

# POLITECNICO DI TORINO

## Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

## Studio sperimentale e modellizzazione Matlab di meccanismi di deformazione plastica per lega Inconel 718 in Additive Manufacturing

Relatrice

Prof.ssa SESANA RAFFAELLA

Tutor

Dottorando CRACHI MATTEO

Collaborazione

Start up SOPHIA HIGH TECH

Candidato

CICORIA MARCO



## Indice

1-	INTRODUZIONE.....	8
1.1-	Oggetto della ricerca .....	8
1.2-	Obbiettivo della ricerca .....	8
1.3-	Organizzazione della tesi .....	8
2-	STATO DELL'ARTE .....	10
2.1	Inconel 718 .....	10
2.2	Selective Laser Manufacturing (SLM) in Additive Manufacturing .....	11
2.2.1	Parametri di processo Selective Laser Melting e microstruttura derivante .....	11
2.3	Indentation size effect .....	13
3-	MATERIALI E METODI .....	14
3.1	Polvere Inconel 718 .....	14
3.2	Tecnica di Fabbricazione Additiva: Selective Laser Melting SLM .....	16
3.4	Trattamento termico .....	19
3.5	Macchinari utilizzati.....	21
3.6	Metodo test.....	21
3.6.1	Sistema di riferimento solidale al provino:.....	22
3.6.2	Preparazione provini .....	22
3.6.4	Test microdurezza .....	23
4-	RISULTATI SPERIMENTALI .....	28
4.1	Microdurezza: acquisizioni sperimentali .....	28
4.2	Commenti ed osservazioni su risultati sperimentali ed Indentation Size Effect .....	34
4.3	Approssimazione dati sperimentali con modello analitico .....	36
4.3.1	Validazione modello analitico per approssimazione dati sperimentali.....	48
4.4	Correlazione durezza Vickers – tensione snervamento .....	50
	Studio coefficienti per correlazione durezza Vickers – tensione snervamento .....	50
	Ipotesi .....	52
4.4.1	Commento risultati ottenuti da correlazione HV [Mpa] – Rp02 [Mpa] adottata.....	60
5-	IMPLEMENTAZIONE E DESCRIZIONE MODELLO MATLAB .....	65
5.1	Presentazione codice.....	65

5.2	Struttura logica del codice Matlab.....	67
5.3	Codice Matlab:.....	73
5.4	Sviluppo modello Matlab per stima Rp02 .....	85
6-	STUDIO CARATTERISTICHE MATERIALE DA MODELLO MATLAB .....	93
6.1	Densità energetica.....	93
6.2	Utilizzo codice Matlab per stima caratteristiche.....	93
7-	CONCLUSIONI .....	96
7.1	Osservazioni per sviluppare modello Matlab .....	97
	BIBLIOGRAFIA .....	98

### *Indice Figure*

Figura 1:	sistema lenti mobili per dimensine laser emesso .....	16
Figura 2:	sistema specchi per direzionamento de laser .....	17
Figura 3:	distributore di polvere IN718 .....	17
Figura 4:	trattamenti termici [7].....	19
Figura 5:	trattamenti termici per IN718 .....	20
Figura 6:	forno per trattamento termico di invecchiamento provini.....	20
Figura 7:	suddivisione provini .....	21
Figura 8:	sistema di riferimento provini .....	22
Figura 9:	provini forniti da Sophia High Tech .....	22
Figura 10:	indentatore piramidale e misura diagonali dell'impronta per calcolo durezza Vickers.....	24
Figura 11:	schermate acquisizione dati da software di laboratorio .....	27
Figura 12:	andamento dati sperimentali per i sette provini.....	33
Figura 13:	differenza andamento durezza Vickers in provini invecchiati e non.....	35
Figura 14:	grafici per studio fitting lineare .....	37
Figura 15:	andamento / dispersione coefficienti modello analitico.....	38
Figura 16:	grafici per studio fitting polinomiale .....	41
Figura 17:	deviazione standard percentuale .....	42
Figura 18:	andamento / dispersione coefficienti modello analitico.....	43
Figura 19:	grafici per studio fitting logaritmico .....	45
Figura 20:	deviazione standard percentuale .....	46
Figura 21:	andamento / dispersione coefficienti modello analitico .....	47
Figura 22:	andamenti sperimentali vs andamenti lineare polinomiale e logaritmico ottenuti da coefficienti mediati sui sette provini.....	48
Figura 23:	andamenti sperimentali vs andamenti lineare polinomiale e logaritmico ottenuti da coefficienti mediati sui sette provini (invecchiati) .....	49
Figura 24:	grafico tenione - deformazione provino C2.....	50
Figura 25:	andamento coefficiente angolare k in funzione del carico di indentazione in grammi per risalire alla tensione di snervamento partendo dalla durezza .....	51
Figura 26:	parametri di processo della fabbricazione additiva .....	52
Figura 27:	andamenti polinomiali di terzo grado per provini non invecchiati per correlare Rp02 a carico di indentazione .....	58

Figura 28: andamenti polinomiali di secondo grado per provini non invecchiati per correlare Rp02 a carico di indentazione .....	60
Figura 29: andamento durezza Vickers e tensione snervamento per i sette provini al variare del parametro di densità energetica .....	61
Figura 30: impronta deformata e diagonali d1 e d2.....	62
Figura 31: : andamento durezza Vickers e tensione snervamento per i sette provini invecchiati al variare del parametro di densità energetica .....	63
Figura 32: durezza al variare di velocità avanzamento laser e carico indentazione per p= 192 W .....	65
Figura 33: durezza al variare di velocità avanzamento laser e carico indentazione per P=230 W .....	66
Figura 34: : parametri di processo della fabbricazione additiva .....	66
Figura 35: tre + quattro curve note di durezza in funzione del carico in grammi parametrizzate per diversi valori di velocità avanzamento laser .....	68
Figura 36: superfici passanti per le tre + quattro curve note .....	70
Figura 37: interfaccia Matlab - utente: dati in ingresso e dati in uscita .....	70
Figura 38: superfici più valore specifico corrispondente alle coordinate inserite da tastiera .....	71
Figura 39: grafico coeff. angolare Rp02/HV al variare del carico di indentazione .....	85
Figura 40: andamenti polinomiali di terzo grado per snervamento in funzione del carico di indentazione ..	88
Figura 41: riepilogo R <sup>2</sup> per ognuno dei sette provini.....	88
Figura 42: andamenti polinomiali di secondo grado per snervamento in funzione del carico di indentazione .....	91
Figura 43: calcolo coefficiente geometrico a .....	93
Figura 44: carico indentatura <b>50g</b> .....	94
Figura 45: carico indentatura <b>200g</b> .....	94
Figura 46: carico indentatura <b>500g</b> .....	94
Figura 47: carico indentatura <b>1000g</b> .....	95

#### *Indice Tabelle*

Tabella 1: parametri di processo di fabbricazione additiva.....	23
Tabella 2: report dati da software di microdurometro Innovatest .....	27
Tabella 3: AZZURRO: dati per provini non trattati termicamente; VERDE dati per provini invecchiati .....	31
Tabella 4: durezza Vickers mediati .....	31
Tabella 5: studio modello lineare per ognuno dei sette provini .....	38
Tabella 6: studio modello polinomiale di secondo grado per ciascuno dei sette provini .....	41
Tabella 7: studio modello logaritmico per ciascuno dei sette provini .....	46
Tabella 8: riepilogo R <sup>2</sup> per ciascuno dei tre fitting .....	48
Tabella 9: prove di trazione su provino C2 .....	50
Tabella 10: correlazione durezza tensione snervamento con coefficiente angolare k .....	51
Tabella 11: riepilogo durezza al variare del carico di indentazione e dei parametri di processo per i sette provini non trattati e per i sette provini invecchiati.....	53
Tabella 12: calcolo tensioni di snervamento per i provini di cui non si dispone dell'Rp02 .....	55
Tabella 13: riepilogo parametri di processo provini.....	60
Tabella 14: riepilogo durezza e tensioni di snervamento ottenute per i sette provini non trattati termicamente .....	61
Tabella 15: riepilogo durezza e tensioni di snervamento ottenute per i sette provini trattati termicamente	63
Tabella 16: riepilogo durezza snervamento e coefficiente angolare .....	85
Tabella 17: risultati ottenuti da modello Matlab .....	93





## INTRODUZIONE

### 1.1- Oggetto della ricerca

I materiali realizzati in Additive Manufacturing (AM) a parità di composizione metallografica hanno proprietà meccaniche diverse da quelle ottenibili da fabbricazione convenzionale e per avere una caratterizzazione del componente realizzato in AM potrebbe essere pratico fare prove semplici, poco costose e non distruttive come quelle di durezza e microdurezza.

Tuttavia, questo tipo di prova restituisce risultati variabili con la procedura di indentazione, fenomeno che sarà oggetto di studio di questo elaborato per quanto riguarda provini in Inconel 718, lega dalle ottime proprietà termomeccaniche, di resistenza alla corrosione e all'ossidazione fino a temperature di oltre 700 °C.

In effetti, la produzione di componenti in questa lega con i metodi di lavorazione convenzionali potrebbe essere difficile a causa dell'eccessiva usura degli utensili e dei bassi tassi di rimozione del materiale per la lavorazione a temperatura ambiente. La sfida e la necessità di impiegare metodi di produzione avanzati sono ancora più evidenti per la fabbricazione di componenti complessi in Inconel 718, come pale di turbine con canali di raffreddamento interni o ulteriori componenti che concorrono alla refrigerazione o numerosi ugelli degli iniettori dei motori a razzo a liquido.

A tal proposito si pensa possa essere utile uno studio mirato delle proprietà meccaniche di questo materiale in funzione dei parametri di processo della fabbricazione additiva, studio che tenga altresì conto delle insidie legate al tipo di prova adottata in questo caso.

### 1.2- Obiettivo della ricerca

Il lavoro di seguito proposto ha come obiettivo la rilevazione sperimentale, l'analisi e la successiva discussione dell'andamento della microdurezza e in modo indiretto delle sue proprietà meccaniche, su provini in Inconel 718 depositato mediante Additive Manufacturing.

I provini processati sono stati realizzati dalla start up Sophia High Tech (NA) in Additive Manufacturing che si ringrazia per la collaborazione per poi essere analizzati presso il laboratorio di Meccanica del Dipartimento di Ingegneria Meccanica ed Aerospaziale del Politecnico di Torino (DIMEAS).

Ulteriore scopo del progetto di ricerca è stata la stima delle proprietà meccaniche a trazione a partire dalle misure di durezza. Si ricorda infatti che la durezza di indentazione, ossia il rapporto tra il carico applicato e l'area residua di contatto dell'impronta, fornisce una stima della resistenza del materiale alla deformazione plastica ed è considerata come una misura indiretta di tale proprietà.

### 1.3- Organizzazione della tesi

In particolare, dopo aver descritto le proprietà della lega, il trattamento termico di invecchiamento e la tecnica realizzativa in additive manufacturing della stessa, a valle delle prove di microdurezza, sarà analizzato studiato e modellizzato un fenomeno noto come Indentation Size Effect (ISE) secondo cui la micro-durezza sembrerebbe aumentare al diminuire della larghezza dell'impronta lasciata dall'indentatore piramidale quindi al diminuire del carico applicato.

I dati sperimentali acquisiti in laboratorio saranno analizzati e processati inizialmente con supporto grafico e analitico di Excel da cui sarà possibile interpretarne gli andamenti e cercare la migliore

approssimazione possibile tra quella lineare, polinomiale di secondo grado e logaritmica. In questo modo si disporrà del miglior modello analitico possibile che consentirà di riprodurre più o meno fedelmente l'insieme dei dati sperimentali acquisiti.

Validato il modello analitico più adeguato tra quelli proposti, seguirà la stesura di un codice in ambiente Matlab ideato per avere una stima della durezza della lega e poi, in un successivo sviluppo del codice, una stima di altre proprietà meccaniche come la tensione di snervamento del componente. I dati in ingresso da fornire allo script saranno velocità di avanzamento e potenza del laser sintetizzabili nella sola densità energetica del laser e si potrà tener conto dell'ISE fornendo altresì al codice diversi valori di carico con cui si vuole indentare il provino.

# 1- STATO DELL'ARTE

## 2.1 Inconel 718

L'Inconel 718 (IN718) è una superlega di Nichel-Cromo indurita per precipitazione di seconda fase contenente quantità significative di Fe, Co e Mo, oltre a quantità minori di Al e Ti e Nb disciolti nella matrice. La precipitazione delle fasi secondarie è indotta dal trattamento termico nell'intervallo di temperatura 620 °C - 760 °C. È altresì necessario evitare la formazione di altre fasi ( $\delta$ -Ni<sub>3</sub>Nb) per le quali non si verificherebbe la corretta precipitazione e non si verificherebbe la piena resistenza della lega [1].

La segregazione del Nb durante il processo di produzione ad alta temperatura porta alla formazione di seconde fasi dannose per la resistenza, la duttilità, la fatica e le proprietà di rottura per scorrimento del materiale, in quanto impoverisce gli elementi principali necessari per il rafforzamento per precipitazione e favorisce la facile iniziazione e propagazione delle cricche. L'invecchiamento eccessivo durante il trattamento termico o l'esposizione prolungata alle alte temperature ne riducono pertanto la resistenza.

Numerosi studi hanno esaminato la microstruttura dell'Inconel 718 AM per diversi processi Metal Manufacturing in condizioni " as-deposited " e post-trattamento termico. La struttura generata dopo il processo AM dipende dalle direzioni locali del flusso di calore e a seconda dei parametri di processo, come l'input di potenza e la strategia di scansione, per l'AM dell'Inconel 718 sono state classificate una gamma di texture che vanno da quella a cubo a quella a fibre fino a una texture casuale. Alcune di queste possono essere preferite per le applicazioni di creep-fatica ad alta temperatura e che la struttura può essere utilizzata come parametro di progettazione per lo sviluppo di proprietà adatte al carico specifico.

Un'altra tipica caratteristica osservata nella microstruttura dell'Inconel 718 AM a base di polveri è la porosità. In generale, per le leghe AM, un problema importante per l'accettazione del prodotto finale è la densità (porosità) e/o la presenza di cricche. I pori di forma circolare si formano solitamente a causa dell'intrappolamento di gas nel metallo fuso, mentre i pori di forma irregolare "a mancanza di fusione" sono attribuiti alla fusione incompleta del materiale durante il processo di fabbricazione. Le cricche, invece, hanno origine da tensioni residue indotte dall'AM o come conseguenza di cricche da solidificazione o da liquefazione. La microstruttura dell'Inconel 718 AM varia tipicamente lungo l'altezza dell'edificio a causa del profilo termico dipendente dall'altezza sperimentato dalle diverse parti dell'edificio. A causa del contatto diretto con la piastra del substrato di costruzione, di solito si ottiene una velocità di raffreddamento maggiore per gli strati inferiori. Pertanto, gli strati superiori presentano dendriti colonnari più grossolane rispetto a quelle degli strati inferiori.

## 2.2 Selective Laser Manufacturing (SLM) in Additive Manufacturing

La fabbricazione additiva dei metalli (Metal Additive Manufacturing MAM) è un metodo di produzione avanzato che consente di costruire parti tridimensionali, strato per strato, a partire da materie prime in polvere o in filo, con una buona precisione e direttamente da un modello CAD del computer, senza alcuna attrezzatura ausiliaria. In genere, si utilizza un laser o un fascio di elettroni per fondere o sinterizzare (selettivamente) il materiale di partenza. Rispetto ai metodi di produzione tradizionali, le MAM presentano diversi vantaggi, come la possibilità di fabbricare componenti di forma complessa con geometrie che non possono essere prodotte in modo convenzionale, il miglioramento del ciclo di produzione e la capacità di fabbricare piccoli lotti di pezzi in tempi brevi e con un basso investimento finanziario, talvolta il risparmio dei costi grazie all'ottimizzazione dell'uso dei materiali e la fabbricazione di pezzi classificati funzionalmente. Questi vantaggi rendono le MAM interessanti per un'ampia gamma di settori, tra cui quello aerospaziale, dei trasporti, della difesa e biomedico. La buona saldabilità dell'Inconel 718, dovuta al suo basso contenuto di alluminio e titanio è vantaggiosa per le MAM.

Le tecniche AM possono essere classificate in base al tipo di materia prima (polvere o filo) e alla fonte di energia utilizzata (laser o fascio di elettroni). Per l'Inconel 718 sono stati utilizzati diversi metodi MAM: deposizione laser diretta (Direct Laser Deposition DLD), deposizione diretta con fascio di elettroni (Direct Electron Beam (wire) Deposition DEBD), fusione laser selettiva (Selective Laser Melting SLM) e fusione con fascio di elettroni (Electron Beam Melting EBM) [2].

I provini processati per lo sviluppo di questa ricerca sono stati realizzati in Selective Laser Manufacturing SLM, tecnica che offre una libertà di progettazione quasi incontrastata, elevata precisione dimensionale, buona integrità superficiale e minimo scarto di materiale. Nel processo SLM, un raggio laser ad alta energia (continuo o pulsato) viene utilizzato per fondere un sottile strato di polvere metallica in un'atmosfera di gas inerte, secondo le informazioni fornite da un apposito file CAD. Dopo la rapida solidificazione del bagno di fusione, viene depositato un nuovo strato di polvere e nuovamente esposto al laser. Questo processo viene ripetuto fino alla completa costruzione del pezzo [2].

### 2.2.1 Parametri di processo Selective Laser Melting e microstruttura derivante

In generale, la velocità di raffreddamento del metallo fuso per i processi AM è elevata e, di conseguenza, la microstruttura è di uno o due ordini di grandezza inferiore a quella dei materiali fusi.

È quindi chiaro che parametri di processo, come l'apporto di calore, la velocità di scansione e la strategia di scansione, influenzano la microstruttura della lega. L'influenza della potenza della fonte di calore (P) è stata studiata principalmente in combinazione con la velocità dell'utensile e della scansione (V) e mediante il parametro della Densità di Energia Lineare (LED).

$$\eta = a * P/V$$

Il parametro LED influisce significativamente sulle dimensioni e sulla forma del bagno di fusione e sulle caratteristiche microstrutturali dell'Inconel 718 AM: un LED più elevato determina un bagno di fusione più grande e più caldo mentre la riduzione del LED porta a cambiamenti successivi nella microstruttura, che passa da una forte struttura colonnare grossolana a una raffinata struttura a

grani equiasiali con una struttura quasi casuale. Tuttavia, un basso livello di LED potrebbe aumentare la porosità e diminuire la densità della lega [2].

Anche l'integrità della superficie delle costruzioni AM in Inconel 718 è fortemente influenzata dai LED. Con un LED troppo basso, le tracce di scansione sono discontinue e la superficie contiene sfere di grandi dimensioni circondate da pori aperti. L'aumento del LED porta ad un aumento della temperatura del bagno di fusione ottenendo una superficie sana con pori o sfere minime. L'aumento del LED a questo regime aumenta la media e l'uniformità della microdurezza, migliora la resistenza all'usura e aumenta la densificazione della lega AM. È stato riferito che la maggiore densificazione migliora anche la resistenza all'ossidazione ad alta temperatura della lega. Un ulteriore aumento dei LED, tuttavia, comporta una significativa diminuzione della viscosità del metallo fuso e un aumento del moto di turbolenza nel bagno di fusione. Di conseguenza, vengono intrappolate numerose bolle che determinano una grande quantità di porosità residua e il livello di densificazione torna ad abbassarsi. L'insieme ottimale dei parametri di processo per componenti diversi con geometrie diverse può essere diverso e i produttori di macchine AM, come Arcam, hanno sviluppato algoritmi di lavorazione che decidono i parametri di lavorazione in base alla geometria del pezzo.

### 2.3 Indentation size effect

Come già accennato nel capitolo introduttivo la durezza di indentazione HV, ossia il rapporto tra il carico applicato e l'area residua di contatto dell'impronta, rappresenta una rapida stima della resistenza del materiale alla deformazione plastica ed è considerata una misura indiretta della resistenza di un materiale. A differenza del limite di snervamento uniassiale, l'HV non è un valore costante e varia in funzione della geometria del penetratore e del carico di indentazione [3].

Nel caso di penetratori piramidali come quelli usati durante le prove sperimentali di cui si parlerà nei prossimi capitoli, si osserva comunemente che la durezza Vickers HV diminuisce all'aumentare del carico di indentazione, fenomeno conosciuto con il nome di Indentation Size Effect ossia effetto della dimensione di indentazione (ISE). Di conseguenza, il vero valore di HV rimane sempre discutibile e un gran numero di studi è stato dedicato alla comprensione delle origini dell'ISE in vari materiali.

L'entità dell'ISE dipende dalle scale di lunghezza microstrutturali intrinseche presenti nel materiale, generalmente attribuite alla presenza di un elevato gradiente di deformazione plastica, di un grande recupero elastico a bassi carichi di indentazione, di meccanismi di incrudimento sotto l'indentazione, di cricche sotto la superficie, di elevate sollecitazioni di nucleazione delle dislocazioni [3].

Oltre a comprendere i meccanismi associati all'ISE sono stati condotti diversi studi per capire il fenomeno dell'ISE con l'aiuto di modelli empirici o semi-empirici. La maggior parte di questi modelli utilizza parametri di indentazione come il carico di indentazione, le dimensioni dell'impronta e la profondità di penetrazione per descrivere l'ISE [4]. Il modello di Nix/Gao, per esempio, propone un metodo di correzione dell'effetto dimensionale dell'indentazione, assumendo che le dislocazioni geometricamente necessarie siano immagazzinate all'interno del volume deformato plasticamente. Utilizzando questo volume per calcolare la dipendenza dalla profondità della durezza e la scala caratteristica della lunghezza di indentazione, si è trovato un buon accordo con gli esperimenti per molti materiali metallici [5].

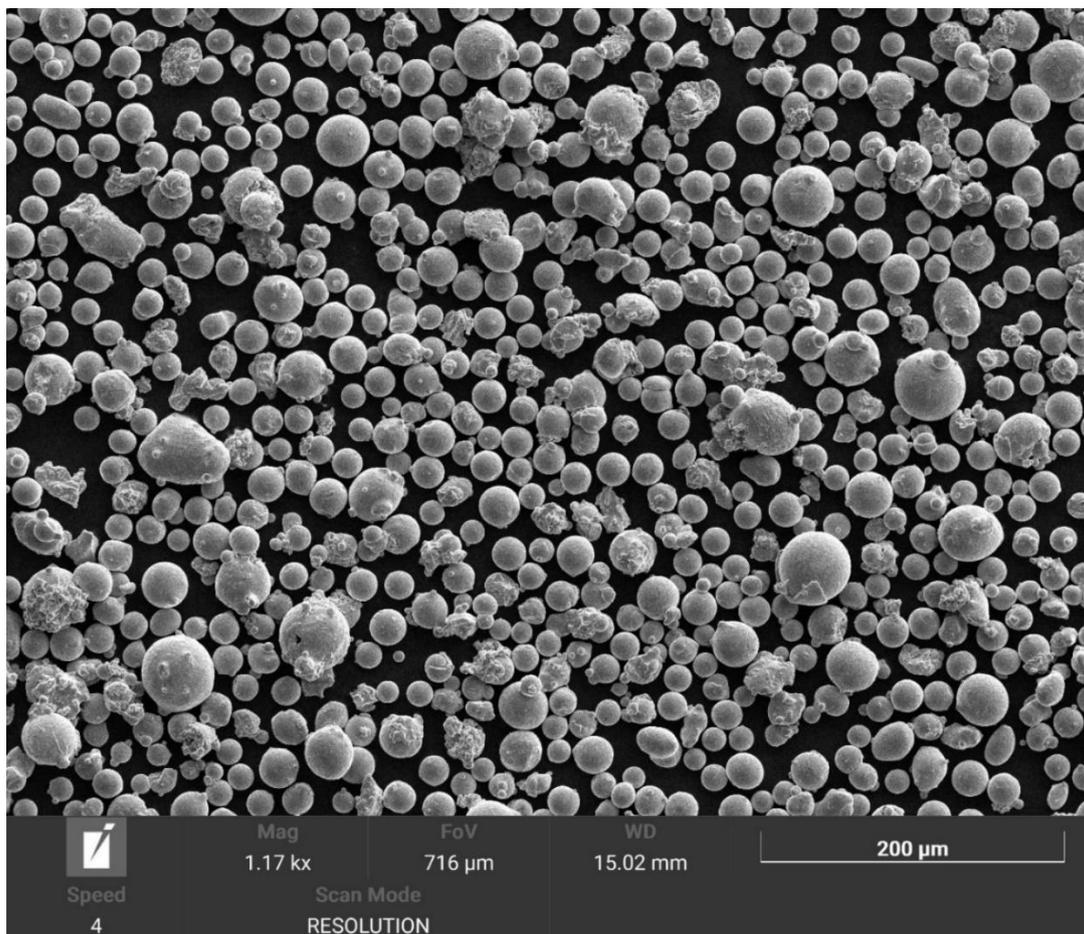
Tuttavia, lo studio presentato con il presente elaborato non propone modelli correttivi bensì si limita alla constatazione del fenomeno a partire dall'acquisizione in laboratorio delle dimensioni delle diagonali  $d_1$  e  $d_2$ , da cui la larghezza dell'impronta lasciata dall'indentatore. Segue quindi il calcolo dei MPa applicati dal microdurometro sulla superficie del provino per fornire un'analisi analitica e strutturale dei risultati ottenuti, interrogandosi sulle zone deformate plasticamente, sui meccanismi di incrudimento al disotto dell'impronta deformata, sulla presenza di porosità e sull'eventuale presenza di fattori che possano contribuire a favorire o ridurre l'ampiezza dell'orma lasciata dall'indentatore.

## 2- MATERIALI E METODI

### 3.1 Polvere Inconel 718

Prima di procedere con le prove sperimentali vere e proprie si fornisce una breve analisi delle polveri condotta presso il SEM, Selective Electron Microscope, per avere un'idea di quello che fosse il materiale di partenza per la fabbricazione additiva e per conoscerne la granulometria.

Si allegano di seguito alcune immagini più significative che mostrano la granulometria della polvere acquisite al microscopio elettronico SEM.





Dalle immagini ci si rende conto di quanto fine possa essere la granulometria di queste polveri. Siamo nell'ordine di pochi micrometri e benché sembri trattarsi di una polvere piuttosto omogenea non si può escludere che tutto ciò che si discosta dalla tipica forma sferica del granello di polvere possa poi avere ripercussioni sulla fusione ad opera del laser in fase di fabbricazione additiva di cui ci si accinge a discutere.

### 3.2 Tecnica di Fabbricazione Additiva: Selective Laser Melting SLM

Per la tecnica SLM di AM utilizzata da Sophia High Tech per la realizzazione dei provini in IN718 si utilizza un laser con un valore medio di potenza di circa 200W. Il fascio laser, di circa 0,8 mm di diametro, viene guidato attraverso opportune fibre ottiche e focalizzato sul letto di polveri.

Il laser viene guidato nelle direzioni x e y (parallele al piano del letto di polveri) dal computer seguendo il modello CAD fornito, poi un pistone di acciaio, sul quale è attaccato il substrato sul quale lo strato di polvere viene steso, si abbassa di una lunghezza pari allo spessore di uno strato (0,05 o 0,1 mm) in direzione z (perpendicolare al piano del letto di polveri), ogniqualvolta che una sezione viene completata prima della deposizione dello strato successivo [6]. Anche in questo caso la camera in cui il processo avviene è riempita con un gas inerte, solitamente argon. La piattaforma d'appoggio sulla quale è fabbricato il pezzo viene riscaldata a circa 90 °C e mantenuta a temperatura circa costante per tutta la durata del processo per attenuare i gradienti termici che si vengono a creare. Sebbene la velocità di raffreddamento del materiale sia più elevata nel processo di SLM rispetto a quello di EBM, per molti dei materiali trattati con queste tecnologie non si osservano significative differenze microstrutturali almeno per quanto riguarda le fasi presenti, tuttavia il rischio di introdurre cricche nel materiale è maggiore in un processo SLM.

Il processo Selective Laser Melting:

- Un raggio laser colpisce un sottile strato di polvere metallica e salda selettivamente le particelle tra loro.
- Viene applicato un nuovo strato di polvere e la piattaforma di costruzione viene abbassata in misura pari allo spessore di uno strato.
- Al termine dell'intero processo, la polvere non utilizzata viene rimossa e rimane il componente finito.

In questo modo si costruiscono componenti complessi strato per strato.

Il percorso del raggio laser:

- La luce laser viene prodotta nelle unità laser che di solito si trovano nella parte inferiore della macchina (SLM Solutions Group [5]).
- I cavi in fibra ottica guidano il raggio laser verso l'unità ottica.
- L'unità ottica ottimizza continuamente l'ampiezza del fascio laser attraverso lenti mobili.

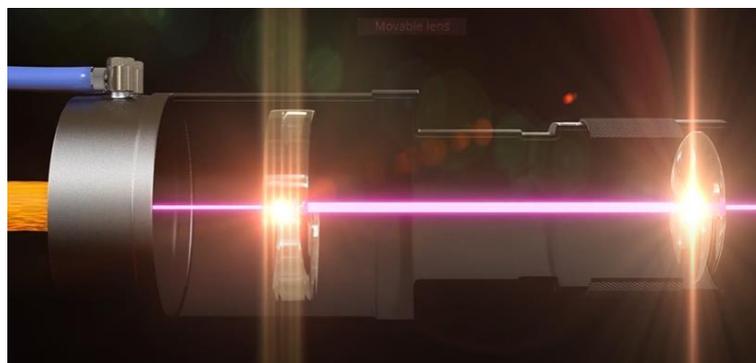
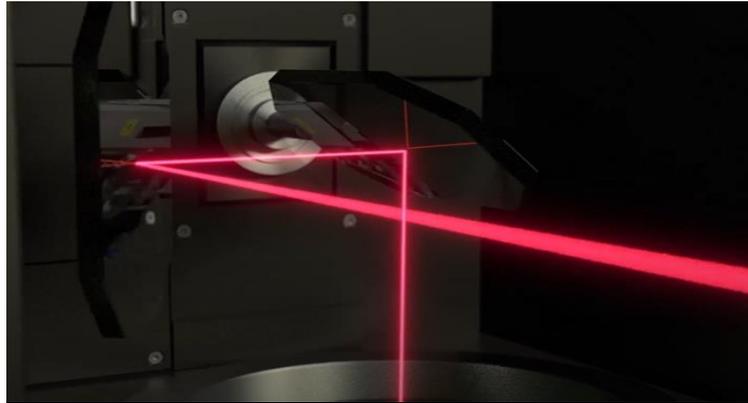


Figura 1: sistema lenti mobili per dimensine laser emesso

- Due specchi di regolazione all'interno della testa di scansione controllano la direzione del raggio laser.

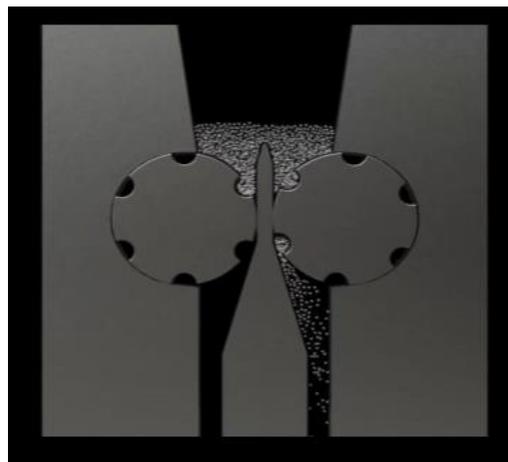


*Figura 2: sistema specchi per direzionamento de laser*

- 1) Il fascio laser viene indirizzato nella camera di costruzione dove incontra la polvere metallica.

Il percorso della polvere

- Le polveri metalliche vengono immesse nel sistema da contenitori di plastica.
- La polvere viene trasportata tramite tubazioni a un'unità di setacciatura.
- Dopo la setacciatura, la polvere viene trasportata all'unità di distribuzione che fornisce la giusta quantità di polvere necessaria per ogni strato.



*Figura 3: distributore di polvere IN718*

## Parametri di processo

In generale, la velocità di raffreddamento del metallo fuso per i processi AM è elevata e, di conseguenza, la microstruttura è di uno o due ordini di grandezza inferiore a quella dei materiali fusi.

È quindi chiaro che parametri di processo, come l'apporto di calore, la velocità di scansione e la strategia di scansione, influenzano la microstruttura della lega. L'influenza della potenza della fonte di calore ( $P$ ) è stata studiata principalmente in combinazione con la velocità dell'utensile e della scansione ( $V$ ) e mediante il parametro della Densità di Energia Lineare (LED)  $\eta = a * P/V$  con  $a$  coefficiente moltiplicativo legato ai parametri di laser e dello strato fuso. Il parametro LED influisce significativamente sulle dimensioni e sulla forma del bagno di fusione e sulle caratteristiche microstrutturali dell'Inconel 718 AM: un LED più elevato determina un bagno di fusione più grande e più caldo mentre la riduzione del LED porta a cambiamenti successivi nella microstruttura, che passa da una forte struttura colonnare grossolana a una raffinata struttura a grani equiassiali con una struttura quasi casuale. Tuttavia, un basso livello di LED potrebbe aumentare la porosità e diminuire la densità della lega [2].

Anche l'integrità della superficie delle costruzioni AM in Inconel 718 è fortemente influenzata dai LED. Con un LED troppo basso, le tracce di scansione sono discontinue e la superficie contiene sfere di grandi dimensioni circondate da pori aperti. L'aumento del LED porta ad un aumento della temperatura del bagno di fusione ottenendo una superficie sana con pori o sfere minime. L'aumento del LED a questo regime aumenta la media e l'uniformità della microdurezza, migliora la resistenza all'usura e aumenta la densificazione della lega AM. È stato riferito che la maggiore densificazione migliora anche la resistenza all'ossidazione ad alta temperatura della lega. Un ulteriore aumento dei LED, tuttavia, comporta una significativa diminuzione della viscosità del metallo fuso e un aumento del moto di turbolenza nel bagno di fusione. Di conseguenza, vengono intrappolate numerose bolle che determinano una grande quantità di porosità residua e il livello di densificazione torna ad abbassarsi. L'insieme ottimale dei parametri di processo per componenti diversi con geometrie diverse può essere diverso e i produttori di macchine AM, come Arcam, hanno sviluppato algoritmi di lavorazione che decidono i parametri di lavorazione in base alla geometria del pezzo.

### 3.4 Trattamento termico

Si riporta un estratto di documentazione AMS che elenca i principali trattamenti termici per i materiali adottati in ambito aerospaziale.

 An SAE International Group	<b>AEROSPACE MATERIAL SPECIFICATION</b>	<b>SAE AMS2773</b>	<b>REV. E</b>
		Issued 1999-01 Revised 2013-02	
		Superseding AMS2773D	
Heat Treatment Cast Nickel Alloy and Cobalt Alloy Parts			

#### RATIONALE

AMS2773E results from a Limited Scope Ballot to correct a referenced gas standard (3.1.2.3.2.2).

#### 1. SCOPE

##### 1.1 Purpose

This specification specifies the engineering requirements for heat treatment, by part fabricators (users) or their vendors or subcontractors, of parts made of cast nickel or cobalt alloys and of fabricated assemblies in which cast nickel or cobalt alloys are the primary structural components. It is not intended to provide requirements for heat treating operations that are a responsibility of the casting supplier in meeting the requirements of the casting commodity specification.

##### 1.2 Application

###### 1.2.1 Alloys

Detailed heat treating instructions are specified for the age-hardenable (precipitation-hardenable) and non-age-hardenable alloys listed in 8.2. However, this specification also may be used for alloys other than those listed in 8.2 provided that temperatures, soaking times, and cooling requirements are specified by the cognizant engineering organization.

###### 1.2.2 Heat Treatments

Heat treatments covered by this specification are as follows:

Homogenization (See 8.4.6)

Solution Treating (See 8.4.7)

Stabilization (See 8.4.9)

Precipitation (See 8.4.10)

Stress Relief (See 8.4.8)

Figura 4: trattamenti termici [7]

L'indurimento per precipitazione di seconda fase si ottiene con trattamento termico di invecchiamento ottenuto riscaldando i provini a 720°C il più velocemente possibile, temperatura mantenuta per 8 h, per poi procedere a due raffreddamenti, il primo in 2 h per raggiungere 620°C, temperatura mantenuta per 8 h, il secondo realizzato lasciando i provini a temperatura ambiente.

In effetti l'Inconel 718 (IN718) è una superlega di Nichel-Cromo indurita per precipitazione di seconda fase contenente quantità significative di Fe, Co e Mo, oltre a quantità minori di Al e Ti e Nb disciolti nella matrice. La precipitazione delle fasi secondarie è indotta dal trattamento termico nell'intervallo di temperatura 620 °C-760 °C. È altresì necessario evitare la formazione di altre fasi ( $\delta$ -Ni<sub>3</sub>Nb) per le quali non si verificherebbe la corretta precipitazione e non si realizzerà la piena resistenza della lega [1].

La segregazione del Nb durante il processo di produzione ad alta temperatura porta alla formazione della fase di Laves dannosa per la resistenza, la duttilità, la fatica e le proprietà di rottura per scorrimento del materiale, in quanto impoverisce gli elementi principali necessari per il rafforzamento per precipitazione e favorisce la facile iniziazione e propagazione delle cricche.

L'invecchiamento eccessivo durante il trattamento termico o l'esposizione prolungata alle alte temperature ne riducono pertanto la resistenza.

TABLE 3 - HEAT TREATMENT OF AGE-HARDENABLE CAST NICKEL ALLOY AND COBALT ALLOY PARTS

Casting Alloy	Applicable AMS	Purchased Condition <sup>1</sup>	Solution Set Temperature <sup>2</sup>	Precipitation Set Temperature <sup>2</sup>	Other Treatments Set Temperature <sup>2</sup>
INCONEL® Alloy 713	AMS5377	As cast	Not applicable	Not applicable	Stress relief 1600 °F (871 °C) Hold 2 hours - AC
INCONEL® Alloy 718	AMS5383	Homogenization and solution heat treated	Select temperature in the range 1750 to 1800 °F (954 to 982 °C) Hold 1 hour minimum - AC	1325 °F (718 °C) Hold 8 hours Furnace cool to 1150 °F (621 °C) and hold at 1150 °F (621 °C) for total precipitation time of 18 hours - AC	Homogenization <sup>3</sup> 2000 °F (1093 °C) Hold 1 to 2 hours - AC

Figura 5: trattamenti termici per IN718

Si riportano inoltre due immagini relative al trattamento termico di invecchiamento.



Figura 6: forno per trattamento termico di invecchiamento provini

### 3.5 Macchinari utilizzati

Si procede con la descrizione delle macchine di laboratorio utilizzate per le prove sperimentali.

- Levigatrice: al fine di ottenere provini conformi alle prove di microdurezza è stato necessario levigare i provini fino ad ottenere superfici lucide e possibilmente prive di ulteriori difetti macroscopici. In particolare, è stato sufficiente ricorrere alle carte abrasive nel seguente ordine di granulometria 250, 1000 e 4000.
- Microdurometro: la Rupac Innovatest è la macchina effettivamente impiegata per effettuare le prove di microdurezza. Questa è principalmente composta da:
  - 1) testa operatrice con mandrino multifunzione dotata di indentatore e due sistemi di lenti per zoom 10x e 40x.
  - 2) Base cartesiana con sistema manuale vite madrevite per movimentazione slitta lungo le tre direzioni di un sistema di riferimento con piano XY sulla slitta e asse z uscente dalla slitta verso il mandrino;
  - 3) Schermo per visualizzazione dati di processo;
  - 4) Computer per elaborazione e salvataggio dati;

### 3.6 Metodo test

I campioni su cui sono stati effettuati i test sono stati forniti da Sophia High Tech, Sant'Alessandra (NA). Si tratta di una raccolta ordinata di campioncini divisa sostanzialmente in una metà post invecchiamento e l'altra di provini non trattati.

Per comprendere la suddivisione dei provini all'interno della scatola bisogna immaginare che il pezzo iniziale di superlega è stato diviso in quattro spicchi A B C D come mostrato in figura ciascuno dei quali è stato poi tagliato in altri sette pezzetti a distanze differenti dal centro A1 A2 ... A7, B1 B2 ... B7, ...C7, ...D7. In questo modo sono stati ottenuti ventotto provini ciascuno dei quali da suddividere in due metà in modo tale da poterne trattare ventotto termicamente.

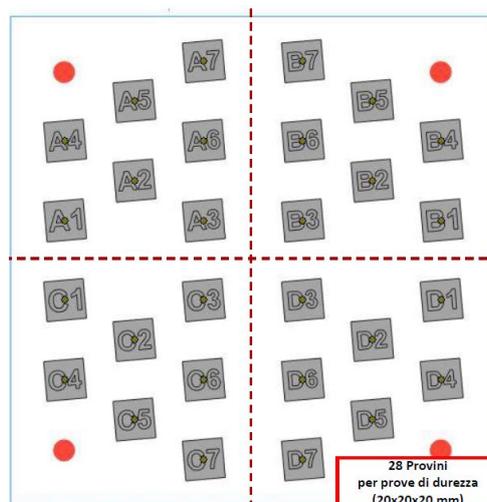


Figura 7: suddivisione provini

I provini scelti per le prove di micordurezza sono C1, C2 ... C7 e C1TT, C2TT ... C7TT; la scelta è stata completamente casuale. Si noti fin da subito che, come si discuterà a valle della descrizione delle prove sperimentali, la distanza dal centro potrebbe giocare un ruolo importante nell'analisi dei risultati ottenuti, o per lo meno ci si potrebbe aspettare una qualche dipendenza della durezza della superlega al variare di tale parametro.

### 3.6.1 Sistema di riferimento solidale al provino:

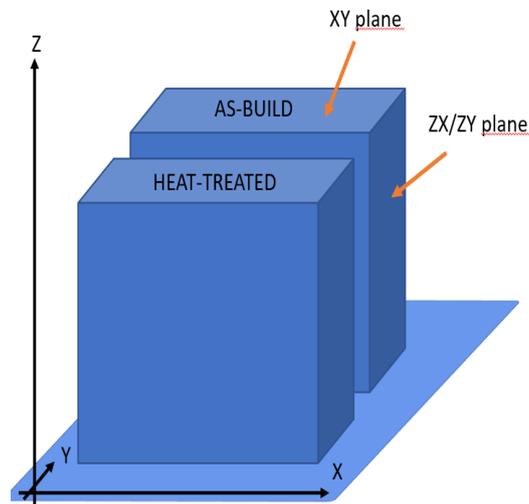


Figura 8: sistema di riferimento provini

Il sistema di riferimento SR relativo al provino serve per orientarsi con le sezioni che si desidera testare. Nei capitoli successivi si vedrà che la sezione orizzontale ossia la sezione parallela al piano di deposizione delle polveri che verranno fuse dal laser, ha caratteristiche meccaniche molto più performanti delle sezioni verticali dei provini. Per dare un'idea si dispone di  $R_{p02} = 530 \text{ Mpa}$  tirando il provino nella direzione x (o y) del SR ed  $R_{p02} = 730 \text{ Mpa}$  tirando in direzione z

### 3.6.2 Preparazione provini

Prima di procedere all'indentatura delle superfici dei campioncini è stato necessario crearsi un sistema di riferimento sugli stessi che consentisse di ritrovare con relativa semplicità le indentature lasciate durante l'esecuzione dei test. E' stato sufficiente marcare ciascun campioncino con una freccia che indicasse l'ordine crescente del carico. Per evitare di confondere tra loro i provini, anche nella successiva fase di levigatura, si è preferito scrivere la loro dicitura sulla stessa faccia contenente la freccia come mostrato in figura.



Figura 9: provini forniti da Sophia High Tech

Si riportano inoltre i parametri di processo utilizzati da Sophia High Tech per la realizzazione dei provini gentilmente forniti per le attività di ricerca condotte presso il DIMEAS.

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>		<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>C7</b>
P [W]	192	192	192	P [W]	230	230	230	230
v [mm/s]	400	600	800	v [mm/s]	500	600	700	900
rho [J/mm <sup>3</sup> ]	152	101	76	rho [J/mm <sup>3</sup> ]	146	121	104	81

*Tabella 1: parametri di processo di fabbricazione additiva*

I due parametri reali sono potenza laser in Watt e velocità avanzamento laser in mm/s. Il parametro densità energetica è un parametro di sintesi ed è proporzionale alla potenza ed inversamente proporzionale alla velocità con cui il laser fonde le polveri.

### 3.6.3 Levigatura provini

Si procede quindi alla levigatura delle superfici da indentare. A tal proposito si precisa che si è scelto di lavorare sul piano XZ del precedente sistema di riferimento che come si vedrà taglia una sezione più critica rispetto a quella orizzontale.

Le quattordici superfici, sette per i provini trattati termicamente e sette per quelli non trattati, sono state prima sgrossate con una carta abrasiva più ruvida e grossolana, la 250, poi con la carta da 1000 e per ultima la 4000 in modo da ottenere una lucidatura a specchio rimuovendo in ottima parte i difetti superficiali dovuti ad altre prove o ad altri segni di usura.

### 3.6.4 Test microdurezza

Dopo la levigatura si procede all'indentatura dei provini per registrarne la micro-durezza. Questa proprietà è stata rilevata per ogni provino al variare del carico.

Trattandosi di micro-durezza si sono scelti cinque valori di carico espresso in grammi fino ad un massimo di 1kg per registrare la durezza Vickers ottenuta: 25g 50g 200g 500g e 1000g mentre per avere un numero di dati per lo meno significativo si è scelto di ripetere delle prove un minimo di 5 volte: in questo modo sono state eseguite per ogni campione venticinque indentature.

Per ognuno dei cinque carichi applicati al provino sono state acquisite e salvate le altrettante cinque misure di durezza elaborate dal calcolatore dopo aver riposizionato manualmente i cursori per il calcolo delle diagonali da cui l'area di deformazione plastica e la durezza derivante.

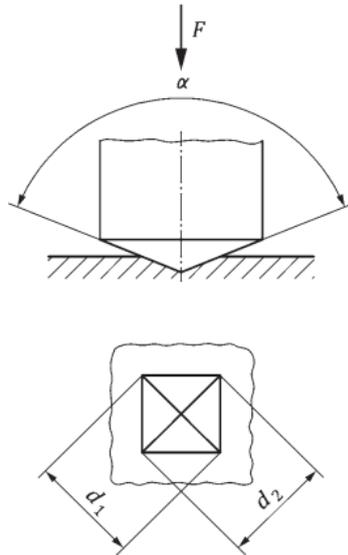


Figura 10: indentatore piramidale e misura diagonali dell'impronta per calcolo durezza Vickers

Symbol	Designation
$\alpha$	Mean angle between the opposite faces at the vertex of the pyramidal indenter (nominally $136^\circ$ ) (see <a href="#">Figure 1</a> )
$F$	Test force, in newtons (N)
$d$	Arithmetic mean, in millimetres, of the two diagonal lengths $d_1$ and $d_2$ (see <a href="#">Figure 1</a> )
HV	$\text{Vickers hardness} = \frac{\text{Test force (kgf)}}{\text{Surface area of indentation (mm}^2\text{)}}$ $= \frac{1}{g_n} \times \frac{\text{Test Force (N)}}{\text{Surface area of indentation (mm}^2\text{)}}$ $= \frac{1}{g_n} \times \frac{F}{d^2 / \left(2 \sin \frac{\alpha}{2}\right)^2} = \frac{1}{g_n} \times \frac{2 F \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2}$ <p>For the nominal angle <math>\alpha = 136^\circ</math>,</p> $\text{Vickers hardness} \approx 0,1891 \times \frac{F}{d^2}$
<p>NOTE 1 Standard acceleration due to gravity, <math>g_n = 9,806\ 65\ \text{m/s}^2</math> which is the conversion factor from kgf to N            To reduce uncertainty, the Vickers hardness may be calculated using the actual mean indenter angle, <math>\alpha</math>.</p>	

Al fine di mostrare quanto ottenuto in fase di test si riporta un file acquisito tramite software Innovatest. Secondo normativa ISO 6507-1 il report dovrebbe contenere le seguenti informazioni:

- un riferimento alla norma ISO 6507-1;
- tutte le informazioni necessarie per l'identificazione del pezzo in prova;
- la data della prova;
- il risultato di durezza ottenuto in HV;

- e) tutte le operazioni non specificate nel presente documento o considerate facoltative;
- f) i dettagli di tutte le circostanze che hanno influenzato i risultati;
- g) la temperatura della prova, se è al di fuori dell'intervallo indicato dalla suddetta normativa;
- h) se viene eseguita anche la conversione in un'altra scala di durezza, la base e il metodo di tale conversione.



Innovatest Europe BV  
 Borgharenweg 140  
 6222 AA - Maastricht  
 The Netherlands  
 +31 43 3520060

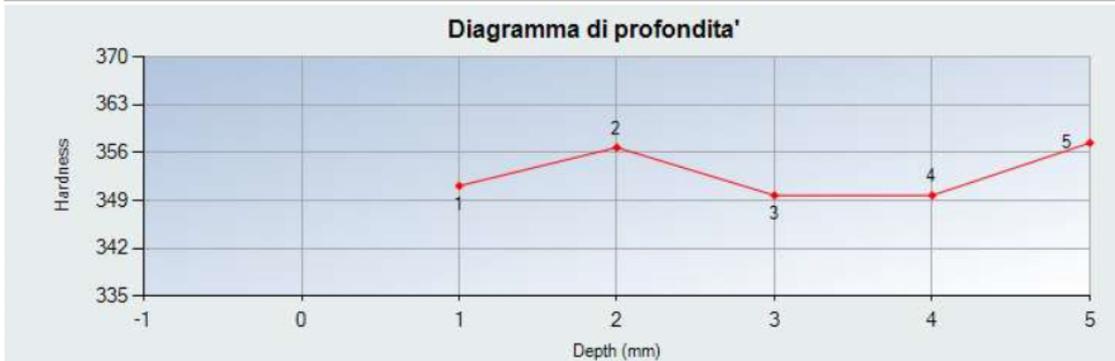
**Tester Info**

Type NOVA 130  
 Data 11/09/2022  
 Operatore admin  
 Test HV/1  
 Tempo app 15 sec.

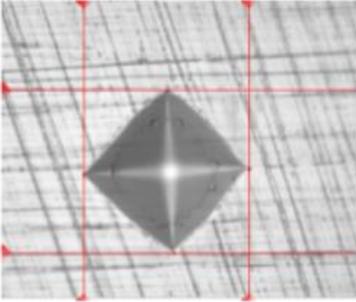
**Statistics**

Nr of measurements 5  
 Max 357.45  
 Min 349.76  
 Media 352.98  
 Std.dev 3.41

Notes:



1

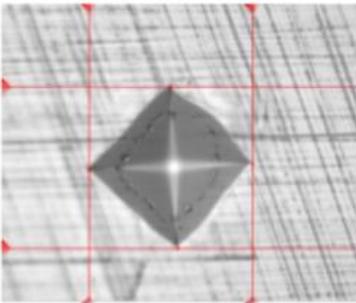


11 Sep 2022 17:07 depth: mm

d1:0.0729mm      d2:0.0725mm  
 351.2      HV/1  
 36.6 HRC      ---      ---

Comment

2

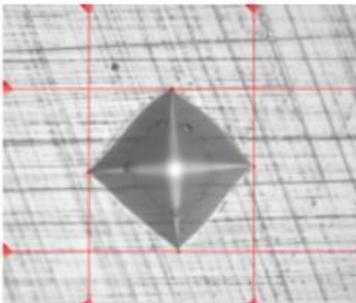


11 Sep 2022 17:08 depth: mm

d1:0.0722mm      d2:0.0720mm  
 356.8      HV/1  
 37.2 HRC      ---      ---

Comment

3

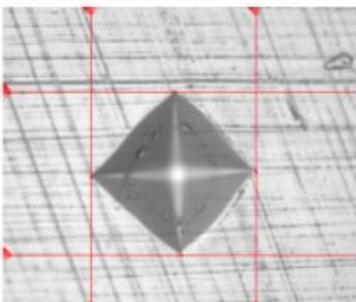


11 Sep 2022 17:10 depth: mm

d1:0.0730mm      d2:0.0726mm  
 349.8      HV/1  
 36.5 HRC      ---      ---

Comment

4

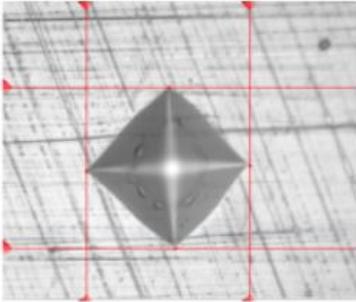


11 Sep 2022 17:12 depth: mm

d1:0.0729mm      d2:0.0728mm  
 349.8      HV/1  
 36.5 HRC      ---      ---

Comment

5



11 Sep 2022 17:14      depth: mm

d1:0.0722mm      d2:0.0718mm  
 357.4      HV/1  
 37.3 HRC      ---      ---

Comment

Figura 11: schermate acquisizione dati da software di laboratorio

Per ogni valore di carico quindi ogni cinque indentature il software Innovatest ha generato altresì un file Excel mettendo a disposizione ulteriori dati utili alla valutazione del test effettuato e dei risultati ottenuti. Anche in questo caso si allegano immagini dei dati registrati.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Operatore	Year	Month	Day	Hour	Minute	Seconds	Method	Risultato	Scala	Obiettivo	d1	d2	Indentor	UpperLimi	LowerLimi	Conversion
2	admin	2022	September	11	17	7	25	VICKERS	351.17	HV/1	40x	0.0729	0.0725	HV	500	450	36.6
3	admin	2022	September	11	17	8	40	VICKERS	356.77	HV/1	40x	0.0722	0.072	HV	500	450	37.2
4	admin	2022	September	11	17	10	39	VICKERS	349.76	HV/1	40x	0.073	0.0726	HV	500	450	36.5
5	admin	2022	September	11	17	12	16	VICKERS	349.77	HV/1	40x	0.0729	0.0728	HV	500	450	36.5
6	admin	2022	September	11	17	14	29	VICKERS	357.45	HV/1	40x	0.0722	0.0718	HV	500	450	37.3

Tabella 2: report dati da software di microdurometro Innovatest

### 3- RISULTATI SPERIMENTALI

#### 4.1 Microdurezza: acquisizioni sperimentali

Si riportano di seguito i dati acquisiti dalle prove di laboratorio e si precisa che per ognuno dei sette provini sono stati usati differenti parametri di processo in additive manufacturing come sarà chiarito nei successivi capitoli quando si parlerà della densità energetica.

\*misure in MPa

<b>C1</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	380.20	382.13	313.75	329.40	318.56	
	389.38	348.77	338.20	342.91	300.21	
	371.12	357.47	321.04	329.70	318.06	
	348.39	357.67	323.49	336.32	300.06	
	367.82	368.08	330.69	331.22	314.93	
media	371.38	362.824	325.434	333.91	310.364	340.78
dev_strd	13.73371	11.42883	8.368973	5.140202	8.444256	

<b>C1TT</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	666.7	620.72	612.15	597.74	554.71	
	677.98	626.27	571.79	603.24	566.86	
	698.53	627.88	596.00	566.95	577.61	
	666.7	634.98	611.85	572.29	563.27	
	643.73	641.66	580.82	566.81	561.90	
media	670.728	630.302	594.522	581.406	564.87	608.37
dev_strd	17.81507	7.277715	16.23379	15.80281	7.494988	

<b>C2</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	424.65	376.31	340.35	327.77	312.96	
	409.62	396.31	362.85	351.76	328.63	
	380.74	369.96	344.25	332.17	328.10	
	390.03	361.57	365.78	329.33	334.60	
	394.62	376.24	348.50	334.37	328.10	
media	399.93	376.08	352.35	335.08	326.48	357.98
dev_strd	15.4883	11.46583	10.14936	8.645151	7.191607	

<b>C2TT</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	626.65	648.01	574.22	550.56	554.33	
	628.52	620.31	577.14	583.72	569.71	
	630.83	633.49	564.98	557.81	582.58	
	629.98	627.03	574.64	552.52	570.97	
	636.02	607.37	568.32	543.34	565.45	
media	630.4	627.242	571.86	557.59	568.608	591.14
dev_strd	3.14778	13.51548	4.495384	13.86372	9.119698	

<b>C3</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	465.16	477.71	479.09	328.76	400.71	
	486.51	469.12	467.34	353.57	403.75	
	475.13	460.49	422.78	336.01	410.90	
	476.57	451.36	411.43	333.50	375.04	
	452.71	464.03	421.10	334.37	372.90	
media	471.216	464.542	440.348	337.242	392.66	421.20
dev_strd	11.46332	8.772688	27.36743	8.51254	15.62952	

■

<b>C3TT</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	563.14	578.02	540.34	508.89	514.72	
	571.12	543.81	518.89	514.99	523.88	
	588.32	548.56	534.50	499.51	491.76	
	580.68	554.08	516.80	510.17	495.11	
	564.07	526.97	521.58	526.39	503.51	
media	573.466	550.288	526.422	511.99	505.796	533.59
dev_strd	9.72726	16.56576	9.292187	8.775338	12.02576	

■

<b>C4</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	476.42	477.98	444.13	436.36	455.18	
	475.5	478.41	440.56	479.40	432.05	
	496.04	506.79	438.24	431.39	431.02	
	471.04	474.08	440.21	433.89	431.53	
	495.41	470.02	444.39	442.68	449.77	
media	<b>482.882</b>	481.456	441.506	444.744	439.91	458.10
dev_strd	10.64489	13.02582	2.385126	17.7298	10.40604	

Come si avrà modo di argomentare nel corso del presente elaborato, è bene notare che il picco di maggiore durezza (483 Mpa) tra i provini non trattati termicamente si ottiene per 230 W di potenza laser quindi la più alta disponibile e per velocità di avanzamento laser più bassa, pertanto con valori di densità energetica maggiori.

<b>C4TT</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	562.02	543.02	535.06	518.26	512.38	
	506.48	532.42	526.62	507.34	505.26	
	518.51	537.18	551.34	505.78	502.21	
	505.39	526.85	542.58	504.24	499.24	
	531.33	528.71	516.37	507.33	474.39	
media	524.746	533.636	534.394	508.59	498.696	520.01
dev_strd	20.88008	5.872194	12.16487	4.969459	12.91328	

<b>C5</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	355.27	386.48	331.89	318.22	323.60	
	381.25	350.76	328.13	316.68	312.14	
	347.14	367.46	335.95	329.49	319.12	
	359.75	344.34	321.72	319.87	321.38	
	347.66	352.40	321.86	325.36	316.50	
media	358.214	360.288	327.91	321.924	318.548	337.38
dev_strd	12.45555	15.13143	5.575823	4.785155	3.978112	

■

<b>C5TT</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	642.01	577.30	604.84	550.76	555.23	
	624.53	596.04	574.61	583.37	572.25	
	607.70	588.40	597.00	576.04	581.59	
	606.29	620.44	574.33	559.46	561.64	
	612.77	608.36	592.53	554.17	547.86	
media	618.66	598.108	588.662	564.76	563.714	586.78
dev_strd	13.32299	15.06862	12.2399	12.72642	12.00036	

■

<b>C6</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	425.36	386.04	372.98	351.47	351.17	
	414.42	413.72	356.81	346.33	356.77	
	404.76	395.84	376.49	357.15	349.76	
	394.62	399.84	375.02	365.52	349.77	
	404.61	420.74	373.19	347.24	357.45	
media	408.754	403.236	370.898	353.542	352.984	377.88
dev_strd	10.39959	12.4759	7.159903	7.106497	3.414484	

■

<b>C6TT</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	605.34	526.03	526.30	533.25	512.06	
	621.29	554.93	516.37	523.33	509.19	
	596.01	560.23	532.11	518.19	501.62	
	616.46	577.49	537.74	510.32	513.69	
	608.81	553.88	545.88	521.46	523.93	
media	609.582	554.512	531.68	521.31	512.098	545.84
dev_strd	8.799703	16.56794	10.01887	7.445549	7.221871	

■

<b>C7</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	441.35	336.32	370.54	343.76	305.81	
	398.52	373.46	338.62	343.4	335.08	
	415.09	375.84	352.58	351.19	311.03	
	441.33	386.21	351.16	353.02	318.65	
	408.16	378.69	355.42	347.13	315.32	
media	420.89	370.104	353.664	347.7	317.178	361.91
dev_strd	17.50723	17.42783	10.21421	3.868359	9.931061	

<b>C7TT</b>	5x25g	5x50g	5x200g	5x500g	5x1000g	
	590.79	583.04	546.11	507.40	512.48	
	584.09	570.98	514.08	501.24	520.53	
	570.13	571.95	537.53	517.36	508.42	
	553.32	562.35	530.18	520.15	516.92	
	571.35	554.08	552.26	520.22	505.89	
media	573.936	568.48	536.032	513.274	512.848	540.91
dev_strd	12.9101	9.749066	13.29131	7.636003	5.361915	

Tabella 3: AZZURRO: dati per provini non trattati termicamente; VERDE dati per provini invecchiati

\*misure in MPa

Prima di tracciare gli andamenti dei dati raccolti è stato necessario *mediare le cinque durezze ottenute per ciascun valore di carico imposto*, quindi i valori per ogni colonna delle precedenti tabelle e registrarli nella penultima riga di ciascuna tabella.

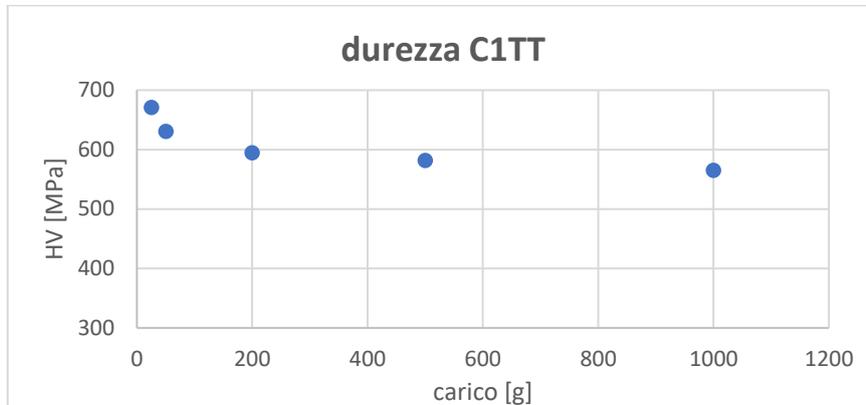
Inoltre, per avere un'indicazione della bontà dei dati registrati è stata calcolata anche la deviazione standard, ultima riga delle precedenti tabelle. Questa in effetti restituisce minimi di poche unità fino a deviazioni standard massime attorno a diciassette diciotto. In effetti, durante i test, la ricerca delle diagonali da cui ricavare la larghezza dell'impronta lasciata dall'indentatore è stata l'operazione di maggiore delicatezza e senza dubbio più sottoposta alla manualità dell'operatore: anche uno zoom più o meno nitido ha inciso sulla dimensione delle diagonali e quindi sul valore di durezza registrato.

carico [g]	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
25	371.38	399.93	471.216	482.882	358.21	408.754	420.89
50	362.824	376.08	464.542	481.456	360.288	403.236	370.104
200	325.434	352.35	440.348	441.506	327.91	370.898	353.664
500	333.91	335.08	421.05	444.75	321.924	353.542	347.7
1000	310.364	326.48	392.66	439.91	318.548	352.984	317.178
carico [g]	C1TT	C2TT	C3TT	C4TT	C5TT	C6TT	C7TT
25	670.728	630.4	573.466	524.746	618.66	609.582	573.936
50	630.302	654.58	550.288	533.636	598.108	568.48	568.48
200	594.522	571.86	526.422	534.394	588.662	536.032	536.032
500	581.406	557.59	511.99	508.59	564.76	513.274	513.274
1000	564.87	568.61	505.796	498.696	563.714	512.848	512.848

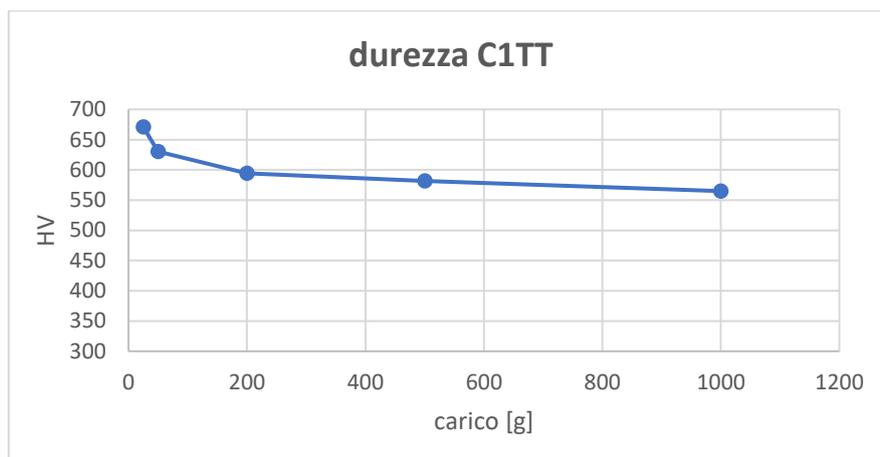
Tabella 4: durezze Vickers mediati

Per ognuno dei quattordici provini sono stati riportati i valori delle durezze mediate in funzione del carico applicato all'indentatore per poi unire i punti ottenuti con una spezzata. Si prenda come esempio il provino C1 Trattato Termicamente (C1TT):

a) Sono stati riportati i valori sperimentali di durezza in funzione del carico



b) Sono stati uniti i valori ottenuti con una spezzata che ne raffigurasse l'andamento qualitativo



c) Il medesimo iter è stato seguito per tutti i quattordici provini e sono state poi raffigurate su uno stesso grafico tutte le spezzate relative ai campioni non invecchiati e su un altro quelle per i campioncini trattati termicamente al fine di confrontare le variazioni di durezza al variare dei parametri di stampa.

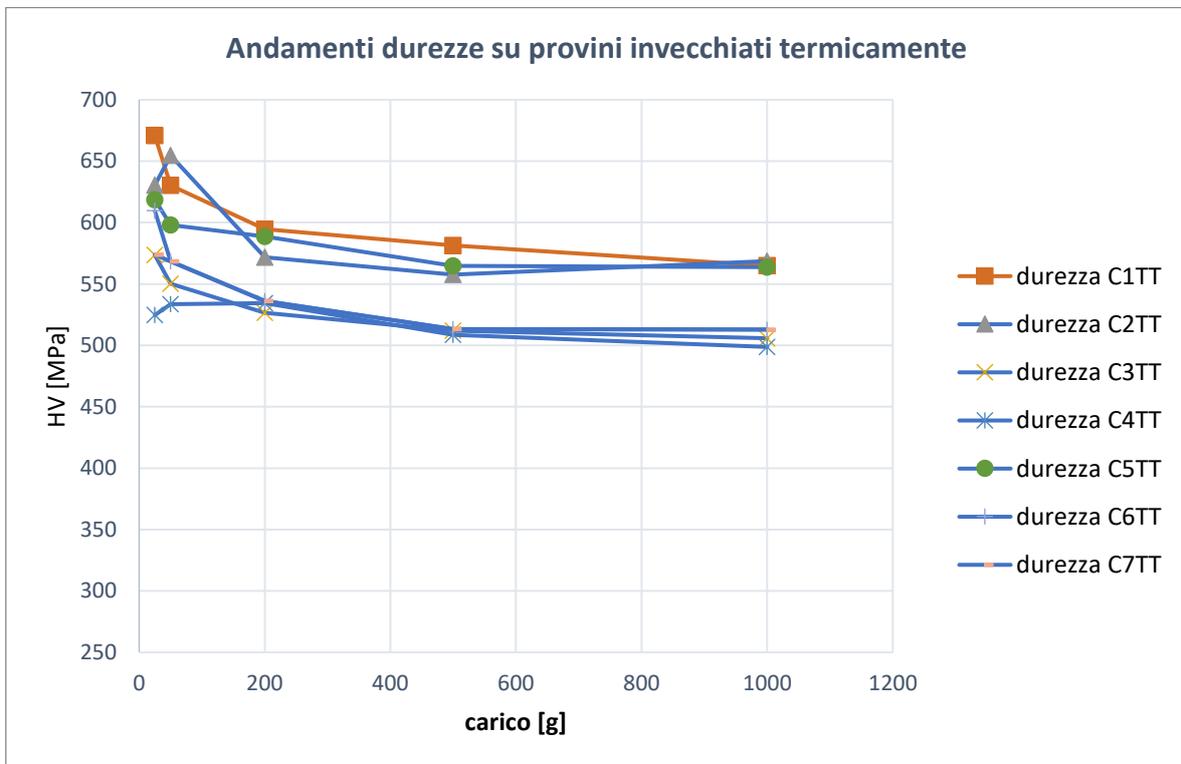
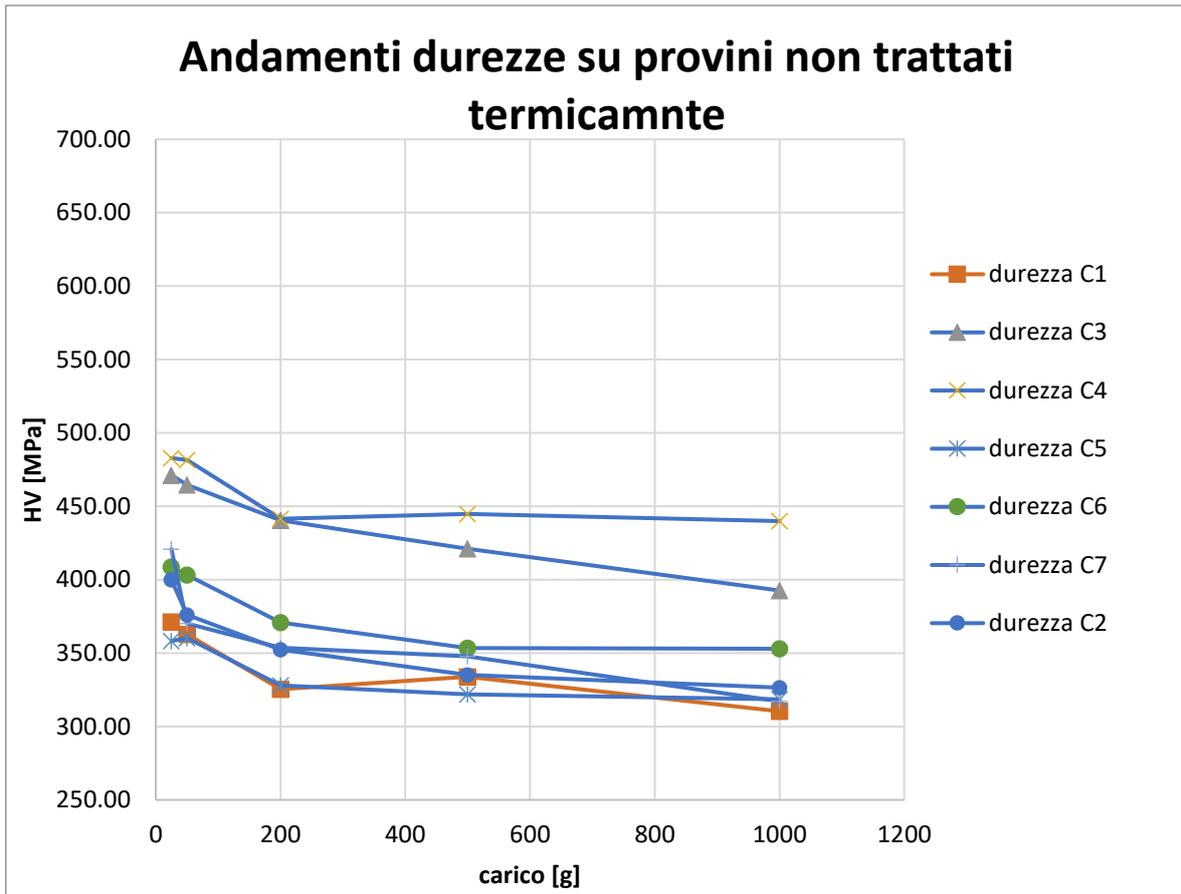


Figura 12: andamento dati sperimentali per i sette provini

#### 4.2 Commenti ed osservazioni su risultati sperimentali ed Indentation Size Effect

Si è già accennato al fatto che l'entità dell'ISE poteva dipendere dalle scale di lunghezza microstrutturali intrinseche presenti nel materiale, generalmente attribuibili alla presenza di un elevato gradiente di deformazione plastica, alla presenza di un importante recupero elastico a bassi carichi di indentazione che portano ad avere un'impronta più piccola, o a meccanismi di incrudimento sotto l'indentazione, cricche sotto la superficie ecc. Riguardo quest'ultimo aspetto si è cercato di condurre le prove sperimentali tenendosi alla larga da evidenti difetti superficiali presenti sui provini cercando di indentare su zone quanto più lucide possibile.

Si capisce pertanto che il valore di durezza acquisito risulta essere particolarmente influenzato dalla zona in cui si indenta oltre che dal carico imposto da cui senz'altro dipende l'ampiezza dell'impronta piramidale lasciata sulla superficie da cui il rapporto carico/ superficie.

Ciò nonostante, è possibile osservare comportamenti di massima nei due grafici delle grandezze in questione. Fin dai primi plot è stato possibile notare come l'andamento delle durezze rilevate indentando i provini con carichi crescenti non potesse essere ritenuto costante ma decrescente. In particolare, come già accennato nella fase introduttiva dell'elaborato è ben visibile il fenomeno dell'Indentation Size Effect secondo cui il carico applicato andasse ad influire sulla larghezza dell'impronta di deformazione plastica e quindi sul valore di durezza registrato.

Confrontando i due grafici ci si accorge immediatamente di come i provini trattati termicamente siano ovviamente più duri degli altri e la differenza tra le due tipologie risulta attorno ai 300 Mpa.

Si veda inoltre l'andamento relativo al provino C1. Il range di variazione della durezza copre circa 50 Mpa (371 - 317 Mpa) mentre per lo stesso provino invecchiato termicamente il gap registrato è di circa 100 MPa (670 – 563 Mpa).

Osservando però nel loro insieme le sette curve di entrambi i grafici ci si rende conto del fatto che nei provini non trattati termicamente le variazioni di durezza su ogni curva (da 25g a 1000g) sono più ampie rispetto ai gap mediamente riscontrabili tra le curve dei provini trattati. Questo dato lascerebbe presumere che, a meno di comportamenti particolari come sul C1 e C1TT, su provini trattati termicamente e mediamente più duri più resistenti e meno deformabili l'Indentation Size Effect si manifesti in modo meno evidente rispetto al materiale più deformabile ottenuto subito dopo stampa: posto invecchiamento i provini presentano nella matrice più precipitati che bloccando il moto delle dislocazioni aumentano la durezza del provino lasciando meno spazio alla deformazione plastica.

La durezza, infatti, decresce con l'aumento delle dimensioni dell'impronta deformata dall'indentatore all'aumentare del carico imposto. La superficie deformata risulta più estesa se il materiale si mostra meno incline al ritorno elastico, comportamento deducibile dal fatto che per provini non trattati si registrano valori di durezza mediamente più bassi come ovvio che sia ma soprattutto, confrontando le curve provino per provino ci si accorge che l'ISE è meno marcato nei provini trattati, ossia, ci si discosta meno dal valore medio di durezza.

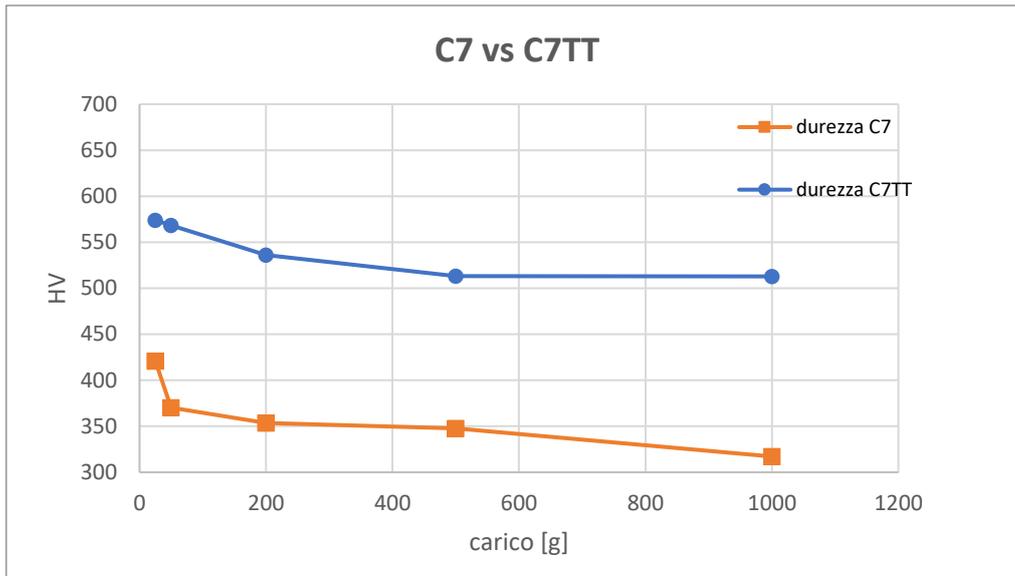


Figura 13: differenza andamento durezza Vickers in provini invecchiati e non

Il grafico riportato mostra l'esempio più evidente di curva più piatta per trattamenti termici. In effetti per provini invecchiati, il modulo di Young ossia il coefficiente angolare della parte lineare del grafico tensione deformazione aumenta e il ritorno elastico diminuisce.

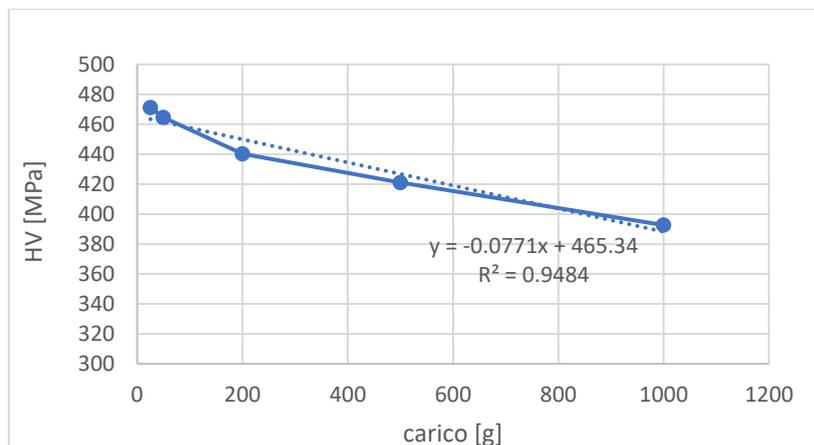
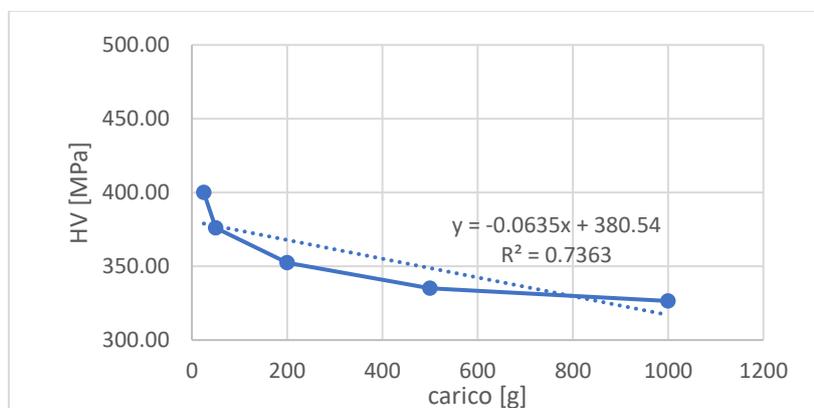
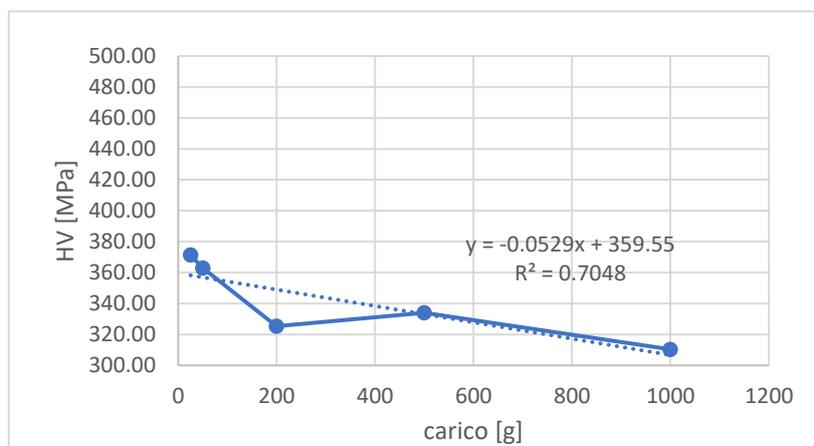
Un altro aspetto da osservare è che se per i primi 150g di carico applicati la riduzione di durezza risulta piuttosto evidente, per i restanti grammi applicabili fino ad 1kg l'andamento diventa piuttosto lineare e quasi orizzontale, tendente dunque ad assumere valori di durezza circa costanti.

### 4.3 Approssimazione dati sperimentali con modello analitico

Al fine di poterne dare un'interpretazione analitica è stato condotto uno studio sul fitting più opportuno da adottare per una buona approssimazione delle curve ottenute unendo i soli dati sperimentali. In particolare, è stato fatto un confronto tra approssimazione lineare polinomiale di secondo grado e logaritmica.

Si riportano in sequenza i grafici relativi ai sette provini non trattati termicamente su cui sono stati tracciate le linee di tendenza tratteggiate ottenute con fitting lineare.

#### 1) Fitting lineare:



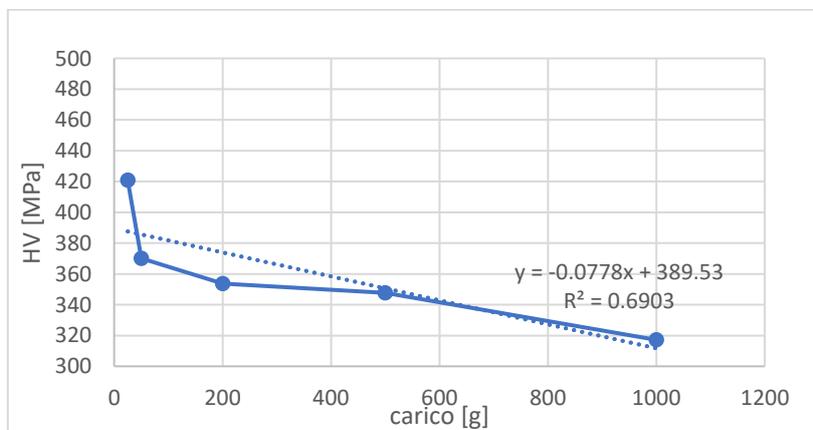
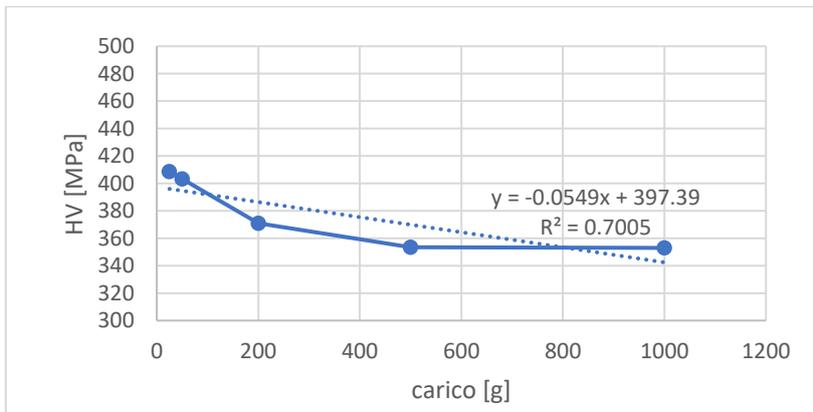
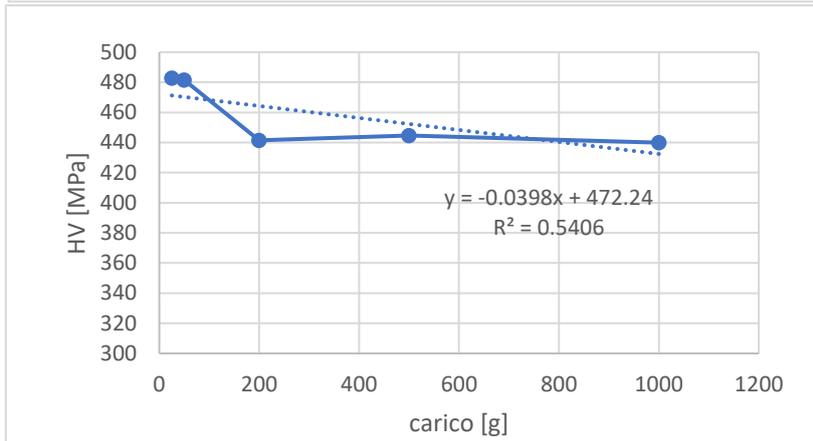
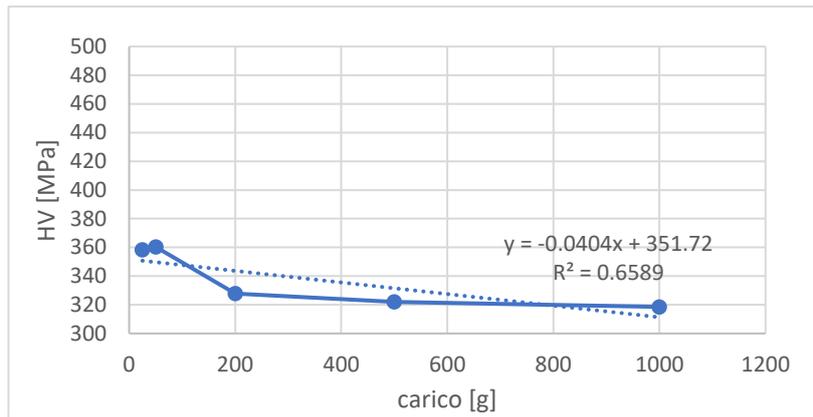


Figura 14: grafici per studio fitting lineare

Per ogni provino quindi per ogni grafico è stata riportata l'equazione della regressione lineare, il coefficiente angolare il termine noto e l' $R^2$  e per ognuno dei parametri citati è stata calcolata media e deviazione standard come mostrato nella tabella seguente.

FITTING LINEARE AF		k1	q	R <sup>2</sup>
C1	$y = -0.0529x + 359.55$	0.0529	359.55	0.7048
C2	$y = -0.0635x + 380.54$	0.0635	380.54	0.7363
C3	$y = -0.0771x + 465.34$	0.0771	465.34	0.9484
C4	$y = -0.0398x + 472.24$	0.0398	472.24	0.5406
C5	$y = -0.0404x + 351.72$	0.0404	351.72	0.6589
C6	$y = -0.0549x + 397.39$	0.0549	397.39	0.7005
C7	$y = -0.0778x + 389.53$	0.0778	389.55	0.6903
<b>media</b>		0.058057143	402.3328571	0.7114
<b>dev strd</b>		0.014460276	44.58011207	0.1129636

Tabella 5: studio modello lineare per ognuno dei sette provini

Il primo dato significativo è la media degli  $R^2$  che si afferma appena sopra lo 0.7.

Dai fitting successivi si capirà che si tratta di un valore piuttosto lontano dall'unità rispetto al caso polinomiale e logaritmico motivo per cui si eviterebbe di discutere ulteriormente l'approssimazione lineare.

Si riporta per successivi confronti un grafico sulla dispersione del coefficiente angolare rispetto al coefficiente medio.

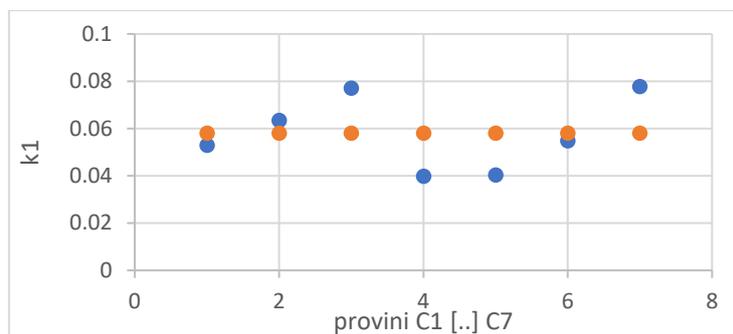
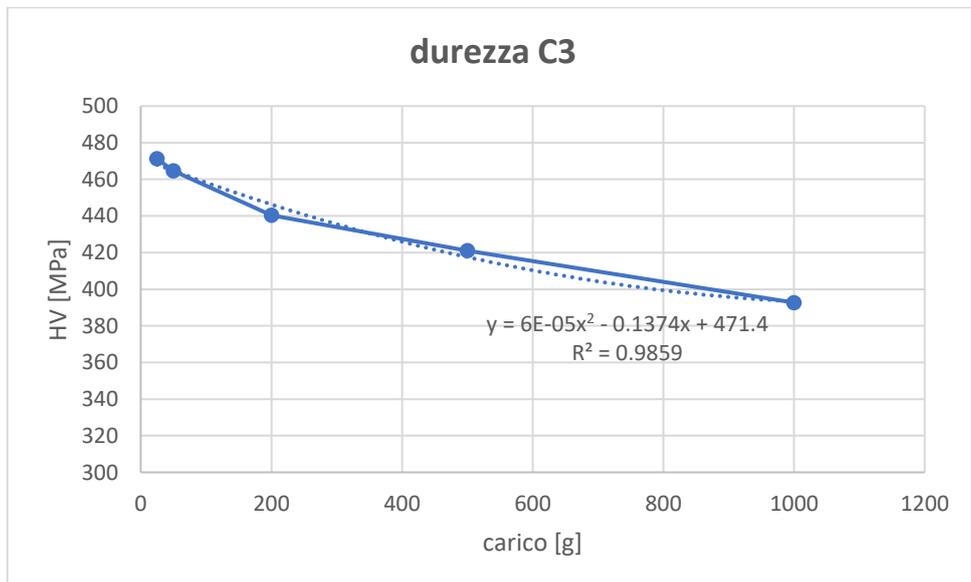
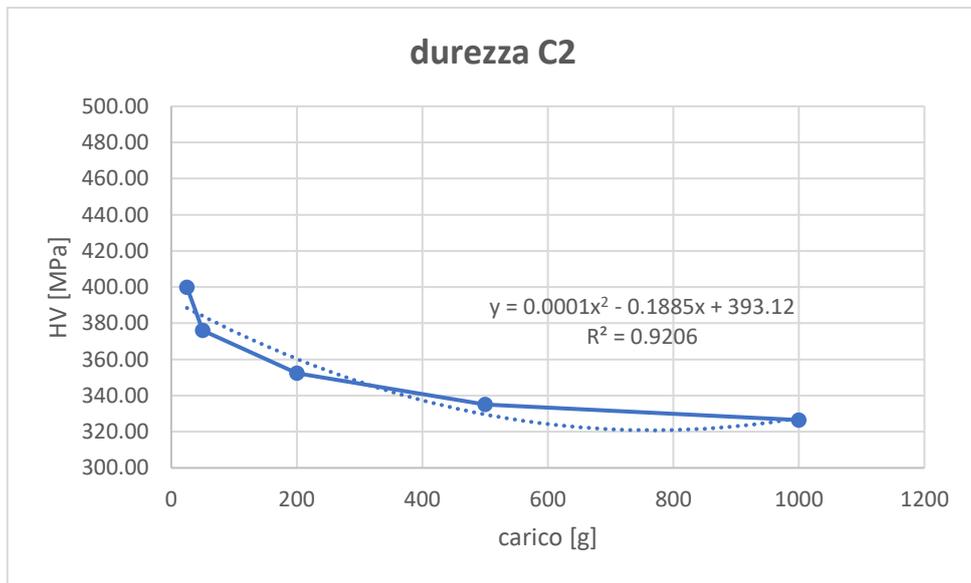
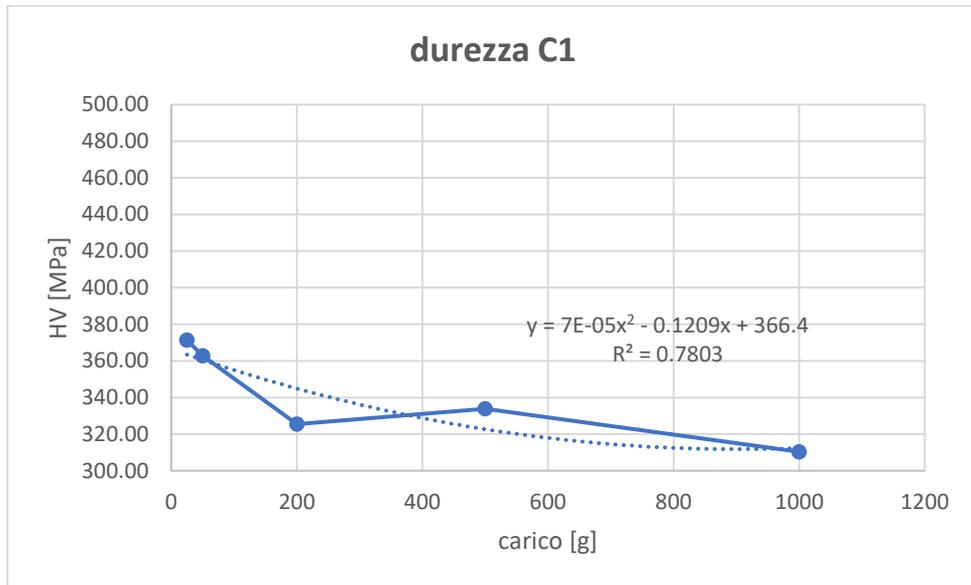
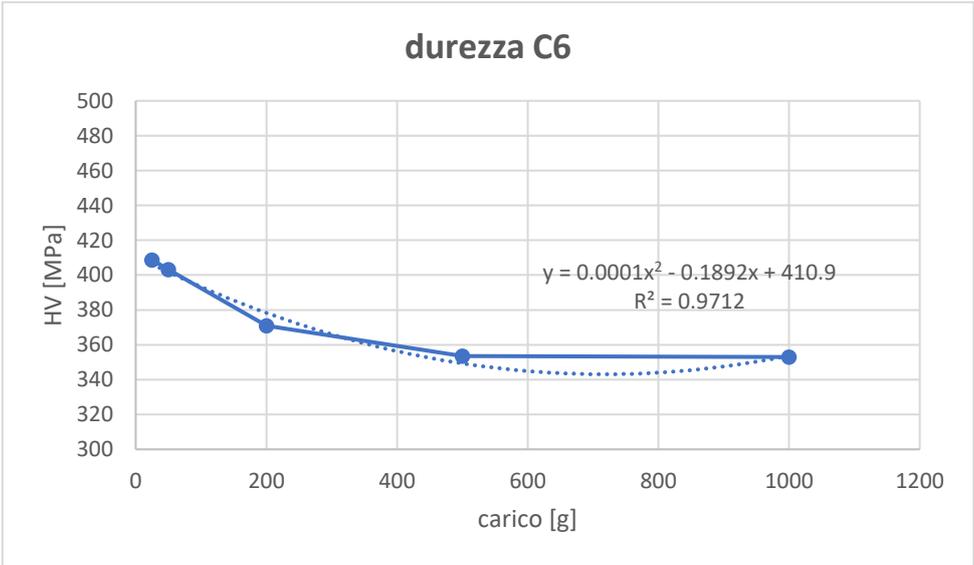
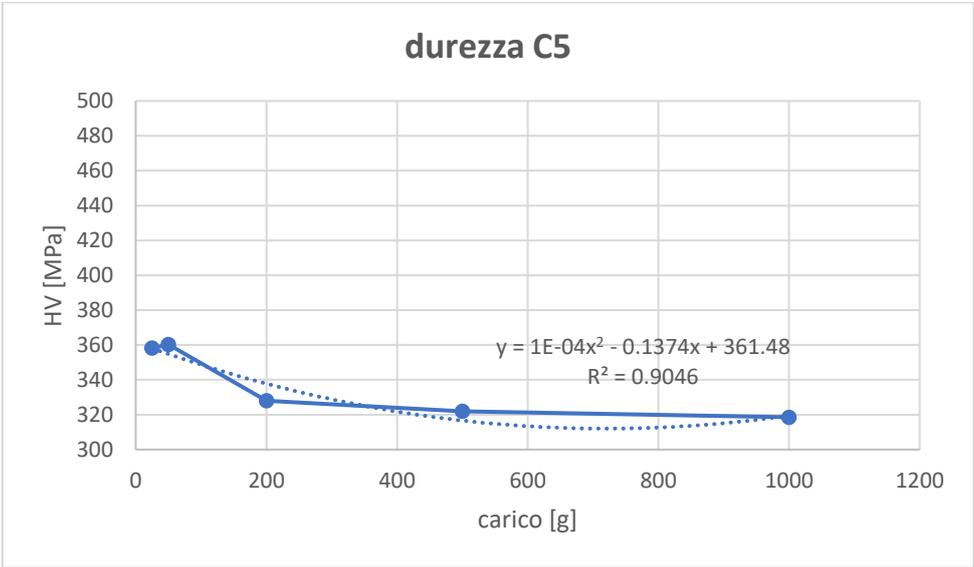
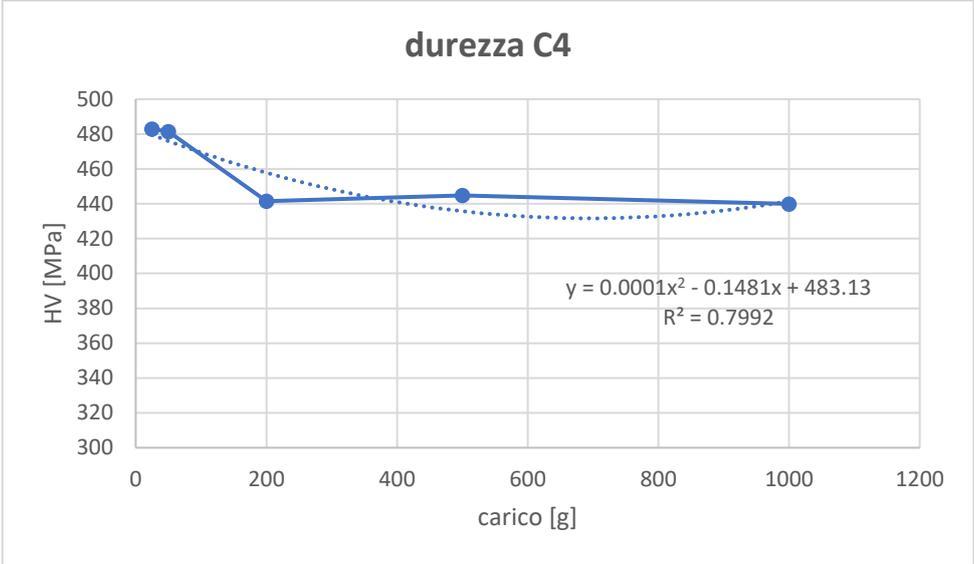


Figura 15: andamento / dispersione coefficienti modello analitico

2) Fitting polinomiale di secondo grado:





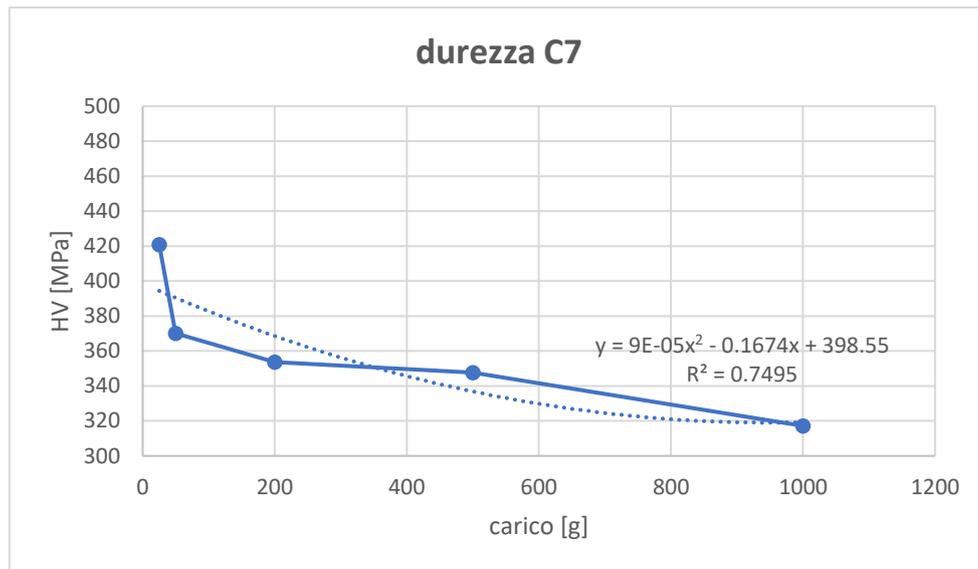


Figura 16: grafici per studio fitting polinomiale

Anche in questo caso si riportano in tabella i coefficienti del termine di secondo grado e di primo grado ed il termine noto. Al fine di valutare la bontà dell'approssimazione polinomiale si riporta anche l' $R^2$  e per ognuna delle grandezze citate se ne calcola media e deviazione standard.

FITTING POLINOMIALE AF		K2	K1	q	R <sup>2</sup>
C1	$y = 7E-05x^2 - 0.1209x + 366.4$	7.00E-05	0.1209	366.4	0.7803
C2	$y = 0.0001x^2 - 0.1885x + 393.12$	0.0001	0.1885	393.12	0.9206
C3	$y = 6E-05x^2 - 0.1374x + 471.4$	0.0001	0.1374	471.4	0.9859
C4	$y = 0.0001x^2 - 0.1481x + 483.13$	0.0001	0.1481	483.13	0.7992
C5	$y = 1E-04x^2 - 0.1374x + 361.48$	1.00E-04	0.1374	361.48	0.9046
C6	$y = 0.0001x^2 - 0.1892x + 410.9$	0.0001	0.1892	410.9	0.9712
C7	$y = 9E-05x^2 - 0.1674x + 398.55$	9.00E-05	0.1674	398.55	0.7495
media		0.0000886	0.1556	412.14	0.87
dev strd		1.55183E-05	0.0247081	44.332988	0.088597

Tabella 6: studio modello polinomiale di secondo grado per ciascuno dei sette provini

Si noti che il coefficiente del termine di secondo grado è quattro ordini di grandezza più piccolo di quello di primo, indice del fatto che in realtà l'andamento di queste curve non si discosta molto dalla linearità, soprattutto per valori crescenti di carico, lì dove i valori di durezza iniziano ad essere circa costanti.

Da un rapido confronto con il precedente caso lineare si nota però che l' $R^2$  ottenuto con il fitting polinomiale di secondo grado approssima meglio i dati sperimentali.

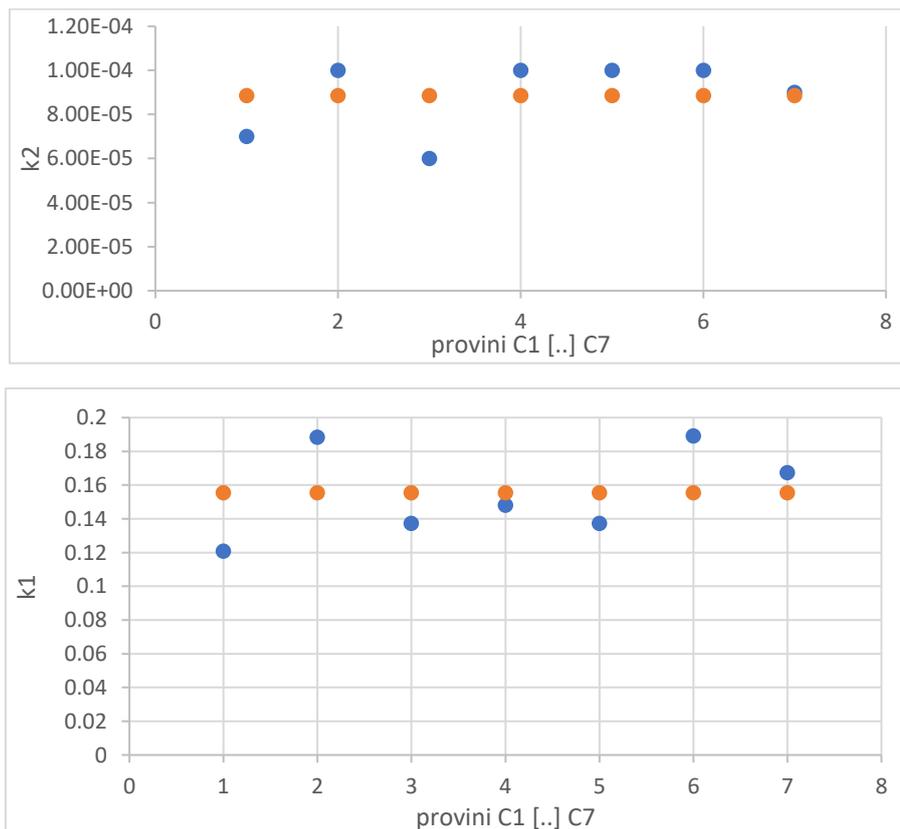
Anche in questo caso la *deviazione standard percentuale* dei termini  $k_2$ ,  $k_1$ ,  $q$  ed  $R^2$  viene rispettivamente:

K2: 18% di	K1: 16% di	q: 11% di	$R^2$ : 10% di
0.0000886	0.1556	412.14	0.087

Figura 17: deviazione standard percentuale

Il confronto con il caso precedente tende nettamente a favore dell'approssimazione polinomiale. La dispersione dei coefficienti è più contenuta (18% vs 25%) e l'errore quadro è più prossimo all'unità.

Anche per il caso polinomiale si riporta la dispersione dei valori dei coefficienti rispetto ai coefficienti medi per avere un'idea di quanto un unico modello polinomiale che abbia come coefficienti quelli ottenuti dalla media di tutti i sette coefficienti relativi ai sette singoli andamenti, possa accuratamente rappresentare l'insieme dei dati raggruppati nelle sette curve. Come si vedrà dopo la discussione del fitting logaritmico non sembra essere una buona idea cercare di racchiudere tutti e sette gli andamenti in un unico modello, che sia esso lineare polinomiale o logaritmico.



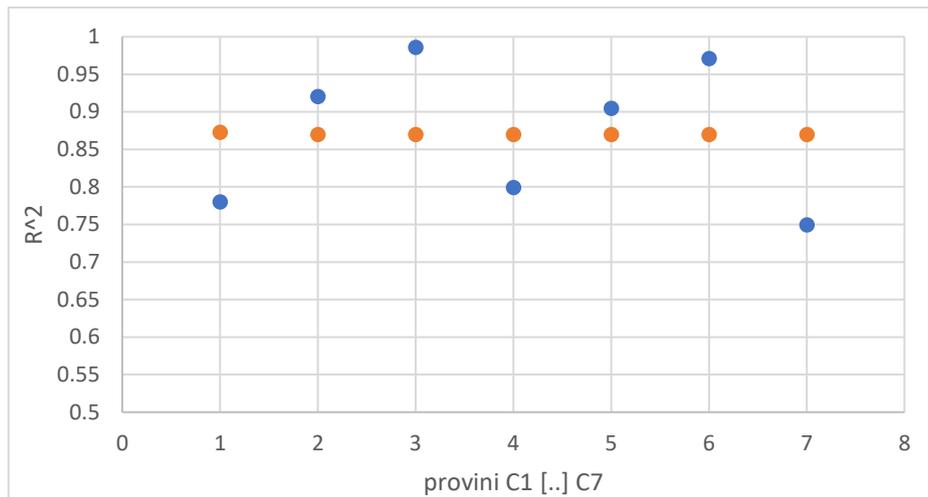
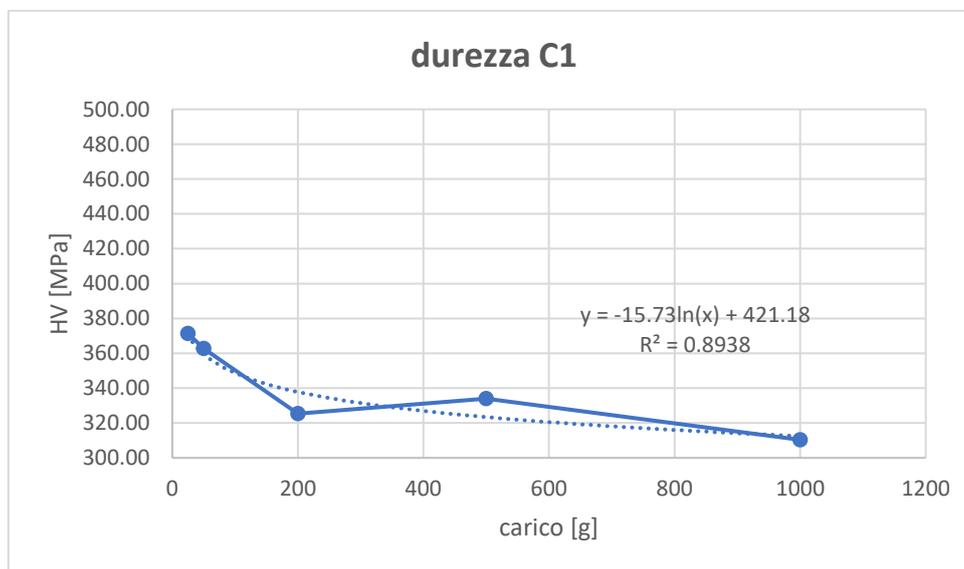


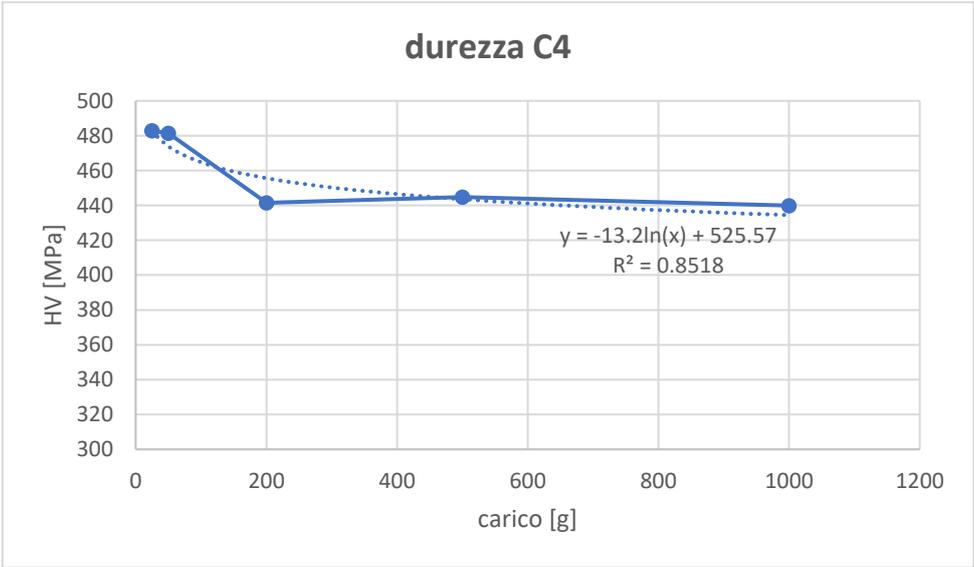
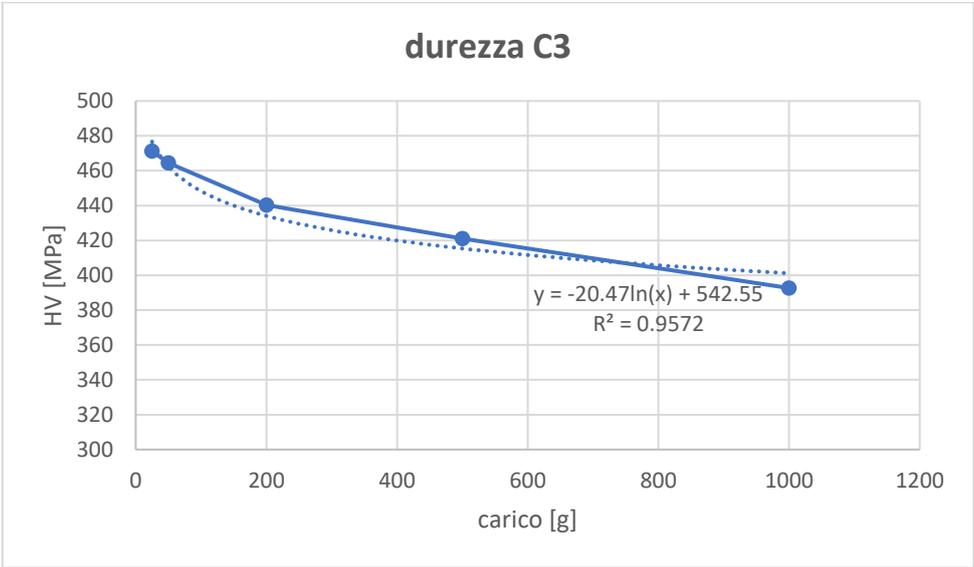
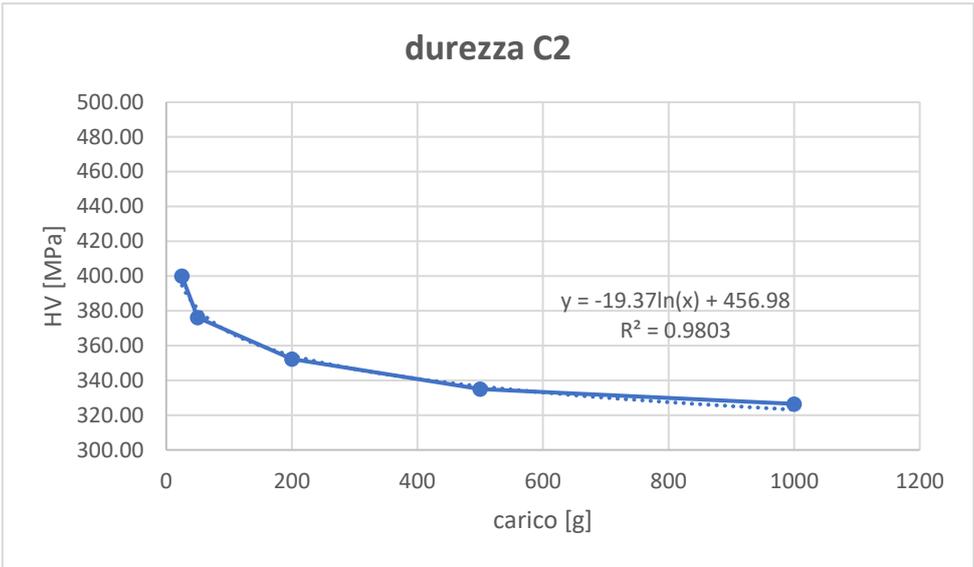
Figura 18: andamento / dispersione coefficienti modello analitico

L'andamento polinomiale risulta nel complesso piuttosto accettabile tanto che il valore minimo di errore quadro resta comunque 0,75 mentre il migliore tra i sette diversi fitting si ottiene per errore quadro uguale a 0.97, scenario molto apprezzabile.

### 3) Fitting logaritmico:

Si procede allo stesso modo anche per il fitting logaritmico. Si riportano in sequenza i grafici con i dati sperimentali e le regressioni logaritmiche e si procede all'analisi ed alla discussione del fitting ottenuto confrontando il tutto con i fitting precedenti al fine di scegliere il fitting più fedele ai dati sperimentali.





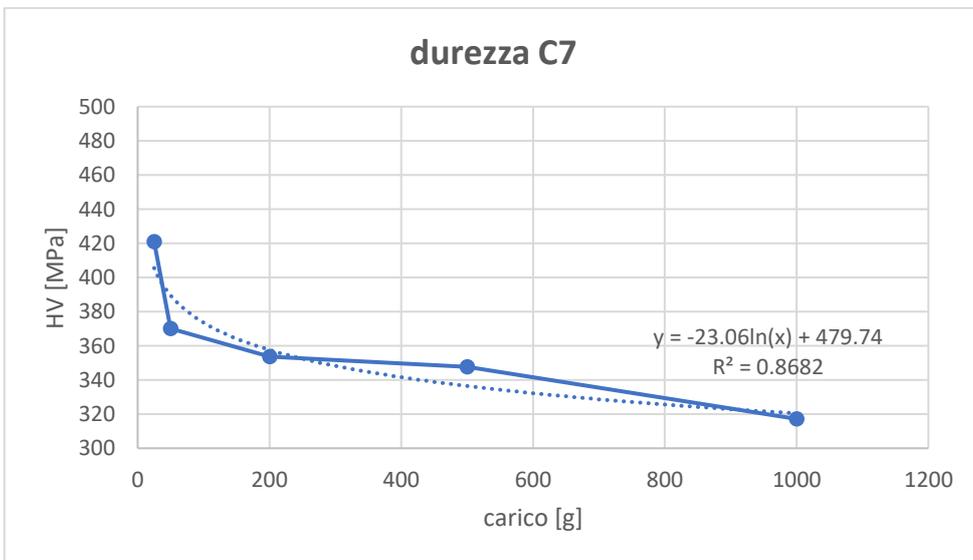
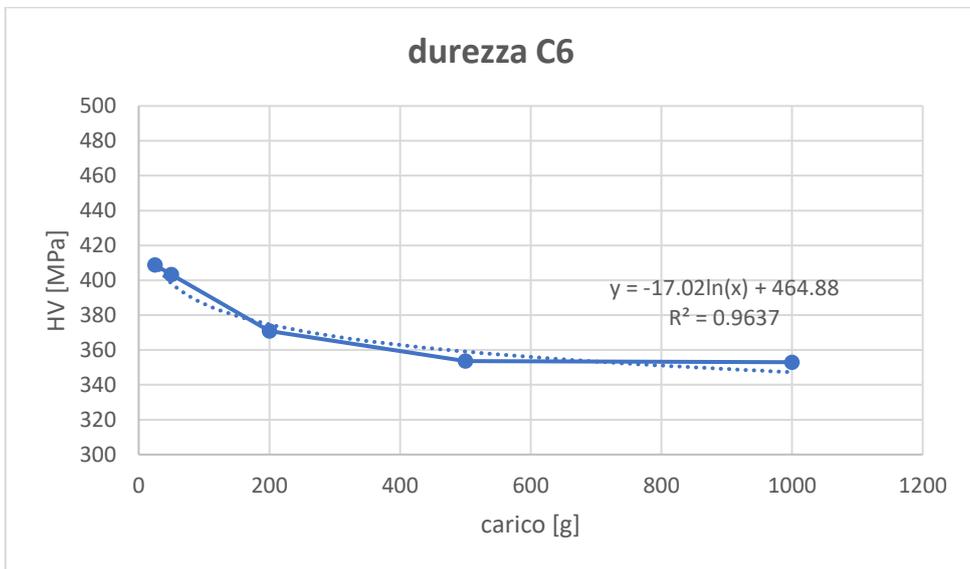
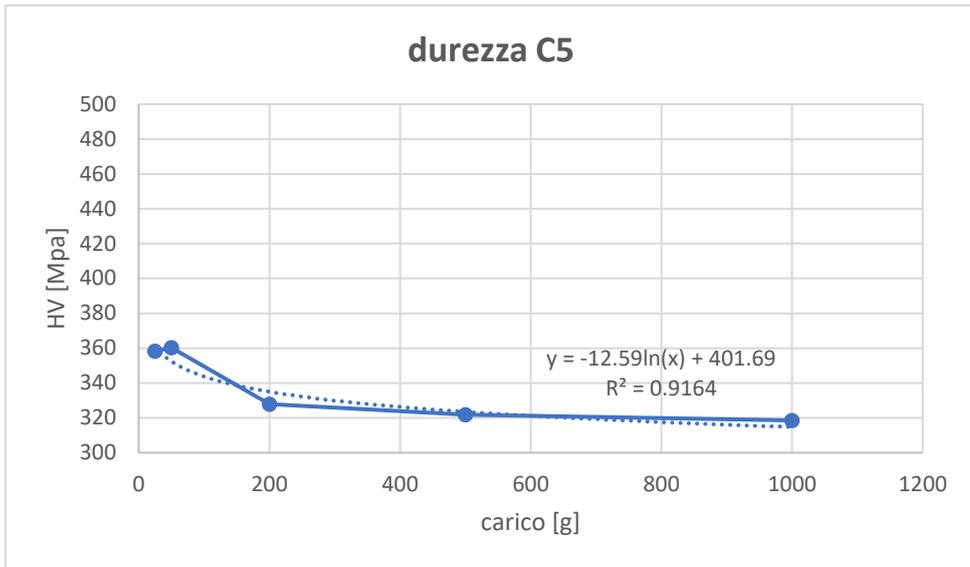


Figura 19: grafici per studio fitting logaritmico

Anche solo visivamente sembra chiaro che un decremento logaritmico possa soddisfare meglio dei precedenti fitting l'andamento dei dati sperimentali. A tal proposito si fa presente che l' $R^2$  è ancora più prossimo all'unità rispetto al fitting polinomiale 0.92 vs 0.87 con un 5 % di deviazione standard contro il 10 % come deducibile dalla seguente tabella

FITTING LOGARITMICO AF		k	q	R <sup>2</sup>
C1	$y = -15.73\ln(x) + 421.18$	15.73	421.18	0.8938
C2	$y = -19.37\ln(x) + 456.98$	19.37	456.98	0.9803
C3	$y = -20.47\ln(x) + 542.55$	20.47	542.55	0.9572
C4	$y = -13.2\ln(x) + 525.57$	13.2	525.57	0.8518
C5	$y = -12.59\ln(x) + 401.69$	12.59	401.69	0.9164
C6	$y = -17.02\ln(x) + 464.88$	17.02	464.88	0.9637
C7	$y = -23.06\ln(x) + 479.74$	23.06	479.74	0.8682
media	$y = -17.35\ln(x) + 470.37$	17.35	470.37	0.92
dev strd		3.566356398	47.344965	0.0462183

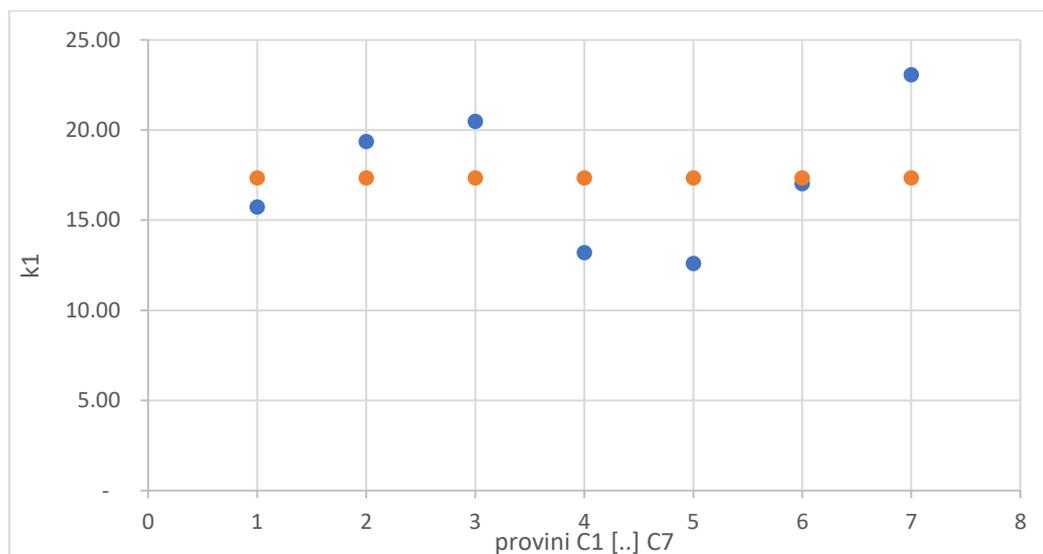
Tabella 7: studio modello logaritmico per ciascuno dei sette provini

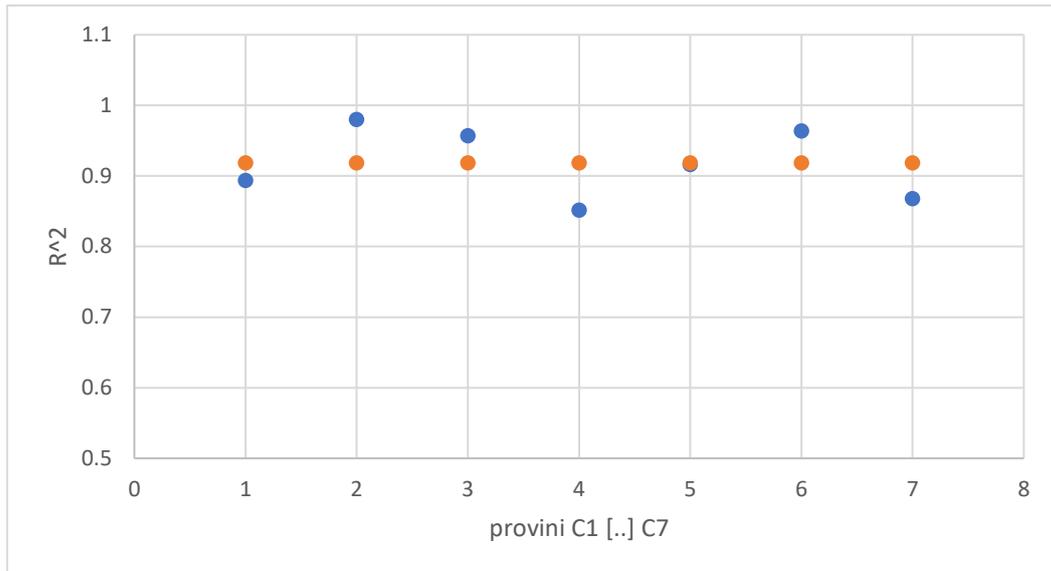
In questo caso la deviazione standard percentuale dei temini k, q ed  $R^2$  viene rispettivamente:

k : 21% di 17.35      q: 10% di 470.37       $R^2$  : 5% di 0.92

Figura 20: deviazione standard percentuale

Si mostra anche in questo caso la dispersione dei coefficienti e quindi delle sette curve ottenute dalle regressioni logaritmiche rispetto ad un unico modello ottenibile dai coefficienti mediati nella precedente tabella. Il 21% di deviazione standard, come si vedrà meglio nel prossimo paragrafo, lascia immaginare che rispetto ad un andamento analitico medio possano esserci curve piuttosto disperse.





*Figura 21: andamento / dispersione coefficienti modello analitico*

**NB:**

Si precisa che così come per il prossimo capitolo, tutto l'iter visto finora con risultati del tutto simili, è stato ripetuto interamente per i sette provini Trattati Termicamente. Per snellire la discussione si evita di riproporre risultati già discussi con i provini non trattati. La sostanziale differenza rientra nel fatto che i valori di durezza sono incrementati mediamente di 300 Mpa rispetto al caso dei provini non trattati.

#### 4.3.1 Validazione modello analitico per approssimazione dati sperimentali

Dalle considerazioni già parzialmente discusse sul modello da adottare sembra evidente che il fitting logaritmico sia il più appropriato; si riportano per completezza gli  $R^2$  medi di ogni fitting.

modello	LINEARE	POLINOMIALE	LOGARITMICO
$R^2$	0.711	0.87	<b>0.92</b>

Tabella 8: riepilogo  $R^2$  per ciascuno dei tre fitting

Dopo aver abbondantemente validato il fitting logaritmico si procede proponendo un'illustrazione grafica da cui discutere l'eventualità di poter legare i sette singoli andamenti relativi ai sette provini ottenuti con sette diversi parametri di processo con un unico modello analitico, lineare logaritmico o polinomiale che sia.

Il grafico riporta:

- 1) i sette andamenti sperimentali;
- 2) un fitting lineare (tracciato con i coefficienti mediati sui sette fitting lineari delle sette prove);
- 3) un fitting polinomiale (tracciato con i coefficienti mediati sui sette fitting polinomiali delle sette prove);
- 4) un unico fitting logaritmico (tracciato con i coefficienti mediati sui sette decrementi logaritmici delle sette prove);

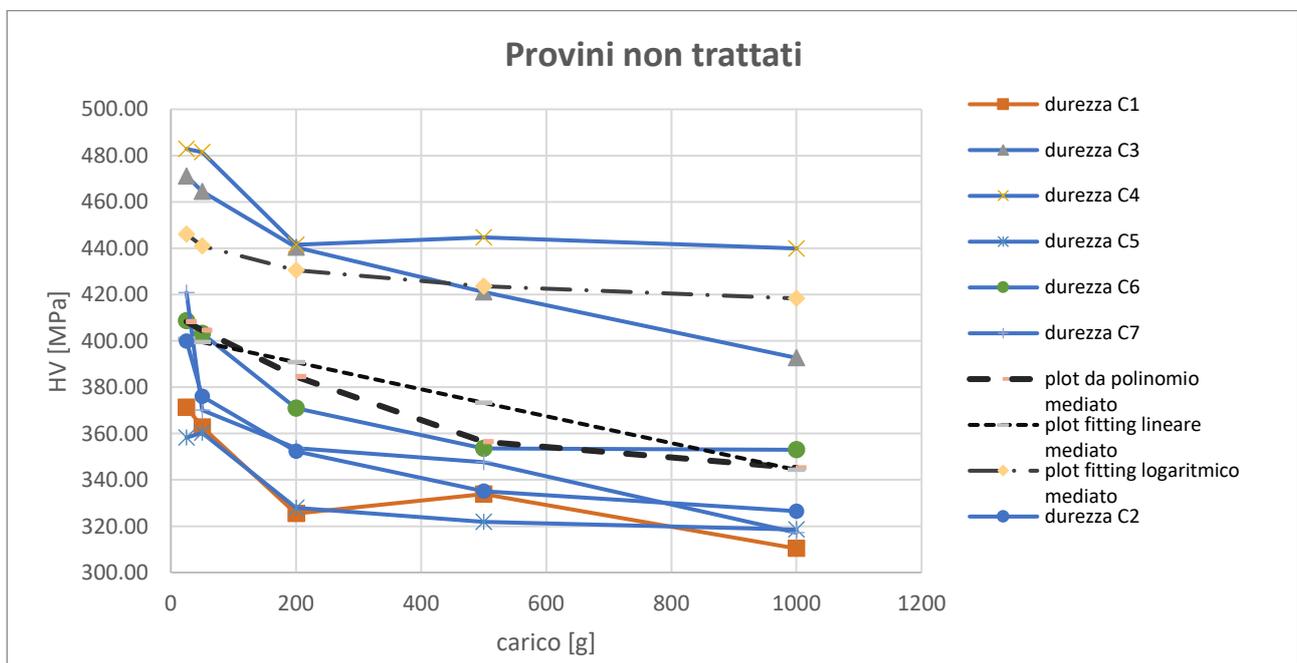


Figura 22: andamenti sperimentali vs andamenti lineare polinomiale e logaritmico ottenuti da coefficienti mediati sui sette provini

La curva più in alto tra le tre tratteggiate riporta l'andamento della durezza relativo al modello ottenuto da decremento logaritmico per il quale ci si accorge subito di quanto bene la sua forma riesca a riprodurre le altre spezzate.

Ci si accorge inoltre che per quattro curve su sette il fitting logaritmico tende a sovrastimare i valori di durezza registrati e ricordando che si è sempre in ambito additive manufacturing e che pertanto ogni curva è parametrizzata per un ben preciso valore di densità energetica del laser [J/mm<sup>3</sup>] proveniente da differenti combinazioni di potenza [W] e velocità di avanzamento [mm/s] del laser, si comprende come un unico modello possa essere piuttosto riduttivo e poco significativo rispetto all'insieme dei dati sperimentali acquisiti analizzando i sette provini ottenuti con sette diversi parametri di processo: un unico modello anche piuttosto accurato ( $R^2 = 0.92$ ) non può tenere conto delle differenze derivanti da differenti parametri di processo impiegabili nella fabbricazione additiva.

Stesso discorso vale per gli altri fitting: probabilmente sovrastimano meno dell'andamento logaritmico, ciò nonostante, non sembra lo stesso un buon metodo per cercare di tener traccia di tutte le acquisizioni sperimentali registrate durante le prove al microdurometro. Inoltre, per le altre due tratteggiate, lineare e polinomiale, anche solo visivamente non sembra che le forme siano così fedeli agli andamenti dei dati sperimentali come già discusso confrontando gli  $R^2$  (0.87 per polinomiale di secondo grado e 0.71 per lineare).

A valle di queste considerazioni, per avere andamenti più prossimi ai dati acquisiti durante la fase sperimentale pare che sia più conveniente mantenere ben distinti gli andamenti HV [Mpa] – carico [g] dai parametri di processo, aspetto su cui si lavorerà a lungo nei prossimi capitoli riguardanti lo script implementato in ambiente Matlab che si occuperà di restituire durezza e tensioni a snervamento in funzione dei parametri di processo, pur tenendo conto della grandezza dell'impronta di indentatura

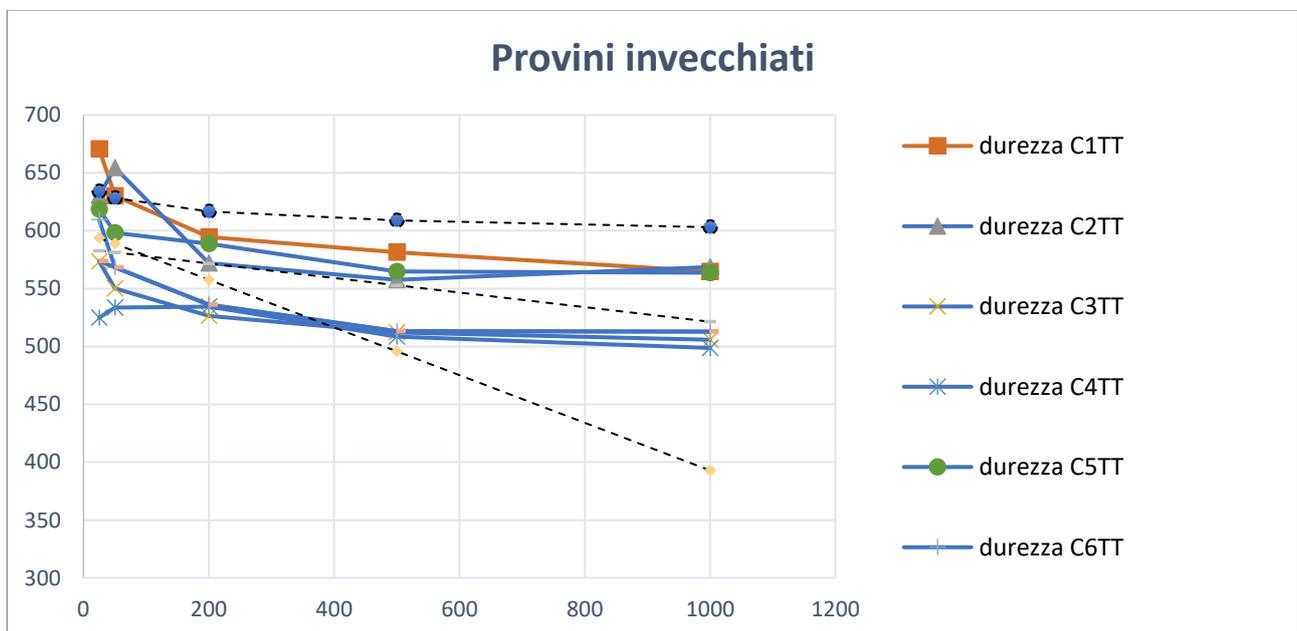


Figura 23: andamenti sperimentali vs andamenti lineare polinomiale e logaritmico ottenuti da coefficienti mediati sui sette provini (invecchiati)

#### 4.4 Correlazione durezza Vickers – tensione snervamento

Studio coefficienti per correlazione durezza Vickers – tensione snervamento

Dopo aver tracciato gli andamenti delle durezza acquisite in laboratorio e dopo aver trovato i rispettivi andamenti logaritmici in grado di raffigurarne abbastanza fedelmente le approssimazioni serve legare in qualche modo la durezza Vickers alle tensioni di snervamento dei provini.

Si ricorda che per le prove sperimentali si è scelto il piano verticale XZ del provino, piano parallelo alla direzione di propagazione del laser che fonde le polveri di IN718. A seguito dello studio portato a termine dall'ex alunno del Politecnico di Torino Matteo Crachi, attualmente impegnato nell'attività di Dottorato presso lo stesso ateneo, ci si rende conto che le facce verticali del provino presentano caratteristiche di sollecitazione inferiori ( $R_{p0.2}=530$  Mpa) rispetto a quelle ottenute dalle prove di trazione relative alla sezione orizzontale ( $R_{p0.2}=730$  Mpa), piano XY. Come noto che sia, passando poi ai trattamenti termici si ha un incremento di  $R_{p0.2}$  anche superiore al 70% passando da 730 a 1300 MPa per il piano XY.

	E [GPa]	Rp0.2 [MPa]	Sigma Max [MPa]	Sigma R [MPa]	Elong. To Fracture %
XY n.1	204	732	1027	1028	29
XY n.2	224	730	1030	1033	27
<b>Z n.1</b>	<b>136</b>	<b>500</b>	<b>587</b>	<b>573</b>	<b>1.6</b>
<b>Z n.2</b>	<b>135</b>	<b>561</b>	<b>756</b>	<b>750</b>	<b>4.3</b>
XY HT n.1	133	1301	1366	1366	8.6
XY HT n.2	212	1303	1417	1417	5.5
XY HT n.3	206	1295	1342	1342	6.5

Tabella 9: prove di trazione su provino C2

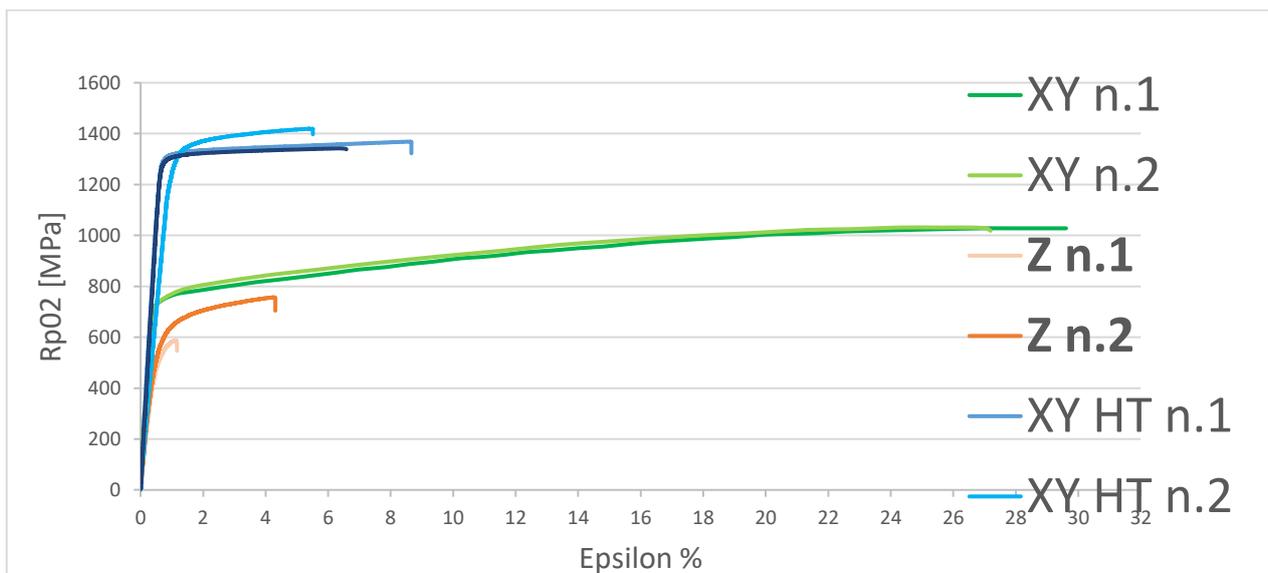


Figura 24: grafico tenione - deformazione provino C2

I dati raccolti per le prove di trazione fanno riferimento al solo provino C2 realizzato con i seguenti parametri di processo: P=192W e Velocità Avanzamento Laser = 600 mm/s.

Da letteratura si legge che è possibile legare HV [MPa] ed Rp02 [MPa] con una legge lineare del tipo:

$$HV = k * Rp02$$

L'Rp02 per il provino C2 è 530 MPa e si dispone di cinque valori di durezza al variare del carico imposto all'indentatore per cui è possibile calcolare altrettanti coefficienti angolari da formula inversa:

$$k = HV/Rp02$$

Si riportano di seguito durezza Vickers, Rp02 e coefficienti così ottenuti:

carico [g]	HV[MPa]	k	Rp02 [MPa]
25	399.9	1.400	560
50	376.1	1.489	560
200	352.3	1.589	560
500	335.1	1.671	560
1000	326.5	1.715	560
media	358.0	1.573	560

Tabella 10: correlazione durezza tensione snervamento con coefficiente angolare k

Il coefficiente angolare medio si aggira attorno ad 1.6 e la deviazione standard dei cinque coefficienti rispetto alla media è di 0.11 ossia il 7%. Il grafico successivo mostra l'andamento dei coefficienti al variare del carico ed una linea di tendenza che ne riproduce fedelmente la forma. Come per i fitting precedenti si è valutato il modello analitico che presentasse miglior R<sup>2</sup> convenendo ancora una volta sull'approssimazione logaritmica.

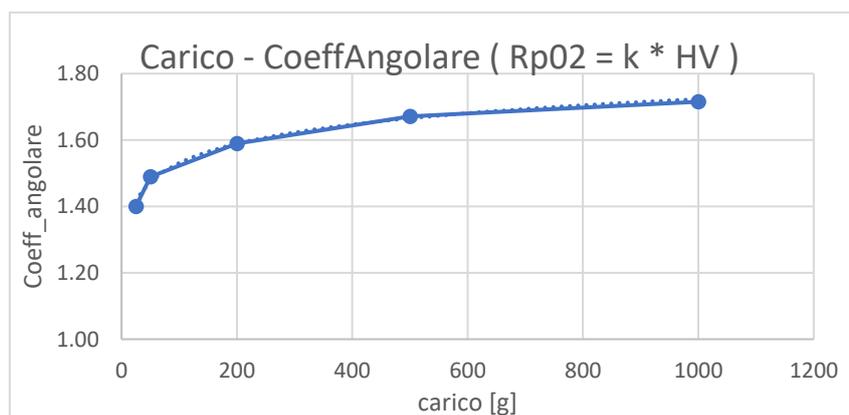


Figura 25: andamento coefficiente angolare k in funzione del carico di indentazione in grammi per risalire alla tensione di snervamento partendo dalla durezza

$$y = 0.0837\ln(x) + 1.1455; R^2 = 0.9914$$

con:

y = coefficiente angolare;

x= carico [g];

Si dispone dunque di una serie di coefficienti e di un modello analitico logaritmico che li rappresenta in funzione di qualsiasi valore di carico. In questo modo si tiene conto dell'Indentation Size Effect anche per la conversione dei valori di durezza in Rp02 dando seguito al lavoro presentato nei capitoli precedenti, con l'obiettivo di *stimare le tensioni a snervamento anche per i provini di cui non si dispone delle curve sperimentali.*

#### Ipotesi

Per procedere alla stima dell'Rp02 per gli altri provini basandosi su quanto appena visto e senza ricorrere a prove sperimentali è necessaria un'ipotesi piuttosto forte. Si tenga infatti presente che ciascuno dei sette provini analizzati è stato realizzato da Sophia High Tech con diversi parametri di processo riassunti nella tabella seguente:

Potenza [W]	Velocità Body [mm/s]	Densità Energia [J/mm3]	n°	
192	400	152,3809524	1	x4 ZONE
	600	101,5873016	2	
	800	76,19047619	3	
230	500	146,031746	4	
	600	121,6931217	5	
	700	104,30839	6	
	900	81,1287478	7	

Figura 26: parametri di processo della fabbricazione additiva

Le curve di trazioni precedenti facevano riferimento al provino C2 e si vuole procedere alla stima degli Rp02 dei provini 1, 3, 4, 5, 6 e 7.

Con l'ipotesi proposta, si afferma che:

*I coefficienti " k "*

*riferiti al provino C2 (190W e 600 mm/s), calcolati con:*

$$k = HV/Rp02$$

*e legati al carico in grammi secondo l'equazione empirica:*

$$y = 0.0837 \ln(x) + 1.1455;$$

$$R^2 = 0.9914$$

*non variano per gli altri sei provini,*

*quindi non variano al variare dei parametri di processo*

*della fabbricazione additiva.*

La bontà di questa assunzione potrebbe valutarsi a posteriori a seguito di altre prove di trazione. In particolare, potrebbe essere spunto per un successivo lavoro procedere all'acquisizione degli Rp02 dei provini non ancora analizzati per valutarne la variazione dei coefficienti angolari per ora ripresi dal provino C2.

Prima di presentare i risultati ottenuti si riportano i valori di durezza da utilizzare per la conversione in Rp02.

DUREZZA	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
	ParProc 192W 400mm/s	ParProc 192W 600mm/s	ParProc 192W 800mm/s	ParProc 230W 500mm/s	ParProc 230W 600mm/s	ParProc 230W 700mm/s	ParProc 230W 900mm/s	
carico [g]	[Mpa]							
25	371.382	399.932	471.216	482.882	358.214	408.754	420.89	
50	362.824	376.078	464.542	481.456	360.288	403.236	370.104	
200	325.434	352.346	440.348	441.506	327.91	370.898	353.664	
500	333.91	335.08	421.05	444.75	321.924	353.542	347.7	
1000	310.364	326.478	392.66	439.91	318.548	352.984	317.178	
MEDIA	340.7828	357.9828	437.9632	458.1008	337.3768	377.8828	361.9072	381.7138

DUREZZA	C1TT	C2TT	C3TT	C4TT	C5TT	C6TT	C7TT	
	ParProc 192W 400mm/s	ParProc 192W 600mm/s	ParProc 192W 800mm/s	ParProc 230W 500mm/s	ParProc 230W 600mm/s	ParProc 230W 700mm/s	ParProc 230W 900mm/s	
carico [g]	[Mpa]							
25	670.7	630.4	573.5	524.7	618.7	609.6	573.9	
50	630.3	602.0	550.3	533.6	598.1	568.5	568.5	
200	594.5	571.9	526.4	534.4	588.7	536.0	536.0	
500	581.4	557.6	512.0	508.6	564.8	513.3	513.3	
1000	564.9	568.6	505.8	498.7	563.7	512.8	512.8	
MEDIA	608.4	586.1	533.6	520.0	586.8	548.0	540.9	560.5441

Tabella 11: riepilogo durezza al variare del carico di indentazione e dei parametri di processo per i sette provini non trattati e per i sette provini invecchiati

Le tabelle successive mostrano dunque, al variare del carico in grammi e dei parametri di processo, le tensioni a snervamento ottenute facendo fede all'ipotesi adottata. Si riporta lo stesso studio per i provini semplicemente stampati e per quelli trattati termicamente.

AS FABRICATED		C1		C2		C3	
		<b>ParProc</b> 192W 400mm/s		<b>ParProc</b> 192W 600mm/s		<b>ParProc</b> 192W 800mm/s	
carico [g]	k	Rp02 [Mpa]	k	Rp02 [Mpa]	k	Rp02 [Mpa]	
25	1.40	520.02	1.40	560.00	1.40	659.81	
50	1.49	540.26	1.49	560.00	1.49	691.73	
200	1.59	517.23	1.59	560.00	1.59	699.87	
500	1.67	558.04	1.67	560.00	1.67	703.68	
1000	1.72	532.36	1.72	560.00	1.72	673.52	
<b>MEDIA</b>	1.57	533.58	1.57	560.00	1.57	685.72	

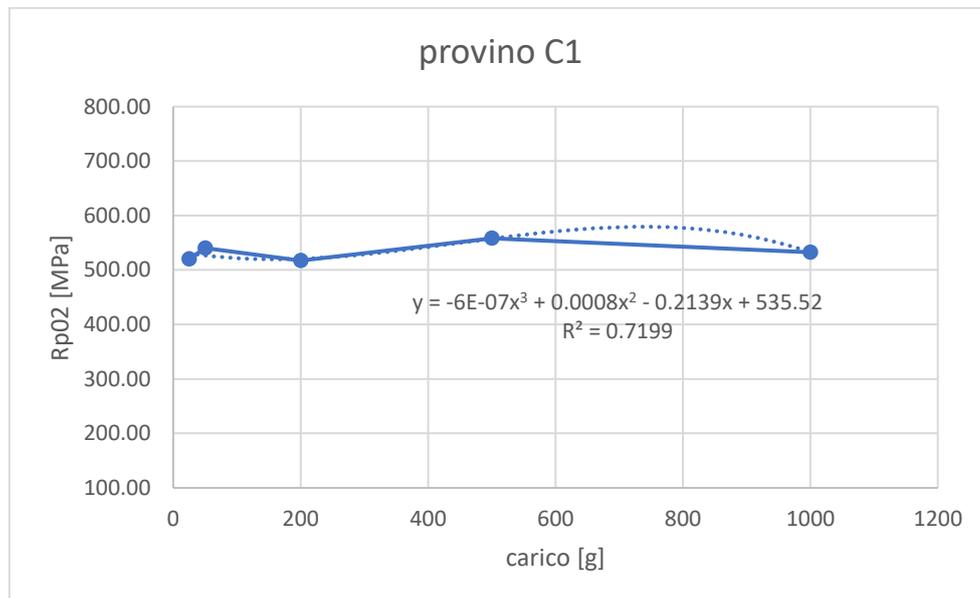
AS FABRICATED		C4		C5		C6		C7	
		<b>ParProc</b> 230W 500mm/s		<b>ParProc</b> 230W 600mm/s		<b>ParProc</b> 230W 700mm/s		<b>ParProc</b> 230W 900mm/s	
carico [g]	k	Rp02 [Mpa]	k	Rp02 [Mpa]	k	Rp02 [Mpa]	k	Rp02 [Mpa]	
25	1.40	676.15	1.40	501.58	1.40	572.35	1.40	589.35	
50	1.49	716.91	1.49	536.49	1.49	600.44	1.49	551.10	
200	1.59	701.71	1.59	521.16	1.59	589.49	1.59	562.09	
500	1.67	743.29	1.67	538.01	1.67	590.85	1.67	581.09	
1000	1.72	754.57	1.72	546.40	1.72	605.47	1.72	544.05	
<b>MEDIA</b>	1.57	718.52	1.57	528.73	1.57	591.72	1.57	565.54	

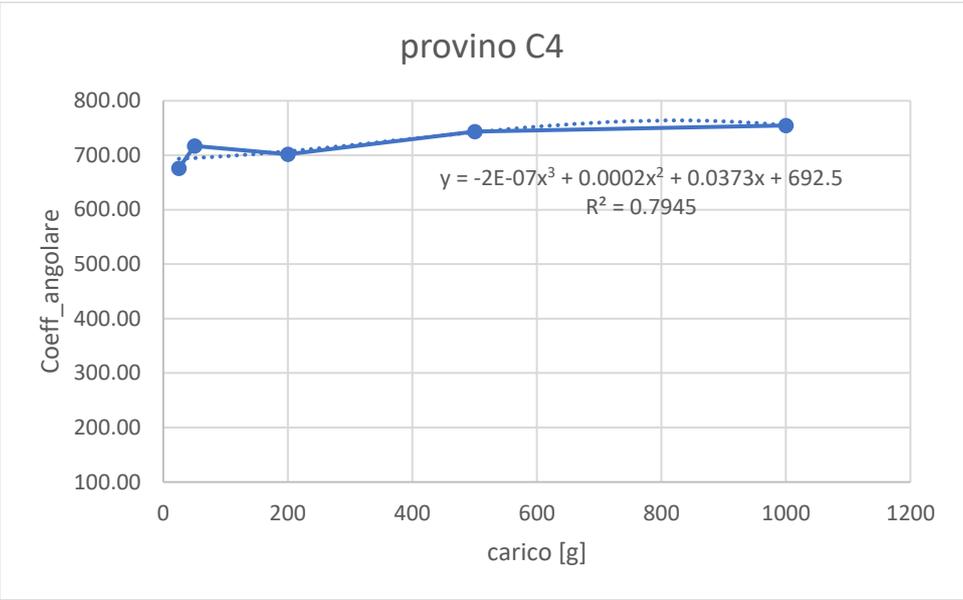
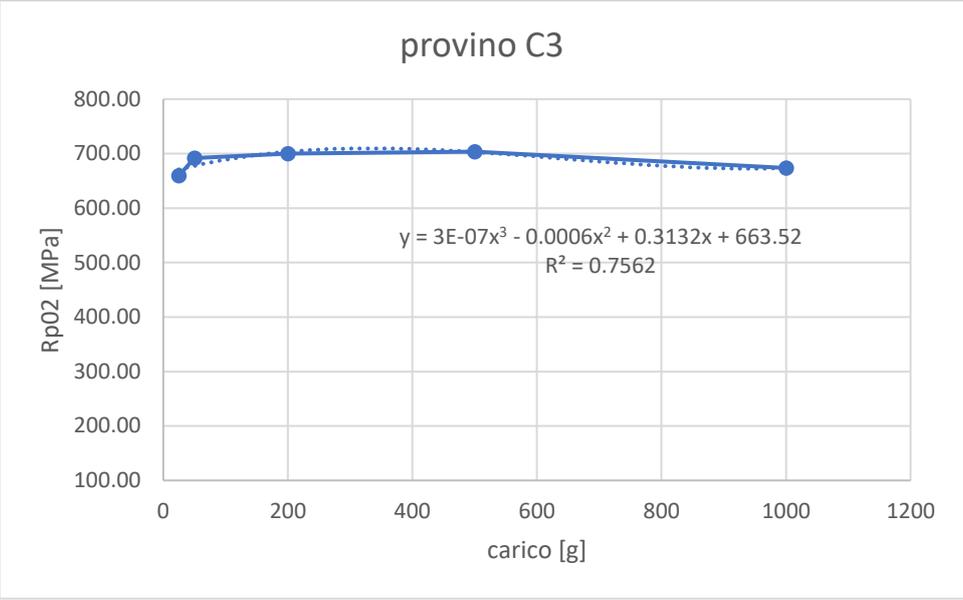
TRATTAMENTO TERMICO		C1TT		C2TT		C3TT	
		<b>ParProc</b> 192W 400mm/s		<b>ParProc</b> 192W 600mm/s		<b>ParProc</b> 192W 800mm/s	
carico [g]	k	Rp02 [Mpa]	k	Rp02 [Mpa]	k	Rp02 [Mpa]	
25	1.43	957.57	1.43	900.00	1.43	818.72	
50	1.49	942.25	1.49	900.00	1.49	822.64	
200	1.57	935.67	1.57	900.00	1.57	828.49	
500	1.61	938.44	1.61	900.00	1.61	826.40	
1000	1.58	894.08	1.58	900.00	1.58	800.58	
<b>MEDIA</b>	1.54	933.60	1.54	900.00	1.54	819.36	

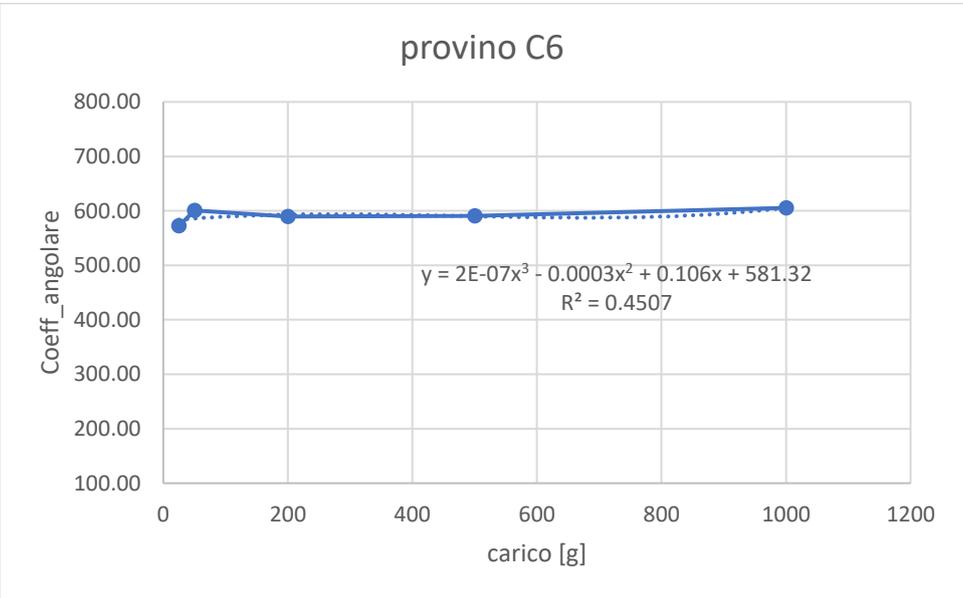
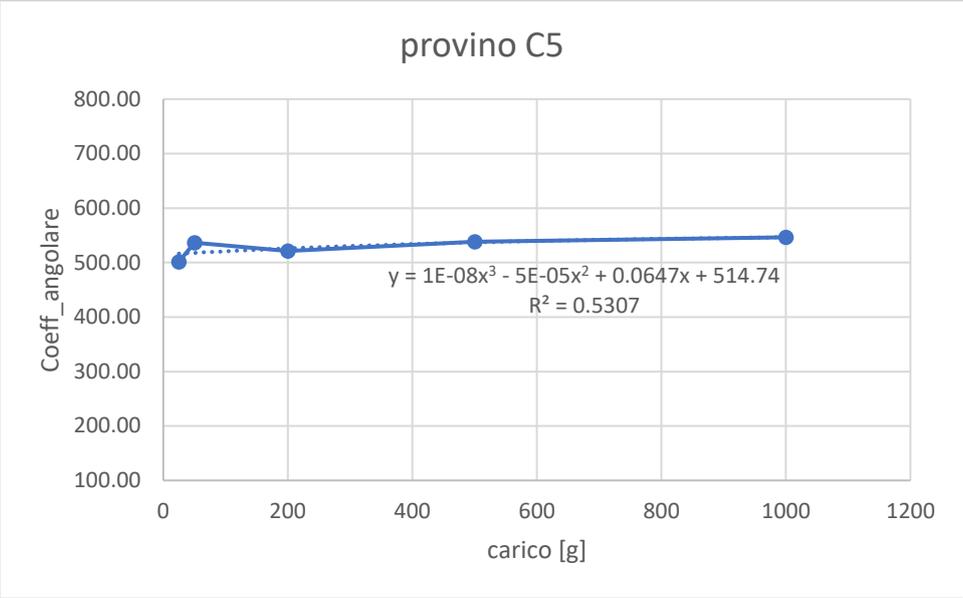
TRATTAMENTO TERMICO		C4TT		C5TT		C6TT		C7TT	
		ParProc 230W 500mm/s		ParProc 230W 600mm/s		ParProc 230W 700mm/s		ParProc 230W 900mm/s	
carico [g]	k	Rp02 [Mpa]							
25	1.43	749.16	1.43	883.24	1.43	870.28	1.43	819.39	
50	1.49	797.74	1.49	894.12	1.49	849.83	1.49	849.83	
200	1.57	841.04	1.57	926.44	1.57	843.61	1.57	843.61	
500	1.61	820.91	1.61	911.57	1.61	828.47	1.61	828.47	
1000	1.58	789.34	1.58	892.25	1.58	811.74	1.58	811.74	
<b>MEDIA</b>	1.54	799.64	1.54	901.53	1.54	840.79	1.54	830.61	

Tabella 12: calcolo tensioni di snervamento per i provini di cui non si dispone dell'Rp02

Ottenute le tensioni a snervamento Rp02 al variare del carico si è tracciato per ogni provino AF e HT l'andamento in funzione del carico di indentazione. Se ne riportano le andature ricavate per utilizzare poi i modelli analitici nel codice Matlab e procedere così alla stima delle proprietà meccaniche inizialmente per i sette provini e poi al variare dei parametri di processo anche per valori non riferiti ai provini sperimentalmente già processati.







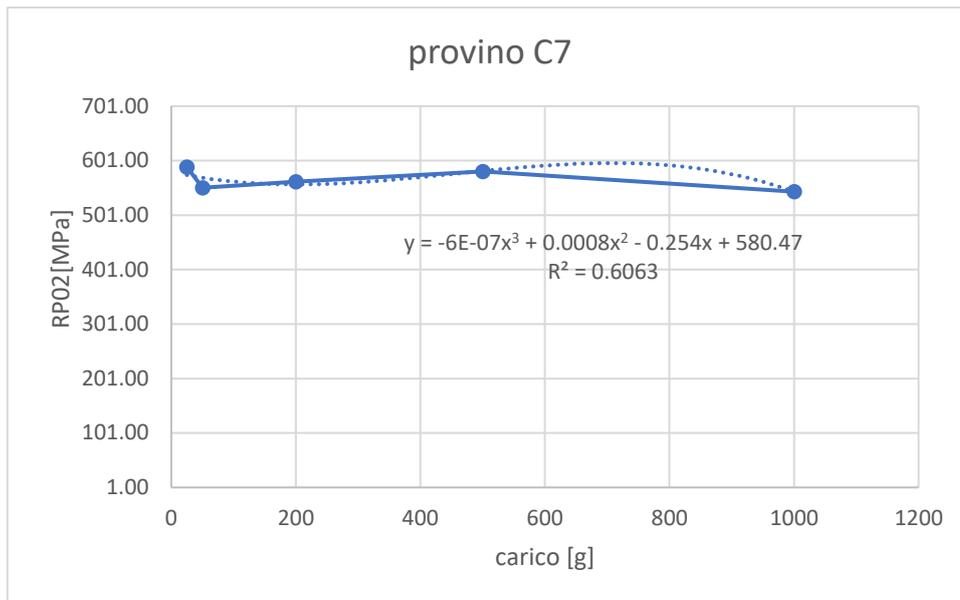
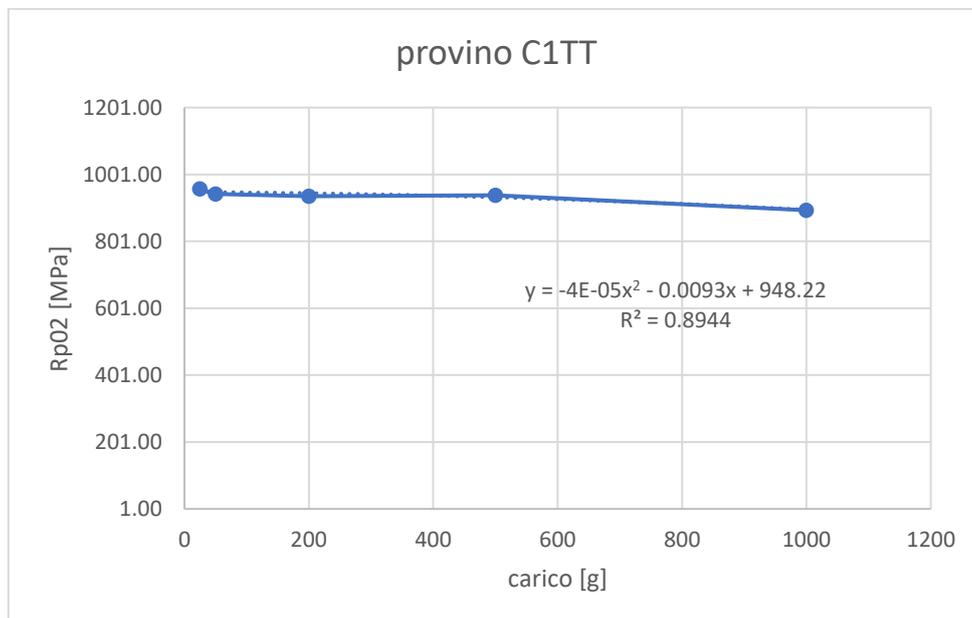
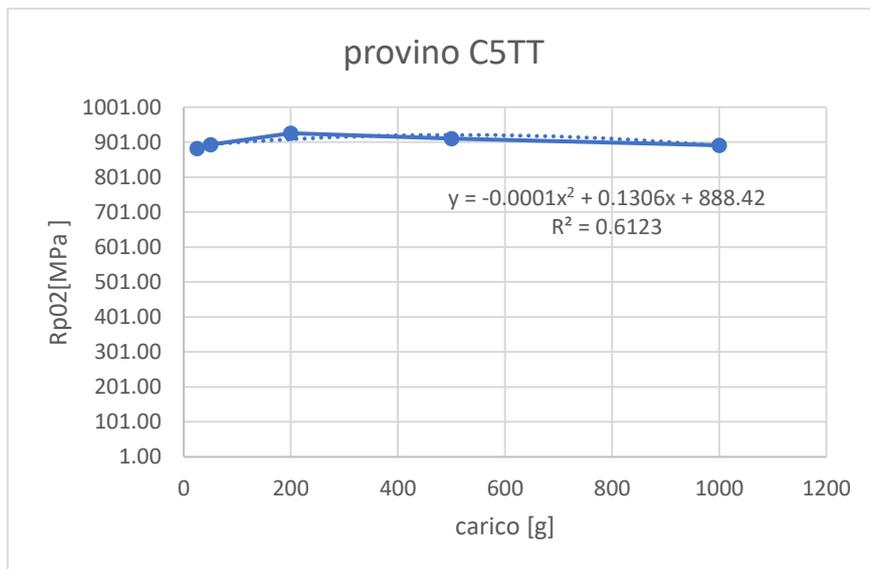
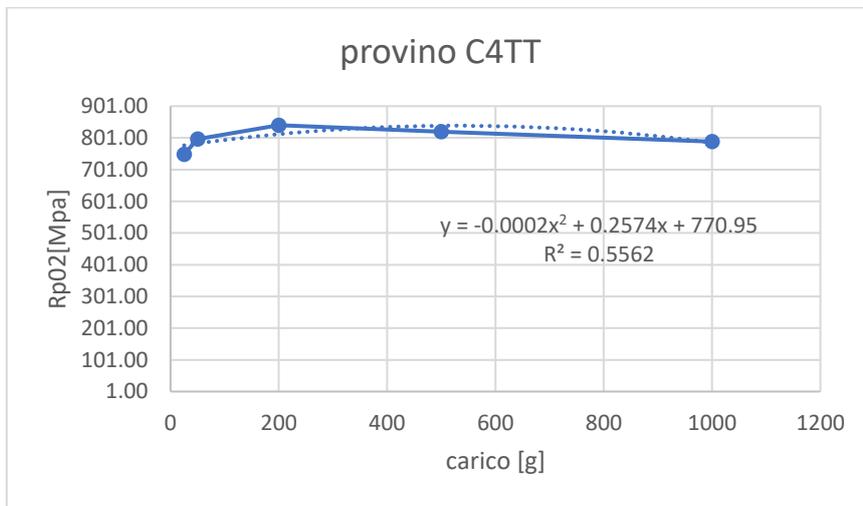
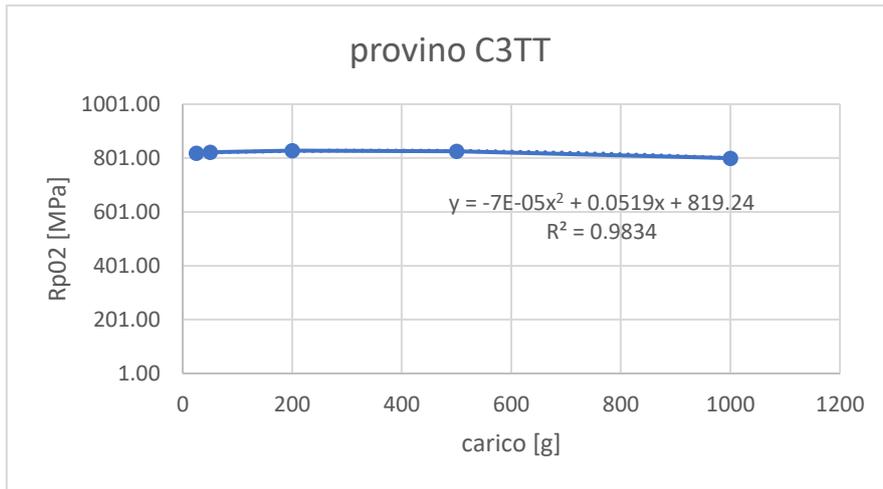


Figura 27: andamenti polinomiali di terzo grado per provini non invecchiati per correlare Rp02 a carico di indentazione

L'approssimazione è stata fatta, come per il fitting dei dati sperimentali di durezza, seguendo un'analisi statistica tra andamenti lineari logaritmici e polinomiali. La scelta è ricaduta su polinomi di terzo grado che consentissero di registrare R<sup>2</sup> migliori.

Si riportano gli stessi grafici per i provini invecchiati





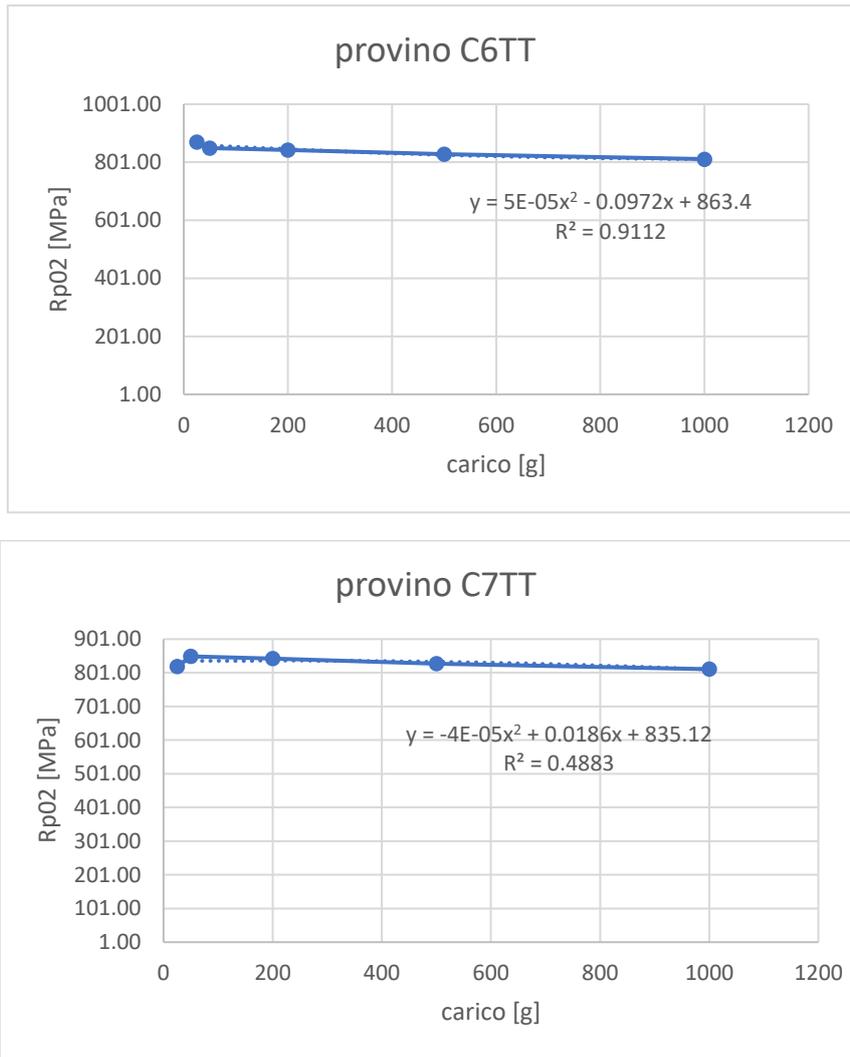


Figura 28: andamenti polinomiali di secondo grado per provini non invecchiati per correlare Rp02 a carico di indentazione

Con i provini trattati termicamente è stato adottato un’ approssimazione con polinomio di secondo grado.

Anche questo aspetto sottolinea quanto discusso come effetto dell’ invecchiamento sull’ ISE. In particolare, gli andamenti delle tensioni a snervamento per i provini trattati, presentano meno oscillazioni rispetto ai provini non trattati, segno del fatto che una maggiore durezza della lega ottenuta da precipitazione di seconde fasi post invecchiamento possa garantire proprietà più omogenee del materiale. A tal proposito può essere consigliabile utilizzare il trattamento termico per porre rimedio alle disomogeneità introdotte dalla fabbricazione additiva.

#### 4.4.1 Commento risultati ottenuti da correlazione HV [Mpa] – Rp02 [Mpa] adottata

Per un’ analisi dei risultati ottenuti è doveroso spendere qualche parola sugli andamenti che legano parametri di processo a durezza e tensioni di snervamento.

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>		<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>C7</b>
<b>P [W]</b>	192	192	192	<b>P [W]</b>	230	230	230	230
<b>v [mm/s]</b>	400	600	800	<b>v [mm/s]</b>	500	600	700	900
<b>rho [J/mm3]</b>	152	101	76	<b>rho [J/mm3]</b>	146	121	104	81

Tabella 13: riepilogo parametri di processo provini

Si osservi che la densità energetica si riduce all'aumentare della velocità di avanzamento del laser e ci si aspetterebbe che durezza e tensione di snervamento seguissero una tendenza dello stesso tipo.

Si riportano le durezze mediate per ogni provino e i relativi valori di Rp02 mediati, ossia quelli osservabili nell'ultima riga delle precedenti tabelle.

	C1	C2	C3		C4	C5	C6	C7
<b>HV [Mpa]</b>	340.7828	357.9828	437.9632	<b>HV [Mpa]</b>	458.1008	337.3768	377.8828	361.9072
<b>Rp02[MPa]</b>	533.58	560.00	685.72	<b>Rp02[MPa]</b>	718.52	528.73	591.72	565.54

Tabella 14: riepilogo durezza e tensioni di snervamento ottenute per i sette provini non trattati termicamente

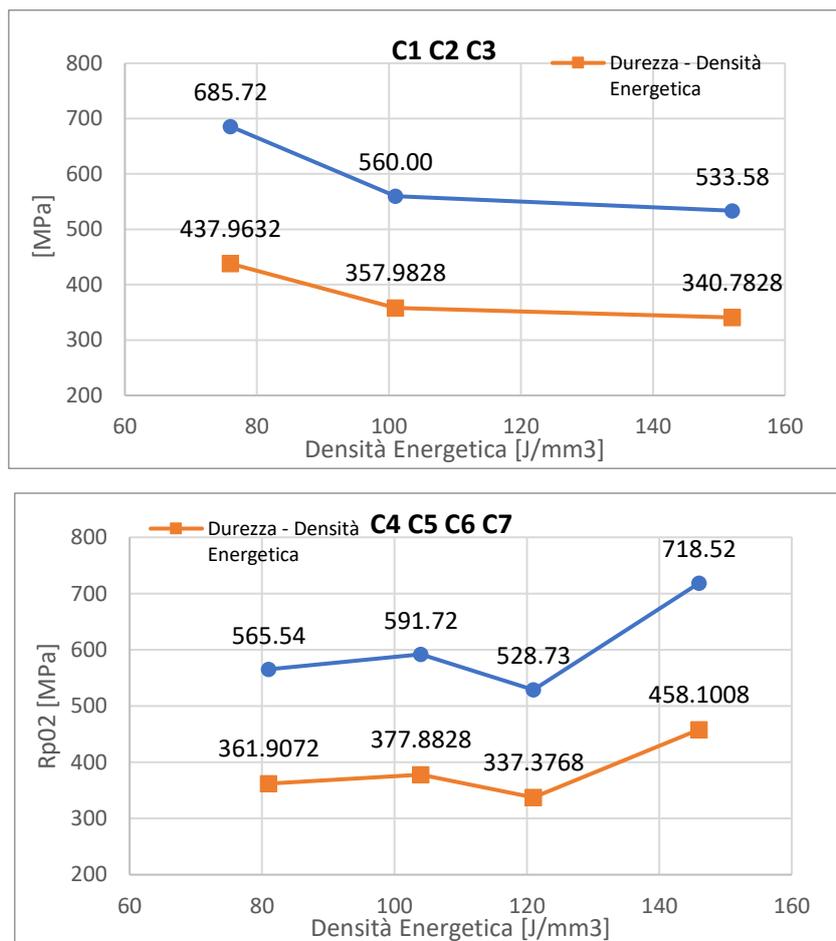


Figura 29: andamento durezza Vickers e tensione snervamento per i sette provini al variare del parametro di densità energetica

Si osserva che per i primi tre provini caratterizzati da P = 190 W le proprietà meccaniche si riducono all'aumentare della densità energetica del laser mentre aumentano per gli altri quattro con P = 230 W.

L'anomalia potrebbe risiedere nell'acquisizione dei valori di durezza la cui validità si ricorda essere particolarmente soggetta alla capacità del sottoscritto di avere la stessa ripetibilità nella messa a fuoco manuale dell'immagine raffigurante l'impronta lasciata dall'indentatore in fase di test da cui poi il calcolo delle diagonali e della durezza.

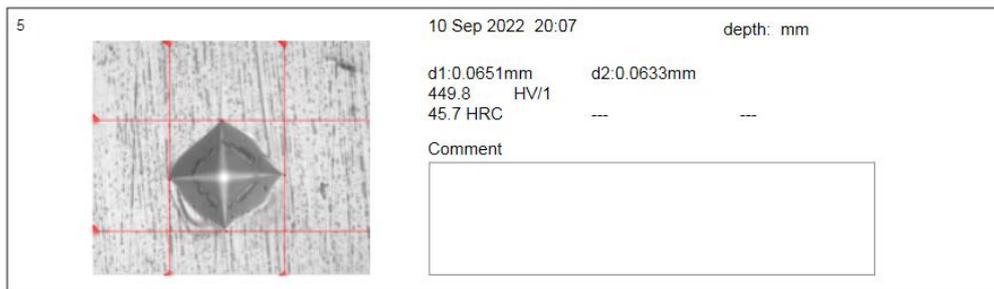


Figura 30: impronta deformata e diagonali d1 e d2

Ci sarebbe però da sottolineare che trattandosi di fabbricazione additiva sarebbe piuttosto inappropriato aspettarsi l'omogeneità delle proprietà meccaniche anche su piccolissimi volumi di materiale stampato. Basta indentare in una micro-porzione di sezione meno compatta di altre a seguito di diversa velocità di raffreddamento per acquisire valori di durezza, e quindi di Rp02, molto diversi dai valori registrati nella micro-porzione immediatamente vicina.

Infatti, come già discusso nei capitoli introduttivi, una tipica caratteristica osservata nella microstruttura dell'Inconel 718 AM a base di polveri è la porosità. I pori di forma circolare si formano solitamente a causa dell'intrappolamento di gas nel metallo fuso, mentre i pori di forma irregolare "a mancanza di fusione" sono attribuiti alla fusione incompleta del materiale durante il processo di fabbricazione.

Si tratta di aspetti particolarmente legati alla velocità di raffreddamento del materiale fuso e se si pensa che a velocità di avanzamento del laser maggiori corrispondono velocità di raffreddamento crescenti si può intuire come nei numerosi cambi di direzione operati dal laser per una fusione ad isole delle polveri, intrappolamento di gas, mancanza di fusione e zone ottimali di fusione possono caratterizzare porzioni di materiale molto vicine tra loro lasciando spazio a porosità più o meno importanti, da cui diversi valori di durezza acquisiti in fase di test.

Le cricche, invece, hanno origine da tensioni residue indotte dall'AM o come conseguenza di cricche da solidificazione o da liquefazione, spesso dovuti a gradienti di temperatura elevati in fase di raffreddamento e solidificazione, per questo motivo legabili ancora alla velocità di avanzamento del laser

La microstruttura dell'Inconel 718 AM varia tipicamente lungo l'altezza dell'edificio a causa del profilo termico dipendente dall'altezza sperimentato dalle diverse parti dell'edificio. Se si pensa alla procedura utilizzata in fase di test, ogni provino era indentato per cinque volte con lo stesso carico procedendo riposizionando l'indentatore sempre qualche millimetro verso valori crescenti dell'asse Z. Stiamo facendo l'ipotesi che i provini fossero tutti disposti nella stessa direzione al momento del test, cosa non vera poiché non si era considerata la variabile relativa alle differenti velocità di raffreddamento tra piastra e sezione più lontana da questa. A causa del contatto diretto con la piastra del substrato di costruzione, di solito si ottiene una velocità di raffreddamento maggiore per gli strati inferiori. Pertanto, gli strati superiori presentano dendriti colonnari più grossolane rispetto a quelle degli strati inferiori e di questo aspetto non si è tenuto conto.

Si ripete la stessa procedura per provini trattati termicamente per capire se la tendenza è confermata o se come si sospetta possono esserci errori dovuti alla registrazione dei parametri sperimentali.

	C1	C2	C3		C4	C5	C6	C7
P [W]	192	192	192	P [W]	230	230	230	230
v [mm/s]	400	600	800	v [mm/s]	500	600	700	900
rho [J/mm3]	152	101	76	rho [J/mm3]	146	121	104	81

	C1	C2	C3		C4	C5	C6	C7
HV [Mpa]	608.4	586.1	533.6	HV [Mpa]	520.0	586.8	548.0	540.9
Rp02[MPa]	933.60	900.00	819.36	Rp02[MPa]	799.64	901.53	840.79	830.61

Tabella 15: riepilogo durezza e tensioni di snervamento ottenute per i sette provini trattati termicamente

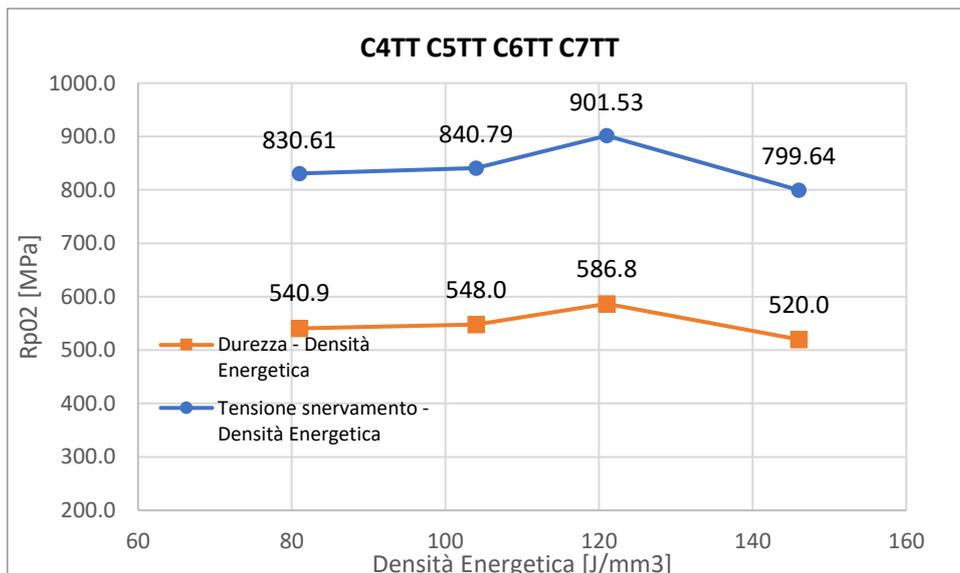
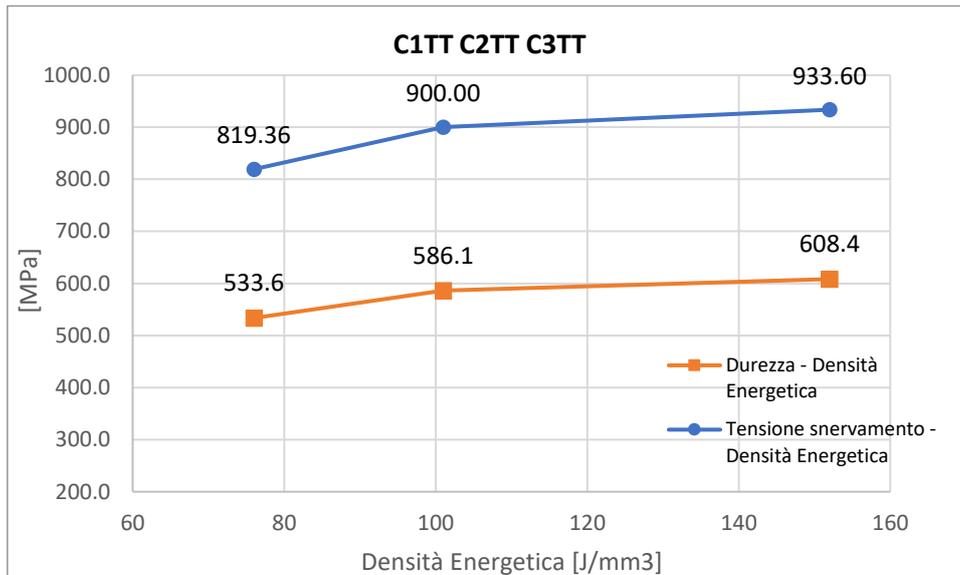


Figura 31: : andamento durezza Vickers e tensione snervamento per i sette provini invecchiati al variare del parametro di densità energetica

Nel caso dei provini invecchiati sembra essere più evidente che la tendenza significativa è quella per cui durezza e tensione a snervamento crescono con l'aumento della densità energetica, quindi con il ridursi della velocità di avanzamento del laser, comportamento giustificabile per il fatto che a velocità di avanzamento ridotte corrisponde, a parità di potenza del laser, una fusione più graduale delle polveri di IN718, traducibile in un liquido probabilmente più omogeneo.

## 4- IMPLEMENTAZIONE E DESCRIZIONE MODELLO MATLAB

### 5.1 Presentazione codice

Una consistente parte del monte ore dedicate all'elaborazione di questa relazione di fine studi è stata dedicata all'implementazione di un modello matematico che, come accennato poc'anzi, restituisce stime delle proprietà del materiale in funzione dei parametri di stampa pur sempre tenendo conto dell'Indentation Size Effect.

In particolare, tale script realizzato in ambiente Matlab vedrebbe in input la velocità di avanzamento del laser e restituisce valori di durezza HV [Mpa] ed Rp02 [Mpa] in funzione della velocità di avanzamento del laser [mm/s] per due diversi valori di potenza del laser [W] come da immagine seguente.

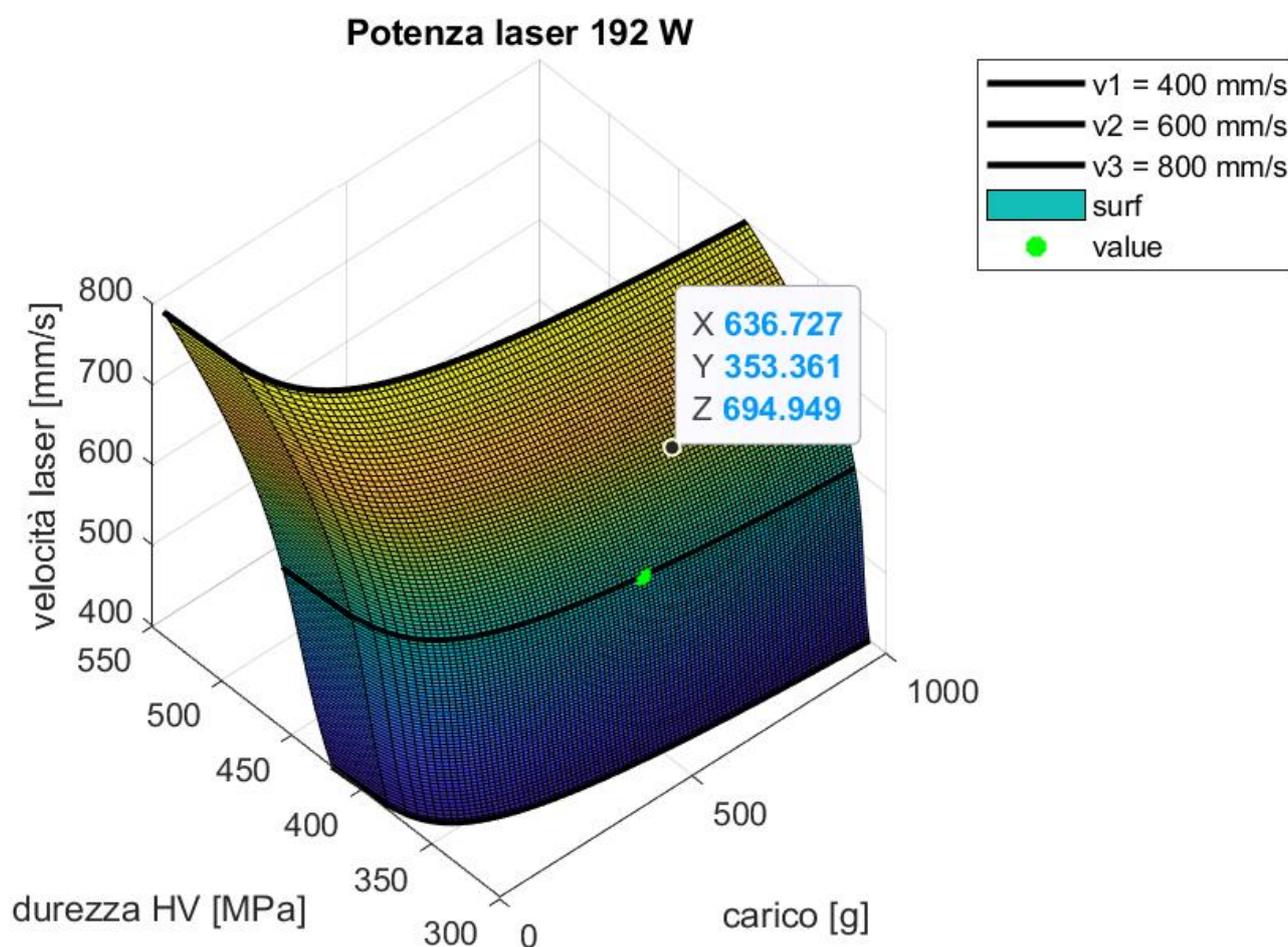


Figura 32: durezza al variare di velocità avanzamento laser e carico indenzazione per  $p=192\text{ W}$

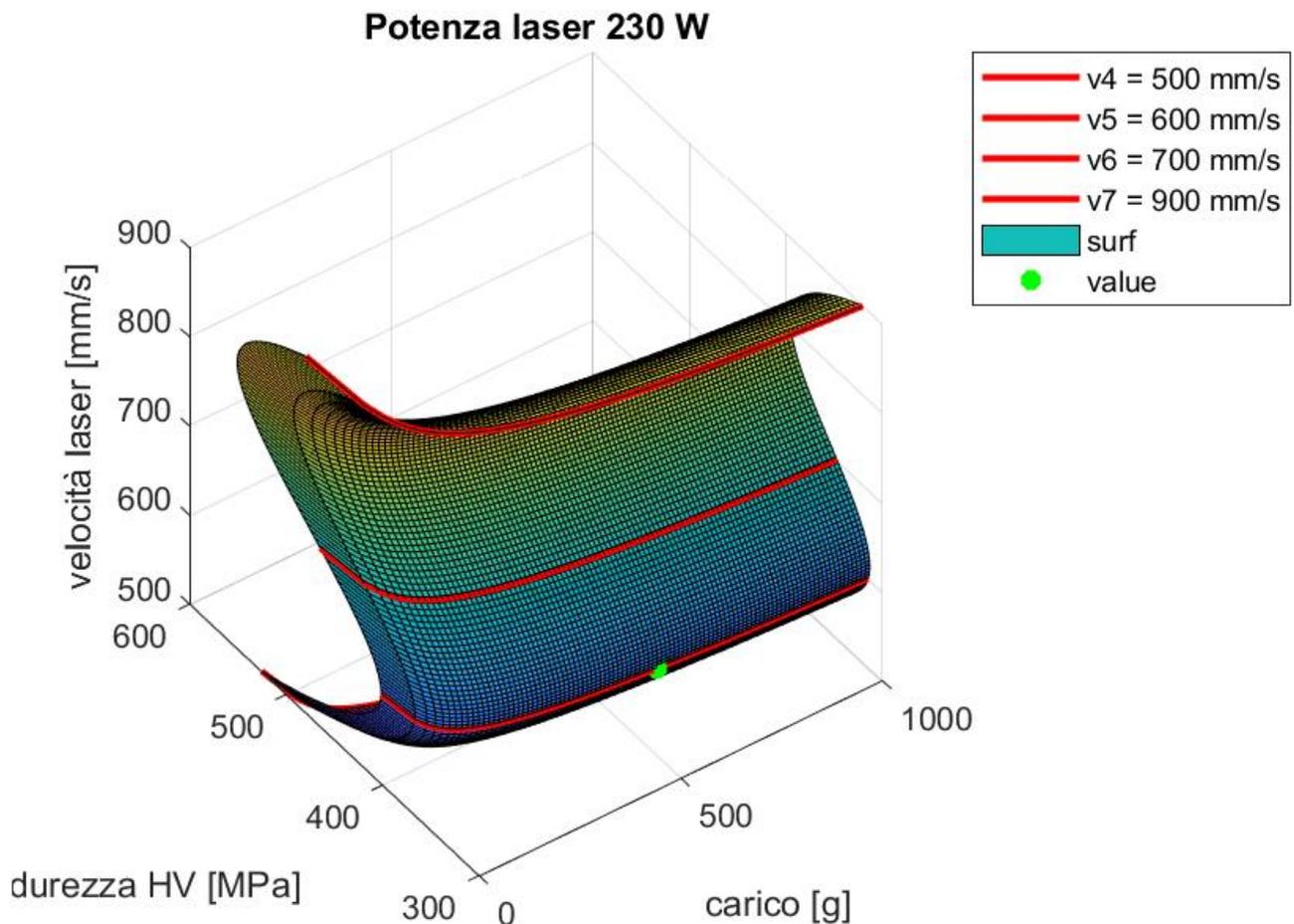


Figura 33: durezza al variare di velocità avanzamento laser e carico indentazione per P=230 W

La necessità di parametrizzare in funzione di due soli valori di potenza 192 W e 230 W deriva direttamente dai parametri di processo utilizzati in fase di stampa da Sophia High Tech per cui saranno presentati solo risultati in funzione di questi due valori.

Potenza [W]	Velocità Body [mm/s]	Densità Energia [J/mm3]	n°	
192	400	152,3809524	1	x4 ZONE
	600	101,5873016	2	
	800	76,19047619	3	
230	500	146,031746	4	
	600	121,6931217	5	
	700	104,30839	6	
	900	81,1287478	7	

Figura 34: : parametri di processo della fabbricazione additiva

Come si evince dalla precedente tabella, i provini realizzati in Selective Laser Melting racchiudono sette diverse combinazioni di parametri di processo, pertanto, le due precedenti superfici

parametrizzate a 192 W e 230 W, sono state realizzate interpolando rispettivamente su tre (400, 600, 800 mm/s) e su quattro (500, 600, 700 900 mm/s) diverse curve sperimentali.

## 5.2 Struttura logica del codice Matlab

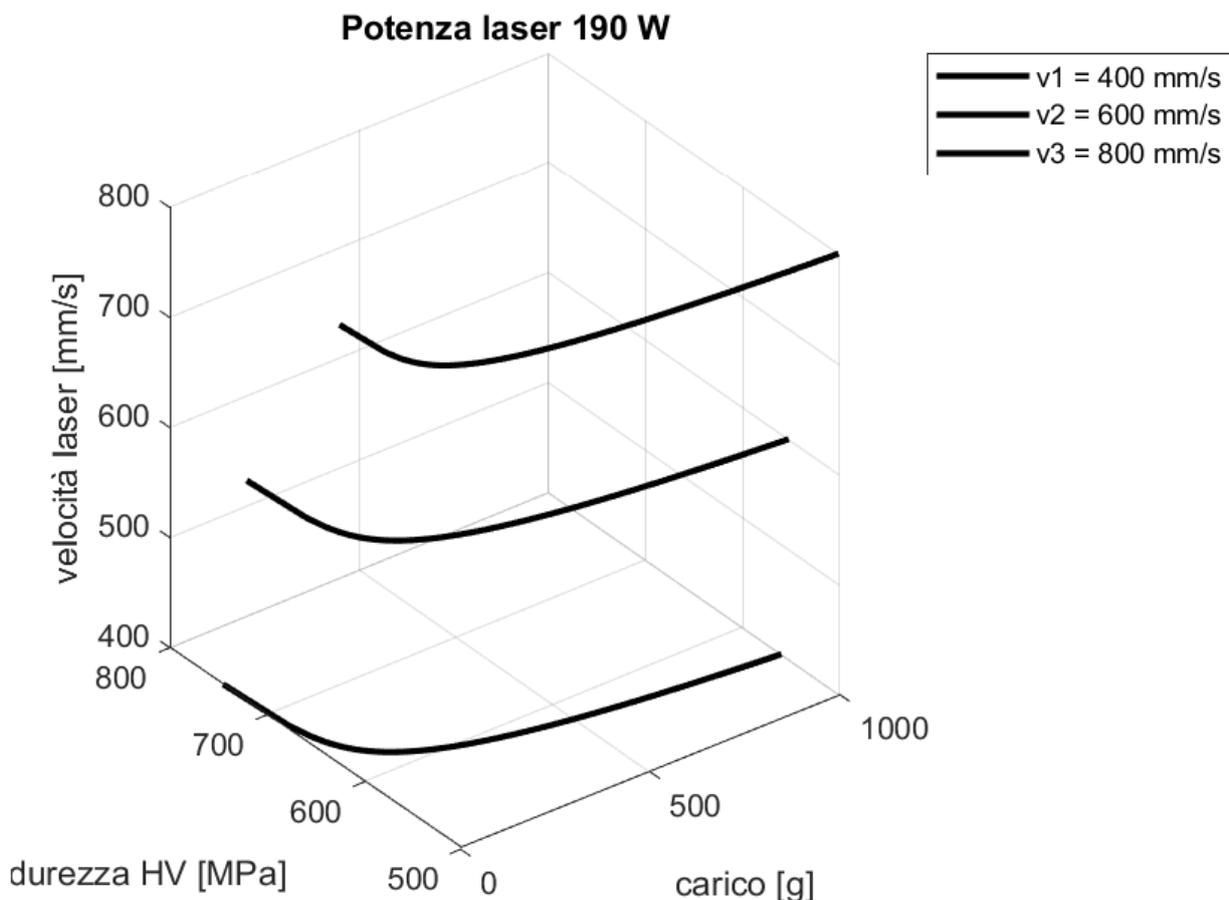
Prima di entrare nel dettaglio delle righe di codice si riporta in quattro punti il procedimento logico che ha portato allo sviluppo dello script.

Procedendo per punti:

### 1) Grafico delle sette curve sperimentali

Il primo passo è stato quello di *realizzare le sette curve sperimentali* plottando semplicemente i decrementi logaritmici in funzione dei carichi di indentazione con il comando "Plot3". Per discretizzare il problema si è scelto di dividere l'intervallo di carichi relativi alle prove di microdurezza, da 1g a 1000g, in N nodi di carichi, con N impostato a 100. Si ottengono così due plot differenti che come spiegato poc'anzi, riproducono le tre curve per 192 W e le altre quattro curve sperimentali per 230 W.

In particolare, data la terna destrorsa X, Y, Z con l'asse Z rivolto verso l'alto, si ha il carico [g] sull'asse X, la durezza [Mpa] sulle Y e la velocità di avanzamento del laser [mm/s] sulle Z.



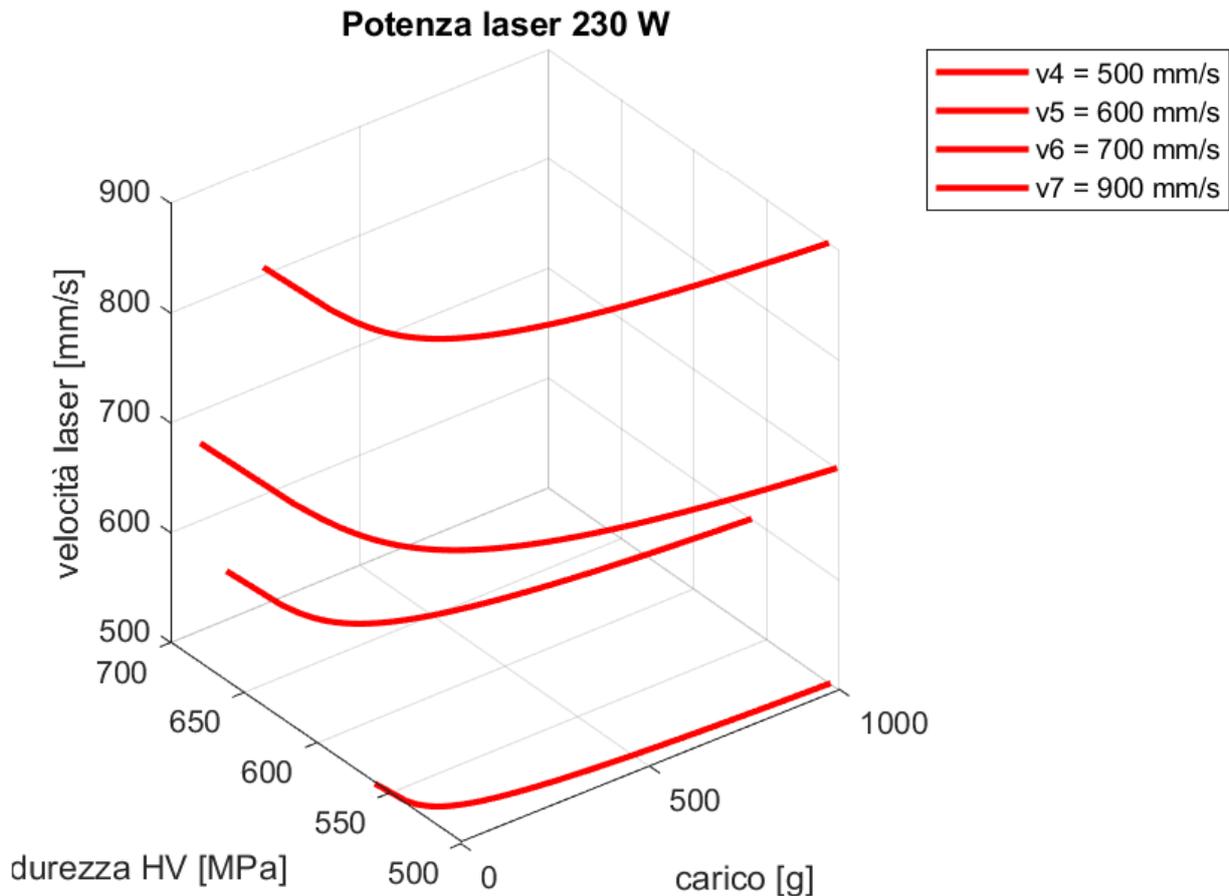


Figura 35: tre + quattro curve note di durezza in funzione del carico in grammi parametrizzate per diversi valori di velocità avanzamento laser

Si ricordi che si sta lavorando su due tipi di provini, quelli trattati termicamente e quelli non trattati. La prima scelta che dovrà fare l'utente sarà proprio questa: selezionare da tastiera la famiglia di provini in IN718 di cui si vuole avere informazioni circa le proprietà meccaniche. Lo script selezionerà i modelli analitici appropriati per ottenere i primi valori di durezza, diversi tra provini invecchiati e non, su cui procedere per il seguito dell'esecuzione del codice.

## 2) Realizzazione di un'unica superficie

Disponendo delle distinte curve, serve ora che si proceda alla *realizzazione di una superficie* che unisca le curve per ognuno dei due grafici al fine di avere un andamento in tre dimensioni della durezza. A tal fine si è proceduto con i comandi "Polyfit" e "Polyval" per creare rispettivamente una matrice di coefficienti del polinomio interpolante ed una matrice con i valori di durezza calcolati con gli stessi polinomi. Per discretizzare il problema si è suddiviso l'intervallo di velocità di avanzamento del laser in M intervalli equi spaziate.

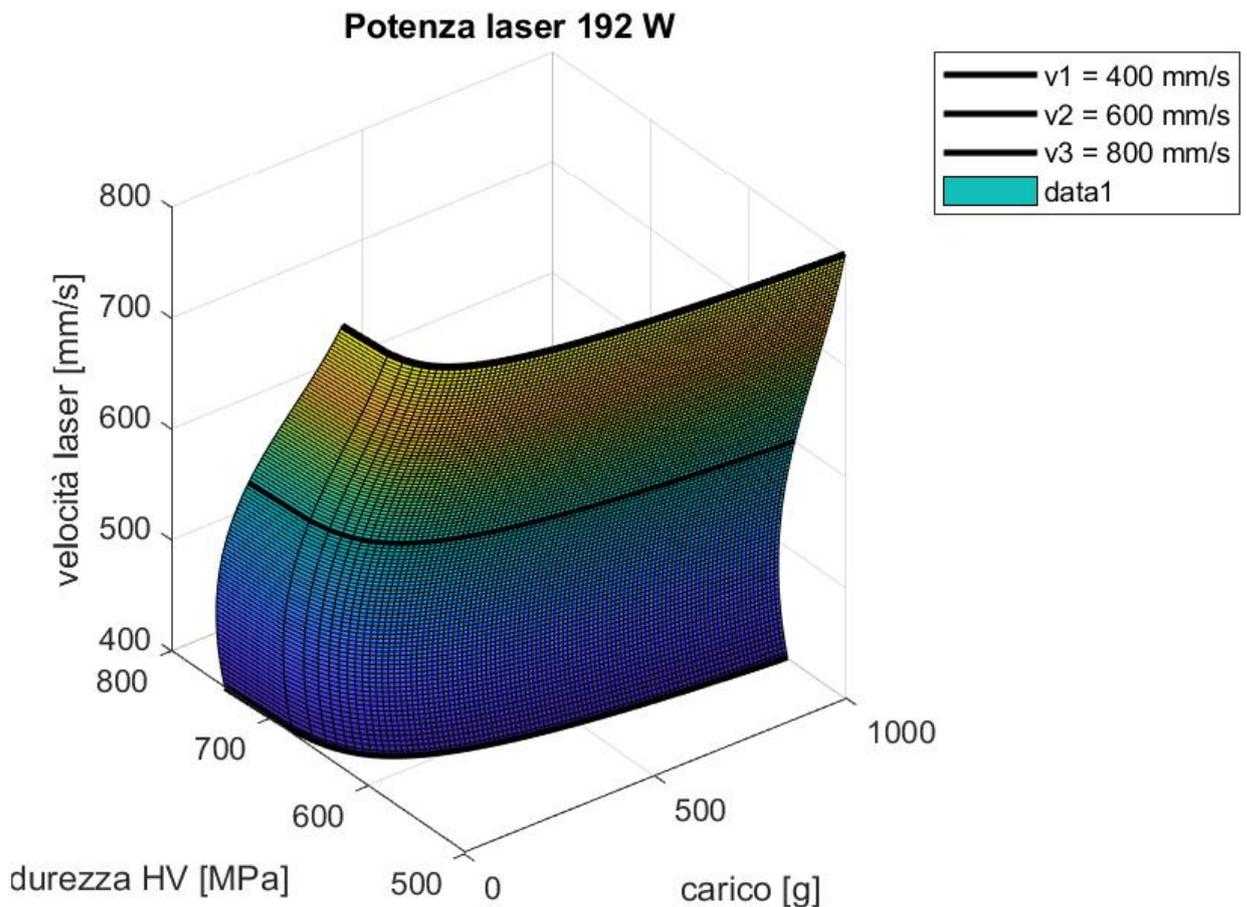
- Discretizzazione del problema: *range di carichi* e *range di velocità di avanzamento laser*  
Riepilogando, il problema è stato quindi discretizzato provvedendo a fornire un vettore "X" di N elementi tra 1g e 1000g ed un altro vettore Z di M elementi tra 400 ed 800 mm/s. Quest'ultima discretizzazione è stata scelta per poter confrontare valori uguali di velocità di

avanzamento sui due grafici riferiti a 192W ed a 230W, facendo in modo che lo script lavori su parametri di processo comuni ad entrambi gli scenari; si veda la precedente tabella riassuntiva sui parametri di processo dell'SLM.

Inoltre, con questa discretizzazione ci si scontra con i limiti relativi ai dati forniti dall'azienda Sophia High Tech riguardo i parametri di processo della Fabbricazione Additiva. In particolare, per quanto riguarda le velocità di avanzamento (400, 600, 800 mm/s e 500, 600, 700, 900 mm/s) del laser sarebbe stato più realistico averne un numero più consistente al fine di imporre poi il passaggio della superficie attraverso più vincoli. Si tratta di un aspetto sicuramente migliorabile ed implementabile della modellizzazione presentata.

A questo punto del codice si dispone di una matrice (una per 192W mat1\_192 ed una per 230W mat1\_230)  $3 \times N^\circ \text{ carichi} \times N^\circ \text{ velocità di avanzamento}$ ,  $3 \times N \times M$ , in cui per ogni colonna si riportano le tre coordinate: carico [g], durezza [MPa] e velocità [mm/s].

Per plottare il tutto è necessario creare tre nuovi vettori che contengano carico [g], durezza [Mpa] e velocità [mm/s] richiamandoli poi nel comando "surf".



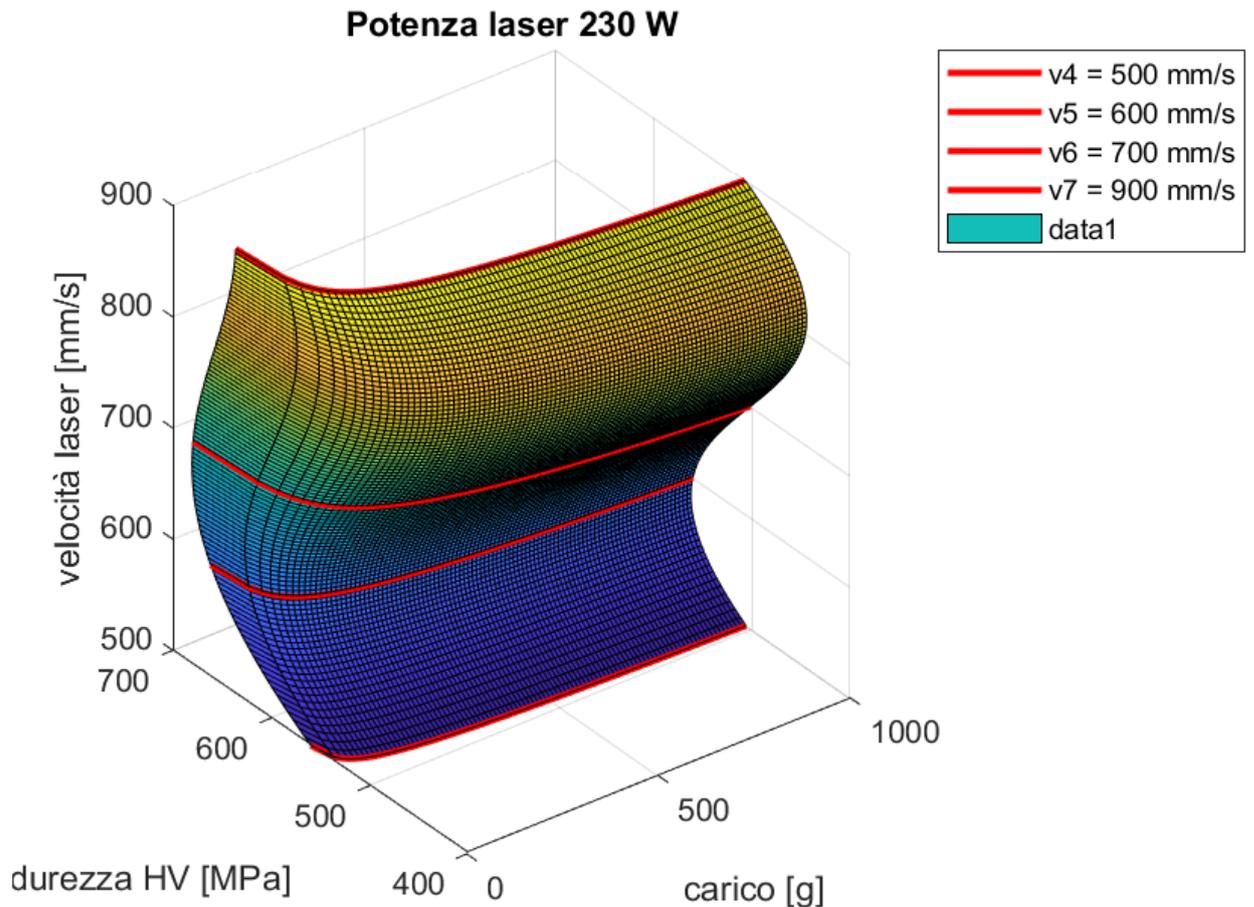


Figura 36: superfici passanti per le tre + quattro curve note

### 3) Stima del valore di durezza

Ottenute le superfici sarebbe interessante interrogare il programma per far sì che restituisca le attese stime sulle proprietà meccaniche. Sarà quindi richiesto in ingresso un carico di indentatura in grammi ed una velocità di avanzamento del laser e procederà interrogando la matrice `mat1_192`. Restituirà a video un valore di durezza relativo alla potenza laser 192W ed un altro relativo alla potenza laser 230W e mostrerà sulla superficie il punto esatto di coordinate carico - velocità - durezza.

```

Command Window
Inserire valore di carico tra 1g e 1000g: 999
Inserire valore di velocità tra 500 e 800 mm/s: 799

durezza_192W_in_MPa =
    501.3067

durezza_230W_in_MPa =
    445.6805

fx >> |
  
```

Figura 37: interfaccia Matlab - utente: dati in ingresso e dati in uscita

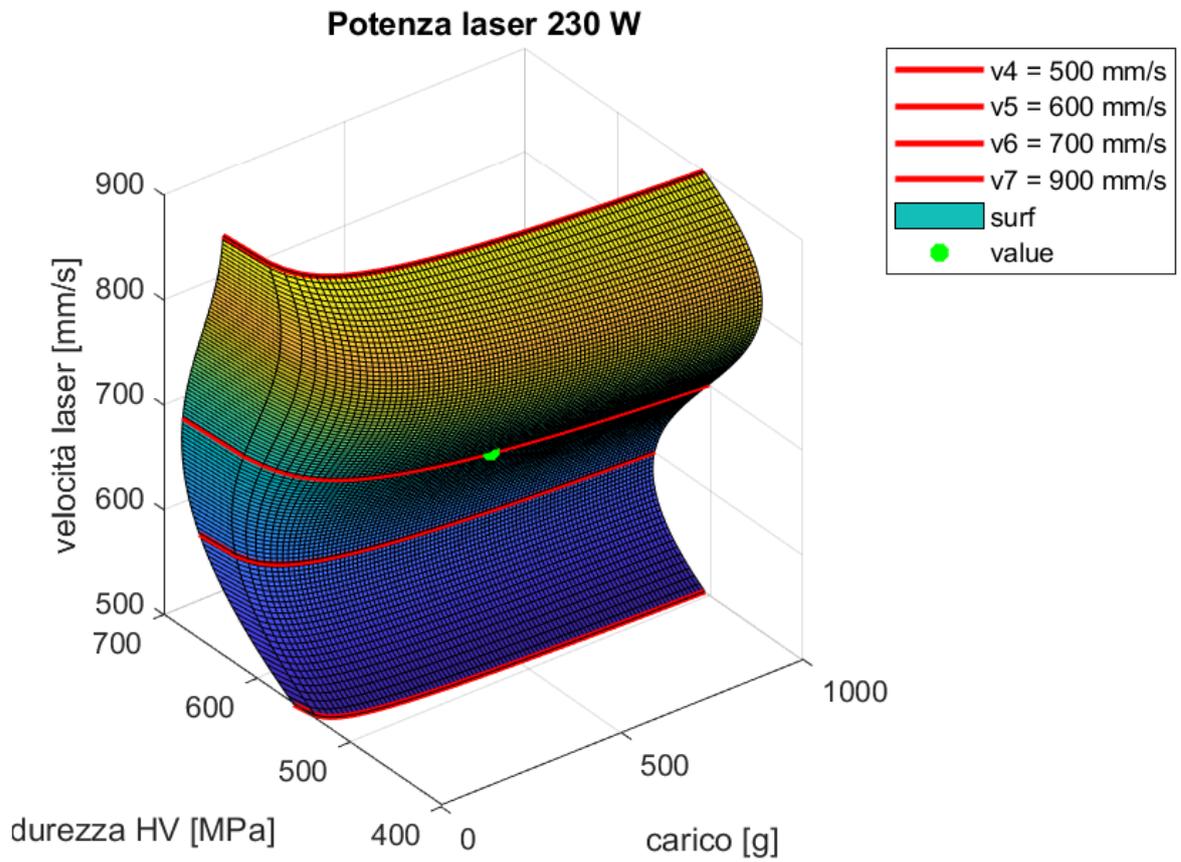
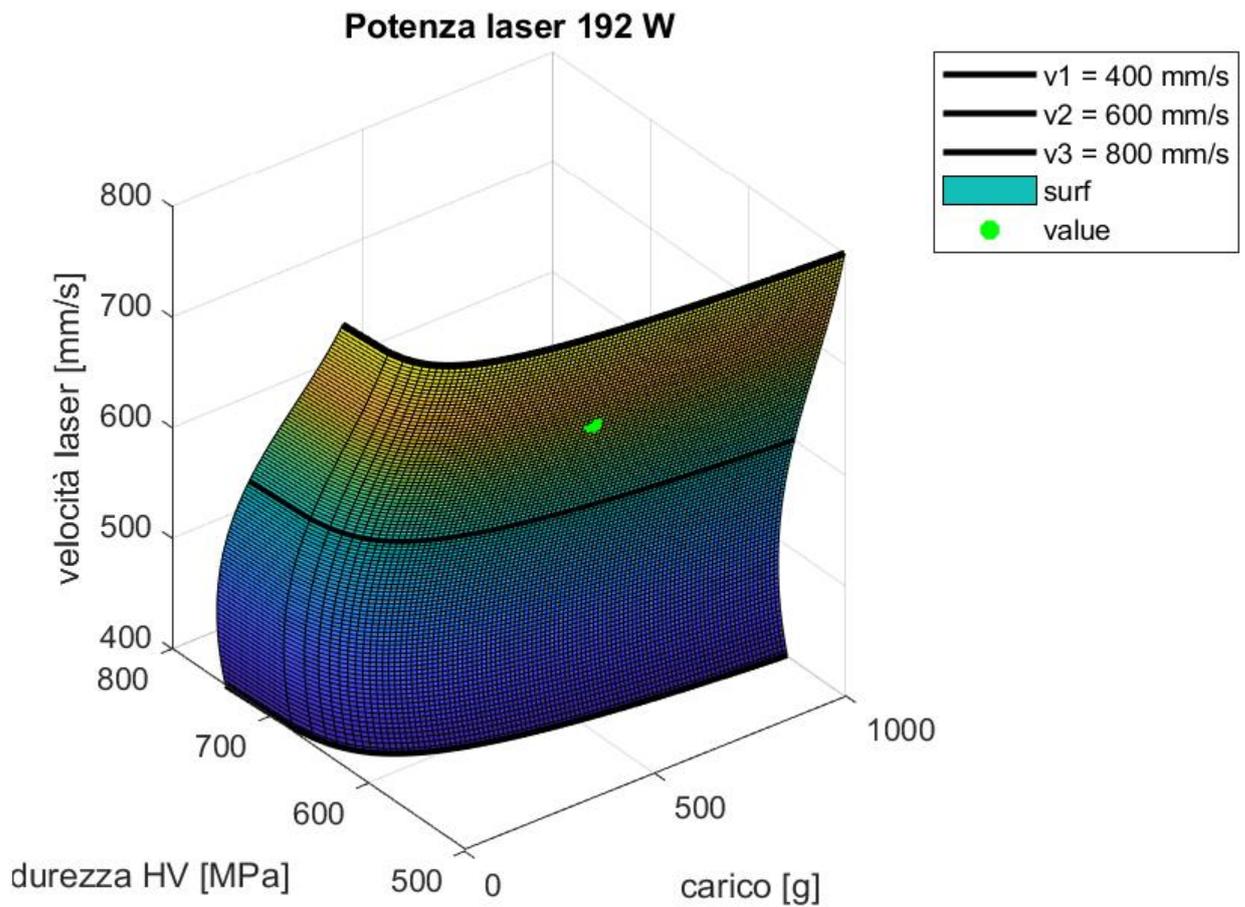


Figura 38: superfici più valore specifico corrispondente alle coordinate inserite da tastiera

#### 4) *Legare la durezza con la tensione di snervamento*

A questo punto della stesura del codice si è cercato di *legare la durezza con l'Rp02* utilizzando lo studio dei coefficienti discusso nel relativo capitolo. Si ricorda che l'unico provino di cui si ha Rp02 direttamente da prova di trazione è il C2 con i 530 MPa di tensione a snervamento.

Lo script realizzerà prima le sette curve relative ai valori di tensione a snervamento per gli altri sei provini, poi le unirà con superfici ottenute con lo stesso algoritmo utilizzato per le superfici delle durezze. Si ricorda che anche in questo caso le curve sono due, una per P=192W ed una per P=230W e come già visto per la durezza, una superficie passerà per tre curve ed una superficie per le altre quattro.

Trattandosi di una lega realizzata in additive manufacturing si è preferito far riferimento a valori di Rp02 ottenuti da prove di trazione portate a termine, come già detto, in un precedente lavoro di tesi dall'ex alunno del Politecnico di Torino Matteo Crachi, attualmente impegnato come dottorando nello stesso ateneo. Si allegano di seguito i grafici ottenuti a seguito delle prove distruttive

Si ricorda che le indentature sui campioni analizzati sono state eseguite sulla faccia verticale XZ (o YZ) di un sistema di riferimento avente come Z l'asse parallelo al laser emesso per la stampa e come piano XY quello orizzontale di deposizione delle polveri, sottolineando che si tratta della sezione meno performante del provino che risulta essere più resistente nella sezione parallela al piano orizzontale XY. Si tratta pertanto di uno studio nel complesso cautelativo.

### 5.3 Codice Matlab:

Nella prima parte di codice si dichiarano le variabili. In particolare, per discretizzare il problema si è scelto di dividere l'intervallo 0 – 1000 g in 200 valori di carichi equi spazati. Sempre all'interno di questa prima sezione si dà la possibilità di scegliere manualmente il tipo di provino, trattato o non trattato e si introducono le relazioni che legano punto-punto i valori di durezza alla tensione di snervamento Rp02.

```
N=200; % N nodi su x carico (da 1 a
1000 g)

M=200; % M nodi su z densità (da 70 a
160 J/mm3)
max_carico=1000;

x=linspace(0,max_carico,N); %vettore carico in
grammi

y1_af = -26.82*log(x) + 745.44; %HV provino C1
y2_af = -24.37*log(x) + 721.12; %HV provino C2
y3_af = -17.96*log(x) + 625.37; %HV provino C3

y4_af = -7.738*log(x) + 559.56; %HV provino C4
y5_af = -14.66*log(x) + 661.72; %HV provino C5
y6_af = -25.77*log(x) + 679.74; %HV provino C6
y7_af = -18.67*log(x) + 636.34; %HV provino C7

y1_tt = -15.73*log(x) + 421.18; %HV provino C1_tt
y2_tt = -19.37*log(x) + 456.98; %HV provino C2_tt
y3_tt = -20.47*log(x) + 542.55; %HV provino C3_tt
y4_tt = -13.2*log(x) + 525.57; %HV provino C4_tt
y5_tt = -12.59*log(x) + 401.69; %HV provino C5_tt
y6_tt = -17.02*log(x) + 464.88; %HV provino C6_tt
y7_tt = -23.06*log(x) + 479.74; %HV provino C7_tt

z1=400; % 152.381 J/mm3; 192W 400mm/s
z2=600; % 101.587 J/mm3; 192W 600mm/s
z3=800; % 76.1905 J/mm3; 192W 800mm/s

z4=500; % 146.032 J/mm3; 230W 500mm/s
z5=600; % 121.693 J/mm3; 230W 600mm/s
z6=700; % 104.308 J/mm3; 230W 700mm/s
z7=900; % 81.1287 J/mm3; 230W 900mm/s

% scelta As Fabricated o Trattam Termico
provini = input('if As_Fabricated press " 1 "; if Heat_Treatment press
"0" ');

if (provini == 1)
    y1=y1_af;
    y2=y2_af;
```

```
y3=y3_af;  
y4=y4_af;  
y5=y5_af;  
y6=y6_af;  
y7=y7_af;
```

```
SIGMA_SN= 530;  
rp1= -0.00008.*x.^2 + 0.0946.*x + 521.1;  
rp2= SIGMA_SN*ones(1,N);  
rp3= -0.00001.*x.^2 + 0.1455.*x + 671.36;  
rp4= -0.00007.*x.^2 + 0.1379.*x + 687.8;  
rp5= -0.00003.*x.^2 + 0.0575.*x + 515.07;  
rp6= -0.000009.*x.^2 + 0.0098.*x + 585.82;  
rp7= -0.00007.*x.^2 + 0.0467.*x + 566.41;
```

```
end  
if (provini == 0)  
    y1=y1_tt;  
    y2=y2_tt;  
    y3=y3_tt;  
    y4=y4_tt;  
    y5=y5_tt;  
    y6=y6_tt;  
    y7=y7_tt;
```

```
SIGMA_SN= 900;  
rp1= -0.00004.*x.^2 + 0.0093.*x + 948.22;  
rp2= SIGMA_SN*ones(1,N);  
rp3= -0.00007.*x.^2 + 0.0519.*x + 819.24;  
rp4= -0.0002.*x.^2 + 0.2574.*x + 770.95;  
rp5= -0.0001.*x.^2 + 0.1306.*x + 888.42;  
rp6= -0.00005.*x.^2 + 0.00972.*x + 863.4;  
rp7= -0.00004.*x.^2 + 0.0186.*x + 835.12;
```

```
end
```

### %% interpolazione curve per ottenere superficie

OSS 1) Da questo momento in poi il codice lavorerà in parallelo sulle due potenze laser che abbiamo a disposizione come parametro di processo dei provini realizzati in Selective Laser Melting: P=192W e P=230W.

OSS 2) A differenza di quanto descritto nei quattro passaggi elencati nel paragrafo "Impostazione logica del codice", si è preferito procedere in contemporanea sia con la creazione dei polinomi relativi alla durezza che con quelli relativi alla tensione di snervamento. Nello script così presentato che è poi la versione finale si vedranno apparire sullo stesso grafico sia superficie di durezza che di Rp02. I quattro punti della descrizione precedete descrivevano la struttura logica

seguita durante l'attività di programmazione che vedeva in effetti l'interpolazione sullo snervamento come upgrade dello script già messo a punto sulla durezza.

Si procede pertanto ad interpolare creando N nuove curve parametrizzate per gli N valori di carico es (0g 5g 10g .... 1000g) al variare di durezza e velocità di avanzamento laser.

```

Y192=[y1; y2; y3];           % matrice durezza 3 x N
Z192=[z1; z2; z3];           % matrice velocità avanz. laser 3 x 1
RP192=[rp1; rp2; rp3];       % matrice RP02 3 x N

Y230=[y4; y5; y6; y7];       % matrice durezza 4 x N
Z230=[z4; z5; z6; z7];       % matrice velocità avanz. laser 4 x 1
RP230=[rp4; rp5; rp6; rp7];  % matrice RP02 4 x N

%matrice per costruire polinomio
% P 192W
mat192=zeros(3,N,3);
for i=1:3
    for j=1:N
        for k=1:3
            if(k==1)
                mat192(k,j,i)=x(j); % posiziono il carico nella matrice; es:
                                     25g x 3prove
            end
            if(k==2)
                mat192(k,j,i)=Y192(i,j); % posiziono la durezza nella
                                     matrice x ogni carico e x ogni densità energetica
            end
            if(k==3)
                mat192(k,j,i)=Z192(i); % posiziono la velocità avanz.
                                     laser che varia per ogni prova i
            end
        end
    end
end

mat_rp192=zeros(3,N,3);
for i=1:3
    for j=1:N
        for k=1:3
            if(k==1)
                mat_rp192(k,j,i)=x(j); % posiziono il carico nella matrice;
                                     es: 25g x 7prove
            end
            if(k==2)
                mat_rp192(k,j,i)=RP192(i,j); % posiziono la durezza nella
                                     matrice x ogni carico e x ogni densità energ
            end
            if(k==3)

```

```

        mat_rp192(k,j,i)=Z192(i); % posiziono la velocità avanz.
                                laser che varia per ogni prova i
    end
end
end
end

% P 230
mat230=zeros(3,N,4);
for i=1:4
    for j=1:N
        for k=1:3
            if(k==1)
                mat230(k,j,i)=x(j); % posiziono il carico nella matrice; es:
25g x 7prove
            end
            if(k==2)
                mat230(k,j,i)=Y230(i,j); % posiziono la durezza nella
matrice x ogni carico e x ogni densità energ
            end
            if(k==3)
                mat230(k,j,i)=Z230(i); % posiziono la velocità avanz. laser
che varia per ogni prova i
            end
        end
    end
end
end

mat_rp230=zeros(3,N,4);
for i=1:4
    for j=1:N
        for k=1:3
            if(k==1)
                mat_rp230(k,j,i)=x(j); % posiziono il carico nella matrice;
es: 25g x 7prove
            end
            if(k==2)
                mat_rp230(k,j,i)=RP230(i,j); % posiziono la durezza nella
matrice x ogni carico e x ogni densità energ
            end
            if(k==3)
                mat_rp230(k,j,i)=Z230(i); % posiziono la velocità avanz.
laser che varia per ogni prova i
            end
        end
    end
end
end

% punti di durezza in funzione della velocità di avanzamento del laser
per ogni valore del carico

```

```

% P =192W
for j=1:N
    for i=1:3
        nodiy192(i,j)=mat192(2,j,i); %nodi durezza HV
        nodiz192(i,j)=mat192(3,j,i); %nodi velocità avanz. laser
    end
end

for j=1:N
    for i = 1:3
        nodi_rp192(i,j)=mat_rp192(2,j,i);
    end
end

% P =230W
for j=1:N
    for i=1:4
        nodiy230(i,j)=mat230(2,j,i); %nodi durezza HV
        nodiz230(i,j)=mat230(3,j,i); %nodi velocità avanz. laser
    end
end
for j=1:N
    for i=1:4
        nodi_rp230(i,j)=mat_rp230(2,j,i); %nodi durezza HV
        nodiz230(i,j)=mat230(3,j,i); %nodi velocità avanz. laser
    end
end

%ciclo for per avere N nodi; p = polyfit(x,y,n) returns the COEFFICIENTS
for a polynomial p(x) of degree n that is a best fit (in a least-squares
sense) for the data in y.

% P = 192 W
for i=1:N
    p192(:,i)=polyfit(nodiz192(:,i)',nodiy192(:,i)',3); %coefficienti
matrice durezza
end

for i=1:N
    p_rp192(:,i)=polyfit(nodiz192(:,i)',nodi_rp192(:,i)',3);
%coefficienti matrice Rp02
end
zz192=linspace(nodiz192(1),nodiz192(3),M);

% P = 230 W
for i=1:N
    p230(:,i)=polyfit(nodiz230(:,i)',nodiy230(:,i)',3); %coefficienti matrice
durezza
end

for i=1:N

```

```

p_rp230(:,i)=polyfit(nodiz230(:,i)',nodi_rp230(:,i)',3); % coefficienti
matrice Rp02
end
zz230=linspace(nodiz230(1),nodiz230(4),M);

%% scelta carico e velocità
xs=input('Inserire valore di carico tra 1g e 1kg: ');
errx=(x(3)-x(2))/2;
zs=input('Inserire valore di velocità tra 500 e 800 mm/s: ');
errz192=(zz192(3)-zz192(2))/2;
errz230=(zz230(3)-zz230(2))/2;

%% interpolazione e ricerca valori sulla superficie
% matrice delle durezze valutate con polyval

%P=192W
for i=1:M
    yy192(i,:)=polyval(p192(:,i),zz192); % matrice delle durezze valutate
con polyval
end
for i=1:M
    rp192(i,:)=polyval(p_rp192(:,i),zz192); % matrice degli Rp02 valutate
con polyval
end

%P=230W
for i=1:M
    yy230(i,:)=polyval(p230(:,i),zz230); % matrice delle durezze valutate
con polyval
end
for i=1:M
    rp230(i,:)=polyval(p_rp230(:,i),zz230); % matrice degli Rp02 valutate
con polyval
end
%matrice in tre dimensioni per carico durezza densità energetica

%P=192W
mat1_192=zeros(3,N,M);
for i=1:M
    for j=1:N
        for k=1:3
            if(k==1)
                mat1_192(k,j,i)=x(j);
            end
            if(k==2)
                mat1_192(k,j,i)=yy192(j,i);
            end
        end
    end
end

```

```

        if(k==3)
            mat1_192(k,j,i)=zz192(i);
        end
    end
end

mat1_rp_192=zeros(3,N,M);
for i=1:M
    for j=1:N
        for k=1:3
            if(k==1)
                mat1_rp_192(k,j,i)=x(j);
            end
            if(k==2)
                mat1_rp_192(k,j,i)=rp192(j,i);
            end
            if(k==3)
                mat1_rp_192(k,j,i)=zz192(i);
            end
        end
    end
end

%P=230W
mat1_230=zeros(3,N,M);
for i=1:M
    for j=1:N
        for k=1:3
            if(k==1)
                mat1_230(k,j,i)=x(j);
            end
            if(k==2)
                mat1_230(k,j,i)=yy230(j,i);
            end
            if(k==3)
                mat1_230(k,j,i)=zz230(i);
            end
        end
    end
end

mat1_rp_230=zeros(3,N,M);
for i=1:M
    for j=1:N
        for k=1:3
            if(k==1)
                mat1_rp_230(k,j,i)=x(j);
            end
            if(k==2)

```

```

        mat1_rp_230(k,j,i)=rp230(j,i);
    end
    if(k==3)
        mat1_rp_230(k,j,i)=zz230(i);
    end
end
end
end

% in ogni casella della matrice metto le coordinate di ogni punto nello
spazio: se apro questa matirce trovo le coordinate in x y z
%P=192W
for i=1:N
    for j=1:M
        x11_192(i,j)=mat1_192(1,i,j);
        y11_192(i,j)=mat1_192(2,i,j);
        z11_192(i,j)=mat1_192(3,i,j);
    end
end

for i=1:N
    for j=1:M
        x11_rp_192(i,j)=mat1_rp_192(1,i,j);
        y11_rp_192(i,j)=mat1_rp_192(2,i,j);
        z11_rp_192(i,j)=mat1_rp_192(3,i,j);
    end
end

for i=1:N
    for j=1:M
        if(x11_192(i,j)<=xs+errx)
            if(x11_192(i,j)>xs-errx)
                indice=i;
            end
        end
    end
end

for i=1:M
    if(zz192(i)<=zs+errz192)
        if(zz192(i)>zs-errz192)
            indicez192=i;
        end
    end
end

%plot curve traslate per diversi valori di velocità del laser
figure
grid on
plot3(x,y1,z1*ones(1,M),'k','LineWidth',2)

```

```

xlabel('carico [g]')
ylabel('durezza HV [MPa]')
zlabel('velocità laser [mm/s]')
hold on
plot3(x,y2,z2*ones(1,M),'k','LineWidth',2)
plot3(x,y3,z3*ones(1,M),'k','LineWidth',2)
title('Potenza laser 190 W')
grid on
%plot superficie
surf(x11_192,y11_192,z11_192) %in serf inserisco matrici di coordinate
title('Potenza laser 192 W')
xlabel('carico [g]')
ylabel('durezza HV [MPa]')
zlabel('velocità laser [mm/s]')
hold on
%plot value
plot3(mat1_192(1,indice,indicez192),mat1_192(2,indice,indicez192),mat1_192(3,indice,indicez192),'*','LineWidth',3,'Color','g')
xlabel('carico [g]')
ylabel('durezza HV [MPa]')
zlabel('velocità laser [mm/s]')
title('Potenza laser 192 W')
legend('v1 = 400 mm/s','v2 = 600 mm/s','v3 = 800 mm/s','surf','value')

figure
grid on
plot3(x, rp1,z1*ones(1,M),'LineWidth',2)
xlabel('carico [g]')
ylabel('Rp02 [MPa]')
zlabel('velocità laser [mm/s]')
hold on
plot3(x,rp2,z2*ones(1,M),'LineWidth',3)
plot3(x,rp3,z3*ones(1,M),'LineWidth',2)
title('Potenza laser 190 W')
grid on
%plot superficie
surf(x11_rp_192,y11_rp_192,z11_192) %in serf inserisco matrici di
coordinate
title('Potenza laser 192 W')
xlabel('carico [g]')
ylabel('Rp02 [MPa]')
zlabel('velocità laser [mm/s]')
hold on
%plot value
plot3(mat1_rp_192(1,indice,indicez192),mat1_rp_192(2,indice,indicez192),mat1_rp_192(3,indice,indicez192),'*','LineWidth',3,'Color','g')
xlabel('carico [g]')
ylabel('Rp02 [MPa]')
zlabel('velocità laser [mm/s]')
title('Potenza laser 192 W')

```

```

legend('Rp02 [MPa] c1','Rp02 [MPa] c2','Rp02 [MPa] c3','surf','value')

durezza_192W_in_MPa =mat1_192(2,indice,indicez192)
Rp02_192W =mat1_rp_192(2,indice,indicez192)

%P=230W
%durezza
for i=1:N
    for j=1:M
        x11_230(i,j)=mat1_230(1,i,j);
        y11_230(i,j)=mat1_230(2,i,j);
        z11_230(i,j)=mat1_230(3,i,j);
    end
end

figure
grid on
plot3(x,y4,z4*ones(1,M),'LineWidth',2)
xlabel('carico [g]')
ylabel('durezza HV [MPa]')
zlabel('velocità laser [mm/s]')
hold on
plot3(x,y5,z5*ones(1,M),'LineWidth',2)
plot3(x,y6,z6*ones(1,M),'LineWidth',2)
plot3(x,y7,z7*ones(1,M),'LineWidth',2)
title('Potenza laser 230 W')
grid on

surf(x11_230,y11_230,z11_230) %in serf inserisco matrici di coordinate
title('Potenza laser 230 W')
xlabel('carico [g]')
ylabel('durezza HV [MPa]')
zlabel('velocità laser [mm/s]')
hold on

for i=1:N
    for j=1:M
        if(x11_230(i,j)<=xs+errx)
            if(x11_230(i,j)>xs-errx)
                indice=i;
            end
        end
    end
end

for i=1:M
    if(zz230(i)<=zs+errz230)

```

```

        if(zz230(i)>zs-errz230)
            indicez230=i;
        end
    end
end
durezza_230W_in_MPa=mat1_230(2,indice,indicez230)

%figure
plot3(mat1_230(1,indice,indicez230),mat1_230(2,indice,indicez230),mat1_230(3,indice,indicez230),'*','LineWidth',3,'Color','g')
xlabel('carico [g]')
ylabel('durezza HV')
zlabel('velocità laser [mm/s]')
title ('Potenza laser 230 W')

%Rp02
for i=1:N
    for j=1:M
        x11_rp_230(i,j)=mat1_rp_230(1,i,j);
        y11_rp_230(i,j)=mat1_rp_230(2,i,j);
        z11_rp_230(i,j)=mat1_rp_230(3,i,j);
    end
end

% figure
plot3(x,rp4,z4*ones(1,M),'r','LineWidth',2)
xlabel('carico [g]')
ylabel('Rp02 [MPa]')
zlabel('velocità laser [mm/s]')
hold on
plot3(x,rp5,z5*ones(1,M),'r','LineWidth',2)
plot3(x,rp6,z6*ones(1,M),'r','LineWidth',2)
plot3(x,rp7,z7*ones(1,M),'r','LineWidth',2)
title('Potenza laser 230 W')
legend('v4 = 500 mm/s','v5 = 600 mm/s','v6 = 700 mm/s','v7 = 900 mm/s')

surf(x11_rp_230,y11_rp_230,z11_rp_230) %in serf inserisco matrici di
coordinate
title('Potenza laser 230 W')
xlabel('carico [g]')
ylabel(' Rp02 [MPa]')
zlabel('velocità laser [mm/s]')
hold on

for i=1:N
    for j=1:M
        if(x11_rp_230(i,j)<=xs+errx)
            if(x11_rp_230(i,j)>xs-errx)
                indice=i;
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end

for i=1:M
    if(zz230(i)<=zs+errz230)
        if(zz230(i)>zs-errz230)
            indicez230=i;
        end
    end
end
end
Rp02_230W_in_MPa=mat1_rp_230(2,indice,indicez230)

%figure
plot3(mat1_rp_230(1,indice,indicez230),mat1_rp_230(2,indice,indicez230),m
at1_rp_230(3,indice,indicez230),'*','LineWidth',3,'Color','g')
xlabel('carico [g]')
ylabel('Rp02[MPa]')
zlabel('velocità laser [mm/s]')
title ('Potenza laser 230 W')
legend('Rp02[MPa] C4','Rp02[MPa] C5','Rp02[MPa] C6','Rp02[MPa]
C7','surf','value')

```

#### 5.4 Sviluppo modello Matlab per stima Rp02

Si discute più in dettaglio l'elaborazione del codice che consenta di stimare l'Rp02 al variare dei parametri di processo della Fabbricazione Additiva per poi descriverne l'implementazione in Matlab. Tale studio si basa sullo studio dei coefficienti proposto nell'omonimo capitolo ricavati con le formule riproposte:

$$HV = k * Rp02$$

L'Rp02 per il provino C2 è 530 MPa e si dispone di cinque valori di durezza al variare del carico imposto all'indentatore per cui è possibile calcolare altrettanti coefficienti angolari da formula inversa:

$$k = HV/Rp02$$

Si riportano di seguito durezza Vickers, Rp02 e coefficienti così ottenuti:

carico [g]	HV[MPa]	k	Rp02 [MPa]
25	399.9	1.400	560
50	376.1	1.489	560
200	352.3	1.589	560
500	335.1	1.671	560
1000	326.5	1.715	560
media	358.0	1.573	560

Tabella 16: riepilogo durezza snervamento e coefficiente angolare

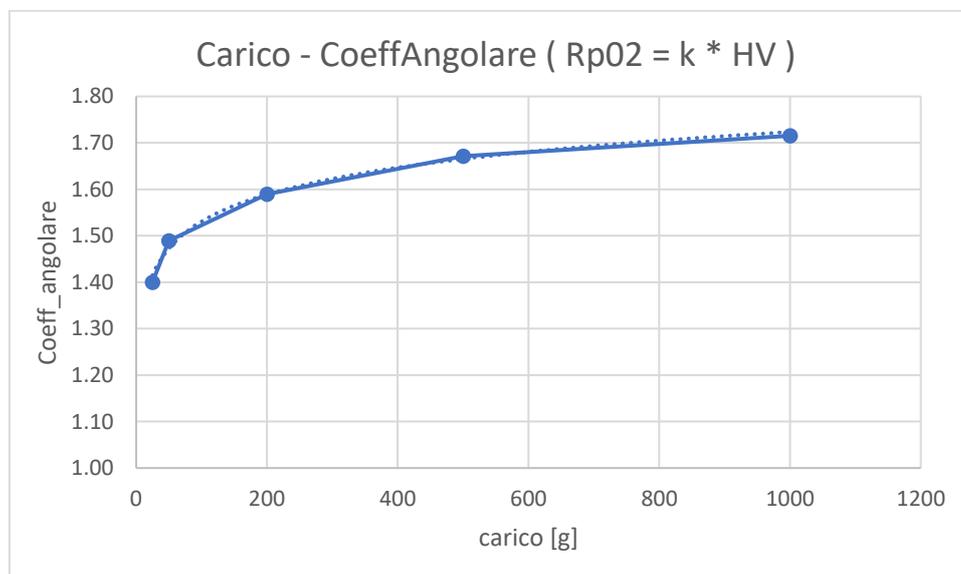


Figura 39: grafico coeff. angolare Rp02/HV al variare del carico di indentazione

$$y = 0.0837 \ln(x) + 1.1455;$$

$$R^2 = 0.9914$$

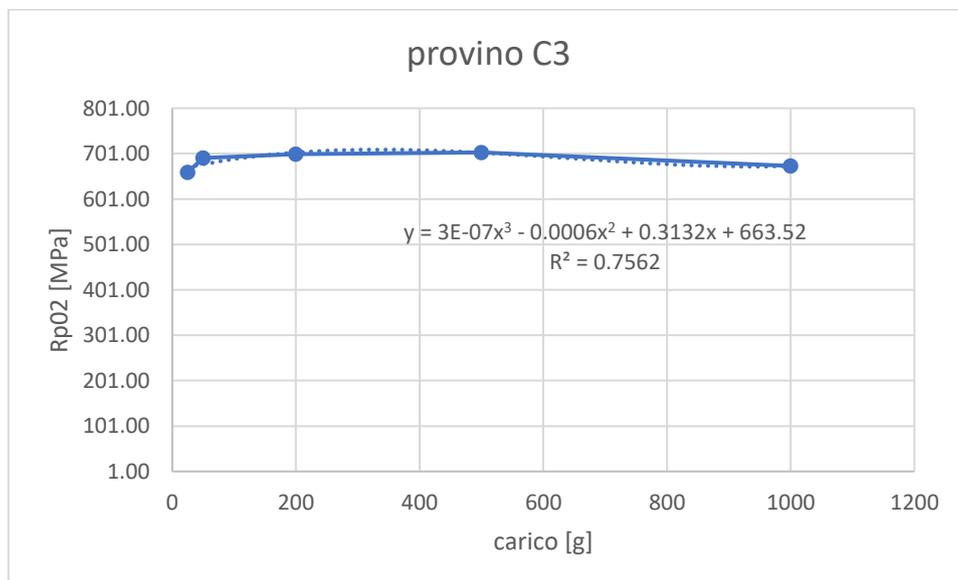
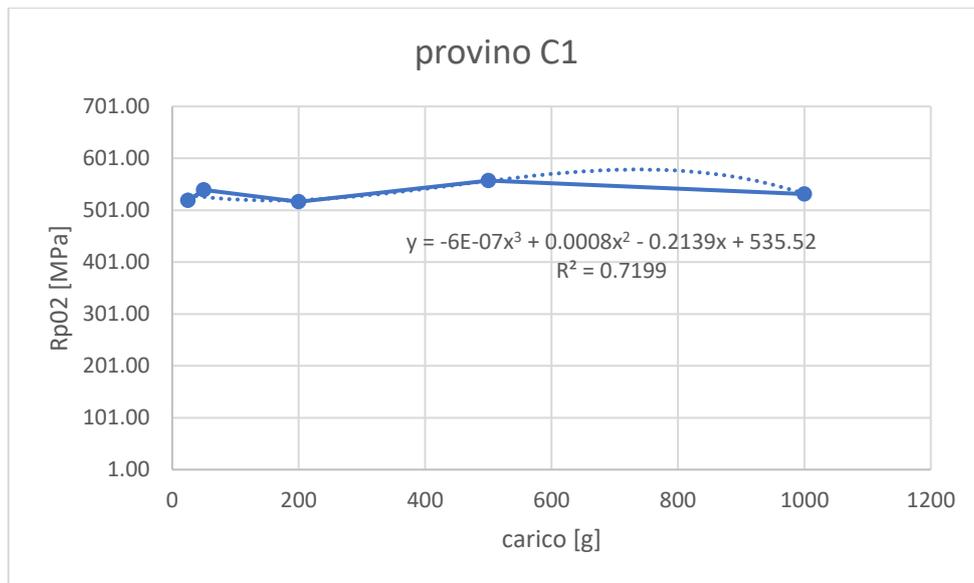
Ottenuto quindi l'andamento dei coefficienti al variare del carico si utilizzano i singoli valori di coefficienti per passare da HV a Rp02 e se ne ricavano gli andamenti.

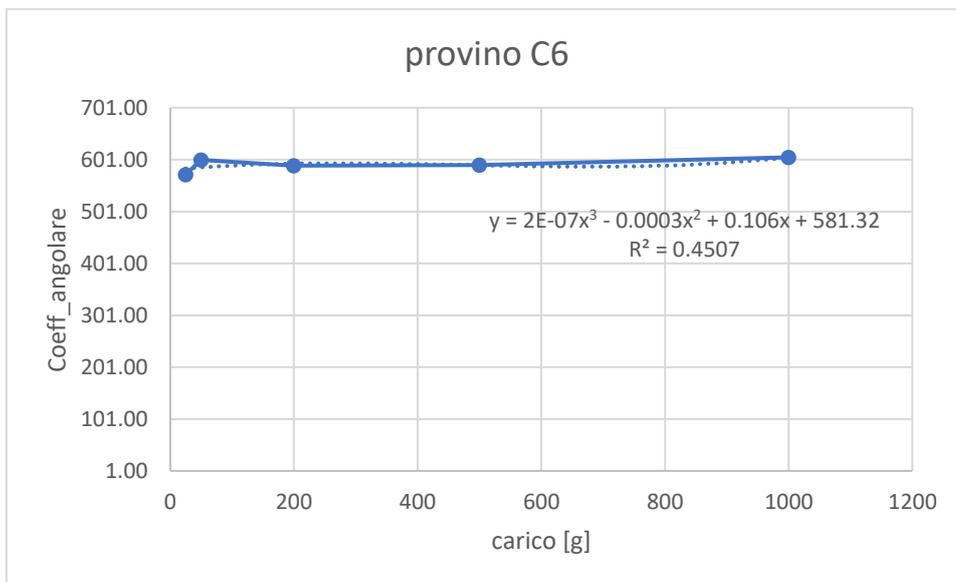
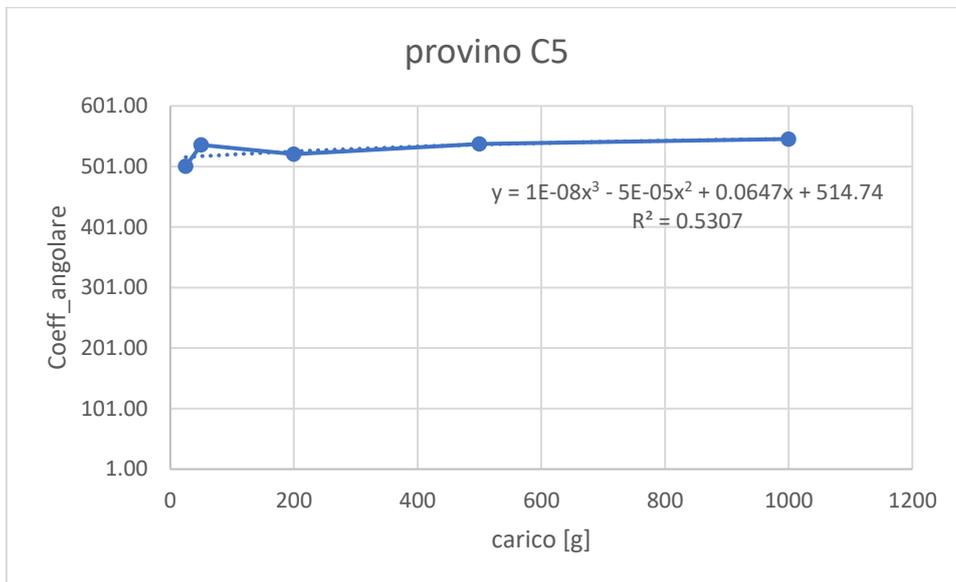
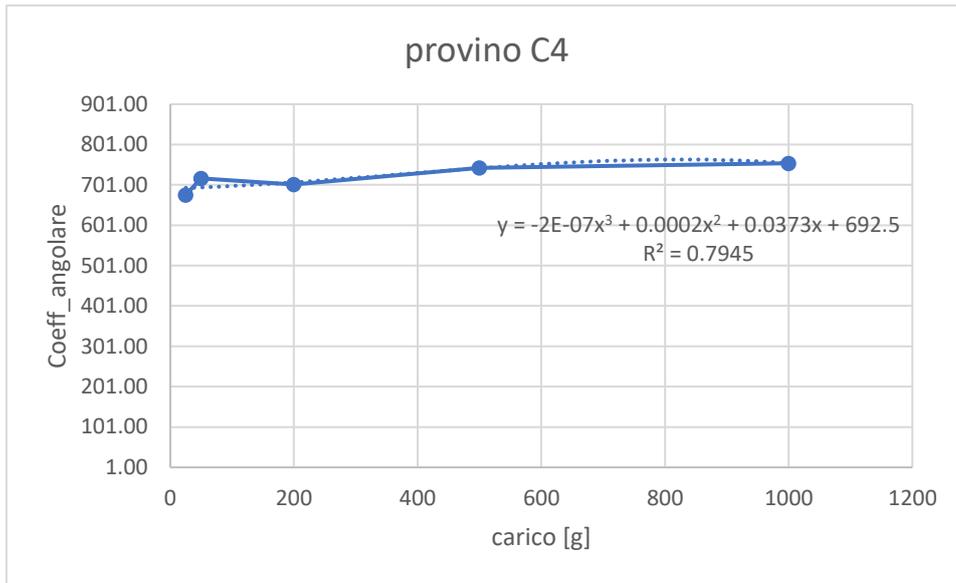
Una volta ottenuti i valori di Rp02 come da **TABELLA \*\*\*** se ne traccia l'andamento al variare del carico di indentazione per ognuno dei sette provini, aggiungendo poi a grafico la linea di tendenza

con  $R^2$  migliore e ricavandone una legge che potesse approssimare  $R_{p02}$  al variare del carico imposto.

Anche in questo caso si è cercato il miglior fitting possibile procedendo al confronto tra logaritmico, polinomiale di secondo grado e polinomiale di terzo. Per i provini invecchiati è stato sufficiente il polinomio di secondo grado per ottenere i migliori risultati mentre per i provini non trattati termicamente è stato necessario ricorrere a polinomi di terzo grado

### Provini non trattati: approssimazione polinomio secondo grado





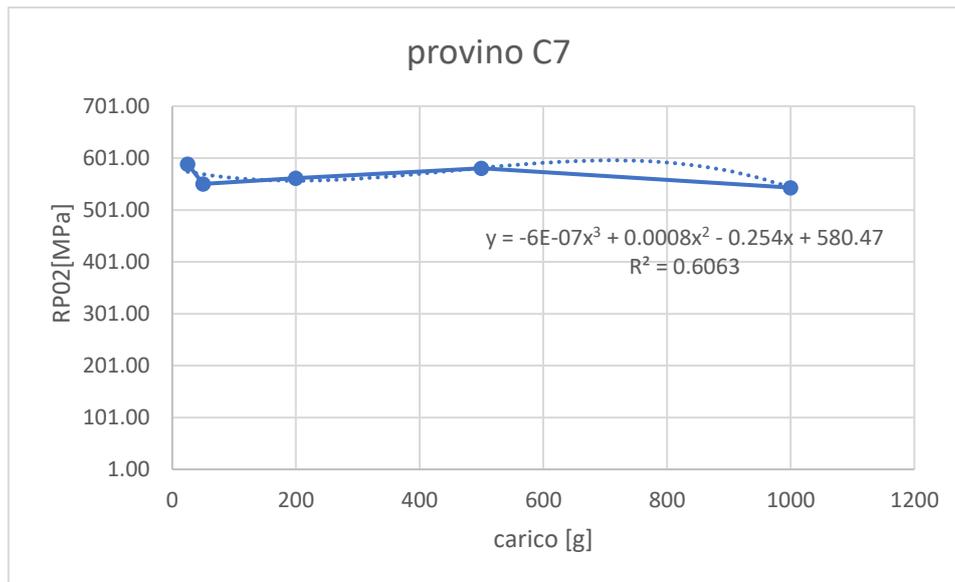


Figura 40: andamenti polinomiali di terzo grado per snervamento in funzione del carico di indentazione

Si riportano gli erre quadri calcolati sugli andamenti dei sette provini non trattati. Si nota che, pur selezionando il miglior fitting possibile l'approssimazione non è più ottima come quando si cercava di approssimare i dati sperimentali di durezza con un modello analitico.

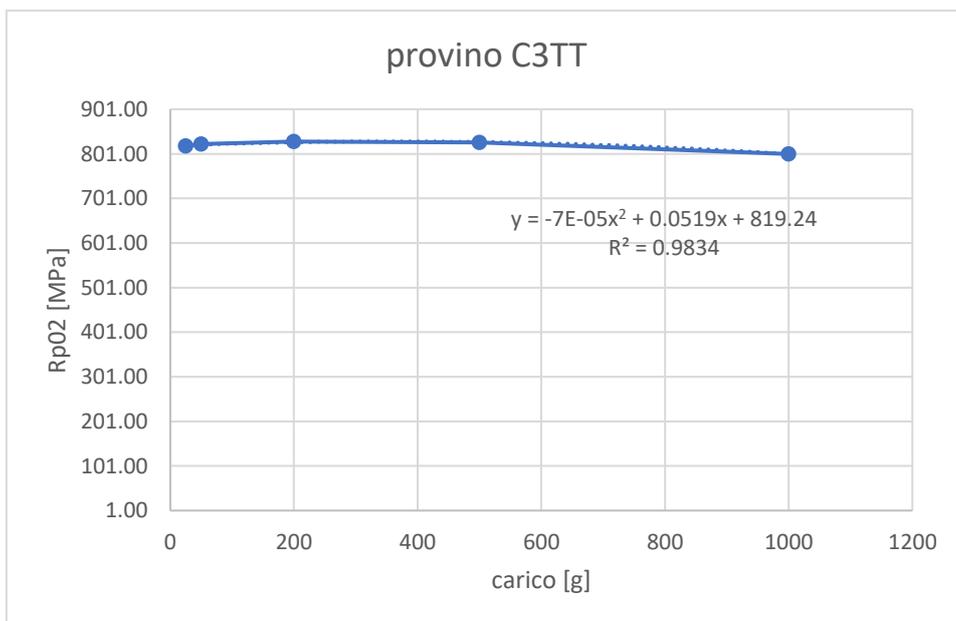
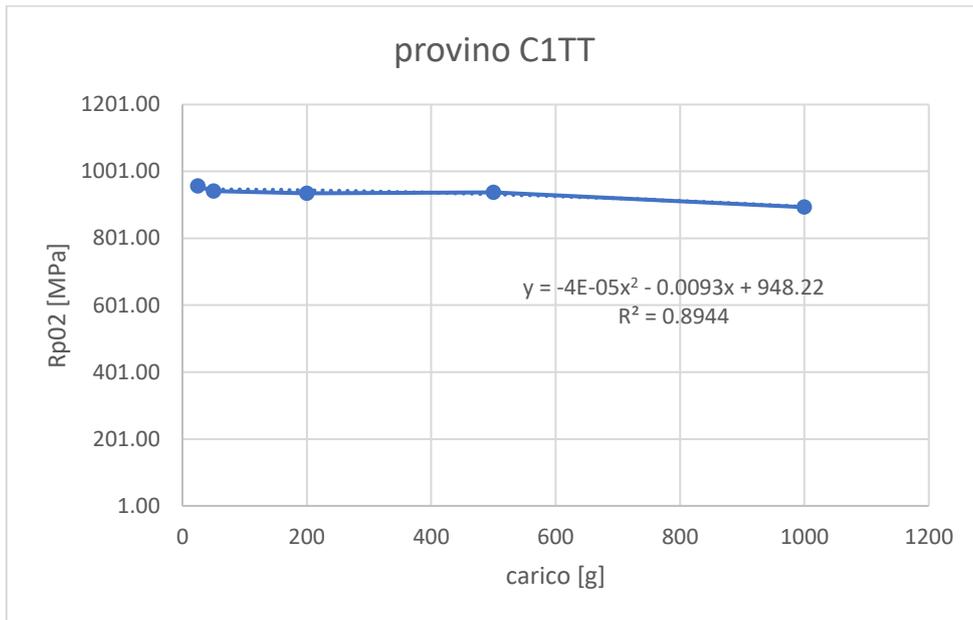
R <sup>2</sup>	C1	0.7199
R <sup>2</sup>	C3	0.7562
R <sup>2</sup>	C4	0.7945
R <sup>2</sup>	C5	0.5307
R <sup>2</sup>	C6	0.4507
R <sup>2</sup>	C7	0.6063
R <sup>2</sup>	medio	0.64305

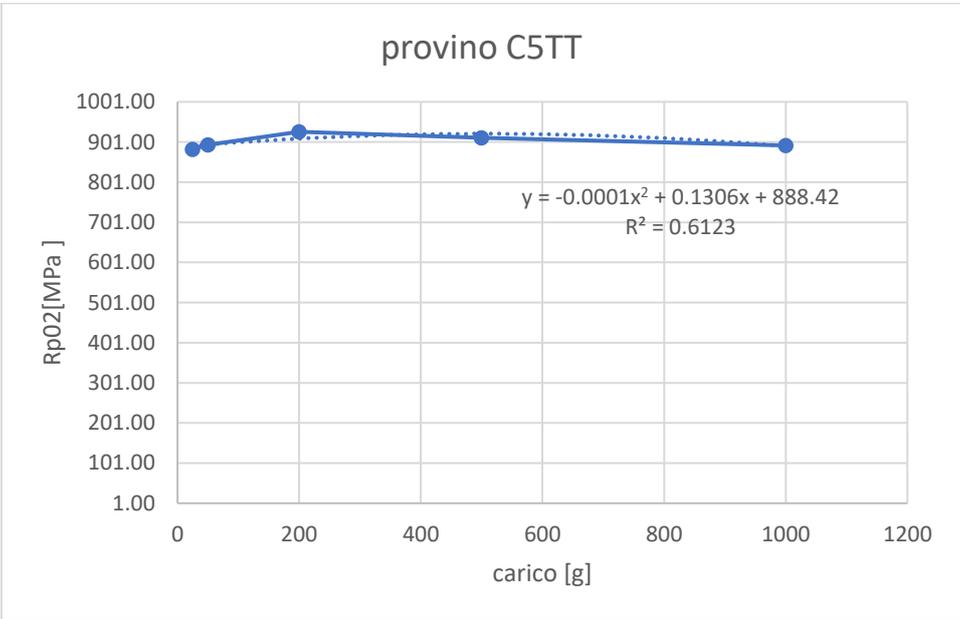
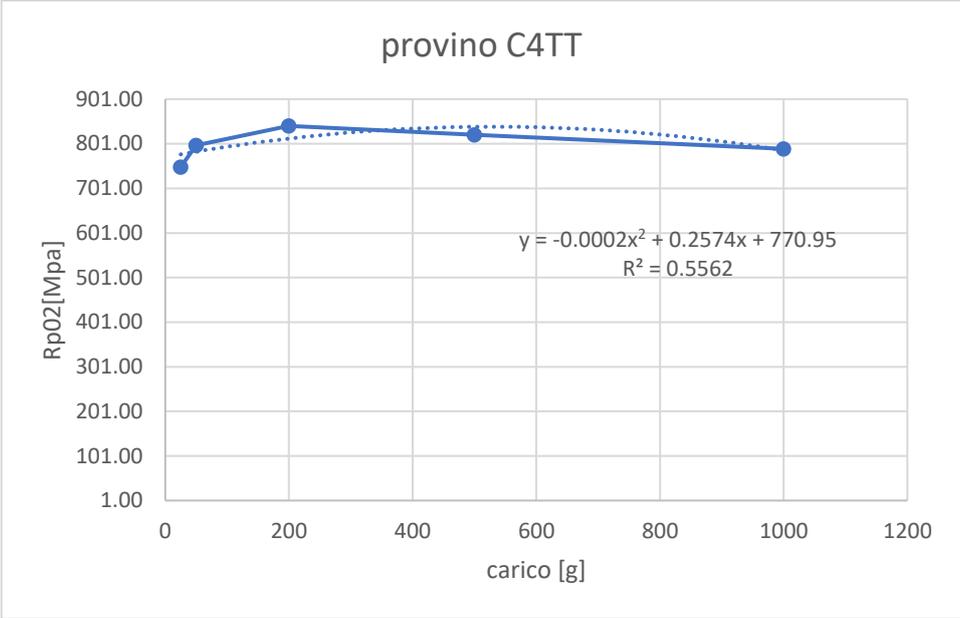
Figura 41: riepilogo R<sup>2</sup> per ognuno dei sette provini

Si passa infatti da un R<sup>2</sup> medio di 0.92 ad uno di 0.64 ed il motivo di un' approssimazione così poco fedele è legato al fatto che per riprodurre l'andamento dell'Rp02 in funzione del carico di indentazione si parte dallo studio dei coefficiente, si passa poi al calcolo dell'Rp02 con l'ipotesi di adottare gli stessi coefficienti anche al variare dei parametri di processo per poi plottare gli Rp02 ottenuti in funzione dei grammi imposti all'indentatore.

Risulta quindi evidente che aumentano errori, approssimazioni ed ipotesi prima di ottenere una stima dell'Rp02 con relativa distribuzione di dati in modo meno ordinato e riducibile con maggiore difficoltà ad una sola forma analitica

Provini invecchiati: approssimazione polinomio secondo grado





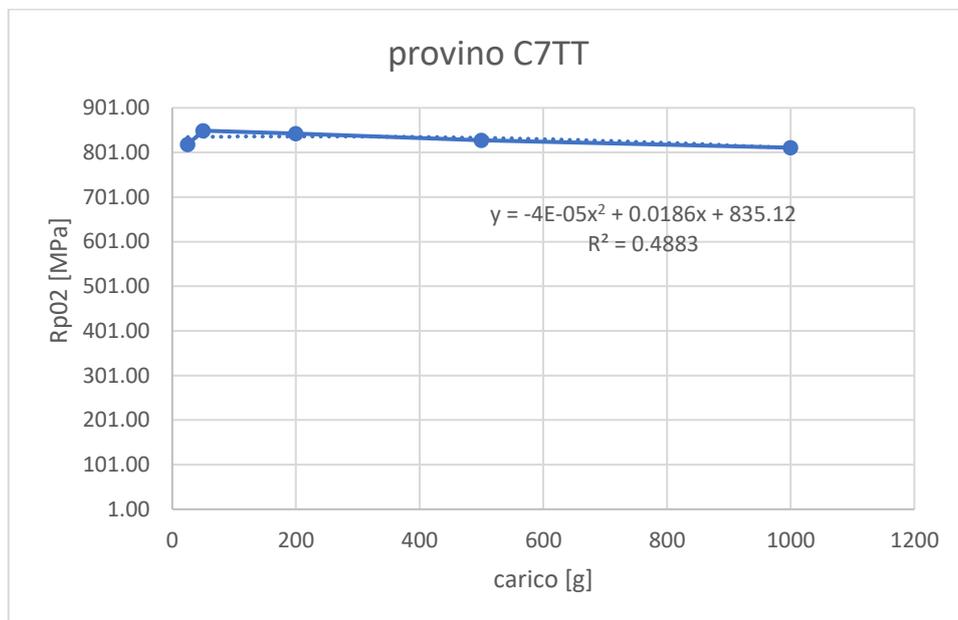
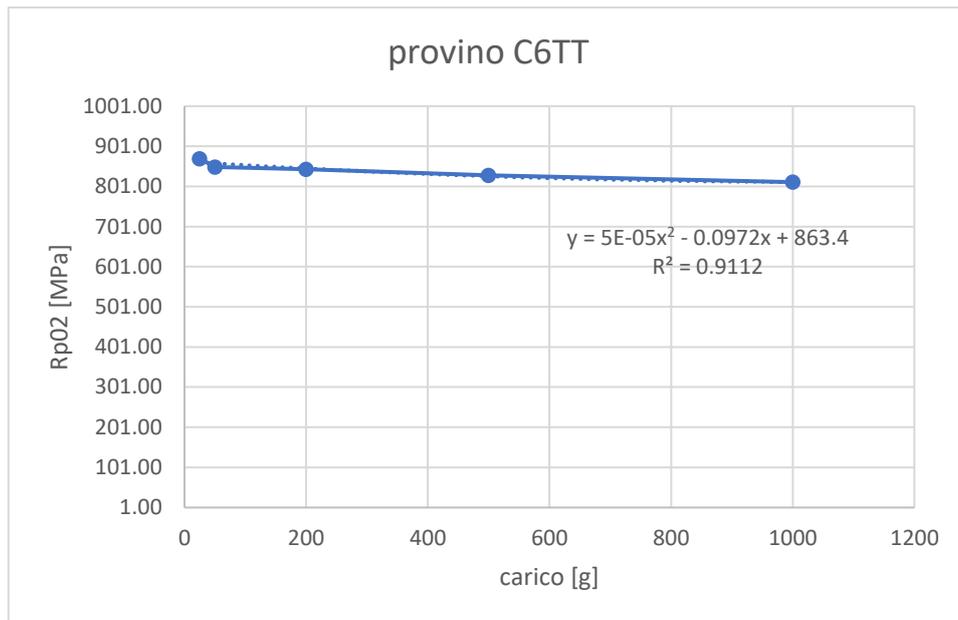


Figura 42: andamenti polinomiali di secondo grado per snervamento in funzione del carico di indentazione

Dagli andamenti di Rp02 [MPa] al variare del carico si procede con lo script alla stima delle tensioni di snervamento al variare dei parametri di processo e del carico di indentazione.

```

if (provini == 1)
  y1=y1_af;
  y2=y2_af;
  y3=y3_af;
  y4=y4_af;
  y5=y5_af;
  y6=y6_af;
  y7=y7_af;

```

```
SIGMA_SN= 530;
```

```

rp1= -0.00008.*x.^2 + 0.0946.*x + 521.1;
rp2= SIGMA_SN*ones(1,N);
rp3= -0.00001.*x.^2 + 0.1455.*x + 671.36;
rp4= -0.00007.*x.^2 + 0.1379.*x + 687.8;
rp5= -0.00003.*x.^2 + 0.0575.*x + 515.07;
rp6= -0.000009.*x.^2 + 0.0098.*x + 585.82;
rp7= -0.00007.*x.^2 + 0.0467.*x + 566.41;

```

end

```

if (provini == 0)

```

```

    y1=y1_tt;

```

```

    y2=y2_tt;

```

```

    y3=y3_tt;

```

```

    y4=y4_tt;

```

```

    y5=y5_tt;

```

```

    y6=y6_tt;

```

```

    y7=y7_tt;

```

```

SIGMA_SN= 900;

```

```

rp1= -0.00004.*x.^2 + 0.0093.*x + 948.22;

```

```

rp2= SIGMA_SN*ones(1,N);

```

```

rp3= -0.00007.*x.^2 + 0.0519.*x + 819.24;

```

```

rp4= -0.0002.*x.^2 + 0.2574.*x + 770.95;

```

```

rp5= -0.0001.*x.^2 + 0.1306.*x + 888.42;

```

```

rp6= -0.00005.*x.^2 + 0.00972.*x + 863.4;

```

```

rp7= -0.00004.*x.^2 + 0.0186.*x + 835.12;

```

end

Ottenuti i sette vettori contenenti N (numero di carichi in grammi in cui è stato diviso l'intervallo 0 – 1000 g) valori di Rp02 per ognuno dei sette provini si procede esattamente come riportato nell'intero script seguendo le variabili contrassegnate da RP o rp (mat1\_rp\_192, mat1\_rp\_230, nodi\_rp192, p\_rp192, ecc.).

## 5- STUDIO CARATTERISTICHE MATERIALE DA MODELLO MATLAB

### 6.1 Densità energetica

Per il calcolo della densità energetica  $Rho$  [ $J/mm^3$ ] si fa riferimento alla seguente formula con cui si è ricavato il coefficiente geometrico "a", moltiplicativo di  $P/V$ , che tiene conto del diametro della sezione del laser e della sovrapposizione dei due strati adiacenti di materiale fuso e solidificato.

$$Rho = a * P/V \text{ [J/mm}^3\text{]}$$

Rho	a	P/V
76	0.316667	240
101.33	0.316667	320
152	0.316667	480

Figura 43: calcolo coefficiente geometrico a

### 6.2 Utilizzo codice Matlab per stima caratteristiche

Per testare il funzionamento del modello Matlab si procede dunque ad uno studio di valori di durezza e tensioni di snervamento eseguito su provini non trattati per valori di indentazione di 50, 200, 500 e 1000 g. Per ogni carico di indentazione si è proceduto all'acquisizione di valori di HV ed Rp02 per 500, 550, 600, 700 ed 800 mm/s di velocità avanzamento laser, sia per  $P=192W$  sia per  $P=230W$  direttamente da modello Matlab.

carico g	vel avanz mm/s	P = 192 W				P = 230 W			
		P W	Rho J/mm <sup>3</sup>	HV Mpa	Rp02 Mpa	P W	Rho J/mm <sup>3</sup>	HV Mpa	Rp02 Mpa
		192				230			
50	500		121.6	647	525		145.7	529	694
	550		110.5	639	524		132.4	583	564
	600		101.3	624	530		121.4	604	517
	700		86.9	589	579		104.0	577	588
	800		76.0	555	678		91.0	536	677
200	500		121.6	610	528		145.7	518	713
	550		110.5	604	525		132.4	569	576
	600		101.3	564	530		121.4	568	538
	700		86.9	560	575		104.0	541	590
	800		76.0	530	700		91.0	495	677
500	500		121.6	587	530		145.7	511	739
	550		110.5	582	525		132.4	560	595
	600		101.3	569	530		121.4	568	538
	700		86.9	540	586		104.0	541	590
	800		76.0	514	741		91.0	467	674
1000	500		121.6	569	519		145.7	506	755
	550		110.5	563	518		132.4	554	606
	600		101.3	552	530		121.4	560	542
	700		86.9	526	610		104.0	500	588
	800		76.0	501	806		91.0	445	662

Tabella 17: risultati ottenuti da modello Matlab

Si osservi che con i parametri di processo relativi al secondo provino C2 ( $P=192W$  e  $v=600mm/s$ ) di cui si dispone di prove di trazione si ottiene per ogni carico  $Rp02 = 530$  MPa.

Si tracciano ora gli andamenti di HV ed  $Rp02$  al crescere della densità energetica  $Rho$  per capire se ci sono comportamenti in linea con quanto ci si aspetta al variare dei parametri di processo ed in particolare della densità energetica.

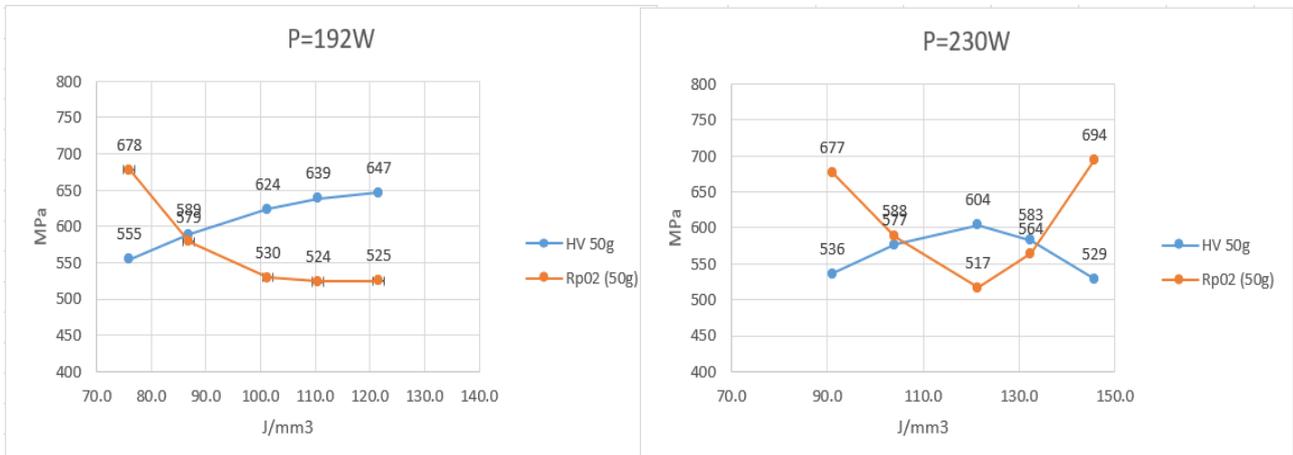


Figura 44: carico indentatura 50g

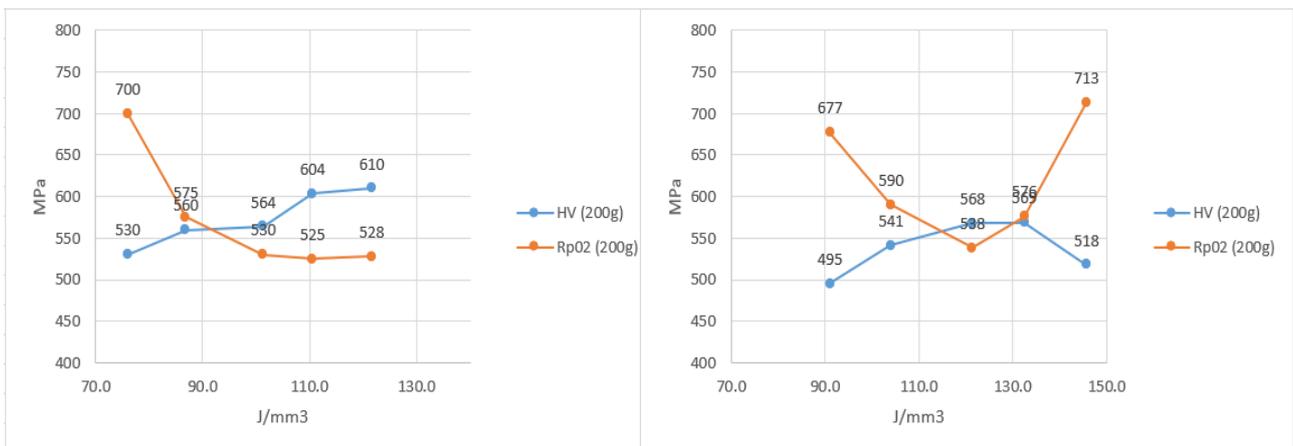


Figura 45: carico indentatura 200g

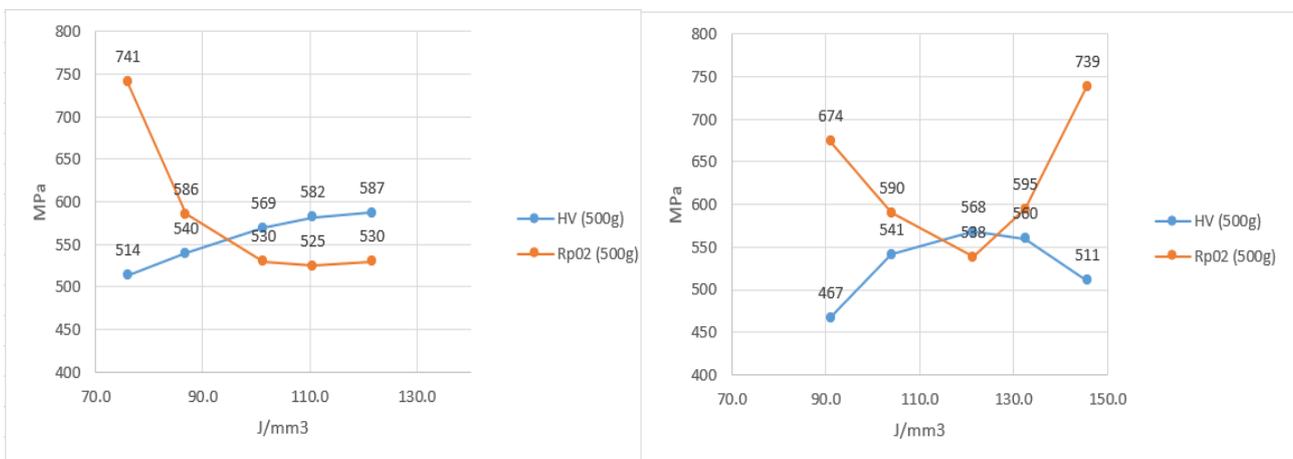


Figura 46: carico indentatura 500g

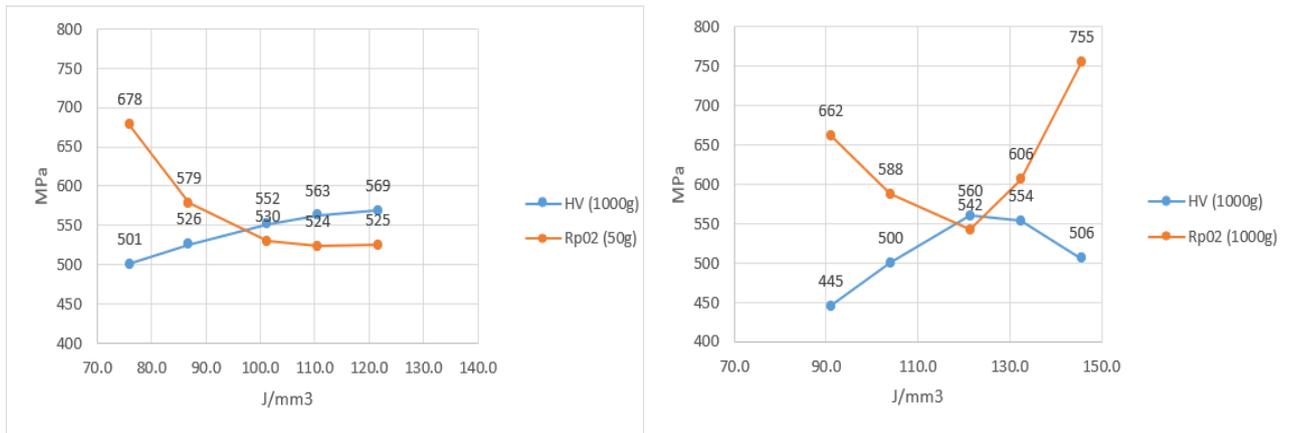


Figura 47: carico indentatura 1000g

Il modello Matlab restituisce risultati soddisfacenti e piuttosto in line con quanto riportato in letteratura.

In particolare, si nota dalle curve che le caratteristiche del materiale all'aumentare della densità energetica hanno stesso andamento al variare del carico di indentazione. In particolare, nei provini con  $P=192W$  la durezza aumenta all'aumentare dei Joule al millimetro cubo impressi dal laser alle polveri quindi al diminuire della velocità di avanzamento del laser mentre l' $Rp02$  decresce, andamento in linea con le previsioni. Per i provini che partono già con  $P=230W$  quindi con una densità energetica più elevata l'andamento è circa parabolico.

Per i provini a  $P=192W$  si immagina che le densità energetiche in gioco non siano ancora tali da generare un'inversione di tendenza che invece si verifica con  $P=230W$ . Avendo inserito le stesse velocità di avanzamento laser sia per  $P=192W$  che per  $P=230W$  si può dedurre che potenze laser più elevate garantiscono non solo picchi di durezza più bassi ma anche un'inversione di tendenza più repentina della durezza.

Una densità energetica più elevata determina un bagno di fusione più grande e più caldo mentre la riduzione della stessa porta a cambiamenti successivi nella microstruttura, che passa da una forte struttura colonnare grossolana a una raffinata struttura a grani equiassiali con una struttura quasi casuale [2] e una struttura più fine implica proprietà meccaniche migliori come testimoniato dai precedenti andamenti in cui i picchi di durezza si registrano per  $P=192W$ . Tuttavia, un basso livello di LED potrebbe aumentare la porosità e diminuire la densità della lega [2]

Tale fenomeno sembra verificarsi a prescindere dal carico di indentatura, quindi dall'Indentation Size Effect. È però evidente che all'aumentare dei valori di indentazione i valori di  $Rp02$  si discostano sempre più da quelli di HV riducendo l'intervallo di Mpa in comune come ben visibile dagli ultimi grafici per 1000g.

## 6- CONCLUSIONI

L'attività sviluppata durante questo lavoro ha dato un'ulteriore evidenza sperimentale al fenomeno dell'Indentation Size Effect studiato su provini Inconel 718 realizzati in Additive Manufacturing.

L'attività di laboratorio presso il DIMEAS del Politecnico di Torino ha in effetti restituito andamenti di durezza Vickers HV [MPa] decrescenti all'aumentare del carico di indentazione dovuti ai differenti meccanismi di deformazione plastica che si verificano. In effetti, l'impronta lasciata dall'indentatore piramidale cresce all'aumentare dei grammi selezionati di volta in volta per il test e di conseguenza, ad una superficie maggiore corrisponde una tensione minore pur considerando un aumento del carico evidentemente meno importante rispetto all'aumento della superficie deformata.

Il processo di lavorazione non convenzionale ha giocato un ruolo molto importante nell'analisi dei risultati ottenuti. La Selective Laser Melting (SLM), tecnica di fabbricazione additiva utilizzata dalla start up Sophia High Tech per realizzare i provini che sono stati processati, rispetto alle lavorazioni convenzionali, lascia una matrice piuttosto porosa e come spesso succede in Additive Manufacturing, non isotropa. La discontinuità del materiale processato si è manifestata fin da subito durante le acquisizioni sperimentali in laboratorio ed ha contribuito a rendere lo studio meno accurato e preciso di quanto non potesse essere fatto su provini della medesima lega realizzata in lavorazione convenzionale. La superficie indentata presentava valori di durezza piuttosto diversi con il medesimo carico imposto anche solo spostandosi di pochi millimetri, e tali evidenze sperimentali hanno poi avuto leggere ripercussioni sui successivi modelli sviluppati la cui accuratezza potrebbe non sembrare eccellente.

Ciò nonostante, per ognuno dei quattordici provini testati, sette dei quali induriti con precipitazione di seconde fasi post invecchiamento, si è riusciti ad approssimare con un decremento logaritmico l'andamento della microdurezza in funzione del carico in grammi imposto all'indentatore con un'ottima vicinanza ai dati sperimentali garantita da un  $R^2$  mediato tra i provini molto prossimo all'unità (0.93).

Con tali andamenti si è sviluppato un modello Matlab in grado di prevedere la microdurezza della lega in funzione dei parametri di processo della SLM. In particolare, partendo dai decrementi logaritmici noti sui sette provini e discretizzando il problema su un numero N di carichi imposti tra un grammo e mille grammi e su M valori di velocità avanzamento laser, il programma è in grado di plottare un'unica superficie che passa per le sette curve imposte.

Lo script chiede che si inserisca da tastiera la famiglia di provini Inconel 718 di cui si vogliono informazioni, invecchiato o no; richiede poi il carico di indentazione per tener conto dell'Indentation Size Effect e chiede di inserire il valore di velocità di avanzamento laser. Restituirà a video la durezza Vickers HV in MPa e con lo sviluppo del modello di cui si sta per accennare mostrerà altresì le tensioni di snervamento.

In effetti, allo studio degli andamenti della durezza HV approssimata come si diceva con un modello logaritmico, segue lo studio dei coefficienti angolari che legano l'HV con l' $R_{p0.2}$ . Sono stati utilizzati grafici "Sigma [Mpa] - Deformazioni% [ad]" relativi alle prove di trazione realizzate presso il DIMEAS dal dottorando Matteo Crachi in un suo precedente lavoro di tesi. Tali dati

facevano riferimenti al provino C2 da cui si è acquisito il primo Rp02 necessario alla stima dei coefficienti che legano durezza a tensione di snervamento secondo una legge del tipo:

$$Rp02 = a * HV$$

Si ricorda che si è registrato un valore di durezza per ogni carico di indentazione (25g 50g 200g 500g 1000g) per cui per ogni provino, si avranno cinque trasformazioni di HV in Rp02. I coefficienti così stimati al variare del carico sono stati applicati agli altri sei provini con l'ipotesi che potessimo ritenerli costanti al variare dei parametri di processo con cui sono stati realizzati.

Tornando al codice Matlab, lo script è ora in grado di stimare la tensione di snervamento per ogni grammo imposto all'indentatore e per ogni valore di velocità di avanzamento laser procedendo come per la durezza al plot di una superficie di Rp02.

### 7.1 Osservazioni per sviluppare modello Matlab

Tutto lo studio è stato realizzato con sole sette diverse densità energetiche ottenute combinando due potenze laser con sette velocità di avanzamento come da successiva tabella.

	C1	C2	C3		C4	C5	C6	C7
P [W]	192	192	192	P [W]	230	230	230	230
v [mm/s]	400	600	800	v [mm/s]	500	600	700	900
rho [J/mm3]	152	101	76	rho [J/mm3]	146	121	104	81

Tabella 18: riepilogo parametri di processo Selective Laser Melting

Il codice potrebbe migliorarsi qualora si chiedesse alla star up Sophi High Tech di fornire un maggior numero di provini realizzati con altre potenze del laser e con altre velocità di avanzamento, pur restando nei limiti imposti dai vincoli tecnologici della SLM.

Se si avessero ad esempio quattordici curve invece delle sette attuali, le superfici potrebbero rappresentare più fedelmente i valori di durezza e di tensione a snervamento al variare del carico di indentazione e dei parametri di processo.

Si ritiene inoltre che il presente lavoro possa essere completato con altre prove di trazione sui provini di cui non si dispone delle curve tensioni deformazione. Sarebbe utile calcolarne gli Rp02, registrarli per osservare quanto il modello si discosta dalla realtà ed eventualmente calibrarlo o modificarlo. Si ricorda infatti che per lo studio dei coefficienti moltiplicativi della durezza Vickers è stata adottata l'ipotesi di poterli considerare costanti al variare dei parametri di processo. Questa ipotesi potrebbe essere sicuramente rimossa a seguito di ulteriori prove di trazione. Anche a tal proposito sarebbe utile avere più parametri di processo a disposizione al fine di semplificare la fase di calibrazione del modello.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] - [www.sciencedirect-com.ezproxy.biblio.polito.it/science/article/pii/S074964191830860X](http://www.sciencedirect-com.ezproxy.biblio.polito.it/science/article/pii/S074964191830860X)
- [2] - A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718 E. Hosseinia, V.A. Popovichb
- [3] - Analysis of indentation size effect (ISE) in nanoindentation hardness in polycrystalline PMN-PT piezoceramics with different domain configurations
- [4] - Indentation size effect in metallic materials: Correcting for the size of the plastic zone, Scripta materialia, 2005, Vol.52 (11), p.1093-1097
- [5] - SLM® - Selective Laser Melting Technology - The Elements (english)
- [6] - Dispensa sull'Additive Manufacturing Prof. Ing. Antonio Del Prete
- [7] - AMS2773E Heat Treatment Cast Nickel Alloy and Cobalt Alloy Parts

## RINGRAZIAMENTI

Questo spazio lo dedico alle persone che, con il loro supporto, mi hanno aiutato in questo meraviglioso percorso di formazione.

Ringrazio mia madre e mio padre per avermi sostenuto e guidato fino al raggiungimento di questo prestigioso traguardo e ringrazio i miei fratelli per essere indiscussi modelli di vita e per esserci sempre stati.

Ringrazio la mia relatrice professoressa Sesana Raffaella ed il mio tutor dottorando Matteo Crachi, sempre disponibili per delucidazioni e chiarimenti nel corso della stesura del presente elaborato.

Ringrazio infine tutti i colleghi e i carissimi amici con cui ho avuto l'onore e il piacere di condividere questi anni di Politecnico.

Non abbiamo petrolio e miniere ma possiamo primeggiare nel mondo con la fantasia.

-Enzo Ferrari