatto che se una sezione trasversale presenta una geometria non connessa a quella delle restanti parti, risulterà difficoltoso praticare un’accurata registrazione dei laminati, e di conseguenza sarà necessario ricorrere ad una soluzione specifica. Emerge che le tipologie di elementi più facilmente ottenibili sono quelli in cui la geometria di ciascuna sezione trasversale risulta interconnessa con continuità [2].

Sheet Metal Clamping

Nel caso in cui si dovessero assemblare laminati in metallo la cui forma non risulti particolarmente complessa, è possibile bloccare le lamiere attraverso il coinvolgimento di bulloni e/o di meccanismi di bloccaggio, piuttosto che mediante un metodo che prevede l'incollaggio o la termosaldatura. Il Clamping è una pratica rapida e poco costosa che consente non solo di smontare, e quindi modificare, un particolare della sezione trasversale del laminato, ma permette anche il facile riciclaggio dei materiali. Inoltre, il meccanismo di bloccaggio o bullonatura può agire come punto di riferimento con il fine di registrare ciascun laminato l'uno rispetto all'altro. Quando si effettua il bloccaggio, risulta spesso vantaggioso tagliare un solo lato del profilo del laminato, lasciando gli altri tre lati della lamiera rettangolare così come sono. Il principale vantaggio di questo approccio è la facilità con cui può essere effettuato il bloccaggio degli strati. Gli svantaggi legati all'uso di tale tecnica riguardano le forze di serraggio della maggior parte degli utensili. Queste, infatti, sono perpendicolari all'interfaccia del laminato, e potrebbero causare una vicendevole separazione delle lamiere, definendo l'insorgenza di lacune in certe condizioni, come ad esempio quando i polimeri pressurizzati vengono iniettati all'interno di uno stampo ottenuto con questa tecnologia.

1.7 Material Extrusion

L'estrusione è il principio di funzionamento che sta alla base della tecnologia denominata "**Material Extrusion**" (ME). Questa tecnica consiste nella deposizione di un materiale malleabile in uno stato semisolido, attraverso quello che viene denominato "ugello", estremità terminale di un elemento chiamato "estrusore", su uno strato di materiale sottostante depositato in precedenza e già solidificatosi. La fabbricazione del prodotto avviene grazie alla deposizione e all'indurimento progressivo dei vari strati che lo costituiscono, dal basso, verso l'alto; è importante che la pressione applicata per favorire l'uscita del materiale e la velocità con la quale l'ugello si muove siano il più possibile costanti, in modo tale da definire una sezione di diametro di materiale uniforme.

Esistono due differenti metodologie base che è possibile utilizzare quando si parla di processi di estrusione. Il più utilizzato consiste nel controllare lo stato del materiale attraverso la regolazione della temperatura, mentre il secondo, adottato per realizzare prodotti costituiti da materiali in pasta, viene utilizzato, solitamente per la realizzazione di applicazioni biomediche in cui è necessario che ci sia una certa biocompatibilità, sfruttando il principio della solidificazione ottenuta mediante modifica chimica, cioè attraverso l'indurimento o l'essiccazione. Tuttavia, non è escluso che quest'ultimo sia preferibile, nella pratica industriale, rispetto alla tecnica tradizionale che agisce variando la temperatura, ad esempio utilizzando un processo di stampaggio ad iniezione e reazione.

I prodotti ottenuti con questo metodo presentano notevoli proprietà chimiche e meccaniche, ragioni per cui la Material Extrusion trova applicazione in settori quali quello medico, automobilistico, aerospaziale, alimentare, e molti altri. È possibile aggiungere a queste considerazioni che il grado di finitura superficiale dei prodotti ottenuti con questa pratica,

risultando essere grezzo, richiede un miglioramento che è possibile definire tramite processi di sabbiatura, abrasione chimica o verniciatura.

La tecnologia di ME che più di tutte ha trovato diffusione è la Fused Deposition Modeling (FDM), descritta nella figura 8.

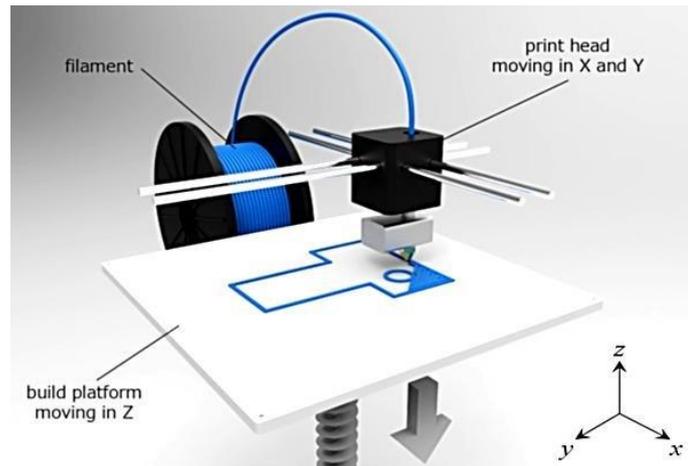


Figura 8 sistema di AM basato sulla FDM.

Questa tecnologia incentra il suo funzionamento nel depositare materiale, inizialmente allo stato solido e sotto forma di granuli o filamento, allo stato semisolido, dopo che è stato portato ad una temperatura idonea per la deposizione.

I tipi di materiali che è possibile stampare con questa tecnologia sono diversi e molteplici.

Abbiamo filamenti e granuli di materiale polimerico in:

- PLA;
- ABS;
- Nylon;
- HDPE;
- PVA.

PLA

Tra questi, quello che ha raggiunto il più ampio margine di utilizzo, assieme all'ABS, è il PLA, definito come acido polilattico. Si tratta di un bio-polimero ricavato da fonti rinnovabili, contrariamente alle sue controparti provenienti dal petrolio, utilizzato prevalentemente per realizzare modelli non funzionali o per applicazioni in campo medico. Sfortunatamente il PLA soffre di alcune carenze, per le quali sono richieste specifiche proprietà di uso finale, che però possono essere conferite se si aggiungono fibre di rinforzo, micro e/o nano-cariche e additivi specifici [3]. Risulta essere un materiale molto flessibile, adatto a numerose applicazioni per via del fatto che è caratterizzato da una buona stabilità, un ritiro ridotto, buone caratteristiche meccaniche e da temperature di stampa inferiori a quelle degli altri polimeri.

ABS

Quello in questione è un materiale che risulta essere adatto alle applicazioni con sforzi rilevanti, poiché ha delle ottime proprietà meccaniche, quali:

- Alta resistenza meccanica e al graffio;
- Buona resistenza al calore;
- Elevata rigidità;
- Consente facile lucidatura e verniciatura;
- Comporta un elevato ritiro.

Nylon

È un materiale dalle proprietà meccaniche interessanti, che tuttavia necessita di alcuni accorgimenti. Infatti, seppur sia tale da definire un buon livello di coesione tra gli strati, in modo da renderli meno individuabili sulla superficie ottenuta mediante la produzione additiva; si riesca a stamparlo senza che sia necessario l'utilizzo di un piano riscaldato, è necessario portarlo ad una temperatura di stampaggio superiore a 250°C ed ha il problema di essere molto sensibile all'umidità [1].

Il Carbon PA, che ha una base polimerica affine a quella del nylon, necessita di essere portato ad una temperatura idonea per la stampa di circa 260°C, e come il suo simile, risulta essere particolarmente sensibile all'umidità. Pertanto è preferibile dunque estruderlo in un ambiente asciutto.

HDPE

Si tratta di uno tra i polimeri più diffusi, poiché può essere stampato senza particolari accorgimenti. È atossico, ha inoltre un grado di assorbimento di acqua basso, tale da consentirgli di essere utilizzato in ambito alimentare ed infine ha la caratteristica di essere molto resistente agli agenti chimici, e questo fa dell'HDPE un materiale utilizzabile anche per applicazioni relative all'industria chimica ed elettrica.

PVA

È un materiale utilizzato per la creazione di supporti la cui caratteristica è quella di essere solubile in acqua, ma resistente agli idrocarburi. Per tale ragione, va conservato in un luogo asciutto per evitarne il degrado. Inoltre, a causa dell'elevata temperatura di stampa, risulta essere leggermente più complesso da estrarre rispetto ad altri polimeri.

2. Generalità sull'usura negli utensili

L'usura degli utensili da taglio gioca un ruolo chiave nelle lavorazioni, poiché i cambiamenti dimensionali del tagliente influenzano la qualità delle superfici lavorate. Operare il taglio con utensili eccessivamente usurati può quindi portare a problemi relativi alla precisione dimensionale e all'integrità superficiale dei componenti lavorati. Un'usura relativa all'utensile che risulti essere costante e prevedibile è quindi da preferire, al fine di sostituire gli utensili prima che venga raggiunto un livello di degradazione critico. Il deterioramento degli utensili è causato da una complessa combinazione di meccanismi, quali:

- abrasione;
- adesione;
- diffusione/dissoluzione;
- deformazione plastica;
- ossidazione;
- fatica termo-meccanica;
- scheggiatura;
- deformazione plastica.

Abrasione

Il fenomeno in questione è causato dallo scorrimento sulla superficie dell'utensile di particelle dure ed abrasive presenti nel materiale che viene sottoposto a lavorazione, e si manifesta in maniera particolarmente evidente sullo spigolo tagliente e sul fianco.

Adesione

Emerge quando le elevate pressioni di contatto e temperature provocano delle microsaldature localizzate tra truciolo e petto, che staccandosi man mano che il primo scorre sul secondo, ne causano l'asportazione di materiale.

Diffusione/dissoluzione

Si verifica quando avvengono dei processi di mutua solubilità fra alcuni componenti dei due materiali a contatto, e in condizioni in cui si raggiungono temperature elevate, il fenomeno accelera. Inoltre, il suo sviluppo è causato dalla migrazione di atomi attraverso l'interfaccia utensile-truciolo, ed avviene in particolare in casi in cui vengono utilizzati acciai austenitici con carburi di tungsteno, favorendo il passaggio di carbonio dall'utensile al truciolo, e di ferro dal truciolo verso l'utensile.

Ossidazione

Quella per ossidazione è un tipo di fenomeno di usura che si manifesta quando l'ossigeno atmosferico si lega con alcuni elementi dell'utensile, come il tungsteno e il cobalto, formando ossidi facilmente asportabili dal truciolo.

Fatica termo-meccanica

È un fenomeno legato all'insorgenza di sollecitazioni termo-meccaniche che agiscono in maniera ciclica sull'utensile, maggiormente individuabile in quei processi che prevedono una continua variazione di temperatura e forza di taglio (in particolare nelle operazioni di taglio interrotto). Esse causano la formazione di cricche, che provocano la rapida frattura dell'utensile.

Scheggiatura

Si tratta di un tipo di usura che definisce l'asportazione di particelle metalliche in prossimità del tagliente successivamente allo sviluppo di urti o pressioni eccessive.

Deformazione plastica

Accade che quando la temperatura della zona di taglio raggiunge valori tali da causare una riduzione della tensione del materiale dell'utensile, esso si deforma, perdendo tutte le caratteristiche, o buona parte di esse, che lo identificavano precedentemente a questo tipo di evento.

Al fine di limitare gli effetti di cui sopra, vengono sfruttati dei fluidi di taglio le cui funzionalità sono di due tipi: lubrificante e refrigerante. In base alla velocità di taglio " v_t ", essi assumono un tipo di funzionalità:

- di refrigerazione, se si tratta di lavorazioni con v_t medio-alte, come ad esempio nella tornitura o nella fresatura;
- di lubrificazione, se si tratta di lavorazioni che sfruttano v_t basse, come ad esempio la maschiatura e la brocciatura.

Inoltre, hanno anche il compito di favorire l'evacuazione del truciolo dalla zona di taglio e di proteggere le superfici sottoposte a lavorazione dai fenomeni di ossidazione e/o corrosione.

Ciò che accade a livello geometrico sull'utensile dipende dal tipo di fenomeno di usura che si è verificato su di esso. Se ad esempio si è formato un cratere sul petto, è perché nella lavorazione si è verificato un fenomeno di diffusione o di adesione, mentre se si osserva un labbro d'usura sul fianco dell'utensile, caratterizzato da una serie di striature parallele alla direzione di taglio, si parla di abrasione. Ad ogni modo, ciò che si è verificato è consistito in

una alterazione di forma e dimensioni dell'utensile, dovuta alla perdita di materiale dalla sua superficie.

Labbro e cratere d'usura sono due meccanismi che necessitano di essere presi in considerazione, poiché sono i fenomeni che si verificano maggiormente nelle lavorazioni di taglio.

2.1 Labbro d'usura

Si forma a causa dello strisciamento del dorso dell'utensile sulla superficie di lavorazione, ed è sempre presente, in maniera più o meno marcata. La sua insorgenza è spesso causa di irregolarità nella finitura e nella precisione, ed è definita da dimensioni quali:

- **larghezza**, quantificata dal valore medio, chiamato "VB" e dal valore massimo, definito "VB_{max}";
- **lunghezza**, definita "b";
- **distanza** tra tagliente principale usurato e originario, individuato con il termine "N".

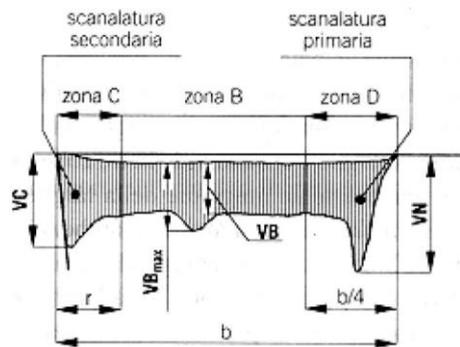


Figura 9 rappresentazione schematica della distribuzione dei parametri VB , VB_{max} , b ed N

2.2 Cratere d'usura

La sua formazione è dovuta all'azione di diffusione e di adesione, che si manifesta in condizioni in cui la temperatura e la pressione risultano elevate, causando un progressivo indebolimento nello strumento da taglio, ed è presente solo negli utensili in materiali che consentono di raggiungere velocità di taglio elevate. Inoltre, per lavorazioni di materiali fragili che danno origine ad un truciolo interrotto, come la ghisa, tale fenomeno risulta assente.

Le dimensioni che vengono considerate per quantificarlo sono:

- Profondità massima "KT";
- Larghezza "KL";
- Distanza del centro del cratere dal tagliente originario "KM";
- Distanze dei bordi del cratere dal tagliente originario "KB" e "KF".

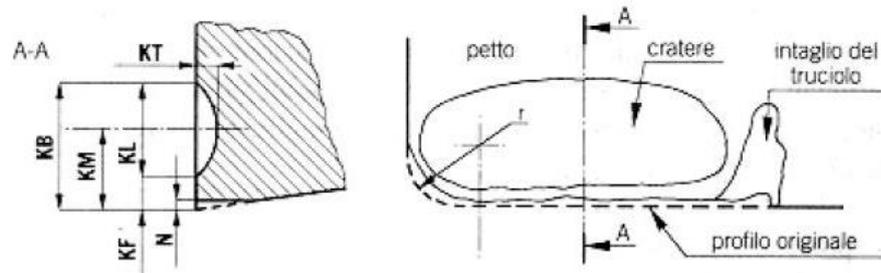


Figura 10 rappresentazione schematica del cratere di usura e dei relativi parametri

Insieme a queste informazioni, facilmente ottenibili, vengono adoperati i cosiddetti criteri d'usura, che sono dei metodi che consentono di stabilire in modo oggettivo la durata dell'utensile. Essi vengono caratterizzati in funzione:

- del grado di usura massimo ammissibile sul fianco dell'utensile " VB_{lim} ";
- del grado di usura massimo ammissibile sul petto dell'utensile " KT_{lim} ";
- dei limiti di tolleranza ammissibili sul pezzo, secondo cui la presenza del labbro d'usura è causa della perdita di precisione;
- dei limiti di rugosità ammissibili sul pezzo, per cui la presenza del labbro d'usura definisce la perdita della finitura desiderata.

Parlando del criterio di usura che si rifà al massimo valore ammissibile di VB, allo stesso modo di come si farebbe per gli altri, si definisce che l'utensile raggiunga il termine della sua vita utile quando $VB > VB_{lim}$. In base al tipo di utensile, se ad esempio questo sia integrale, o

con inserti, si agisce in una certa maniera per la sostituzione. Se l'utensile è integrale, si provvede al ripristino della geometria originale del tagliente mediante rifilatura, altrimenti, se l'utensile presenta degli inserti, si procede con la sostituzione del tagliente riposizionando o cambiando l'inserto. In ulteriore aggiunta, VB_{lim} dipende dal materiale con cui viene realizzato l'utensile e dal tipo di operazione. Ad esempio, se si tratta di uno strumento da taglio costituito da carburi metallici sinterizzati, $VB_{lim}=0,8\text{mm}$ se si parla di tornitura o fresatura di sgrossatura; $VB_{lim}=0,4\text{mm}$ se, ad esempio, abbiamo a che fare con un processo di finitura.

Viene poi evidenziato dalla teoria che la velocità di taglio è il parametro che influenza maggiormente l'usura, poiché è legato alla temperatura della zona di taglio. Nelle curve di usura, in cui è espresso l'andamento di VB , definito in millimetri, in funzione del tempo, espresso in minuti, è possibile vedere come all'aumentare di v_t la curva subisca uno spostamento verso sinistra, proprio a sottolineare la diminuzione della durata dell'utensile.

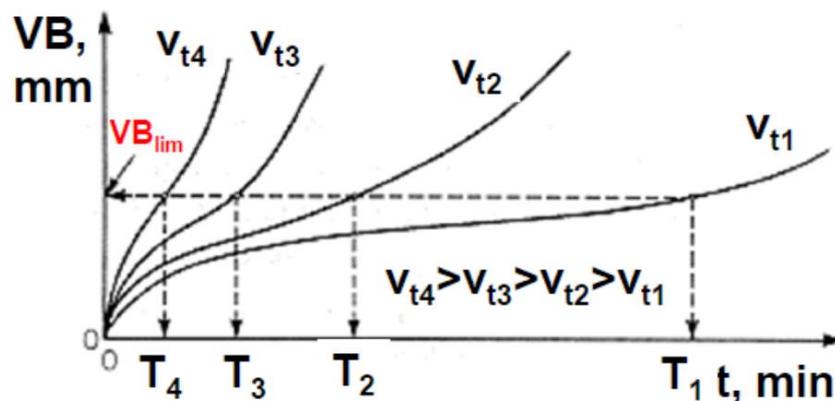


Figura 11 Curve limite di usura

L'andamento che meglio consente di evidenziare il legame tra durata dell'utensile e v_t è quello descritto in scala logaritmica, dove sulle ordinate è localizzato il logaritmo del tempo, sempre riportato in minuti, e sulle ascisse vengono inseriti i valori del logaritmo della velocità di taglio, espressa in metri al minuto.

2.3 Legge di Taylor

La legge di Taylor è la relazione che descrive la durata dell'utensile evidenziando proprio la sua dipendenza dalla sola velocità di taglio:

$$v_t * T^n = C \quad (1)$$

Dove:

- C è una costante che esprime la v_t corrispondente a una durata dell'utensile di 1 min;
- n è l'esponente di Taylor, usualmente compreso tra 0,1 e 0,6.

e su scala logaritmica "C" rappresenta l'intersezione con l'asse delle ascisse per $T=1$ min, mentre "n" indica la tangente dell'angolo minore tra retta e asse delle ordinate.

Risulta doveroso aggiungere che la sola legge di Taylor non considera, perlomeno in maniera esplicita, gli altri parametri di taglio, comunque responsabili anch'essi, seppur in maniera minore rispetto a v_t , dell'usura dell'utensile. Pertanto, in letteratura esistono anche altre formulazioni della legge di Taylor, dette generalizzazioni.

La legge di Taylor generalizzata, così definita, è la seguente:

$$v_t * T^n * a^r * p^s = C \quad (2)$$

Con:

- r: sensibilità di T all'avanzamento "a" (r=0,4-0,6), con "a" espresso in mm/giro o mm/doppia corsa;
- s: sensibilità di T alla profondità di passata "p" (s=0,2), con "p" espresso in mm.

Questa formula viene utilizzata nella seguente forma, per esplicitare il termine legato alla durata dell'utensile:

$$T = C^{1/n} * v_t^{-1/n} * a^{-r/n} * p^{-s/n} \quad (3)$$

Da cui emerge che per mantenere invariato il valore di T, ad un aumento di v_t deve corrispondere una diminuzione di "a" e/o "p" [1].

3. materiali e procedure sperimentali

3.1 Materiali

La strumentazione utilizzata per adempiere alle finalità proposte dall'intento di tale studio è la seguente:

Stereomicroscopio:

Lo strumento in questione è rappresentato nella figura 12.



Figura 12 Stereomicroscopio Leica EZ4 D

Lo strumento in questione è stato utilizzato con l'ausilio di un software di acquisizione immagini nominato "LasEZ".

Stampante 3D:

La stampante utilizzata è una “Roboze one+ 400”, rappresentata nella figura 13.



Figura 13 stampante 3D Roboze one+ 400

Tale stampante viene adoperata mediante l'utilizzo di una scheda SD contenente il file CAD, opportunamente elaborato tramite un software denominato “Simplify”, che è in grado di tradurre il linguaggio con il quale il modello 3D da stampare viene realizzato sul software CAD (solitamente in formato “.stl”), nel linguaggio che la macchina è in grado di comprendere, per poter effettuare la stampa (formato “.gcode”). Su questo software è possibile impostare numerosi parametri, tra cui l'angolazione con la quale deve avvenire la deposizione di materiale sul piano mobile, cioè, se di 0, 45 o 60 gradi. Ciò è importante poiché l'orientazione dei filamenti che costituiscono lo stampato influisce sul grado di resistenza che il materiale esercita, se sollecitato. È poi possibile definire delle impostazioni dedicate in base al tipo di materiale, affinché la stampante svolga il processo nella maniera migliore possibile.

È importante aggiungere che risulta possibile impostare dei parametri anche tramite il pannello di controllo della stampante, quali la temperatura di estrusione e la temperatura del

piano mobile. Nel nostro caso, avendo lavorato con il carbon PA, i parametri con i quali è stata definita la stampa sono stati i seguenti:

- temperatura di estrusione di 260°C circa;
- temperatura del piano di deposizione (denominato “bed”) di circa 80°C.

Ugello:

L’ugello montato sull’estrusore della stampante 3D è stato realizzato dalla Micro Swiss, ha un diametro di uscita di 0,4 mm ed è rivestito con Ni-P. Nella figura 14 è possibile osservarne un esempio.



Figura 14 Ugello Micro Swiss MK8 in acciaio rivestito in A2 ed indurito, con un foro di uscita da 0,4 mm

È utilizzato per effettuare la stampa di materiali a matrice polimerica con filamento di diametro iniziale di 1,75 mm, con vita utile dichiarata dal costruttore di circa 100 ore.

Materiale utilizzato per la stampa 3D:

Il materiale utilizzato per la stampa 3D è il Carbon PA, materiale composito a matrice polimerica (poliammide), rinforzata con fibre corte di carbonio al 20%, ottenibile in commercio sotto forma di filo di diametro 1,75mm avvolto in bobine, come indicato nella figura 15. Una criticità legata all'uso di questo materiale è la sua elevata sensibilità all'umidità, che rischia di comprometterne l'integrità strutturale. Vanno pertanto adottati degli accorgimenti al fine di evitare che tali problematiche possano insorgere. Procedura vuole che tali accorgimenti consistano nel preriscaldare, prima che venga lanciata la stampa, il materiale in un forno a 100°C circa; successivamente, per la stampa, si pone la bobina di materiale in un riscaldatore, posto sull'estremità superiore della macchina, alla temperatura di 70°C.



Figura 15 Bobina di carbon PA

Dalle schede tecniche dichiarate dal costruttore, emergono le seguenti caratteristiche:

	MECHANICAL PROPERTIES	Test Method	BUILD ORIENTATION		INFILL DENSITY
			XZ	XY	
TENSILE	Tensile Strength, Ultimate	ASTM D638	98 MPa	94 MPa	75%
	Tensile Modulus	ASTM D638	7,85 GPa	6,40 GPa	

Tabella 1 Proprietà meccaniche conferite dal costruttore

Dalla tabella 1 i termini denominati “XY” ed “XZ” stanno ad indicare l’orientazione di costruzione del provino utilizzato per le prove di trazione. “XY” sta ad indicare una struttura del provino prevalentemente distribuita, in un sistema di assi cartesiani ortogonale XYZ, sul piano XY, mentre la dicitura “XZ” sta ad indicare una distribuzione della struttura del provino prevalentemente orientata lungo il piano “XZ”.

Micrometro centesimale:

Per effettuare le nove misurazioni sui provini utilizzati nella prova di trazione, come dettato dalla norma ASTM D3039- “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”, è stato utilizzato il micrometro centesimale rappresentato in figura 16.



Figura 16 Micrometro centesimale Mitutoyo

Macchina utilizzata per le prove di trazione:

La macchina servoidraulica utilizzata per svolgere le prove di trazione, rappresentata nella figura 17, è la MTS 810. Per l’acquisizione di valori di tensione e deformazione più accurati è stato utilizzato anche un estensometro, della stessa casa produttrice.



Figura 17 Macchina MTS 810

Per lo svolgimento delle prove di trazione, ci si è attenuti alla normativa ASTM D638.

Software utilizzati per quantificare il grado di usura:

Sono stati utilizzati, per analizzare e quantificare l'usura nell'ugello, software quali Microsoft Powerpoint e Rhinoceros. Il primo è stato utilizzato per confrontare le immagini dell'ugello nuovo con le acquisizioni effettuate successivamente al tempo di inizio vita, cioè dopo

ciascuna stampa, mentre il secondo è stato utilizzato per quantificare l'aumento delle dimensioni del diametro del tratto di uscita dell'ugello.

3.2 Procedure sperimentali

Con l'obiettivo di individuare in quale maniera il grado di usura dell'ugello influenzi le proprietà meccaniche del prodotto stampato, si è operato nel seguente modo: è stato mandato in stampa, tra un componente e l'altro, per vari intervalli temporali, un provino di trazione, ciascuno dei quali è stato contrassegnato con un valore numerico corrispondente al tempo in minuti trascorso dall'inizio della vita dell'utensile fino al momento precedente l'estrusione del provino stesso. Insieme a tale pratica, è stata effettuata la procedura di acquisizione delle immagini allo stereomicroscopio dell'ugello oggetto dello studio, all'inizio della sua vita, e poi, progressivamente, dopo ciascuna sessione di stampa, fino alla sua fine, con l'obiettivo di evidenziare, attraverso dei confronti mediante loro sovrapposizione, il grado di usura dell'utensile.

Le modalità con le quali sono state effettuate le acquisizioni sono le seguenti.

Per le acquisizioni delle immagini dell'ugello da differenti prospettive, è stato avvitato l'utensile sulla base removibile dell'estrusore con foro centrale filettato, come avviene quando si effettua il suo montaggio sulla stampante 3D, in modo tale da rendere acquisibili sempre le stesse parti dell'ugello. Dunque, per ciascun lato (numerato da uno a quattro) della base, di forma quadrata, sono state acquisite le viste laterali con un ingrandimento 8x, mentre per le viste dall'alto sono state effettuate delle fotografie con doppio zoom, una a 8x, e l'altra a 35x, per evidenziare maggiormente gli effetti oggetto dello studio.

Nelle seguenti figure è rappresentato quanto descritto precedentemente.

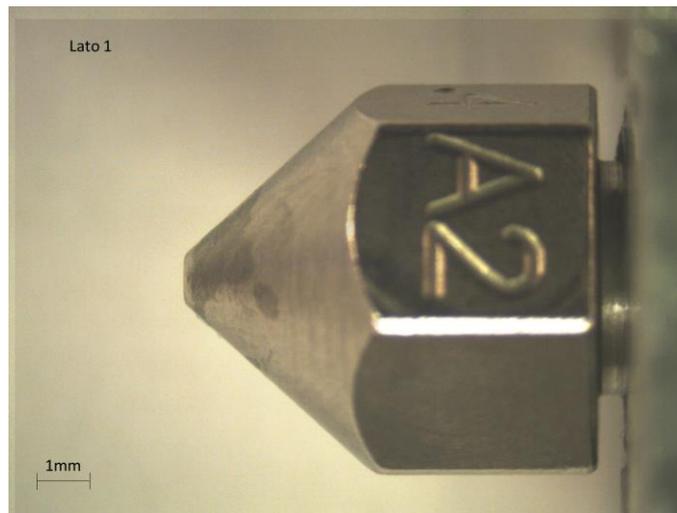


Figura 18 Sovrapposizione di immagini dell'ugello al tempo $t=0$ e $t=100$ minuti svolta su Powerpoint

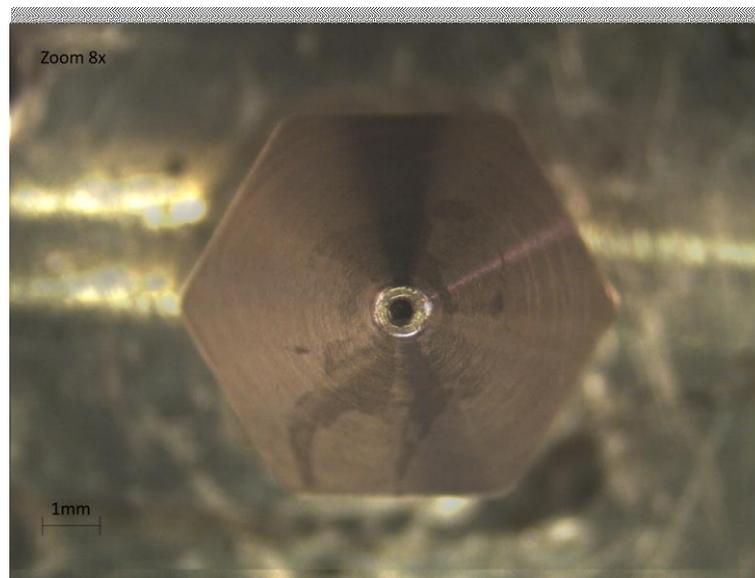


Figura 19 Sovrapposizione di confronto tra l'acquisizione della vista dall'alto dell'ugello al tempo $t=0$ e al tempo $t=100$ minuti ottenuto con ingrandimento 8x effettuato su Powerpoint

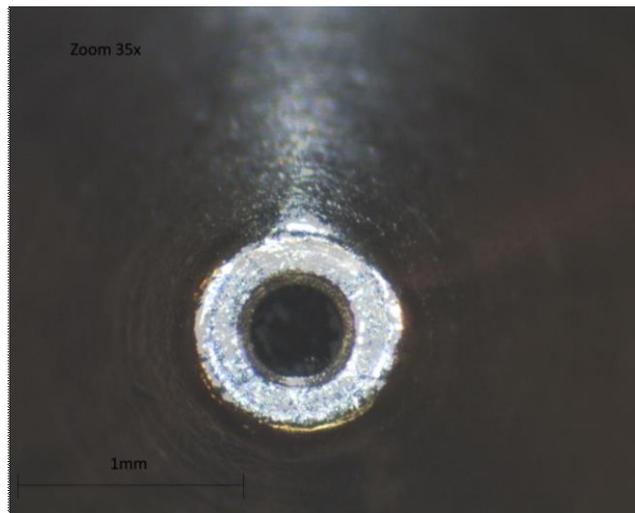


Figura 20 Sovrapposizione tra le acquisizioni effettuate della vista dall'alto dell'ugello al tempo $t=0$ e al tempo $t=100$ minuti con ingrandimento 35x effettuato su Powerpoint



Figura 21 Immagine raffigurante l'ugello avvitato sulla basetta. È stato utilizzato un righello per rendere il più possibile piana l'immagine dell'acquisizione

3.2.1 Prove di trazione

La prova di trazione è una prova di caratterizzazione di materiali che consiste nel sottoporre un provino standardizzato, con dimensioni definite da norme UNI, a un carico monoassiale che parte da modulo nullo fino a raggiungere un valore tale da rompere il provino. Con la prova di trazione si può ricavare la curva σ - ϵ , che mette in relazione tensione e deformazione. Nella curva si distinguono una regione ad andamento elastico ed una ad andamento plastico; il punto massimo della curva definisce la strizione del materiale, ovvero il momento in cui si verifica una deformazione localizzata, dopo la quale i dati ottenuti dalla prova non sono più attendibili. Dalla prova di trazione si possono ottenere:

- Resistenza allo snervamento: la tensione alla quale inizia la deformazione plastica definita come la deformazione corrispondente ad una deformazione dello 0,02%;
- Resistenza a trazione: valore massimo della tensione, ottenuta in corrispondenza dell'inizio della strizione;
- Modulo di Young: grandezza che esprime il rapporto tra deformazione e tensione, e corrisponde all'inclinazione della retta costituente la regione elastica;
- Duttilità: capacità di un materiale di deformarsi prima di arrivare a rottura;
- Resilienza: capacità del materiale di immagazzinare energia in campo elastico;
- Tenacità: capacità del materiale di immagazzinare energia in campo plastico;

Per la realizzazione della prova di trazione è stata utilizzata una macchina di prova universale MTS 810, mostrata in figura 17. Per prima cosa il provino, in posizione verticale, va fissato alle estremità sui due afferraggi della macchina e, successivamente, inizia la vera e propria trazione che avrà fine al momento della frattura del materiale. Per l'elaborazione dei dati, un computer acquisisce le informazioni relative alla prova grazie ad una scheda di acquisizione e ad un software, mettendo in relazione la forza applicata dalla macchina con lo spostamento da essa effettuato. I dati acquisiti vengono inseriti automaticamente in un file Excel, e vengono elaborati per realizzare i grafici tensione-deformazione, utili a valutare le caratteristiche del materiale.

Per effettuare il passaggio dal grafico forza-spostamento al grafico tensione-deformazione è necessario utilizzare le relazioni indicate dalla normativa presa a riferimento per l'esecuzione delle prove, ovvero la ISO 527-1 (o ASTM D638). Le relazioni sono:

$$\varepsilon_t = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (4)$$

$$\sigma_t = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (5)$$

nelle quali

- ε_t = deformazione a trazione
- σ_t = tensione a trazione

Inoltre, dato che $\sigma = \frac{F}{A_0}$, per poterle applicare è necessario conoscere i valori della lunghezza iniziale del provino L_0 , la sua lunghezza finale L , la sua sezione iniziale A_0 e la forza F applicata su di esso.

A partire dall'ugello nuovo, fino a metà della sua vita utile, cioè per un equivalente di circa 50 ore, sono stati stampati, tra un componente e l'altro, cinque provini di trazione, rappresentati in figura 22, le cui dimensioni sono state ricavate tramite la normativa ASTM D3039- "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", i quali sono stati sottoposti a delle prove di trazione, che hanno consentito di estrapolare le prime informazioni relative alle proprietà meccaniche del materiale.



Figura 22 I primi cinque provini di trazione, stampati, a partire dal basso, ai tempi $t=0$, $t=100$, $t=900$, $t=1820$, $t=3260$ minuti

Successivamente alla stampa di altri sette provini di trazione (osservabili in figura 23) tra un componente e l'altro, giunti alla fine della vita utile dell'utensile, è stata svolta la seconda serie di prove di trazione. Dopo tali prove, è stata effettuata la procedura di messa in ordine dei dati raccolti, che successivamente si è conclusa con l'elaborazione dei grafici.



Figura 23 Provini di trazione stampati da metà vita utile a fine vita dell'ugello

È stata effettuata anche l'acquisizione allo stereomicroscopio delle sezioni dei provini fratturati, per analizzare il grado di porosità nel tratto utile dei provini. Nella sezione

“risultati” è possibile prendere nota delle informazioni ottenute dalle procedure sperimentali condotte.

4. Risultati

4.1 Evidenze riscontrate dalle acquisizioni allo stereomicroscopio

Dall’analisi delle sovrapposizioni è stato evidenziato che, dopo un tempo di vita utile di circa 1820 minuti, e in maniera visibile dal tempo $t=3360$, l’ugello ha iniziato a risentire dell’azione abrasiva causata dal passaggio del carbon PA, alla temperatura di estrusione di 260°C , come evidenziato nelle figure seguenti:

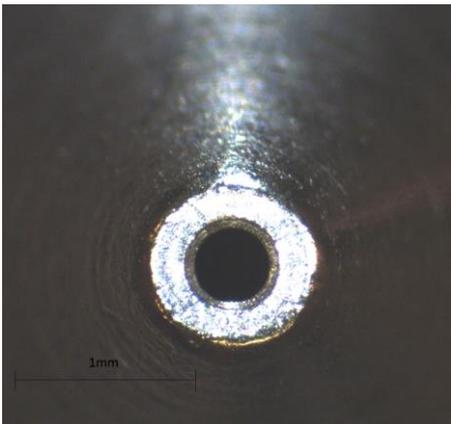


Figura 24 Acquisizione a 35x dell’ugello nuovo visto dall’alto

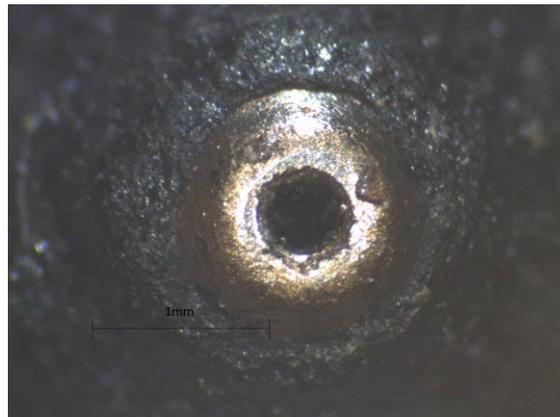


Figura 25 Acquisizione ugello dopo un tempo totale di lavoro di circa 3360 minuti con zoom 35x

Dal confronto delle circonferenze costruite (osservabile nella figura 26) attraverso il software chiamato “Rhinoceros” sulle acquisizioni fatte con lo stereomicroscopio, utilizzate per descrivere i contorni dei fori dell’ugello a diversi tempi di utilizzo, è stato possibile

quantificare la variazione di diametro della sezione di uscita dell'ugello dovuta all'usura, che, come è possibile osservare, è di 0,02 mm, cioè pari al 2% circa.

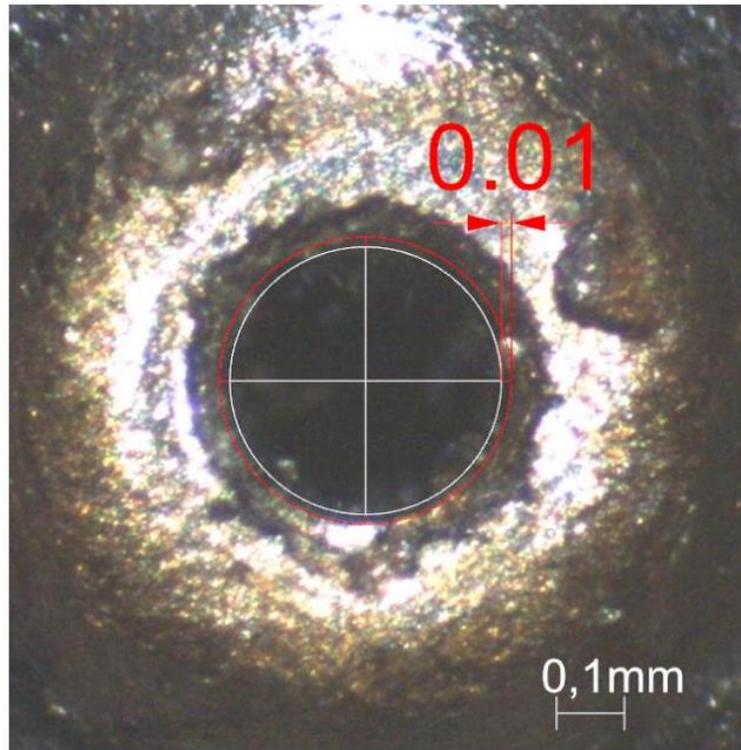


Figura 26 Variazione di raggio evidenziata dalla quota. Il cerchio bianco indica la circonferenza della sezione di uscita dell'ugello nuovo, mentre quella rossa dopo 3360 minuti

Attraverso questa immagine (figura 26) è possibile osservare, inoltre, che l'estremità terminale ha subito un arrotondamento della sua forma, rispetto a com'era ad utensile nuovo.

Vengono mostrate di seguito le acquisizioni fatte per ciascun lato della bassetta su cui è stato avvitato l'ugello, al tempo $t=0$ e al tempo $t=3360$, per definire il confronto tra le geometrie.

Ciò è visibile anche tramite le acquisizioni laterali effettuate sull'utensile, come mostrato nei confronti seguenti.

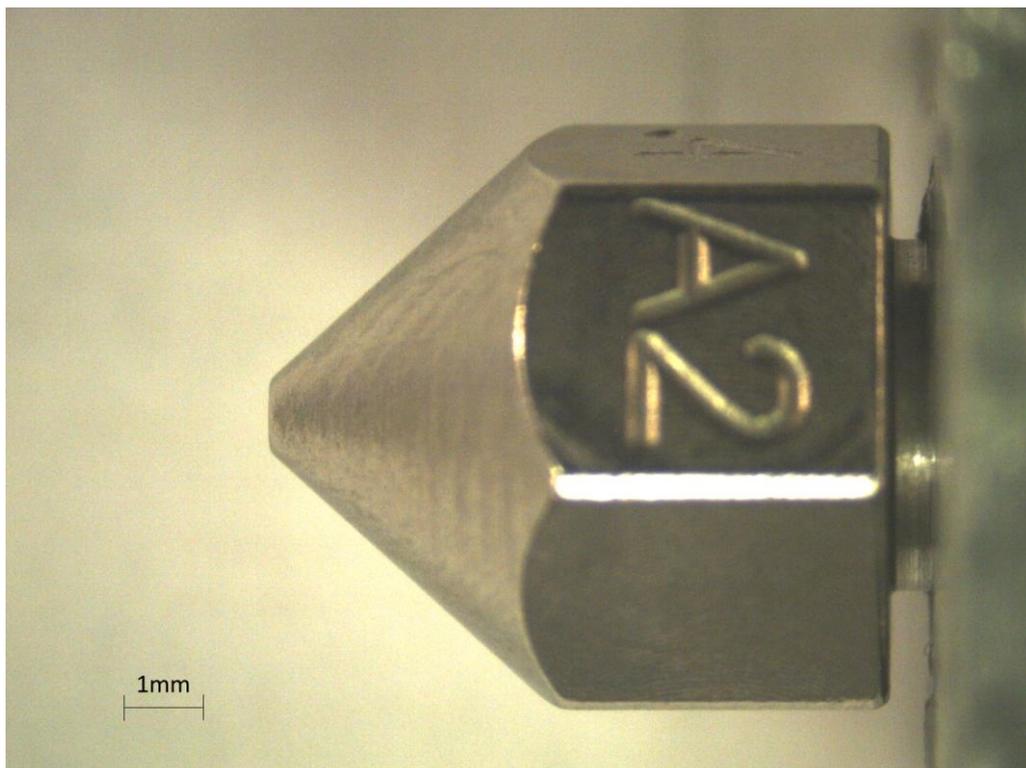


Figura 27 Lato 1 dell'ugello nuovo



Figura 28 Lato 1 dell'ugello dopo 3360 minuti

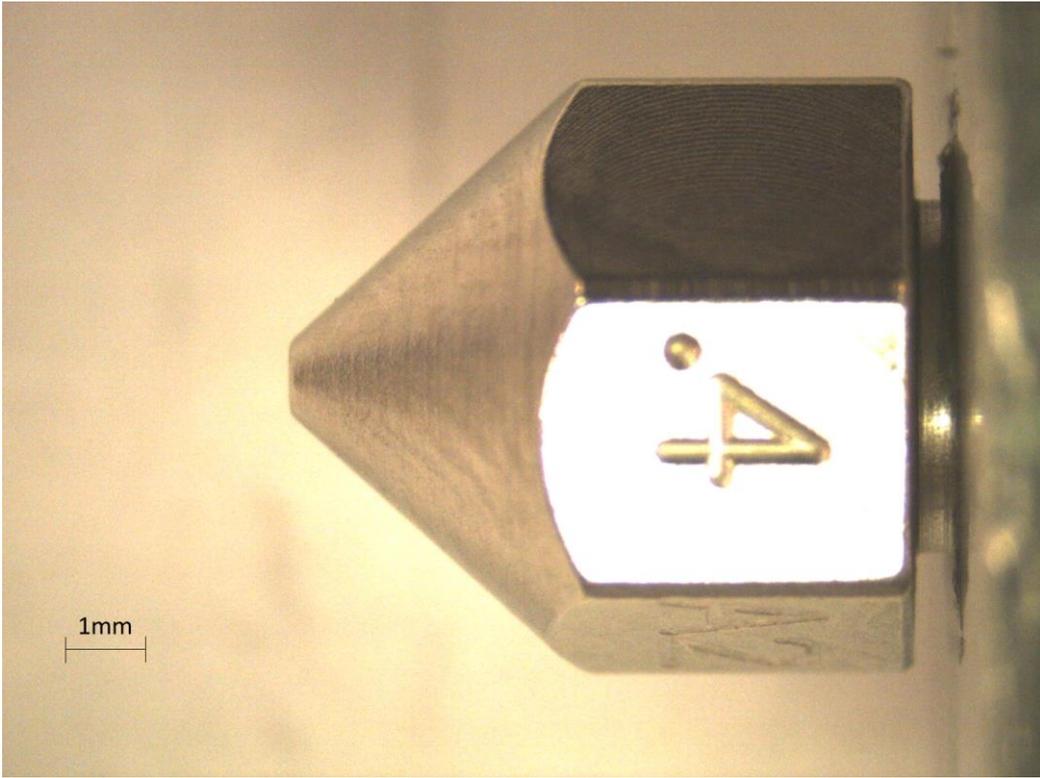


Figura 29 Lato 2 dell'ugello nuovo

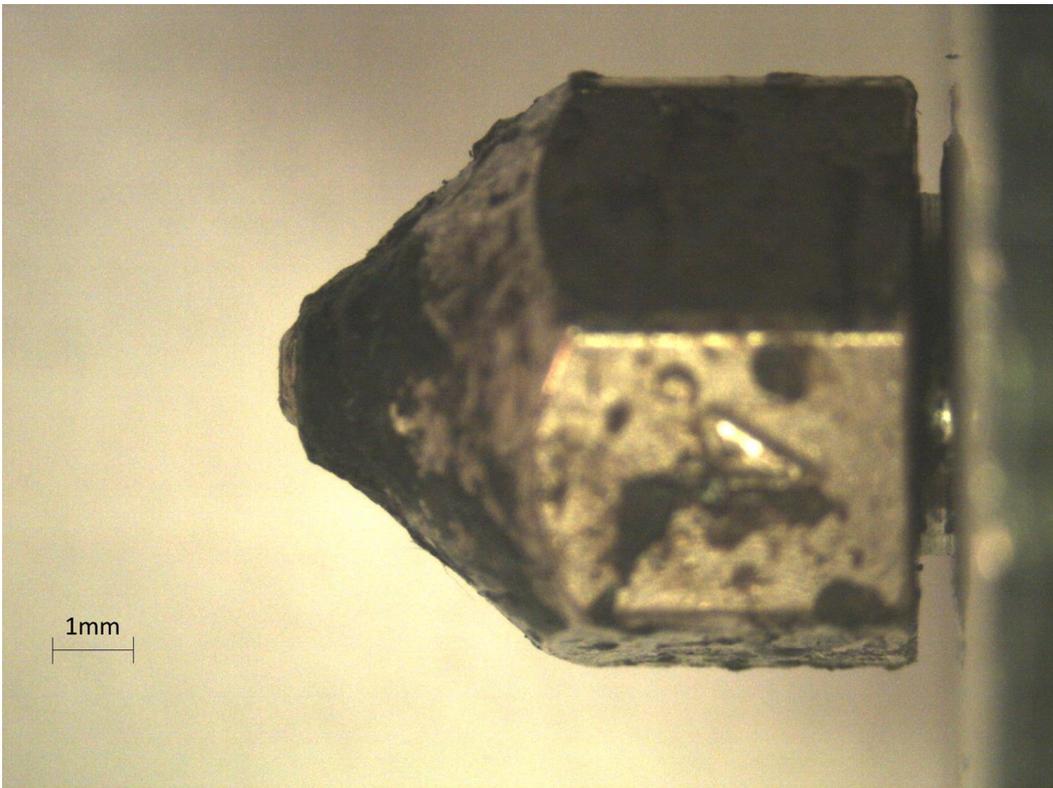


Figura 30 Lato2 dell'ugello dopo 3360 minuti

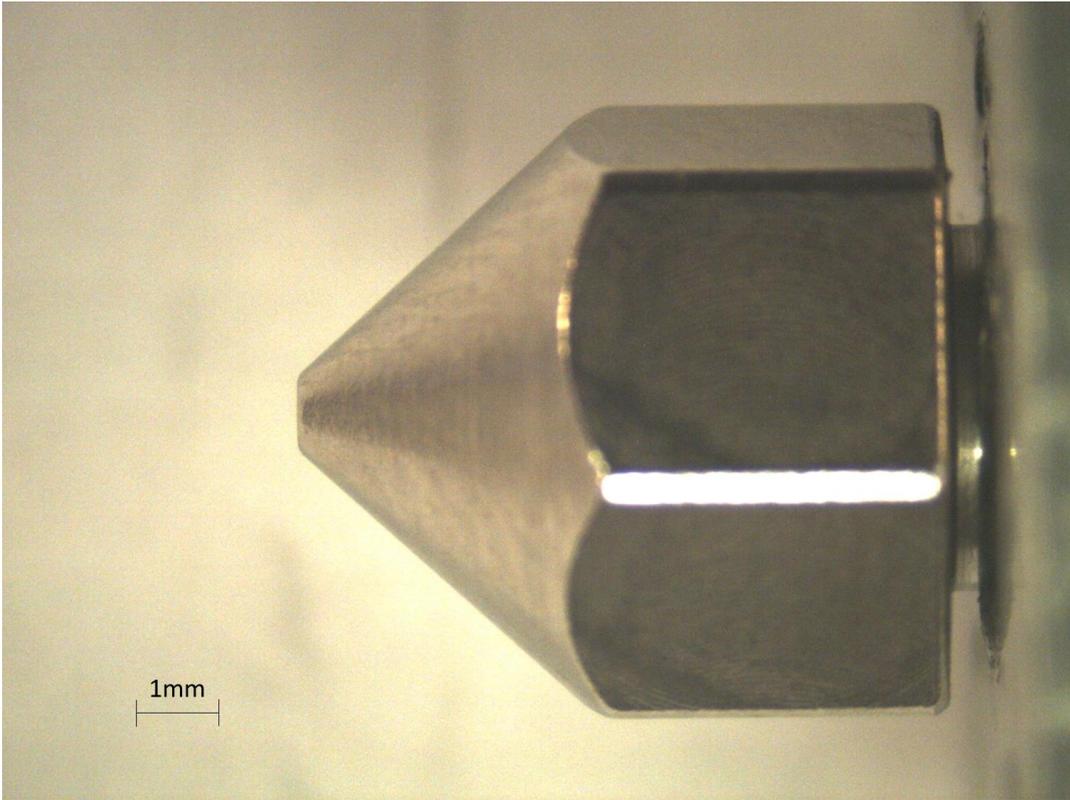


Figura 31 Lato 3 dell'ugello nuovo

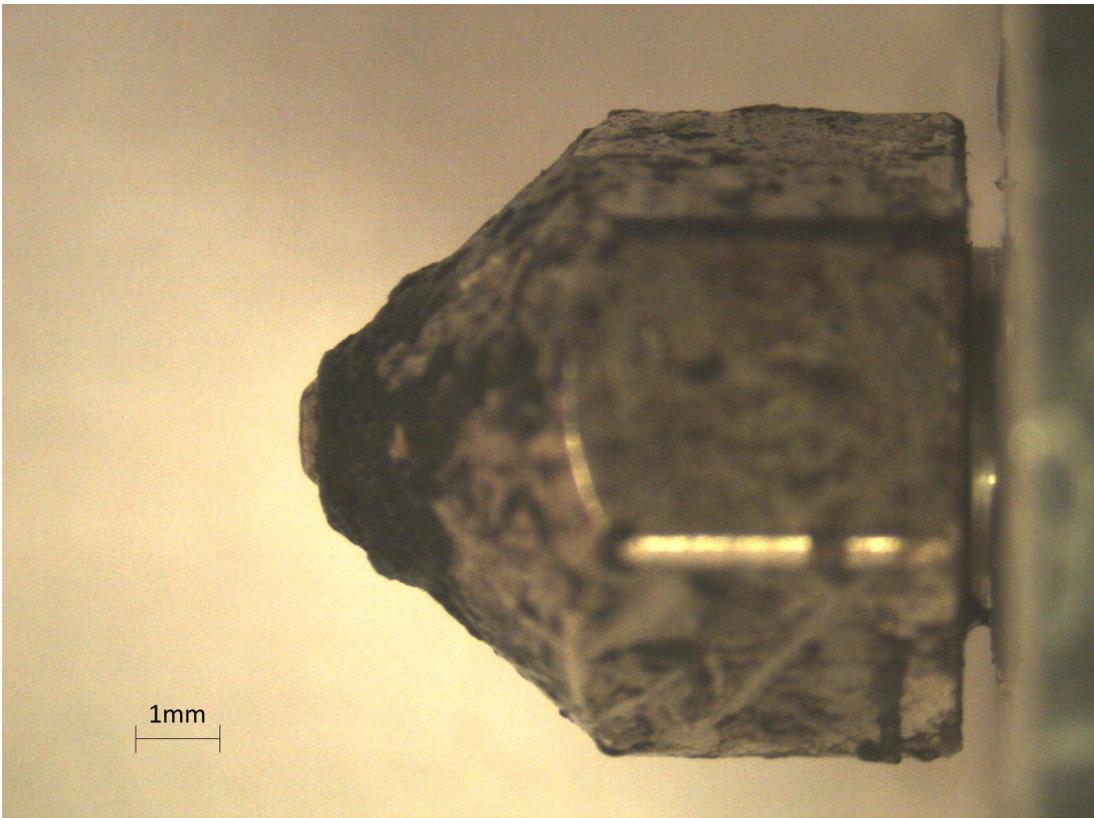


Figura 32 Lato 3 dell'ugello dopo 3360 minuti

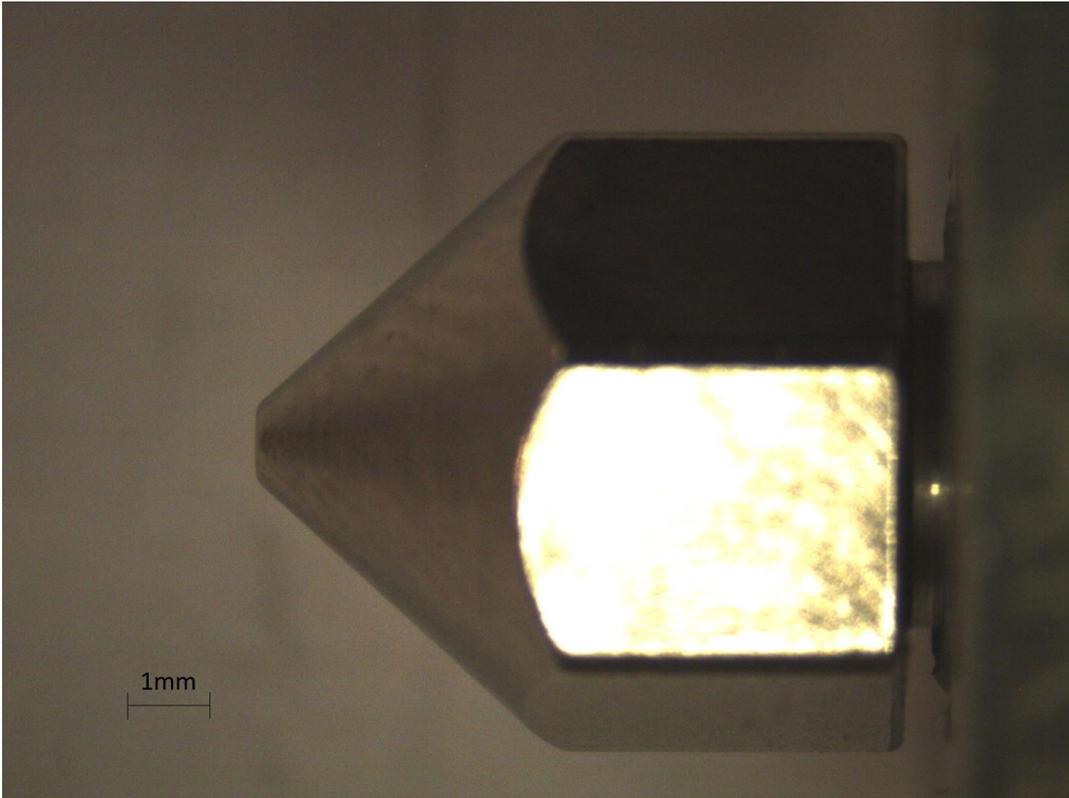


Figura 33 Lato 4 dell'ugello nuovo

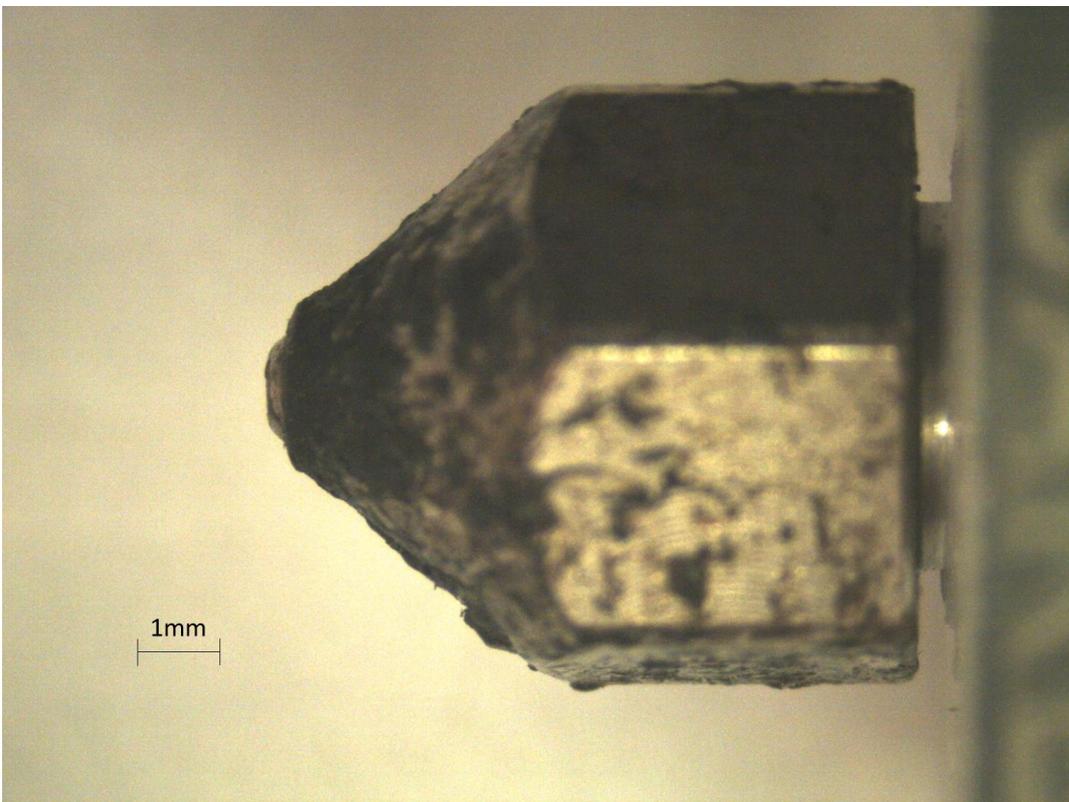


Figura 34 Lato 4 dell'ugello dopo 3360 minuti

A seguire, è possibile osservare, nelle figure 35 e 36 il confronto tra le viste dall'alto acquisite con zoom 8x dell'utensile nuovo con lo stesso dopo 3360 minuti:

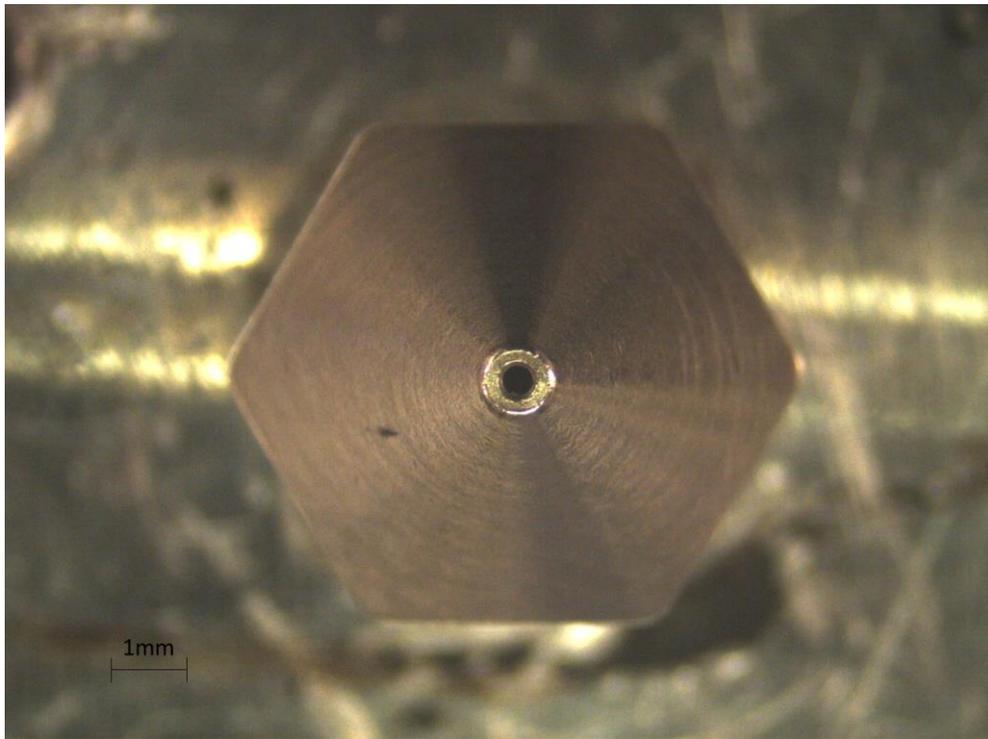


Figura 35 Vista dall'alto dell'ugello nuovo

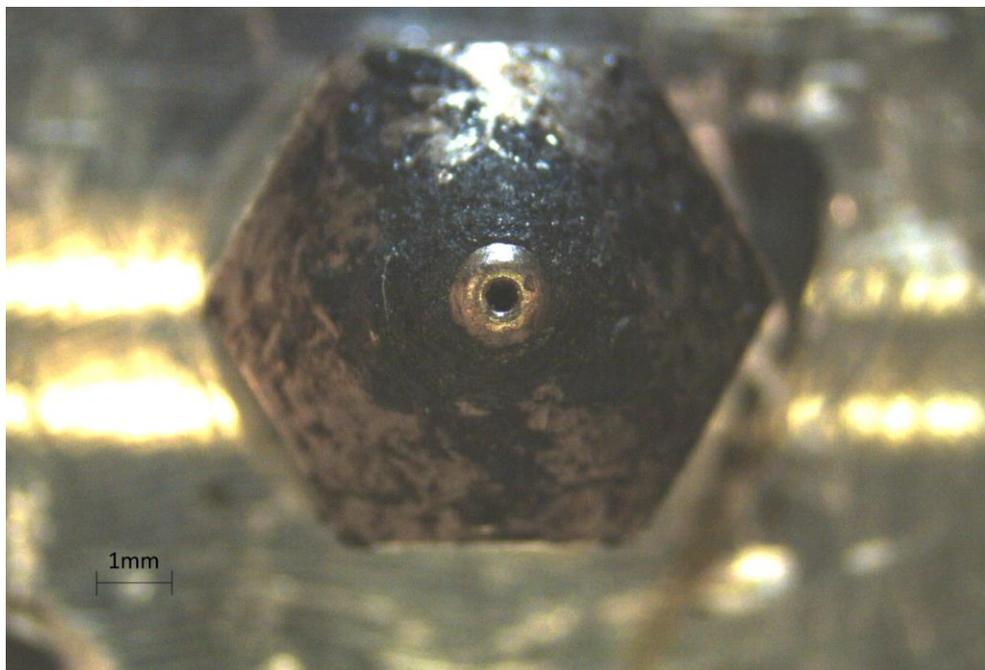


Figura 36 Vista dall'alto dopo 3360 minuti

A partire da metà vita, è stato osservato che il profilo dell'ugello risente dell'usura in maniera più marcata. Infatti, dopo soltanto 300 minuti circa di utilizzo, cioè al tempo $t=3660$ minuti, è stato possibile osservare un incremento di diametro pari al 6%, passando dagli 0,42 mm agli 0,46 mm, come descritto dalla figura 31.

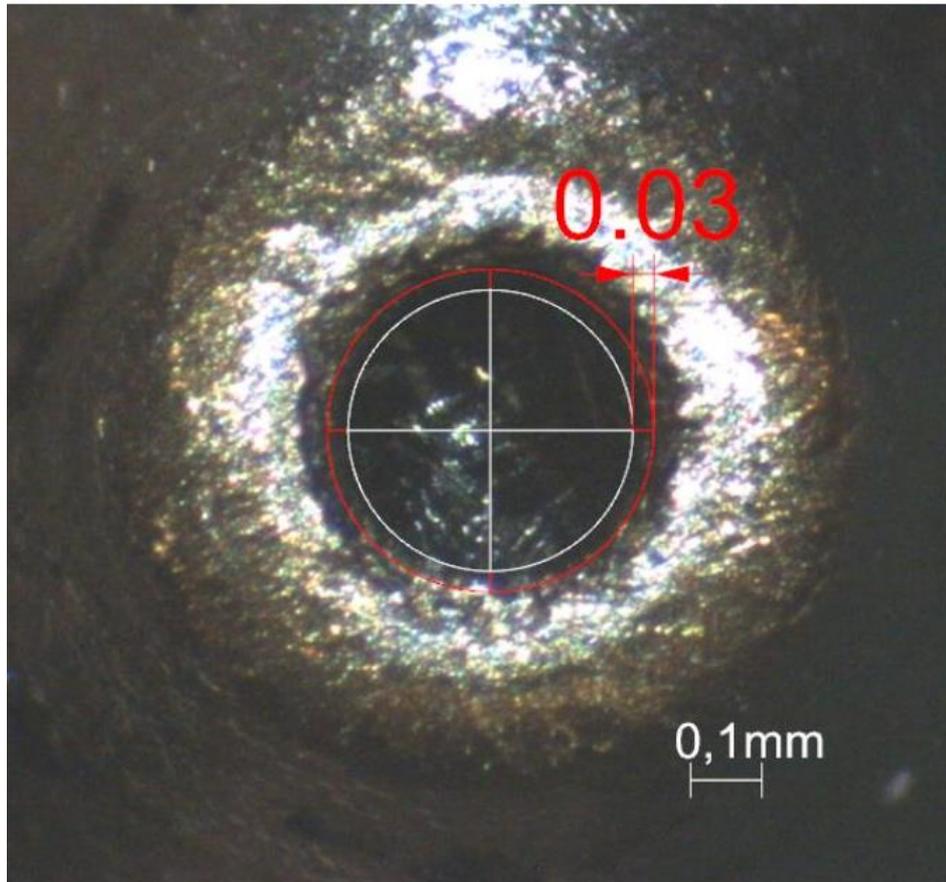


Figura 37 Diametro del foro dell'ugello dopo 3660 minuti di utilizzo

Come mostrato nelle immagini precedenti, si intendono evidenziare anche le differenze osservabili tra le acquisizioni dei lati dell'ugello al tempo $t=0$ e tra quelle dei lati dell'ugello al tempo $t=3660$ minuti, visibili, nelle pagine seguenti.

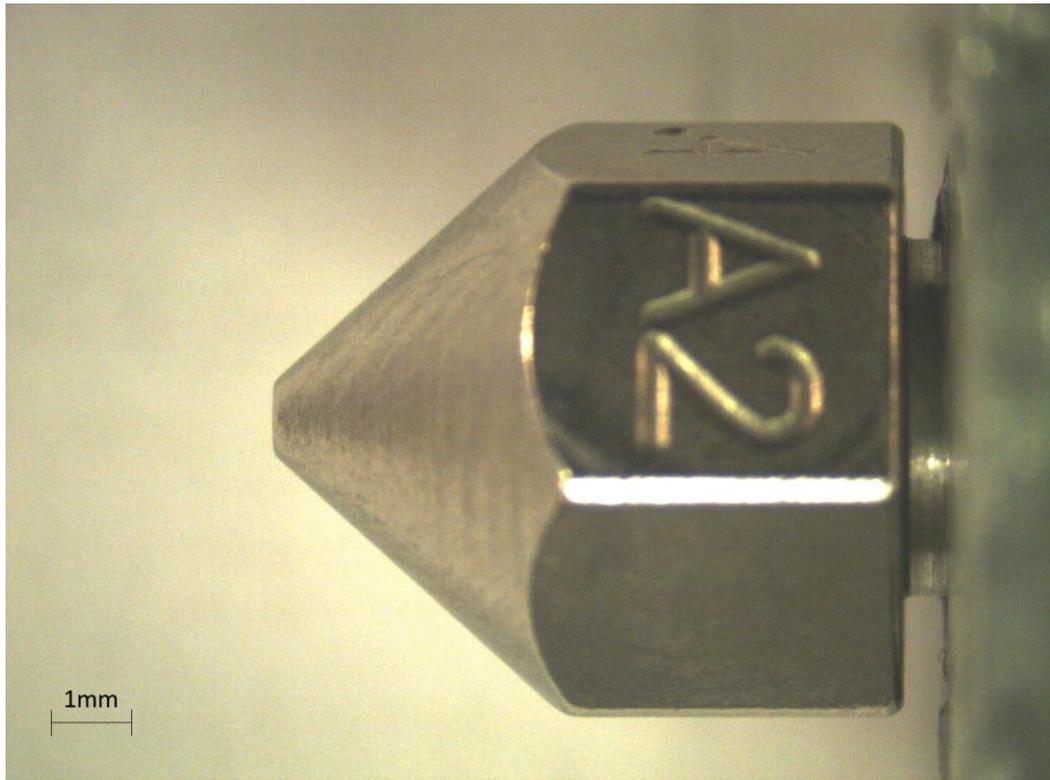


Figura 38 Lato 1 dell'ugello nuovo

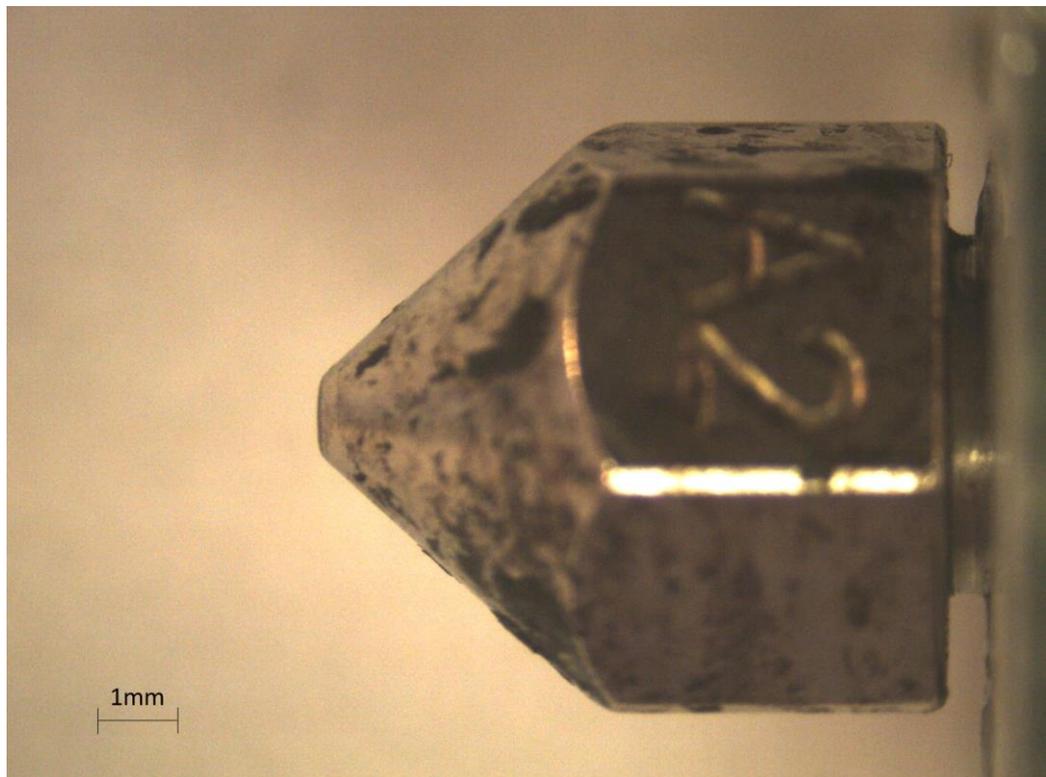


Figura 39 Lato 1 dell'ugello dopo 3660 minuti

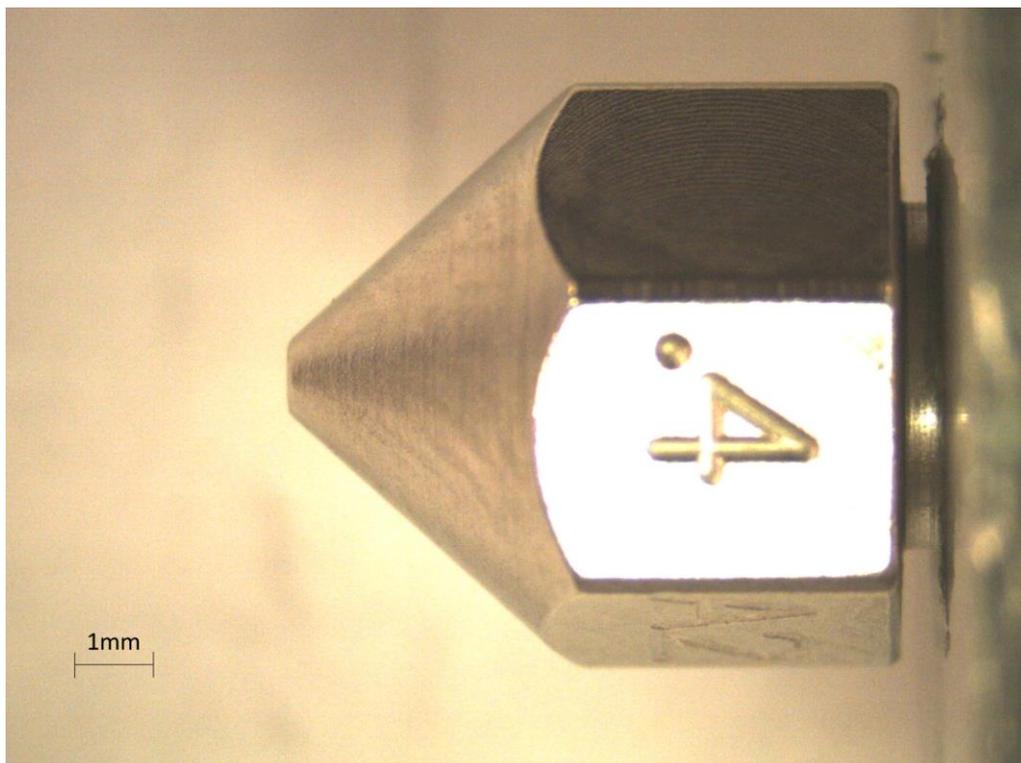


Figura 40 Lato 2 dell'ugello nuovo

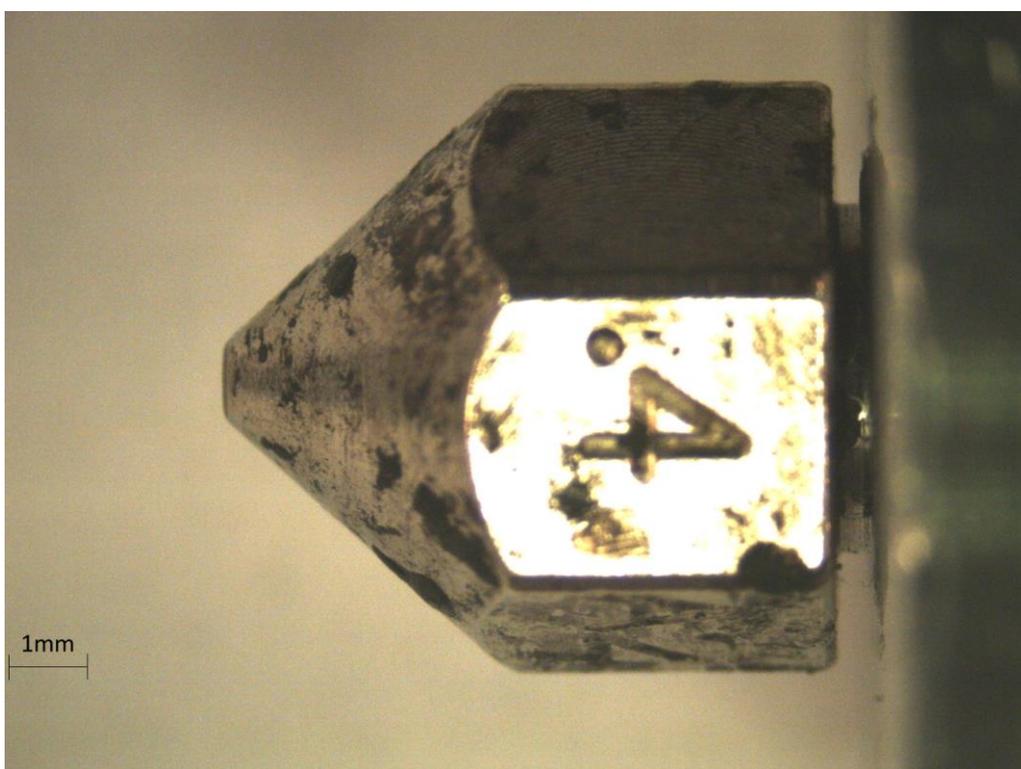


Figura 41 Lato 2 dell'ugello dopo 3660 minuti

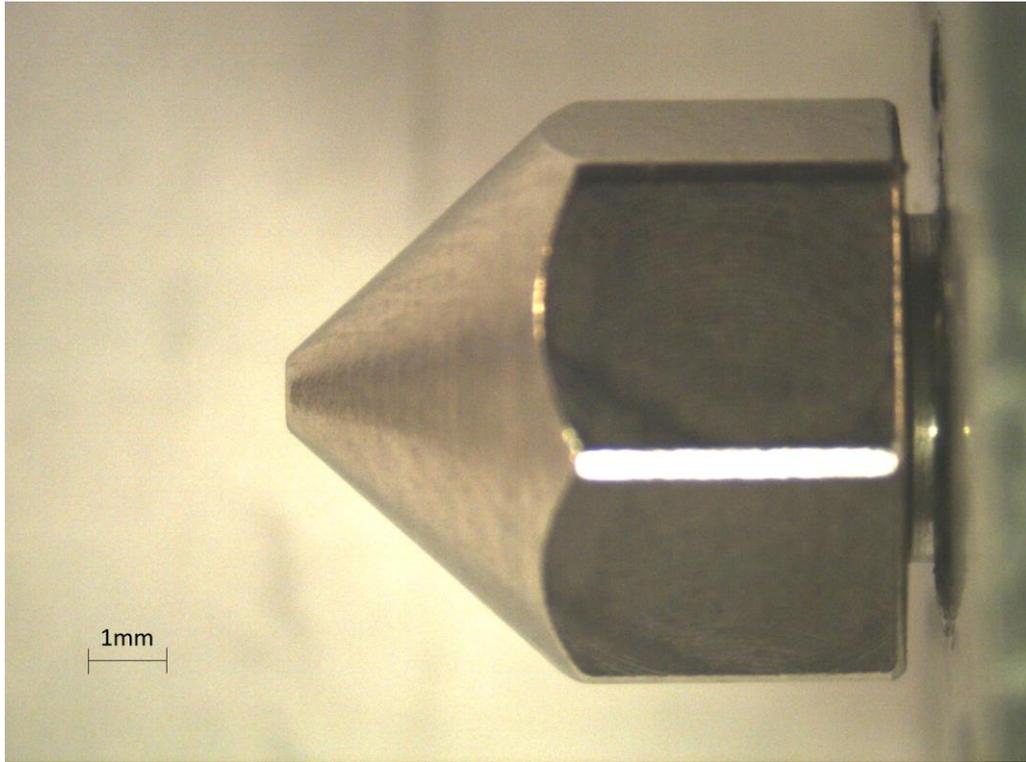


Figura 42 Lato 3 dell'ugello nuovo

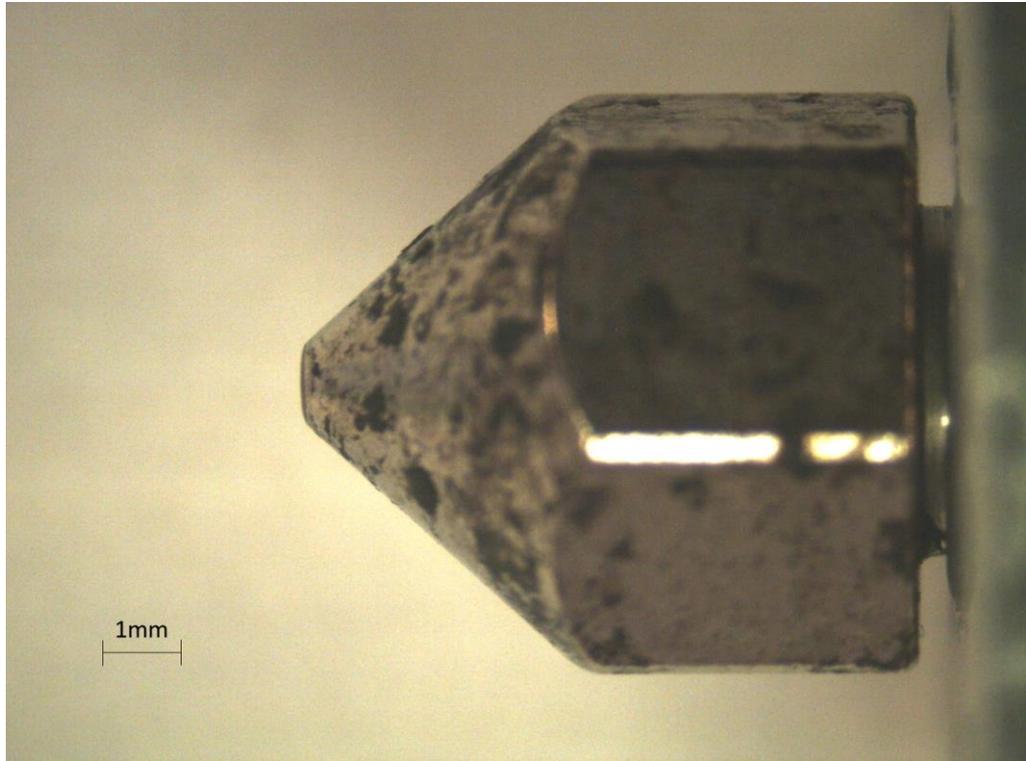


Figura 43 Lato 3 dell'ugello dopo 3660 minuti

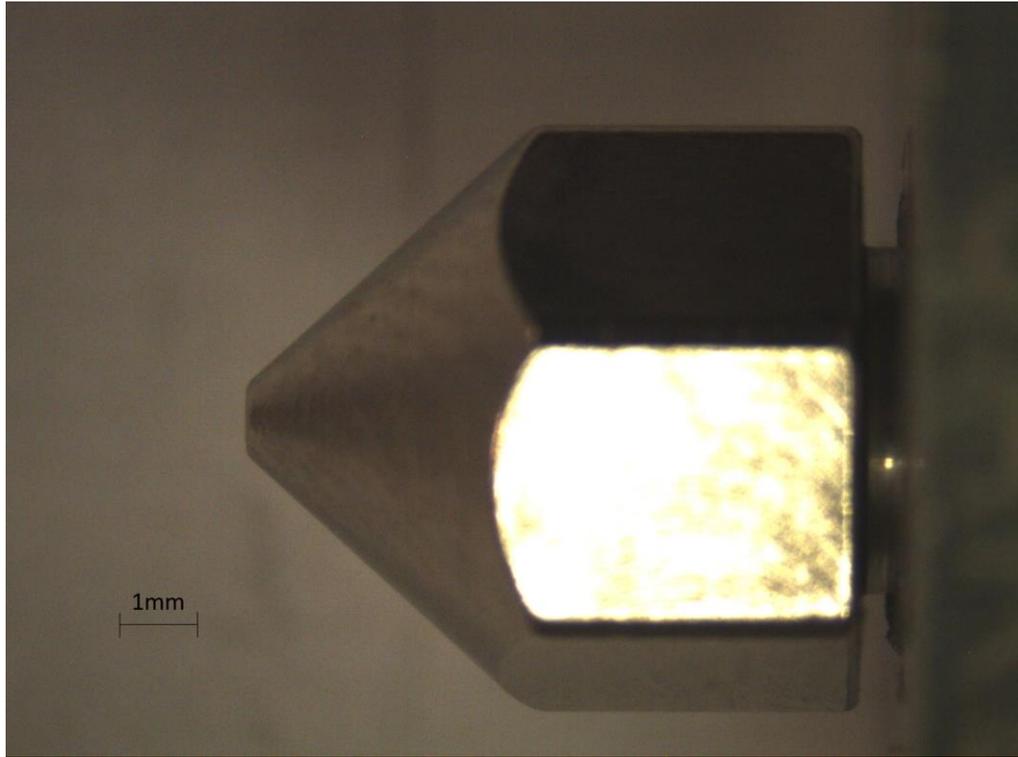


Figura 44 Lato 4 dell'ugello nuovo

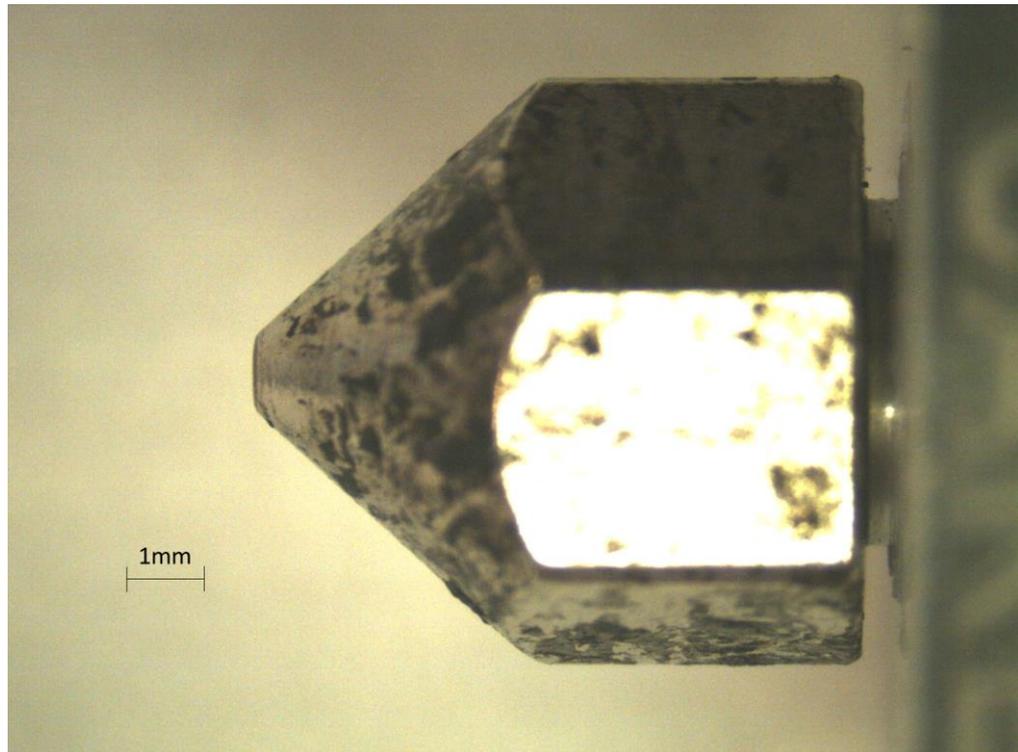


Figura 45 Lato 4 dell'ugello dopo 3660 minuti

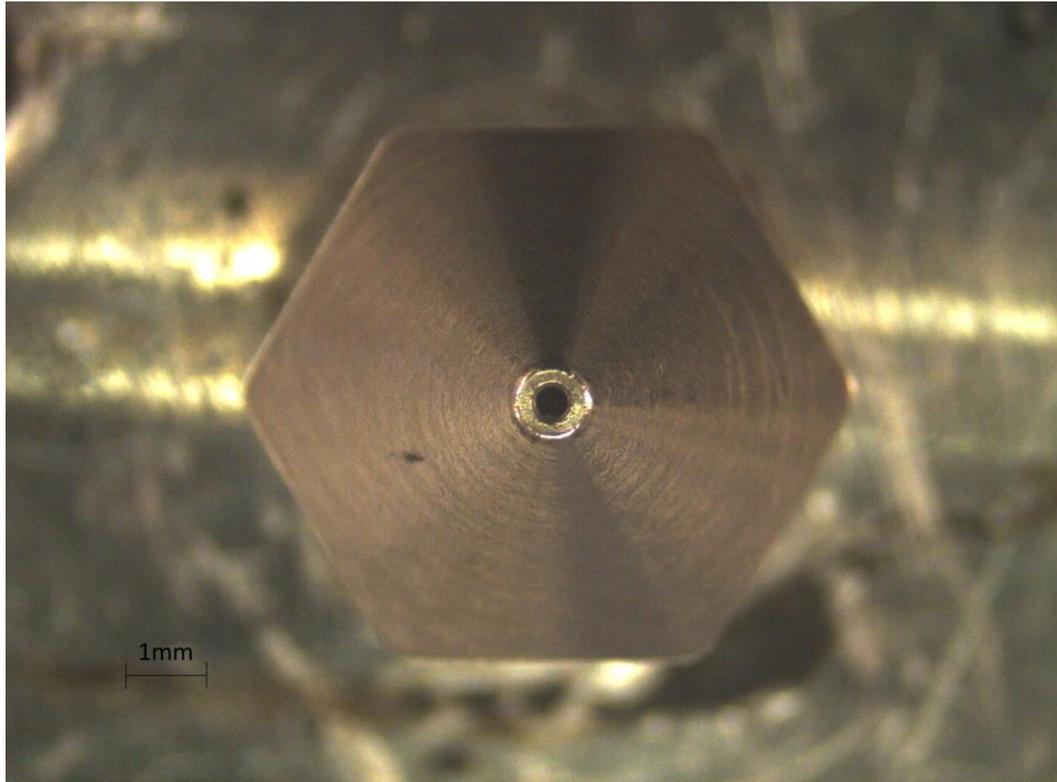


Figura 46 Vista dall'alto dell'ugello nuovo

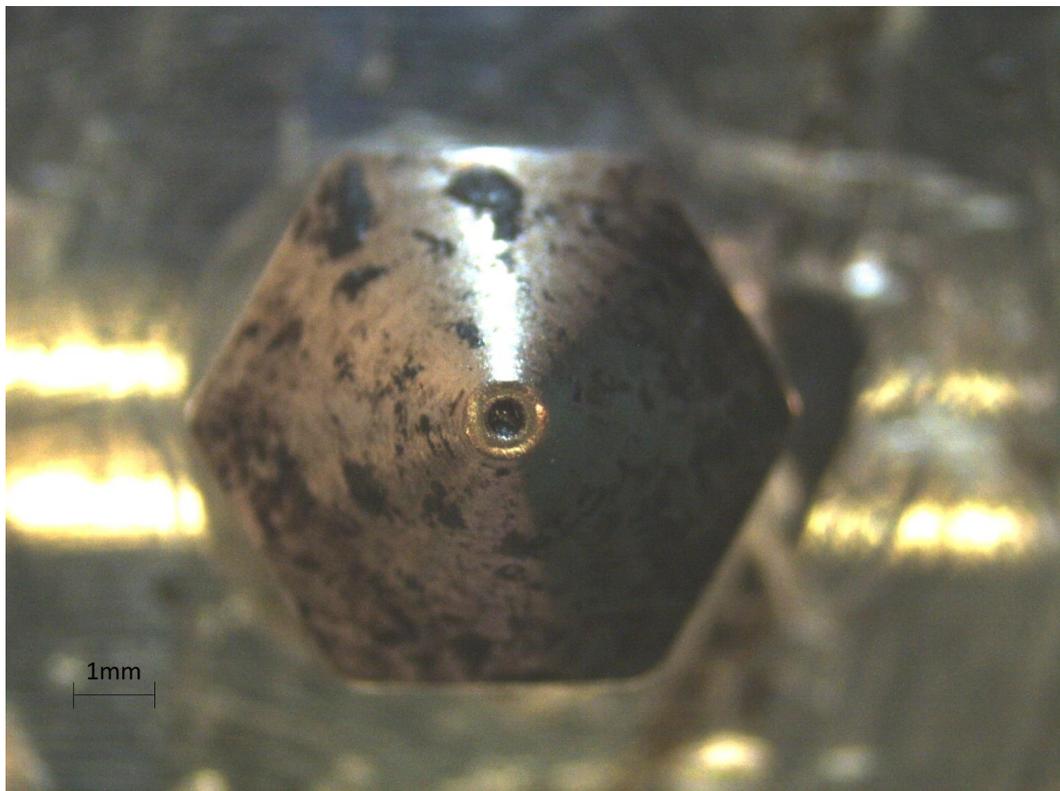


Figura 47 Vista dall'alto dopo 3660 minuti

Nelle figure 46 e 47 è possibile osservare il modo in cui la geometria dell'ugello sia cambiata, seppur in maniera lieve.

La variazione più importante, individuabile nella figura 48, come ci si aspettava, è stata osservata a fine vita utile dell'ugello. L'estensione del diametro del foro di uscita dell'utensile, misurata alla fine della sua vita utile, ha raggiunto gli 0,58 mm, che, rispetto al suo valore iniziale, ne ha denotato un aumento del 9%.

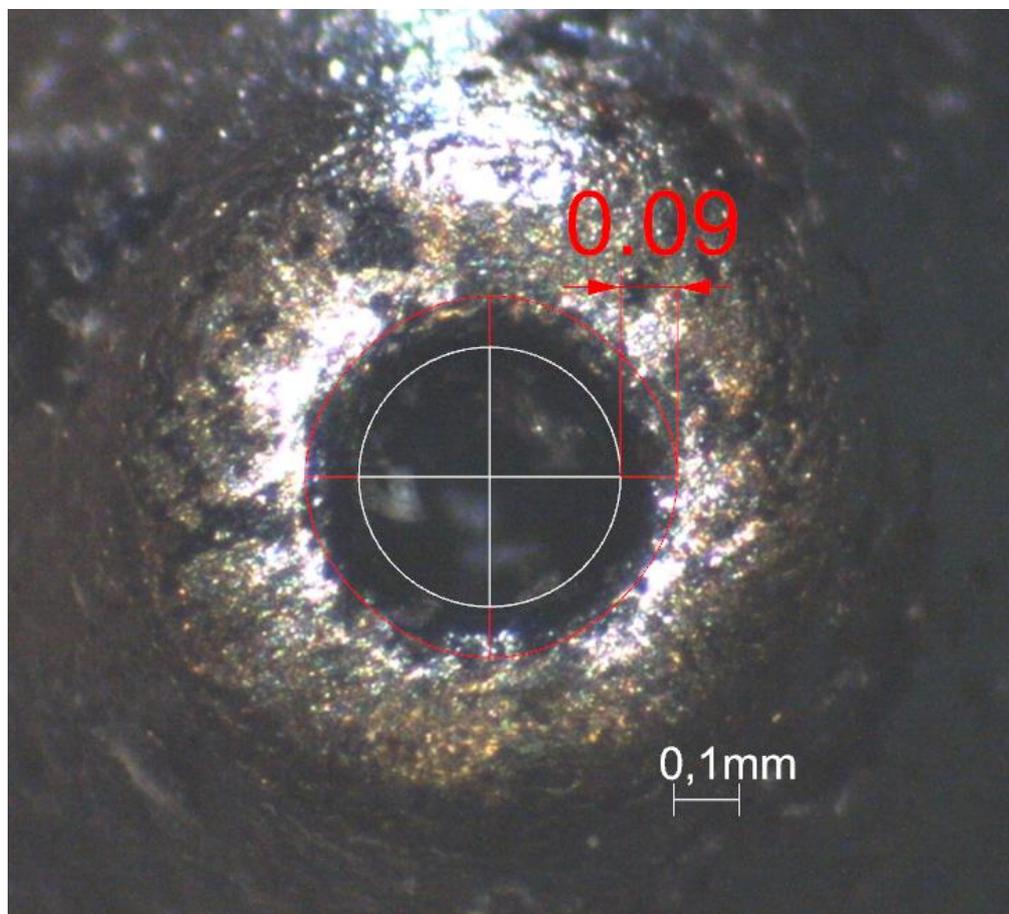


Figura 48 Variazione del raggio del foro di uscita a fine vita utile dell'utensile. In bianco il profilo circolare dell'ugello nuovo, in rosso il profilo del foro dopo un tempo di circa 6110 minuti

Di seguito verranno mostrati i confronti delle parti laterali effettuati tra le acquisizioni dell'ugello nuovo e dello stesso dopo 6110 minuti.

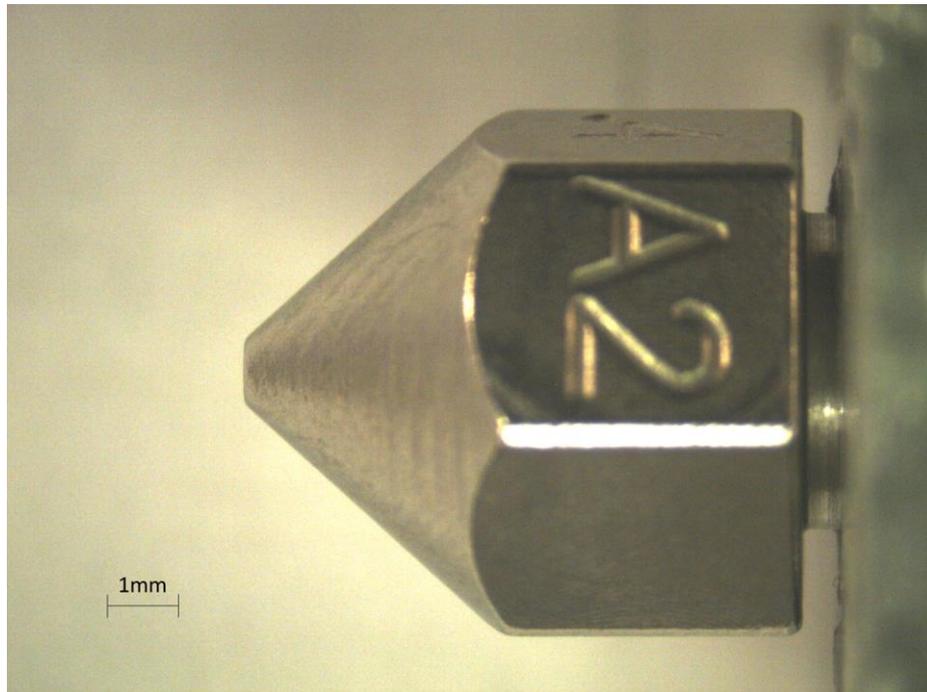


Figura 49 Lato 1 dell'ugello nuovo

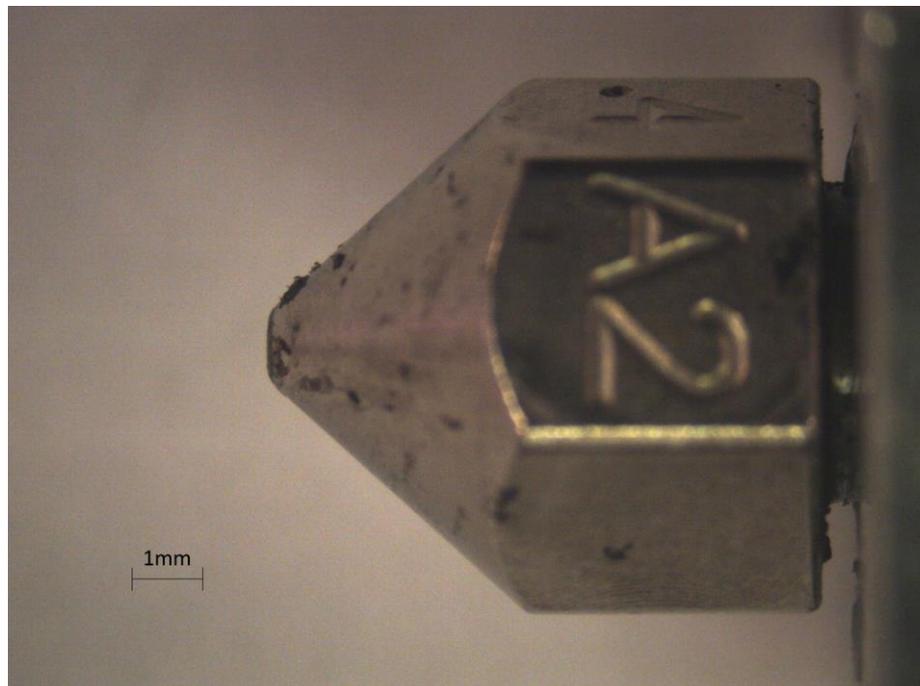


Figura 50 Lato 1 dell'ugello dopo 6110 minuti

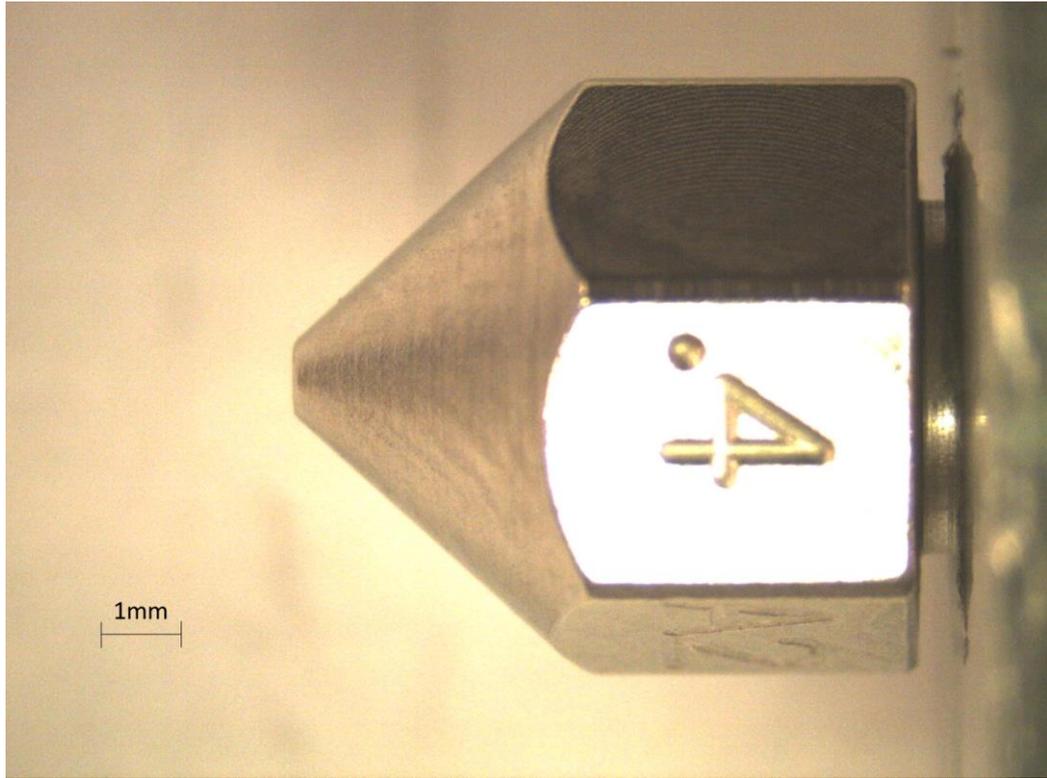


Figura 51 Lato 2 dell'ugello nuovo

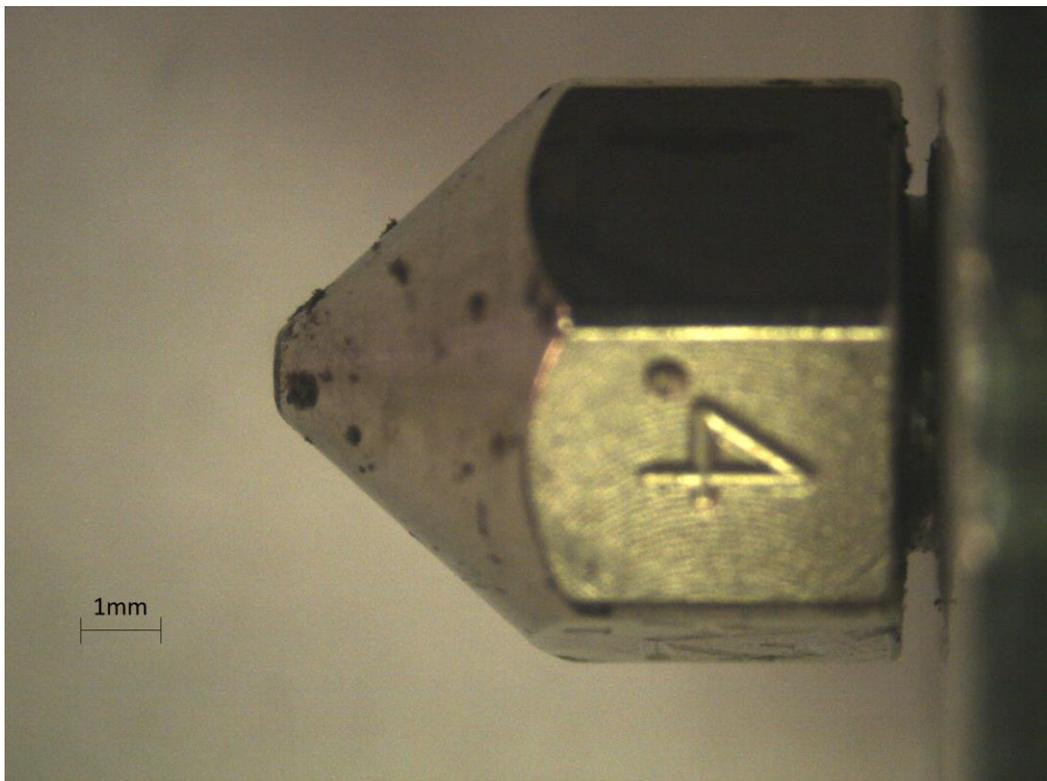


Figura 52 Lato 2 dell'ugello dopo 6110 minuti

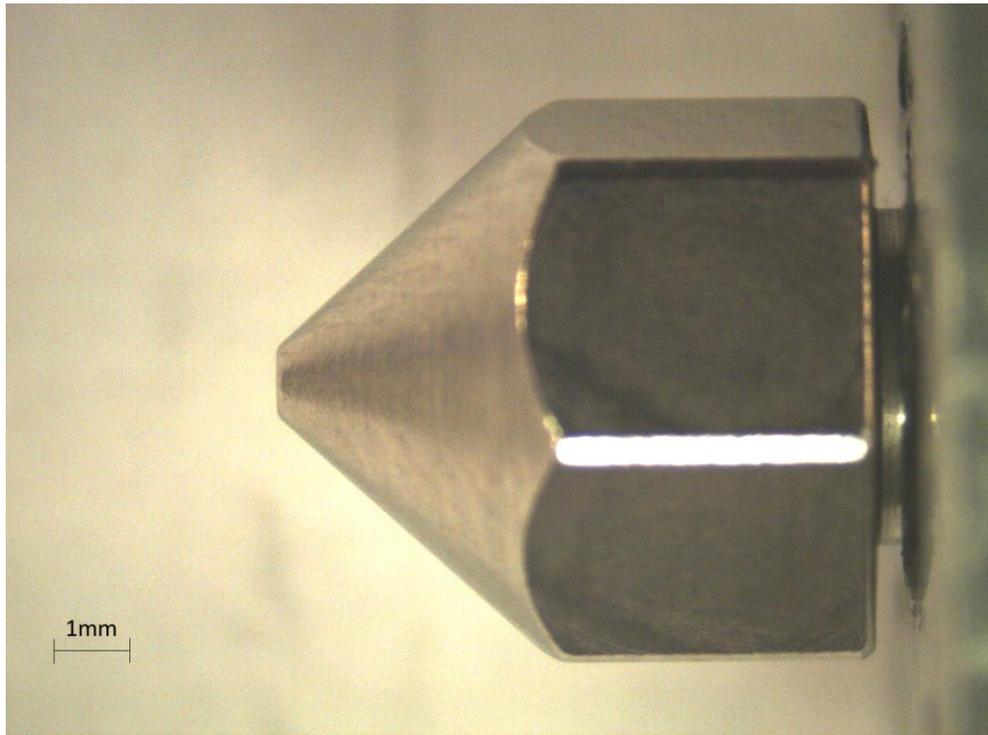


Figura 53 Lato 3 dell'ugello nuovo

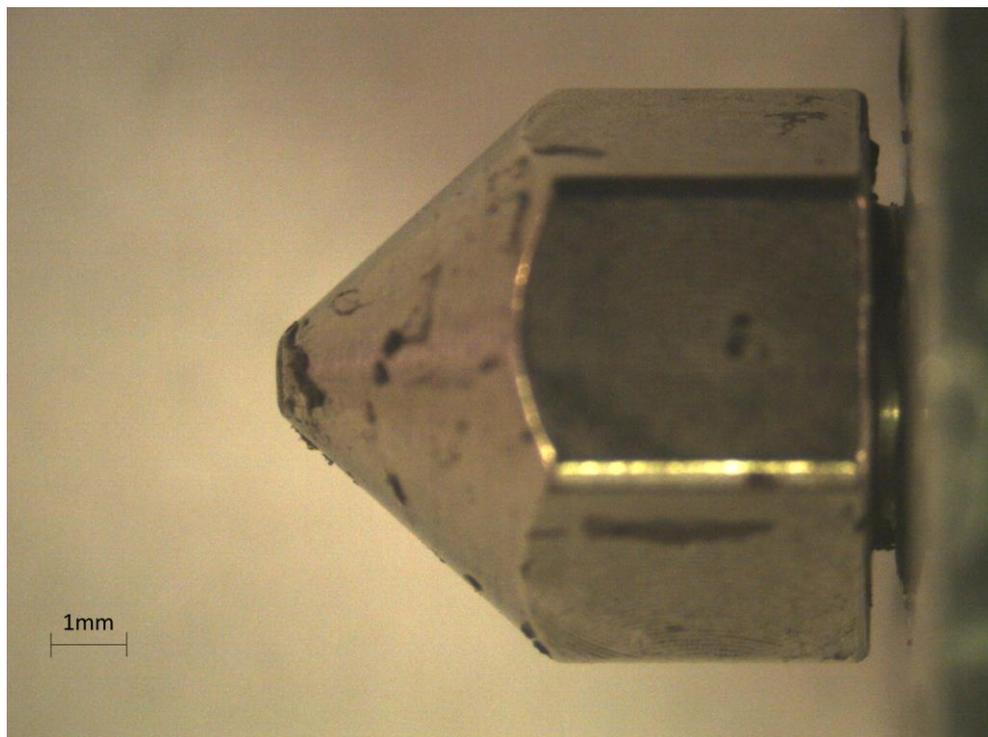


Figura 54 Lato 3 dell'ugello dopo 6110 minuti

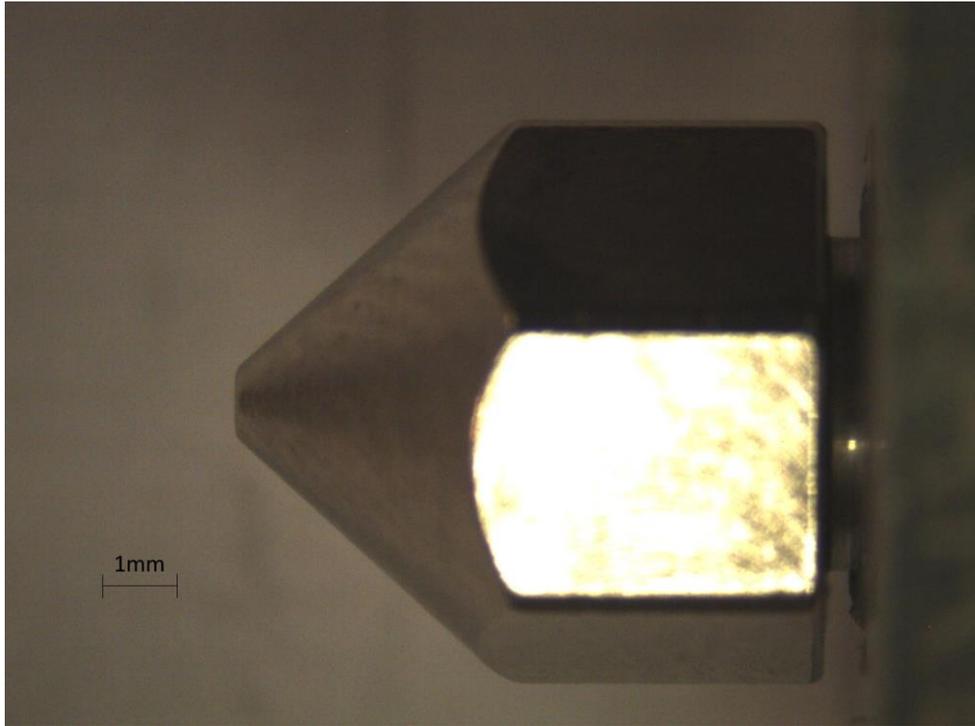


Figura 55 Lato 4 dell'ugello nuovo

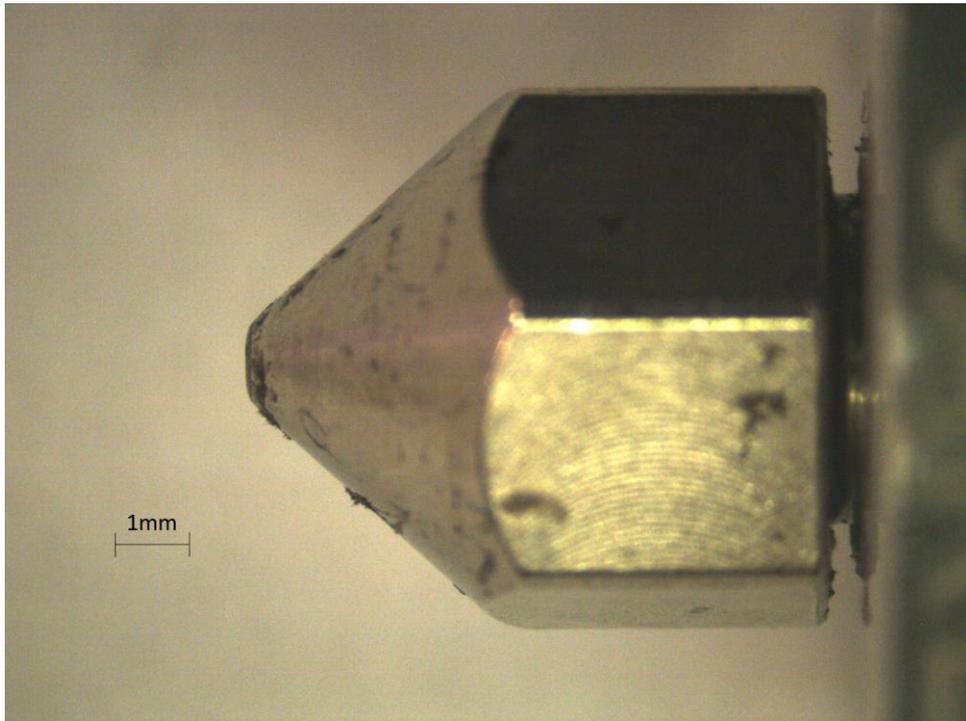


Figura 56 Lato 4 dell'ugello dopo 6110 minuti

Di seguito sono riportate le rappresentazioni dei confronti delle viste dall'alto dell'ugello nuovo e dopo 6110 minuti:

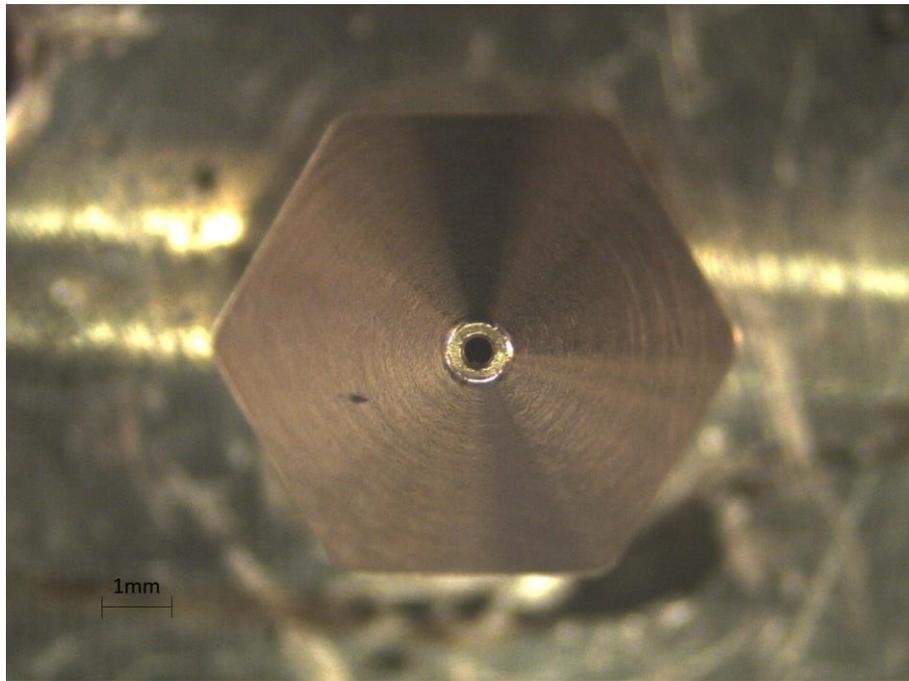


Figura 57 Vista dall'alto dell'ugello nuovo

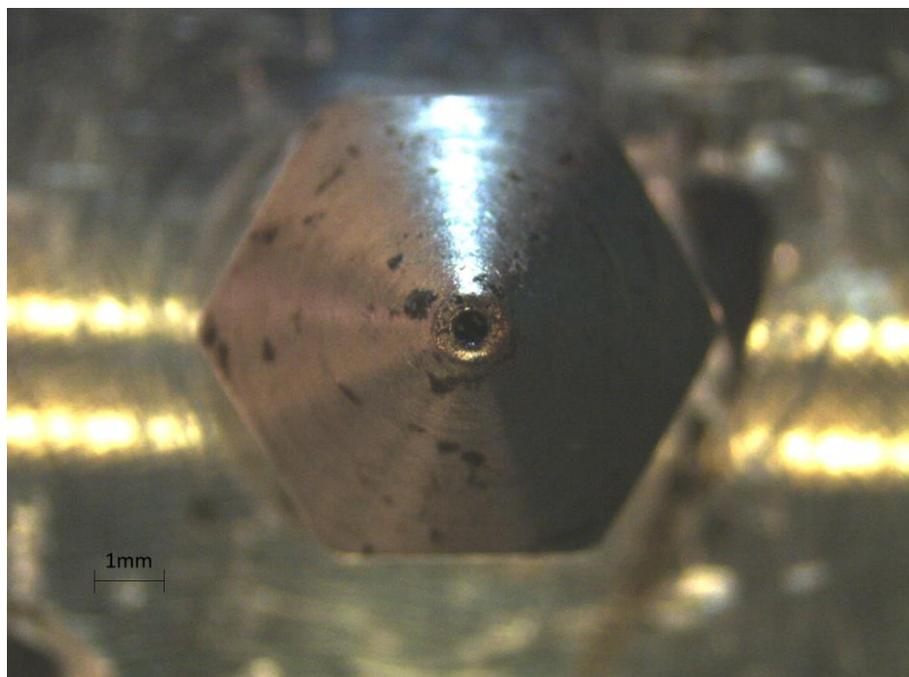


Figura 58 Vista dall'alto dell'ugello dopo 6110 minuti

4.2 Risultati delle prove di trazione

Dalle prove di trazione svolte sui provini stampati, sono emerse le seguenti caratteristiche:

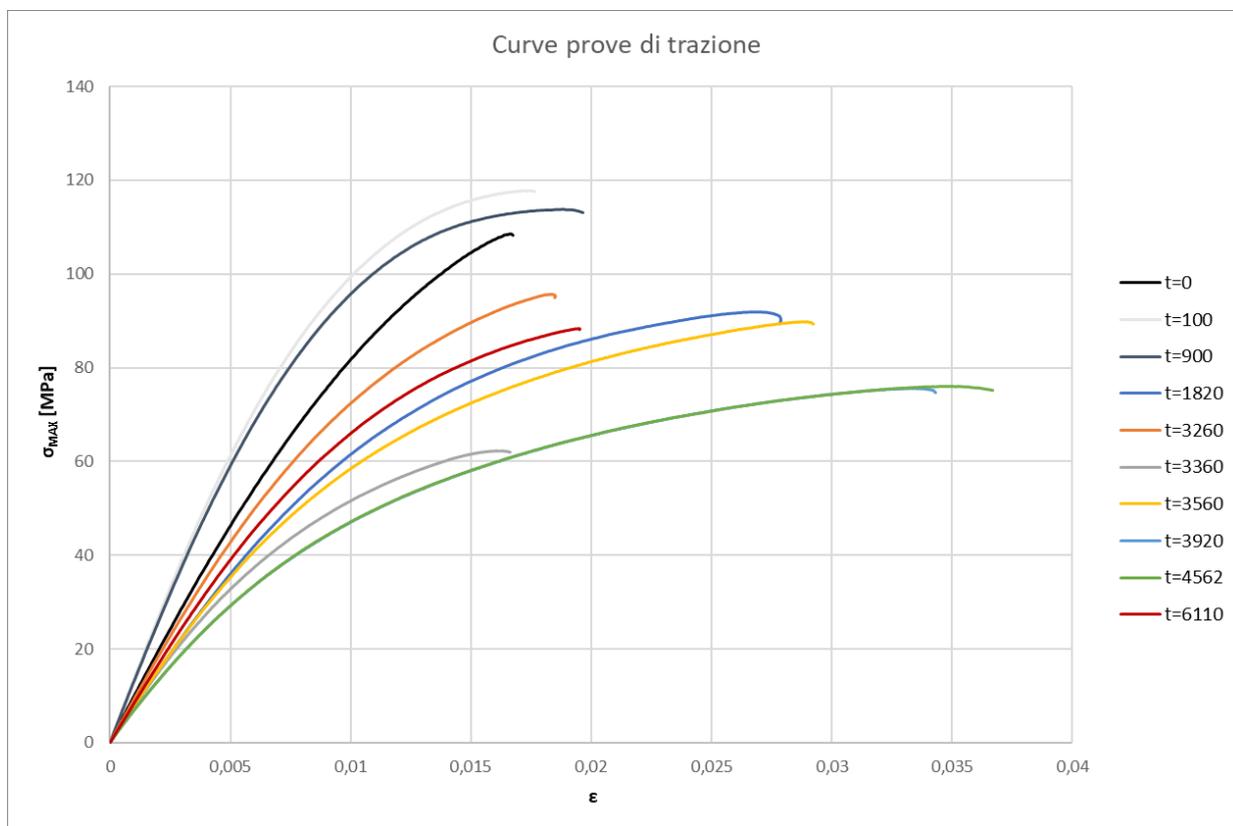


Figura 59 Grafico contenente le curve ottenute dalle prove di trazione esercitate sui provini di trazione stampati

È possibile osservare che, salvo in alcuni casi, in cui i risultati ottenuti hanno presentato dei trend non conformi a causa di alcuni malfunzionamenti della macchina (le curve anomale non sono state inserite), l'andamento di ciascuna curva, man mano che aumenta il tempo di vita dell'utensile, tende ad avere un valore massimo che diminuisce. Ciò è più evidente se si osservano le curve seguenti.

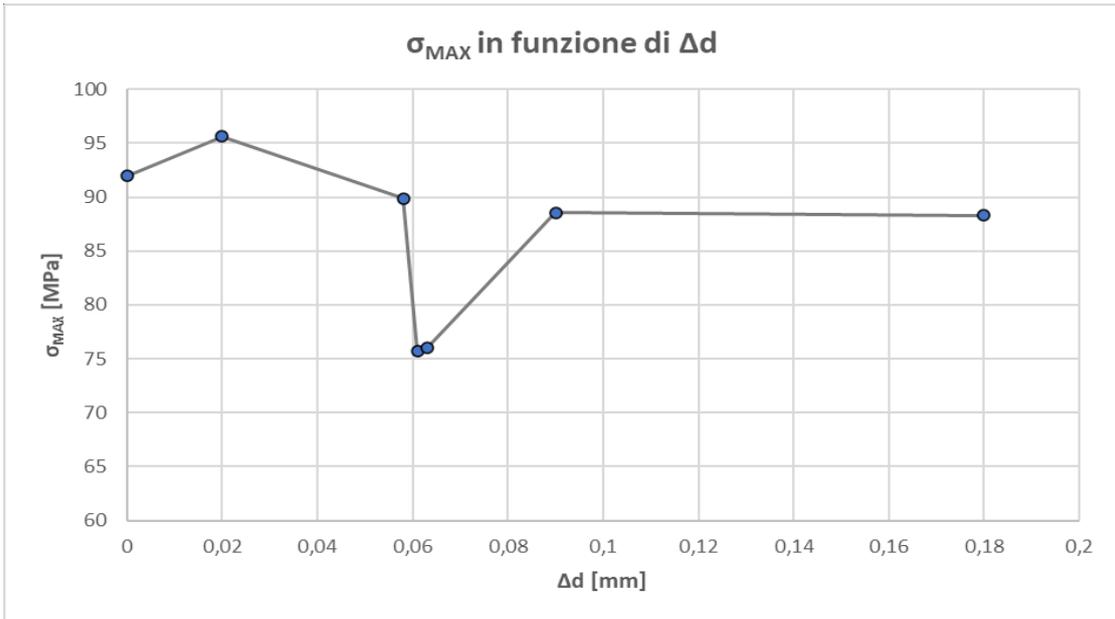


Figura 60 Grafico rappresentante la tensione massima, espressa in MPa, in funzione della variazione di diametro, espressa in mm

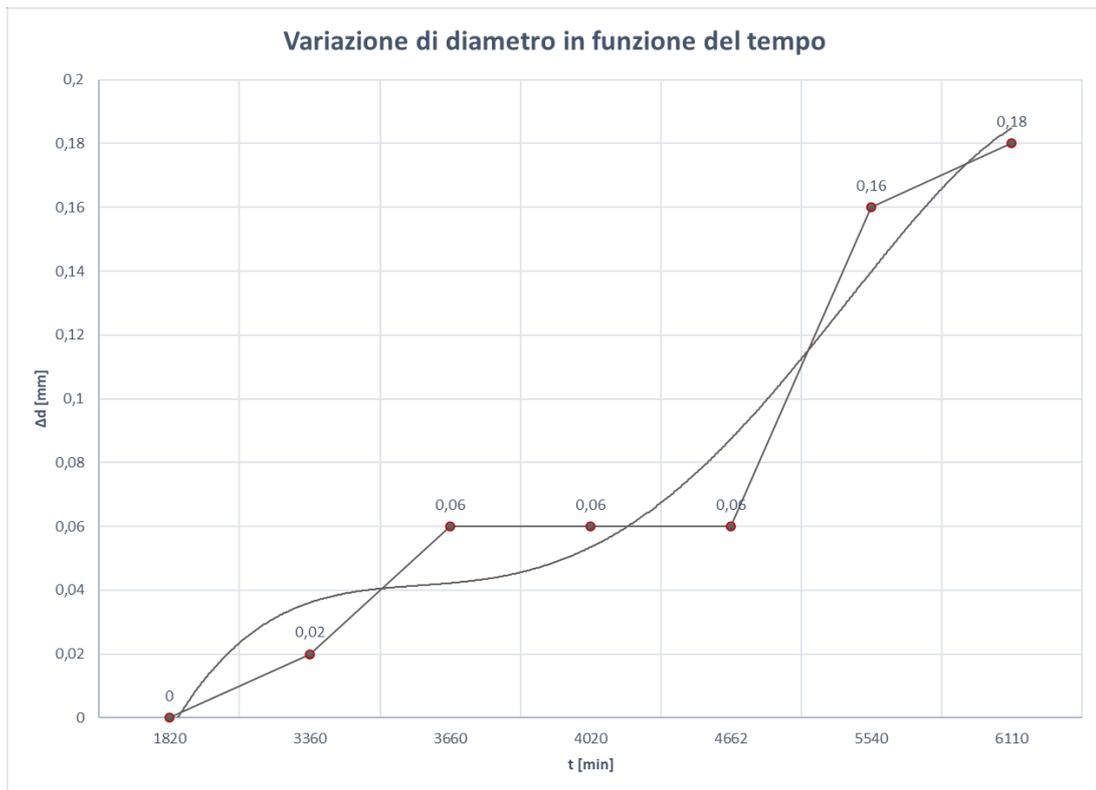


Figura 61 Grafico che esprime l'andamento della variazione di diametro, espressa in mm, in funzione del tempo di vita dell'utensile, espressa in minuti

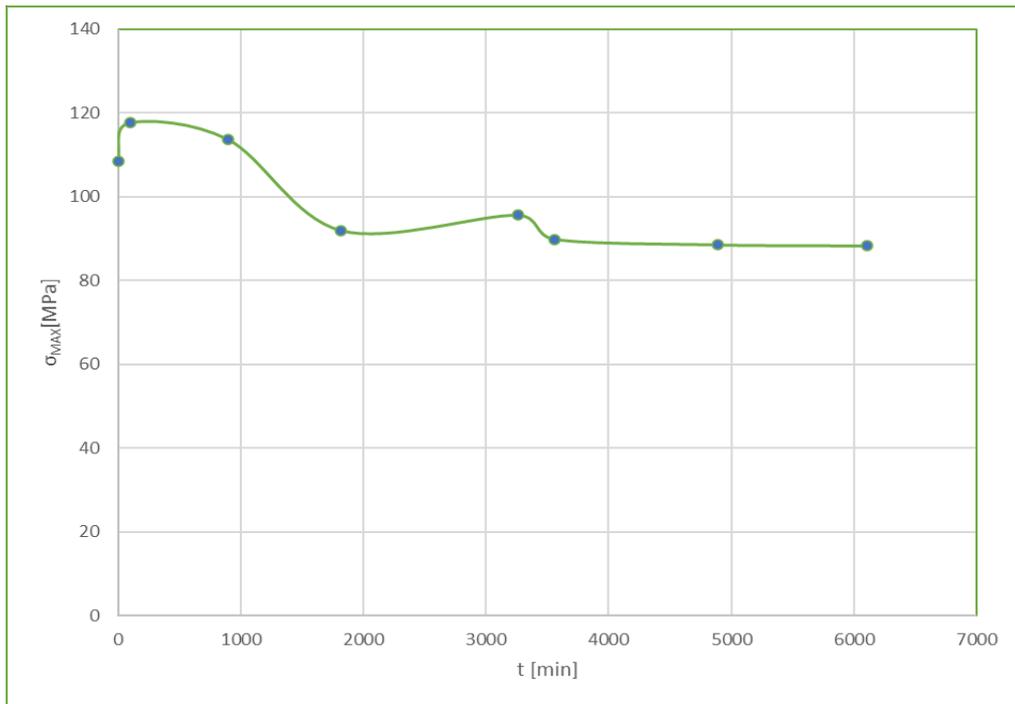


Figura 62 Andamento della tensione massima, espressa in Mpa, in funzione del tempo di lavoro dell'utensile, espresso in minuti

Attraverso questi grafici è possibile notare come, all'avanzare delle ore di lavoro dell'ugello, la resistenza meccanica diminuisca, ed aumentino anche notevolmente le dimensioni del diametro del foro di uscita dell'ugello in corrispondenza delle ultime ore della sua vita.

I provini fratturati sottoposti ad acquisizione allo stereomicroscopio hanno mostrato le seguenti particolarità.

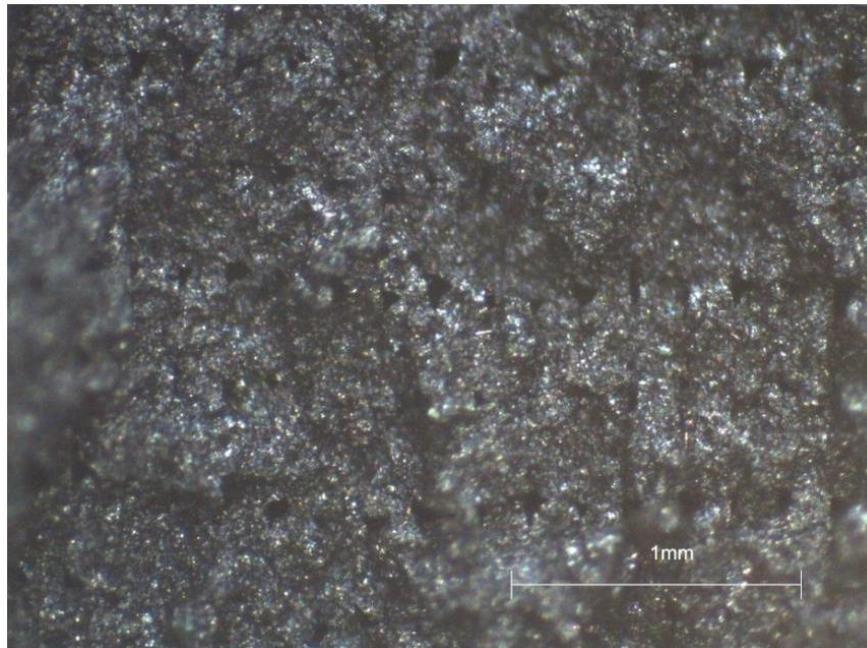


Figura 63 dettaglio sezione del provino stampato al tempo $t=0$ ottenuto con zoom 35x

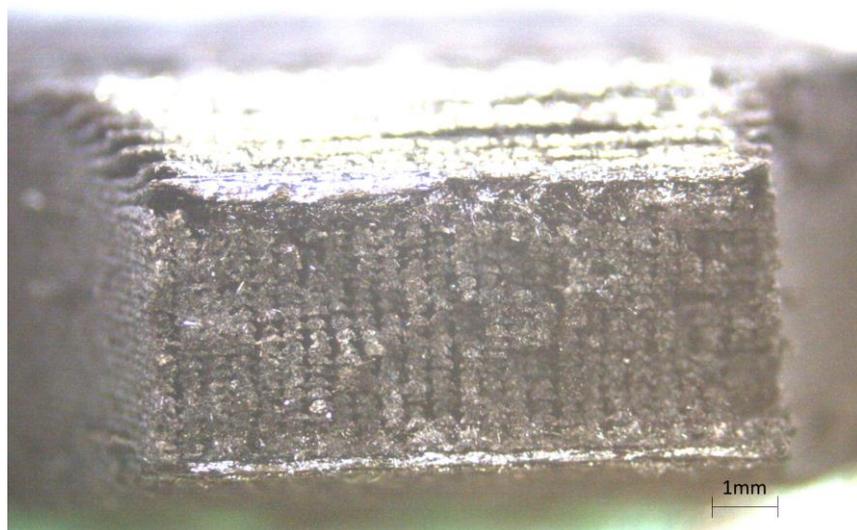


Figura 64 sezione del provino stampato dopo $t=3920$ minuti

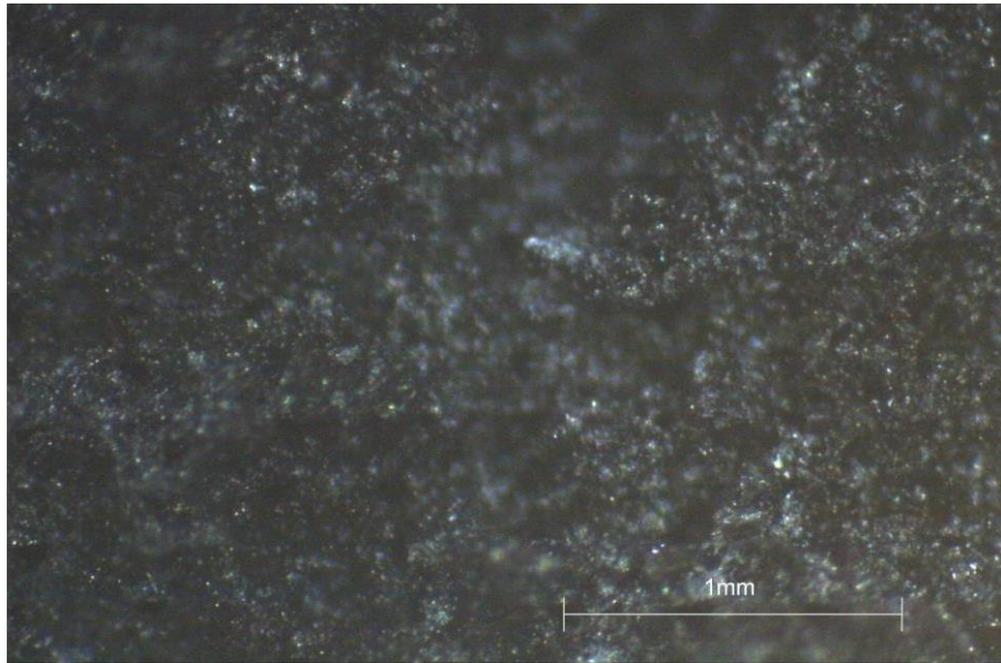


Figura 65 Ingrandimento 35x della sezione del provino stampato a $t=6010$ minuti

I fori, visibili nella figura 33, sono visibili, ma poco estesi. Diventano ancora più visibili nella figura 34, e diventano pressoché invisibili nella raffigurazione 35, quando ormai l'utensile ha raggiunto la fine della sua vita utile. Questo risultato si suppone sia dovuto al fatto che il diametro di uscita, raggiunta una dimensione sufficientemente grande (a causa dell'usura), favorisce una deposizione maggiore di materiale, definendo un riempimento dei vuoti (rappresentati dai fori) e quindi una diminuzione dell'estensione della sezione resistente del provino, evidenziata dalle misurazioni effettuate con il micrometro centesimale.

5. Conclusioni

Lo studio sistematico condotto su questo ugello, coinvolto nei processi di stampa 3D di componenti e provini di trazione in carbon PA, ed analizzato allo stereomicroscopio progressivamente nel tempo, man mano che le ore di lavoro dell'utensile hanno subito un incremento; effettuate le sovrapposizioni delle immagini ottenute tramite lo stereomicroscopio su Powerpoint e quantificate le differenze nella geometria dell'ugello usurato rispetto a quello nuovo tramite Rhinoceros; svolte le prove di trazione sui provini ottenuti ed analizzati i risultati su Excel; ha consentito di individuare i seguenti risultati:

- La geometria dell'ugello usurato influisce sulle proprietà meccaniche del prodotto stampato, come quantificato dal grafico in cui è espresso l'andamento delle tensioni in funzione del grado di usura dell'utensile (figura 60);
- L'usura nell'ugello definisce un'importante impennata quando questo raggiunge un tempo di lavoro cumulativo che si avvicina ai 5000 minuti;
- Contrariamente a quanto ci si poteva aspettare, l'ugello non ha mostrato, alla fine della sua vita utile, una diminuzione della sua altezza, ma ha presentato, come è possibile osservare nelle figure 49-56, l'arrotondamento dell'estremità terminale, denotando la formazione di un raccordo. Inoltre, la maggior parte del deterioramento si è manifestata internamente all'ugello;
- I vuoti osservati nelle acquisizioni delle sezioni dei provini di trazione, da visibili, al tempo di lavoro $t=0$, corrispondente all'ugello nuovo, diventano ancora più visibili verso i 4000 minuti di esercizio, e verso la fine della vita utile diventano pressoché assenti.

Si suggerisce di effettuare l'analisi del grado di usura di altri ugelli, compatibilmente con quella che è la stampa (per evidenziare meglio il legame con le proprietà meccaniche del prodotto estruso) di un numero maggiore di provini di trazione a parità di tempo di vita utile dell'utensile.

Ringraziamenti

Ringrazio i miei genitori, senza i quali non sarei mai riuscito ad arrivare dove sono, e la mia famiglia, che con pazienza mi ha sempre supportato e sopportato.

Ringrazio Luna, senza la quale non avrei mai concluso questo percorso, che con la sua presenza ha contribuito a rendere un po' più leggero e praticabile. La ringrazio per la fiducia che ha riposto nelle mie capacità, per la pazienza con la quale ha affrontato ogni mio singolo momento di insopportabile sconforto e frustrazione.

Ringrazio Susanna, Francesco Pio, Daniele, Anna, Giuseppe, Dennis e Luigi, per aver creduto in me sin dall'inizio, per avermi dato la forza di affrontare la vita un passo alla volta.

Ringrazio Simone, Giustino, Antonio, Giulio, Valerio e tutti i ragazzi che hanno condiviso con me questo percorso universitario, tra gioie, dolori e momenti di piacevole spensieratezza.

Ringrazio Luigi, Michele e Renato, con i quali ho condiviso la vita presso la casa dello studente. Sono stati, quelli vissuti insieme, dei momenti piacevoli, nonostante la difficoltà rappresentata dal contesto abitativo.

Ringrazio il mio relatore, il prof. Forcellese, per avermi dato l'opportunità di poter collaborare con il suo gruppo di ricerca.

Ringrazio la mia correlatrice, la prof. Simoncini, per avermi seguito nello svolgimento del tirocinio.

Ringrazio Tommaso, Serena e Iacopo, per avermi insegnato molte cose e, soprattutto, per la pazienza e la gentilezza con le quali, in questi due mesi di lavoro, hanno sopportato il sottoscritto.

Ringrazio chi, in un modo o nell'altro, ha sempre sostenuto le mie scelte e mi ha sempre incoraggiato ad andare avanti.

A chi non c'è più, che avrebbe voluto tanto assistere a questo momento, ma che il tempo ha deciso per loro che non sarebbe stato così, pongo un ringraziamento speciale. Da lassù mi guardano, e spero possano gioire, perché so che non mi hanno mai lasciato solo durante tutti questi anni, e mi hanno sempre sostenuto.

6. Riferimenti

- [1] **F. Gabrielli, R. Ippolito, F. Macari.** *Analisi e tecnologia delle lavorazioni meccaniche.* s.l. : McGraw-Hill, 2008.
- [2] **Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker.** *Additive Manufacturing Technologies.* s.l. : Springer, 2015.
- [3] *PLA composites: From production to properties.* **Murariu, Marius e Dubois, Philippe.** s.l. : Abraham J Domb, Robert Langer, Arijit Basu, dicembre 2016, *Advanced Drug Delivery Reviews*, Vol. 107, p. 17-46.
- [4] P. Hoier, A. Malakizadi, U. Klement, and P. Krajnik, “Characterization of abrasion- and dissolution-induced tool wear in machining,” *Wear*, vol. 426–427, 2019, doi: 10.1016/j.wear.2018.12.015.

