

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

Caratterizzazione del processo di tranciatura di leghe di alluminio per il settore automotive mediante mappe di microdurezza



Relatore: Prof. Gianfranco Genta

Correlatore: Ing. Roberto Cagliero

Candidato: Maria Chiara Casavecchia

A.A. 2019-2020

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	3
1.1	Leghe di Alluminio	3
1.1.1	Designazione delle leghe di Alluminio	3
1.1.2	Principali applicazioni.....	6
1.1.3	Leghe di alluminio per il settore Automotive.....	9
2	MICRODUREZZA VICKERS.....	11
2.1	Metodo di prova.....	11
2.1.1	Microdurometro	12
2.1.2	Procedura	13
2.2	Mappature di microdurezza	15
3	MATERIALI E METODI	21
3.1	Alluminio AlMg3.....	21
3.1.1	Processo di tranciatura.....	22
3.2	Microdurometro	24
3.3	Profilometria a contatto	24
3.4	Microscopio interferometrico a scansione.....	25
3.5	Preparazione metallografica.....	25
3.6	Microscopia ottica	26
4	RISULTATI E DISCUSSIONE.....	27
4.1	Database AlMg3.....	27
4.2	Microstruttura AlMg3 (SEM/EDS).....	29
4.2.1	Analisi microstrutturale	29
4.3	Caratterizzazione superficie tranciata.....	39
4.3.1	Microscopio interferometrico a scansione.....	39
4.3.2	Profilometria a contatto	44
4.4	Mappe di durezza	47
4.4.1	Taratura accreditata (IATF).....	47
4.4.2	Definizione delle mappe di microdurezza	50
4.4.3	Mappatura zona tranciatura	53
4.4.4	Validazione della distanza minima tra le impronte.....	56
4.4.5	Mappe dx, dy, dx/dy, h, As, Ap, F/Ap,	59
4.4.6	Fenomeno del pile up	67
4.4.7	Definizione durezza di riferimento HV0	72
4.4.8	Metodo di correlazione con la prova di trazione.....	74

5	CONCLUSIONI.....	77
	BIBLIOGRAFIA.....	79
	RINGRAZIAMENTI.....	82

1 INTRODUZIONE

1.1 Leghe di Alluminio

Le leghe di alluminio svolgono un ruolo molto importante nella moderna ingegneria in quanto sono i materiali non ferrosi più utilizzati. Vengono ampiamente utilizzati in vari settori poiché presentano una buona resistenza alla corrosione, buone proprietà meccaniche insieme a buona lavorabilità, saldabilità ed un costo relativamente basso [1].

1.1.1 Designazione delle leghe di Alluminio

Come primo passaggio è utile distinguere tra leghe da fonderia e leghe da lavorazione plastica poiché la loro costituzione è tipicamente diversa a seconda dei rispettivi requisiti di colabilità (fluidità, caratteristiche di solidificazione e resistenza alla criccabilità a caldo) e di formabilità a caldo (soluzioni solide omogenee per un ottimo comportamento durante la rullatura a caldo, l'estrusione e la forgiatura). Di conseguenza tradizionalmente viene utilizzato un differente sistema di designazione per i due gruppi di lega sia negli standard nazionali che in quelli internazionali [2].

Ci si sofferma ora ad analizzare le leghe da deformazione plastica. Vengono riportati in Tabella 1.1 i gruppi per questa categoria con la loro designazione.

Tabella 1.1. Leghe di alluminio da deformazione plastica

Codice	Elemento alligante maggiore
1xxx	Nessuno
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg e Si
7xxx	Zn
8xxx	Altri elementi

Leghe della serie 1xxx: questo tipo di designazione viene assegnato per le leghe contenenti almeno il 99,00% di alluminio. Per questo gruppo, la terza e la quarta cifra indicano i primi due valori decimali della percentuale minima di alluminio presente. La seconda cifra della designazione indica modifiche della lega nei limiti di impurità o elementi di lega. Se la seconda cifra è zero, si sta indicando un alluminio non legato con limiti di impurità naturali; numeri da 1 a 9, indicano il controllo speciale di impurità o di elementi di lega.

Leghe dalla serie 2xxx alla serie 8xxx: la designazione per queste leghe è determinata dall'elemento di lega presente nella percentuale più elevata. Le ultime due cifre della designazione non hanno un significato particolare ma servono solo a identificare le diverse leghe di alluminio nel gruppo. La seconda cifra nella designazione indica la lega originale e le modifiche. Se la seconda cifra è zero, si sta indicando la lega originale. Al contrario valori compresi tra 1 e 9 indicano modifiche alla lega. [3]

Oltre alla designazione già esposta altri codici vengono utilizzati per l'indicazione degli stati metallurgici:

- F: grezzo di fabbricazione. Per questi prodotti non vengono applicati controlli speciali e non vengono specificati limiti per le proprietà meccaniche.
- O: designazione applicata ai prodotti ricotti.
- H: incrudito. Designazione applicata ai prodotti soggetti a deformazione a freddo dopo l'operazione di ricottura o dopo processi di deformazione a caldo. La lettera H è sempre seguita da almeno due cifre. La prima indica la combinazione specifica delle operazioni di base, la seconda indica il grado di incrudimento. Una terza cifra può essere aggiunta per indicare eventuali varianti rispetto agli stati definiti in precedenza.
- W: la designazione viene applicata solo alle leghe che spontaneamente subiscono un processo di invecchiamento naturale successivo alla solubilizzazione.
- T: questa designazione viene applicata ai prodotti sottoposti a trattamento termico. La T è sempre seguita da una o più cifre che indicano l'ordine specifico dei trattamenti. [4]

Tra le leghe da deformazione plastica, può essere fatta un'ulteriore suddivisione basata sui meccanismi di rafforzamento:

- Leghe da incrudimento: sono rafforzate per soluzione solida. Le leghe per la lavorazione plastica vengono successivamente rafforzate tramite l'incrudimento (H-Tempers).
- Leghe da trattamento termico: sono indurite per precipitazione e permettono l'esecuzione di speciali trattamenti termici (T-tempers) [2].

Nel primo gruppo ricadono le leghe delle serie 1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx e alcune leghe della serie 8xxx. Nel secondo gruppo ricadono le leghe delle serie 2xxx, 6xxx, 7xxx, 8xxx.

Elementi di lega

L'alluminio puro, non legato è molto morbido e duttile. Per impieghi di tipo strutturale o di altro genere vengono aggiunti elementi di lega che conferiscono le proprietà desiderate al prodotto finale come ad esempio la resistenza, la durezza e la resistenza alla corrosione. A seconda della composizione, della temperatura e della cinetica dei processi di nucleazione e crescita, gli elementi di lega possono entrare all'interno della struttura cristallina come soluzione solida o generare seconde fasi.

Nella produzione di un prodotto colato o lavorato, i parametri dell'intera catena dei processi termomeccanici eseguiti influenzano il tipo e la distribuzione degli elementi di lega e delle fasi nella microstruttura così da determinarne le proprietà e il comportamento.

La conoscenza della costituzione della lega è quindi la base per selezionare la lega più adatta e per comprenderne le proprietà e il comportamento durante la fabbricazione e l'utilizzo [2].

Le proprietà meccaniche vengono controllate tramite l'aggiunta di vari elementi, mediante la modifica del trattamento termico o tramite la variazione della microstruttura. Gli elementi alliganti vengono di seguito elencati e suddivisi in quattro categorie.

- Elementi alliganti maggiori: Cu, Si, Mg, Mg e Si
- Elementi alliganti minori: Ni, Sn
- Elementi modificanti della microstruttura: Ti e B, Sr, Na, Ca, Bi, P, S, Sb, Mn e Cr
- Impurità: Fe, Zn, Be

Gli elementi di lega vengono aggiunti per differenti scopi a volte però possono anche risultare dannosi.

- Magnesio: fornisce un sostanziale rafforzamento, facilita le caratteristiche di incrudimento e migliora la saldabilità
- Rame: migliora le proprietà meccaniche, provoca il decadimento della resistenza alla corrosione
- Silicio: migliora la fluidità dell'alluminio fuso
- Nichel: fornisce rafforzamento alla lega, l'aggiunta di Nichel viene tenuta al minimo per ottenere un buon compromesso tra costo e prestazioni
- Stagno: utilizzato per le proprietà antifrizione
- Titanio e Boro: il titanio viene utilizzato per affinare il grano. L'affinamento del grano risulta accelerata se si abbinano titanio e boro
- Manganese e Cromo: aumentano la duttilità e migliorano la resistenza alla corrosione
- Ferro: impurità, può essere difficile da rimuovere. Ha influenza sulla duttilità e sulla colabilità. In bassa concentrazione può portare all'affinamento del grano[5]

La maggior parte degli elementi vengono aggiunti per migliorare la resistenza del prodotto finale in diversi modi. La Figura 1.1 mostra l'effetto del rafforzamento che si ha nelle leghe binarie di alluminio per diversi elementi di lega.

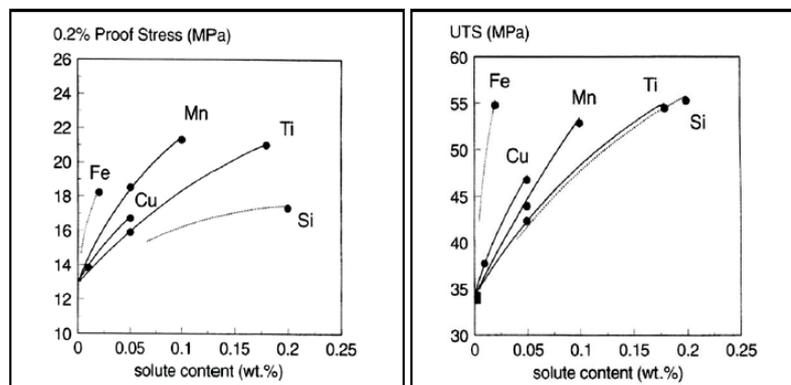


Figura 1.1: Effetto degli elementi di lega sul rafforzamento [2]

1.1.2 Principali applicazioni

L'alluminio ha già raggiunto un ruolo di primo piano in un'ampia gamma di applicazioni grazie al basso peso, alla fabbricazione relativamente facile e ad interessanti proprietà meccaniche. L'uso di queste leghe è iniziato con lo sviluppo nell'industria aerospaziale non appena le varianti ad alta resistenza sono state sviluppate e rese disponibili in quantità sufficiente, più di cento anni fa. Negli ultimi decenni, quantità crescenti di queste leghe sono state utilizzate anche in campo Automotive grazie alla creazione di varianti robuste e facilmente applicabili con buone prestazioni in termini di resistenza, formabilità e resistenza alla corrosione [6].

Restrizioni ambientali sempre più severe e rigorose per quanto riguarda le emissioni inquinanti e requisiti di sicurezza sempre più elevati hanno portato a direzionare le attività di ricerca del settore automobilistico verso l'utilizzo di materiali più leggeri.

Vale quindi la pena andare ad analizzare la potenziale riduzione di peso ottenibile per le varie parti dell'automobile. In Figura 1.2 viene riportato il peso, espresso in percentuale, dei componenti principali (escluso il gruppo propulsore) in un'automobile normale. Si nota che il 58% del peso totale è coperto da parti della carrozzeria, telaio ed elementi di sospensione; la riduzione del peso riguarderà quindi principalmente questi elementi.

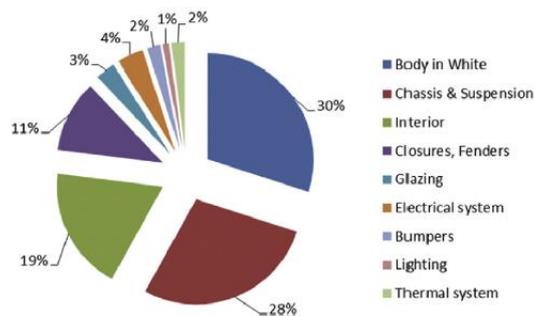


Figura 1.2: Confronto tra il peso dei vari componenti di un autoveicolo [7]

L'alluminio può essere dunque considerato come potenziale soluzione ingegneristica: la sua densità è solo un terzo di quella dell'acciaio e alcune leghe particolarmente resistenti soddisfano i requisiti di torsione e rigidità di un componente automotive [7].

Al giorno d'oggi le leghe di alluminio vengono usate in varie parti del corpo dell'automobile come il cofano, la copertura del bagagliaio, pannelli esterni, portiere e coperture di protezione tra cui isolanti termici. L'uso di tali leghe nella produzione di autoveicoli è aumentata in modo esponenziale al fine di aumentare la competitività e di soddisfare severe normative ambientali e legislative [8].

Dal punto di vista dei processi di formatura le applicazioni body-in-white sono le più promettenti, anche se per molti anni la crescita dell'alluminio nella produzione automobilistica era principalmente dovuta all'applicazione di getti per le parti del motore e di forgiati per gli elementi di trasmissione e del cambio. Recenti risultati hanno dimostrato che il risparmio di peso può raggiungere anche il 50% delle applicazioni body-in-white (BIW) e possono portare ad una riduzione del peso complessivo del 30-40% [7].

In Figura 1.3 viene riportata una selezione di parti per auto realizzate in alluminio



Figura 1.3: Parti per automobili realizzate in alluminio [9]

L'industria Europea ha sviluppato e introdotto numerose soluzioni innovative volte alla riduzione del peso, basate sull'utilizzo delle leghe di alluminio e sulla progettazione di un design ottimizzato. Uno dei principali vantaggi dell'alluminio è la disponibilità di una grande varietà di semilavorati quali prodotti da fonderia, estrusioni e lamiere, adatti per la produzione di massa e per la realizzazione di soluzioni innovative. Le parti prodotte riescono quindi a soddisfare le esigenze prestazionali, qualitative ed economiche grazie ad un contenimento dei costi di fabbricazione. [9]

Vengono ora analizzate le tre principali categorie di applicazione per le leghe di alluminio:

- Gruppo propulsore: l'alluminio è diventato il materiale di scelta per diverse applicazioni all'interno del gruppo propulsore. Generalmente vengono utilizzate leghe da fonderia, al contrario la parte di componenti prodotta utilizzando leghe da deformazione plastica è relativamente piccola. L'alluminio viene ormai utilizzato in modo consolidato per la produzione di scambiatori di calore e pistoni. L'impiego per la fabbricazione di testate e alloggiamenti sta diventando pienamente sviluppato. Ultimamente i blocchi motore sono stati i principali portatori della crescita dell'utilizzo dell'alluminio. La crescita dell'alluminio è venuta principalmente a discapito della ghisa, tuttavia un'ulteriore crescita nell'impiego dell'alluminio in questa applicazione è limitata. Vi sono infatti applicazioni in cui soluzioni più leggere, quali plastiche ad alte prestazioni e leghe di magnesio, stanno iniziando a rimpiazzare i getti in alluminio. [10]
- Carrozzeria: il Body in White (BIW) visto come un singolo componente è la parte più pesante di una vettura convenzionale con una quota compresa tra il 25% e il 30% del peso completo del veicolo. Il corpo della macchina che comprende il body-in-white, le portiere, i paraurti e le diverse parti interne è ancora oggi principalmente composto da lamiere in acciaio. La sostituzione dell'acciaio con l'alluminio nel corpo dell'automobile rappresenta una interessante possibilità di alleggerimento. Inoltre le opzioni di alleggerimento date dall'alluminio non si limitano alla pura sostituzione del materiale, le differenti forme ottenibili con prodotti in alluminio permettono infatti di ottenere una buona combinazione tra peso e design. E' stato dimostrato che la

sostituzione delle carrozzerie in acciaio convenzionali con modelli in alluminio adeguati offre una potenziale riduzione di peso di circa il 40%. [11]

- Telaio e sospensioni: le automobili Europee contengono circa 40-45 kg di alluminio nel telaio e nelle sospensioni, ossia il 30% del contenuto totale medio di alluminio. Per le auto prodotte in Nord America e nel Sud-Est Asiatico questa frazione è invece del 25-30%. In ogni caso il contenuto varia fortemente tra i diversi modelli. Per questo sottogruppo, i prodotti da fonderia rappresentano l'80% del contenuto complessivo di alluminio, il 10% circa è rappresentato da componenti forgiati, le leghe di alluminio laminate ed estruse sono infine una percentuale relativamente piccola. L'applicazione dell'alluminio in questo tipo di applicazioni crescerà ulteriormente, ne è un esempio il potenziale di crescita per i cerchi in alluminio considerato il loro fascino estetico. I componenti del telaio e delle sospensioni sono parti che devono rispettare severi requisiti di sicurezza. Le ruote e le sospensioni sono sottoposte a carichi dinamici elevati, ambienti aggressivi e, allo stesso tempo, devono resistere ad un utilizzo improprio. E' quindi necessario che vengano impiegati solo componenti in alluminio di elevata qualità realizzati con leghe selezionate attentamente, utilizzando procedure di fabbricazione controllate e standard di controllo qualità rigorosi. [12]

Difficoltà nella sostituzione dell'acciaio con l'alluminio

Il maggior costo dell'alluminio rispetto all'acciaio spiega come mai l'alluminio è rimasto a lungo una soluzione che comprendeva principalmente il settore automobilistico di lusso.

Sebbene l'uso dell'alluminio nelle automobili sia cresciuto negli ultimi decenni, i progressi sono ancora limitati. Fino ad ora la maggior parte della sostituzione con l'alluminio è stata fatta con pezzi derivanti da operazioni di fonderia e forgiatura.

Gli ostacoli maggiori che non permettono una buona diffusione di questo tipo di leghe sono: l'alto costo delle materie prime, la minore formabilità e in molti casi i maggiori costi di produzione di pannelli in alluminio. Tuttavia, sia il settore produttivo dell'alluminio che il settore automotive hanno fatto tentativi significativi per fare in modo che l'alluminio diventasse un'alternativa vantaggiosa all'acciaio.

Per sopperire al maggior costo delle leghe di alluminio la loro competitività deve essere affrontata considerando i costi di produzione minori, la maggiore funzionalità, la migliore resistenza alla corrosione. I getti di alluminio sono potenzialmente meno costosi rispetto la ghisa, questa è infatti la ragione principale per cui i getti di alluminio sono già stati ampiamente utilizzati nella produzione di automobili per molti anni. Al contrario i componenti in alluminio ottenuti per lavorazione plastica sono più costosi rispetto alle loro controparti ferrose, pertanto la scelta di utilizzare leghe leggere può essere legata ad esempio ad una funzionalità migliore.

Altri motivi che possono condurre alla preferenza delle leghe di alluminio e che spesso risultano avere un impatto maggiore rispetto ai costi sono i regolamenti governativi che possono riguardare la protezione ambientale, il risparmio di carburante o il miglioramento della sicurezza dei passeggeri. [7]

Altro motivo per cui l'utilizzo dell'alluminio risulta limitato in campo Automotive riguarda requisiti di processo che sono in contrasto con gli acciai convenzionalmente utilizzati. L'alluminio è infatti considerato difficile da saldare a causa di: alta conducibilità termica, alto

ritiro di solidificazione, formazione di ossido in superficie, elevato coefficiente di dilatazione termica, alta solubilità dell'idrogeno allo stato fuso e intervalli relativamente ampi di solidificazione e temperatura che influenzano le saldature [8].

1.1.3 Leghe di alluminio per il settore Automotive

Le due principali serie di leghe da deformazione plastica utilizzate nel settore Automotive sono le leghe da incrudimento Al-Mg (AA5xxx) e le leghe da trattamento termico Al-Mg-Si (AA6xxx), che presentano una buona combinazione tra resistenza e formabilità.

Per applicazioni specifiche le leghe Al-Zn-Mg-Cu (AA 7xxx) ad alta resistenza vengono usate principalmente come parti estruse. Tuttavia, a causa di limitazioni di corrosione, caratteristiche di giunzione e di invecchiamento, queste leghe assieme alle altre leghe alto resistenziali Al-Cu-Zn-Mg (AA2xxx) sono meno adatte per la produzione convenzionale di massa di parti automobilistiche.

La resistenza e la formabilità per le leghe Al-Mg (5xxx) è basata sul meccanismo di indurimento per soluzione solida grazie all'aggiunta di Mg, di solito superiore al 5%. Così le leghe Al-Mg ad alto contenuto di Mg migliorano entrambe le proprietà chiave di resistenza e formabilità.

L'uso di leghe 5xxx Al-Mg è ben consolidato nelle applicazioni che riguardano il telaio ed elementi strutturali, grazie alla loro buona formabilità. Negli ultimi anni nuove varianti di leghe Al-Mg con contenuto di Mg più elevato (ad esempio 3,5%) o con piccole aggiunte di Cu sono state studiate e hanno mostrato proprietà potenziate. Alcune di queste vengono utilizzate in applicazioni body-in-white da compagnie giapponesi.

Le leghe della serie 6xxx Al-Mg-Si vengono utilizzate in modo consolidato in molte parti dell'autoveicolo, compresi i pannelli esterni, che hanno elevati requisiti per quanto riguarda l'aspetto superficiale. Ad una temperatura di circa 185 °C si ha un significativo aumento della resistenza grazie al processo di indurimento per precipitazione (invecchiamento), successivo a un trattamento di solubilizzazione, superiore a 540 °C, e tempra. Questo tipo di leghe fornisce un'elevata resistenza in caso di trattamento T6, mentre offrono una resistenza minore e una buona formabilità in caso di trattamento T4. La loro caratteristica evoluzione della resistenza avviene in seguito ad un trattamento termico aggiuntivo, utilizzato in campo automotive, dopo il processo di formatura, in alcuni casi semplicemente durante il ciclo di verniciatura del body-in-white. [6]

In particolare, tra le leghe di alluminio recentemente applicate nel settore Automotive, vi sono la AA5754 H22 e la AA6082 T6. La AA5754 viene ampiamente utilizzata in auto sportive mentre la AA6082 è comunemente usata per elementi strutturali nella maggior parte delle auto di lusso. L'applicazione di leghe di alluminio ad altissima resistenza della serie 7xxx, includendo la 7021 e la 7075, sono un'importante fonte per le attività di ricerca [7].

L'elemento principale presente nelle leghe lavorate Automobilistiche della serie 5xxx è il Magnesio. La sua aggiunta aumenta l'incrudimento, la resistenza alla trazione e la formabilità. In Figura 1.4 viene mostrata l'influenza del magnesio sulla curva tensione-deformazione. Tuttavia, queste proprietà benefiche vengono bilanciate da una crescente difficoltà

nell'esecuzione della laminazione, per le leghe contenenti alte percentuali di magnesio si verifica infatti il fenomeno del rafforzamento durante la laminazione.

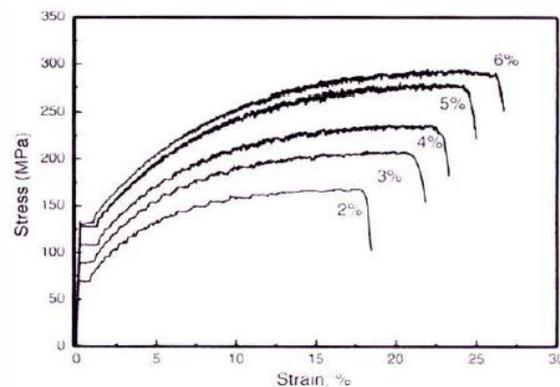


Figura 1.4: Curve tensione-deformazione al variare della quantità di Mg nella lega [2]

La saldabilità delle leghe 5xxx è molto influenzata dalla composizione e può essere correlata sia al livello di magnesio all'interno della lega che ai livelli di manganese e cromo.

Per quanto riguarda le leghe della serie 6xxx gli elementi alliganti maggiori sono invece il magnesio, il silicio e il rame.

Anche elementi a bassa solubilità come manganese e ferro o altri alliganti minori come cromo, zirconio e titanio giocano un ruolo importante nello sviluppo delle proprietà delle leghe per autoveicoli. Essendo a bassa solubilità questi elementi formano particelle intermetalliche relativamente grossolane durante la colata e durante il preriscaldamento antecedente la laminazione a caldo. In piccole quantità queste particelle svolgono un ruolo fondamentale nel controllo della struttura del grano che si sviluppa durante le operazioni di laminazione a caldo e a freddo e durante la ricottura finale della lamiera.

D'altro canto, livelli troppo alti di questi elementi possono condurre a effetti dannosi sulle proprietà. Ad esempio, alti livelli di ferro possono ridurre la formabilità della lega. Ottenere una bassa quantità di questo elemento è però costosa da ottenere e impone vincoli all'uso di leghe riciclate. Come in questo caso più parametri vanno presi in considerazione [2].

2 MICRODUREZZA VICKERS

2.1 Metodo di prova

La normativa EN ISO 6507-1 [13] specifica il metodo di prova per la misurazione della durezza Vickers. In Tabella 2.1 vengono identificati tre diversi intervalli di forza utilizzati per la prova.

Tabella 2.1. Intervalli di forza per la prova Vickers

Ranges of test force, F N	Hardness symbol	Designation
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Vickers hardness test
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 to $< HV 5$	Low-force Vickers hardness test
$0,009\ 807 \leq F < 1,961$	HV 0,001 to $< HV 0,2$	Vickers microhardness test

La prova di durezza Vickers illustrata è valida per impronte aventi la lunghezza delle diagonali compresa tra 0,020 mm e 1,400 mm.

In Figura 2.1 viene mostrato il principio di esecuzione della prova. Un penetratore di diamante avente forma di una piramide a base quadrata, con un angolo noto tra le facce opposte al vertice, viene forzato contro la superficie del campione da analizzare. Dopo la rimozione della forza di prova, viene valutata l'impronta lasciata sulla superficie, tale operazione viene eseguita andando a misurare la lunghezza delle diagonali dell'impronta.

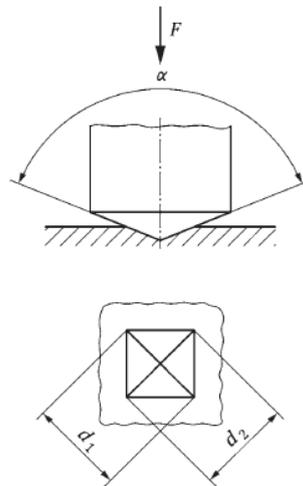


Figura 2.1: Principio della prova Vickers

In Tabella 2.2 vengono illustrati i simboli utilizzati durante l'esecuzione della prova.

Tabella 2.2. Simboli di riferimento per l'esecuzione della prova Vickers

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

La durezza Vickers HV viene indicata come mostrato in Figura 2.2

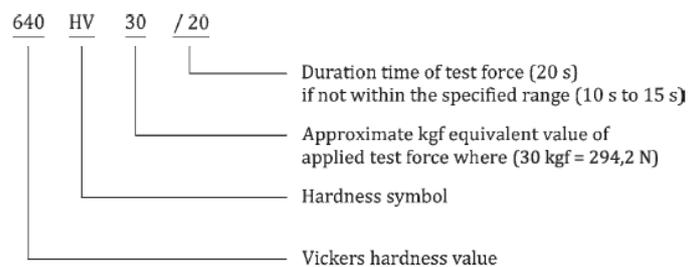


Figura 2.2: Designazione della durezza Vickers

2.1.1 Microdurometro

La macchina di prova deve essere in grado di applicare una o più forze predeterminate entro l'intervallo desiderato.

Il penetratore deve essere di diamante a forma di piramide a base quadrata.

Per quanto riguarda il sistema di misurazione diagonale esso deve soddisfare i requisiti della ISO 6507-2.

Gli ingrandimenti dovrebbero essere forniti in modo che la diagonale possa essere ingrandita più del 25% ma meno del 75% del massimo campo visivo possibile. Il sistema di misura della diagonale che utilizza una telecamera per la misurazione può utilizzare il 100% del campo visivo della telecamera a condizione che sia progettato per considerare i limiti del campo visivo del sistema ottico.

La risoluzione richiesta del sistema di misurazione della diagonale dipende dalla dimensione dell'impronta più piccola da misurare e deve essere conforme ai valori in Tabella 2.3. Nel determinare la risoluzione del sistema di misurazione le seguenti caratteristiche dovrebbero essere prese in considerazione: la risoluzione dell'ottica del microscopio, la risoluzione digitale della scala di misurazione e l'ampiezza del passo per ogni movimento della piattaforma, ove applicabile.

Tabella 2.3. Risoluzione del sistema di misura della diagonale

Diagonal length, d mm	Resolution of the measuring system
$0,020 \leq d < 0,080$	0,000 4 mm
$0,080 \leq d \leq 1,400$	0,5 % of d

La prova deve essere eseguita su una superficie liscia e uniforme, priva di incrostazioni di ossido, corpi estranei e, in particolare, completamente priva di lubrificanti, se non diversamente specificato nelle norme di prodotto. La finitura della superficie deve consentire la determinazione precisa della lunghezza della diagonale dell'impronta.

Per i campioni di metallo duro, lo spessore dello strato rimosso dalla superficie non deve essere inferiore a 0,2 mm.

La preparazione della superficie deve essere eseguita in modo tale da evitare danni superficiali o alterazioni della durezza superficiale dovute a surriscaldamenti o lavorazioni a freddo.

A causa della piccola profondità di penetrazione durante la prova è essenziale che durante la preparazione siano prese precauzioni specifiche. Viene consigliato di utilizzare un processo di lucidatura / elettrolucidatura adatto al materiale da misurare.

Lo spessore del provino o dello strato sottoposto a prova deve essere almeno 1,5 volte la lunghezza della diagonale dell'impronta. Nessuna deformazione deve essere visibile sul retro del provino dopo la prova.

Lo spessore di un provino di metallo duro deve essere di almeno 1 mm.

2.1.2 Procedura

La prova viene normalmente eseguita a temperatura ambiente entro i limiti compresi tra 10 °C e 35 °C. Se la prova viene eseguita a una temperatura al di fuori di questo intervallo, deve essere annotato nel verbale di prova. Le prove effettuate in condizioni controllate devono essere effettuate a una temperatura di (23 ± 5) °C.

Le forze di prova indicate in Tabella 2.4 sono standard. Possono essere utilizzate altre forze di prova maggiori di 980,7 N, ma non inferiori a 0,009807 N. Si devono scegliere forze di prova che diano luogo a impronte con diagonali maggiori di 0,020 mm.

Tabella 2.4. Forze di prova standard nella prova Vickers

Hardness test ^a		Low-force hardness test		Microhardness test	
Hardness symbol	Nominal value of the test force, <i>F</i> N	Hardness symbol	Nominal value of the test force, <i>F</i> N	Hardness symbol	Nominal value of the test force, <i>F</i> N
—	—	—	—	HV 0,001	0,009 807
—	—	—	—	HV 0,002	0,019 61
—	—	—	—	HV 0,003	0,029 42
—	—	—	—	HV 0,005	0,049 03
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,098 07
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147 1
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,196 1
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,245 2
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,490 3
HV 100 ^a	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,980 7

^a Nominal test forces greater than 980,7 N may be applied.

Il provino deve essere posto su un supporto rigido. Le superfici di supporto devono essere pulite e prive di corpi estranei (incrostazioni, olio, sporco, ecc.). È importante che il provino poggi saldamente sul supporto in modo che durante il test non si verifichi uno spostamento che influisca sul risultato del test.

Il penetratore deve essere portato a contatto con la superficie di prova e la forza deve essere applicata in direzione perpendicolare alla superficie, senza urti, vibrazioni o sovraccarico, fino a quando la forza applicata non raggiunge il valore specificato. Il tempo dall'applicazione iniziale della forza fino al raggiungimento della forza di prova completa deve essere di 7_{-5}^{+1} s.

Per le prove di durezza Vickers e per le prove di durezza Vickers a bassa forza (vedi Tabella 2.4), il penetratore deve entrare in contatto con il campione a una velocità $\leq 0,2$ mm/s. Per le prove di micro-durezza, il penetratore deve invece entrare in contatto con il provino ad una velocità di $\leq 0,070$ mm/s.

La durata dell'applicazione della forza di prova deve essere di 14_{-4}^{+1} s, ad eccezione delle prove su materiali le cui proprietà dipendenti dal tempo renderebbero questo intervallo inadatto.

La distanza minima tra impronte adiacenti e tra le impronte ed il bordo del campione viene mostrata in Figura 2.3.

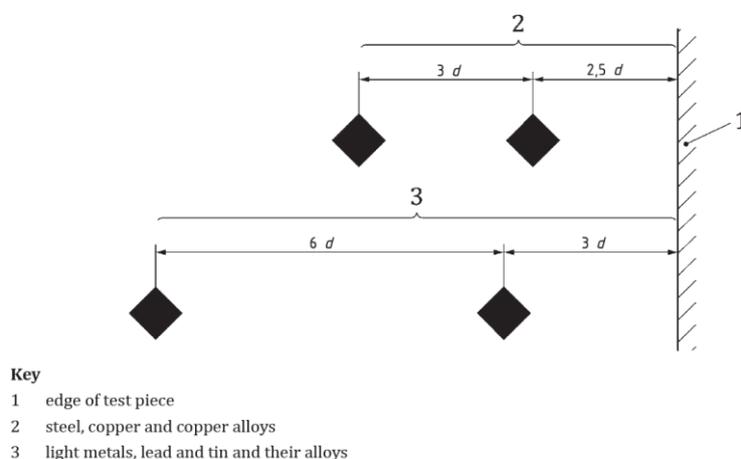


Figura 2.3: Distanza tra le impronte per la prova Vickers

Per l'alluminio la distanza tra il centro dell'impronta e il bordo del campione deve essere almeno tre volte la lunghezza della diagonale media mentre la distanza tra due impronte adiacenti deve essere almeno sei volte la lunghezza della diagonale media.

Una volta eseguite le impronte, vengono misurate le lunghezze delle due diagonali, la media aritmetica tra le due viene utilizzata per il calcolo della durezza Vickers utilizzando la formula indicata in Tabella 2.2.

2.2 Mappature di microdurezza

Nello studio eseguito da Mkaddem [14] viene proposta una procedura sperimentale di microdurezza per valutare l'evoluzione del comportamento dell'acciaio HSLA durante l'esecuzione di ogni passaggio del processo di formatura della lamiera, riportato in Figura 2.4.

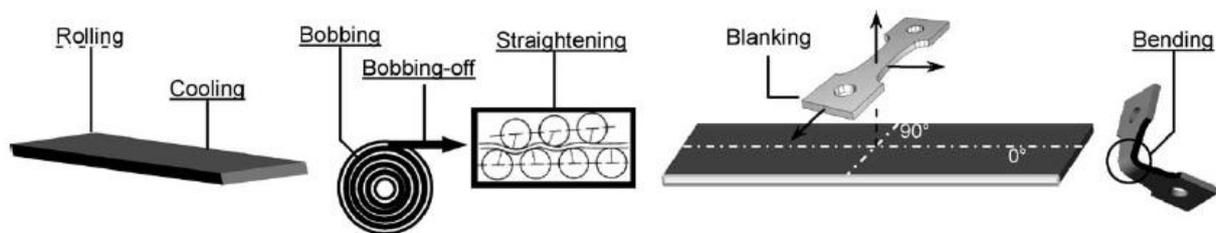


Figura 2.4: Sequenze principali del ciclo di lavorazione

L'analisi permette di caratterizzare il foglio di lamiera in diverse fasi del processo:

- Foglio di lamiera vergine: la prova viene eseguita sul foglio che ha subito il processo di laminazione e di raffreddamento. Le caratteristiche legate alla microstruttura non sono omogenee lungo lo spessore della lamiera di acciaio. Di conseguenza anche il comportamento meccanico varia in funzione dello spessore. La prova di microdurezza viene eseguita dalla superficie interna alla superficie esterna dell'acciaio, utilizzando un carico di 0,2 kgf che garantisce una precisione tale da comprendere il comportamento del materiale. Dalla prova eseguita si nota che i valori di microdurezza non sono uniformi lungo lo spessore. In particolare, valori maggiori si riscontrano vicino alla superficie dove la dimensione dei grani è minore.
- Lamiera raddrizzata: dopo la laminazione, viene creata la bobina. Durante questa operazione la microstruttura subisce alcune modifiche meccaniche come l'introduzione di stress residui. Per produrre parti di alta qualità la lamiera costituente la bobina deve essere raddrizzata. Mentre viene raddrizzato il materiale viene sottoposto a deformazione plastica. Il conseguente indurimento generato nel foglio di lamiera viene osservato, soprattutto sulla superficie, grazie ai nuovi valori di microdurezza.
- Lamiera piegata: durante la piegatura il materiale viene sottoposto ad un importante fenomeno di deformazione che è caratterizzato dal fenomeno dell'indurimento. I valori di durezza Vickers vengono misurati soprattutto nella zona di piegatura dalla superficie in compressione alla superficie in trazione. Lo scostamento tra i valori di durezza, che

nelle operazioni precedenti risultavano più bassi nella zona centrale dello spessore e più alti in corrispondenza delle superfici, risulta ancora più amplificato.

In Figura 2.5 vengono rappresentati i risultati ottenuti dalle prove eseguite.

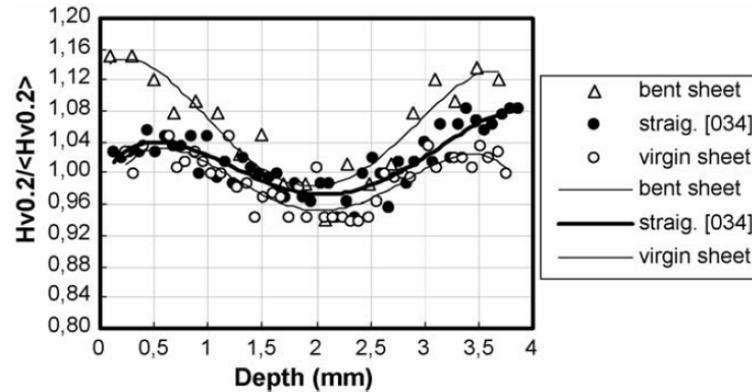


Figura 2.5: Profili di microdurezza relativi alla lamiera vergine, raddrizzata e piegata

Con lo studio eseguito è stato mostrato come la prova di microdurezza risulti una prova preferibile per la caratterizzazione dell'indurimento del materiale nella lamiera vergine e per seguire il processo di indurimento che si presenta nelle operazioni successive. Le prove sperimentali effettuate per i diversi stati della materia sembrano essere molto affidabili e permettono di registrare i cambiamenti locali della microstruttura in modo accurato anche se risultano essere di piccola entità.

In aggiunta la prova di microdurezza in combinazione alla prova di trazione è stata utilizzata con il fine di caratterizzare sperimentalmente il danno dei materiali. Questo procedimento è stato descritto anche da Mkaddem e Gassara [15].

In particolare quello che si vuole ottenere è il valore del danno del materiale in funzione della deformazione a cui lo stesso è sottoposto.

Nella procedura seguita, il danno è stato definito come segue:

$$D_H = 1 - \frac{H_V}{H_V^*} \quad (2.1)$$

H_V^* rappresenta la legge di microdurezza in funzione della deformazione per il materiale vergine, essa viene ricavata grazie all'utilizzo dei parametri di indurimento ottenuti durante l'esecuzione della prova di trazione.

H_V rappresenta la legge di microdurezza in funzione della deformazione per il materiale danneggiato, viene ricavata utilizzando i dati misurati sperimentalmente. Per il loro ottenimento è stata eseguita la prova Vickers sui provini utilizzati per la prova di trazione. Come indicato in Figura 2.6 le misure sono state eseguite lungo la direzione di trazione, sulla superficie trasversale indicata dagli assi N e L.

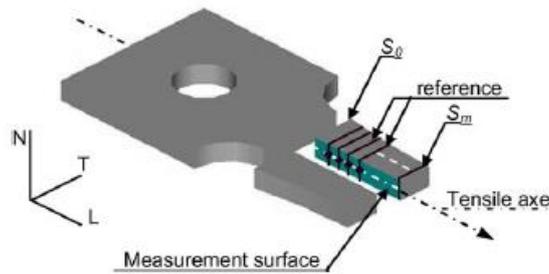


Figura 2.6: Campione utilizzato per le prove di microdurezza dopo la rottura avvenuta durante la prova di trazione

La prova è stata eseguita dal punto caratterizzato dalla deformazione minore (S_0) fino al punto in cui è avvenuta la rottura (S_m), dove la deformazione plastica è massima. I dati ricavati utilizzando questo procedimento sono stati plottati ed è stato possibile trovare la legge di microdurezza H_V .

La variazione tra H_V e H_V^* dipende essenzialmente dalle proprietà del materiale. Viene inoltre mostrato che lo scostamento tra i due parametri diventa maggiore all'aumentare della deformazione.

Infine, la legge del danno in funzione della deformazione può essere identificata grazie all'applicazione dell'equazione (2.1).

A differenza di un procedimento puramente sperimentale come quelli appena descritti, le mappe di microdurezza possono essere utilizzate per la validazione di simulazioni. Ne è un esempio il lavoro condotto da Muller e Barrans [16], in cui viene illustrato un nuovo metodo per convalidare le previsioni delle simulazioni agli elementi finiti. Nello studio vengono analizzati i 6 passaggi di formatura a freddo utilizzati durante il processo di produzione del V-band. Come primo passaggio è stata utilizzata l'analisi agli elementi finiti per simulare il processo di formatura a freddo. Secondariamente è stata eseguita la prova di trazione in combinazione a quella di microdurezza sul materiale in analisi (acciaio AISI 304), questo ha permesso di ottenere una relazione tra deformazione plastica e incrudimento. La correlazione ottenuta ha permesso di convertire i valori di deformazione plastica equivalente, ottenuti dalle simulazioni, in valori di durezza. Infine, i valori ottenuti sono stati comparati ai dati sperimentali. Per l'ottenimento di tali dati sono stati ricavati provini da ognuno dei sei passaggi di formatura, su di essi è stata eseguita la prova di microdurezza nei punti in cui il materiale risultava più deformato, come riportato in Figura 2.7.

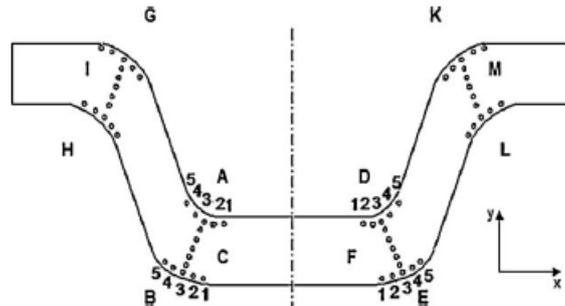


Figura 2.7: Indicazione delle impronte eseguite nella sezione trasversale per il campione estratto dopo i sei passaggi di formatura

Il metodo sviluppato grazie all'utilizzo delle microdurezze permette di ottenere un numero di dati sufficienti per la definizione della deformazione plastica in lamiere di diverso spessore.

In conclusione si ritrova una buona corrispondenza tra i risultati sperimentali e di simulazione. Viene inoltre identificato un aumento della durezza nei punti caratterizzati dalla deformazione plastica.

Altro studio in cui vengono utilizzate in combinazione l'analisi agli elementi finiti e le mappature di microdurezza è quello condotto da Falsafi e Demirci [17].

L'analisi tratta dello stampaggio della lamiera e di come una serie di deformazioni implichi un'evoluzione del danno attraverso i diversi passaggi di formatura. Lo studio si focalizza sulla quantificazione sperimentale del danno e sul degrado della capacità di carico dovuto al processo di formatura.

Come caso studio viene considerato un processo di formatura a freddo industriale e l'analisi del danno viene eseguita tramite una ricerca sperimentale basata su mappe di microdurezza eseguite sulla sezione trasversale della zona piegata in unione alla modellazione agli elementi finiti.

Viene dunque definito un nuovo metodo in cui la durezza viene utilizzata per la caratterizzazione del danno duttile.

Innanzitutto è stata eseguita la prova di microdurezza sul materiale vergine. La prova ha rilevato che i valori di durezza risultano eterogenei lungo la direzione dello spessore; il risultato dovrebbe dunque essere preso in considerazione per una precisa caratterizzazione del danno.

Una parte importante della caratterizzazione del danno mediante l'utilizzo della durezza è rappresentata dal saper collegare la durezza alla deformazione plastica associata. Per gli studi precedentemente analizzati, l'estrapolazione della durezza rispetto alla deformazione plastica, calcolata mediante la prova di trazione, è un approccio comune per collegare le due proprietà. Nella presente ricerca, la deformazione plastica invece non è misurabile, questa mancanza è stata dunque colmata usando la simulazione agli elementi finiti. Il danno duttile è stato dunque caratterizzato sia sperimentalmente attraverso estesi test di micro-durezza che permettessero di registrare le variazioni delle proprietà nella sezione trasversale del materiale sia mediante l'utilizzo della simulazione.

Durante la fase sperimentale dello studio è stata eseguita la prova di durezza Vickers sul campione nei punti in cui verrà eseguita la piegatura. Per ottenere un riferimento che permettesse di identificare la variazione della durezza durante le diverse fasi, la prova è stata

innanzitutto condotta su un campione del foglio vergine. La media delle misurazioni eseguita viene rappresentata in Figura 2.8, dall'andamento rappresentato si può notare la non uniformità dei dati di durezza nella direzione dello spessore.

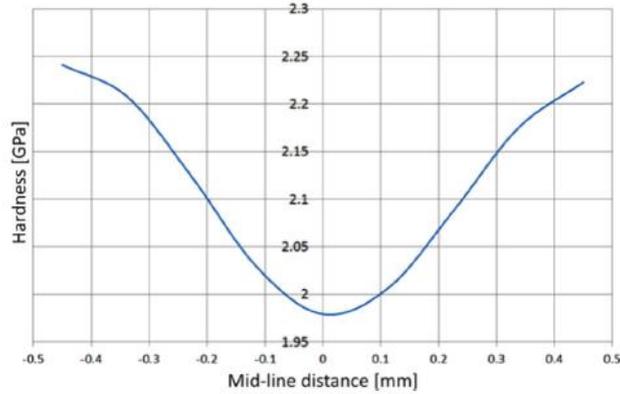


Figura 2.8: Misure di durezza condotte sul foglio vergine nella direzione dello spessore

Definito il materiale vergine, lo studio si è rivolto alla caratterizzazione del danno duttile basata sulla microdurezza, il metodo è di tipo indiretto e tramite la sua applicazione viene eseguita la misura del danno tramite i suoi effetti sull'indurimento.

La correlazione che viene considerata è la seguente:

$$D = 1 - \frac{H_i}{H_0} \quad (2.2)$$

Dove D è il parametro del danno, H_i è la durezza del materiale danneggiato che viene effettivamente misurato e H_0 è la durezza dello stesso materiale in assenza di danni, che ovviamente è un valore fittizio. Le tecniche impiegate in questo studio per calcolare H_0 sono i valori sperimentali della durezza in congiunzione con la simulazione agli elementi finiti.

La correlazione tra micro-durezza, misurata secondo il metodo Vickers, e la tensione di snervamento σ_y sono stati studiati da diversi ricercatori e risultano essere proporzionali:

$$HV = \alpha \sigma_y \quad (2.3)$$

Il fattore di proporzionalità α è compreso tra 2,5 e 3,0. Per tenere in considerazione l'indurimento durante la deformazione plastica, la tensione di snervamento (σ_y) deve essere sostituita dalla tensione di snervamento corrente (σ_y^*).

$$H = \alpha (\sigma_y^*) \quad (2.4)$$

$$\sigma_y^* = K \epsilon_p^{*n} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_p^* = \epsilon_p + \epsilon_{offset} \quad (2.6)$$

La durezza può quindi essere espressa come:

$$H = \alpha K (\epsilon_p + \epsilon_{offset})^n \quad (2.7)$$

In cui ϵ_p è la deformazione plastica, H è la durezza (MPa), n e K sono rispettivamente l'esponente e il coefficiente di indurimento. ϵ_{offset} è l'offset che tiene in conto la deformazione

plastica indotta a causa del test di indentazione. L'offset viene indicato per essere dipendente dal livello di deformazione plastica nel materiale.

Il procedimento per il calcolo del danno viene riportato in Figura 2.9 schematicamente:

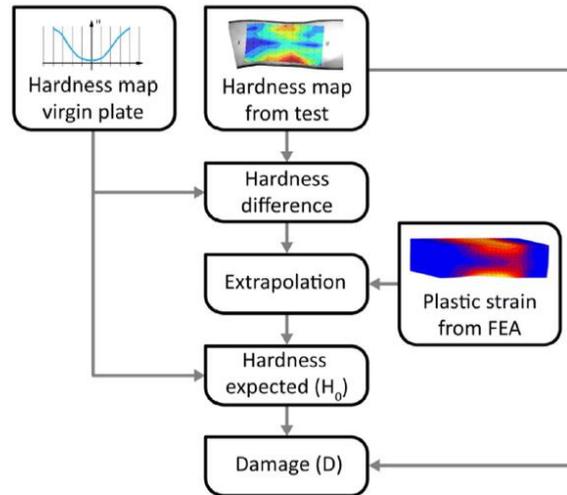


Figura 2.9: Diagramma di flusso per il calcolo del danno

Per eseguire l'extrapolazione la relazione (2.7) viene utilizzata inserendo i valori sperimentali di durezza ed i corrispondenti di deformazione plastica lungo lo spessore del materiale. Tuttavia in questo procedimento solo i punti attorno l'asse neutro vengono utilizzati, in questi punti infatti il materiale non è stato altamente deformato. La relazione viene poi utilizzata per estrapolare i valori di H₀ per i punti in cui il materiale è altamente deformato e probabilmente danneggiato.

3 MATERIALI E METODI

L'ispezione dedicata alla caratterizzazione delle leghe di alluminio è stata eseguita sia grazie ai mezzi messi a disposizione dai laboratori di LBN Ricerca, in collaborazione con AGLA PT, durante il periodo di tirocinio curriculare presso l'azienda sia agli strumenti resi disponibili dal Laboratorio di Caratterizzazione delle Superfici Tecnologiche del Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione del Politecnico di Torino.

3.1 Alluminio AlMg3

Il lavoro di tesi si è principalmente incentrato sulla puleggia in Alluminio prodotta in AGLA PT per Audi. La puleggia è collegata alla pompa dell'acqua del motore Audi V6T riportato in Figura 3.1 (a), a sua volta montato su Audi RS5, in Figura 3.1 (b).



Figura 3.1: (a) motore Audi V6T; (b) Audi RS5

Per la produzione della puleggia si parte da dischi di Alluminio della lega AlMg3 (Figura 3.2). Sommarariamente le operazioni eseguite per ottenere il disco sono quelle di rullatura e tranciatura. I dischi indicati risultano essere l'OP 10 del ciclo di produzione della puleggia. Le operazioni successive eseguite in AGLA PT sono di stampaggio, rullatura e anodizzazione.



Figura 3.2: Disco di partenza

3.1.1 Processo di tranciatura

Il processo viene comunemente utilizzato per la produzione di pezzi industriali, il suo impiego per la produzione di componenti piccoli e leggeri si è largamente diffuso grazie alla facilità con cui è possibile ottenere pezzi di forma e dimensione desiderata e pezzi finiti.

La tranciatura è un'operazione di taglio vincolata che comporta flessione elastica, deformazione plastica, taglio e frattura del materiale. Rispetto agli altri processi di formatura, l'obiettivo del processo di tranciatura non serve solo a deformare ma anche a rompere la lastra di metallo.

Il processo di tranciatura è diviso in quattro fasi (Figura 3.3) che si differenziano per il comportamento fisico. La prima fase è la deformazione elastica, questo cambiamento di forma è temporaneo e viene recuperato una volta che viene rimossa la forza. Successivamente la tensione diventa tale da provocare la deformazione permanente della lamiera, inizia qui la deformazione plastica che caratterizza la seconda fase. La terza fase è quella della deformazione di taglio in cui la profondità di estrusione della lamiera cresce gradualmente, anche la tensione di trazione ed il momento flettente nel materiale continuano a crescere. Il materiale nella sezione deformata risentirà dell'incrudimento. La forza di tranciatura continua ad aumentare fino a quando si iniziano a riscontrare crepe vicino al bordo di taglio. All'apparire delle crepe la terza fase finisce e la quarta fase, in cui avviene il distacco del tranciato, inizia. Il punzone continua a penetrare nella lamiera e le crepe vicine ai bordi taglienti del punzone e della matrice diventano più grandi e si espandono all'interno del materiale. Quando le crepe in alto e in basso si incontrano e coincidono la lamiera risulta tranciata [18].

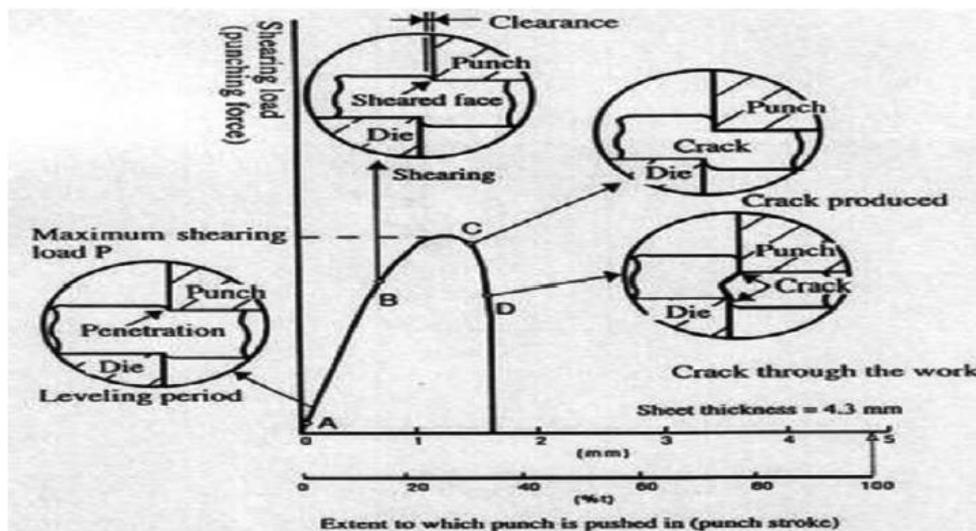


Figura 3.3: Andamento qualitativo della forza di tranciatura in funzione della corsa del punzone [18]

Il processo di tranciatura è ampiamente utilizzato per il taglio di componenti in lamiera in un ampio numero di settori. Durante il processo di tranciatura, il foglio viene posizionato tra il premilamiera e la matrice, il pezzo che si vuole ottenere si ricava tramite la penetrazione nella lamiera del punzone. A causa del bordo affilato del punzone, nella lamiera si verifica una deformazione di taglio altamente localizzata che porta alla frattura duttile. Di conseguenza, il taglio della lamiera porta ad un tipico profilo nell'elemento tranciato che può essere distinto in

quattro zone [19] mostrate in Figura 3.4 e confrontate con la superficie tranciata che si presenta sul disco di partenza.

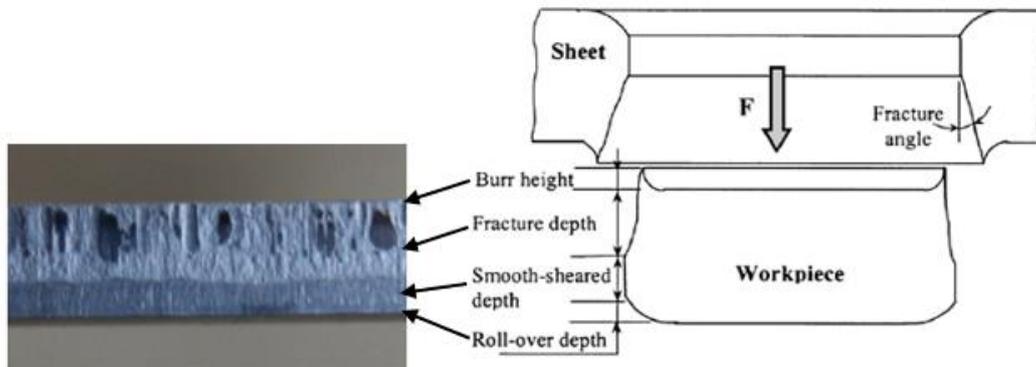


Figura 3.4: Confronto tra profilo teorico [20] e profilo reale del disco di partenza

Di seguito vengono descritte le quattro zone [21].

- Roll-over depth (Arrotondamento): indotta dalla deformazione plastica
- Smooth-sheared depth (Superficie liscia di taglio): zona liscia e lucida che si forma durante la fase di taglio
- Fracture depth (Zona di frattura/rottura): superficie ruvida, si verifica dopo la rottura del materiale
- Burr height (Bava): causata dalla deformazione plastica

La qualità del taglio si basa sulla dimensione di queste zone. Una buona qualità del profilo tranciato implica la massima dimensione del bordo di taglio e la minima dimensione dell'arrotondamento, della zona di frattura e della bava.

Il profilo di taglio dipende da parametri di processo e dal comportamento del materiale della lamiera. I parametri di processo includono: il gioco, la velocità di taglio, la cinematica della pressa, la geometria e lo spessore del componente, la geometria e l'usura dell'utensile. Le proprietà del materiale della lamiera includono: la velocità di deformazione, la dipendenza dalla temperatura e la dimensione del grano.

Per ottenere la qualità desiderata del bordo di taglio, di solito vengono seguite prove dispendiose in termini di tempo e procedure basate su conoscenze empiriche. Pertanto, lo sviluppo di un modello affidabile agli elementi finiti (FEM) del processo di tranciatura è necessario per prevedere il profilo di taglio e, di conseguenza, accelerare lo sviluppo del processo produttivo che porta alla qualità desiderata [19].

Riconducendoci al disco di partenza, vengono riportate in Figura 3.5 le immagini della superficie tranciata ottenute utilizzando il microscopio ottico.

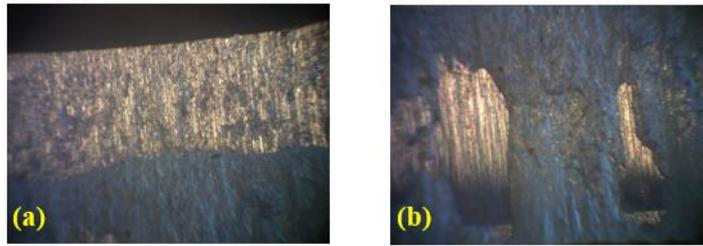


Figura 3.5: (a) Superficie liscia; (b) Zona di frattura

3.2 Microdurometro



Figura 3.6: Microdurometro

Il microdurometro utilizzato è il modello HV 1M STV della CRASE. Il carico utilizzato è di 0,2 kgf. Il penetratore è di tipo Vickers ed il tempo di mantenimento è pari a 10 secondi.

3.3 Profilometria a contatto



Figura 3.7: Profilometro a contatto

Il profilometro a contatto utilizzato è il Surfcom 1900SD3.

3.4 Microscopio interferometrico a scansione



Figura 3.8: Microscopio interferometrico a scansione

Il microscopio interferometrico a scansione utilizzato è il Coherence Scanning Interferometer Zygo NewView 9000.

3.5 Preparazione metallografica

La preparazione dei provini consta di tre operazioni principali.

Per la prima operazione, che consiste nell'estrazione degli elementi da analizzare, viene utilizzata la troncatrice presente in Figura 3.9.



Figura 3.9: Troncatrice Hitech Europe

Come seconda operazione gli elementi estratti sono stati inglobati in una resina polimerica termoindurente, l'inglobatrice utilizzata viene riportata in Figura 3.10.



Figura 3.10: Inglobatrice Hitech Europe

Infine, come terza operazione, i provini sono stati lucidati a specchio utilizzando la lucidatrice in Figura 3.11. La velocità di rotazione è 250 rpm. Le carte abrasive utilizzate hanno i seguenti valori di grana: 80, 240, 320, 800, 1200. Per la finitura finale sono stati usati panni con soluzione diamantata 6 μm , 3 μm e 1 μm .



Figura 3.11: Lucidatrice Hitech Europe

3.6 Microscopia ottica



Figura 3.12: Partendo da sinistra verso destra microscopio ottico e stereo microscopio

Il microscopio ottico è il LABORLUX 12 ME LEITZ mentre lo stereo microscopio è della GAL.

4 RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Database AlMg3

Al fine di andare a generare un database che permettesse di raccogliere tutte le informazioni relative alle proprietà meccaniche e chimiche della lega di alluminio AlMg3 utilizzata per la produzione della puleggia in esame, sono stati raccolti 47 certificati riportanti i valori delle proprietà desiderate per ciascun lotto consegnato.

Una volta definito l'elenco di dati, si è passati ad una rappresentazione grafica che esprimesse la distribuzione del campione, il boxplot.

Il boxplot detto anche diagramma a scatola e baffi è un grafico statistico, esso permette di capire se la distribuzione è simmetrica o asimmetrica e risulta molto utile nel confronto di più distribuzioni. Inoltre permette di individuare valori anomali e outliers.

In Figura 4.1 viene rappresentato un tipico diagramma boxplot utilizzato in questa analisi con tutti i parametri che lo costituiscono:

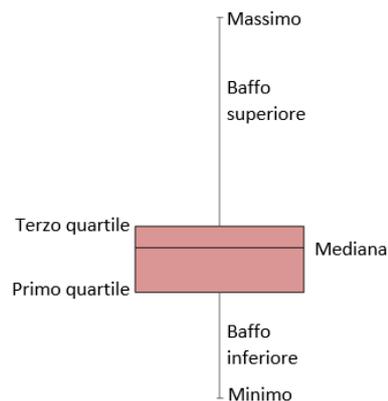


Figura 4.1: Esempio di boxplot

Viene ora illustrato il significato di tali parametri:

- Minimo e Massimo: rappresentano il valore minimo ed il valore massimo dell'intervallo di dati considerati
- Mediana: indica il valore centrale della distribuzione, al di sotto di questo punto è contenuto il 50% dei dati
- Primo quartile: al di sotto di questo punto è compreso il 25% dei dati della distribuzione
- Terzo quartile: al di sotto di questo punto viene compreso il 75% dei dati della distribuzione

I dati per i quali è stata generata la rappresentazione grafica illustrata sono:

- Il carico di snervamento Rp02
- Il carico di rottura Rm
- Allungamento percentuale misurato utilizzando un estensimetro da 5mm, A5mm/%

- Allungamento percentuale misurato utilizzando un estensimetro da 50mm, A50mm/%
- Il valore percentuale di elementi presenti nella lega, essi sono: Magnesio, Silicio, Ferro, Rame, Manganese, Cromo, Zinco, Titanio

Per ognuna di queste proprietà è stato generato il boxplot ed al fine di identificare all'interno della distribuzione di dati dove si posizionasse il lotto utilizzato nelle prove eseguite in laboratorio, al grafico di Figura 4.2 è stata aggiunta una tacchetta rossa ed il corrispondente valore numerico appartenente al lotto in utilizzo.

In Figura 4.2 viene riportato il boxplot riferito al carico di snervamento.

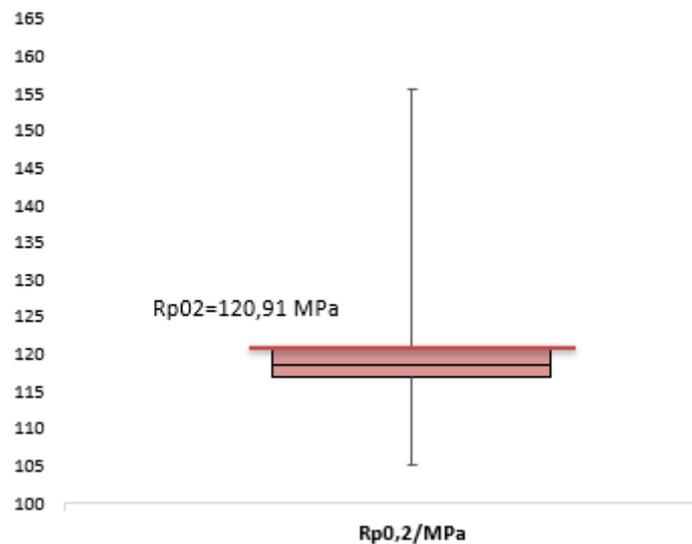


Figura 4.2: Boxplot carico di snervamento, valori espressi in MPa

4.2 Microstruttura AlMg3 (SEM/EDS)

4.2.1 Analisi microstrutturale

L'indagine microstrutturale è stata eseguita su di un campione prelevato dal disco di partenza. La superficie analizzata viene rappresentata in Figura 4.3, nell'immagine vengono anche inseriti i riferimenti necessari: i punti 1 e 3 indicano i bordi del provino mentre 2 il centro.

In Figura 4.4 viene mostrata la superficie del provino osservata utilizzando il microscopio ottico convenzionale senza l'utilizzo di filtri. Successivamente, sempre utilizzando il microscopio ottico, sono stati applicati i filtri che hanno permesso di osservare i diversi grani. In Figura 4.5 è possibile osservare i grani della superficie per l'intero spessore del provino, in Figura 4.6 e Figura 4.7 è stato utilizzato un ingrandimento maggiore, in questi casi la struttura dei grani è stata osservata in corrispondenza del bordo e del centro del provino.

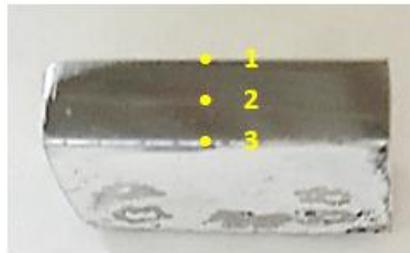


Figura 4.3: Campione per l'analisi microstrutturale



Figura 4.4: Visione provino al microscopio ottico senza l'applicazione di filtri

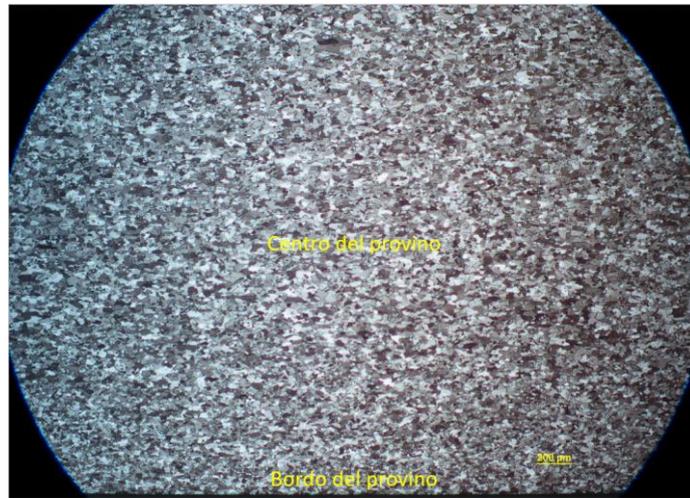


Figura 4.5: Visione provino al microscopio ottico con l'applicazione di filtri

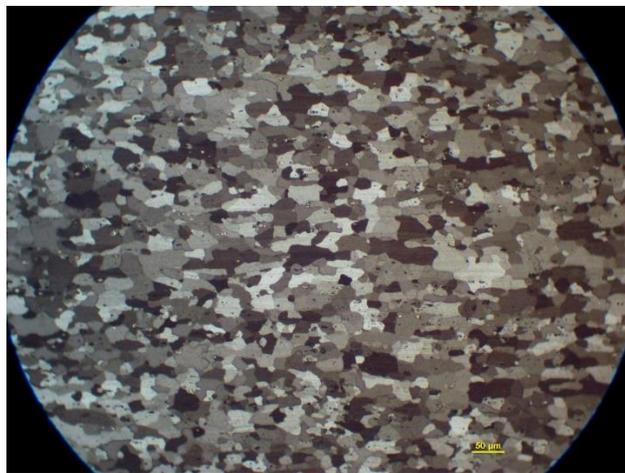


Figura 4.6: Visione bordo provino utilizzando microscopio ottico con l'applicazione di filtri



Figura 4.7: Visione centro provino utilizzando microscopio ottico con l'applicazione di filtri

Dal confronto tra la Figura 4.6 e la 4.7 si può notare che sul bordo del provino i grani risultano più piccoli e allungati mentre a cuore i grani risultano più equiassici e meno orientati.

La differenza tra le due strutture è dovuta al processo di lavorazione. L'operazione di spianatura induce un gradiente di durezza tra cuore e superficie, il materiale risulta incrudito in superficie e questo si riflette nella forma dei grani che risultano più piccoli e allungati

Come secondo passaggio si è passati ad analizzare i componenti presenti all'interno della lega. Per eseguire l'analisi è stato utilizzato il microscopio elettronico a scansione, in particolare è stato analizzato il segnale degli elettroni retrodiffusi ed è stata effettuata l'analisi EDS (spettrometria per dispersione di energia).

Gli elettroni retrodiffusi permettono di generare immagini che contengono informazioni sulla composizione del campione, al cambiamento di colore nelle immagini viene infatti associato un cambiamento della superficie ma anche un cambiamento nella chimica.

Nella tecnica EDS viene sfruttato il segnale dei raggi X generati nel SEM (microscopio elettronico a scansione), il loro rilevamento avviene tramite una microsonda che esegue la spettroscopia in dispersione di lunghezza d'onda.

In Figura 4.8 vengono riportati i risultati ottenuti con la tecnica EDS nella direzione dello spessore. La tecnica è stata utilizzata per l'analisi di 4 elementi:

- Mg: elemento principale nella lega
- Mn: elemento che migliora la resistenza alla corrosione
- Si: elemento importante per le leghe di alluminio
- Fe: inquinante delle leghe alluminio, il suo valore deve essere basso

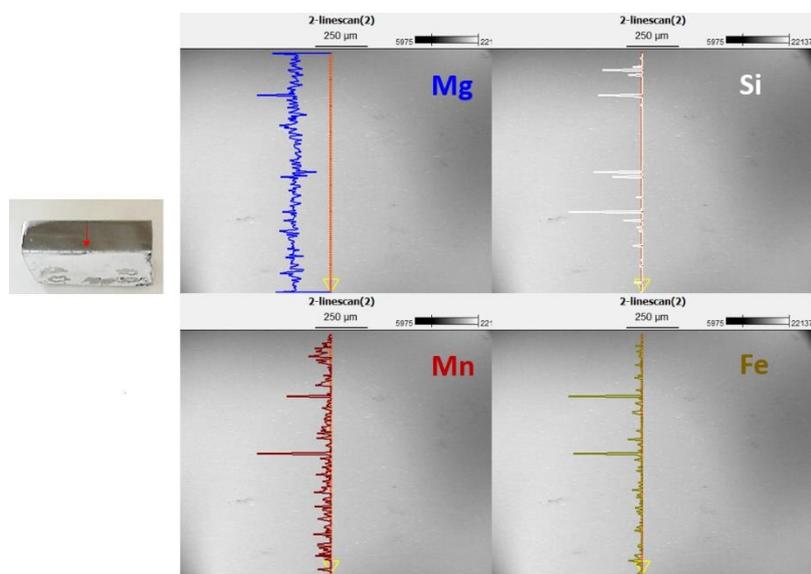


Figura 4.8: Spettroscopia EDS nella direzione dello spessore

L'analisi qualitativa lineare è stata eseguita, in via preliminare, lungo lo spessore del campione, come visibile in Figura 4.8. Nella matrice di alluminio si osserva una distribuzione omogenea del magnesio. Anche il manganese è distribuito in modo omogeneo, ma in quantità inferiore al

magnesio. Il silicio ed il ferro sembrano essere invece legati alla presenza di alliganti sparsi in modo irregolare sulla superficie.

Poiché l'analisi lungo una singola linea non è rappresentativa dell'intera superficie, le analisi EDS sono state effettuate anche in direzione perpendicolare rispetto alla Figura 4.8, per avere un'indicazione media della distribuzione degli elementi lungo il bordo superiore (Figura 4.9), la zona centrale (Figura 4.10) e il bordo inferiore (Figura 4.11).

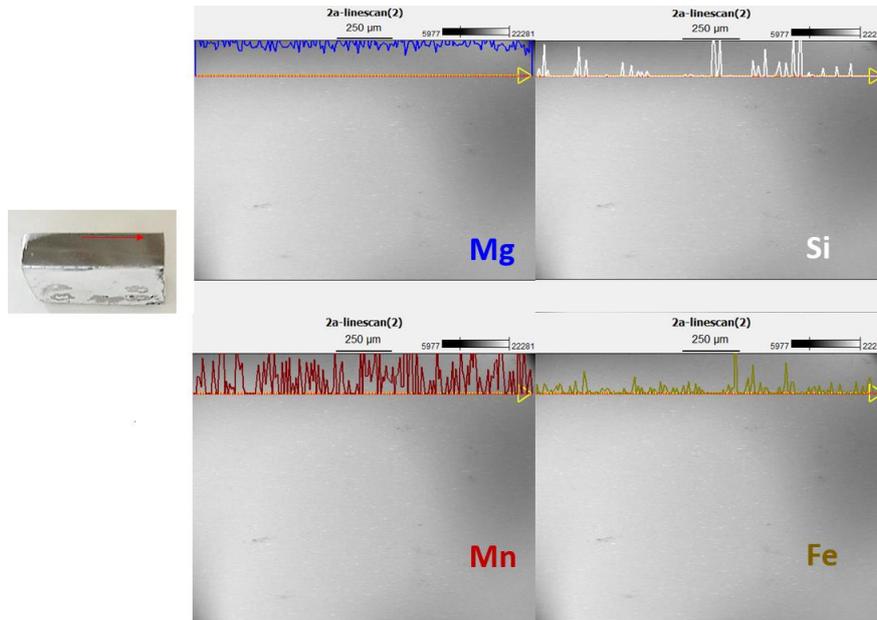


Figura 4.9: Spettroscopia EDS nella direzione longitudinale, lungo il bordo superiore

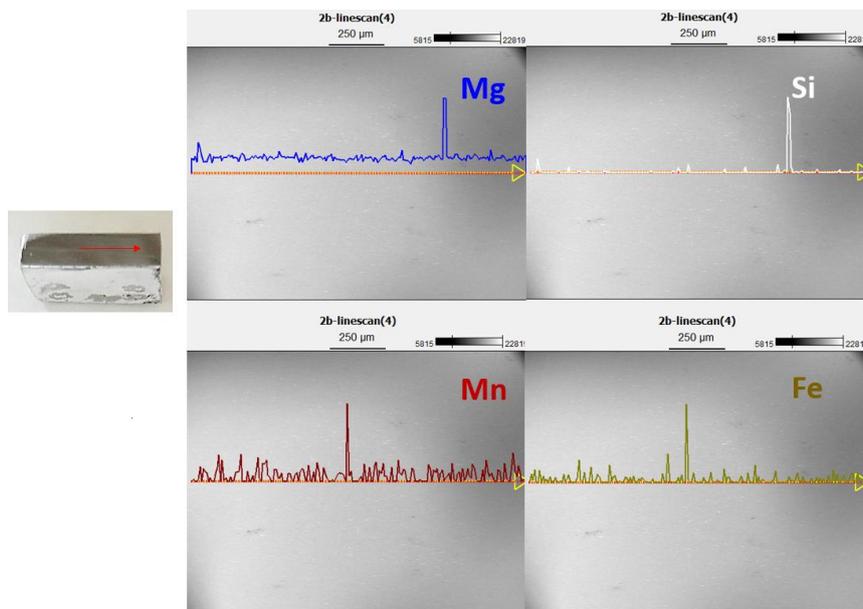


Figura 4.10: Spettroscopia EDS nella direzione longitudinale, al centro del provino

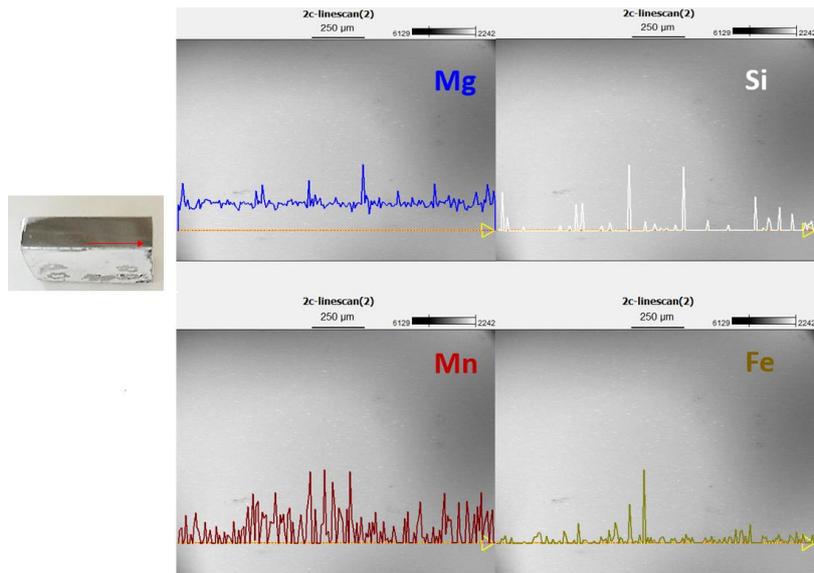


Figura 4.11: Spettroscopia EDS nella direzione longitudinale, lungo il bordo inferiore

Con l'esecuzione dell'analisi nella direzione longitudinale, in generale viene confermato ciò che è già stato osservato.

La valutazione del magnesio e del manganese è dubbia poiché questi due elementi sono presenti nella zona centrale in quantità leggermente inferiore rispetto ai bordi, tuttavia questa osservazione non è confermata nell'analisi effettuata lungo lo spessore del campione.

Bisogna notare che l'utilizzo dell'analisi lineare eseguita con EDS è particolarmente adatto per una superficie in cui vi è un'evidente disomogeneità qualitativa degli elementi presenti; nel caso del campione in questione, la lega ha una distribuzione abbastanza omogenea di alliganti.

Si conclude dunque che il materiale in analisi risulta omogeneo chimicamente.

La variazione delle proprietà meccaniche sarà quindi da ricercare nella variazione della dimensione del grano e non nella concentrazione chimica degli elementi.

Non avendo ritrovato differenze nella concentrazione degli elementi tra il centro e i bordi del provino, si è passati ad eseguire un'analisi più approfondita al centro del provino al fine di individuare gli elementi costitutivi della lega.

In Figura 4.12 viene visionato il campione nella zona centrale utilizzando il massimo ingrandimento del microscopio ottico. I grani blu e grigi sono alluminio e rappresentano la matrice, i punti bianchi e neri sono invece seconde fasi ancora da identificare.

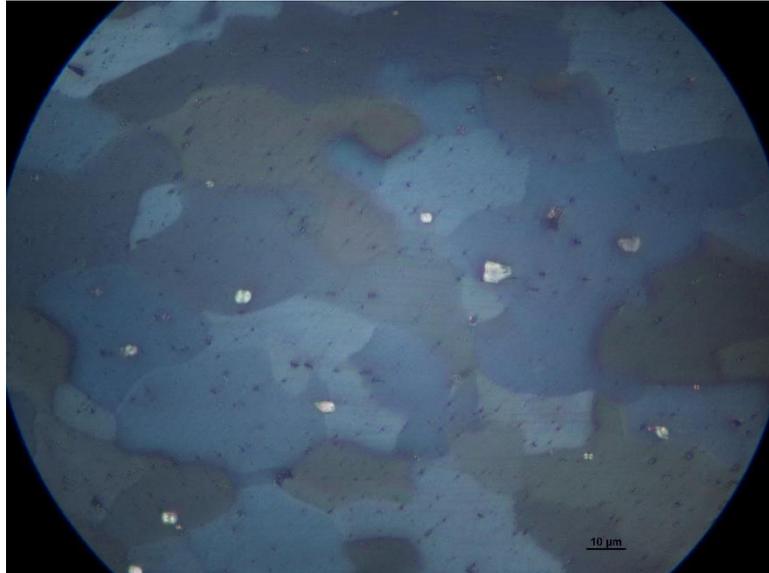


Figura 4.12: Visione centro del provino utilizzando microscopio ottico al massimo ingrandimento

Per l'identificazione degli elementi è stato utilizzato il microscopio elettronico (SEM) in combinazione all'EDS.

Un'analisi morfologica è stata eseguita a 500 X (Figura 4.13) con relativa analisi semiquantitativa riportata in Figura 4.14 e Tabella 4.1. Analisi Morfologiche sono state ripetute anche a 1000 X (Figura 4.15 e Figura 4.16) e a 2500 X (Figura 4.17).

Come si può vedere nelle Figure 4.15 e 4.16 è stata effettuata anche la misurazione della dimensione delle fasi.

Considerando la distribuzione irregolare delle fasi, si è deciso di effettuare altre due analisi semiquantitative su porzioni più piccole della superficie (Zona A e Zona B), al fine di dare un'indicazione della distribuzione degli elementi presenti nella lega. I risultati sono elencati nelle Tabelle 4.2 e 4.3 e mostrano una variazione della chimica nel passaggio da A a B.

Come ultimo passaggio si è quindi deciso di andare ad eseguire l'analisi semiquantitativa sulle due fasi, quella chiara e quella scura (Figura 4.18 e Tabella 4.4). La fase scura sembra essere un foro con magnesio e silicio all'interno. La fase chiara è invece composta da ferro, manganese e magnesio (EDS-1-CH) e non è incorporata nel metallo base. In accordo con Engler [22] gli intermetallici studiati possono essere classificati nel seguente modo:

- Fase scura: Mg_2Si
- Fase chiara: $Al_3(Fe,Mn)$

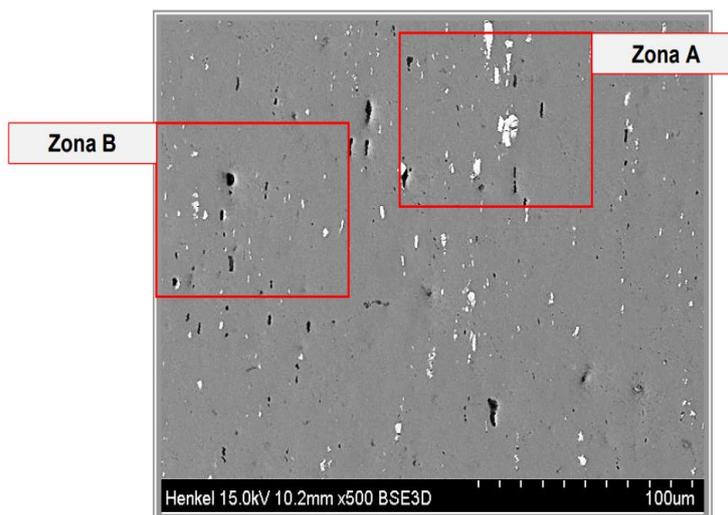


Figura 4.13: Superficie analizzata utilizzando il SEM

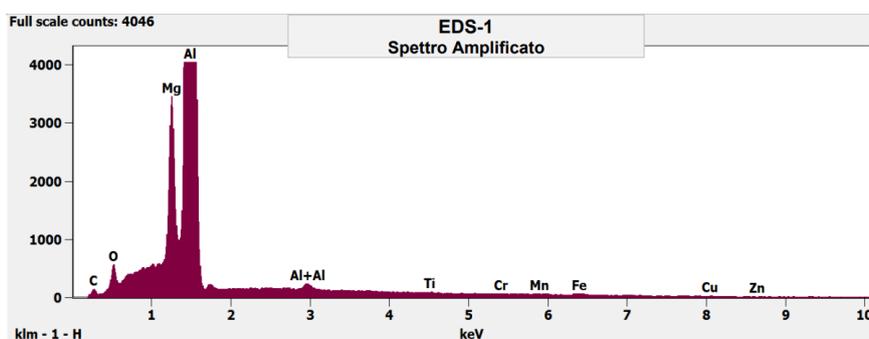


Figura 4.14: Analisi EDS della superficie (analisi qualitativa)

Tabella 4.1: Analisi semiquantitativa della superficie

Element Line	Net Count	Weight %
C K	886	1.64
O K	2631	1.92
Mg K	21792	2.85
Al K	684939	92.59
Si K	0	0.00
Ti K	144	0.07
Cr K	204	0.12
Mn K	214	0.17
Fe K	623	0.56
Cu K	0	0.00
Zn K	36	0.09
Total		100.00

Tabella 4.2: Analisi semiquantitativa zona A

Zona A		
Element Line	Net Count	Weight %
C K	903	1.68
O K	2621	1.93
Mg K	21489	2.86
Al K	671539	92.21
Si K	0	0.00
Ti K	58	0.03
Cr K	193	0.12
Mn K	388	0.31
Fe K	728	0.66
Cu K	106	0.20
Zn K	0	0.00
Total		100.00

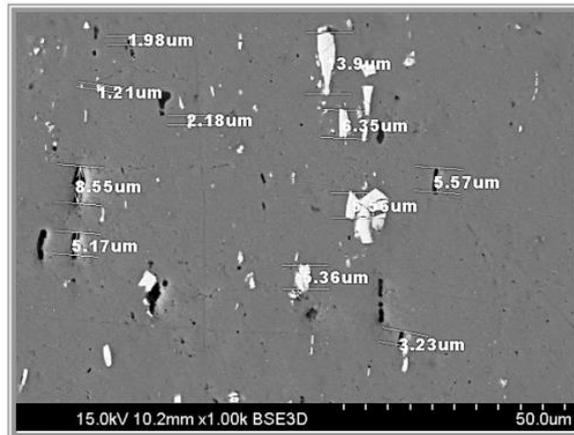


Figura 4.15: Zona A al SEM

Tabella 4.3: Analisi semiquantitativa zona B

Zona B		
Element Line	Net Count	Weight %
C K	968	1.77
O K	2655	1.92
Mg K	22697	2.94
Al K	688519	92.43
Si K	0	0.00
Ti K	106	0.05
Cr K	167	0.10
Mn K	182	0.14
Fe K	372	0.33
Cu K	0	0.00
Zn K	120	0.31
Total		100.00

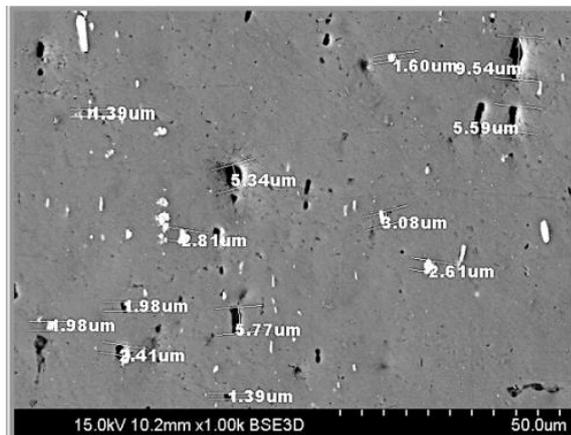


Figura 4.16: Zona B al SEM

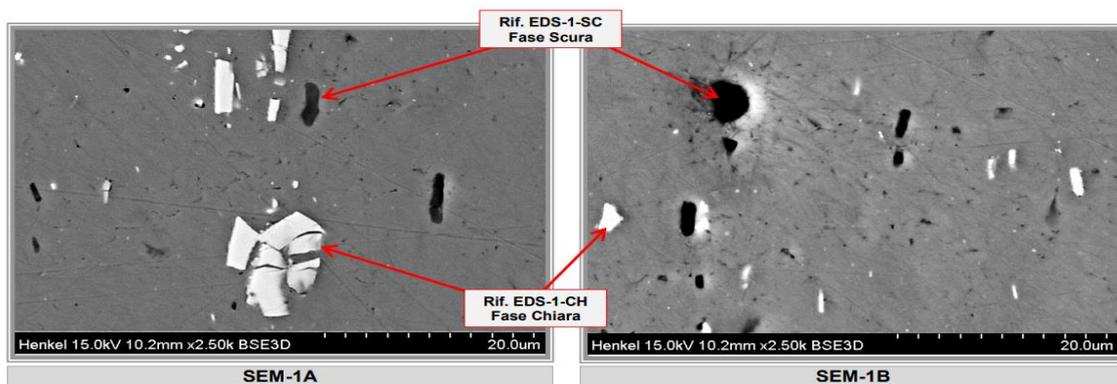


Figura 4.17: Osservazione fase chiara e fase scura al SEM

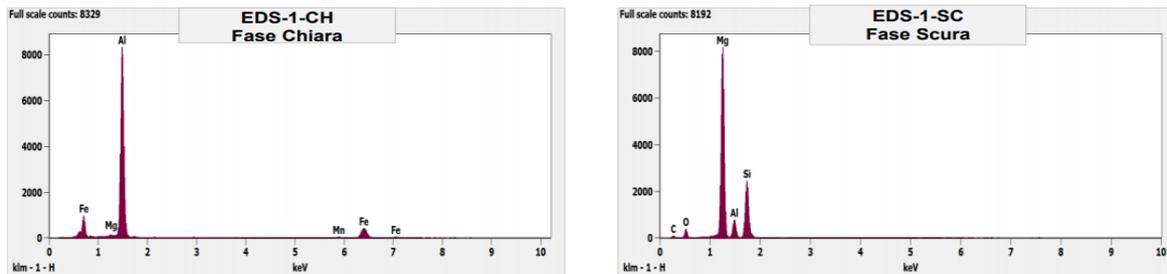


Figura 4.18: Analisi EDS per la fase chiara e per la fase scura

Tabella 4.4 Analisi semiquantitativa per la fase chiara e per la fase scura

Fase CHIARA					
Element Line	Weight %				
C K	1.62	1.25	1.50	2.34	1.67
O K	1.28	1.72	0.89	1.05	0.83
Mg K	1.03	1.91	1.50	0.39	1.04
Al K	67.3	78.3	73.0	62.3	65.6
Si K	0.27	0.00	0.31	0.22	0.40
Ti K	0.00	0.12	0.00	0.00	0.04
Cr K	0.13	0.23	0.34	0.35	0.29
Mn K	2.23	1.51	1.70	2.78	2.53
Fe K	25.8	14.9	20.5	30.6	27.3
Cu K	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00
Zn K	0.32	0.00	0.00	0.00	0.28
Rapporto Fe/Mn	11.5	9.9	12.0	11.0	10.8

Fase SCURA					
Element Line	Weight %				
C K	1.42	3.08	2.26	2.07	6.04
O K	5.37	6.46	11.1	8.61	9.23
Mg K	41.8	17.1	16.6	28.0	48.1
Al K	36.0	63.1	57.8	50.3	8.06
Si K	15.1	9.84	11.8	10.4	27.6
Ti K	0.03	0.00	0.00	0.11	0.15
Cr K	0.06	0.00	0.09	0.22	0.06
Mn K	0.21	0.27	0.00	0.03	0.06
Fe K	0.00	0.13	0.00	0.18	0.00
Cu K	0.00	0.00	0.45	0.00	0.74
Zn K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Rapporto Mg/Si	2.7	1.7	1.4	2.7	1.7

Una volta analizzata la microstruttura l'immagine di Figura 4.7 è stata utilizzata per confrontare la grandezza dei grani della matrice con la dimensione delle impronte eseguite durante la prova di microdurezza Vickers.

La misura di durezza, ottenuta dalla misurazione dell'impronta, risulta veritiera soltanto quando l'impronta ricopre una porzione di superficie statisticamente rappresentativa della metallografia, cioè quando comprende una quantità sufficiente di matrice e di intermetallici. L'impronta risulta avere queste caratteristiche quando la sua superficie ricopre, almeno in parte, cinque grani differenti.

L'analisi è stata condotta eseguendo otto impronte a otto diversi carichi su uno dei provini utilizzato per l'esecuzione delle mappe di microdurezza. Per ognuna delle impronte sono state misurate le diagonali e un'impronta equivalente a quella eseguita è stata rappresentata sulle immagini della Figura 4.7 al fine di osservare la quantità di grani ricoperta da ogni impronta.

In Figura 4.19 vengono rappresentate le impronte per ciascun carico. Per il carico di 0,2 kgf, utilizzato per l'esecuzione delle mappature di microdurezza, l'impronta riesce a ricoprire un numero di grani medio maggiore di cinque, ne consegue che il suo utilizzo risulta giustificato.

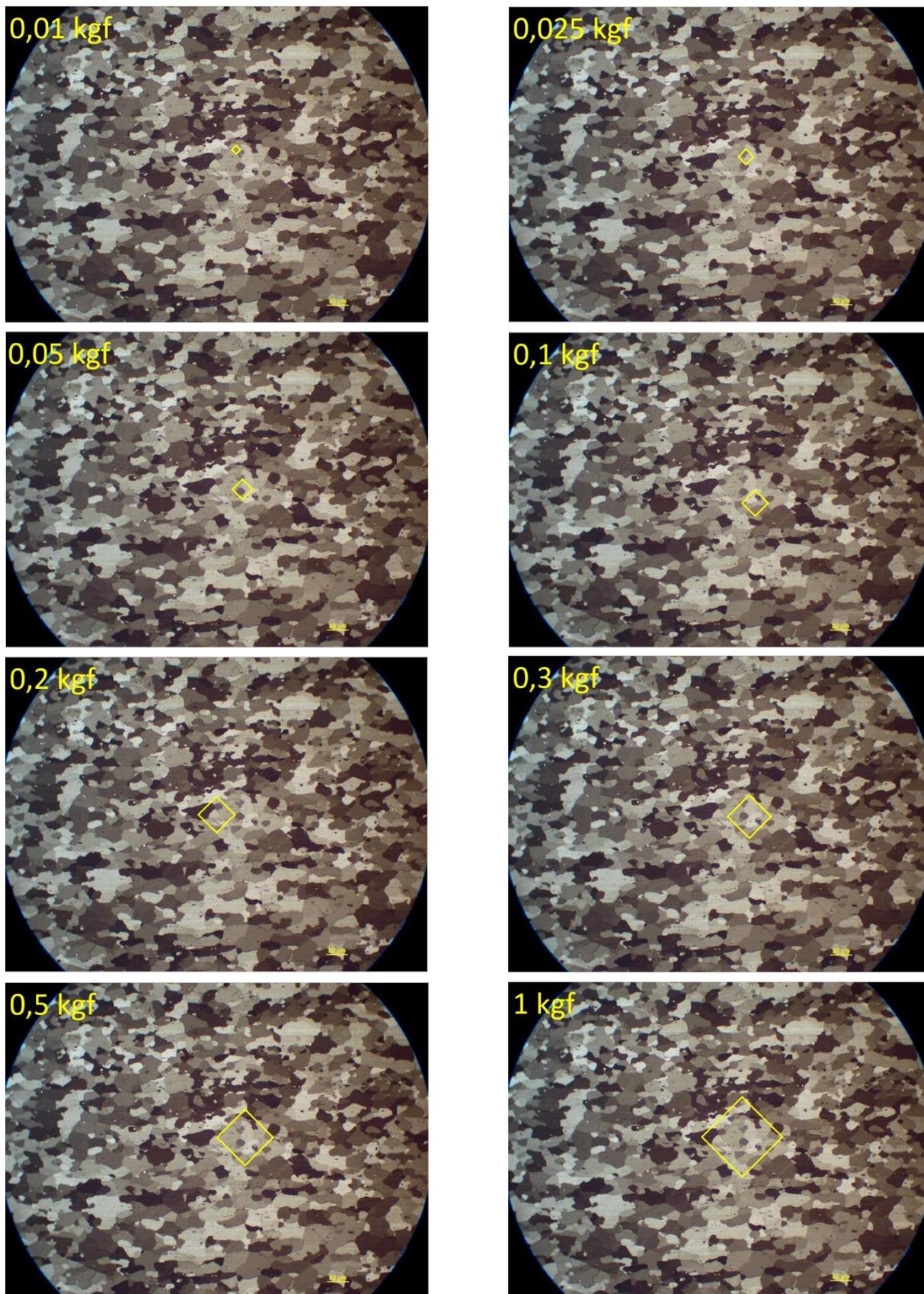


Figura 4.19: Rappresentazione impronte a diversi carichi sulla microstruttura al centro del provino

4.3 Caratterizzazione superficie tranciata

4.3.1 Microscopio interferometrico a scansione

La superficie di tranciatura del disco, op 10, è stata analizzata utilizzando il microscopio interferometrico a scansione presente nel Laboratorio di Caratterizzazione delle Superfici Tecnologiche del Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione del Politecnico di Torino.

La prima operazione è stata dunque l'acquisizione tramite l'utilizzo dello strumento, come rappresentato in Figura 4.20.



Figura 4.20: Acquisizione superficie di tranciatura

La procedura e i parametri che vengono utilizzati per caratterizzare la superficie sono contenuti nella norma GPS ISO 25178-2 [23].

Alla superficie acquisita dallo strumento sono stati applicati due operatori aventi la funzione di filtro.

Gli operatori disponibili vengono elencati e riportati in Figura 4.21

- S-filter: filtro di superficie che rimuove componenti laterali di piccola scala dalla superficie ricavando la superficie primaria
- L-filter: filtro di superficie che rimuove componenti laterali di larga scala dalla superficie primaria o dalla superficie S-F
- F-operation: operazione che rimuove la forma dalla superficie primaria

Applicando gli operatori elencati alla superficie primaria posso ottenere:

- S-F surface: superficie derivata dalla superficie primaria tramite l'operazione di rimozione della forma che si ottiene usando F-operation
- S-L surface: superficie derivata dalla S-F surface tramite la rimozione dei componenti di larga scala tramite l'utilizzo di L-filter

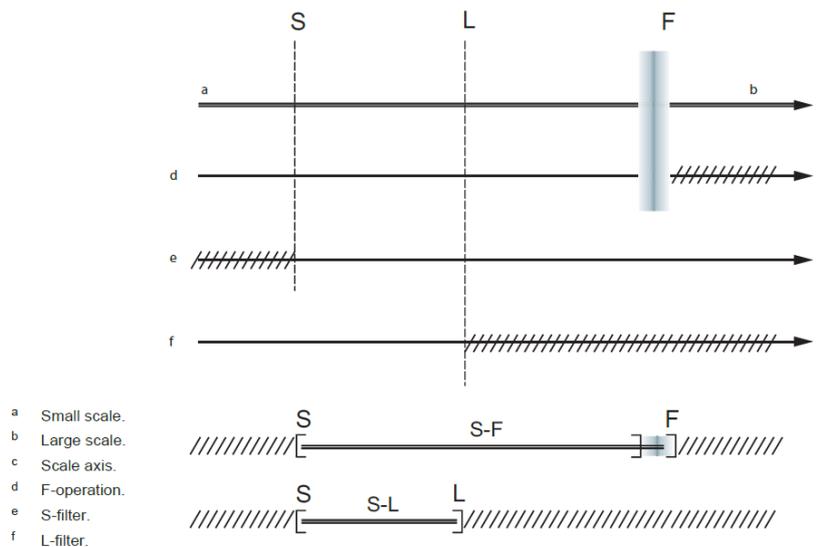


Figura 4.21: Relazione tra S-filter, L-filter, F-operation, S-F surface, S-L surface

Nel caso in esame alla superficie acquisita sono stati applicati S-filter e L-filter, è stata così ricavata la superficie S-L.

Dalla superficie sono poi stati ricavati una serie di parametri che vengono di seguito riportati:

Parametri di altezza:

- Sp: altezza del picco massimo all'interno di un'area definita
- Sv: profondità della buca più profonda all'interno di un'area definita
- Sz: altezza massima della superficie, somma dell'altezza del picco massimo e dell'altezza della gola più profonda all'interno di un'area definita
- Sa: altezza media aritmetica, media aritmetica dei valori assoluti delle ordinate all'interno di un'area definita

Parametri funzionali:

- Sk: distanza tra il livello più basso e il più alto della superficie centrale, tale superficie viene ricavata dalla superficie S-L escludendo i picchi e le buche sporgenti rispetto al centro della superficie. (Figura 4.22)

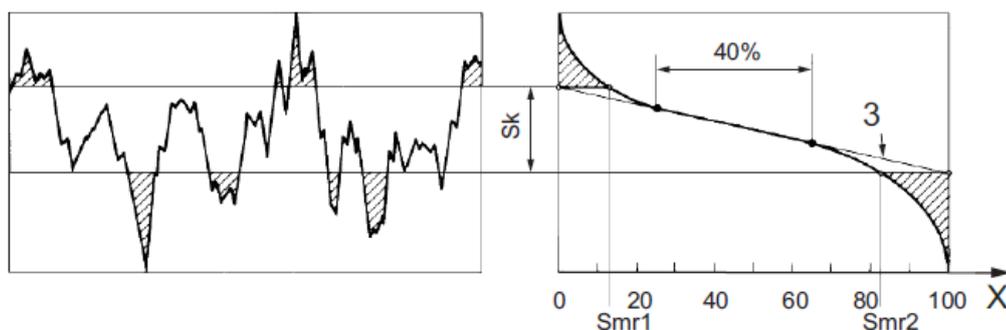


Figura 4.22: Rappresentazione grafica dei parametri Sk, Smr1, Smr2

- Spk: altezza ridotta dei picchi, altezza media dei picchi sporgenti al di sopra della superficie centrale
- Svk: altezza ridotta delle gole, profondità media delle buche sporgenti al di sotto della superficie centrale
- Smr1: percentuale di materiale in corrispondenza della linea di intersezione che separa i picchi più sporgenti dalla superficie a cuore per l'area in esame.
- Smr2: percentuale di materiale in corrispondenza della linea di intersezione che separa le gole più sporgenti dalla superficie a cuore per l'area in esame.

Vengono ora riportate le immagini rappresentati la procedura eseguita e le tabelle con i parametri per la superficie in esame.

In Figura 4.23 viene rappresentata la superficie estratta.

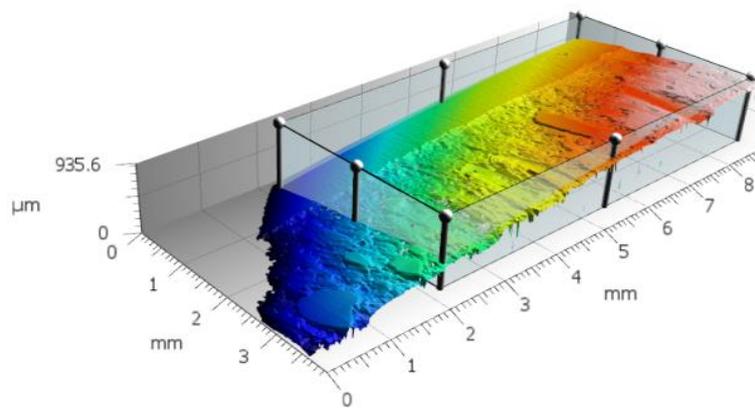


Figura 4.23: Vista 3D della superficie di tranciatura

Successivamente la superficie è stata opportunamente ritagliata (Figura 4.24) e suddivisa nelle due parti principali che la compongono: la superficie lucida e la superficie di strappo

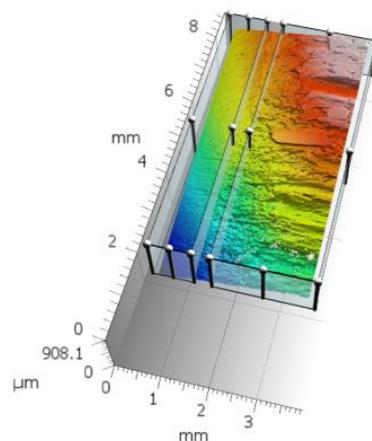


Figura 4.24: Suddivisione nella zona liscia e nella zona di strappo per la superficie acquisita

Superficie lucida:

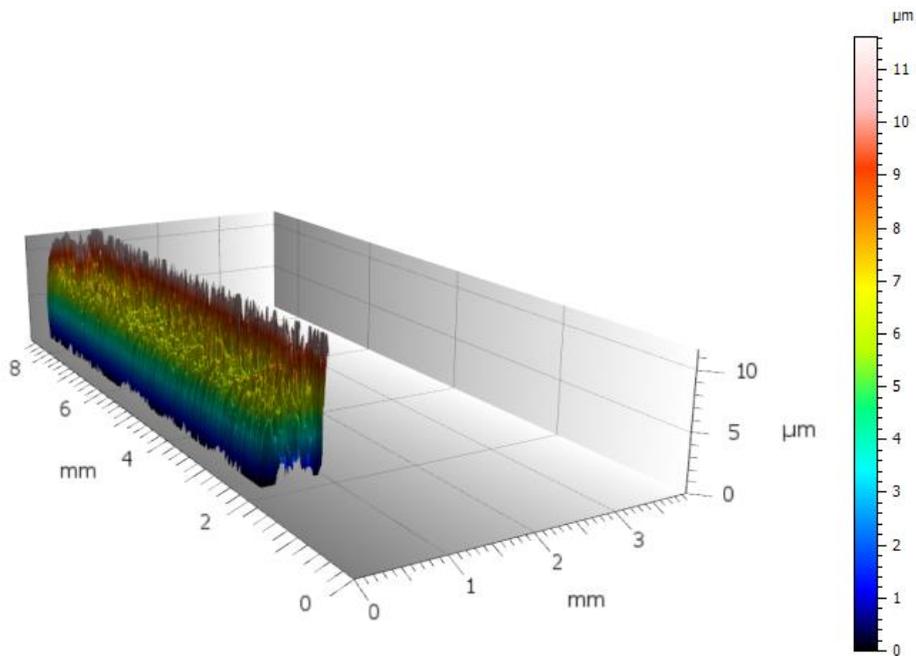


Figura 4.25: Superficie liscia

Tabella 4.5: Parametri per la superficie lucida

ISO 25178 - Rugosità (S-L)			
Parametri di altezza			
Sp	5.899	µm	
Sv	5.718	µm	
Sz	11.62	µm	
Sa	1.292	µm	
Parametri funzionali (superfici stratificate)			
Sk	2.871	µm	
Spk	2.976	µm	
Svk	2.983	µm	
Smr1	14.58	%	
Smr2	83.96	%	

Superficie di strappo:

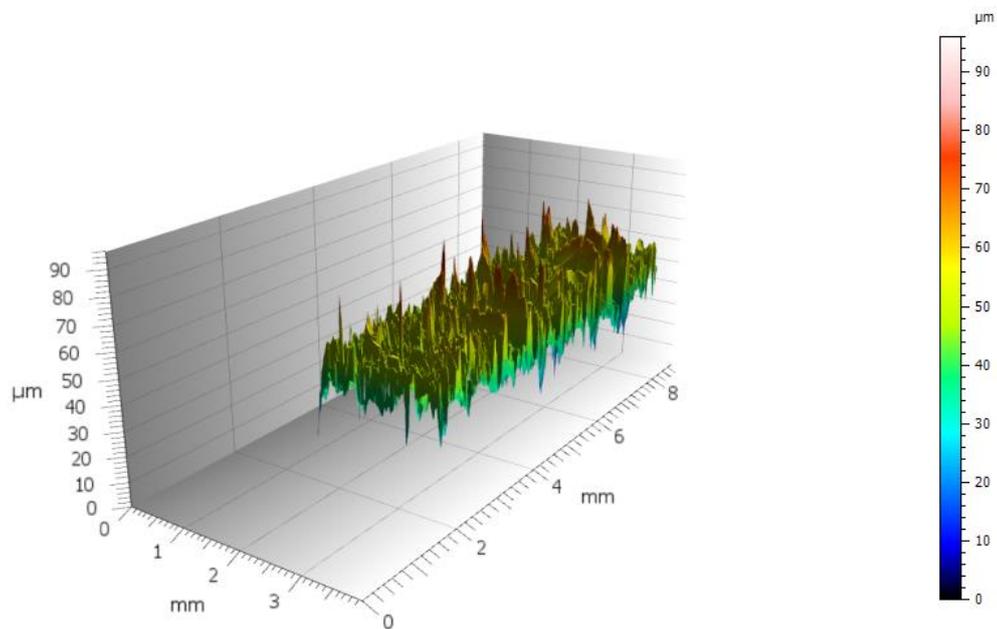


Figura 4.26: Superficie di strappo

Tabella 4.6: Parametri per la superficie di strappo

ISO 25178 - Rugosità (S-L)			
Parametri di altezza			
Sp	50.69	μm	
Sv	45.35	μm	
Sz	96.04	μm	
Sa	5.733	μm	
Parametri funzionali (superfici stratificate)			
Sk	18.34	μm	
Spk	8.277	μm	
Svk	6.971	μm	
Smr1	10.19	%	
Smr2	91.08	%	

4.3.2 Profilometria a contatto

A differenza di quanto eseguito presso il Politecnico di Torino, in azienda l'analisi della superficie di tranciatura è stata eseguita utilizzando il profilometro a contatto (Figura 4.27). Tramite questa tecnica non è stato possibile acquisire un'intera superficie ma soltanto un profilo. In ogni caso i parametri che sono stati valutati utilizzando il microscopio interferometrico a scansione possono essere acquisiti ugualmente attraverso l'utilizzo del profilometro a contatto.



Figura 4.27: Acquisizione del profilo sulla superficie di tranciatura

Il profilo ottenuto viene riportato in Figura 4.28.

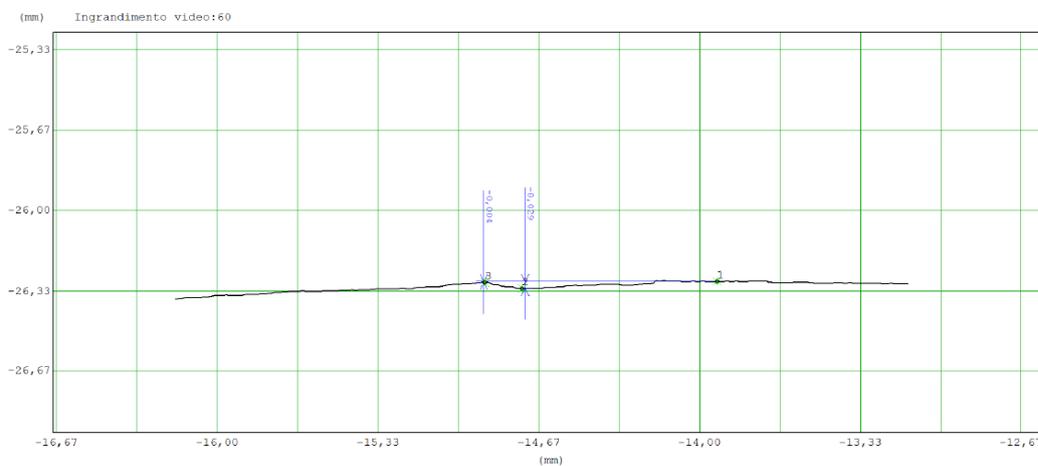


Figura 4.28: Profilo di tranciatura con riferimento alla superficie da cui viene ricavato

Analizzando la Figura 4.28 da sinistra verso destra, la prima parte del profilo fino al punto indicato con il numero 1 è la zona di frattura/rottura, di seguito vi è invece il profilo della superficie liscia.

Con lo stesso strumento sono stati inoltre misurati i parametri di rugosità con riferimento alle normative GPS ISO 4287 [24], GPS ISO 3274 [25] e GPS ISO 13565-2 [26]. I parametri sono: Ra, Rz, Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2. Il significato dei parametri elencati è lo stesso di quelli illustrati per il microscopio interferometrico a scansione, unica differenza è che in questo caso i valori vengono valutati all'interno di una lunghezza e non di una superficie come avveniva precedentemente.

Rugosità zona liscia:

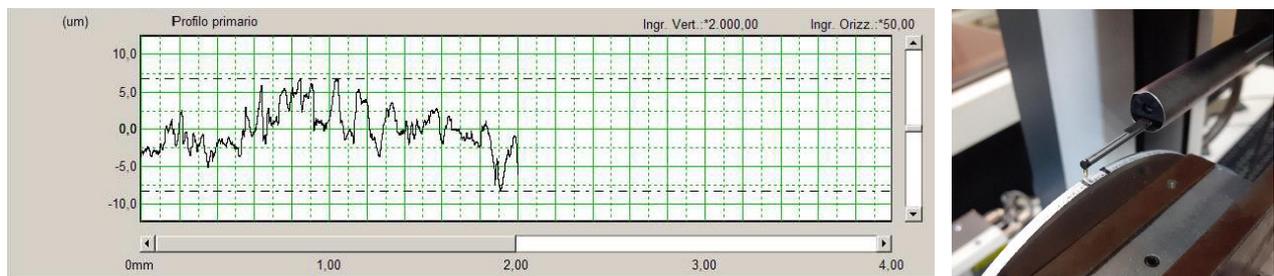


Figura 4.29: Profilo di rugosità della zona liscia e profilometro durante l'acquisizione

Tabella 3.7: Parametri di rugosità della superficie liscia

Ra	1,528	μm
Rz	8,810	μm
Rk	4,315	μm
Rpk	1,663	μm
Rvk	1,733	μm
Mr1	19,380	%
Mr2	90,438	%

Rugosità zona di frattura/rottura:

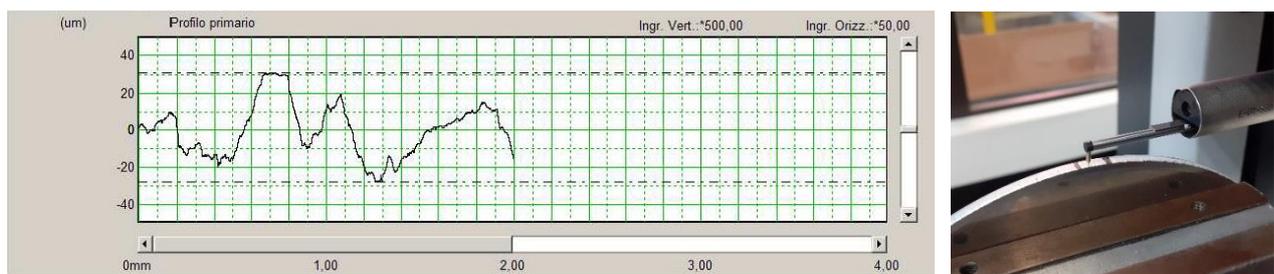


Figura 4.30: Profilo di rugosità della zona di frattura e profilometro durante l'acquisizione

Tabella 4.8: Parametri rugosità superficie di strappo

Ra	8,136	μm
Rz	37,300	μm
Rk	28,645	μm
Rpk	3,679	μm
Rvk	4,799	μm
Mr1	8,911	%
Mr2	92,398	%

In conclusione i dati ottenuti utilizzando la profilometria a contatto non si scostano molto da quelli ricavati utilizzando microscopio interferometrico a scansione. Ragionevolmente si ritrova una differenza maggiore per i valori acquisiti sulla zona di rottura/frattura, in particolare per il valore di Rz. Questo è giustificato dal fatto che analizzando una superficie rispetto ad un profilo la quantità di dati acquisiti è molto maggiore, ne consegue un valore di Rz maggiore nel caso di acquisizione della superficie.

4.4 Mappe di durezza

4.4.1 Taratura accreditata (IATF)

L'operazione di taratura accreditata [27] è stata eseguita da un ente certificato Accredia.

Tale ente attesta le capacità di misura e di taratura, le competenze metrologiche del Centro e la riferibilità delle tarature eseguite ai campioni nazionali e internazionali delle unità di misura del Sistema Internazionale delle Unità (SI).

Le norme di riferimento per l'operazione sono: ASTM E92-17 [28] e la UNI EN ISO 6507-2:2018 [29].

L'operazione di taratura prevede l'utilizzo di placchette di durezza con valore nominale, l'ente di provenienza delle placchette è la DKD. A titolo esemplificativo in Figura 4.31 viene riportata una delle placchette utilizzate durante l'operazione.



Figura 4.31: Placchetta di durezza

Seguendo le norme di riferimento, per eseguire la taratura è necessario eseguire cinque impronte su ciascuna placchetta.

Nel caso in cui si esaminino una sola scala di durezza Vickers, le placchette da considerare sono tre: una di durezza bassa, una media e una alta.

Diversamente nel caso in cui vengano analizzate due scale di durezza Vickers, la normativa prevede che vengano considerate due placchette per ogni scala.

Durante l'operazione di taratura eseguita in laboratorio, sono state due le scale esaminate: la scala HV0,3 e la HV1. La scelta delle placchette è stata di conseguenza effettuata nel seguente modo:

- Per la scala HV0,3 è stata utilizzata una placchetta con durezza bassa e una con durezza media, i valori nominali delle due durezza sono 206 HV e 427 HV
- Per la scala HV1 è stata utilizzata una placchetta con durezza media e uno con durezza alta, i valori nominali delle due durezza sono 435 HV e 750 HV

Gli altri carichi non sono stati oggetto di questa taratura in quanto l'operazione era già stata effettuata pochi mesi prima.

Sono state dunque eseguite le impronte su ciascuna placchetta (Figura 4.32), misurate le diagonali e calcolata le durezza. Rapportando i valori misurati con il microdurometro ai valori nominali delle placchette sono stati valutati l'errore percentuale, la ripetibilità e l'incertezza. A seconda dei risultati ottenuti lo strumento risulterà conforme o non conforme.

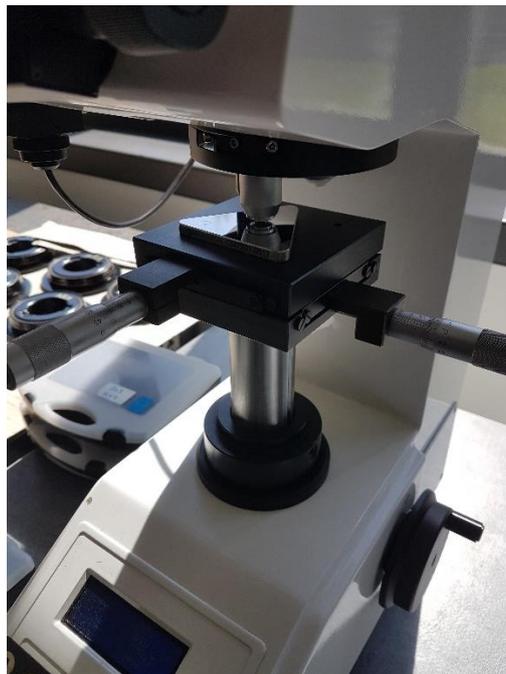


Figura 4.32: Esecuzione impronte

Certificato di taratura

Incertezza di misura

Le incertezze di misura dichiarate nel certificato di taratura sono state determinate riferendosi alla Guida ISO/IEC 98 [30] e al documento EA-4/02 [31]. Di solito vengono espresse come incertezza estesa che si ricava moltiplicando l'incertezza tipo per il fattore di copertura k corrispondente ad un livello di fiducia di circa il 95%. Normalmente tale fattore k vale 2.

Condizioni di prova

Durante l'esame generale è stato indicato che non sono state ritrovate anomalie che possano pregiudicare il buon funzionamento della macchina stessa, in accordo alle prescrizioni indicate nel paragrafo relativo alla procedura di prova delle norme di riferimento.

La taratura è riferita solamente alla verifica della macchina e non è riferita al penetratore.

Risultati

In Tabella 4.9 e Tabella 4.10 vengono riportati i risultati dell'operazione di taratura:

Tabella 4.9. Risultati di taratura per la scala HV 0.3

SCALA HV 0.3									
Blocchetto di Riferimento [HV]	1a	2a	Lettura 3a [HV]	4a	5a	Lettura Media [HV]	Errore [%]	Ripetibilità [%]	Incertezza [HV]
206.0	201.8	205.7	203.8	201.8	205.7	203.78	-1.09	0.96	13.95
427	429.3	424.5	422.2	424.5	426.9	425.47	-0.36	0.83	31.12

Tabella 4.10. Risultati di taratura per la scala HV 1

SCALA HV 1									
Blocchetto di Riferimento [HV]	1a	2a	Lettura 3a [HV]	4a	5a	Lettura Media [HV]	Errore [%]	Ripetibilità [%]	Incertezza [HV]
435.0	419.3	422.5	420.6	416.2	418.1	419.3	-3.74	0.75	4.79
750.0	727.1	718.6	725.7	727.1	724.3	724.6	-3.51	0.59	11.12

Secondo la norma UNI EN ISO 6507/2-18-5 il risultato finale è di conformità.

4.4.2 Definizione delle mappe di microdurezza

Vengono ora illustrati i passaggi che hanno portato alla generazione delle mappe di microdurezza.

In primo luogo sono stati ricavati i provini. Per questa operazione si è partiti dal disco iniziale e, tramite l'utilizzo della troncattrice, sono stati estratti tre elementi dal disco come rappresentato in Figura 4.33.

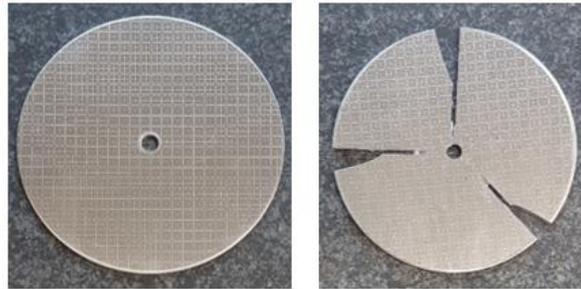


Figura 4.33: Disco prima e dopo l'estrazione dei campioni

I campioni sono stati estratti nel modo indicato nella Figura 4.33 per due motivi principali, di seguito illustrati.

La superficie sulla quale devono essere eseguite le mappature di microdurezza è quella interna al disco, indicata in Figura 4.34.

Lo studio che si vuole eseguire riguarda la zona di tranciatura, ne consegue che essendo il diametro esterno del disco caratterizzato da tale operazione (Figura 4.34), i provini siano stati ricavati in prossimità del diametro esterno.



Figura 4.34: Indicazione delle Superfici

Una volta ricavati gli elementi necessari, questi sono stati inglobati e lucidati in modo che la superficie visibile sul provino fosse quella da analizzare con le mappe di microdurezza.

A questo punto è stato quindi possibile eseguire le mappature.

In Figura 4.35 viene riportato un campione sul quale è stata eseguita una delle mappe. I riferimenti indicati risulteranno utili per l'interpretazione delle mappe che verranno riportate nelle sezioni successive. Il lato superiore del campione è quello in corrispondenza della superficie di tranciatura; osservando questo lato in Figura 4.35 (b) si possono facilmente riconoscere le quattro zone tipiche del processo di tranciatura

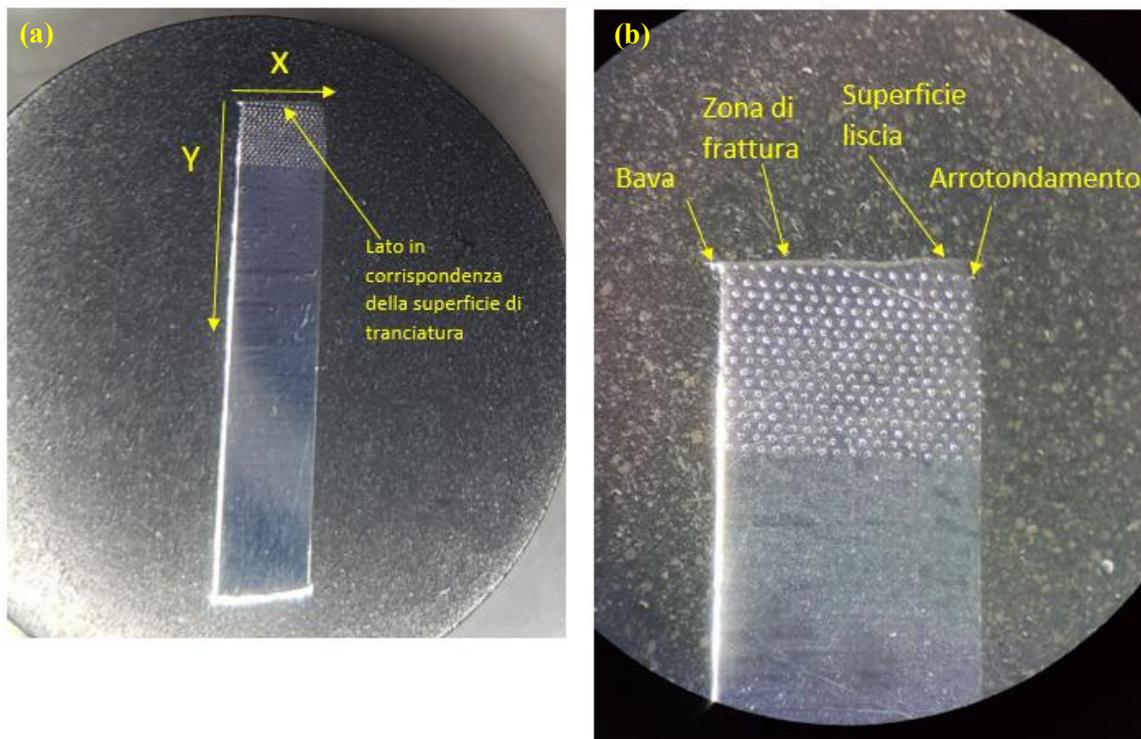


Figura 4.35: (a) riferimenti; (b) zone caratteristiche del processo di tranciatura

In totale sono state nove le mappe di microdurezza generate, per ognuna è stato utilizzato il sistema di riferimento indicato in Figura 4.35 (a).

Una volta ottenuta la superficie e definito il sistema di riferimento, sono stati definiti il carico da utilizzare e la distanza da mantenere tra un'impronta e la successiva. Il carico scelto è pari a 0,2 kgf mentre la distanza tra le impronte è stata definita con la seguente procedura: un'impronta di riferimento è stata eseguita su di un provino ad una distanza tale dalla superficie di tranciatura che permettesse di non esserne influenzata, di questa sono state calcolate le diagonali, il valore medio tra le due è stato calcolato e assunto come diagonale di riferimento. La distanza tra le impronte è stata infine definita pari a tre volte il valore della diagonale di riferimento per i primi tre provini, pari a sei volte il valore della diagonale di riferimento per i secondi tre provini e pari a nove volte il valore della diagonale di riferimento per gli ultimi tre provini.

Per semplicità d'ora in avanti le mappe verranno identificate nei seguenti modi:

- Mappe in cui la distanza tra le impronte è pari a tre volte il valore della diagonale di riferimento verranno definite 3d
- Mappe in cui la distanza tra le impronte è pari a sei volte il valore della diagonale di riferimento verranno definite 6d
- Mappe in cui la distanza tra le impronte è pari a nove volte il valore della diagonale di riferimento verranno definite 9d

Le tre tipologie di mappe visionate utilizzando lo Stereo Microscopio vengono rappresentate in Figura 4.36 utilizzando tre diversi campioni.

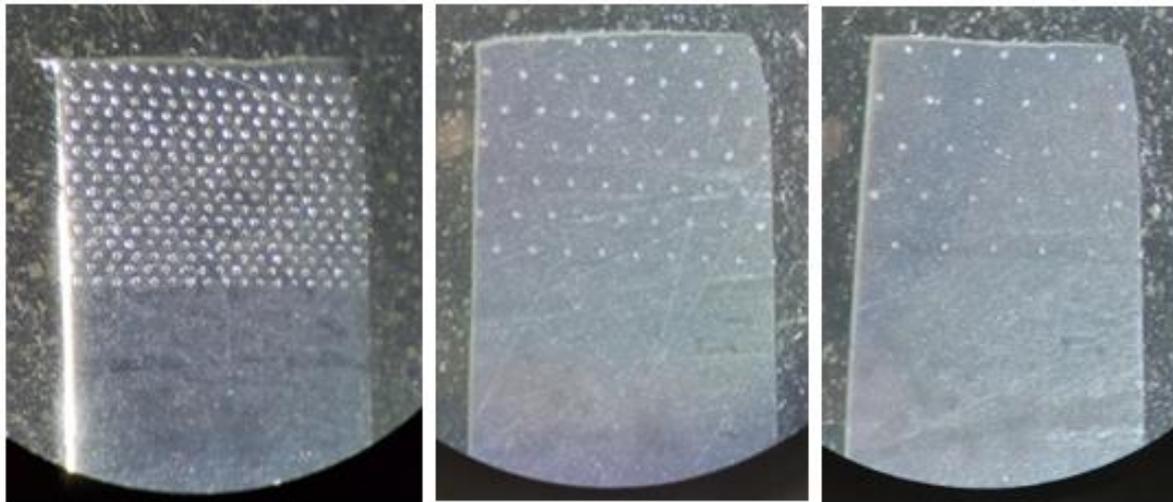


Figura 4.36: Partendo da sinistra verso destra, esempi di mappe per la tipologia 3d, 6d, 9d

Le mappe eseguite e riportate in Figura 4.36 sono state generate seguendo uno tra i criteri 3d, 6d, 9d. Per ognuna di queste tre tipologie la disposizione delle impronte ha seguito la logica rappresentata in Figura 4.37, impronte nere. Successivamente le mappe di durezza generate sono state infittite con valori fittizi (Figura 4.37, impronte rosse). Tali valori si ricavano eseguendo la media tra i valori di durezza di due impronte reali adiacenti.

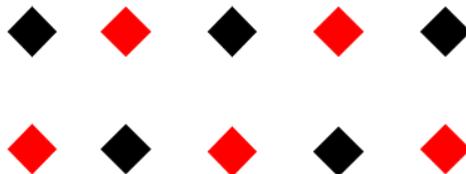


Figura 4.37: Disposizione impronte, le impronte nere sono quelle reali eseguite al microdurometro, le impronte rosse rappresentano valori fittizi

4.4.3 Mappatura zona tranciatura

Le mappe di durezza sono state eseguite seguendo la procedura descritta nella sezione 4.4.2 e seguendo la UNI EN ISO 6507-1:2018. Vengono ora riportati i risultati di durezza ottenuti.

Per ogni tipologia di mappa la quantità di superficie analizzata è stata all'incirca la stessa: 4 mm in direzione X e 3 mm in direzione Y.

Come si può vedere dai risultati riportati nelle Tabelle da 4.11 a 4.19 l'operazione di tranciatura altera sensibilmente i valori di durezza vicini alla superficie tranciata, al contrario proseguendo nel verso delle Y crescenti, le misure ne risultano sempre meno affette. In queste zone, dove l'operazione di tranciatura ha una piccola influenza, si può notare un andamento ben definito delle misurazioni: valori di durezza minori nel centro dello spessore del disco e valori maggiori in corrispondenza delle superfici del disco.

I valori delle diagonali in direzione X e in direzione Y hanno un andamento speculare a quello delle durezza, nei punti in cui i valori di durezza sono minori, i valori delle diagonali sono maggiori mentre nei punti in cui la durezza è maggiore, i valori delle diagonali sono minori. Ne consegue che per la zona che risente meno dell'operazione di tranciatura avremo dimensioni delle impronte maggiori nel centro del provino e minori in corrispondenza della superficie del disco. In Figura 4.38 vengono riportati esempi di impronta per questi tre casi, osservati utilizzando il microscopio ottico.

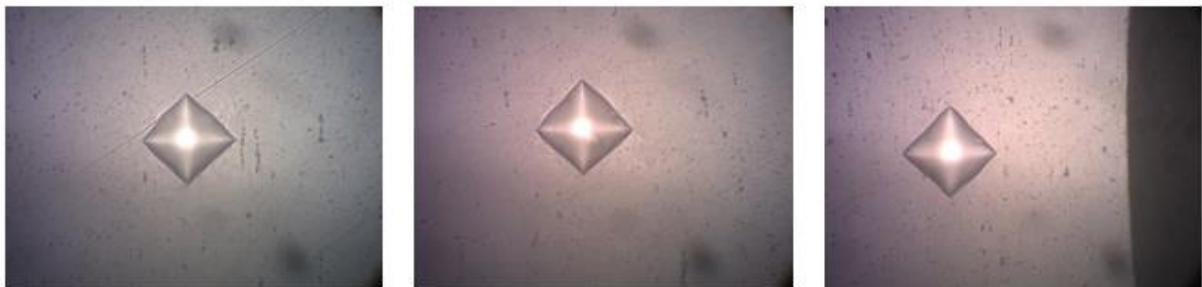


Figura 4.38: Procedendo da sinistra verso destra, esempio di impronte eseguite sul lato sinistro, al centro e sul lato destro del provino

Tabella 4.11. Prima mappa di durezza per la tipologia 3d, valori di durezza in Mpa, X e Y in mm

X→/Y↓ [mm]	0,000	0,080	0,234	0,314	0,468	0,548	0,702	0,782	0,936	1,016	1,170	1,250	1,404	1,484	1,638	1,718	1,872	1,952	2,106	2,186	2,340	2,420	2,574	2,654	2,808	2,888	3,042	3,122	3,276	3,356	3,510	3,590	3,744	3,824	3,978		
0,000			89,1	89,1	89,5	89,8	89,8	89,8	90,0	90,2	90,2	90,2	89,0	87,8	85,8	83,9	83,6	83,2	81,8	80,5	81,6	82,6	82,0	81,4	82,3	83,2	81,4	79,6	80,2	80,8	75,0	69,1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		
0,234	#DIV/0!	#DIV/0!	70,6	74,7	78,8	79,2	79,6	79,5	79,3	78,9	78,5	79,6	80,8	79,5	78,2	77,3	76,5	77,8	79,0	78,0	77,1	77,5	77,9	78,8	79,6	79,0	78,5	78,0	77,6	75,1	72,5	68,5	64,4	#DIV/0!	#DIV/0!		
0,399		#DIV/0!	68,2	68,2	70,9	73,6	75,5	77,3	76,6	76,0	76,6	77,3	76,5	75,7	75,8	76,0	74,6	73,3	74,4	75,4	75,6	75,7	76,5	77,3	76,2	75,2	75,3	75,4	75,3	75,2	71,2	67,3	68,6	69,8			
0,565	#DIV/0!	#DIV/0!	65,9	67,3	68,7	70,3	72,0	72,9	73,8	72,6	71,3	72,2	73,1	72,8	72,5	72,5	72,5	71,9	71,3	73,2	75,2	74,4	73,6	74,0	74,4	73,3	72,3	72,3	72,3	69,7	67,0	67,3	67,5	69,7	#DIV/0!		
0,730		#DIV/0!	65,7	65,7	66,4	67,0	66,6	66,2	65,9	65,7	67,4	69,1	69,1	69,1	69,4	69,6	69,5	69,4	70,6	71,8	71,3	70,8	71,0	71,3	70,8	71,0	71,3	70,1	69,8	69,1	68,4	67,1	65,7	67,7	69,6		
0,896	#DIV/0!	#DIV/0!	65,5	66,2	66,8	66,8	66,8	66,8	65,4	64,0	64,3	64,6	66,5	68,4	68,8	69,1	66,5	68,8	65,2	66,6	66,3	65,9	68,6	71,3	70,0	68,7	69,5	70,3	69,6	68,9	66,9	64,8	65,6	66,4	68,5	#DIV/0!	
1,061		#DIV/0!	65,5	65,3	66,3	67,3	66,0	64,6	65,3	65,9	64,3	62,8	63,2	63,6	63,0	62,3	65,3	68,2	66,7	65,3	66,7	68,2	67,7	67,3	67,2	67,0	67,2	67,3	66,0	64,6	64,6	64,6	66,1	67,5	64,8		
1,227	#DIV/0!	#DIV/0!	65,5	65,3	65,1	64,6	64,2	62,8	61,4	60,8	60,2	60,5	60,8	61,6	62,3	61,9	61,4	60,7	60,0	62,3	64,6	65,3	65,9	65,8	65,7	65,4	65,1	64,5	64,0	63,6	63,2	65,0	66,8	64,5	62,1		
1,392		#DIV/0!	65,3	66,4	65,5	64,6	62,8	61,0	60,3	59,6	59,3	59,1	58,1	57,2	57,4	57,6	57,8	57,9	58,5	59,1	60,2	61,4	62,2	63,0	63,5	64,0	63,1	62,1	61,2	60,2	61,4	62,6	64,1	65,7	63,7		
1,558	#DIV/0!	#DIV/0!	65,1	63,8	62,6	61,6	60,6	59,2	57,8	58,5	59,2	58,9	58,5	57,3	56,0	54,5	53,3	54,5	55,2	57,5	58,9	59,1	59,2	59,6	60,0	61,2	62,3	62,2	62,1	62,5	62,8	63,1	63,4	64,3	65,3		
1,723		#DIV/0!	62,5	60,6	60,6	60,6	59,6	58,7	58,3	57,9	57,9	57,8	57,2	56,7	56,3	55,8	56,1	56,4	55,5	54,3	55,4	56,5	57,7	58,9	59,2	59,6	59,8	60,0	62,2	64,4	63,3	62,1	63,6	65,1	64,1		
1,889	#DIV/0!	#DIV/0!	60,0	59,7	59,4	59,6	59,8	59,6	59,4	59,0	58,5	58,3	58,1	57,9	57,6	56,3	55,0	54,5	54,0	55,3	56,7	56,6	56,5	56,7	61,4	61,2	61,0	61,4	61,7	61,9	62,1	63,0	63,8	63,4	63,0		
2,054		#DIV/0!	59,8	61,0	60,2	59,4	59,7	60,0	59,5	59,1	59,0	58,9	57,6	56,4	56,0	55,7	54,3	53,0	53,3	53,5	54,8	56,0	56,6	57,2	58,2	59,2	59,8	60,4	60,5	60,6	61,8	63,0	62,7	62,3	62,3		
2,220	#DIV/0!	#DIV/0!	59,6	59,7	59,8	60,8	61,7	60,1	58,5	57,9	57,2	58,5	59,8	57,5	55,2	54,4	53,7	54,8	56,0	56,7	57,4	57,2	57,1	57,8	58,5	59,6	60,8	60,4	60,0	60,0	60,9	61,7	62,3	62,8			
2,385		#DIV/0!	60,7	60,8	60,5	60,2	59,2	58,3	58,8	59,2	59,1	59,1	58,5	57,9	57,2	56,5	55,1	53,7	54,8	55,8	56,5	57,2	57,9	58,5	58,9	59,2	59,1	58,9	59,1	59,4	60,3	61,2	61,3	61,4	61,4		
2,550	#DIV/0!	#DIV/0!	61,7	61,7	61,7	61,5	61,4	61,0	60,6	60,1	59,6	59,0	58,3	57,3	56,4	57,1	57,8	55,4	53,0	55,1	57,2	56,7	56,2	57,7	59,2	60,1	61,0	60,2	59,4	59,8	60,2	61,1	61,9	61,4	60,8		
2,716		#DIV/0!	61,7	61,4	61,0	60,6	60,7	60,8	59,2	57,6	57,6	57,6	56,8	56,0	56,6	56,4	55,7	56,4	55,7	54,4	53,2	54,1	55,0	55,7	56,4	57,3	58,3	58,5	58,7	59,1	59,4	59,2	59,1	59,6	60,2	60,2	

Tabella 4.12. Seconda mappa di durezza per la tipologia 3d, valori di durezza in Mpa, X e Y in mm

X→/Y↓ [mm]	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223	2,340	2,457	2,574	2,691	2,808	2,925	3,042	3,159	3,276	3,393	3,510	3,627	3,744	3,861		
0,234		81,7	83,7	85,8	86,1	86,4	87,5	88,5	88,5	88,5	89,2	89,8	89,3	88,8	89,0	89,1	91,5	93,8	91,1	88,5	88,3	88,1	86,3	84,5	84,0	83,6	84,7	85,8	86,3	86,8	#DIV/0!	#DIV/0!		
0,437	62,8	68,8	74,9	75,8	76,8	78,1	79,3	78,8	78,2	78,8	79,3	77,6	76,0	77,2	78,5	78,8	79,0	81,0	82,9	81,6	80,2	80,1	79,9	80,2	80,5	79,3	78,2	77,2	76,2	71,5	66,8	#DIV/0!		
0,639	63,6	66,8	70,4	70,1	72,2	74,4	74,5	74,6	74,9	75,2	74,5	73,8	75,3	76,8	75,3	73,8	74,2	74,6	76,8	79,0	79,3	79,6	77,9	76,2	76,1	76,0	75,4	74,9	71,8	68,7	65,6	62,6		
0,842	64,4	65,2	65,9	66,5	67,0	68,0	68,9	69,4	69,8	71,1	72,3	72,2	72,0	70,2	68,4	72,1	75,7	74,5	73,3	74,0	74,6	73,8	73,1	73,1	73,1	73,1	73,4	73,8	72,7	71,5	67,8	64,0	65,6	
1,045	65,0	65,5	65,7	66,8	67,0	67,3	68,0	68,7	68,3	68,0	69,0	70,1	69,4	68,7	68,8	68,9	69,0	69,1	69,8	70,6	70,7	70,8	71,0	71,3	70,7	70,1	69,8	69,6	67,5	65,5	67,1	68,7		
1,247	65,5	65,5	65,5	65,3	65,1	65,1	63,4	61,7	63,1	64,4	64,8	65,3	64,1	63,0	64,7	66,4	66,4	66,4	67,6	68,9	68,1	67,3	67,7	68,2	67,5	66,8	66,0	65,3	67,7	66,8	66,8	68,8		
1,450	65,3	63,0	64,0	65,5	64,3	63,2	62,3	61,4	61,4	61,4	61,7	62,1	62,2	62,3	61,9	61,5	62,5	63,4	64,8	66,2	65,5	64,9	66,0	67,0	66,8	66,6	64,7	62,8	63,6	64,4	65,7	67,0		
1,653	65,1	63,8	62,6	62,6	62,3	60,3	58,3	59,6	61,0	60,5	60,0	60,2	60,4	59,4	58,5	60,8	61,3	61,7	63,3	64,8	64,6	64,4	64,8	65,3	65,5	65,7	64,4	63,2	65,1	67,0	66,7			
1,855	63,2	62,6	62,6	59,4	60,0	60,6	60,1	59,6	59,6	60,1	60,6	58,9	57,2	58,1	59,1	58,0	56,9	58,5	60,2	61,4	62,6	63,2	63,8	63,2	62,6	64,0	65,5	65,6	65,7	66,0	66,4			
2,058	61,4	62,0	62,6	62,8	63,0	62,3	61,5	61,8	62,1	61,5	60,8	60,6	59,2	58,8	58,3	57,7	57,1	58,2	59,4	60,6	60,6	61,3	61,9	62,4	62,8	62,5	62,1	63,6	65,1	66,4	67,7	67,7		
2,260	61,5	61,0	62,2	61,9	61,6	61,4	61,9	62,3	61,3	60,2	59,4	58,7	58,0	57,4	56,9	56,4	56,3	56,2	59,0	61,7	60,9	60,0	60,6	61,2	61,7	62,1	63,2	64,2	65,0	65,7	65,7	65,7		
2,463	61,7	61,7	61,7	61,9	62,1	61,7	61,2	60,9	60,6	59,8	59,1	60,5	61,9	59,3	56,7	56,9	57,1	57,3	57,6	58,2	58,9	59,2	59,6	60,2	60,8	61,7	62,6	63,4	64,2	64,0	63,8	64,0		
2,666	61,8	61,4	61,4	63,4	61,9	60,4	60,9	61,4	60,4	59,4	59,1	58,9	57,8	56,7	57,2	57,8	58,0	58,3	58,5	58,7	59,3	60,0	60,6	61,2	61,4	61,5	62,1	62,6	63,3	64,0	63,2	62,3		
2,868	61,9	61,5	61,0	61,4	61,7	61,2	60,6	61,3	61,9	60,3	58,7	59,1	59,4	58,2	57,1	57,3	57,6	58,0	58,5	59,2	60,0	60,5	61,0	61,3	61,5	61,7	61,9	62,1	62,3	63,3	64,2	63,3		

Tabella 4.13. Terza mappa di durezza per la tipologia 3d, valori di durezza in Mpa, X e Y in mm

X→/Y↓ [mm]	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223</
------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	---------

Tabella 4.14. Prima mappa di durezza per la tipologia 6d, valori di durezza in Mpa, X e Y in mm

X→/Y↓ [mm]	0,234	0,468	0,702	0,936	1,170	1,404	1,638	1,872	2,106	2,340	2,574	2,808	3,042	3,276	3,510	3,744	3,978
0,234		#DIV/0!	#DIV/0!	93,8	94,8	95,7	94,4	93,1	90,8	88,5	85,1	81,7	80,5	79,3	79,3		#DIV/0!
0,702	65,5	68,5	71,5	73,2	74,9	75,0	75,2	74,5	73,8	73,3	72,8	72,7	72,5	70,0	67,5	#DIV/0!	#DIV/0!
1,170	65,3	65,9	66,5	65,1	65,9	66,8	66,6	66,4	66,9	67,5	67,2	66,8	67,0	67,3	66,2	65,1	#DIV/0!
1,638	65,1	63,3	61,5	60,1	58,7	59,1	59,6	60,5	61,4	61,5	61,7	64,4	67,0	65,4	63,8	64,5	65,3
2,106	62,1	60,4	60,8	60,0	58,7	57,4	56,8	56,2	56,4	56,7	59,1	61,5	61,3	61,0	62,3	63,6	65,2
2,574	59,1	59,5	60,0	59,2	58,5	57,5	56,5	56,0	55,5	56,9	58,3	58,5	58,7	60,1	61,5	63,3	65,1
3,042	60,3	61,5	61,0	60,4	58,5	56,5	56,2	55,8	54,7	53,5	55,2	56,9	58,4	60,0	61,3	62,6	63,8

Tabella 4.15. Seconda mappa di durezza per la tipologia 6d, valori di durezza in Mpa, X e Y in mm

X→/Y↓ [mm]	0,234	0,468	0,702	0,936	1,170	1,404	1,638	1,872	2,106	2,340	2,574	2,808	3,042	3,276	3,510	3,744
0,234			93,8	93,8	92,0	90,2	90,5	90,9	89,2	87,4	84,6	81,7	81,9	82,0	#DIV/0!	#DIV/0!
0,639	68,2	71,3	74,4	73,8	73,3	73,8	74,4	74,0	73,6	74,8	76,0	75,0	74,1	70,7	67,3	#DIV/0!
1,045	67,1	65,5	68,6	67,3	67,3	67,3	66,9	66,6	67,6	68,7	68,9	69,1	68,7	68,2	68,3	68,4
1,450	65,9	64,3	62,8	61,1	59,4	60,5	61,5	61,6	61,7	63,2	64,6	65,7	66,8	65,9	65,1	66,8
1,855	63,4	61,0	61,9	59,1	58,6	58,1	56,8	55,5	56,9	58,3	59,8	61,4	62,4	63,4	64,3	65,3
2,260	61,0	61,0	61,0	59,5	58,1	58,0	57,9	56,8	55,7	57,3	58,9	59,7	60,6	61,6	62,6	65,1
2,666	61,2	60,2	60,8	59,2	59,2	59,2	57,5	55,7	56,4	57,2	58,5	59,8	60,6	61,4	63,1	64,8
3,071	61,4	61,0	60,6	59,9	59,2	58,6	57,9	58,3	58,7	58,8	58,9	59,8	60,8	60,9	61,0	62,9

Tabella 4.16. Terza mappa di durezza per la tipologia 6d, valori di durezza in Mpa, X e Y in mm

X→/Y↓ [mm]	0,234	0,468	0,702	0,936	1,170	1,404	1,638	1,872	2,106	2,340	2,574	2,808	3,042	3,276	3,510	3,744
0,234			86,4	86,4	85,6	84,8	83,4	82,0	83,3	84,5	82,5	80,5	80,8	81,1	#DIV/0!	#DIV/0!
0,639	67,0	68,9	70,8	70,6	70,3	71,1	71,8	72,6	73,3	74,9	76,5	74,8	73,1	71,8	70,6	#DIV/0!
1,045	66,5	67,5	67,0	65,3	65,8	66,4	65,2	64,0	66,1	68,2	69,7	71,3	71,7	72,0	72,4	72,8
1,450	65,9	64,5	63,2	63,1	63,0	62,2	61,4	61,3	61,2	63,4	65,7	66,5	67,3	68,3	69,4	71,2
1,855	64,3	64,6	63,5	63,4	62,5	61,5	59,2	56,9	58,5	60,2	61,8	63,4	65,5	67,7	68,7	69,6
2,260	62,8	63,3	63,8	62,6	61,4	59,9	58,5	56,7	54,8	57,5	60,2	61,2	62,1	64,3	66,4	68,1
2,666	63,7	63,4	63,8	62,3	61,9	61,4	58,8	56,2	56,4	56,7	58,9	61,2	62,2	63,2	64,9	66,6
3,071	64,6	64,2	63,8	62,8	61,7	59,9	58,1	56,7	55,3	57,6	59,8	60,5	61,2	62,4	63,6	63,6

Tabella 4.17. Prima mappa di durezza per la tipologia 9d, valori di durezza in Mpa, X e Y in mm

X→/Y↓ [mm]	0,234	0,585	0,936	1,287	1,638	1,989	2,340	2,691	3,042	3,393	3,744
0,234		88,5	87,5	86,4	86,0	85,5	81,8	78,2	78,3	78,5	#DIV/0!
0,936	68,0	67,2	66,4	66,9	67,5	68,2	68,9	69,6	70,3	68,1	65,9
1,638	64,8	63,0	63,8	58,5	57,3	56,2	59,2	62,1	61,8	61,5	64,4
2,340	61,5	61,4	61,2	59,1	57,1	57,6	58,1	58,6	59,1	61,0	63,0
3,042	60,7	59,8	59,2	58,7	56,9	55,2	56,6	58,1	58,1	58,1	60,5

Tabella 4.18. Seconda mappa di durezza per la tipologia 9d, valori di durezza in Mpa, X e Y in mm

X→/Y↓ [mm]	0,234	0,585	0,936	1,287	1,638	1,989	2,340	2,691	3,042	3,393	3,744
0,234			85,1	85,1	85,3	85,5	84,0	82,6	82,8	82,9	#DIV/0!
0,842	64,8	66,3	67,7	68,2	68,7	69,4	70,1	70,8	71,5	66,5	61,5
1,450	63,8	65,1	63,4	58,3	58,0	57,6	61,0	64,4	62,5	60,6	62,5
2,058	62,8	60,9	59,1	57,3	55,5	56,0	56,5	57,9	59,2	61,3	63,4
2,666	61,1	60,2	59,5	57,2	55,6	54,0	55,4	56,9	58,3	59,8	61,0
3,274	59,4	59,7	60,0	58,7	57,4	56,7	56,0	56,1	56,2	57,4	58,7

Tabella 4.19. Terza mappa di durezza per la tipologia 9d, valori di durezza in Mpa, X e Y in mm

X→/Y↓ [mm]	0,234	0,585	0,936	1,287	1,638	1,989	2,340	2,691	3,042	3,393	3,744
0,234			92,7	92,7	89,4	86,1	84,7	83,2	81,6	79,9	#DIV/0!
0,842	67,0	68,6	70,1	69,6	69,1	70,7	72,3	70,8	69,4	69,5	69,6
1,450	64,4	61,7	63,7	58,1	59,5	61,0	62,6	64,2	63,0	61,7	66,1
2,058	61,7	59,5	57,2	56,4	55,5	55,7	55,8	57,9	60,0	61,3	62,6
2,666	61,0	58,5	58,3	56,7	54,9	53,2	55,6	57,9	58,3	58,7	60,4
3,274	60,2	59,8	59,4	57,0	54,7	55,1	55,5	56,4	57,2	57,8	58,3

4.4.4 Validazione della distanza minima tra le impronte

Validazione statistica

Nella sezione 4.5.2 sono state descritte le tre tipologie di campionamento utilizzate: 3d, 6d, 9d.

Con la seguente sezione si confrontano i tre diversi tipi di campionamento. L'obiettivo finale è di andare a identificare la mappatura più fitta che non introduce effetti sistematici dovuti alla sovrapposizione dei campi tensionali, inevitabilmente generati durante l'esecuzione delle indentazioni.

I dati che verranno utilizzati sono stati ricavati da nove differenti provini, a loro volta ricavati da differenti dischi di AlMg3. Come ipotesi preliminare, considerando che il processo per la produzione dei dischi viene eseguito in controllo, è stato assunto che i provini fossero omogenei e che tutti dunque potessero essere usati per eseguire l'analisi.

Nei grafici riportati in Figura 4.39, per ogni tipologia di campionamento (3d, 6d, 9d) vengono rappresentati i dati sperimentali disponibili. L'ipotesi iniziale che si vuole andare a verificare è che non vi siano differenze sistematiche introdotte dal campionamento, viene fatta inoltre l'ipotesi che i dati si distribuiscano come una normale centrata nella media e aventi scarto tipo pari all'incertezza tipo. Per eseguire il confronto del set di dati si è deciso di eseguire il test in modo grafico paragonando le barre di incertezza, l'intervallo di fiducia è stato valutato al 95% con un fattore di copertura k pari a 2. Utilizzando i dati di partenza sono quindi stati calcolati la media e lo scarto tipo per ognuno dei tre casi (3d, 6d, 9d) e i grafici rappresentati in Figura 4.40 sono stati tracciati.

Riferendoci alla Figura 4.40 ed eseguendo un'analisi grafica si nota che le bande di incertezza risultano sovrapponibili, dunque statisticamente non si vedono differenze sistematiche tra i tre gruppi assumendo un rischio di errore di prima specie del 5%.

Per le analisi che seguiranno, non avendo riscontrato differenze sistematiche tra le tre casistiche, verranno utilizzate unicamente le mappe della tipologia 3d che permettono uno studio più dettagliato.

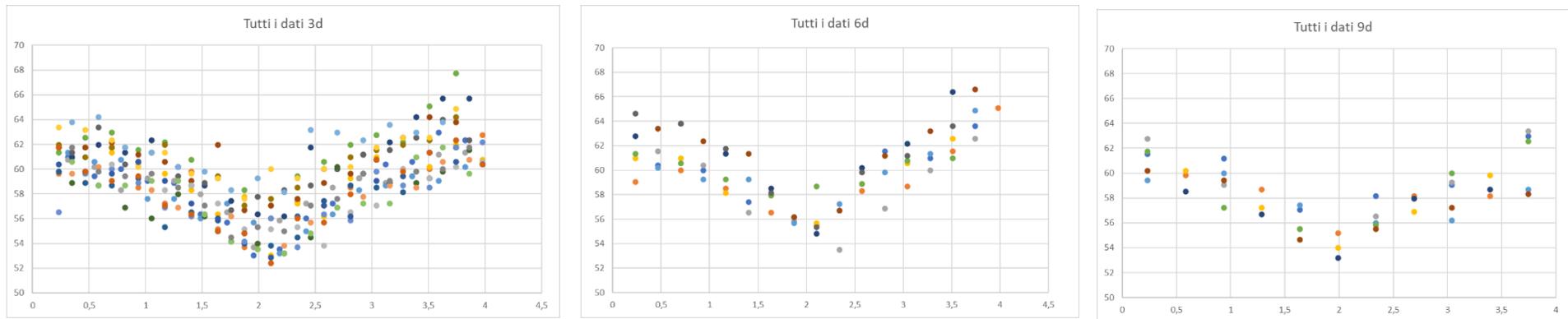


Figura 4.39: Distribuzione dei dati a disposizione per l'esecuzione della validazione statistica

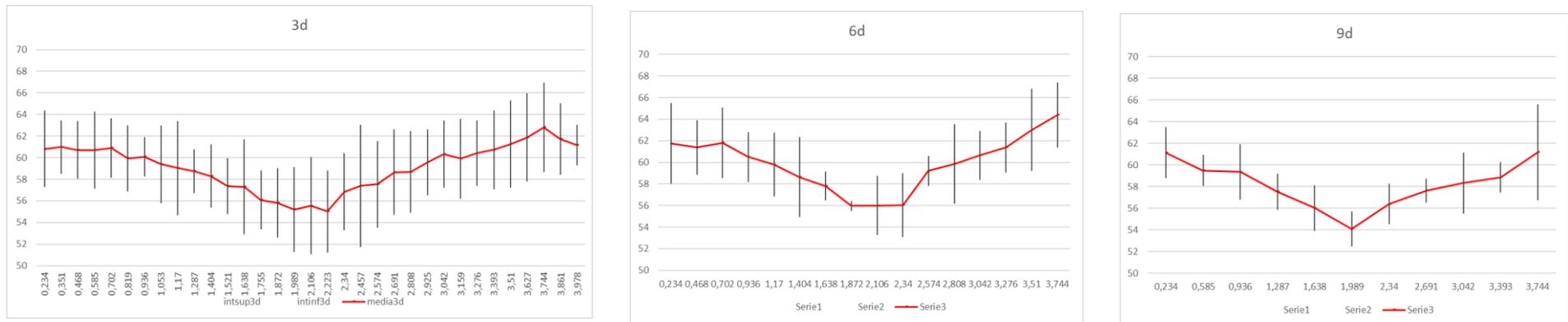


Figura 4.40: Rappresentazione bande di incertezza per ognuno dei tre casi

Validazione microstrutturale

L'immagine della Figura 4.5 è stata utilizzata per confrontare la grandezza dei grani della matrice con la distanza tra le impronte per ognuna delle tre tipologie. Il confronto grafico viene riportato in Figura 4.41.

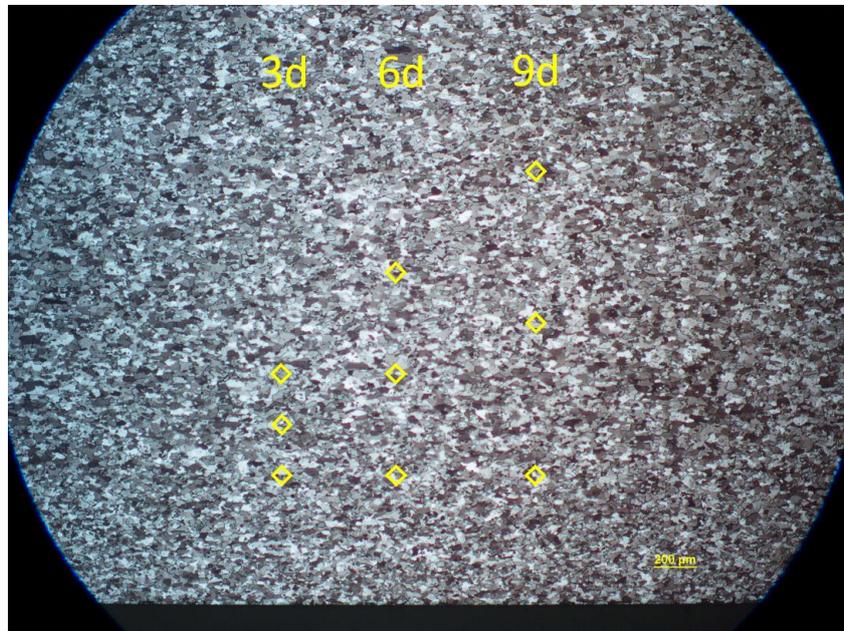


Figura 4.41: Confronto distanza tra le impronte

Dall'analisi visiva dell'immagine si può concludere che le mappe della tipologia 3d possono essere utilizzate poiché si ha un numero di grani sufficiente che distanziano due impronte adiacenti.

4.4.5 Mappe dx, dy, dx/dy, h, As, Ap, F/Ap,

Nelle Tabelle 4.20, 4.21, 4.27, 4.28, 4.34, 4.35 vengono riportati i valori delle diagonali in direzione x e in direzione y per le impronte eseguite.

Nelle tabelle 4.22, 4.29, 4.36 vengono riportati i valori in percentuale della differenza tra le diagonali per ciascuna impronta. Per la normativa UNI EN ISO 6507-1:2018 la differenza tra le diagonali non dovrebbe essere maggiore del 5%. Se così non fosse è necessario riportarlo. Per le misurazioni eseguite, tranne rarissimi casi, il limite viene rispettato.

In funzione dei valori delle diagonali, utilizzando correlazioni geometriche, sono stati calcolati i valori della profondità di penetrazione (h), dell'area proiettata (A_p) e dell'area superficiale (A_s) rappresentante l'area di contatto tra penetratore e materiale. In Figura 4.42 i parametri citati vengono rappresentati graficamente. Nelle mappe che si vengono a generare per queste grandezze l'andamento sarà di conseguenza molto simile a quello delle mappe riportanti i valori delle diagonali.

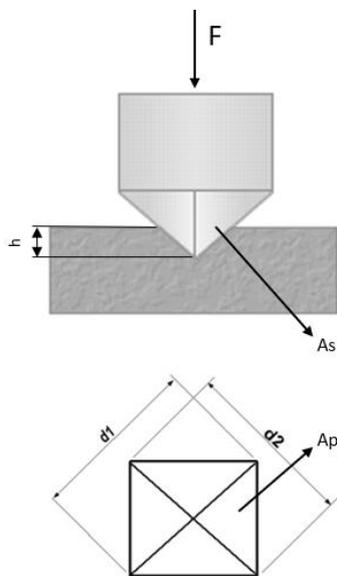


Figura 4.42: Parametri caratteristici impronta

Infine in Tabella 4.22, 4.29 e 4.36 viene rappresentato il valore della pressione media, ossia il rapporto tra la forza esercitata dal penetratore e l'area proiettata. I valori più alti di pressione si presentano nei punti vicini alla superficie tranciata in cui A_p risulta essere minore. Nella zona non alterata dalla superficie di tranciatura la pressione risulta invece minore al centro del provino e maggiore sui bordi.

Tabella 4.20. Prima mappa per la tipologia 3d della diagonale in direzione x (dx), diagonale espressa in mm, X e Y espresse in mm

X→Y↓ [mm]	0,000	0,080	0,234	0,314	0,468	0,548	0,702	0,782	0,936	1,016	1,170	1,250	1,404	1,484	1,638	1,718	1,872	1,952	2,106	2,186	2,340	2,420	2,574	2,654	2,808	2,888	3,042	3,122	3,276	3,356	3,510	3,590	3,744	3,824	3,978			
0,000			0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,064	0,064	0,065	0,065	0,064	0,065	0,065	0,066	0,067	0,067	0,067	0,068	0,069	0,068	0,068	0,068	0,068	0,067	0,067	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	
0,234			0,075	0,072	0,070	0,069	0,068	0,069	0,070	0,069	0,069	0,068	0,069	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,069	0,069	0,069	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	
0,399			0,074	0,074	0,073	0,071	0,070	0,069	0,070	0,070	0,070	0,071	0,070	0,070	0,070	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,070	0,070	0,069	0,069	0,069	0,070	0,070	0,070	0,070	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	
0,565			0,074	0,074	0,074	0,073	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	
0,730			0,074	0,076	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,074	0,074	0,074	0,074	0,073	0,071	0,071	0,072	0,072	0,073	0,073	0,073	0,073	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	
0,896			0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,073	0,073	0,074	0,076	0,078	0,076	0,074	0,075	0,077	0,075	0,073	0,073	0,073	0,074	0,074	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	
1,061			0,075	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,077	0,077	0,076	0,077	0,079	0,077	0,075	0,075	0,075	0,074	0,075	0,076	0,075	0,075	0,075	0,074	0,076	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	
1,227			0,075	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,077	0,077	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,077	0,076	0,075	0,075	0,075	0,074	0,076	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	
1,392			0,075	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,077	0,077	0,078	0,078	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	
1,558			0,075	0,076	0,076	0,076	0,077	0,077	0,078	0,078	0,079	0,079	0,080	0,080	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081
1,723			0,077	0,079	0,078	0,078	0,079	0,080	0,081	0,081	0,082	0,081	0,080	0,081	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,081	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
1,889			0,079	0,079	0,079	0,079	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081
2,054			0,080	0,077	0,078	0,080	0,079	0,078	0,079	0,080	0,080	0,080	0,081	0,081	0,082	0,082	0,082	0,083	0,083	0,083	0,083	0,083	0,083	0,083	0,083	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
2,220			0,080	0,080	0,080	0,079	0,078	0,080	0,081	0,081	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,082	0,084	0,085	0,085	0,083	0,083	0,082	0,080	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
2,385			0,079	0,079	0,080	0,080	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,082	0,081	0,081	0,082	0,084	0,083	0,081	0,081	0,081	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
2,550			0,078	0,077	0,077	0,077	0,078	0,078	0,079	0,080	0,080	0,080	0,080	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
2,716			0,078	0,078	0,078	0,078	0,079	0,079	0,080	0,081	0,081	0,080	0,081	0,082	0,082	0,081	0,082	0,082	0,083	0,083	0,083	0,083	0,082	0,081	0,081	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080

Tabella 4.21. Prima mappa per la tipologia 3d della diagonale in direzione y (dy), diagonale espressa in mm, X e Y espresse in mm

X→Y↓ [mm]	0,000	0,080	0,234	0,314	0,468	0,548	0,702	0,782	0,936	1,016	1,170	1,250	1,404	1,484	1,638	1,718	1,872	1,952	2,106	2,186	2,340	2,420	2,574	2,654	2,808	2,888	3,042	3,122	3,276	3,356	3,510	3,590	3,744	3,824	3,978				
0,000			0,064	0,064	0,064	0,064	0,064	0,065	0,064	0,064	0,064	0,064	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,067	0,067	0,067	0,067	0,066	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067		
0,234			0,071	0,069	0,067	0,068	0,069	0,068	0,067	0,068	0,069	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,069	0,070	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	
0,399			0,073	0,073	0,072	0,071	0,070	0,069	0,070	0,070	0,069	0,068	0,069	0,070	0,070	0,069	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	
0,565			0,076	0,075	0,074	0,073	0,072	0,071	0,070	0,071	0,072	0,071	0,070	0,071	0,071	0,071	0,072	0,072	0,072	0,071	0,070	0,070	0,070	0,070	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
0,730			0,076	0,075	0,075	0,074	0,074	0,074	0,075	0,075	0,075	0,075	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	
0,896			0,076	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	
1,061			0,076	0,075	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074	
1,227			0,076	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	
1,392			0,076	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	
1,558			0,076	0,076	0,077	0,078	0,080	0,079	0,079	0,079	0,080	0,079	0,080	0,080	0,082	0,082	0,083	0,082	0,081	0,081	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
1,723			0,077	0,078	0,078	0,078	0,079	0,079	0,079	0,079	0,080	0,079	0,080	0,080	0,081	0,082	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081
1,889			0,078	0,079	0,079	0,079	0,078	0,078	0,079	0,079	0,079	0,079	0,080	0,080	0,080	0,081	0,083	0,082	0,082	0,082	0,082	0,083	0,083	0,082	0,081	0,079	0,077	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	
2,054			0,078	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,080	0,081	0,081	0,081	0,083	0,085	0,084	0,084	0,083	0,082	0,081	0,080	0,079	0,078	0,078	0,078	0,078										

Tabella 4.29. Seconda mappa per la tipologia 3d della differenza percentuale tra le diagonali

X→/Y↓ [mm]	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223	2,340	2,457	2,574	2,691	2,808	2,925	3,042	3,159	3,276	3,393	3,510	3,627	3,744	3,861
0,234			1%	0%	1%	2%	0%	2%	2%	1%	0%	1%	0%	1%	3%	5%	3%	1%	1%	2%	2%	3%	2%	2%	0%	2%	1%	0%	0%	0%	#DIV/0!	#DIV/0!
0,437	1%	1%	1%	1%	1%	2%	3%	1%	2%	3%	4%	2%	0%	1%	2%	3%	4%	2%	0%	0%	1%	1%	3%	2%	2%	0%	1%	1%	2%	2%	0%	0%
0,639	1%	1%	2%	3%	1%	2%	0%	2%	2%	3%	2%	1%	2%	3%	1%	0%	1%	1%	0%	2%	0%	2%	1%	1%	1%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	1%
0,842	1%	2%	3%	1%	0%	2%	3%	2%	1%	0%	1%	0%	2%	4%	2%	0%	1%	1%	2%	2%	1%	1%	1%	2%	3%	4%	4%	3%	2%	0%	0%	
1,045	1%	1%	2%	1%	0%	1%	1%	1%	1%	2%	1%	1%	1%	3%	0%	2%	1%	0%	0%	1%	1%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	3%	3%	3%	2%	2%
1,247	2%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	2%	4%	7%	3%	1%	0%	1%	0%	2%	1%	1%	2%
1,450	1%	2%	1%	2%	0%	2%	0%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%	3%	2%	2%	3%	4%	1%	2%	1%	0%	1%	2%	2%	2%	2%
1,653	0%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	2%	0%	3%	0%	3%	2%	2%	1%	3%	3%	3%	2%	1%	1%	1%	2%	2%	3%	3%	2%	1%	2%	3%	1%
1,855	1%	0%	1%	3%	3%	3%	2%	1%	2%	2%	1%	0%	1%	1%	0%	2%	2%	1%	2%	2%	1%	2%	2%	1%	0%	0%	0%	1%	2%	1%	1%	1%
2,058	1%	1%	1%	1%	1%	0%	2%	1%	0%	1%	3%	2%	1%	1%	1%	0%	0%	1%	2%	3%	2%	3%	2%	2%	2%	3%	1%	0%	1%	3%	1%	1%
2,260	1%	1%	2%	1%	0%	1%	1%	3%	1%	1%	1%	0%	1%	1%	2%	3%	1%	1%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	2%	2%	2%	4%	3%	2%	2%	2%
2,463	1%	2%	3%	2%	2%	3%	3%	2%	0%	0%	1%	0%	1%	1%	0%	1%	1%	0%	1%	0%	1%	2%	0%	2%	2%	2%	3%	4%	2%	1%	1%	2%
2,666	1%	3%	3%	1%	1%	3%	1%	2%	0%	2%	2%	2%	2%	2%	0%	2%	0%	1%	2%	3%	2%	1%	2%	3%	2%	0%	1%	3%	0%	2%	0%	2%
2,868	0%	2%	3%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	1%	2%	2%	3%	1%	0%	0%	0%	1%	2%	0%	0%	0%	1%	2%	1%	0%	2%	3%	1%	0%	0%	0%

Tabella 4.30. Seconda mappa per la tipologia 3d della profondità di penetrazione (h), profondità espressa in mm, X e Y espresse in mm

X→/Y↓ [mm]	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223	2,340	2,457	2,574	2,691	2,808	2,925	3,042	3,159	3,276	3,393	3,510	3,627	3,744	3,861	
0,234		0,0096	0,0095	0,0094	0,0094	0,0094	0,0093	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0092	0,0091	0,0090	0,0091	0,0092	0,0093	0,0093	0,0094	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0094	0,0093				
0,437	0,0110	0,0105	0,0101	0,0100	0,0099	0,0098	0,0098	0,0098	0,0098	0,0098	0,0098	0,0099	0,0100	0,0099	0,0098	0,0098	0,0097	0,0097	0,0097	0,0097	0,0096	0,0097	0,0097	0,0097	0,0097	0,0097	0,0097	0,0098	0,0099	0,0100	0,0103	0,0106	
0,639	0,0109	0,0106	0,0104	0,0104	0,0104	0,0101	0,0101	0,0101	0,0101	0,0100	0,0100	0,0099	0,0100	0,0099	0,0100	0,0101	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099	0,0098	0,0098	0,0099	0,0099	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0101	0,0103	0,0105	0,0107	0,0110
0,842	0,0108	0,0108	0,0107	0,0107	0,0106	0,0106	0,0105	0,0104	0,0104	0,0103	0,0102	0,0102	0,0102	0,0104	0,0105	0,0103	0,0100	0,0101	0,0102	0,0101	0,0101	0,0101	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0101	0,0102	0,0103	0,0106	0,0109	0,0107
1,045	0,0108	0,0107	0,0107	0,0106	0,0106	0,0106	0,0105	0,0105	0,0104	0,0104	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105	0,0105	0,0104	0,0104	0,0104	0,0103	0,0103	0,0103	0,0103	0,0103	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0106	0,0107	0,0106	0,0105	
1,247	0,0107	0,0107	0,0107	0,0108	0,0108	0,0108	0,0108	0,0109	0,0111	0,0110	0,0108	0,0108	0,0108	0,0109	0,0110	0,0108	0,0107	0,0107	0,0107	0,0107	0,0106	0,0105	0,0105	0,0106	0,0106	0,0105	0,0106	0,0106	0,0107	0,0108	0,0107	0,0106	0,0106
1,450	0,0108	0,0110	0,0109	0,0107	0,0108	0,0109	0,0110	0,0111	0,0111	0,0111	0,0111	0,0110	0,0110	0,0111	0,0111	0,0110	0,0109	0,0108	0,0107	0,0107	0,0107	0,0108	0,0107	0,0106	0,0106	0,0107	0,0108	0,0110	0,0109	0,0108	0,0107	0,0106	
1,653	0,0108	0,0109	0,0110	0,0110	0,0112	0,0114	0,0113	0,0111	0,0112	0,0112	0,0112	0,0113	0,0114	0,0113	0,0112	0,0111	0,0111	0,0110	0,0109	0,0108	0,0108	0,0108	0,0108	0,0108	0,0108	0,0108	0,0107	0,0107	0,0108	0,0109	0,0108	0,0106	0,0107
1,855	0,0109	0,0110	0,0110	0,0113	0,0112	0,0112	0,0113	0,0113	0,0113	0,0112	0,0112	0,0113	0,0113	0,0114	0,0113	0,0114	0,0114	0,0115	0,0114	0,0115	0,0114	0,0112	0,0111	0,0110	0,0109	0,0109	0,0109	0,0107	0,0107	0,0107	0,0107	0,0107	
2,058	0,0111	0,0111	0,0110	0,0110	0,0110	0,0111	0,0111	0,0110	0,0111	0,0112	0,0112	0,0113	0,0114	0,0115	0,0114	0,0113	0,0114	0,0115	0,0114	0,0113	0,0112	0,0112	0,0111	0,0111	0,0110	0,0110	0,0110	0,0110	0,0109	0,0108	0,0107	0,0106	0,0107
2,260	0,0111	0,0111	0,0110	0,0111	0,0111	0,0111	0,0111	0,0110	0,0112	0,0112	0,0113	0,0114	0,0114	0,0115	0,0116	0,0116	0,0115	0,0116	0,0115	0,0113	0,0112	0,0112	0,0112	0,0111	0,0111	0,0110	0,0109	0,0109	0,0108	0,0107	0,0107	0,0107	
2,463	0,0111	0,0111	0,0111	0,0111	0,0110	0,0111	0,0111	0,0112	0,0112	0,0112	0,0113	0,0112	0,0111	0,0113	0,0116	0,0115	0,0115	0,0115	0,0115	0,0114	0,0113	0,0113	0,0113	0,0112	0,0112	0,0111	0,0110	0,0109	0,0109	0,0109	0,0109	0,0109	
2,666	0,0111	0,0111	0,0110	0,0109	0,0111	0,0112	0,0112	0,0111	0,0112	0,0113	0,0113	0,0113	0,0114	0,0116	0,0115	0,0114	0,0114	0,0114	0,0114	0,0114	0,0114	0,0113	0,0112	0,0112	0,0111	0,0111	0,0110	0,0110	0,0109	0,0109	0,0109	0,0109	0,0110
2,868	0,0111	0,0111	0,0111	0,0111	0,0111	0,0111	0,0112	0,0111	0,0112	0,0114	0,0113	0,0113	0,0113	0,0114	0,0115	0,0115	0,0115	0,0114	0,0114	0,0114	0,0113	0,0112	0,0112	0,0111	0,0111	0,0111	0,0111	0,0110	0,0110	0,0109	0,0109	0,0109	0,0109

Tabella 4.31. Seconda mappa per la tipologia 3d dell'area superficiale (As) espressa in mm², X e Y espresse in mm

X→/Y↓ [mm]	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223	2,340	2,457	2,574	2,691	2,808	2,925	3,042	3,159	3,276	3,393	3,510	3,627	3,744	3,861	
0,234		0,00245	0,00239	0,00233	0,00232	0,00231	0,00229	0,00226	0,00226	0,00226	0,00224	0,00223	0,00224	0,00225	0,00225	0,00224	0,00219	0,00213	0,00220	0,00226	0,00227	0,00227	0,00232	0,00237	0,00238	0,00239	0,00236	0,00233	0,00232	0,00230			
0,437	0,00319	0,00293	0,00267	0,00264	0,00260	0,00256	0,00252	0,00254	0,00256	0,00254	0,00252	0,00258	0,00263	0,00259	0,00255	0,00254	0,00253	0,00247	0,00241	0,00245	0,00249	0,00250	0,00250	0,00249	0,00248	0,00252	0,00256	0,00259	0,00262	0,00281	0,00299		
0,639	0,00315	0,00299	0,00292	0,00285	0,00277	0,00269	0,00269	0,00268	0,00267	0,00266	0,00269	0,00271	0,00266	0,00260	0,00266	0,00271	0,00269	0,00268	0,00261	0,00253	0,00252	0,00251	0,00257	0,00262	0,00263	0,00263	0,00265	0,00267	0,00279	0,00291	0,00306	0,00320	
0,842	0,00310	0,00307	0,00303	0,00301	0,00298	0,00294	0,00290	0,00288	0,00286	0,00282	0,00277	0,00277	0,00278	0,00285	0,00292	0,00278	0,00264	0,00269	0,00273	0,00270	0,00268	0,00271	0,00274	0,00274	0,00274	0,00274	0,00272	0,00271	0,00275	0,00280	0,00296	0,00313	0,00306
1,045	0,00308	0,00305	0,00302	0,00299	0,00298	0,00297	0,00294	0,00291	0,00293	0,00294	0,00290	0,00285	0,00288	0,00291	0,00291	0,00290	0,00290	0,00289	0,00286	0,00283	0,00283	0,00282	0,00282	0,00281	0,00283	0,00285	0,00286	0,00287	0,00296	0,00305	0,00308	0,00291	
1,247	0,00305	0,00305	0,00305	0,00306	0,00307	0,00307	0,00307	0,00316	0,00324	0,00317	0,00310	0,00308	0,00306	0,00312	0,00318	0,00309	0,00301	0,00301	0,00301	0,00296	0,00290	0,00294	0,00297	0,00295	0,00295	0,00299	0,00296	0,00299	0,00303	0,00306	0,00303	0,00299	0,00295
1,450	0,00306	0,00318	0,00312	0,00305	0,00311	0,00317	0,00321	0,00326	0,00326	0,00326	0,00324	0,00322	0,00321	0,00321	0,00323	0,00325	0,00320	0,00316	0,00309	0,00302	0,00305	0,00308	0,00303	0,00298	0,00298	0,00299	0,00300	0,00310	0,00319	0,00315	0,00310	0,00304	0,00298
1,653	0,00307	0,00314																															

Tabella 4.35. Terza mappa per la tipologia 3d della diagonale in direzione y (dy), diagonale espressa in mm, X e Y espresse in mm

X→/Y↓	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223	2,340	2,457	2,574	2,691	2,808	2,925	3,042	3,159	3,276	3,393	3,510	3,627	3,744	3,861	3,978			
0,234			0,063	0,063	0,063	0,062	0,062	0,063	0,063	0,064	0,064	0,064	0,064	0,063	0,064	0,065	0,065	0,064	0,065	0,066	0,066	0,067	0,067	0,067	0,066	0,066	0,067	0,068	0,071	0,075						
0,437	0,068	0,068	0,068	0,067	0,067	0,067	0,067	0,068	0,068	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,070	0,069	0,069	0,068	0,068	0,067	0,068	0,070	0,071	0,070	0,070	0,070	0,070	0,072	0,074	0,075	0,077					
0,639	0,072	0,071	0,070	0,070	0,069	0,069	0,069	0,069	0,070	0,071	0,071	0,070	0,071	0,072	0,071	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,071	0,072	0,071	0,070	0,069	0,069	0,071	0,072	0,075	0,077	0,079	0,080				
0,842	0,076	0,076	0,076	0,074	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,074	0,073	0,074	0,073	0,072	0,072	0,072	0,071	0,070	0,071	0,072	0,071	0,072	0,074	0,075	0,076	0,078					
1,045	0,076	0,075	0,075	0,075	0,075	0,074	0,075	0,076	0,075	0,074	0,074	0,073	0,073	0,074	0,074	0,075	0,076	0,076	0,074	0,072	0,072	0,073	0,073	0,073	0,073	0,074	0,074	0,074	0,075	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076	0,076
1,247	0,077	0,076	0,075	0,075	0,076	0,076	0,076	0,076	0,075	0,077	0,077	0,077	0,077	0,078	0,078	0,078	0,077	0,076	0,076	0,076	0,076	0,077	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,079	0,080	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081
1,450	0,076	0,076	0,076	0,077	0,078	0,079	0,078	0,078	0,079	0,079	0,079	0,079	0,078	0,078	0,078	0,078	0,079	0,079	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
1,653	0,076	0,077	0,077	0,078	0,078	0,079	0,079	0,080	0,081	0,080	0,080	0,079	0,079	0,080	0,081	0,081	0,081	0,081	0,080	0,078	0,078	0,078	0,077	0,076	0,075	0,076	0,077	0,078	0,078	0,078	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077
1,855	0,077	0,077	0,077	0,078	0,078	0,079	0,079	0,080	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,082	0,083	0,083	0,084	0,082	0,081	0,081	0,081	0,081	0,080	0,078	0,078	0,077	0,076	0,075	0,076	0,077	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078	0,078
2,058	0,078	0,078	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,080	0,081	0,081	0,080	0,080	0,080	0,081	0,082	0,082	0,081	0,082	0,082	0,082	0,083	0,083	0,081	0,080	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,078	0,079	0,079	0,078	0,077	0,076	0,076
2,260	0,079	0,078	0,078	0,078	0,079	0,080	0,082	0,081	0,080	0,080	0,081	0,081	0,081	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	0,081	0,081	0,080	0,079	0,079	0,079	0,079	0,078	0,079	0,080	0,080	0,079	0,078	0,078	0,078	0,077	0,076
2,463	0,081	0,079	0,078	0,078	0,078	0,078	0,079	0,080	0,080	0,080	0,081	0,081	0,082	0,082	0,082	0,081	0,080	0,081	0,083	0,082	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081
2,666	0,082	0,079	0,078	0,078	0,078	0,078	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,081	0,081	0,081	0,082	0,082	0,082	0,081	0,080	0,080	0,081	0,080	0,080	0,080	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079
2,868	0,083	0,080	0,078	0,078	0,078	0,079	0,079	0,079	0,079	0,078	0,078	0,079	0,079	0,080	0,082	0,081	0,081	0,081	0,081	0,082	0,082	0,081	0,080	0,080	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081

Tabella 4.36. Terza mappa per la tipologia 3d della differenza percentuale tra le diagonali

X→/Y↓	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223	2,340	2,457	2,574	2,691	2,808	2,925	3,042	3,159	3,276	3,393	3,510	3,627	3,744	3,861	3,978	4,095		
0,234			0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%	2%	2%	1%	1%	0%	2%	3%	0%	3%	3%	4%	4%	4%	4%	4%	5%	5%	5%	5%	5%	3%	2%	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
0,437	0%	1%	1%	0%	2%	2%	2%	2%	3%	2%	2%	1%	0%	1%	1%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	2%	4%	1%	3%	1%	0%	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
0,639	0%	1%	2%	3%	4%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	2%	4%	3%	2%	3%	4%	2%	0%	1%	1%	3%	4%	3%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	
0,842	0%	1%	2%	2%	3%	3%	4%	3%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	1%	3%	4%	3%	1%	3%	4%	3%	1%	0%	4%	7%	5%	4%	3%	1%	3%	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,045	0%	2%	1%	1%	2%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	0%	1%	0%	2%	1%	3%	1%	0%	0%	1%	1%	0%	2%	3%	3%	0%	2%	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,247	1%	2%	3%	2%	2%	1%	0%	2%	3%	1%	1%	0%	1%	3%	5%	4%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	1%	2%	2%	3%	4%	2%	0%	1%	1%	2%	4%	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,450	2%	1%	1%	1%	1%	1%	2%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	2%	3%	3%	3%	1%	0%	1%	2%	4%	5%	5%	4%	4%	3%	2%	1%	2%	3%	1%	2%	3%	
1,653	3%	2%	1%	0%	0%	1%	2%	1%	1%	0%	1%	3%	5%	2%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	3%	4%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	#DIV/0!	
1,855	2%	1%	1%	2%	2%	1%	0%	2%	4%	3%	1%	0%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	1%	2%	1%	1%	2%	1%	1%	2%	2%	2%	1%	0%	1%	1%	2%	2%	#DIV/0!	
2,058	2%	2%	2%	2%	1%	1%	0%	1%	2%	2%	2%	3%	2%	1%	3%	4%	2%	0%	1%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	3%	5%	2%	0%	1%	2%	2%	2%	3%	#DIV/0!	
2,260	2%	4%	4%	4%	4%	4%	2%	0%	0%	1%	2%	2%	2%	1%	3%	4%	4%	5%	2%	1%	3%	4%	5%	2%	1%	3%	1%	1%	0%	1%	2%	0%	1%	3%	4%	
2,463	1%	2%	3%	2%	1%	2%	3%	3%	2%	2%	3%	1%	1%	1%	3%	3%	3%	2%	1%	1%	1%	2%	2%	2%	2%	2%	1%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	
2,666	1%	0%	1%	1%	1%	1%	0%	2%	3%	3%	3%	2%	1%	2%	4%	3%	2%	3%	3%	2%	1%	1%	2%	1%	2%	1%	1%	2%	2%	1%	1%	2%	2%	2%	2%	
2,868	0%	2%	3%	3%	2%	1%	0%	1%	3%	3%	4%	4%	4%	2%	1%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	0%	2%	1%	3%	1%	2%	0%	1%	2%	3%	2%

Tabella 4.37. Terza mappa per la tipologia 3d della profondità di penetrazione (h), profondità espressa in mm, X e Y espresse in mm

X→/Y↓	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223	2,340	2,457	2,574	2,691	2,808	2,925	3,042	3,159	3,276	3,393	3,510	3,627	3,744	3,861	3,978		
0,234			0,0091	0,0091	0,0089	0,0088	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0090	0,0091	0,0091	0,0090	0,0091	0,0092	0,0092	0,0093	0,0094	0,0096	0,0097	0,0097	0,0097	0,0097	0,0097	0,0097	0,0097	0,0097	0,0098	0,0099	0,0104	0,0108			
0,437	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099	0,0098	0,0097	0,0097	0,0098	0,0100	0,0101	0,0101	0,0101	0,0101	0,0101	0,0102	0,0103	0,0104	0,0107	0,0110	0,0112	0,0113
0,639	0,0102	0,0102	0,0102	0,0101	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0101	0,0101	0,0101	0,0102	0,0103	0,0102	0,0101	0,0101	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0102	0,0101	0,0101	0,0101	0,0101	0,0101	0,0102	0,0103	0,0104	0,0107	0,0108	0,0109	0,0110	
0,842	0,0108	0,0108	0,0109	0,0107	0,0104	0,0105	0,0105	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0105	0,0106	0,0105	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0103	0,0102	0,0102	0,0103	0,0104	0,0106	0,0107	0,0108	0,0109	0,0108	0,0109	0,0110	0,0110	
1,045	0,0109	0,0109	0,0108	0,0107	0,0107	0,0108	0,0108	0,0107	0,0107	0,0106	0,0105	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0108	0,0107	0,0105	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0105	0,0105	0,0106	0,0106	0,0107	0,0108	0,0109	0,0108	0,0107	0,0107	
1,247	0,0110	0,0109	0,0108	0,0109	0,0109	0,0109	0,0108	0,0109	0,0109	0,0110	0,0111	0,0110	0,0110	0,0109	0,0108	0,0110	0,0112	0,0110	0,0108	0,0109	0,0110	0,0109	0,0109	0,0109	0,0108	0,0108	0,0108	0,0108	0,0109	0,0110	0,0109	0,0109	0,0111	0,0113	
1,450	0,0110	0,0110	0,0110	0,0110	0,0112	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0113	0,0112	0,0112	0,0112	0,0113	0,0113	0,0113	0,0114	0,0114	0,0114	0,0114													

Tabella 4.38. Terza mappa per la tipologia 3d dell'area superficiale (As) espressa in mm², X e Y espresse in mm

X→/Y↓	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223	2,340	2,457	2,574	2,691	2,808	2,925	3,042	3,159	3,276	3,393	3,510	3,627	3,744	3,861	3,978			
0,234			0,00217	0,00217	0,00212	0,00206	0,00205	0,00211	0,00211	0,00210	0,00215	0,00220	0,00217	0,00215	0,00219	0,00223	0,00226	0,00228	0,00236	0,00244	0,00246	0,00248	0,00249	0,00248	0,00249	0,00248	0,00247	0,00253	0,00260	0,00264	0,00309					
0,437	0,00246	0,00244	0,00243	0,00243	0,00243	0,00244	0,00246	0,00252	0,00258	0,00260	0,00263	0,00268	0,00258	0,00258	0,00259	0,00262	0,00267	0,00274	0,00280	0,00284	0,00286	0,00287	0,00286	0,00286	0,00286	0,00286	0,00286	0,00286	0,00286	0,00286	0,00286	0,00286	0,00286	0,00286	0,00286	
0,639	0,00276	0,00277	0,00272	0,00268	0,00265	0,00262	0,00262	0,00261	0,00267	0,00272	0,00270	0,00268	0,00275	0,00282	0,00278	0,00274	0,00270	0,00266	0,00270	0,00275	0,00275	0,00276	0,00270	0,00264	0,00267	0,00270	0,00277	0,00284	0,00303	0,00322	0,00330	0,00338				
0,842	0,00306	0,00309	0,00313	0,00300	0,00288	0,00290	0,00292	0,00288	0,00283	0,00284	0,00286	0,00287	0,00286	0,00284	0,00290	0,00295	0,00292	0,00288	0,00286	0,00283	0,00278	0,00273	0,00275	0,00277	0,00282	0,00287	0,00295	0,00303	0,00307	0,00311	0,00320					
1,045	0,00312	0,00311	0,00306	0,00301	0,00304	0,00307	0,00306	0,00305	0,00302	0,00298	0,00299	0,00288	0,00288	0,00287	0,00298	0,00308	0,00306	0,00304	0,00294	0,00283	0,00284	0,00287	0,00287	0,00290	0,00299	0,00299	0,00302	0,00309	0,00316	0,00309	0,00302					
1,247	0,00318	0,00314	0,00310	0,00312	0,00314	0,00312	0,00310	0,00315	0,00316	0,00320	0,00324	0,00322	0,00321	0,00315	0,00309	0,00319	0,00329	0,00318	0,00306	0,00313	0,00320	0,00317	0,00314	0,00310	0,00307	0,00308	0,00308	0,00315	0,00321	0,00317	0,00313	0,00305				
1,450	0,00320	0,00318	0,00319	0,00320	0,00329	0,00338	0,00337	0,00337	0,00338	0,00340	0,00338	0,00335	0,00333	0,00330	0,00333	0,00337	0,00340	0,00344	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345	0,00345
1,653	0,00323	0,00322	0,00321	0,00325	0,00329	0,00336	0,00342	0,00346	0,00349	0,00348	0,00347	0,00349	0,00351	0,00349	0,00348	0,00354	0,00360	0,00346	0,00342	0,00332	0,00332	0,00332	0,00328	0,00323	0,00320	0,00318	0,00324	0,00330	0,00333	0,00335	0,00332	0,00322	0,00318	0,00316	0,00317	
1,855	0,00329	0,00322	0,00327	0,00331	0,00336	0,00340	0,00340	0,00340	0,00343	0,00346	0,00352	0,00358	0,00365	0,00367	0,00370	0,00373	0,00363	0,00354	0,00352	0,00349	0,00350	0,00352	0,00338	0,00326	0,00330	0,00333	0,00332	0,00331	0,00328	0,00324	0,00321	0,00318	0,00316	0,00316	0,00316	
2,058	0,00334	0,00337	0,00340	0,00340	0,00341	0,00339	0,00338	0,00350	0,00361	0,00358	0,00354	0,00356	0,00358	0,00364	0,00370	0,00371	0,00372	0,00369	0,00367	0,00358	0,00348	0,00345	0,00341	0,00341	0,00342	0,00343	0,00344	0,00341	0,00338	0,00331	0,00324	0,00320	0,00316	0,00316	0,00316	
2,260	0,00344	0,00340	0,00340	0,00341	0,00346	0,00352	0,00354	0,00357	0,00351	0,00345	0,00351	0,00356	0,00363	0,00369	0,00370	0,00370	0,00373	0,00376	0,00372	0,00367	0,00350	0,00332	0,00334	0,00335	0,00338	0,00340	0,00340	0,00340	0,00337	0,00334	0,00330	0,00325	0,00319	0,00319	0,00319	
2,463	0,00354	0,00345	0,00335	0,00334	0,00333	0,00337	0,00340	0,00352	0,00351	0,00354	0,00356	0,00360	0,00364	0,00366	0,00369	0,00365	0,00365	0,00373	0,00372	0,00364	0,00355	0,00357	0,00358	0,00346	0,00334	0,00338	0,00341	0,00341	0,00342	0,00333	0,00324	0,00323	0,00322	0,00322	0,00322	
2,666	0,00362	0,00335	0,00334	0,00332	0,00328	0,00324	0,00333	0,00343	0,00347	0,00352	0,00355	0,00355	0,00356	0,00359	0,00374	0,00373	0,00372	0,00365	0,00359	0,00355	0,00352	0,00342	0,00346	0,00344	0,00341	0,00341	0,00342	0,00336	0,00330	0,00330	0,00329	0,00326	0,00326	0,00326	0,00326	
2,868	0,00369	0,00352	0,00334	0,00333	0,00331	0,00331	0,00331	0,00337	0,00343	0,00342	0,00341	0,00345	0,00349	0,00356	0,00363	0,00361	0,00362	0,00362	0,00361	0,00361	0,00372	0,00362	0,00354	0,00352	0,00351	0,00342	0,00333	0,00335	0,00338	0,00335	0,00332	0,00331	0,00330	0,00330	0,00330	

Tabella 4.39. Terza mappa per la tipologia 3d dell'area proiettata (Ap) espressa in mm², X e Y espresse in mm

X→/Y↓	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223	2,340	2,457	2,574	2,691	2,808	2,925	3,042	3,159	3,276	3,393	3,510	3,627	3,744	3,861	3,978					
0,234			0,00201	0,00201	0,00196	0,00191	0,00194	0,00196	0,00195	0,00195	0,00199	0,00204	0,00207	0,00199	0,00203	0,00207	0,00209	0,00211	0,00219	0,00226	0,00228	0,00230	0,00231	0,00231	0,00230	0,00229	0,00235	0,00241	0,00244	0,00287								
0,437	0,00228	0,00227	0,00225	0,00225	0,00227	0,00228	0,00233	0,00239	0,00242	0,00244	0,00242	0,00239	0,00239	0,00240	0,00249	0,00255	0,00262	0,00258	0,00254	0,00250	0,00247	0,00251	0,00255	0,00256	0,00250	0,00245	0,00248	0,00250	0,00257	0,00264	0,00281	0,00298	0,00306	0,00313				
0,639	0,00256	0,00257	0,00253	0,00249	0,00246	0,00243	0,00243	0,00247	0,00247	0,00252	0,00250	0,00249	0,00255	0,00262	0,00258	0,00254	0,00250	0,00247	0,00251	0,00255	0,00256	0,00250	0,00245	0,00248	0,00250	0,00245	0,00248	0,00250	0,00257	0,00264	0,00281	0,00298	0,00306	0,00313				
0,842	0,00284	0,00287	0,00290	0,00279	0,00267	0,00269	0,00271	0,00267	0,00263	0,00263	0,00264	0,00265	0,00266	0,00265	0,00264	0,00269	0,00274	0,00271	0,00267	0,00265	0,00263	0,00258	0,00253	0,00255	0,00257	0,00261	0,00266	0,00274	0,00281	0,00285	0,00289	0,00297						
1,045	0,00289	0,00289	0,00284	0,00279	0,00282	0,00285	0,00284	0,00283	0,00280	0,00277	0,00272	0,00267	0,00267	0,00266	0,00267	0,00286	0,00284	0,00282	0,00273	0,00263	0,00263	0,00266	0,00266	0,00269	0,00271	0,00274	0,00277	0,00280	0,00286	0,00293	0,00286	0,00280	0,00280	0,00280	0,00280	0,00280		
1,247	0,00295	0,00291	0,00288	0,00289	0,00291	0,00289	0,00288	0,00290	0,00293	0,00296	0,00300	0,00299	0,00297	0,00292	0,00287	0,00295	0,00305	0,00295	0,00284	0,00290	0,00296	0,00294	0,00291	0,00288	0,00285	0,00285	0,00286	0,00292	0,00297	0,00294	0,00290	0,00283	0,00283	0,00283	0,00283	0,00283		
1,450	0,00297	0,00295	0,00295	0,00296	0,00305	0,00313	0,00313	0,00313	0,00311	0,00309	0,00305	0,00309	0,00312	0,00316	0,00319	0,00320	0,00320	0,00320	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	0,00327	
1,653	0,00299	0,00298	0,00297	0,00301	0,00305	0,00311	0,00317	0,00321	0,00324	0,00323	0,00322	0,00324	0,00325	0,00324	0,00323	0,00325	0,00334	0,00331	0,00328	0,00325	0,00324	0,00325	0,00325	0,00324	0,00325	0,00325	0,00324	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	
1,855	0,00305	0,00298	0,00303	0,00307	0,00311	0,00315	0,00315	0,00318	0,00321	0,00327	0,00332	0,00336	0,00340	0,00345	0,00349	0,00344	0,00344	0,00342	0,00340	0,00332	0,00328	0,00325	0,00324	0,00325	0,00325	0,00324	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	0,00325	
2,058	0,00310	0,00313	0,00315	0,00316	0,00316	0,00315	0,00313	0,00324	0,00335	0,00342	0,00348	0,00350	0,00352	0,00358	0,00364	0,00369	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370	0,00370
2,260	0,00319	0,00315	0,00316	0,00316	0,00321	0,00326	0,00																															

4.4.6 Fenomeno del pile up

Quando si effettuano indentazioni su di un materiale utilizzando un penetratore molto duro, la materia può fluire in diversi modi influenzata dalle proprietà meccaniche del materiale e dalla natura e forma del penetratore. Di solito vengono considerati due diversi modelli di deformazione:

- *Sink-in* che si verifica quando il materiale viene tirato verso il basso dalla punta del penetratore
- *Pile-up* che si verifica quando il materiale viene allontanato dal centro dell'indentazione

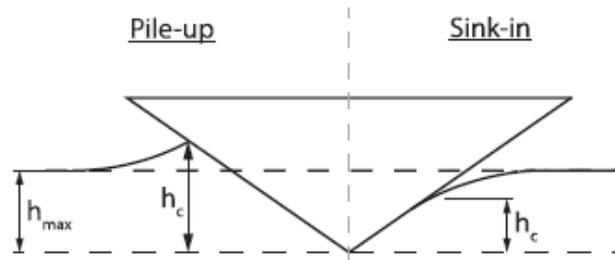


Figura 4.43: Rappresentazione del pile-up e del sink-in, h_c rappresenta la profondità di contatto [32]

Per le prove di durezza classiche in cui la diagonale dell'indentazione viene misurata otticamente, questi modelli di deformazione hanno un piccolo effetto sulla misura della durezza dal momento che è stato riconosciuto che la lunghezza della diagonale dell'indentazione rimane costante nel passaggio dall'applicazione del carico massimo al ritiro del penetratore. Un discorso diverso va invece fatto per la prova di durezza strumentata in cui le proprietà meccaniche vengono calcolate tramite un valore preciso della superficie di contatto, funzione della profondità di contatto. Di conseguenza la misura risulterà influenzata sia dal Pile-up che dal Sink-in [33].

Utilizzando i campioni generati per la creazione delle mappe è stato possibile osservare che le impronte eseguite erano affette dal fenomeno del pile-up. In Figura 4.44 si nota la presenza del fenomeno attorno ad ogni impronta, si è deciso quindi di eseguire un'analisi più accurata utilizzando il microscopio interferometrico a scansione.

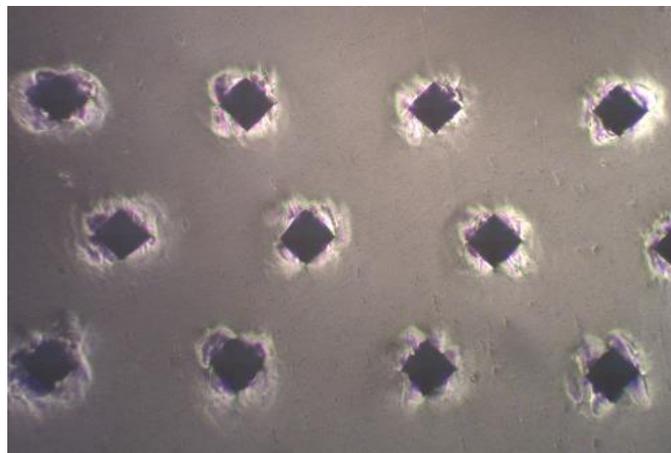


Figura 4.44: Fenomeno del pile-up osservato attraverso l'utilizzo del microscopio ottico

Durante la prova di microdurezza convenzionale non può essere verificata costantemente l'area di contatto tra penetratore e superficie, come avviene per la prova strumentata, poiché le misurazioni vengono eseguite soltanto quando il carico viene rimosso. La prova convenzionale Vickers viene eseguita su materiali metallici a carichi relativamente elevati, ne consegue che il pile-up risulta di piccola entità rispetto alla profondità dell'indentazione. Inoltre durante la prova Vickers vengono acquisite soltanto le misure delle diagonali che risultano poco influenzate dal fenomeno se si considera che il pile-up sui vertici delle impronte è di entità ancora minore rispetto ai bordi.

Con l'utilizzo del microdurometro sono state eseguite impronte per ogni carico a disposizione: 0,01 kgf, 0,025 kgf, 0,05 kgf, 0,1 kgf, 0,2 kgf, 0,3 kgf, 0,5 kgf, 1 kgf. A questo punto ciascuna impronta è stata acquisita tramite l'utilizzo del microscopio interferometrico a scansione, in Figura 4.45 vengono riportate le immagini 3D per ciascuna impronta. L'elaborazione delle impronte ha permesso di andare a valutare l'altezza del pile-up su ogni vertice dell'impronta e il volume complessivo del pile-up.

In Tabella 4.41 viene riportato il rapporto, espresso in percentuale, tra l'altezza del pile up sul vertice dell'impronta e la profondità dell'impronta. Considerando che i carichi testati sono otto e di conseguenza le impronte valutate sono otto, l'operazione è stata eseguita per ognuno dei carichi utilizzati e per ogni vertice delle impronte eseguite. Come si vede dai valori indicati in Tabella 4.41 il pile-up sui vertici risulta sempre di piccola entità rispetto alla profondità dell'impronta per ognuno dei carichi considerati. Per avere una visione più chiara, in Figura 4.46 viene mostrata la distribuzione del fenomeno. Risulta evidente che i valori più elevati del pile-up si posizionano lungo i bordi dell'impronta, lasciando invece i vertici e dunque la diagonale misurata meno affetti dal fenomeno.

L'elaborazione delle impronte acquisite ha inoltre permesso di calcolare complessivamente il volume del pile-up per ciascun caso. I valori, riportati in Tabella 4.42, sono stati poi rapportati ai volumi delle indentazioni, ricavati in funzione dei valori delle diagonali. Il risultato dei rapporti tra i volumi sono stati riportati nel grafico di Figura 4.47. Dai dati riportati si può notare che, diminuendo il carico il fenomeno del pile-up risulta sempre più importante rispetto all'entità dell'impronta che si va ad eseguire. E' per questo motivo che il fenomeno viene preso principalmente in considerazione per le prove strumentate quando si utilizzano bassi carichi.

In conclusione, si può affermare che le misure eseguite per la creazione delle mappe di microdurezza risultano essere veritiere, su di esse quindi non è necessario andare ad eseguire alcuna correzione. Questa affermazione è giustificata dal fatto che per la loro esecuzione è stato usato un carico di 0,2 kgf e che le misurazioni eseguite riguardano le diagonali per le quali il fenomeno del pile-up può essere ritenuto trascurabile.

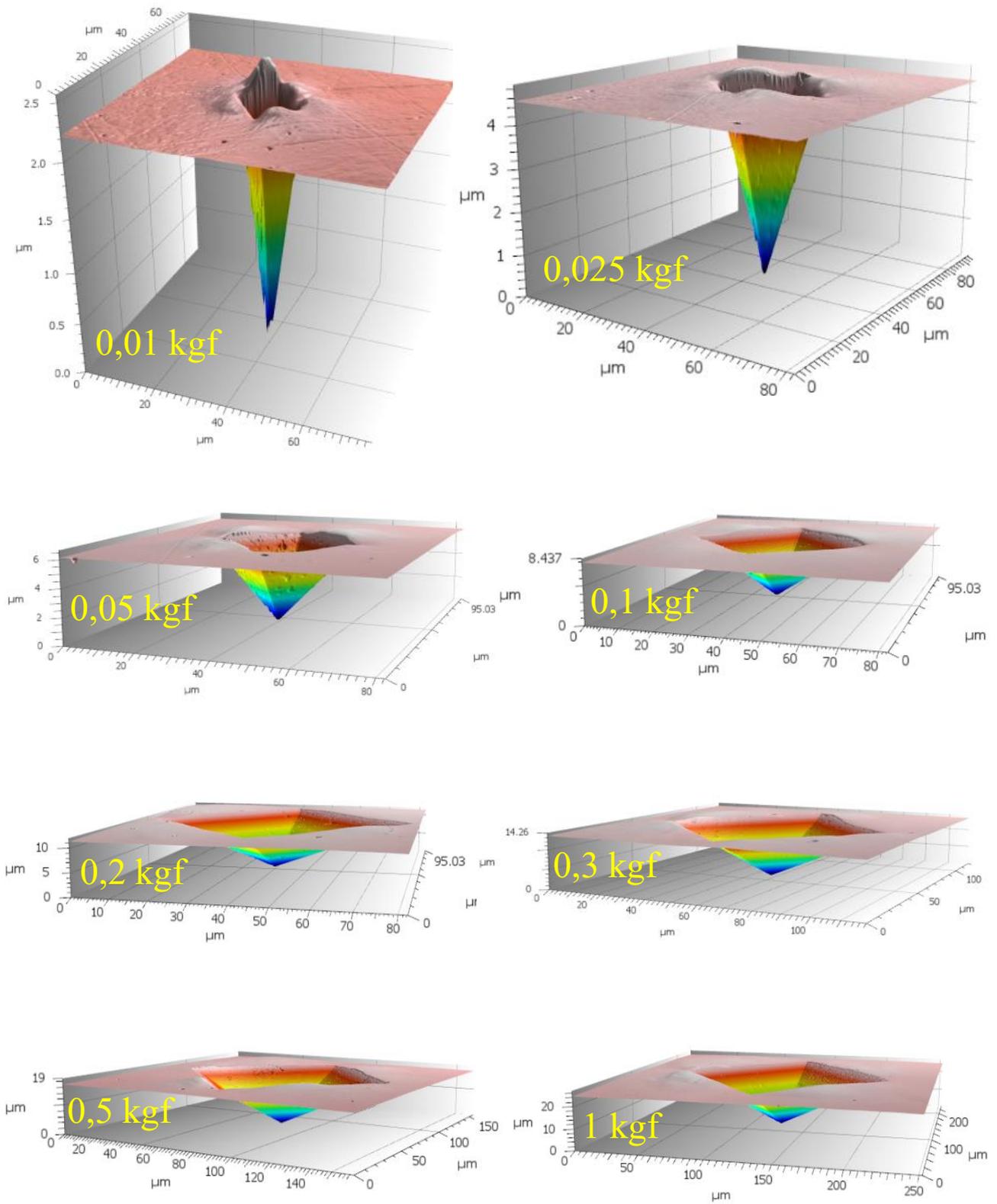


Figura 4.45: Immagini 3D delle impronte a diversi carichi

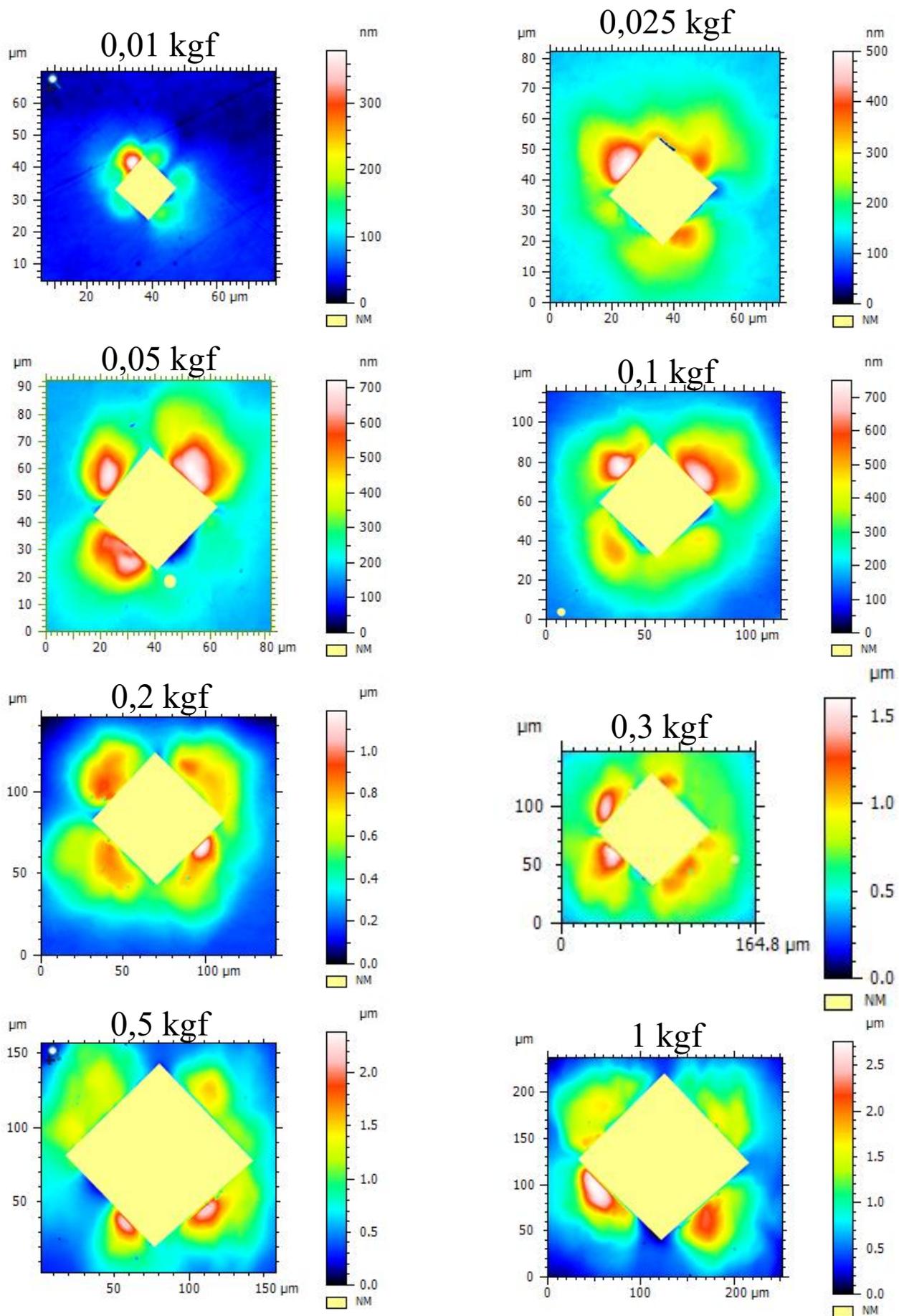


Figura 4.46: Distribuzione del pile up intorno all'impronta per ogni carico utilizzato

Tabella 4.41: rapporto tra l'altezza del pile up sul vertice e la profondità dell'impronta in funzione del carico utilizzato

kgf	vertice 1	vertice 2	vertice 3	vertice 4
0,01	4,3%	4,7%	6,2%	1,9%
0,025	2,3%	1,0%	4,4%	3,3%
0,05	1,6%	1,6%	1,9%	2,1%
0,1	2,6%	3,9%	1,7%	3,5%
0,2	2,6%	4,3%	1,1%	3,0%
0,3	1,0%	1,0%	0,5%	0,9%
0,5	0,6%	0,9%	0,5%	2,2%
1	2,2%	1,0%	0,9%	1,2%

Tabella 4.42: volume pile-up e volume impronta in funzione del carico utilizzato

kgf	volume pile up [μm^3]	volume impronta [μm^3]	rapporto volumi
0,01	75,59	163,30	0,46
0,025	417,85	988,29	0,42
0,05	1034,13	2317,32	0,45
0,1	2051,35	4951,97	0,41
0,2	3994,89	13368,27	0,30
0,3	3554,90	22321,77	0,16
0,5	5285,72	48336,11	0,11
1	33006,75	142345,32	0,23

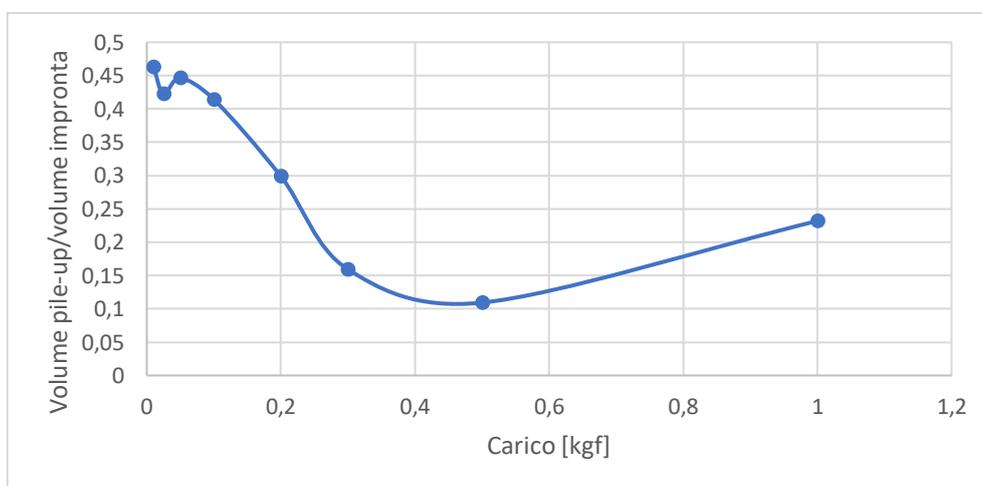


Figura 4.47: Grafico rappresentante l'andamento del rapporto tra i volumi di pile-up e i corrispondenti volumi delle impronte in funzione del carico

4.4.7 Definizione durezza di riferimento HV0

Le mappe di microdurezza riportate rappresentano esattamente il valore che la durezza assume nei vari punti. Tuttavia tali valori non sono dovuti semplicemente all'operazione di tranciatura che viene eseguita sui dischi, ma dipendono anche dalle lavorazioni precedenti subite dal disco.

Al fine di andare ad analizzare in modo più preciso la sola operazione di tranciatura nasce quindi la necessità di andare a generare un riferimento che tenga conto delle operazioni precedenti alla tranciatura, una volta ricavato occorrerà riportare a questo le mappe di durezza al fine di verificare l'influenza sulla durezza dell'operazione di tranciatura.

Il riferimento che si vuole ottenere non è un singolo valore di durezza ma è un intero profilo nella direzione dello spessore.

Per ottenere il profilo di riferimento sono stati utilizzati tre diversi provini, su di essi sono state complessivamente eseguite 21 righe di impronte distanziate 3d. Al fine di non essere influenzati nelle misure dalla zona alterata di tranciatura, la posizione delle righe è stata scelta in modo da essere sufficientemente distanti dalla zona di tranciatura. Nei 21 profili così delineati è stato riscontrato un andamento ripetitivo delle durezze, valori di durezza maggiori sui bordi del provino, in corrispondenza delle due superfici del disco e valori di durezza minori in corrispondenza del cuore del disco. Questo risultato è giustificato dal fatto che sulla lega viene eseguita una spianatura con conseguente incrudimento della zona superficiale.

Dei 21 profili tracciati è stata quindi eseguita la media in modo da ottenere un profilo di riferimento robusto che fosse rappresentativo del materiale non alterato dal processo di tranciatura.

Nelle Tabelle 4.43-4.45 vengono riportate le differenze percentuali tra le mappe di durezza e il profilo di riferimento HV0.

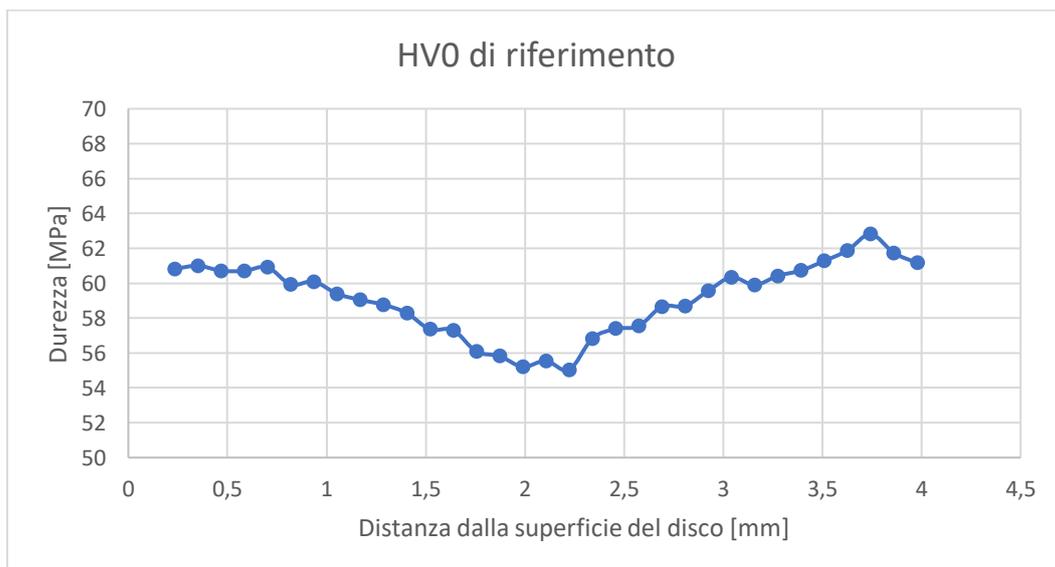


Figura 4.48: Profilo di riferimento HV0

Tabella 4.43. Prima mappa della tipologia 3d-differenza percentuale da HV0, X e Y espresse in mm

X→Y↓	0,000	0,080	0,234	0,314	0,468	0,548	0,702	0,782	0,936	1,016	1,170	1,250	1,404	1,484	1,638	1,718	1,872	1,952	2,106	2,186	2,340	2,420	2,574	2,654	2,808	2,888	3,042	3,122	3,276	3,356	3,510	3,590	3,744	3,824	3,978	
0,000	#DIV/0!	#DIV/0!	47%	46%	47%	48%	47%	50%	50%	52%	53%	53%	53%	53%	50%	50%	50%	51%	47%	46%	44%	44%	43%	39%	40%	40%	35%	33%	33%	33%	33%	22%	12%	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0,234	#DIV/0!	#DIV/0!	16%	22%	30%	30%	31%	33%	32%	33%	33%	36%	39%	39%	36%	38%	37%	41%	42%	42%	36%	35%	34%	36%	33%	30%	30%	28%	24%	18%	11%	3%	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
0,399	#DIV/0!	#DIV/0!	12%	12%	17%	21%	24%	29%	28%	28%	30%	32%	31%	32%	32%	35%	34%	33%	34%	37%	33%	32%	33%	32%	30%	26%	25%	26%	25%	24%	16%	9%	9%	13%	#DIV/0!	
0,565	#DIV/0!	#DIV/0!	8%	10%	13%	16%	18%	22%	23%	22%	21%	23%	25%	27%	27%	29%	30%	28%	33%	32%	30%	28%	26%	27%	23%	20%	21%	20%	15%	9%	9%	7%	13%	#DIV/0!		
0,730	#DIV/0!	#DIV/0!	8%	8%	9%	10%	9%	10%	10%	11%	14%	18%	19%	21%	21%	24%	24%	26%	27%	30%	25%	23%	23%	22%	21%	18%	16%	17%	14%	13%	9%	6%	8%	13%	#DIV/0!	
0,896	#DIV/0!	#DIV/0!	8%	8%	10%	10%	10%	9%	7%	8%	9%	13%	17%	20%	21%	18%	14%	18%	20%	20%	16%	20%	24%	19%	17%	17%	16%	14%	10%	6%	6%	6%	11%	#DIV/0!		
1,061	#DIV/0!	#DIV/0!	8%	7%	9%	11%	8%	8%	9%	11%	9%	7%	8%	11%	10%	11%	17%	24%	20%	19%	17%	19%	18%	15%	14%	13%	11%	12%	9%	6%	5%	4%	5%	9%		
1,227	#DIV/0!	#DIV/0!	8%	7%	7%	6%	5%	5%	2%	2%	2%	3%	4%	7%	9%	10%	10%	10%	8%	13%	14%	14%	15%	12%	12%	10%	8%	8%	6%	5%	3%	5%	6%	4%	2%	
1,392	#DIV/0!	#DIV/0!	7%	9%	8%	6%	3%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	5%	5%	7%	6%	7%	8%	7%	8%	7%	5%	4%	1%	-1%	0%	1%	2%	6%	4%		
1,558	#DIV/0!	#DIV/0!	7%	5%	3%	1%	-1%	-1%	-4%	-1%	0%	0%	0%	0%	0%	-2%	-1%	-2%	-1%	5%	4%	3%	2%	2%	3%	3%	4%	3%	3%	2%	1%	4%	7%			
1,723	#DIV/0!	#DIV/0!	3%	-1%	0%	0%	-2%	-2%	-3%	-2%	-2%	-2%	-2%	-1%	-2%	0%	0%	2%	0%	-1%	-2%	-1%	0%	0%	1%	0%	-1%	0%	3%	6%	3%	0%	1%	5%	5%	
1,889	#DIV/0!	#DIV/0!	-1%	-2%	-2%	-2%	-2%	-1%	-1%	-1%	-1%	-1%	0%	1%	0%	0%	-1%	-1%	-3%	1%	0%	-1%	-2%	0%	5%	3%	1%	2%	2%	2%	1%	2%	2%	3%	3%	
2,054	#DIV/0!	#DIV/0!	-2%	0%	-1%	-2%	0%	-1%	0%	-1%	0%	0%	-1%	-2%	-1%	-3%	-4%	-4%	-3%	-4%	-2%	-2%	-2%	-1%	-1%	1%	0%	0%	1%	2%	0%	1%	2%	0%	1%	2%
2,220	#DIV/0!	#DIV/0!	-2%	-2%	-2%	0%	1%	0%	-3%	-3%	-3%	0%	3%	0%	-4%	-3%	-4%	-1%	1%	3%	1%	0%	-1%	-2%	0%	0%	1%	1%	-1%	-1%	-2%	-2%	-1%	3%		
2,385	#DIV/0!	#DIV/0!	0%	0%	0%	-1%	-3%	-3%	-2%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	1%	-1%	-3%	-1%	1%	-1%	0%	1%	0%	0%	-1%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-1%	-2%	-1%	1%	
2,550	#DIV/0!	#DIV/0!	2%	1%	2%	1%	1%	2%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	-2%	2%	3%	0%	-5%	0%	1%	-1%	-2%	-2%	1%	1%	0%	-2%	-2%	-2%	-1%	-1%	-1%	-1%		
2,716	#DIV/0!	#DIV/0!	1%	1%	0%	0%	0%	1%	-2%	-3%	-2%	-2%	-3%	-2%	-1%	2%	1%	1%	-2%	-3%	-5%	-4%	-3%	-4%	-2%	-2%	-2%	-3%	-2%	-3%	-5%	-5%	-3%	-1%		

Tabella 4.44. Seconda mappa della tipologia 3d-differenza percentuale da HV0, X e Y espresse in mm

X→Y↓ [mm]	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223	2,340	2,457	2,574	2,691	2,808	2,925	3,042	3,159	3,276	3,393	3,510	3,627	3,744	3,861		
0,234		34%	38%	41%	41%	44%	46%	49%	50%	51%	53%	57%	56%	58%	59%	61%	65%	70%	60%	54%	53%	50%	47%	42%	39%	39%	40%	41%	41%	40%	#DIV/0!	#DIV/0!		
0,437	3%	13%	23%	25%	26%	30%	32%	33%	32%	34%	36%	35%	33%	38%	41%	43%	42%	47%	46%	42%	39%	36%	36%	35%	33%	32%	29%	27%	24%	16%	6%	#DIV/0!		
0,639	5%	10%	16%	15%	19%	24%	24%	26%	27%	28%	28%	29%	31%	37%	35%	34%	34%	36%	35%	38%	38%	36%	33%	28%	26%	27%	25%	23%	17%	11%	4%	1%		
0,842	6%	7%	9%	10%	10%	13%	15%	17%	18%	21%	24%	26%	26%	25%	23%	31%	36%	35%	29%	29%	30%	26%	24%	23%	21%	23%	22%	20%	17%	10%	2%	6%		
1,045	7%	7%	8%	10%	10%	12%	13%	16%	16%	18%	22%	21%	22%	23%	25%	24%	26%	23%	23%	23%	23%	21%	21%	20%	17%	17%	16%	15%	10%	6%	7%	11%		
1,247	8%	7%	8%	8%	7%	9%	8%	7%	5%	7%	11%	13%	14%	14%	13%	17%	19%	21%	17%	18%	20%	16%	15%	14%	13%	13%	11%	9%	7%	7%	6%	10%		
1,450	7%	3%	5%	8%	6%	5%	4%	3%	4%	4%	6%	8%	9%	11%	11%	12%	15%	14%	15%	14%	11%	12%	13%	11%	11%	11%	7%	3%	4%	4%	5%	9%		
1,653	7%	5%	3%	3%	2%	1%	-3%	0%	3%	3%	3%	5%	5%	6%	6%	8%	9%	11%	9%	10%	13%	10%	9%	8%	9%	11%	9%	6%	3%	5%	7%	8%		
1,855	4%	3%	3%	-2%	-1%	1%	0%	0%	1%	1%	3%	6%	3%	2%	4%	7%	4%	3%	3%	5%	7%	7%	8%	7%	5%	4%	6%	8%	7%	6%	5%	8%		
2,058	1%	2%	3%	3%	3%	4%	2%	4%	5%	5%	4%	5%	3%	5%	4%	4%	3%	6%	5%	5%	5%	4%	6%	5%	4%	4%	3%	5%	6%	7%	8%	7%		
2,260	1%	0%	2%	2%	1%	2%	3%	4%	2%	2%	2%	2%	1%	2%	2%	2%	1%	2%	4%	8%	6%	6%	3%	3%	2%	4%	5%	6%	6%	5%	6%	5%	6%	
2,463	2%	1%	2%	2%	2%	3%	2%	2%	3%	2%	1%	5%	8%	6%	2%	3%	3%	4%	1%	1%	2%	1%	2%	1%	1%	1%	3%	4%	4%	5%	3%	2%	4%	
2,666	2%	1%	1%	4%	2%	1%	1%	3%	2%	1%	3%	1%	1%	3%	5%	3%	4%	6%	3%	2%	3%	2%	3%	3%	3%	3%	2%	3%	3%	3%	3%	3%	1%	1%
2,868	2%	1%	0%	1%	1%	2%	1%	3%	5%	3%	1%	3%	4%	4%	2%	4%	4%	5%	3%	3%	4%	3%	4%	4%	3%	2%	3%	3%	2%	2%	2%	2%	3%	

Tabella 4.45. Terza mappa della tipologia 3d-differenza percentuale da HV0, X e Y espresse in mm

X→Y↓	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223	2,340	2,457	2,574	2,691	2,808	2,925	3,042	3,159	3,276	3,393	3,510	3,627	3,744	3,861	3,978
0,234		#DIV/0!	#DIV/0!	52%	55%	62%	59%	59%	61%	62%	60%	58%	61%	66%	64%	62%	60%	59%	49%	43%	41%	37%	37%	35%	34%	35%	31%	27%	16%	4%	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
0,437	34%	34%	36%	36%	35%	37%	35%	34%	31%	31%	30%	34%	35%	38%	39%	41%	40%	44%	43%	39%	37%	30%	25%	25%	25%	24%	21%	18%	14%	7%	0%	#DIV/0!	#DIV/0!
0,639	21%	19%	20%	23%	24%	27%	27%	29%	27%	25%	27%	30%	27%	26%	29%	32%	33%	37%	30%	27%	26%	24%	26%	27%	24%	24%	19%	16%	8%	0%	-3%	-4%	#DIV/0!
0,842	7%	6%	5%	10%	14%	15%	14%	17%	20%	20%	21%	22%	21%	25%	26%	25%	22%	25%	22%	22%	23%	23%	25%	22%	20%	18%	15%	12%	8%	5%	2%	2%	#DIV/0!
1,045	5%	5%	6%	9%	8%	9%	9%	10%	12%	14%	17%	21%	21%	24%	20%	17%	18%	19%	20%	23%	22%	20%	19%	16%	13%	13%	11%	9%	6%	2%	3%	7%	#DIV/0!
1,247	4%	4%	6%	6%	5%	7%	7%	8%	7%	6%	6%	8%	9%	13%	16%	14%	9%	15%	15%	11%	9%	8%	9%	8%	8%	8%	7%	5%	2%	2%	2%	6%	-4%
1,450	3%	3%	4%	3%	0%	-1%	-1%	0%	0%	2%	4%	5%	8%	7%	8%	6%	6%	6%	2%	1%	7%	12%	10%	7%	5%	4%	2%	1%	0%	1%	5%	0%	
1,653	2%	2%	3%	1%	0%	0%	-3%	-3%	-3%	-2%	-1%	0%	2%	3%	2%	0%	5%	6%	5%	5%	4%	6%	5%	4%	3%	0%	-1%	-3%	0%	3%	4%	3%	
1,855	0%	2%	0%	-1%	-2%	-2%	-2%	-1%	-1%	-2%	-3%	0%	-4%	-3%	-3%	-3%	-1%	3%	0%	0%	-1%	-3%	1%	3%	1%	0%	-1%	0%	-1%	0%	1%	2%	3%
2,058	-2%	-3%	-3%	-3%	-4%	-2%	-1%	-4%	-6%	-5%	-3%	-2%	-3%	-2%	-3%	-2%	-3%	-2%	-4%	-3%	0%	-1%	0%	-2%	-2								

4.4.8 Metodo di correlazione con la prova di trazione

Nel presente paragrafo si vuole trovare una correlazione tra i valori di durezza calcolati e la tensione di snervamento.

La correlazione nel caso degli acciai può essere eseguita utilizzando tabelle standard di conversione come quelle riportate nella EN ISO 18265 [34]. Al contrario nel caso delle leghe di alluminio non esistono ancora correlazioni standard.

Prendendo in considerazione gli studi descritti nella sezione 2.2, si può notare che la correlazione venga spesso identificata utilizzando metodi che coinvolgono la prova di trazione in combinazione a quella di durezza.

Falsafi e Demirci [17] utilizzano una relazione lineare tra durezza e carico di snervamento. Nel metodo descritto ottengono una relazione tra durezza e deformazione plastica utilizzando valori di durezza calcolati e valori di deformazione plastica valutati utilizzando gli elementi finiti.

Riconducendosi a quanto appena descritto, per la ricerca di un nuovo metodo di correlazione è stata utilizzata una relazione lineare tra durezza e snervamento. Diversamente da quanto eseguito da Falsafi e Demirci però per ricavare la relazione tra le due grandezze vengono utilizzate le prove di durezza e la prova di trazione.

Come già descritto, le prove di microdurezza eseguite nella zona non alterata dal processo di tranciatura hanno permesso di ricavare il profilo di riferimento HV0. Il profilo di riferimento è stato quindi utilizzato per ricavare un unico valore di durezza che potesse essere relazionato con il valore di snervamento ottenuto eseguendo una prova di trazione su di un provino ricavato dal disco di partenza (Figura 4.49).



Figura 4.49: Provino utilizzato durante la prova di trazione

La relazione utilizzata per correlare la durezza con la tensione di snervamento è la seguente:

$$HV = \alpha \sigma_y \quad (4.1)$$

α risulta essere l'incognita dell'equazione e viene dunque ricavata nel seguente modo:

$$\alpha = \frac{HV0^*}{\sigma_y^*} \quad (4.2)$$

In cui:

- σ_y^* rappresenta la tensione di snervamento ottenuta dalla prova di trazione eseguita sul provino in Figura 4.49
- $HV0^*$ è il valore che si ottiene eseguendo la mediana su tutti i valori che compongono il profilo di riferimento HV0

Nel caso in esame risulta

$$\sigma_y^* = 120,91 \text{ MPa}$$

$$HV0^* = 59,57 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 0,493$$

Una volta ricavato il valore di α è stata trovata la relazione tra le due grandezze di interesse. Di conseguenza è stata eseguita l'operazione $\sigma_y = \frac{HV}{\alpha}$ per ogni singolo valore facente parte delle mappe di durezza al fine di ottenere mappe con i valori delle tensioni di snervamento.

I risultati vengono riportati in Tabella 4.46-4.48.

Tabella 4.46. Prima mappa della tipologia 3d-tensioni di snervamento espresse in MPa, X e Y espresse in mm

X→Y↓	0,000	0,080	0,234	0,314	0,468	0,548	0,702	0,782	0,936	1,016	1,170	1,250	1,404	1,484	1,638	1,718	1,872	1,952	2,106	2,186	2,340	2,420	2,574	2,654	2,808	2,888	3,042	3,122	3,276	3,356	3,510	3,590	3,744	3,824	3,978		
0,000			181,0	181,0	181,7	182,4	182,4	182,4	183,1	183,1	183,1	183,1	180,6	178,2	174,2	170,2	169,6	169,0	166,2	163,4	165,6	167,7	166,5	165,2	167,1	169,0	165,3	161,6	162,8	164,0	152,2	140,3	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		
0,234	#DIV/0!	#DIV/0!	143,2	151,5	159,9	160,7	161,6	161,3	161,0	160,1	159,3	161,6	164,0	161,3	158,7	157,0	155,3	157,9	160,4	158,4	156,4	157,3	158,1	159,9	161,6	160,4	159,3	158,4	157,5	152,4	147,3	139,0	130,8	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
0,399	#DIV/0!	#DIV/0!	138,5	138,4	143,9	149,3	153,2	157,0	155,6	157,0	155,3	153,6	153,9	153,9	154,2	151,5	148,8	150,9	153,1	153,4	153,6	155,3	157,0	154,8	152,5	152,8	153,1	152,8	153,1	152,8	152,5	144,5	136,5	139,1	141,7	#DIV/0!	
0,565	#DIV/0!	#DIV/0!	133,8	136,6	139,3	142,8	146,2	148,0	149,9	147,3	144,7	146,5	148,3	147,8	147,3	147,3	146,0	144,7	148,6	152,5	150,9	149,3	150,1	150,9	148,8	146,7	146,7	146,7	141,4	136,1	136,5	137,0	141,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
0,730	#DIV/0!	#DIV/0!	133,4	133,4	134,7	136,1	135,2	134,3	133,8	133,4	136,8	140,3	140,3	140,3	140,8	141,3	141,0	140,8	143,3	145,7	144,7	143,7	144,2	144,2	143,7	142,7	142,2	141,7	140,3	138,9	136,1	133,4	137,3	141,3	#DIV/0!	#DIV/0!	
0,896	#DIV/0!	#DIV/0!	132,9	132,9	134,3	135,6	135,6	135,6	132,9	130,5	131,2	135,0	138,9	139,6	140,3	134,9	129,5	132,3	135,2	134,5	133,8	139,3	144,7	142,0	139,3	141,0	142,7	141,3	139,8	135,7	131,6	133,2	134,7	139,1	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,061	#DIV/0!	#DIV/0!	132,9	132,5	134,5	136,5	133,9	131,2	132,5	133,8	130,6	127,4	128,2	129,1	127,8	126,6	132,5	138,4	135,5	135,5	138,4	137,5	136,5	136,3	136,1	136,3	136,5	133,9	131,2	131,2	131,2	131,2	134,1	137,0	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,227	#DIV/0!	#DIV/0!	132,9	132,5	132,1	131,2	130,3	127,4	124,5	123,3	122,2	122,8	123,3	124,9	126,6	125,5	124,5	123,2	121,8	126,5	131,2	132,5	133,8	133,6	132,7	132,1	131,0	129,9	129,1	128,2	131,2	131,2	131,2	130,9	135,6	130,9	126,1
1,392	#DIV/0!	#DIV/0!	132,5	134,7	133,0	131,2	127,5	123,7	122,4	121,0	120,4	119,9	118,0	116,2	116,5	116,9	117,3	117,6	118,7	119,9	122,2	124,5	126,2	127,8	128,9	129,9	128,0	126,1	124,2	122,2	124,6	127,0	130,2	133,4	129,3	#DIV/0!	
1,558	#DIV/0!	#DIV/0!	132,1	129,5	127,0	125,0	122,9	120,1	117,3	117,3	120,2	119,5	118,7	116,2	113,7	112,1	110,6	112,3	114,0	116,8	119,5	119,9	120,2	121,0	121,8	124,2	126,6	126,4	126,1	126,8	127,4	128,0	128,6	130,6	132,5	#DIV/0!	#DIV/0!
1,723	#DIV/0!	#DIV/0!	126,9	122,9	122,9	122,9	121,0	119,1	118,4	117,6	117,4	117,3	116,2	115,1	114,2	113,3	113,9	114,4	112,3	110,3	112,5	114,7	117,1	119,5	120,2	121,0	121,4	121,8	126,3	130,8	128,5	126,1	129,1	132,1	130,1	#DIV/0!	
1,889	#DIV/0!	#DIV/0!	121,8	121,2	120,6	121,0	121,4	121,0	120,6	119,7	118,7	118,4	118,0	117,4	116,9	114,3	111,6	110,6	109,6	109,6	112,3	115,1	114,9	114,7	119,6	124,5	124,1	123,7	124,5	125,3	125,7	126,1	127,8	129,5	128,6	127,8	
2,054	#DIV/0!	#DIV/0!	121,4	123,7	122,2	120,6	121,2	121,8	120,8	119,9	119,7	119,5	116,9	114,4	113,7	113,0	110,3	107,6	108,1	108,6	111,2	113,7	114,9	116,2	118,2	120,2	121,4	122,6	122,7	122,9	125,4	127,8	127,2	126,6	127,6	#DIV/0!	
2,220	#DIV/0!	#DIV/0!	121,0	121,2	121,4	123,4	125,3	122,0	118,7	117,5	116,2	118,8	121,4	116,7	112,0	110,5	108,9	111,3	113,7	115,1	116,5	116,2	115,8	117,3	118,7	121,0	123,3	122,6	121,8	121,8	123,6	125,3	126,4	127,4	127,4	127,4	
2,385	#DIV/0!	#DIV/0!	123,2	123,3	122,8	122,2	120,3	118,4	119,3	120,2	120,1	119,9	118,7	117,6	116,2	114,7	111,8	108,9	111,1	113,3	114,8	116,2	117,5	118,7	119,5	120,2	119,5	120,1	120,6	122,4	124,1	124,3	124,5	125,4	#DIV/0!	#DIV/0!	
2,550	#DIV/0!	#DIV/0!	125,3	125,3	125,3	124,9	124,5	123,7	122,9	122,0	121,0	119,7	118,4	116,4	114,4	115,8	117,3	112,5	107,6	111,9	116,2	115,1	114,0	117,1	120,2	122,0	123,7	122,2	120,6	121,4	122,2	124,0	125,7	124,5	123,3	#DIV/0!	
2,716	#DIV/0!	#DIV/0!	124,9	124,5	123,7	122,9	123,1	123,3	120,1	116,9	116,9	116,9	115,3	113,7	114,9	116,2	114,6	113,0	110,5	108,0	109,8	111,6	113,0	114,4	116,4	118,4	118,7	119,1	119,9	120,6	120,2	119,9	121,0	122,2	122,8	#DIV/0!	

Tabella 4.47. Seconda mappa della tipologia 3d-tensioni di snervamento espresse in MPa, X e Y espresse in mm

X→Y↓	0,234	0,351	0,468	0,585	0,702	0,819	0,936	1,053	1,170	1,287	1,404	1,521	1,638	1,755	1,872	1,989	2,106	2,223	2,340	2,457	2,574	2,691	2,808	2,925	3,042	3,159	3,276	3,393	3,510	3,627	3,744	3,861		
0,234		165,8	170,0	174,1	174,8	175,5	177,5	179,6	179,6	181,0	182,4	181,3	180,3	180,6	181,0	185,7	185,7	190,4	185,0	179,6	179,2	178,9	175,2	171,5	170,6	169,6	171,9	174,1	175,1	176,1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
0,437	127,4	139,7	152,0	153,9	155,9	158,4	161,0	159,9	158,7	159,9	161,0	157,6	154,2	156,7	159,3	159,9	160,4	164,4	168,3	165,6	162,8	162,5	162,2	162,8	163,4	161,0	158,7	156,7	154,7	145,2	135,6	#DIV/0!	#DIV/0!	
0,639	129,1	135,6	142,9	142,2	146,6	150,9	151,2	151,5	152,0	152,5	151,2	149,9	152,9	155,9	152,9	149,9	150,7	151,5	155,9	160,4	161,0	161,6	158,2	154,7	154,5	154,2	153,1	152,0	145,7	139,3	133,2	127,0	#DIV/0!	
0,842	130,8	132,3	133,8	135,0	136,1	138,0	139,8	140,8	141,7	144,2	146,7	146,5	146,2	142,6	138,9	146,3	153,6	151,2	148,8	150,1	151,5	149,9	148,3	148,3	149,1	149,9	147,5	145,2	142,7	137,6	129,9	133,2	#DIV/0!	#DIV/0!
1,045	131,9	132,9	133,4	135,6	136,1	136,5	137,9	139,3	138,6	137,9	140,1	142,2	140,8	139,3	139,6	139,8	140,1	140,3	141,8	143,2	143,5	143,7	144,2	144,7	143,5	142,2	141,8	141,3	137,1	132,9	136,1	139,3	#DIV/0!	
1,247	132,9	132,9	132,9	132,5	132,1	132,1	128,7	125,3	128,0	130,8	131,6	132,5	130,1	127,8	131,3	134,7	134,7	134,7	137,3	139,8	138,2	136,5	138,4	137,0	135,6	134,1	132,5	134,1	135,6	137,5	137,7	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,450	132,5	127,8	130,0	132,9	130,6	128,2	126,4	124,5	124,5	125,3	126,1	126,4	126,6	125,7	124,9	126,8	126,8	131,5	134,3	130,0	131,7	133,9	136,1	135,6	135,2	131,3	127,4	129,1	130,8	133,4	136,1	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,653	132,1	129,5	127,0	126,8	126,6	122,5	118,4	121,0	123,7	122,8	121,8	122,2	122,6	120,6	118,7	121,0	123,3	124,3	125,3	128,5	131,6	131,2	130,8	131,6	132,9	133,4	130,8	128,2	132,2	136,1	135,4	#DIV/0!	#DIV/0!	
1,855	128,3	127,0	127,0	120,6	121,8	122,9	122,0	121,0	121,0	121,0	122,0	122,9	119,6	116,2	118,0	119,9	117,7	115,4	118,8	122,2	124,6	127,0	128,2	129,5	128,2	127,0	130,0	132,9	133,2	133,4	134,1	134,7	#DIV/0!	#DIV/0!
2,058	124,5	125,8	127,0	127,4	127,8	126,4	124,9	125,5	126,1	124,7	123,3	121,8	120,2	119,3	118,4	117,1	115,8	118,2	120,6	121,8	122,9	124,3	125,7	126,6	127,4	126,8	126,1	129,1	132,1	134,8	137,5	134,1	#DIV/0!	#DIV/0!
2,260	124,9	123,7	126,2	125,7	125,1	124,5	125,5	126,6	124,4	122,2	120,6	119,1	117,8	116,5	115,5	114,4	114,2	114,0	119,7	125,3	123,6	121,8	123,0	124,1	125,1	126,1	128,2	130,3	131,9	133,4	133,4	134,4	133,4	#DIV/0!
2,463	125,3	125,3	125,3	125,7	126,1	125,1	124,1	124,1	122,9	121,4	119,9	122,8	125,7	120,4	115,1	115,5	115,8	116,4	116,9	118,2	119,5	120,2	121,0											

5 CONCLUSIONI

Con il presente lavoro, utilizzando gli strumenti messi a disposizione da LBN Ricerca, AGLA PT e Politecnico di Torino, è stata realizzata una caratterizzazione del processo di tranciatura di leghe di alluminio tramite l'utilizzo di dati sperimentali.

In particolare, utilizzando gli strumenti per la profilometria è stato possibile andare a definire il profilo, la superficie ed i parametri di rugosità per la superficie tranciata, presente sul diametro esterno del disco tranciato. Successivamente un'analisi più approfondita è stata condotta tramite l'esecuzione di mappe di microdurezza. La generazione di tali mappe ha permesso di andare ad individuare le proprietà meccaniche del materiale in modo locale. La veridicità dei dati sperimentali ottenuti è stata testata tramite una serie di verifiche.

In primo luogo, è stata eseguita un'analisi microstrutturale. Durante questa operazione si è dimostrato che la variazione delle proprietà meccaniche è legata alla variazione della dimensione del grano e non alla concentrazione chimica degli elementi. E' stato inoltre dimostrato che l'impronta generata durante le prove, eseguite a 0,2 kgf, ricopre una porzione di superficie statisticamente rappresentativa della metallografia, poiché comprende una quantità sufficiente di matrice e di intermetallici.

Come secondo passaggio è stato verificato che la distanza imposta tra un'impronta e l'adiacente fosse tale da garantire che non vi fossero influenze reciproche sulle misure. Bisogna infatti considerare che una seconda impronta effettuata ad una distanza troppo piccola rispetto alla prima potrebbe determinare un valore di durezza falsato rispetto a quello reale a causa della sovrapposizione dei campi tensionali indotti dalla deformazione plastica. Tale verifica è stata eseguita generando mappe con impronte a diverse distanze. E' stato dimostrato statisticamente che non si vedono differenze sistematiche tra i risultati ottenuti dalle mappe con impronte a diversa distanza, dunque tra le distanze testate è stata scelta la minore e le mappe eseguite con questo criterio sono state scelte per l'esecuzione dell'analisi.

Come terzo passaggio è stata verificata l'influenza del pile up sulle misure eseguite. L'ammontare del pile up è stato analizzato graficamente sui lati dell'impronta e quantitativamente sui vertici. E' stato dimostrato che la sua influenza sui dati acquisiti sperimentalmente è di entità irrilevante.

Una volta eseguite le verifiche sui dati ottenuti è stato ricavato un profilo di riferimento ad una distanza tale dal profilo tranciato che gli conferisse la proprietà di essere poco influenzato dall'operazione di tranciatura. Questo passaggio ha permesso di ottenere un riferimento che non fosse un semplice valore di durezza ma un intero profilo che tenesse conto delle operazioni eseguite sul disco. Avendo a disposizione il profilo di riferimento, è stato possibile analizzare la superficie tranciata in modo più puntuale. Il profilo è infatti stato utilizzato come riferimento per il calcolo della differenza percentuale di ogni punto della mappa dal profilo stesso.

Infine per eseguire una caratterizzazione più completa, le mappe di microdurezza sono state convertite in mappe di tensione di snervamento. L'operazione è stata eseguita utilizzando una relazione lineare tra le due grandezze, il coefficiente di proporzionalità è stato ricavato rapportando i dati sperimentali di microdurezza con i dati derivanti dalla prova di trazione. Il nuovo metodo, così delineato, sfrutta la creazione di un profilo di riferimento HV0 per la definizione di un parametro di durezza che possa essere rapportato ai risultati della prova di trazione. Il metodo ha dato buoni risultati nella correlazione con lo snervamento.

Nota sulla riservatezza industriale

Si precisa che durante il periodo di tirocinio curriculare, la Dott.ssa Casavecchia Maria Chiara potrebbe essere venuta a conoscenza e aver incluso tra gli argomenti della presente tesi di laurea nozioni relative al c.d. know-how aziendale, tecnologico e di ricerca e sviluppo delle società L.B.N. Ricerca S.r.l. e Agla Power Transmission S.p.A., per le quali le suddette società rivendicano ogni diritto di privativa industriale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Y. Murashkin, N. A. Enikeev, V. U. Kazykhanov, I. Sabirov, and R. Z. Valiev, “Physical simulation of cold rolling of ultra-fine grained al 5083 alloy to study microstructure evolution,” *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 35, no. 1, pp. 75–85, 2013.
- [2] European Aluminium Association, *Materials – Alloy constitution 2 Alloy constitution*. 2002.
- [3] Bs En 573-2, “Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 2. Chemical symbol based designation system,” *Standards*, vol. 2, pp. 1–10, 1995.
- [4] “BSI Standards Publication Aluminium and aluminium alloys — Wrought products — Temper designations,” 2017.
- [5] A. Sharma, Y. S. Shin, and J.-P. Jung, “Influence of Various Additional Elements in Al Based Filler Alloys for Automotive and Brazing Industry,” *J. Weld. Join.*, vol. 33, no. 5, pp. 1–8, 2015, doi: 10.5781/jwj.2015.33.5.1.
- [6] J. Hirsch and T. Al-Samman, “Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications,” *Acta Mater.*, vol. 61, no. 3, pp. 818–843, 2013, doi: 10.1016/j.actamat.2012.10.044.
- [7] M. Tisza and I. Czinege, “Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts,” *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 1, no. 4, pp. 229–238, 2018, doi: 10.1016/j.ijlmm.2018.09.001.
- [8] S. J. Doshi, A. V Gohil, N. Mehta, and S. Vaghasiya, “Challenges in Fusion Welding of Al alloy for Body in White,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 6370–6375, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.12.247.
- [9] J. Hirsch, “Recent development in aluminium for automotive applications,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 24, no. 7, pp. 1995–2002, 2014, doi: 10.1016/S1003-6326(14)63305-7.
- [10] European Aluminium Association, “Applications – Power train – Pistons,” *Alum. Automot. Man.*, pp. 1–2, 2011.
- [11] T. Body, G. Arrow, P. G. Arrow, and M. S. Arrows, “Applications – Car Body Introduction,” pp. 1–4, 2013.
- [12] European Aluminium Association, “Applications – Chassis & Suspension – Subframes,” *Alum. Automot. Man.*, pp. 1–16, 2011.
- [13] BSI, “BS EN ISO 6507-1:2005 Metallic materials – Vickers hardness test,” 2005.
- [14] A. Mkaddem, R. Bahloul, P. Dal Santo, and A. Potiron, “Experimental characterisation in sheet forming processes by using Vickers micro-hardness technique,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 180, no. 1–3, pp. 1–8, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.04.006.
- [15] A. Mkaddem, F. Gassara, and R. Hambli, “A new procedure using the microhardness technique for sheet material damage characterisation,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 178, no. 1–3, pp. 111–118, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.02.018.
- [16] M. Muller, S. M. Barrans, and L. Blunt, “Predicting plastic deformation and work hardening during V-band formation,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 4, pp. 627–636, 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.11.020.

- [17] J. Falsafi and E. Demirci, "Micro-indentation based study on steel sheet degradation through forming and flattening: Toward a predictive model to assess cold recyclability," *Mater. Des.*, vol. 109, pp. 456–465, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.07.075.
- [18] E. Kanca, O. Eyercioglu, I. H. Karahan, A. Günen, and K. Göv, "Effects of blanking speed on the shear surface of mild steel (St37)," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 130, no. 1, pp. 370–374, 2016, doi: 10.12693/APhysPolA.130.370.
- [19] K. B. Sidhu, I. Peshekhodov, and B. A. Behrens, "Numerical Modelling of High Speed Blanking Considering Thermoviscoplastic Effects," *3rd Int. Conf. High Speed Form.*, no. January, pp. 97–106, 2008, doi: 10.17877/DE290R-8637.
- [20] R. Hambli, "Prediction of burr height formation in blanking processes using neural network," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 44, no. 10, pp. 2089–2102, 2002, doi: 10.1016/S0020-7403(02)00168-6.
- [21] A. Mahmudah, G. Kiswanto, and D. Priadi, "Analysis of shear edge quality for different punch velocities in micro-blanking process," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 6, no. 4, pp. 279–284, 2017, doi: 10.18178/ijmerr.6.4.279-284.
- [22] O. Engler, K. Kuhnke, and J. Hasenclever, "Development of intermetallic particles during solidification and homogenization of two AA 5xxx series Al-Mg alloys with different Mg contents," *J. Alloys Compd.*, vol. 728, pp. 669–681, 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2017.09.060.
- [23] ISO, "BSI Standards Publication Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture : Areal Part 2 : Terms , definitions and surface," 2012.
- [24] ISO 4287:1997, "Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Terms, definitions and surface texture parameters," *Int. Organ. Stand.*, 1997.
- [25] B. S. E. N. Iso, "Geometric Product Specifications (GPS) — Surface texture : Profile method — Nominal characteristics of contact (stylus) instruments —," no. 1, 1998.
- [26] B. Standard, "Geometrical product specifications (GPS) Đ Surface texture : Profile method ; surfaces having stratified functional properties Đ," no. 1, 2000.
- [27] IATF 16949_2016 .
- [28] K. Hardness *et al.*, "Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials BT - Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials," vol. i, pp. 1–27, 17AD, doi: 10.1520/E0092-17.2.
- [29] British Standards Institution, "BS EN ISO 6507 - 1 : 2018 BSI Standards Publication Metallic materials - Vickers hardness test," 2018, [Online]. Available: <https://bsol.bsigroup.com/>.
- [30] Joint Committee For Guides In Metrology, "Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement," *Int. Organ. Stand. Geneva ISBN*, vol. 50, no. September, p. 134, 2008, [Online]. Available: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>.
- [31] STANDARD, "EA-4/02M [Uncertainty Evaluation]," no. September, 2013.
- [32] M. Hardiman, T. J. Vaughan, and C. T. McCarthy, "The effects of pile-up, viscoelasticity and hydrostatic stress on polymer matrix nanoindentation," *Polym. Test.*, vol. 52, pp. 157–166, 2016, doi: 10.1016/j.polymertesting.2016.04.003.
- [33] M. Y. N'jock *et al.*, "A criterion to identify sinking-in and piling-up in indentation of materials," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 90, pp. 145–150, 2015, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2014.11.008.

- [34] International Organization for Standardization (ISO), “BS EN ISO 18265 : 2013 BSI Standards Publication Metallic materials — Conversion of hardness values,” 2013.

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questo lavoro e di questi anni di studio vorrei ringraziare tutte le persone che mi hanno aiutato a raggiungere questo importante traguardo.

Per primi, il Prof. Gianfranco Genta e il Dott. Giacomo Maculotti per la disponibilità e la professionalità offerta durante i mesi dedicati al lavoro di tesi.

Con profonda riconoscenza ringrazio le aziende LBN Ricerca, AGLA PT e tutte le persone che vi ho incontrato nei mesi di permanenza. Mi avete accolta e fatto vivere una prima esperienza lavorativa che mi ha arricchito professionalmente e personalmente. Ringrazio in particolar modo l'Ing. Roberto Cagliero per il supporto quotidiano, i consigli, gli insegnamenti e l'incoraggiamento.

Ringrazio le mie amiche di sempre e tutte le persone con cui ho condiviso parte di questi anni di studio, siete stati preziosi.

Un grazie di cuore a Jacopo, per l'immensa pazienza.

Infine un sincero grazie alla mia famiglia ma soprattutto ai miei genitori, mi avete supportata, incoraggiata e seguita sempre. A voi va riconosciuto il contributo più grande.