



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

ANALISI METALLOGRAFICA E DELLA RISPOSTA AL CREEP DI  
PROVINI IN ACCIAIO 17-4 PH PRODOTTI PER BOUND METAL  
DEPOSITION

METALLOGRAPHIC AND CREEP RESPONSE ANALYSIS OF  
17-4 PH STEEL SPECIMENS PRODUCED BY BOUND METAL  
DEPOSITION

Relatore:  
Prof.ssa **Eleonora Santecchia**

Tesi di Laurea di:  
**Mario Fucili**

# INDICE

---

<b>1. Introduzione .....</b>	<b>4</b>
<b>2. L'acciaio 17-4 PH .....</b>	<b>6</b>
2.1 Generalità sugli acciai.....	6
2.2 Gli acciai inossidabili.....	7
2.2.1 Cenni storici .....	7
2.2.2 Passivazione .....	8
2.2.3 Classificazione acciai inossidabili.....	8
2.3 Proprietà generali del 17-4 PH .....	9
2.4 Composizione chimica .....	9
2.5 Indurimento per precipitazione.....	9
2.6 Proprietà meccaniche .....	12
<b>3. Additive manufacturing .....</b>	<b>13</b>
3.1 Generalità e cenni storici.....	13
3.2 Il processo di additive manufacturing .....	13
3.3 Vantaggi e svantaggi dell'Additive Manufacturing.....	14
3.4 Tipologie di manifattura additiva .....	15
3.5 Bound Metal Deposition .....	20
3.5.1 Vantaggi e svantaggi del Bound Metal Deposition.....	21
<b>4. Procedura Sperimentale .....</b>	<b>22</b>
4.1 Preparazione del campione.....	22

4.2	Osservazione al microscopio ottico .....	25
4.3	Attacco chimico .....	26
<b>5.</b>	<b>Creep .....</b>	<b>28</b>
5.1	La curva di creep.....	29
5.2	Prove di creep sull'acciaio 17-4 PH.....	30
5.2.1	Prova di durezza Rockwell .....	30
5.2.2	Prova di microdurezza Vickers .....	31
<b>6.</b>	<b>Risultati e discussione .....</b>	<b>34</b>
6.1	Risultati creep .....	34
6.2	Calcolo delle durezza .....	35
6.3	Calcolo delle microdurezza .....	36
6.4	Caratterizzazione dei vuoti tramite ImageJ .....	37
<b>7.</b>	<b>Conclusioni .....</b>	<b>42</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>43</b>

# 1. Introduzione

Lo scopo di questo elaborato è quello di effettuare un'analisi metallografica, ossia uno studio che permetta di determinare l'arrangiamento geometrico dei grani e delle differenti fasi di un provino di acciaio inossidabile 17-4 PH (AISI 630), ottenuto tramite Bound Metal Deposition.

L'acciaio in questione è un acciaio inossidabile, quindi caratterizzato da una buona resistenza alle ossidazioni<sup>1</sup> ed alle corrosioni<sup>2</sup>. Questa resistenza viene conferita dalla presenza del cromo che crea una patina superficiale molto densa e sottile che protegge l'acciaio dall'azione dell'ossigeno e di altri agenti chimici. Tale processo è detto passivazione e può essere sia naturale che indotto artificialmente.

L'elaborato si divide in una parte iniziale in cui si fornisce una panoramica generale sugli acciai, ed in particolare su quelli inossidabili. Si introduce poi l'acciaio che verrà analizzato, descrivendone la composizione, le proprietà chimiche, fisiche e meccaniche e presentando i vari trattamenti termici a cui può essere sottoposto.

In seguito viene fornito un quadro generale riguardante l'Additive Manufacturing, tecnologia che consente di realizzare parti, componenti o prodotti finiti attraverso l'uso di stampanti 3D che lavorano utilizzando la tecnologia additiva. In particolare viene trattata la nascita e lo sviluppo di tale tecnologia, per poi passare alle varie tipologie di produzione additiva, con un focus sulla Bound Metal Deposition.

Vengono poi spiegati tutti i passaggi necessari per la preparazione del provino, partendo dal taglio fino alla lucidatura, per poi passare all'osservazione del campione prima che venga effettuato un attacco chimico, con lo scopo di migliorare i contrasti di luce, evidenziando così i contorni dei vuoti interni presenti.

Si procede poi con una panoramica riguardante il fenomeno del creep, focalizzando l'attenzione in particolar modo sulla prova di microdurezza Vickers e di durezza Rockwell che sono state eseguite sul provino.

---

<sup>1</sup> L'ossidazione è un processo nel quale ad un elemento chimico si sottrae elettroni, con un conseguente aumento del numero di ossidazione.

<sup>2</sup> La corrosione è un processo naturale e irreversibile che comporta la lenta e continua consumazione di un materiale.

La parte finale dell'elaborato è dedicata all'analisi dei risultati ottenuti, con particolare attenzione alla percentuale dei vuoti presenti all'interno delle immagini e sui valori ottenuti dalle prove di durezza svolte.

## 2. L'acciaio 17-4 PH

### 2.1 Generalità sugli acciai

L'acciaio è una lega composta da due elementi principali: il ferro (FE), che è un elemento metallico, ed il carbonio (C), che invece è l'elemento legante. Quest'ultimo è presente in percentuali che possono variare, ma che non superano mai il 2,1%, poiché in tal caso parleremmo di ghisa.

I due elementi sopra citati non sono gli unici presenti nell'acciaio, infatti è possibile trovarne altri come manganese, fosforo, zolfo, silicio ed in quantità minori azoto, alluminio ed ossigeno. Le quantità con cui tali elementi si trovano nell'acciaio ne vanno a variare le proprietà principali, quali durezza, resistenza alla corrosione e resistenza alla trazione.

Esistono molteplici tipologie di acciai, le cui denominazioni e composizioni sono definite da apposite norme: le EN<sup>3</sup> in Europa, nel continente americano l'ASTM<sup>4</sup>, in collaborazione con l'AISI<sup>5</sup> ed internazionalmente le ISO<sup>6</sup>.

Secondo l'AISI esistono 4 principali categorie per la classificazione degli acciai:

- Acciai al carbonio;
- Acciai legati;
- Acciai per utensili;
- Acciai inox.

I primi costituiscono la tipologia più diffusa e presentano caratteristiche tecniche che li rendono molto resistenti, malleabili e piuttosto lavorabili, ma anche altamente soggetti alla corrosione e sensibili alle alte e basse temperature.

In base al tasso di carbonio contenuto nella lega si dividono in [1]:

- acciai extra-dolci (bassissimo contenuto di C)
- acciai dolci (basso contenuto di C)
- acciai semiduri (medio contenuto di C)
- acciai duri (elevato contenuto di C)
- acciai extra-duri (elevatissimo contenuto di C, non superiore a 2,1%)

---

<sup>3</sup> Le EN (European Norms) sono norme tecniche emesse dal CEN (European Committee for Standardization).

<sup>4</sup> L'ASTM (American Society Testing Materials) è un ente di normazione statunitense.

<sup>5</sup> L'AISI (American Iron and Steel Institute) è un'associazione di produttori d'acciaio.

<sup>6</sup> ISO (International Standard Institute) è la più importante organizzazione per la definizione di norme tecniche.

Gli acciai legati, al contrario di quelli al carbonio, contengono elementi leganti come manganese, silicio, cromo, alluminio e nichel, con l'obiettivo di conferire determinate proprietà chimico-fisiche. Per convenzione vengono divisi in [2]:

- Acciai bassolegati, in cui nessun elemento è al di sopra del 5%
- Acciai altolegati, in cui almeno un elemento è al di sopra del 5%

Come i precedenti, anche gli acciai per utensili contengono elementi leganti, in particolare tungsteno, molibdeno, cobalto e vanadio. Questi, presenti in quantità variabili, conferiscono all'acciaio un'ottima resistenza al calore ed un'elevata durabilità. Si prestano bene a sopportare lavorazioni come il taglio e la perforazione e possono essere classificati in base alla forma e alle applicazioni correlate.

Ultimi, ma non per importanza, abbiamo gli acciai inossidabili o anche detti inox.

## 2.2 Gli acciai inossidabili

### 2.2.1 Cenni storici

Gli acciai inossidabili nacquero attorno al 1872 per opera degli inglesi Woods e Clark, i quali aggiungendo una parte di cromo nella classica lega ferro-carbonio, scoprirono che questa acquistava una notevole resistenza alla corrosione e all'ossidazione.

Tuttavia la loro industrializzazione avvenne nei primi anni del Novecento, quando Harry Brearley scoprì che un acciaio con una percentuale di cromo pari al 13-14% e un tenore di carbonio relativamente alto non si arrugginiva<sup>7</sup> se soggetto all'azione dell'aria.

Con il proseguire degli anni si ebbero vari progressi della metallurgia<sup>8</sup> che permisero di perfezionare e ampliare le loro applicazioni. [3]

---

<sup>7</sup> L'arrugginimento è quel processo per il quale si ha un deterioramento di materiali metallici, in particolare il ferro, causato dalla formazione della così detta ruggine.

<sup>8</sup> La metallurgia è la disciplina tecnica che tratta lo studio dei metalli.

## 2.2.2 Passivazione

La passivazione è quel fenomeno di natura elettrochimica<sup>9</sup> che impedisce la reazione di corrosione nei metalli.

Consiste nella formazione di un sottile film<sup>10</sup> di ossido di cromo che protegge il materiale dall'azione ossidante dell'ossigeno e di altri agenti chimici, aumentandone la durabilità.

Tale processo può avvenire spontaneamente o, con lo scopo di ottenere diversi gradi di inossidabilità, può essere indotto. In quest'ultimo caso il processo avviene pulendo il metallo superficialmente, eseguendo il così detto decapaggio, che può essere meccanico, con l'utilizzo di sabbie silicee o sfere di vetro, o chimico.

Successivamente viene eseguita la passivazione, che può essere eseguita inserendo il metallo in bagni acidi, ottenendo così una passivazione in acido nitrico o citrico, oppure spruzzando determinati composti sulla superficie del materiale tramite sistemi a pioggia ad alta o bassa pressione.

## 2.2.3 Classificazione acciai inossidabili

Per questa categoria di acciai la classificazione più usata è la AISI, che prevede una sigla di tre cifre in cui la prima individua<sup>11</sup> una delle diverse tipologie di acciaio inossidabile [2] :

- Ferritici: aventi tenore di cromo tra l'11% e il 30% e di carbonio minore del 12%. Hanno una buona resistenza meccanica, moderata resistenza alla corrosione e sono i più economici.
- Austenitici: hanno un tenore di carbonio inferiore allo 0,1%, cromo compreso tra il 18% e il 25% e nichel dal 6% al 22%. La bassa percentuale di carbonio li rende molto resistenti alla corrosione. Possono essere facilmente lavorati e saldati anche se non possono essere trattati termicamente, a meno della solubilizzazione del carbonio.
- Martensitici: contenenti cromo dal 12% al 17% e carbonio dallo 0.1% al 1%. Non hanno un'elevatissima resistenza alla corrosione ma quest'ultima, grazie all'aggiunta di elementi come manganese, silicio e molibdeno, può essere aumentata. Ha discrete proprietà meccaniche che possono essere implementate tramite un trattamento termico di tempra<sup>12</sup>.

---

<sup>9</sup> L'elettrochimica è quella parte della chimica che studia i processi di trasformazione dell'energia chimica in energia elettrica e viceversa.

<sup>10</sup> Con il termine film si indica una pellicola sottile.

<sup>11</sup> La seconda coppia di cifre è necessaria per distinguere un tipo di materiale da un altro.

<sup>12</sup> La tempra consiste in un riscaldamento del materiale seguito da un brusco raffreddamento, con l'obiettivo di aumentarne le proprietà meccaniche.



- Duplex (austeno-ferritici): hanno un contenuto di cromo che va dal 18% al 30%, nichel dal 3.5% all'8%, molibdeno tra lo 0.1% e il 4.5% ed un tenore di carbonio minore dello 0.03%.
- Induriti per precipitazione: anche detti acciai PH (Precipitation Hardening), contengono cromo con tenore compreso tra il 10% ed il 30%, più elementi come nichel e molibdeno. Hanno elevate resistenze meccaniche e una resistenza alla corrosione paragonabile agli austenitici.

### 2.3 Proprietà generali del 17-4 PH

L'acciaio 17-4 PH, anche conosciuto come AISI 630, è un acciaio inossidabile martensitico indurente per precipitazione, come indicato dalla sigla PH, che offre un'elevata durezza e lavorabilità. Ha inoltre un'elevata resistenza meccanica, che si conserva fino a circa 310°C, combinata con un'eccellente resistenza alla corrosione in atmosfera industriale e marina, in acqua e in presenza di sostanze chimiche ossidanti.

Grazie alle sue notevoli proprietà trova applicazione in vari settori quali l'industria petrolchimica, metallurgica e aerospaziale, in applicazioni marine e nella realizzazione di armi da fuoco e missili. [4][5]

### 2.4 Composizione chimica

La sigla dell'acciaio suggerisce la sua composizione chimica, che è appunto costituita da una concentrazione di cromo del 17% e di nichel del 4%.

Oltre a questi possiamo riscontrare la presenza di altri elementi, riportati nella tabella 1.

	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Cu%	Nb+Ta
Min						15,0	3,0	3,0	0,15
Max	0,07	1,00	1,00	0,040	0,030	17,5	5,0	5,0	0,45

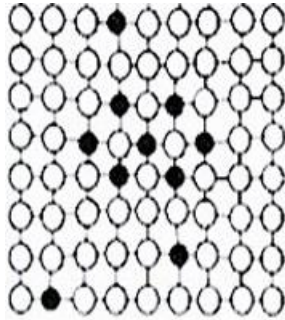
**Tabella 1** Composizione chimica dell'acciaio 17-4 PH [4].

### 2.5 Indurimento per precipitazione

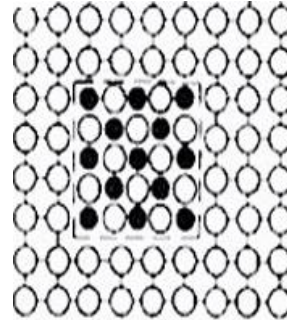
L'indurimento per precipitazione è un insieme di trattamenti volti all'aumento delle proprietà meccaniche, in particolare della durezza, di un metallo.

Tale processo si basa sull'aumento di difficoltà nel moto delle dislocazioni dovuto all'inserimento di particelle, dette precipitati, nei grani.

I precipitati possono essere di natura coerente (figura 1), in tal caso avranno composizione stechiometrica<sup>13</sup> diversa dalla matrice ma stessa struttura cristallina, o incoerente (figura 2), con composizione stechiometrica uguale alla matrice ma con diversa struttura cristallina.



**Figura 1** Precipitazione coerente.



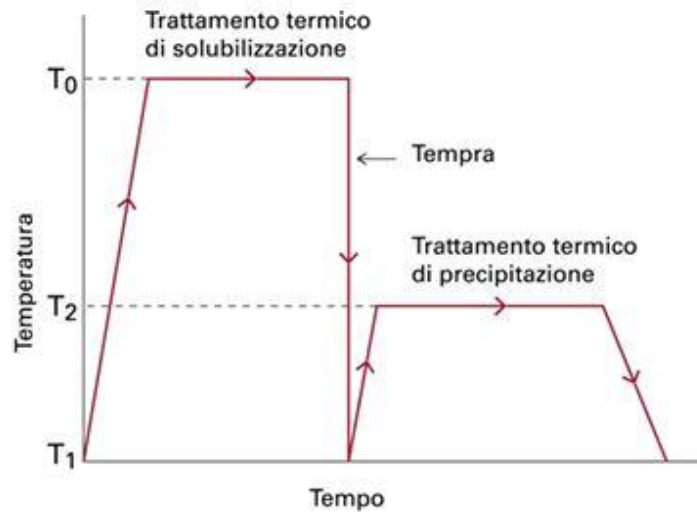
**Figura 2** Precipitazione incoerente.

Il processo avviene nelle seguenti tre fasi (figura 3) [6]:

- Solubilizzazione: il metallo viene riscaldato per portare in soluzione gli elementi indurenti al fine di ottenere una completa omogeneizzazione della matrice.
- Tempra: consiste in un raffreddamento rapido per mantenere in soluzione gli elementi indurenti disciolti ad alte temperature.
- Invecchiamento: consiste in un riscaldamento fino ad una temperatura compresa tra quella ambiente e quella di solubilizzazione. Dopodiché il metallo viene mantenuto per un determinato intervallo di tempo a tale temperatura, favorendo la formazione dei precipitati. Nell'ultima fase si ha un raffreddamento fino a temperatura ambiente, grazie al quale si blocca il movimento delle dislocazioni, rendendo più duro il materiale. La temperatura e il tempo di permanenza alla temperatura stabilita condizionano così la quantità e le dimensioni delle precipitazioni che si vanno a formare, influenzando di conseguenza le proprietà meccaniche del metallo.

---

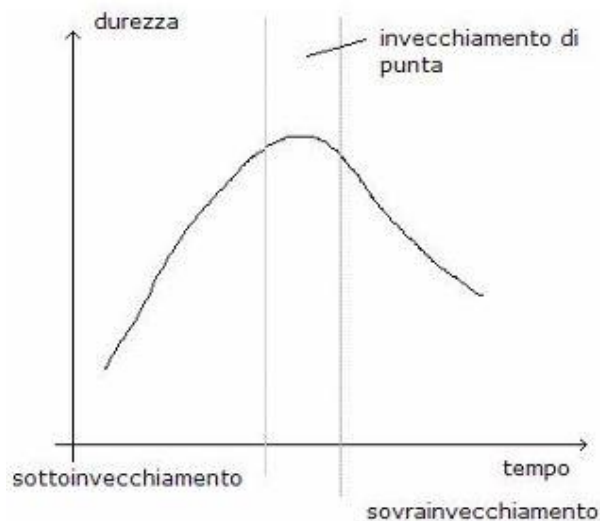
<sup>13</sup> La stechiometria è la parte della chimica che studia i rapporti di combinazione tra gli elementi che formano un composto o tra le sostanze che partecipano a una reazione chimica.



**Figura 3** Fasi dell'indurimento per precipitazione [6].

Grazie ad un grafico durezza-tempo (figura 4) è possibile individuare un intervallo di tempo ottimale nel quale mantenere a temperatura costante il metallo affinché si abbia un massimo rinforzo.

Nel caso in cui l'invecchiamento abbia una durata troppo breve si avrà il cosiddetto "sottoinvecchiamento", caratterizzato da precipitati troppo piccoli che non riescono a bloccare il movimento delle dislocazioni. Mentre, se il processo avviene troppo a lungo, si avrà un "sovrainvecchiamento" in cui i precipitati saranno di dimensioni eccessive e a distanze reciproche elevate, tali da non interagire con le dislocazioni.



**Figura 4** Andamento qualitativo della durezza durante l'invecchiamento [6].

## 2.6 Proprietà meccaniche

Nella tabella 2 sono raffigurate alcune proprietà dell'acciaio 17-4 PH.

Condizione	Carico di rottura [MPa]	Carico di snervamento [MPa]	Allungamento % (sezione 50mm)	Durezza HRC	Durezza HB
A	1105	1000	15	38	363
H900	1310	1170	10	40	388
H925	1170	1070	10	38	375
H1025	1070	1000	12	35	331
H1075	1000	860	13	32	311
H1100	965	795	14	31	302
H1150	930	725	16	28	277
H1150M	795	520	18	24	255
H1150D	860	725	16	24	255

**Tabella 2** Proprietà meccaniche statiche dell'acciaio 17-4 PH al variare dei trattamenti termici di invecchiamento [4].

Queste si riferiscono a diversi trattamenti eseguiti sull'acciaio.

Dai dati riportati notiamo che le migliori condizioni di resistenza meccanica e durezza si ottengono con un trattamento termico H900, ossia un invecchiamento eseguito a 900°F<sup>14</sup> per circa un'ora.

---

<sup>14</sup> Con °F si indicano i gradi Fahrenheit. 900°F corrispondono a 482,222 °C.

## 3. Additive manufacturing

### 3.1 Generalità e cenni storici

L'additive manufacturing (AM) comprende una vasta gamma di tecnologie che permettono di ottenere, partendo da dei modelli virtuali 3D, componenti fisici che vengono costruiti strato su strato fino al loro completamento.

A differenza della produzione sottrattiva, dove si parte da un pezzo grezzo che viene lavorato per asportazione di truciolo fino all'ottenimento della parte desiderata, con questa tecnologia il componente viene creato uno strato alla volta, stampando ogni strato sopra al precedente.

In base alla tecnologia utilizzata, lo spessore dello strato di materiale che viene depositato varia da pochi micron fino a circa 0,25 mm.

I primissimi concetti riguardanti tale tecnologia risalgono alla fine del diciannovesimo secolo, con l'introduzione di mappe topografiche basate su strati, come rappresentazioni 3D del terreno.

Tuttavia la produzione additiva come la conosciamo oggi ha avuto origine intorno al 1986, con l'ingegnere Charles W. Hull, il quale brevettò la tecnica della stereolitografia<sup>15</sup>.

Negli anni l'AM ha avuto un'importante crescita che l'ha portata ad avere un ampio campo di applicazione. Infatti grazie alle varie tecnologie esistenti ed alla possibilità di utilizzare vari materiali, trova applicazione in campo edile, meccanico, aerospaziale, medico e biomedico [7].

### 3.2 Il processo di additive manufacturing

Tutta la produzione additiva inizia con la creazione di un modello CAD<sup>16</sup> 3D virtuale che deve essere sotto forma di un volume completamente chiuso. La mancanza di una delle facce del modello rappresenta una superficie infinitamente sottile, che non può essere stampata.

A questo punto il file Cad viene convertito in un formato leggibile dalla macchina AM. Ad oggi il formato più utilizzato è l'STL<sup>17</sup>, che converte il file CAD in un file triangolato.

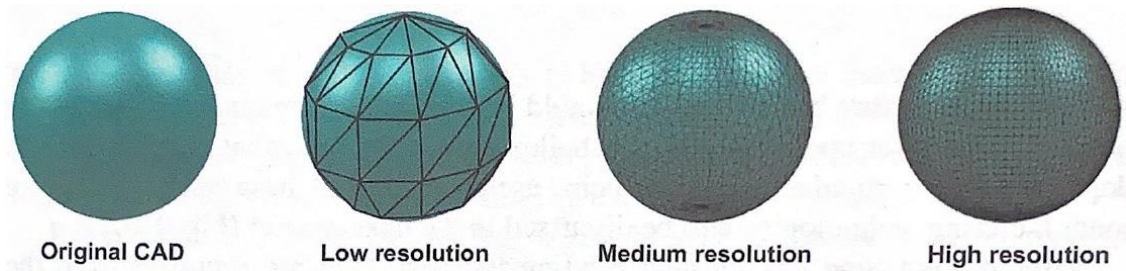
Maggiore è la risoluzione del file STL, più triangoli contiene, quindi maggiore è la qualità del modello (figura 5).

---

<sup>15</sup> La stereolitografia è una tecnica che permette di ottenere componenti tridimensionali, partendo da dati digitali elaborati da software CAD, utilizzando resine fotosensibili solidificate per mezzo di raggi UV.

<sup>16</sup> CAD, acronimo di Computer-Aided Design.

<sup>17</sup> STL, acronimo di Standard Triangle Language.



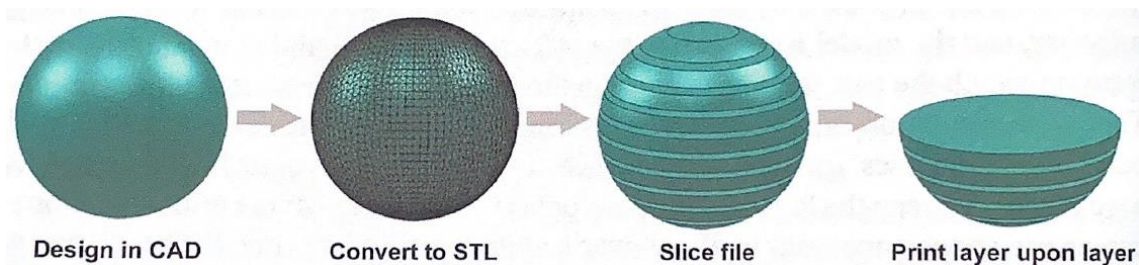
**Figura 5** Esempi di risoluzione di un file STL [7].

Ultimamente sono stati proposti nuovi formati oltre all' STL, come l' AMF<sup>18</sup> o il 3MF<sup>19</sup>, che consentono di aggiungere più informazioni al file, inclusi colore e materiale, e consentono l'uso di triangoli curvi per migliorare la qualità del modello.

A questo punto il file STL viene aperto nel software della macchina AM che lo taglia in strati sottili e vengono impostati alcuni parametri come la risoluzione della stampa, la velocità ed il materiale utilizzato.

Una volta inviate tutte le istruzioni di costruzione, la macchina inizia la creazione del componente strato dopo strato fino al suo completamento.

Post-produzione viene effettuata una pulizia della parte realizzata, per rimuovere polveri e la resina rimasta [7].



**Figura 6** Processo di Additive Manufacturing [7].

### 3.3 Vantaggi e svantaggi dell'Additive Manufacturing

La tecnologia AM consente di ottenere parti con profili complessi che non sono realizzabili con la produzione sottrattiva o con altri tradizionali processi. Consente anche di avere un'importante libertà di design, ma bisogna tenere in considerazione che all'aumentare della complessità del componente si ha anche un aumento dei costi.

<sup>18</sup> AMF, acronimo di Additive Manufacturing File Format.

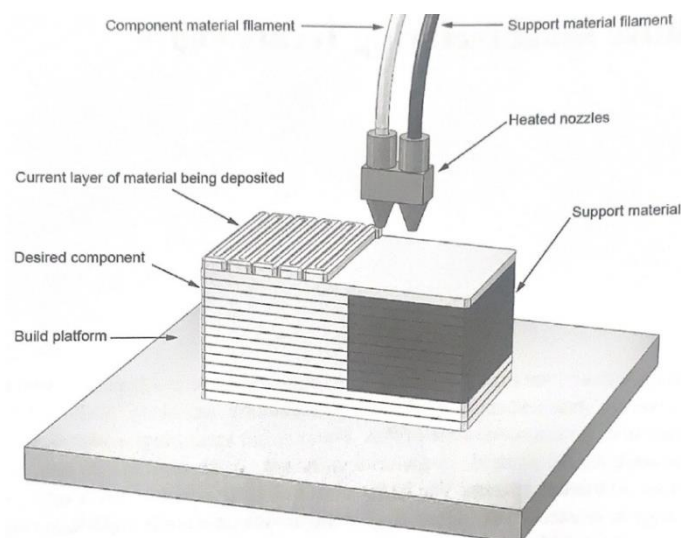
<sup>19</sup> 3MF, acronimo di 3D Manufacturing Format.

Un altro importante aspetto da tenere presente è l'ecosostenibilità del processo. Questo infatti, a differenza delle tecnologie sottrattive, permette di ridurre al minimo lo spreco di materiale. L'additive manufacturing consente anche di avere un'ampia gamma di materiali tra cui scegliere, come ceramiche, metalli, materiali compositi e polimeri, ed una volta creato il modello virtuale 3D del componente e programmata la macchina AM, l'intervento dell'operatore si riduce al minimo. Tuttavia questa tecnologia ha anche degli svantaggi. Come già detto, si hanno costi elevati in caso di componenti con design complessi, non è adatta per elevate quantità di produzione e le parti che si ottengono non hanno un'ottima finitura superficiale, dunque risulta necessaria un'ulteriore lavorazione.

### 3.4 Tipologie di manifattura additiva

Facendo riferimento alla norma ASTM F42 possiamo dividere la manifattura additiva nelle seguenti tipologie [7]:

- **Material Extrusion:** più comunemente conosciuta con il nome di Fused Deposition Modelling (FDM). Funziona estrudendo un filamento fino di materiale su una piattaforma di costruzione che si sposta verso il basso di una frazione di millimetro. In questo modo ogni filamento, che si trova allo stato fuso, viene depositato sopra al precedente legandosi ad esso. Come è possibile vedere dalla figura 7 i sistemi di estrusione sono spesso costituiti da due ugelli, uno per il materiale di cui dovrà essere costituita la parte da realizzare, ed uno per il materiale di supporto che viene utilizzato per creare superfici su cui stampare eventuali pezzi sporgenti.

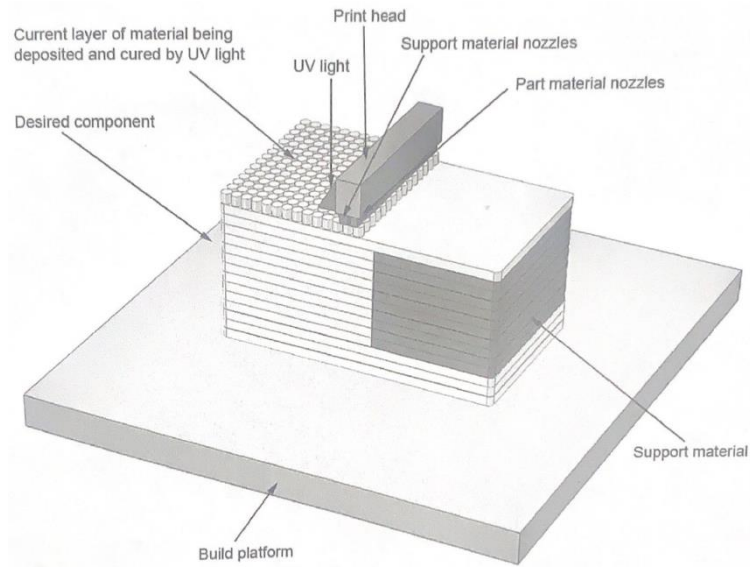


**Figura 7** Material Extrusion [7].



- **Material Jetting:** questa tecnologia utilizza una testina di stampa per depositare, strato dopo strato, sotto forma di piccole gocce, del materiale fotopolimerico<sup>20</sup> che poi viene fatto solidificare tramite l'applicazione di raggi UV.

Anche in questo caso vengono utilizzati più materiali per poter creare superfici di supporto.



**Figura 8** Material Jetting [7].

- **Binder Jetting:** consiste nello stendere, con l'ausilio di un rullo, il materiale sotto forma di polvere su una piattaforma. Successivamente viene applicato del legante liquido alle parti appropriate dello strato, utilizzando una testa a getto d'inchiostro. Nei punti in cui viene applicato il legante, la polvere solidifica.

A questo punto si abbassa la piattaforma ed un altro strato di polvere viene distribuito sul primo e il processo si ripete fino al completamento della parte.

Alla fine del processo la polvere su cui non è stato applicato il legante, e che quindi non si è solidificata, viene rimossa, ottenendo così l'oggetto tridimensionale desiderato, che viene anche chiamato "corpo verde".

<sup>20</sup> I fotopolimeri sono polimeri e resine che hanno la capacità di assorbire una porzione della luce diventando solidi e compatti.



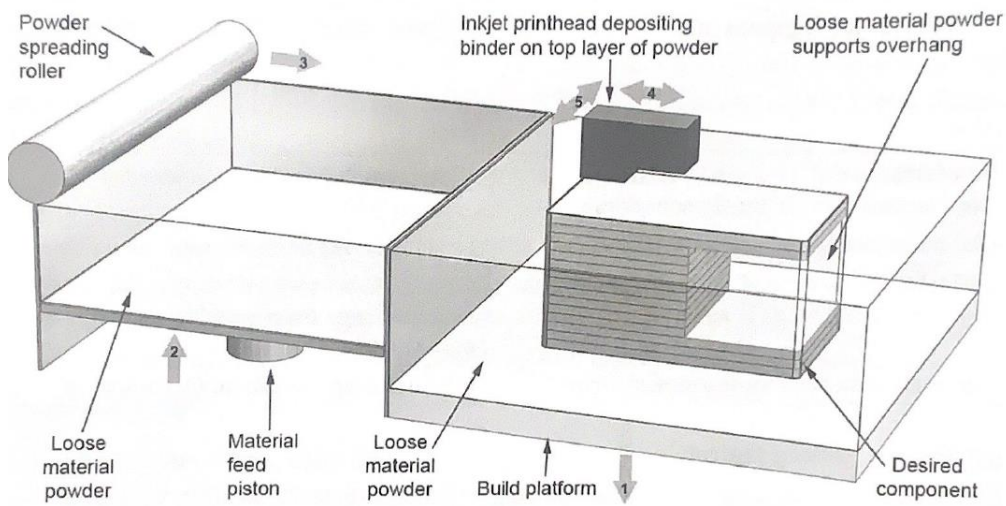


Figura 9 Binder Jetting [7].

- Sheet Lamination: permette di ottenere la parte 3D sovrapponendo fogli di metallo che vengono legati tra loro in due modi:
  - Tramite un adesivo termoindurente (LOM<sup>21</sup>)
  - Tramite saldatura (UAM<sup>22</sup>)

Nel primo caso i fogli di materiale, precedentemente tagliati della forma appropriata, vengono sovrapposti l'uno all'altro e, grazie all'attivazione di un adesivo termoindurente mediante un compattatore riscaldato, si uniscono a formare l'oggetto 3D.

Nel secondo caso, l'unione dei fogli sarà permessa da una saldatura ad ultrasuoni, ma sarà necessaria un'ulteriore lavorazione CNC per rimuovere il metallo non legato.

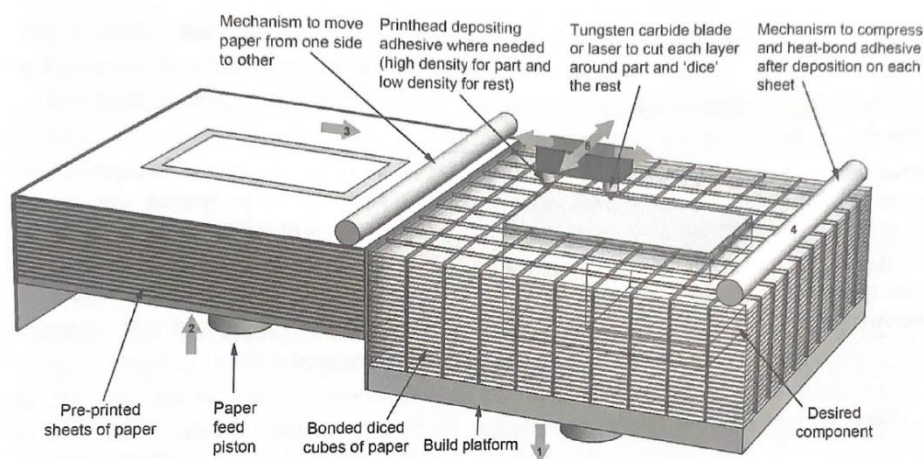


Figura 10 Sheet Lamination [7].

<sup>21</sup> LOM, acronimo di Laminated Object Manufactured.

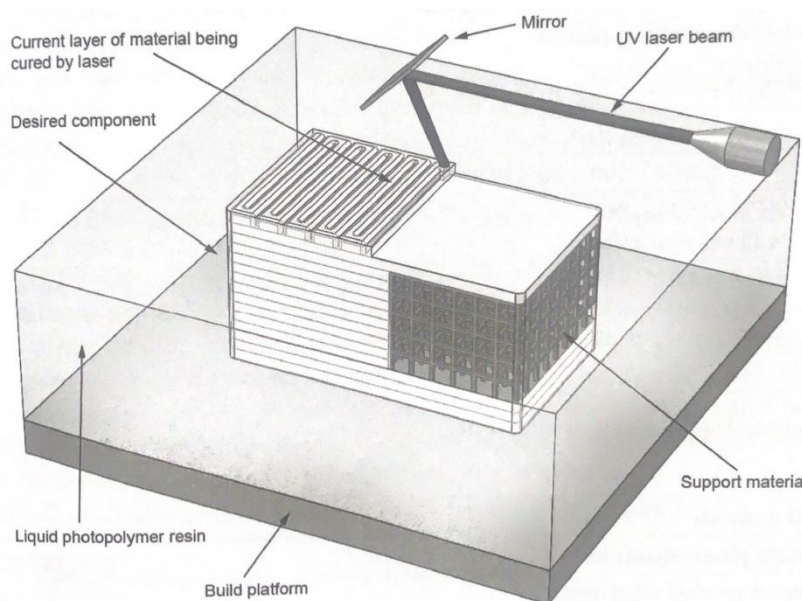
<sup>22</sup> UAM, acronimo di Ultrasonic Additive Manufacturing.

- Vat Photopolymerisation: è una tecnologia comprendente varie tipologie che si basano tutte sullo stesso principio: un fotopolimero liquido contenuto in una vasca che viene polimerizzato selettivamente per mezzo di un fascio di luce UV. Eseguendo il processo strato dopo strato, grazie all'abbassamento della piattaforma di costruzione, si ottiene il componente desiderato.

Come precedentemente detto esistono diverse tipologie di tale processo:

- SLA (Stereolitografia), sfrutta un raggio concentrato di luce UV.
- DLP (Digital Light Processing), dotata di proiettori UV che utilizzano microspecchi per controllare la luce proiettata.
- CLIP (Continuous Liquid Interface Production), in questo caso una parte del fondo della vasca è trasparente alla luce ultravioletta e viene chiamata "finestra".

Attraverso di essa filtra un raggio di luce UV che solidifica il fotopolimero liquido. Lo strato polimerizzato si solleva quanto basta per far defluire il liquido sul fondo della vasca ed il processo si ripete da capo.

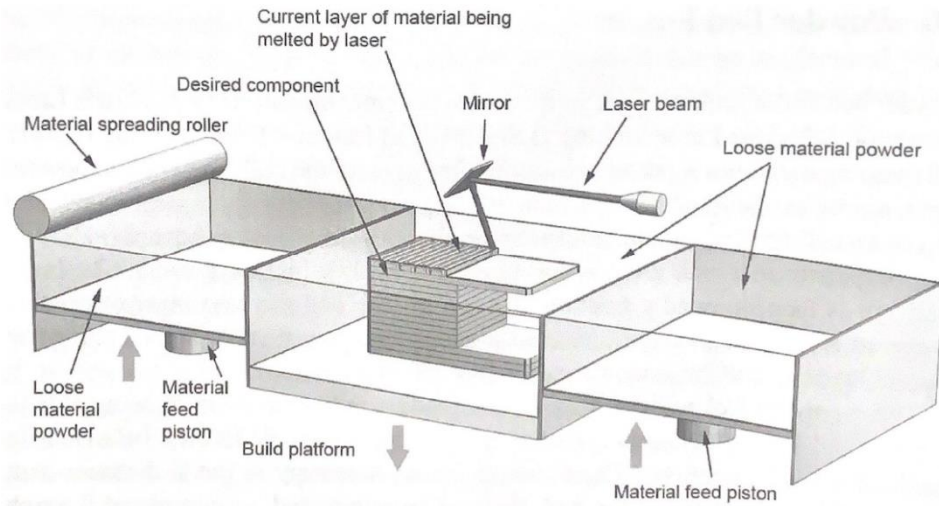


**Figura 11** Vat Photopolymerisation [7].

- Powder Bed Fusion: consiste nel diffondere sulla piattaforma di costruzione un sottile strato di materiale, sotto forma di polvere, ed utilizzando un fascio di energia, far sciogliere questa polvere e poi farla solidificare.

In base al tipo di fascio di energia avremo:

- LS (Laser Sintering) e SLM (Selective Laser Melting), prevede una sinterizzazione laser.
- EBM (Electron Beam Melting), sfrutta un fascio di elettroni.

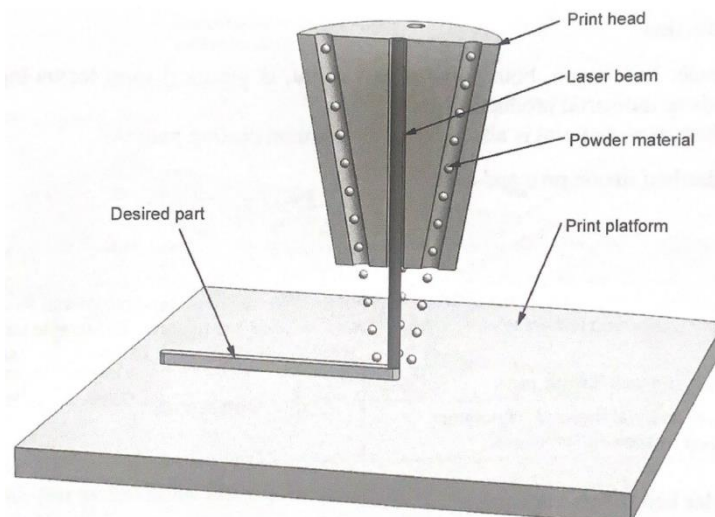


**Figura 12** Powder Bed Fusion [7].

- Direct Energy Deposition: processo comunemente utilizzato per riparare o aggiungere materiale a componenti già esistenti.

Sfrutta un ugello che deposita il materiale, sotto forma di polvere, sulla piattaforma di costruzione e, attraverso un raggio laser o un fascio di elettroni, il materiale viene fuso direttamente al momento della deposizione.

È un processo che necessita di successive lavorazioni per migliorare la finitura superficiale del componente 3D.



**Figura 13** Direct Energy Deposition [7].

### 3.5 Bound Metal Deposition

Il processo di Bound Metal Deposition, più comunemente conosciuto con l'acronimo BMD, è una tecnica di produzione additiva sviluppata dalla società tecnologica americana Desktop Metal e che rientra tra le tecnologie di fabbricazione tramite Material Extrusion (ME).

Sfrutta come materia prima delle bacchette (figura 14) costituite da polvere metallica tenuta insieme da legante polimerico e cera [8].



**Figura 14** Bacchetta di polvere metallica con legante polimerico e cera [9].

Il processo di stampa con tale tecnologia si divide in più fasi [8] [9]:

- **Printing:** una volta caricato il file STL sulla macchina AM e definiti tutti i parametri necessari, ha inizio la stampa. Questa consiste nello spingere, mediante uno stantuffo, le barrette all'interno di un ugello riscaldato, dove verranno fuse e poi estruse sulla piattaforma di costruzione ottenendo il così detto "corpo verde". Il meccanismo è dotato, oltre al principale, di un secondo estrusore che contiene barre di ceramica che vengono utilizzate come mezzo di interfaccia per dividere le diverse parti.
- **Debinding:** il corpo verde viene posto in un serbatoio ed immerso in un solvente per effettuare una rimozione della cera e del legante compresa tra il 30% ed il 70%, mentre la percentuale rimanente consente di mantenere intatta la forma del pezzo. A seguito di tale processo il componente prende il nome di "corpo marrone" ed è caratterizzato da un'elevata porosità.

- Sintering: in quest'ultima fase l'oggetto viene sottoposto ad un ciclo di sinterizzazione termica per rimuovere il legante rimanente ed aumentarne la densità. Consiste nel riscaldare, fino a temperature prossime a quella di fusione, il corpo marrone all'interno di una fornace per poi raffreddarlo per mezzo di un gas inerte.



**Figura 15** Macchinari utilizzati per il processo di stampaggio mediante Bound Metal Deposition.

### 3.5.1 Vantaggi e svantaggi del Bound Metal Deposition

Uno dei principali vantaggi di questa tecnologia è il costo, risulta infatti essere circa il 60% meno costosa di un sistema Powder Bed Fusion. Non necessita un elevato controllo da parte dell'operatore e, grazie alla possibilità di utilizzare vari materiali, risulta un processo molto versatile.

Tuttavia presenta qualche svantaggio relativo alle proprietà meccaniche. Infatti, le parti ottenute con il BMD presentano un'elevata porosità e un'adesione relativamente scarsa tra gli strati di stampa, aspetti che possono essere migliorati aumentando la temperatura durante il processo di Printing.



## 4. Procedura Sperimentale

### 4.1 Preparazione del campione

In seguito allo stampaggio per Bound Metal Deposition del campione di acciaio 17-4 PH, abbiamo una successione di processi che ci permettono di aumentarne la maneggevolezza e la qualità superficiale, in modo da effettuare una migliore analisi metallografica.

La preparazione del campione avviene in questo modo:

1. Taglio: avviene mediante una troncatrice di precisione (figura 16) che ci permette di ottenere un campione di dimensione adeguata, con una superficie di taglio piana, minimizzando l'asportazione di materiale.



**Figura 16** Troncatrice utilizzata per il taglio del campione.

2. Inglobatura: una volta tagliato, il campione viene inglobato in una resina per maneggiarlo più facilmente. Viene quindi inserito nel cilindro di una pressa, insieme ad una resina fenolica rossa, ed ha inizio un processo di polimerizzazione a caldo.

Tale processo consiste nel raggiungere gradualmente, all'interno dell'inglobatrice (figura 18), una temperatura di 150°C, mantenendo il tutto ad una pressione di 25KN.

Eseguendo il tutto per circa 7 minuti la resina si ingloba al campione ed il processo può essere completato estraendolo dalla macchina e raffreddandolo in acqua.



**Figura 18** Inglobatrice a caldo.

3. Lucidatura: per far sì che la microstruttura del nostro acciaio sia adeguatamente visibile al microscopio ottico, è necessario procedere con la lucidatura. Questa avviene attraverso una lucidatrice meccanica (figura 19) dotata di piattaforme rotanti su cui vengono adagiate delle carte abrasive formate da carburi di silicio a granulometria variabile.

Per ottenere un risultato apprezzabile, si inizia con una carta di granulometria 600, per proseguire con quella da 1200, poi da 2000 e per finire quella da 4000 (si va da un grano grosso ad uno sempre più fine).

In questa fase della preparazione è di fondamentale importanza l'orientamento del campione. Difatti ogni volta che si cambia carta abrasiva, il campione viene ruotato di novanta gradi per permettere all'operatore di distinguere gli sfregi lasciati dalla carta precedente.



**Figura 19** Lucidatrice meccanica.

Se a questo punto la superficie non risulta sufficientemente lucidata si utilizza una lappatrice (figura 20) con un panno di pasta diamantata, da 0,25 micron, posto in rotazione e costantemente lubrificato da un olio.



**Figura 20** Lappatrice.



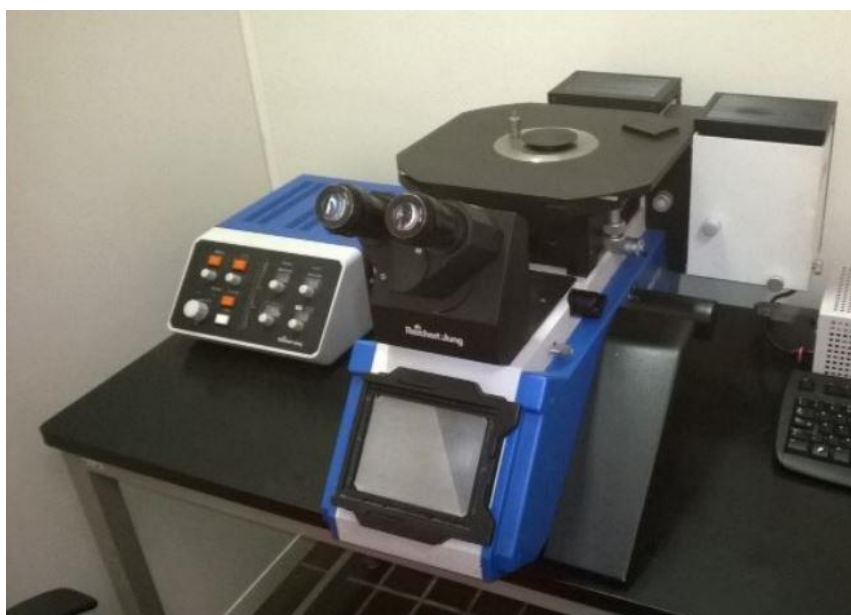
## 4.2 Osservazione al microscopio ottico

Una volta completata la lucidatura, il campione viene posto sulla piattaforma mobile di un microscopio ottico Richert-Jung MeF3<sup>23</sup> (figura 21), permettendo all'operatore di eseguire una prima analisi visiva della microstruttura dell'acciaio.

Questa prima visualizzazione al microscopio ci permette di vedere innanzitutto se la preparazione del campione è stata eseguita correttamente, ma più nello specifico di concentrarci sui difetti, come porosità e vuoti, che poi verranno analizzati con il programma ImageJ.

Nel nostro caso questo tipo di analisi è stata svolta osservando la superficie del campione con una lente con ingrandimento a 10x1,88 ed acquisendo 10 immagini della zona centrale e 10 del bordo del campione.

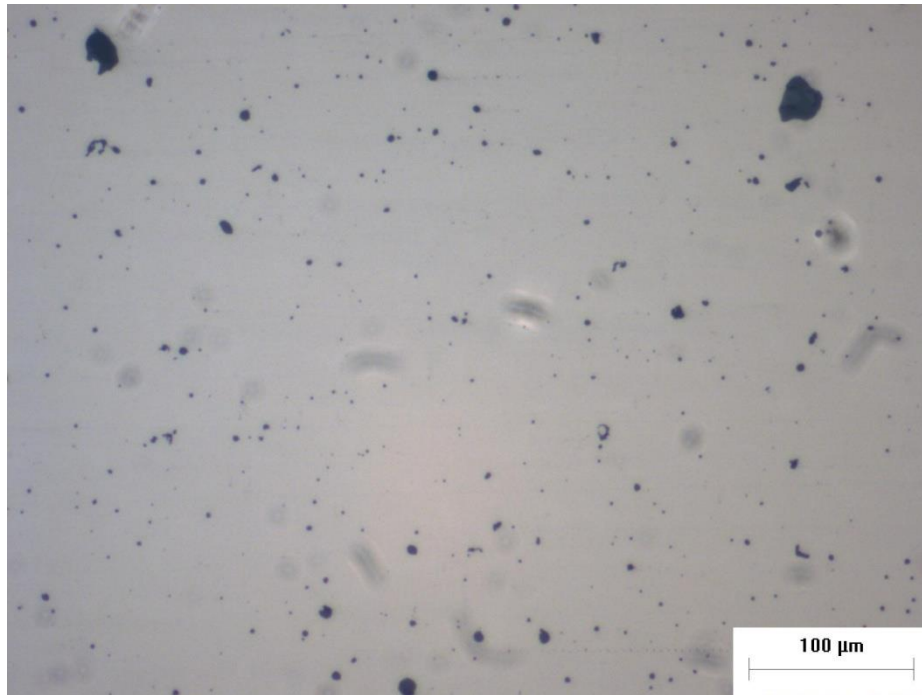
In seguito, grazie ad un apposito programma, sono stati inseriti i marker su tutte le immagini per evidenziare l'unità di misura utilizzata: ad un ingrandimento 10x1,88 corrisponde un marker di 100  $\mu\text{m}$ .



**Figura 21** Microscopio ottico Richert-Jung MeF3 [10]

---

<sup>23</sup> Il microscopio ottico Richert-Jung MeF3 funziona grazie ad un fascio di luce che colpisce la superficie del provino. Questa luce verrà riflessa e così si avrà l'acquisizione dell'immagine, visualizzabile da computer.



**Figura 22** Immagine catturata al microscopio ottico.

### 4.3 Attacco chimico

Con lo scopo di mettere in evidenza bordi di grano e precipitati grossolani, è stato eseguito sul campione un attacco chimico. Questo consiste nell'utilizzare una soluzione, costituita da 10 ml di  $\text{CH}_3\text{COOH}$ <sup>24</sup>, 10 ml di  $\text{HNO}_3$ <sup>25</sup> e 10 ml di  $\text{HCl}$ <sup>26</sup>, che attacca alcuni siti preferenziali andando ad aumentare i contrasti di luce ed evidenziando la microstruttura interna.

L'applicazione della soluzione è stata effettuata versando delle gocce, con l'ausilio di una pipetta, sulla superficie di interesse, per poi distribuirla uniformemente con l'utilizzo di un cotton flock.

Per questa operazione risulta cruciale il rispetto dei tempi di applicazione della soluzione, poiché una eccessiva azione di quest'ultima comporterebbe delle bruciature sulla superficie del provino e di conseguenza un'analisi metallografica di pessima qualità.

Per completare il processo viene rimossa la soluzione lavando il campione con acqua e asciugandolo con aria compressa.

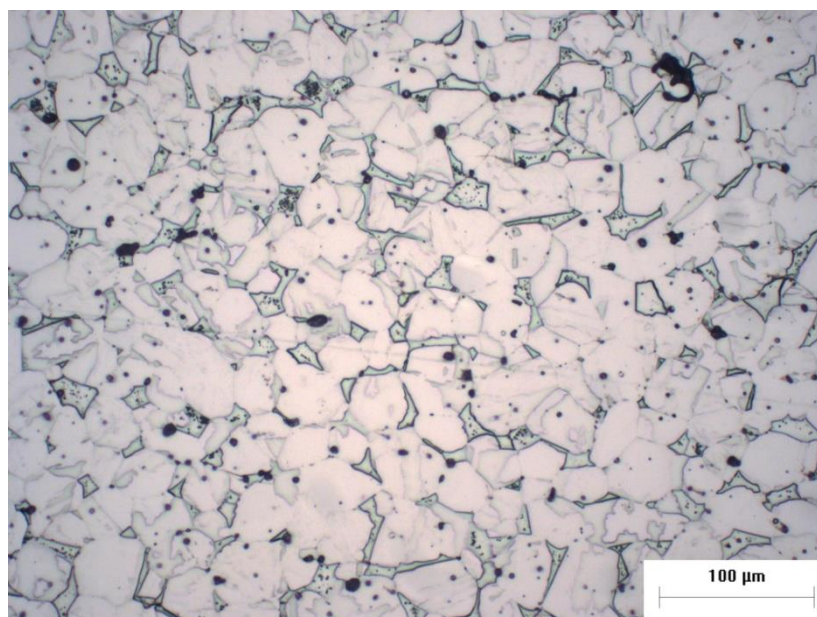
---

<sup>24</sup>  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , sigla dell'acido acetico.

<sup>25</sup>  $\text{HNO}_3$ , sigla dell'acido nitrico.

<sup>26</sup>  $\text{HCl}$ , sigla dell'acido cloridrico.

A questo punto il campione viene nuovamente osservato al microscopio ottico e vengono catturate altre immagini, in particolare 4 della zona centrale e 4 del bordo.



**Figura 22** Immagine acquisita a seguito dell'attacco chimico.

## 5. Creep

Il termine creep, tradotto in italiano con scorrimento viscoso, indica una deformazione di tipo permanente che aumenta nel tempo quando si sottopone un materiale ad una sollecitazione ad alta temperatura.

È un fenomeno che si verifica ad una temperatura superiore al 30-50% della temperatura assoluta di fusione ( $T_F$ ) ed infatti è possibile vedere dalla tabella 3 il limite di temperatura di alcuni metalli al di sotto del quale il creep è un fenomeno poco significativo.

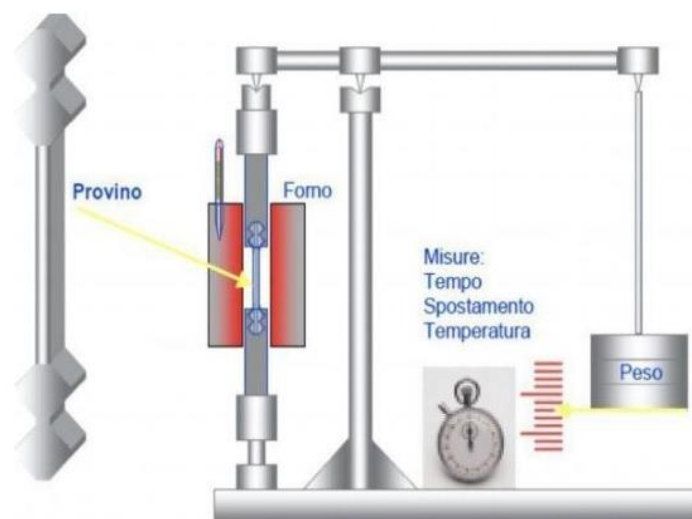
Alluminio	$T < 0.54 T_F$
Titanio	$T < 0.30 T_F$
Acciai bassolegati	$T < 0.36 T_F$
Acciai inossidabili austenitici	$T < 0.49 T_F$
Superleghe	$T < 0.56 T_F$

**Tabella 3** Limite di temperatura al di sotto del quale il creep è un fenomeno poco significativo [11].

Come detto, è una prova che avviene ad alte temperature con una deformazione di tipo permanente, per cui risulta di fondamentale importanza svolgere la prova con una macchina che permetta di:

- Mantenere il carico applicato al provino il più costante possibile per tempi anche molto lunghi.
- Mantenere il campione ad una temperatura elevata (come previsto dalla prova), e ridurre al minimo le oscillazioni di temperatura ( $\pm 1^\circ\text{C}$  rispetto alla temperatura di prova).
- Consentire la misurazione dell'allungamento del provino.

In figura 23 possiamo vedere un esempio di macchina utilizzata per la prova di creep che applica il carico al provino tramite pesi.



**Figura 23** Macchina per la prova di creep [12].

## 5.1 La curva di creep

Raggiunta la rottura del provino si ottiene dalla registrazione dei dati durante la prova, una curva deformazione-tempo (figura 24), grazie alla quale è possibile notare che, partendo da una deformazione istantanea  $\epsilon_0$ , si ha un aumento di deformazione fino al raggiungimento della rottura, individuata con  $\epsilon_R$ .

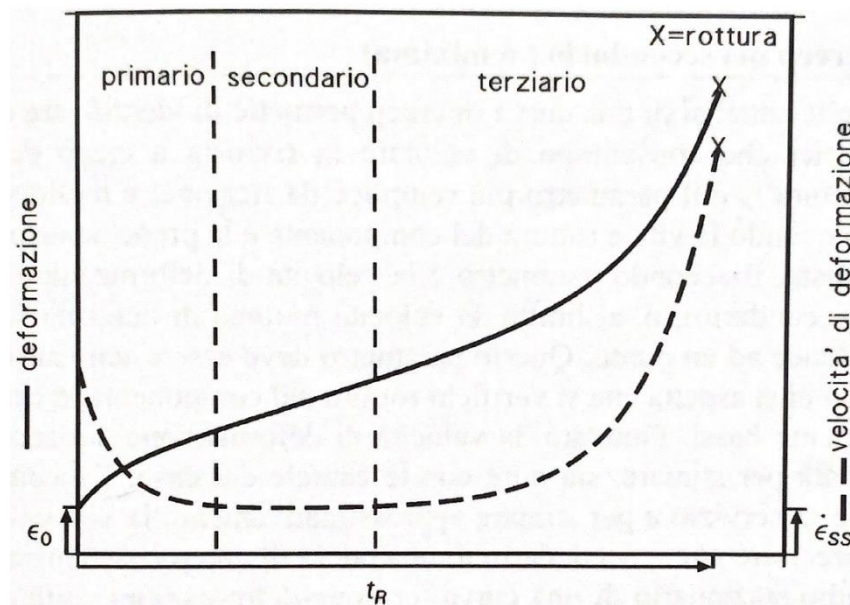


Figura 24 Andamento di una curva di creep [11].

La curva può essere divisa in tre stadi [11]:

- Primario: in cui si ha una diminuzione, con il passare del tempo, della velocità di deformazione  $\frac{\partial \epsilon}{\partial t}$ , dovuta ad un numero elevato di dislocazioni che rendono la deformazione sempre più difficile.
- Secondario: dove la velocità ha un andamento praticamente costante ( $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{SS}$ ). Questa fase è dovuta ad un equilibrio che si instaura tra i fenomeni di rafforzamento, causati dal moltiplicarsi delle dislocazioni, ed il fenomeno di addolcimento, dovuto al ripristino del materiale.
- Terziario: stadio in cui avviene la rottura a seguito di un importante aumento della velocità di deformazione nel tempo. Aumento dovuto alla cavitazione<sup>27</sup> e alla sua crescita, alla formazione di cricche e alla formazione della strizione<sup>28</sup>.

<sup>27</sup> Cavitazione: formazione di cavità nella microstruttura del materiale.

<sup>28</sup> Strizione: riduzione della sezione resistente di un materiale sottoposto a creep.

## 5.2 Prove di creep sull'acciaio 17-4 PH

Fatta questa introduzione generale sul creep, analizziamo, da un punto di vista sperimentale, la prova di durezza Rockwell e di microdurezza Vickers eseguite sull'acciaio.

### 5.2.1 Prova di durezza Rockwell

Si svolge tramite l'utilizzo di una macchina apposita, il durometro (figura 25.a), dotato di un penetratore di diamante conico con un angolo al vertice di  $120^\circ$  (figura 25.b).



**Figura 25.a** Durometro.



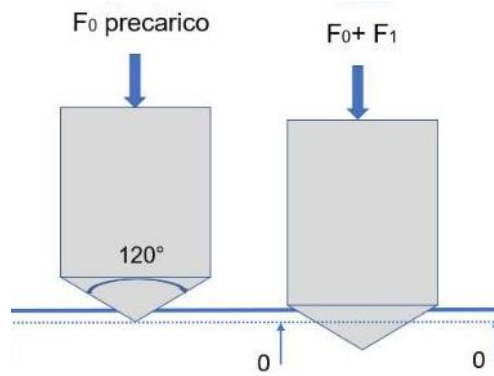
**Figura 25.b** Penetratore Rockwell.

La prova consiste nell'applicare sulla superficie del provino un carico iniziale  $F_0$ , detto precarico, che consente di individuare il livello di riferimento per la misura successiva. A questo punto si applica il carico maggiore  $F_1$  per una durata di circa 10 secondi, alla fine dei quali si rimuove tutto il carico e si va a leggere sul display del durometro il valore di durezza HRC<sup>29</sup>.

---

<sup>29</sup> HRC acronimo di Hardness Rockwell Cone.





**Figura 26** Fasi della prova di durezza Rokwell [13].

Nel complesso, per eseguire la prova, è stato applicato un carico di 150 kgf, con il quale sono state ottenute tre differenti impronte sulla superficie del provino, visibili ad occhio nudo.

### 5.2.2 Prova di microdurezza Vickers

Una volta eseguita la prova di durezza, per poter svolgere quella di microdurezza Vickers è stato necessario procedere nuovamente con la lucidatura del campione, in modo da rimuovere le impronte lasciate dal penetratore Rockwell.

Riottenuta una superficie liscia e priva di impronte si procede con la prova di microdurezza che consiste nell'utilizzo di un microdurometro Vickers (figura 27.a) dotato di un penetratore a forma di piramide retta a base quadrata (figura 27.b).

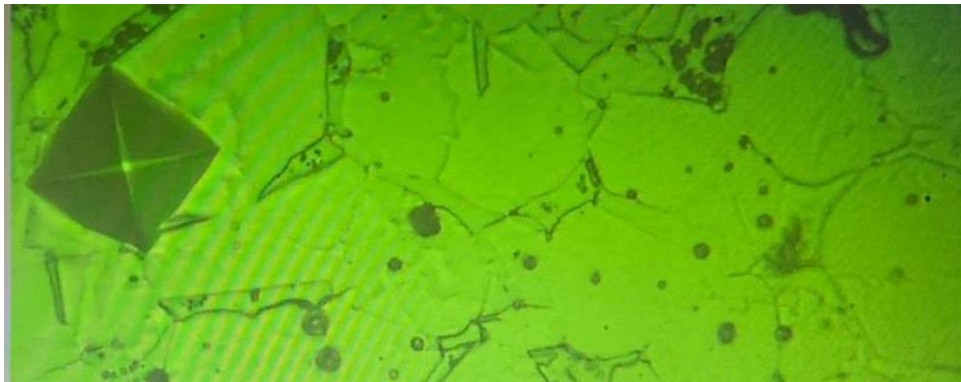


**Figura 27.a** Microdurometro Vickers.



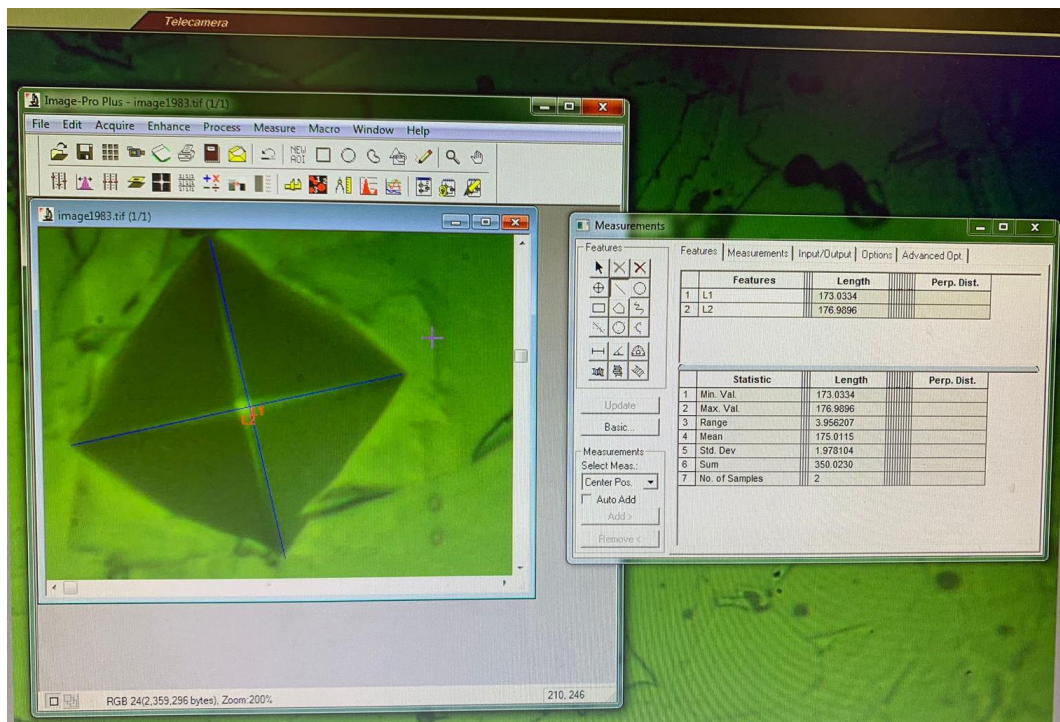
**Figura 27.b** Penetratore Vickers.

La prova si è svolta eseguendo delle impronte lungo la linea centrale della superficie del campione. Le prime 10 sono state fatte ad una distanza di mezzo millimetro l'una dall'altra, poi, per accelerare il processo, sono state effettuate ad una distanza di un millimetro. Le impronte sono state ottenute applicando un carico di 300 gf per 10 secondi e sono state osservate al computer (figura 28) grazie ad un microscopio integrato al microdurometro.



**Figura 28** Immagine al computer dell'impronta lasciata dal penetratore.

A questo punto, grazie ad un programma di misurazione, sono state misurate le due diagonali dell'impronta, dalle quali si è ottenuto un valore della diagonale media (figura 29).



**Figura 29** Misurazione delle diagonali dell'impronta lasciata dal penetratore.



Trovata la diagonale media, è stato calcolato il valore della microdurezza Vickers grazie alla formula sottostante, dove F è il carico applicato e d è la diagonale media.

$$HV = 1,854 \times \frac{F}{d^2} \times 0,102 \quad (1)$$

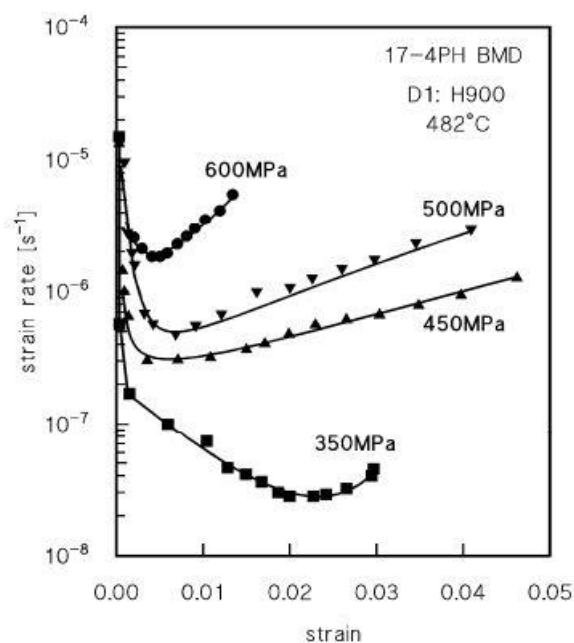
I valori di durezza ottenuti per ogni impronta verranno trattati nel capitolo 6.2 , dedicato alla trattazione dei risultati ottenuti.

## 6. Risultati e discussione

Quest'ultimo paragrafo è dedicato all'analisi dei risultati ottenuti dalla prova di durezza e microdurezza e alla caratterizzazione dei vuoti tramite il programma ImageJ.

### 6.1 Risultati creep

La figura 30 mostra la forma della curva di creep per il campione di acciaio 17-4 PH.



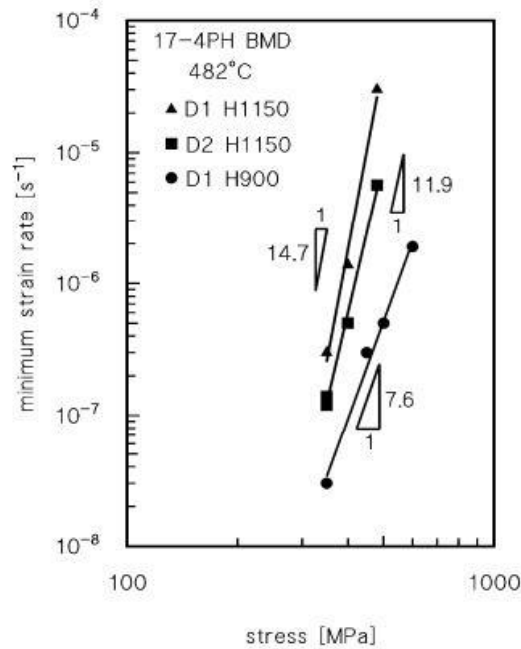
**Figura 30** Curva di creep per l'acciaio 17-4 PH. [14]

La forma delle curve di creep risulta essere convenzionale, con una regione primaria ben definita, una secondaria, definita da un minimo valore di creep, ed una finale piuttosto prolungata e ripida. In figura 31 invece è rappresentata la dipendenza della velocità di deformazione  $\dot{\epsilon}_m$  dalla sollecitazione applicata  $\sigma$ . I risultati riportati in tale figura obbediscono all'equazione della legge di potenza di seguito riportata, dove A è un parametro dipendente dalla temperatura ed n è l'esponente di sollecitazione che varia tra 7,6 e 14,7.

$$\dot{\epsilon}_m = A\sigma^n \quad (2)$$

La figura presenta, oltre la curva riguardante il nostro campione (sottoposto ad invecchiamento H900), anche le curve riferite allo stesso tipo di acciaio ma sottoposto ad un invecchiamento

H1150. È possibile notare come la velocità di deformazione minima del campione testato nello stato H900 è di gran lunga inferiore a quella misurata dopo l'invecchiamento H1150. Questo aspetto era prevedibile poiché l'invecchiamento H900 produce una dispersione delle fasi di indurimento che impedisce maggiormente la mobilità delle dislocazioni.



**Figura 31** Dipendenza della velocità di deformazione  $\dot{\epsilon}_m$  dalla sollecitazione applicata  $\sigma$ . [14]

## 6.2 Calcolo delle durezza

I risultati ottenuti dalla prova di durezza Rockwell, relativo alle tre impronte lasciate sulla superficie del provino, sono quelli descritti nella tabella 4:

N. prova	HRC
1°	25
2°	26
3°	26

**Tabella 4** Risultati durezza HRC.

Nonostante l'acciaio analizzato sia stato sottoposto ad un trattamento termico H900, che dovrebbe conferire al materiale un eccellente aumento di durezza e resistenza meccanica, abbiamo ottenuto dei valori di durezza HRC non consistentemente elevati.

### 6.3 Calcolo delle microdurezze

Come anticipato nel capitolo 5.2.2, per ogni impronta è stata calcolata la diagonale media che è stata inserita in un foglio di lavoro Excel, il quale, grazie alla formula 1, ha calcolato in automatico i valori di microdurezza HV<sup>30</sup>.

In figura 32 sono riportati tutti i valori ottenuti ed il valore medio della microdurezza HV.

<b>CALCOLO MICRODUREZZA</b>			
<b>Carico applicato</b>	<b>300</b>	<b>gf</b>	
<b>Diagonale</b>	<b>HV</b>	<b>MPa</b>	<b>GPa</b>
177	285	2792	2,79
173	296	2903	2,90
174	295	2890	2,89
180	275	2700	2,70
175	290	2841	2,84
175	291	2849	2,85
179	279	2736	2,74
180	274	2686	2,69
175	292	2861	2,86
174	292	2868	2,87
172	299	2934	2,93
174,626	292	2862	2,86
170	307	3008	3,01
178	281	2754	2,75
173	296	2906	2,91
174	294	2887	2,89
172,6566	299	2928	2,93

<b>Media HV</b>	<b>290,3</b>
-----------------	--------------

Figura 32 Valori di micro durezza HV e valore medio.

<sup>30</sup> HV acronimo di Hardness Vickers.

Anche per questo tipo di prova i valori relativamente bassi che sono stati ottenuti, non sono in linea con ciò che ci si aspettava da un acciaio sottoposto a trattamento termico H900.

## 6.4 Caratterizzazione dei vuoti tramite ImageJ

In seguito all'osservazione al microscopio, è stata svolta la caratterizzazione dei vuoti tramite il programma ImageJ, con lo scopo di ottenere una media percentuale dei vuoti presenti sulla superficie dell'acciaio. A tal scopo ogni foto è stata inserita nel programma e sono stati svolti alcuni dei seguenti passaggi.

Come prima cosa è stata settata la scala in micrometri ( $\mu\text{m}$ ). Per fare ciò è stato eseguito, tramite il comando “lente”, un ingrandimento del marker, su cui è stata disegnata una retta della sua stessa lunghezza (figura 33).

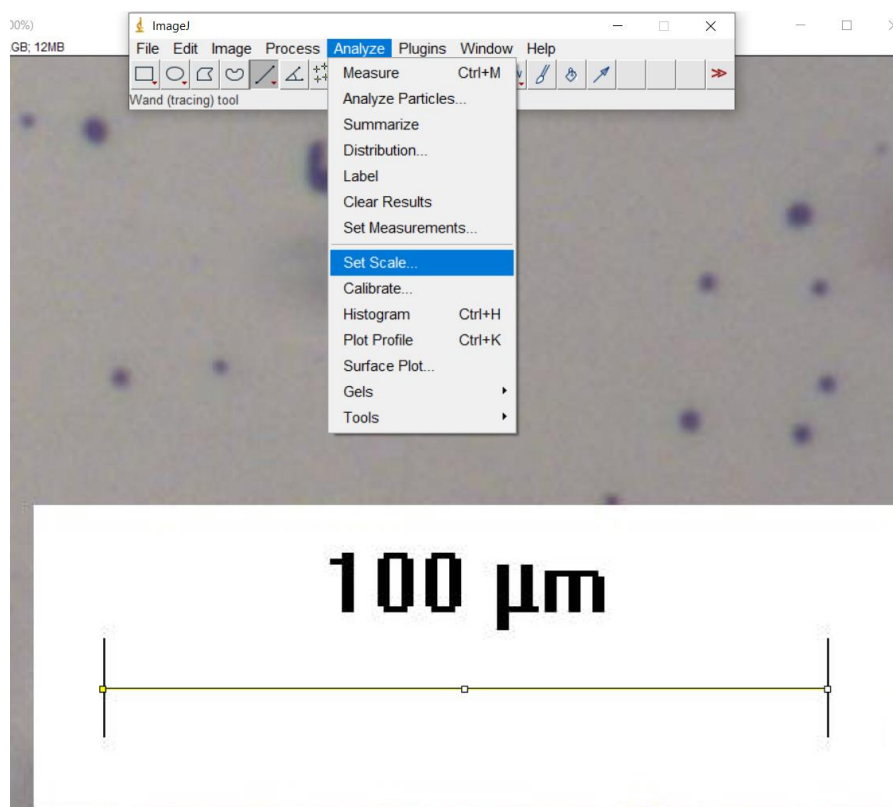


Figura 33 Settaggio della scala in ImageJ.

A questo punto è stato selezionato il comando “Analyze” e dal menù a tendina il comando “Set Scale”. Da qui si è aperta una finestra di comando in cui è stato inserito il valore del marker

(100), in corrispondenza di “Known Distance” e l’unità di misura ( $\mu\text{m}$ ), in corrispondenza di “Unit of Length” (figura 34).

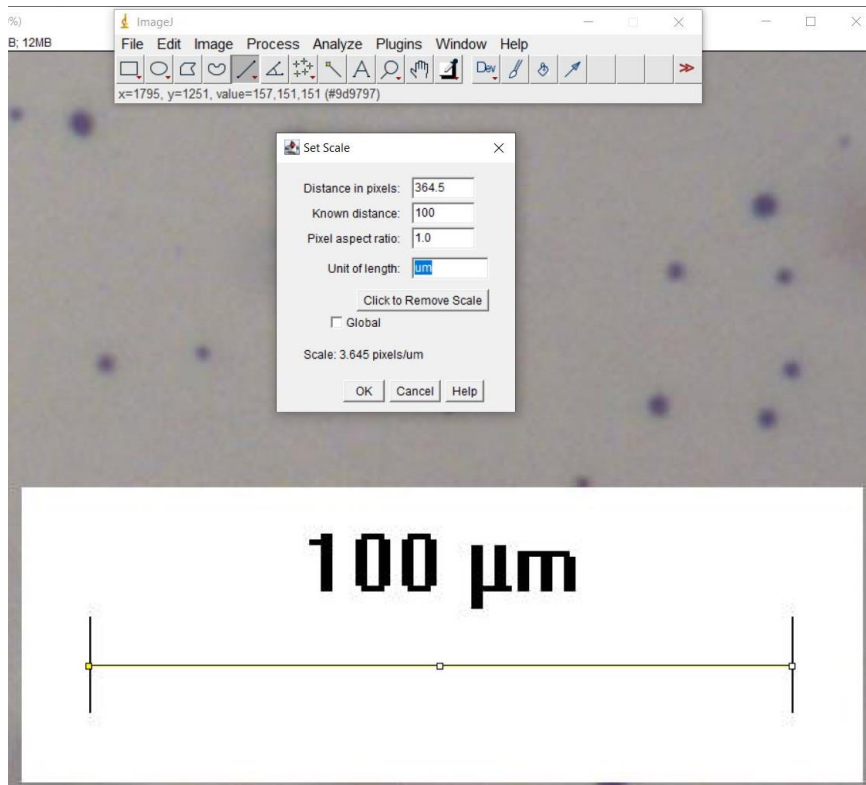


Figura 34 Settaggio della scala in ImageJ.

Una volta definita la scala, è stata disegnata un'area non contenente il marker, tramite il comando “Rectangle”. Il comando “crop” invece ha permesso di rimuovere la parte di immagine che non era di nostro interesse (figura 35).

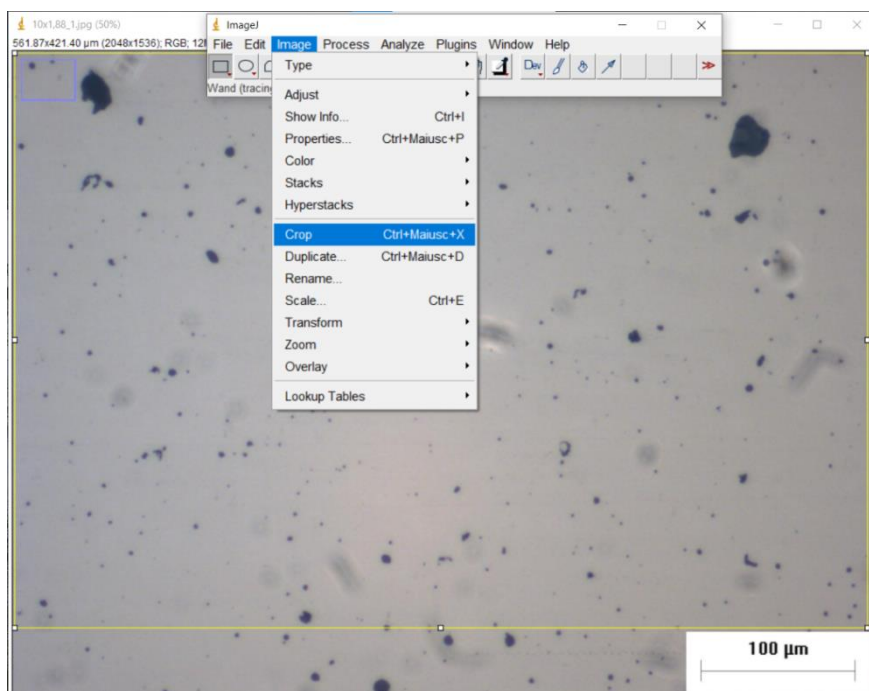
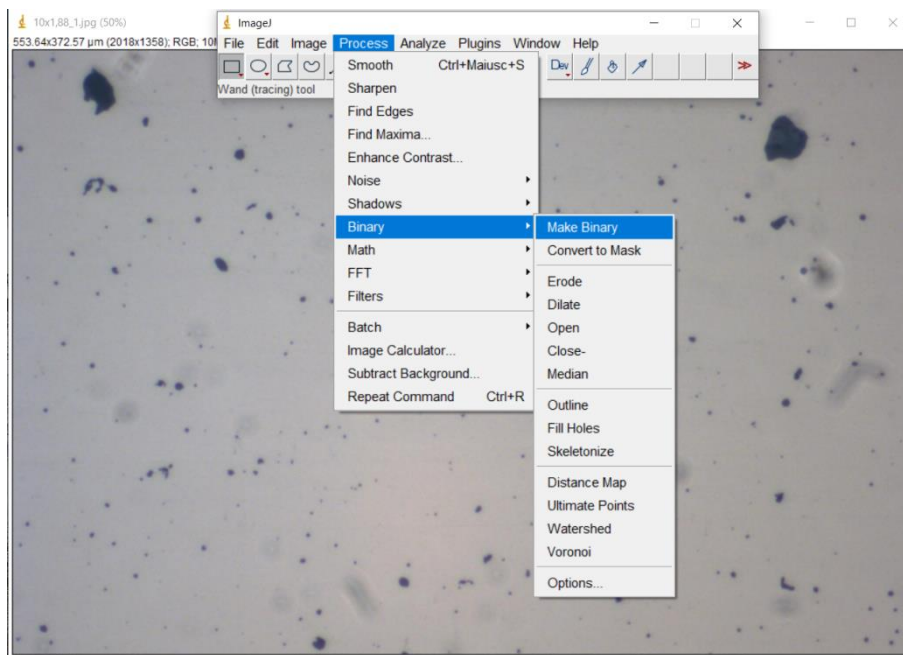


Figura 35 Ritaglio della parte di immagine che era di nostro interesse esaminare.

Da qui, selezionando il comando “Process” e, dal menù a tendina, il comando “Binary” e poi “Make Binary” (figura 36.a), è stato possibile visualizzare tutti i vuoti presenti nell’immagine (figura 36.b).



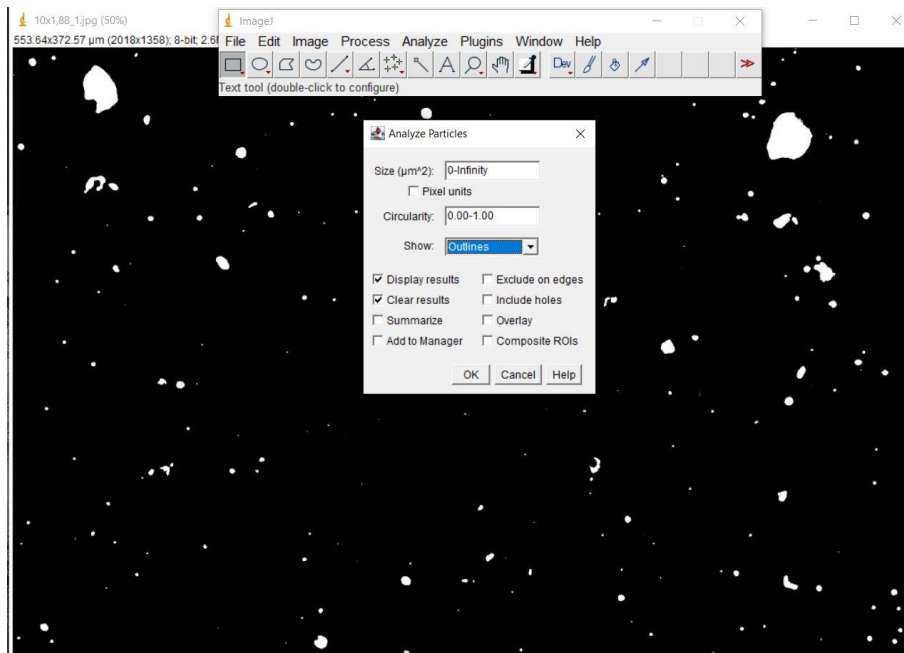
**Figura 36.a** Comandi selezionati per visualizzare i vuoti.



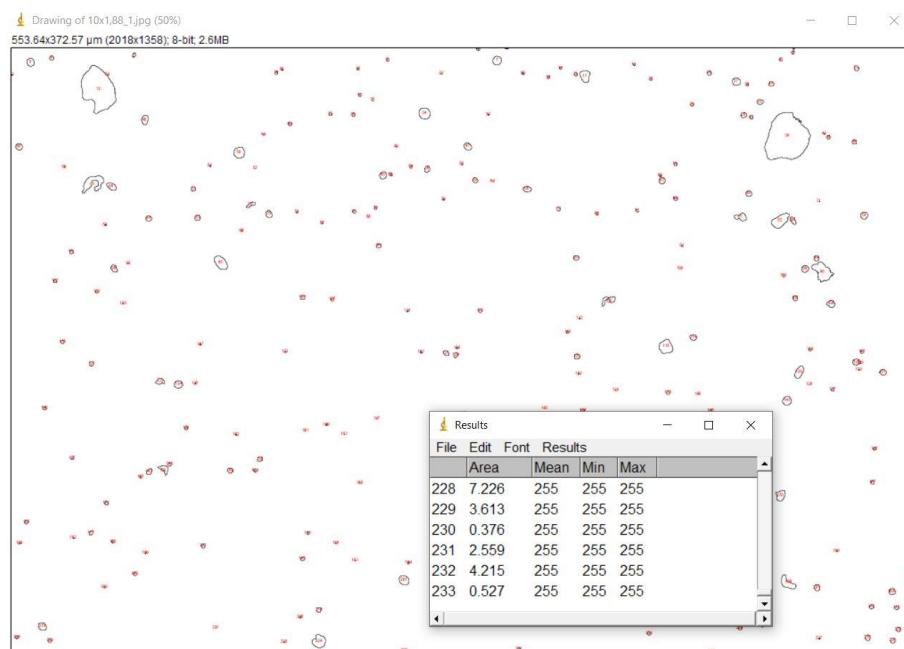
**Figura 36.b** Vuoti messi in risalto a seguito del comando “Make Binary”.



Per finire, con il comando “Analyze Particles” (figura 37.a), il programma ha riconosciuto i vuoti presenti all’interno dell’immagine e per ognuno ha attribuito un numero identificativo e ne ha misurato l’area (figura 37.b).



**Figura 37.a** Comando “Analyze Particles”.



**Figura 37.b** Immagine dei vuoti numerati e con relativo valore dell’area.

I dati che ci vengono forniti per ogni vuoto vengono copiati su Excel per poter eseguire alcuni calcoli. Nello specifico è stata calcolata, per ogni immagine, la sommatoria delle aree di ogni vuoto, l'area dell'immagine e, attraverso la formula 3, la percentuale dei vuoti (figura 38).

IMMAGINE 8 10X1,88		IMMAGINE 9 10X1,88	
N° VUOTO	AREA (µm <sup>2</sup> )	N° VUOTO	AREA (µm <sup>2</sup> )
1	320,285	1	11,441
2	2,027	2	0,075
3	3,303	3	104,471
4	0,901	4	7,677
5	25,371	5	2,107
6	0,45	6	5,269
7	1,222	7	1,222
8	1,222	8	1,222
9	1,222	9	1,222
10	1,222	10	1,222
11	1,222	11	1,222
12	1,222	12	1,222
13	1,222	13	1,222
14	1,222	14	1,222
15	1,222	15	1,222
16	1,222	16	1,222
17	1,222	17	1,222
18	1,222	18	1,222
19	1,222	19	1,222
20	1,222	20	1,222
21	1,222	21	1,222
22	1,222	22	1,222
23	1,222	23	1,222
24	1,222	24	1,222
25	1,222	25	1,222
26	1,222	26	1,222
27	1,222	27	1,222
28	1,222	28	1,222
29	1,222	29	1,222
30	1,222	30	1,222
31	1,222	31	1,222
32	1,222	32	1,222
33	1,222	33	1,222
34	1,222	34	1,222
35	1,222	35	1,222
36	1,222	36	1,222
37	1,222	37	1,222
38	1,222	38	1,222
39	1,222	39	1,222
40	1,222	40	1,222
41	1,222	41	1,222
42	1,222	42	1,222
43	1,222	43	1,222
44	1,222	44	1,222
45	1,222	45	1,222
46	1,222	46	1,222
47	1,222	47	1,222
48	1,222	48	1,222
49	1,222	49	1,222
50	1,222	50	1,222
51	1,222	51	1,222
52	1,222	52	1,222
53	1,222	53	1,222
54	1,222	54	1,222
55	1,222	55	1,222
56	1,222	56	1,222
57	1,222	57	1,222
58	1,222	58	1,222
59	1,222	59	1,222
60	1,222	60	1,222
61	1,222	61	1,222
62	1,222	62	1,222
63	1,222	63	1,222
64	1,222	64	1,222
65	1,222	65	1,222
66	1,222	66	1,222
67	1,222	67	1,222
68	1,222	68	1,222
69	1,222	69	1,222
70	1,222	70	1,222
71	1,222	71	1,222
72	1,222	72	1,222
73	1,222	73	1,222
74	1,222	74	1,222
75	1,222	75	1,222
76	1,222	76	1,222
77	1,222	77	1,222
78	1,222	78	1,222
79	1,222	79	1,222
80	1,222	80	1,222
81	1,222	81	1,222
82	1,222	82	1,222
83	1,222	83	1,222
84	1,222	84	1,222
85	1,222	85	1,222
86	1,222	86	1,222
87	1,222	87	1,222
88	1,222	88	1,222
89	1,222	89	1,222
90	1,222	90	1,222
91	1,222	91	1,222
92	1,222	92	1,222
93	1,222	93	1,222
94	1,222	94	1,222
95	1,222	95	1,222
96	1,222	96	1,222
97	1,222	97	1,222
98	1,222	98	1,222
99	1,222	99	1,222
100	1,222	100	1,222
Σ Aree vuoti (µm <sup>2</sup> )	2654,153	Σ Aree vuoti (µm <sup>2</sup> )	2510,158
area immagine (µm <sup>2</sup> )	207123,9555	area immagine (µm <sup>2</sup> )	210044,3082
% vuoti	1,281432171	% vuoti	1,195061186

Figura 38 Calcoli eseguiti con Excel.

$$\%vuoti = \left( \frac{\sum Aree vuoti}{Area immagine} \right) \times 100 \quad (3)$$

Da ultimo è stata calcolata la media della percentuale dei vuoti (figura 39).

<b>% MEDIA DEI VUOTI</b>	<b>2,133793954</b>
--------------------------	--------------------

Figura 39 Calcolo della media percentuale dei vuoti.

## 7. Conclusioni

Giunti al termine di quest'analisi metallografica sul campione di acciaio 17-4 PH possiamo trarre alcune conclusioni.

L'acciaio in questione è stato ottenuto tramite Bound Metal Deposition, tecnologia di tipo additiva che consente di ottenere parti, mantenendo i costi piuttosto bassi.

Nonostante questo importante vantaggio, tale tecnologia presenta un difetto legato all'elevata porosità delle parti ottenute per BMD e ad un'adesione relativamente scarsa tra gli strati di stampa (si rimanda al paragrafo 3.5.1). Questo aspetto è stato effettivamente riscontrato nella caratterizzazione dei vuoti eseguita tramite il software ImageJ, che ci ha permesso di calcolare la media percentuale dei vuoti presenti nelle 20 immagini acquisite. Il valore in questione è pari circa al 2,1%, il che permette di capire come il nostro acciaio abbia una elevata quantità di vuoti al suo interno e come ciò vada ad inficiare sulle proprietà meccaniche.

Riguardo quest'ultime, grazie alla prova di durezza e microdurezza svolte sul campione, possiamo confermare che non abbiamo ottenuto i valori attesi.

Tornando alla tabella 2, notiamo che per un acciaio 17-4 PH, sottoposto a trattamento termico H900, dovremmo avere un valore di durezza pari a circa 40 HRC, mentre nel nostro caso la media dei valori ottenuti è quasi pari a 26 HRC.

Anche nel caso della prova di microdurezza, il valore medio di 290,3 HV non rientra nei parametri attesi per questa tipologia di acciaio. Tutto ciò potrebbe dunque essere riconducibile all'elevata presenza di vuoti all'interno del campione, che non consentono di ottenere le proprietà meccaniche desiderate.

Per ovviare a questo problema sarà necessario diminuire la porosità che, come spiegato nel paragrafo 3.5.1, è possibile aumentando la temperatura durante il processo di Printing, in questo modo si diminuirebbero i vuoti presenti nella microstruttura dell'acciaio e si otterrebbero proprietà sicuramente migliori.

# Bibliografia

- [1] Prof. Alberto De Capua, “Materiali per l’architettura” . Dipartimento di Architettura e territorio, Corso Di Studio in Architettura quinquennale.
- [2] Dispense di Metallurgia a cura del Prof. Spigarelli Stefano.
- [3] [https://it.wikipedia.org/wiki/Acciaio\\_inossidabile](https://it.wikipedia.org/wiki/Acciaio_inossidabile).
- [4] [https://www.sidex.it/schede\\_tecniche/acciaio-17-4ph/](https://www.sidex.it/schede_tecniche/acciaio-17-4ph/).
- [5] 17-4 Technical-data (Springer).
- [6] Tesi di laurea magistrale in Ingegneria dei Materiali dell’Università degli studi di Padova: “Caratterizzazione di un acciaio 17-4 PH ottenuto mediante pressatura isostatica a caldo” a cura di Federico Scarpellini.
- [7] Olaf Diegel, Axel Nordin, Damien Motte, “A Pratical Guide to Design fo Additive Manufacturing” , Springer Series in Advanced Manufacturing, 2020.
- [8] “Microstructure and Defect Analysis of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by the Bound Metal Deposition Additive Manufacturing Technology” di Valerio Di Pompeo, Eleonora Santecchia, Alberto Santoni, Kamal Sleem, Marcello Cabibbo e Stefano Spigarelli, in Crystals, 2023.
- [9] Tesi di laurea triennale in Ingegneria Meccanica dell’Università Politecnica delle Marche: “Caratterizzazione micro strutturale di strutture reticolari prodotte mediante Bound Metal Deposition” a cura di Marco Massersì.
- [10] Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica dell’Univeristà Politecnica delle Marche: “Studio della risposta a creep dell’acciaio 17-4 PH prodotto attraverso diverse tecnologie” a cura di Gabriele Palladini.
- [11] Stefano Spigarelli, “Metallurgia Meccanica”, Società Editrice Esculapio, 2012.
- [12] Tesi di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica dell’Università Politecnica delle Marche: “Studio della risposta a creep dell’acciaio 17-4PH prodotto per AM” a cura di Ivan D’Eliseo.
- [13] <https://www.labsanmarco.it/it/approfondimenti/prova-di-durezza-rockwell>.
- [14] “On the Short-Term Creep Response at 482 °C (900 °F) of the 17-4PH Steel Produced by Bound Metal Deposition” di Valerio di Pompeo, Alberto Santoni, Eleonora Santecchia e Stefano Spigarelli, in Metals, 2022.

# Ringraziamenti

Desidero esprimere i miei più sinceri ringraziamenti a tutte le persone che mi hanno sostenuto e accompagnato in questo percorso di studi.

In primo luogo, ringrazio la professoressa Eleonora Santecchia per la disponibilità e l'aiuto dimostratomi.

Un grazie speciale va alla mia famiglia, per l'amore, la fiducia ed il supporto incondizionato che mi avete dimostrato in questi anni.

Ringrazio di cuore anche il mio gruppo di amici, la vostra presenza e il vostro affetto mi hanno aiutato a superare i momenti difficili e a celebrare quelli felici.

Non posso dimenticare la squadra di basket di San Severino, che con grande dispiacere ho lasciato l'anno scorso. Sarete sempre come una seconda famiglia e porterò sempre con me i ricordi dei bei momenti trascorsi insieme.

Un sentito ringraziamento va anche alla squadra di Tolentino con cui ho passato quest'ultimo anno. Nonostante il brutto finale di stagione siamo sempre stati uniti contro tutto e tutti e per questo posso esser fiero di aver fatto parte del gruppo ABT 2023/24.

Infine desidero ringraziare i miei ex coinquilini, nonché grandi amici, Filippo e Tommaso. Porterò sempre nel cuore i momenti trascorsi insieme, dalle feste in casa organizzate a mia insaputa, alle "sclerate" contro Tommaso per le cose lasciate in giro, alle partite a FIFA contro Filippo, che ci hanno fatto rompere mensole e joystick (no Tony, non è caduto per sbaglio). Grazie per aver reso questi anni un'esperienza incredibile.

Grazie a tutti di cuore.