



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria Meccanica

**Effetti microstrutturali su componenti in acciaio per uso ferroviario di misure senza contatto effettuate con sorgenti laser**

**Microstructural effects on steel components for railway use of non-contact measurements carried out with laser sources**

Relatrice:

**Prof. ssa Eleonora Santecchia**

Tesi di laurea di:

**Rocco D'Abramo**

**A.A 2023/2024**

## **Introduzione.**

### **Capitolo 1. Problematiche dei sistemi di misura senza contatto**

1.1 Precisione delle misure

1.2 Interferenze ambientali

1.3. Calibrazione del dispositivo

### **Capitolo 2. Normative**

2.1. Norme di sicurezza

2.2. Certificazioni richieste

2.3. Limiti di utilizzo

### **Capitolo 3. Applicazioni del rilevamento laser senza contatto**

3.1. Misure industriali

3.2. Misure mediche

3.3. Misure ambientali

3.4. Misure architettoniche

## **Capitolo 4- Tipologie di acciai strutturali per uso ferroviario**

4.1. Acciai al carbonio

4.2. Acciai legati

4.3. Acciai inossidabili

4.4 Caratteristiche degli acciai strutturali per uso ferroviario

4.5 Resistenza alla corrosione

Resistenza meccanica

4.7 Durezza

4.8 Microstruttura degli acciai strutturali per uso ferroviario

4.9 Proprietà meccaniche degli acciai strutturali per uso ferroviario

4.10 Resistenza alla trazione

4.11 Tenacità

4.12 Allungamento

## **Capitolo 5. Trattamenti termici degli acciai strutturali per uso ferroviario**

5.1. Ricottura

5.2. Normalizzazione

5.3. Tempra

## **Capitolo 6. Prove di laboratorio per la valutazione delle proprietà degli acciai strutturali per uso ferroviario**

6.1. Prova di trazione

6.2. Prova di durezza

6.3. Prova di resilienza

## **Capitolo 7. Normative e standard per gli acciai strutturali per uso ferroviario**

7.1. UNI EN 13674-1

7.2. UNI EN 13674-2

7.3. UNI EN 13674-3

## **Capitolo 8 – Procedure sperimentali**

8.1. Caratterizzazione Laser

8.2. Microscopia ottica

8.3. Microscopia elettronica

8.4. Microscopia stereoscopica

8.5. Durezza

8.6. Microdurezza

## **9 - Risultati sperimentali**

9.1- Micrografie dei provini

9.2 Procedure per determinare il materiale in analisi

9.3 Risultati durezza

9.4 Risultati Microscopia elettronica

9.5 Risultati stereo microscopia

## **10 – Conclusioni**

## **Introduzione:**

Negli ultimi decenni, l'uso delle tecnologie laser ha rivoluzionato numerosi settori industriali, inclusa la manutenzione e l'analisi dei componenti ferroviari. In questo contesto, la mia tesi si propone di analizzare l'effetto delle bruciature lasciate da una sorgente laser sulla superficie di campioni di acciaio prelevati da componenti ferroviari, in particolare dagli assali dei treni. Questa ricerca si inserisce nell'ambito della valutazione dei danni e dell'integrità strutturale dei componenti critici del settore ferroviario, con l'obiettivo di migliorare la sicurezza e l'affidabilità del trasporto su rotaia.

Per lo studio, ho proceduto prelevando i campioni da un assale ferroviario integro. Questi campioni sono stati successivamente preparati attraverso un processo di lucidatura a specchio, necessario per garantire una superficie uniforme e priva di imperfezioni, ideale per le successive analisi con microscopia ottica ed elettronica. Il processo di lucidatura è stato cruciale per ottenere immagini di alta qualità, permettendo un'analisi dettagliata delle bruciature causate dal laser.

L'esperimento ha coinvolto l'utilizzo di un laser a diverse potenze per colpire i campioni di acciaio. A potenze più basse, le bruciature risultanti non erano visibili ad occhio nudo, evidenziando la necessità di tecniche avanzate di microscopia per rilevare e analizzare i danni. Con l'aumentare della potenza del laser, le bruciature diventavano progressivamente più evidenti, fornendo un'interessante gamma di dati per l'analisi delle variazioni strutturali e delle modifiche superficiali indotte dal laser.

L'analisi microscopica, sia ottica che elettronica, ha permesso di osservare dettagliatamente le caratteristiche delle bruciature, rivelando differenze significative tra i campioni esposti a diverse potenze del laser. Attraverso queste osservazioni, è stato possibile dedurre la

correlazione tra l'intensità del laser e i danni strutturali superficiali, contribuendo alla comprensione dei limiti di tolleranza dell'acciaio utilizzato negli assali ferroviari.

Questa ricerca ha implicazioni rilevanti per la manutenzione predittiva e preventiva dei treni. Comprendere come le bruciature laser influenzano la superficie degli assali può aiutare a sviluppare nuove strategie per monitorare e prevenire i danni, migliorando la sicurezza operativa dei sistemi ferroviari. Inoltre, i risultati ottenuti possono fornire una base per ulteriori studi sull'uso dei laser nel settore ferroviario, sia per l'analisi dei materiali che per le operazioni di manutenzione e riparazione.

In conclusione, questa tesi offre un contributo significativo alla conoscenza degli effetti dei laser sulle superfici di acciaio degli assali ferroviari, evidenziando l'importanza delle tecnologie di microscopia avanzata per l'analisi dei danni. I risultati ottenuti non solo arricchiscono il campo della ricerca sui materiali, ma offrono anche spunti pratici per migliorare la gestione e la manutenzione dei componenti ferroviari, con potenziali benefici per la sicurezza e l'efficienza del trasporto su rotaia.

## **Capitolo 1 – Problematiche dei sistemi di misura senza contatto**

Studiando la metrologia laser senza contatto, emergono criticità da valutare attentamente. Sebbene la tecnologia sia estremamente avanzata ed in grado di fornire dati di elevatissima precisione, la misurazione stessa richiede un esame estremamente attento di una molteplicità di fattori come l'accuratezza delle rilevazioni effettuate, le possibili distorsioni causate dall'ambiente circostante e la necessità di una corretta taratura del dispositivo in uso al fine di ottenere risultati accurati e attendibili. Tali elementi sono di fondamentale importanza in quanto rappresentano le basi per ottenere informazioni estremamente precise e affidabili che possono, ad esempio, essere utilizzate in ambiti scientifici, industriali oppure per fini di ricerca e sviluppo. È, pertanto, indispensabile garantire una valutazione e una gestione accurata di tali fattori, in modo da minimizzare qualsiasi possibile errore e ottenere risultati riproducibili e coerenti, in linea con gli standard richiesti. La metrologia laser senza contatto, se opportunamente compresa e ben gestita, rappresenta un potente strumento in grado di fornire dati di grande precisione, aprendo la strada a numerose applicazioni e benefici nei diversi settori. (1)

### **1.1. Precisione delle misure**

L'affidabilità delle rilevazioni laser senza contatto è di importanza vitale nell'ambito delle applicazioni industriali e scientifiche. Questa avanzata tecnica di misurazione promette di catturare dati con una precisione millimetrica straordinaria, consentendo di analizzare e monitorare con estrema precisione oggetti e superfici. Tuttavia, è fondamentale tenere presente che la precisione delle misurazioni può essere influenzata da diverse variabili. Uno

dei fattori chiave che incide sulla giustezza delle misurazioni è la risoluzione del dispositivo laser utilizzato. Più alta è la risoluzione, maggiore sarà la precisione dei dati catturati. Allo stesso tempo, il divario tra il sensore e l'oggetto misurato può avere un impatto significativo sulla precisione delle misurazioni. Pertanto, è essenziale posizionare il sensore laser a una distanza ottimale dall'oggetto, mantenendo un contatto senza contatto stabile e costante. Inoltre, le condizioni ambientali hanno un ruolo cruciale nella precisione delle misurazioni laser senza contatto. Variazioni nella temperatura, umidità o vibrazioni possono influire sui risultati e compromettere l'affidabilità del sistema di rilevazione. È quindi fondamentale stabilizzare l'ambiente di lavoro e minimizzare al massimo possibili interferenze esterne. Per garantire la massima precisione e affidabilità delle misurazioni laser senza contatto, è necessario condurre un'attenta valutazione del dispositivo utilizzato. È fondamentale esaminare meticolosamente le specifiche tecniche del dispositivo, comprese la gamma di misurazione, l'accuratezza dichiarata e la ripetibilità. Solo attraverso questo approccio meticoloso è possibile garantire che il dispositivo sia adatto per le applicazioni di misurazione critiche. In conclusione, l'affidabilità delle rilevazioni laser senza contatto dipende da una serie di fattori, tra cui la risoluzione del dispositivo, la distanza tra il sensore e l'oggetto misurato e le condizioni ambientali. Attribuire la giusta importanza a questi fattori e condurre una valutazione pregiudiziale accurata del dispositivo sono passaggi fondamentali per garantire la precisione e l'affidabilità delle misurazioni in contesti critici.

(2)

## 1.2. Interferenze ambientali

Le interferenze ambientali costituiscono una sfida significativa nel contesto delle misurazioni laser senza contatto. Elementi perturbatori quali particelle in sospensione, umidità, variazioni termiche, e luce ambientale possono compromettere l'esattezza dei risultati. È indispensabile effettuare rilevazioni in un ambiente stabilizzato, limitando gli effetti delle perturbazioni esterne per assicurare misure accurate e consistenti.

## 1.3. Calibrazione del dispositivo

Il processo di calibrazione è fondamentale per la rilevazione tramite laser senza contatto, permettendo di attestare la veridicità dei dati raccolti. Durante la calibrazione, si corregge qualsiasi scostamento dal valore misurato atteso o noto, garantendo così la precisione delle misurazioni. Per ottenere risultati affidabili, è necessario utilizzare campioni di riferimento affidabili e adeguatamente conservati. La calibrazione periodica è di vitale importanza per garantire l'integrità delle rilevazioni nel tempo, in modo da poter contare su misurazioni accurate e consistenti. È altamente raccomandato ripetere la calibrazione ogni volta che vengono apportate modifiche alle componenti del dispositivo o all'ambiente operativo in cui viene utilizzato. In questo modo, si assicura che il dispositivo rimanga sempre preciso e affidabile, fornendo dati di alta qualità e consentendo una corretta interpretazione e analisi dei risultati. La calibrazione costante è quindi un processo necessario e fondamentale per sfruttare appieno le capacità del sistema di rilevazione tramite laser senza contatto. **(3)**

## **Capitolo 2. Normative**

L'adozione del laser nelle misure senza contatto è regolamentata da un'ampia gamma di normative di sicurezza, certificazioni e restrizioni sull'uso. Queste direttive sono assolutamente indispensabili per garantire l'utilizzo sicuro ed efficace delle tecnologie laser nelle diverse aree di applicazione. È fondamentale seguire attentamente le linee guida e le prescrizioni di sicurezza esistenti al fine di proteggere sia le persone che l'ambiente durante l'uso di dispositivi laser. La conoscenza e il rispetto di tali norme sono essenziali per prevenire rischi e incidenti. Inoltre, è necessario ottenere le certificazioni necessarie, rilasciate da organizzazioni di accreditamento internazionali, che attestano la qualità e la sicurezza dei dispositivi utilizzati. Infine, è importante attenersi ai limiti d'uso stabiliti per i dispositivi laser di misurazione senza contatto, che possono includere specifiche tecniche come la distanza massima di misurazione o la precisione. Il rispetto di questi parametri è vitale per garantire misurazioni precise e affidabili. In sintesi, le normative, le misure di sicurezza, le certificazioni richieste e i limiti d'uso costituiscono elementi cruciali nell'impiego delle tecnologie laser senza contatto, essenziali per assicurare un'applicazione sicura e corretta nei settori dell'industria, della medicina, dell'ambiente e dell'architettura. (4)

### **2.1. Norme di sicurezza**

Le norme di sicurezza per l'utilizzo dei laser nella rilevazione senza contatto sono di fondamentale importanza per garantire la massima sicurezza delle persone coinvolte. Tali normative, che rappresentano un punto di riferimento cruciale, includono una vasta gamma di direttive progettate specificamente per evitare danni o infortuni derivanti dall'esposizione ai fasci laser. È di vitale importanza seguire attentamente tali indicazioni di sicurezza al fine

di proteggere sé stessi e gli altri. Una delle principali indicazioni consiglia l'utilizzo di occhiali protettivi specializzati durante l'utilizzo dei laser. Questi occhiali sono appositamente progettati per filtrare e bloccare la luce laser, riducendo al minimo il rischio di danni agli occhi. Inoltre, è fondamentale installare barriere di sicurezza in modo da confinare le emissioni laser all'interno dell'area di lavoro designata. Queste barriere fungono da strumenti efficaci per contenere i fasci laser e impedire loro di fuoriuscire, riducendo così il potenziale rischio per chiunque si trovi nelle vicinanze. Allo stesso modo, una formazione approfondita per il personale responsabile dell'utilizzo dei dispositivi laser è indispensabile per garantire un utilizzo sicuro ed efficace. Questa formazione mira a fornire conoscenze approfondite sul funzionamento dei laser, sulle procedure di sicurezza da seguire e sui rischi connessi all'utilizzo improprio o negligente. Solo attraverso una preparazione adeguata sarà possibile prevenire pericoli per la salute degli utilizzatori e garantire un ambiente lavorativo sicuro e privo di rischi. La sicurezza è una priorità assoluta quando si tratta di utilizzare i laser nella rilevazione senza contatto. Rispettare scrupolosamente le normative e le precauzioni di sicurezza stabilite è fondamentale per minimizzare i rischi e proteggere la salute e il benessere di tutti coloro che sono coinvolti nell'utilizzo di questi dispositivi. Con questi importanti provvedimenti, sarà possibile mantenere un'efficienza operativa ottimale e un ambiente di lavoro privo di pericoli. (5)

## 2.2. Certificazioni richieste

L'utilizzo dei dispositivi laser nelle misurazioni senza contatto richiede approvazioni certificate che attestino la qualità e l'affidabilità dei sistemi impiegati. Tali certificazioni sono il frutto di test e analisi meticolosi per verificare la conformità ai requisiti normativi.

Tra le certificazioni standard per i dispositivi laser si annoverano il marchio CE, che testimonia la conformità alle norme di sicurezza europee, e la certificazione ISO 9001, che comprova l'aderenza agli standard internazionali di qualità gestionale. Altri tipi di certificazione possono essere necessari a seconda dell'uso e del contesto in cui il laser è operativo. È pertanto cruciale assicurarsi che i dispositivi possiedano le certificazioni pertinenti per confermare la loro sicurezza e affidabilità.

### 2.3. Limiti di utilizzo

I dispositivi laser per misurazioni senza contatto presentano limiti operativi che occorre rispettare per assicurare la correttezza e l'affidabilità delle letture. Tali limiti considerano vari fattori, tra cui la distanza massima di rilevazione, la precisione delle misurazioni e altre caratteristiche tecniche. Per esempio, la capacità di misurazione di alcuni dispositivi può essere circoscritta dalla potenza del laser o dalle peculiarità ottiche. In aggiunta, la precisione delle letture può subire variazioni in relazione alla distanza di misurazione e alle condizioni ambientali. È pertanto essenziale capire e attenersi a questi limiti operativi per ottenere risultati consistenti e veritieri. Si raccomanda di consultare le specifiche tecniche del produttore prima dell'uso dei dispositivi laser e di aderire alle istruzioni per un corretto impiego e una precisa raccolta dati.

### **Capitolo 3. Applicazioni del rilevamento laser senza contatto**

Un'ampia e diversificata gamma di settori beneficia enormemente delle applicazioni del rilevamento laser senza contatto. Le più rilevanti e significative includono, ma non si limitano a, settori come l'industria manifatturiera, la medicina, l'ecologia, l'architettura e molte altre ancora. Questi metodi di misurazione innovativi si distinguono per la loro straordinaria precisione, la rapidità di esecuzione e l'efficienza superiore rispetto alle tecniche tradizionali. Vengono estensivamente utilizzati per la sorveglianza e il controllo dei processi produttivi industriali, la diagnosi e la valutazione accurata dello stato di salute in campo medico, l'analisi e la verifica della qualità delle risorse idriche e atmosferiche nell'ambito ambientale, nonché per la determinazione estremamente precisa di misure e distanze in progetti architettonici, ingegneristici e di costruzione. L'incessante avanzamento delle tecnologie laser senza contatto ha consolidato in modo significativo il loro ruolo come uno strumento cruciale e insostituibile in una vastissima gamma di ambiti applicativi, dimostrando il loro impatto notevole e la loro incommensurabile versatilità. (6)

#### **3.1. Misure industriali**

Le rilevazioni senza contatto basate su tecnologia laser sono diventate una prassi estremamente comune nell'ambiente industriale di oggi. Questi avanzati sistemi di misurazione assicurano rilevamenti rapidi, affidabili e estremamente accurati di una vasta gamma di parametri. Grazie alla loro versatilità, queste misure sono diventate indispensabili per il controllo qualitativo dei manufatti, la gestione efficiente dei sistemi produttivi e l'integrità delle attrezzature. I sensori laser di ultima generazione consentono di ottenere dati

di precisione millimetrica sulle lunghezze, distanze, spessori, angolature e altri aspetti dimensionali. Questi rilevamenti ultra-precisi permettono di aumentare in modo significativo l'efficienza complessiva della produzione, riducendo al minimo gli errori di misurazione e perfezionando i processi industriali. Le misure industriali eseguite con l'ausilio di tecnologie laser senza contatto sono pertanto fondamentali per mantenere livelli di precisione e qualità estremamente elevati nel contesto produttivo odierno. (7)

### 3.2. Misure mediche

Anche nel settore della medicina, le tecnologie laser senza contatto trovano impiego nel valutare e monitorare diversi indicatori clinici. Questo approccio consente la rilevazione dei dati senza necessità di contatto diretto con il paziente, limitando così il pericolo di infezioni o danni fisici. L'uso del laser in ambito medico si rivela utile per determinare misure quali la temperatura corporea, la pressione sanguigna, oltre a frequenze cardiache e respiratorie, lo spaziamento fisico tra individui, il monitoraggio di lesioni dermatologiche o disfunzioni oculari, tra gli esempi più significativi. L'esattezza e la celerità offerte dalle misurazioni laser sono particolarmente preziose nel settore medico, contribuendo a diagnosi attendibili, sorvegliando lo sviluppo delle condizioni cliniche dei pazienti e assistendo nelle cure appropriate.

### 3.3. Misure ambientali

Il monitoraggio e la quantificazione della qualità ambientale usufruiscono altresì dell'applicazione delle misure laser non invasive. Tale metodologia permette la rilevazione accurata e celere di indicatori come la concentrazione di particolato atmosferico, la presenza di composti gassosi dannosi, la termicità e l'igrometria dell'aria, la celerità eolica e le distanze fra entità o costruzioni ambientali. Essenziali per la mitigazione e il controllo dell'inquinamento dell'aria, per la pianificazione urbana e la gestione di fenomeni climatici avversi, le misurazioni ambientali tramite laser sono strumenti fondamentali per la tutela e la conservazione dell'ecosistema.

### 3.4. Misure architettoniche

L'utilizzo delle tecnologie laser non invasive si estende anche al settore architettonico, consentendo di ottenere informazioni esatte e dettagliate su immobili e strutture. Tale modalità facilita la cattura istantanea di dati relativi alle dimensioni degli spazi, all'altezza degli edifici, alle distanze fra i componenti strutturali e ad altre metriche critiche per il design, il planning e la valutazione di progetti costruttivi. Le rilevazioni architettoniche via laser propiziano la creazione di modelli digitali tridimensionali di ambienti ed edifici, agevolando così la progettazione e l'anticipazione visiva degli esiti attesi. La loro precisione e facilità di impiego le rendono un utensile fondamentale per architetti e ingegneri nell'elaborare e valutare progetti architettonici.

## References:

1. zheng junli. caratterizzazione e taratura di un sistema a triangolazione laser wireless portatile per il controllo qualità in linea di .... 2020. [univpm.it](http://univpm.it)
2. di platino id. facoltà di ingegneria. tesi.univpm.it. . [univpm.it](http://univpm.it)
3. bortolussi g. sensori per il monitoraggio della composizione del sudore e loro utilizzo in ambito sportivo. 2022. [unipd.it](http://unipd.it)
4. carnevale f. la gestione dei rischi per la salute e la sicurezza sul lavoro: aspetti generali ed applicazione ad una realtà aziendale= risk .... 2020. [polito.it](http://polito.it)
5. bertolini v. laser in endodonzia: efficacia del laser a diodo come metodo di decontaminazione endodontica. 2022. [unige.it](http://unige.it)
6. alotaibi m, honarvar shakibaei asli b, khan m. non-invasive inspections: a review on methods and tools. sensors. 2021. [mdpi.com](http://mdpi.com)
7. pizzuto a. sistema di rammollimento di un bordo co-estruso tramite tecnica di incollaggio filo colla zero. 2022. [univpm.it](http://univpm.it)

## **Capitolo 4- Tipologie di acciai strutturali per uso ferroviario**

Gli acciai strutturali utilizzati per scopi ferroviari possono essere suddivisi in tre principali tipologie: acciai al carbonio, acciai legati e acciai inossidabili. I acciai al carbonio sono costituiti principalmente da ferro e carbonio, e possono assumere diverse composizioni chimiche a seconda dell'applicazione specifica. I acciai legati, invece, contengono altri elementi in aggiunta al ferro e carbonio, quali manganese, nichel, cromo e molibdeno, che conferiscono loro caratteristiche specifiche come maggiore resistenza e durezza. I acciai inossidabili, infine, sono leghe di ferro e carbonio con l'aggiunta di cromo, che conferisce loro una resistenza superiore alla corrosione. Ognuna di queste tipologie di acciai ha caratteristiche e proprietà meccaniche specifiche che li rendono adatti all'uso ferroviario. Queste caratteristiche e proprietà meccaniche permettono agli acciai di resistere alle sollecitazioni e alle forze presenti durante il funzionamento dei treni. Inoltre, la resistenza alla corrosione degli acciai inossidabili li rende adatti per le parti esposte all'umidità e agli agenti atmosferici, come ad esempio le rotaie. Grazie alla loro robustezza e durabilità, gli acciai strutturali sono ampiamente utilizzati nell'industria ferroviaria per garantire un trasporto sicuro ed efficiente. (1)

### **4.1. Acciai al carbonio**

Gli acciai al carbonio sono una delle tipologie di acciai strutturali utilizzati per uso ferroviario. Composti principalmente da ferro e carbonio, possono contenere anche piccole quantità di altri elementi per apportare specifiche caratteristiche al materiale. L'utilizzo di acciai al carbonio offre diversi vantaggi nel settore ferroviario, come la facilità di

lavorazione, l'elevata resistenza e l'economicità. A seconda delle diverse applicazioni, gli acciai al carbonio possono presentare composizioni chimiche e proprietà meccaniche specifiche per soddisfare i requisiti di resistenza e durata richiesti. Questi acciai possono essere sottoposti a diversi trattamenti termici e meccanici per migliorare ancora di più le loro prestazioni. Ad esempio, possono essere temprati per ottenere una maggiore durezza e resistenza o rinvenuti per migliorare la tenacità. Inoltre, i processi di laminazione e trafilazione possono essere utilizzati per conferire agli acciai al carbonio la forma e le dimensioni desiderate. Nel settore ferroviario, gli acciai al carbonio sono ampiamente utilizzati nella costruzione di binari, piastre di ancoraggio, traverse, ruote e altri componenti strutturali. La loro resistenza e durabilità li rendono ideali per sopportare il peso dei treni e resistere allo stress e all'usura causati dal traffico ferroviario continuo. Oltre alle loro eccellenti proprietà meccaniche, gli acciai al carbonio sono anche apprezzati per la loro buona conducibilità termica ed elettrica. Queste caratteristiche rendono gli acciai al carbonio adatti per le applicazioni in cui è necessaria una dissipazione efficiente del calore o una conduzione affidabile dell'elettricità. Inoltre, gli acciai al carbonio sono generalmente più economici rispetto ad altre leghe di acciaio, il che li rende una scelta preferita nel settore ferroviario in termini di costo e disponibilità. Infine, è importante sottolineare che gli acciai al carbonio possono essere riciclati in modo efficiente e sostenibile. Ciò contribuisce a ridurre l'impatto ambientale dell'industria ferroviaria e promuove una gestione responsabile delle risorse. In conclusione, gli acciai al carbonio sono una scelta eccellente per l'uso ferroviario grazie alle loro proprietà meccaniche, alla facilità di lavorazione, all'economicità e alla capacità di soddisfare i requisiti di resistenza e durata richiesti.

## 4.2. Acciai legati

Gli acciai legati sono una categoria diversa di acciai strutturali che vengono ampiamente utilizzati nel settore ferroviario in tutto il mondo. A differenza degli acciai al carbonio, i quali contengono principalmente ferro e carbonio, gli acciai legati presentano una composizione chimica più complessa che comprende non solo ferro e carbonio, ma anche altri importanti elementi come manganese, nichel, cromo e molibdeno. L'aggiunta di questi elementi di lega conferisce agli acciai legati una serie di proprietà specifiche che li rendono ideali per le applicazioni ferroviarie. Una delle principali caratteristiche degli acciai legati è la loro maggiore resistenza rispetto agli acciai al carbonio. Questa resistenza aggiuntiva è il risultato delle proprietà meccaniche intrinseche di questi elementi di lega, che contribuiscono a rendere gli acciai legati molto più duri e tenaci rispetto agli acciai al carbonio convenzionali. Questo li rende particolarmente adatti per essere utilizzati in situazioni in cui è richiesta una notevole resistenza meccanica, come nel caso dei binari ferroviari e delle infrastrutture associate. Inoltre, gli acciai legati presentano anche una maggiore resistenza alla corrosione rispetto agli acciai al carbonio. Questo significa che possono sopportare meglio l'esposizione agli agenti atmosferici e agli agenti chimici presenti nell'ambiente ferroviario, come l'umidità, la polvere e l'inquinamento. Grazie a questa maggiore resistenza alla corrosione, gli acciai legati tendono ad avere una vita utile più lunga rispetto agli acciai al carbonio, il che li rende una scelta eccellente per le applicazioni ferroviarie a lungo termine. Infine, gli acciai legati offrono anche una combinazione unica di resistenza meccanica e durata nel tempo. Questo significa che possono sopportare sollecitazioni meccaniche estreme senza subire deformazioni permanenti o danni strutturali significativi. Ciò li rende particolarmente adatti per le applicazioni ferroviarie soggette a carichi elevati, come i binari delle linee ad alta velocità. In conclusione, gli acciai legati sono

una scelta eccellente per le applicazioni ferroviarie in quanto offrono una combinazione unica di resistenza, durezza, tenacità e resistenza alla corrosione. Sono in grado di soddisfare le esigenze dei settori ferroviari moderni, fornendo materiali che possono sopportare con successo le condizioni più impegnative. Che si tratti di binari, infrastrutture o altre componenti cruciali, gli acciai legati sono una scelta affidabile e di alta qualità per garantire la sicurezza e l'affidabilità del sistema ferroviario. (2)

### 4.3. Acciai inossidabili

Gli acciai inossidabili sono una terza tipologia di acciai strutturali utilizzati nel settore ferroviario. Questi acciai sono leghe di ferro e carbonio contenenti anche cromo, che conferisce loro una maggiore resistenza alla corrosione rispetto agli acciai al carbonio e legati. Gli acciai inossidabili sono ampiamente impiegati in ambienti ferroviari esposti all'umidità, come i ponti ferroviari e i componenti delle stazioni, in cui è fondamentale prevenire la ruggine. La resistenza alla corrosione degli acciai inossidabili li rende una scelta affidabile per garantire la durata e la sicurezza delle infrastrutture ferroviarie.

### 4.4 Caratteristiche degli acciai strutturali per uso ferroviario

Gli acciai strutturali per uso ferroviario sono caratterizzati da diverse proprietà che li rendono particolarmente adatti alla loro applicazione specifica nel settore ferroviario. Questi acciai devono possedere una resistenza alla corrosione, una resistenza meccanica e una durezza adeguate per garantire la sicurezza e l'affidabilità delle infrastrutture ferroviarie. La scelta di acciai con tali caratteristiche è assolutamente essenziale per evitare danni strutturali, ridurre al minimo il rischio di rotture e incrementare notevolmente la durabilità nel tempo. Oltre a ciò, una corretta e costante manutenzione, unita a una protezione efficace dagli agenti

atmosferici, contribuisce in modo significativo a preservare e salvaguardare queste incredibili proprietà nel corso della lunga vita utile degli acciai strutturali impiegati nell'ambito del settore ferroviario. (1)

#### 4.5 Resistenza alla corrosione

La resistenza alla corrosione è una caratteristica fondamentale degli acciai strutturali per uso ferroviario. Gli acciai utilizzati devono essere capaci di resistere all'azione corrosiva dell'ambiente ferroviario, che può includere l'umidità, l'esposizione agli agenti chimici presenti nell'aria (come gli inquinanti atmosferici) e l'azione di agenti aggressivi come i sali presenti sulle linee ferroviarie. La corretta protezione tramite l'applicazione di rivestimenti protettivi e l'implementazione di programmi di manutenzione adeguati è cruciale per garantire una buona resistenza alla corrosione degli acciai utilizzati per le infrastrutture ferroviarie. L'efficienza e l'affidabilità delle operazioni ferroviarie dipendono in larga misura dalla durabilità e dalla resistenza alla corrosione delle strutture in acciaio. È fondamentale utilizzare materiali di alta qualità e adottare le migliori pratiche di protezione e manutenzione per preservare l'integrità e la funzionalità delle infrastrutture ferroviarie. Inoltre, la corrosione può compromettere la sicurezza delle linee ferroviarie e dei veicoli, mettendo a rischio sia il personale che i passeggeri. Pertanto, è assolutamente essenziale monitorare attentamente lo stato dei materiali e adottare misure preventive appropriate per prevenire danni e incidenti correlati alla corrosione. In definitiva, la resistenza alla corrosione è un aspetto critico nella progettazione, nella costruzione e nella manutenzione delle infrastrutture ferroviarie, e richiede una costante attenzione e impegno per garantire la sicurezza, l'efficienza e la durabilità del sistema ferroviario.

## 4.6 Resistenza meccanica

La resistenza meccanica è una caratteristica essenziale degli acciai strutturali utilizzati per le infrastrutture ferroviarie. Questi acciai devono possedere una resistenza adeguata per sopportare il carico e lo stress generato dalle locomotive, dai treni e dal traffico ferroviario in generale. Una buona resistenza meccanica è fondamentale per garantire la stabilità e l'integrità strutturale delle infrastrutture ferroviarie, prevenendo la comparsa di deformazioni permanenti e danni che potrebbero compromettere la sicurezza dell'intero sistema di trasporto su rotaia. Pertanto, la scelta dei materiali con la giusta resistenza meccanica è cruciale per garantire la durabilità e la robustezza delle strutture ferroviarie nel corso del tempo. Senza una resistenza meccanica sufficiente, le infrastrutture potrebbero subire cedimenti strutturali che porterebbero a incidenti ferroviari catastrofici. È pertanto di vitale importanza che gli acciai utilizzati rispettino rigorosi standard di resistenza meccanica, in modo da garantire la sicurezza degli utenti e la continuità del servizio ferroviario. Inoltre, una resistenza meccanica adeguata può contribuire anche a ridurre i costi di manutenzione e riparazione delle infrastrutture ferroviarie nel lungo periodo. In conclusione, la resistenza meccanica è un aspetto fondamentale da considerare nella progettazione e nella costruzione di infrastrutture ferroviarie affidabili e sicure. (1)

## 4.7 Durezza

La durezza è una proprietà fondamentale degli acciai strutturali utilizzati nell'ambito del trasporto ferroviario. Un'adeguata durezza assicura resistenza all'usura e all'abrasione, specialmente nelle zone di contatto tra i componenti ferroviari, quali rotaie e ruote dei treni. Gli acciai dotati di durezza adeguata possono sopportare gli sforzi e l'attrito generato dal movimento dei treni, riducendo l'usura e garantendo una maggiore durata degli elementi strutturali. Eseguire test di durezza sui materiali utilizzati nel settore ferroviario risulta essenziale per garantire che gli acciai rispettino i rigidi requisiti di durezza necessari per conservarne l'integrità e la funzionalità nel corso del tempo. In tal modo, si assicurano alti livelli di sicurezza e prestazioni nel sistema ferroviario. (3)

## 4.8 Microstruttura degli acciai strutturali per uso ferroviario

La microstruttura degli acciai strutturali per uso ferroviario è un aspetto fondamentale per la valutazione delle loro proprietà meccaniche. Essa può essere suddivisa in diverse fasi, tra cui la ferrite, la perlite e la bainite. La ferrite è una fase costituita da un reticolo cubico a corpo centrato, che conferisce agli acciai una buona tenacità. La perlite, invece, è una fase costituita da lamelle alternate di ferrite e cementite, responsabile della durezza degli acciai. Infine, la bainite è una fase composta da aggregati di ferrite e carburi che conferisce agli acciai una combinazione di tenacità e resistenza meccanica. La conoscenza della microstruttura degli acciai strutturali per uso ferroviario permette di comprendere le loro proprietà e di ottimizzarne le prestazioni.

- Ferrite

La ferrite è una fase importante nella microstruttura degli acciai strutturali per uso ferroviario. Essa è costituita da un reticolo cubico a corpo centrato e rappresenta la fase più tenera degli acciai a temperatura ambiente. La presenza di ferrite conferisce agli acciai una buona tenacità e resistenza alle sollecitazioni. La quantità di ferrite presente nella microstruttura viene influenzata dai processi di produzione e dai trattamenti termici a cui gli acciai sono sottoposti. La conoscenza della quantità e della distribuzione della ferrite è essenziale per garantire le prestazioni e la durabilità degli acciai strutturali utilizzati nel settore ferroviario. (3)

- **Perlite**

La perlite è un'altra fase significativa nella microstruttura degli acciai strutturali per uso ferroviario. Questa fase consiste in lamelle alternate di ferrite e cementite, con una struttura caratteristica. La presenza di perlite conferisce agli acciai una maggiore durezza e resistenza meccanica. La quantità e la distribuzione della perlite possono variare in base alle condizioni di produzione e ai trattamenti termici applicati agli acciai. La conoscenza della quantità di perlite è cruciale per garantire che gli acciai strutturali per uso ferroviario soddisfino i requisiti di resistenza e durabilità necessari nelle applicazioni ferroviarie.

- **Bainite**

La bainite è un'altra fase che può essere presente nella microstruttura degli acciai strutturali per uso ferroviario. Questa fase consiste in aggregati di ferrite e carburi di diverso tipo, che conferiscono agli acciai una combinazione di resistenza meccanica e tenacità. La bainite si forma a partire dalla trasformazione austenite-bainite attraverso un processo di raffreddamento controllato. La quantità e la distribuzione della bainite possono essere

influenzate dai trattamenti termici applicati agli acciai. La conoscenza della presenza e della distribuzione della bainite è fondamentale per garantire che gli acciai strutturali utilizzati nel settore ferroviario soddisfino i requisiti di resistenza e resilienza richiesti dalle applicazioni ferroviarie.

#### 4.9 Proprietà meccaniche degli acciai strutturali per uso ferroviario

Gli acciai strutturali per uso ferroviario sono caratterizzati da proprietà meccaniche che ne determinano la resistenza e la durabilità. Queste proprietà sono fondamentali per garantire la sicurezza e l'affidabilità delle infrastrutture ferroviarie. In questa sezione saranno approfondite tre importanti proprietà meccaniche degli acciai strutturali utilizzati per scopi ferroviari: la resistenza alla trazione, la tenacità, l'allungamento e la durezza. La conoscenza approfondita di queste proprietà è essenziale per la progettazione, la costruzione e il controllo qualità degli acciai utilizzati nel settore ferroviario. La resistenza alla trazione è la capacità dell'acciaio di resistere a forze di trazione applicate su di esso, ed è misurata in mega Pascal (MPa). La tenacità è la capacità di assorbire energia senza rompersi, ed è misurata in joule per metro quadro ( $J/m^2$ ). L'allungamento, invece, è la capacità di deformarsi senza rompersi ed è solitamente espressa in percentuale. La conoscenza di queste proprietà permette di selezionare gli acciai adatti alle diverse esigenze delle infrastrutture ferroviarie, garantendo la massima sicurezza e durabilità. Inoltre, anche la durezza degli acciai è un parametro fondamentale da considerare, poiché influisce sulla resistenza all'usura e all'abrasione. La durezza viene misurata utilizzando diverse scale di misura, come la scala di Rockwell o la scala di Brinell. Grazie alla conoscenza di queste proprietà meccaniche, è possibile effettuare un'accurata valutazione dei materiali e garantire la scelta degli acciai più adatti per le diverse applicazioni nel campo ferroviario.

#### 4.10 Resistenza alla trazione

La resistenza alla trazione è una delle proprietà meccaniche più fondamentali e vitali da considerare quando si tratta di acciai strutturali utilizzati nel settore ferroviario. Questo parametro misura la robustezza e l'affidabilità di un acciaio nel resistere alle forze di trazione, che cercano di separare i suoi componenti. Viene espressa utilizzando unità di pressione e rappresenta la massima resistenza che un metallo di questo genere può sopportare prima di cedere. È di cruciale importanza che gli acciai utilizzati per le infrastrutture e i veicoli ferroviari rispondano ai precisi requisiti normativi e standard del settore per garantire l'incolumità e la sicurezza di tutte le persone coinvolte. Solo assicurandosi che la resistenza alla trazione soddisfi questi criteri di conformità, possiamo garantire la robustezza e l'affidabilità delle infrastrutture ferroviarie e dei veicoli che viaggiano su di esse.

#### 4.11 Tenacità

La tenacità è un'altra importante proprietà meccanica degli acciai strutturali per uso ferroviario. Indica la capacità dell'acciaio di assorbire energia in presenza di sollecitazioni, come ad esempio impatti o vibrazioni. Una maggiore tenacità significa che l'acciaio è in grado di resistere a eventi impattanti senza subire fratture o crepe. La tenacità degli acciai per uso ferroviario è un aspetto cruciale per garantire la sicurezza delle strutture ferroviarie e dei materiali utilizzati nella loro costruzione.

## 4.12 Allungamento

L'allungamento è una proprietà meccanica che misura la deformazione che un materiale può subire prima di rompersi. Nell'ambito degli acciai strutturali per uso ferroviario, l'allungamento è un parametro importante per valutare la duttilità dell'acciaio. Maggiore è l'allungamento, maggiore sarà la capacità dell'acciaio di subire deformazioni senza rompersi. L'allungamento degli acciai per uso ferroviario è un elemento chiave per garantire che le strutture e i componenti resistenti all'acciaio possano sopportare le sollecitazioni e gli sforzi presenti nell'ambiente ferroviario.



## **Capitolo 5. Trattamenti termici degli acciai strutturali per uso ferroviario**

I trattamenti termici degli acciai strutturali per uso ferroviario sono cruciali per conferire alle leghe le proprietà desiderate. Nel contesto specifico, i trattamenti termici comprendono la ricottura, la normalizzazione e la tempra, ognuna con il proprio scopo e processo. La ricottura viene utilizzata per ridurre la durezza dell'acciaio e migliorarne la lavorabilità. Questo avviene tramite il riscaldamento dell'acciaio a temperature elevate, seguito da un raffreddamento lento controllato. La normalizzazione, d'altra parte, mira a omogeneizzare la struttura dell'acciaio e migliorarne la resistenza meccanica. Questo trattamento prevede il riscaldamento dell'acciaio a una temperatura superiore alla sua temperatura di ricottura critica, seguito da un raffreddamento all'aria. Infine, la tempra consiste nel riscaldare l'acciaio a una temperatura elevata e successivamente raffreddarlo rapidamente in una soluzione di raffreddamento come l'acqua o l'olio. Questo conferisce all'acciaio una maggiore durezza e resistenza, ma può renderlo fragile. Pertanto, spesso si effettua anche una successiva operazione di rinvenimento per recuperare parte della duttilità persa.

### **5.1. Ricottura**

La ricottura è un importante trattamento termico per gli acciai strutturali utilizzati nel settore ferroviario. Questo trattamento consiste nel riscaldare l'acciaio a una temperatura adeguata, generalmente al di sopra di 600°C, e successivamente raffreddarlo lentamente in modo controllato. L'obiettivo principale della ricottura è quello di ridurre la durezza dell'acciaio, renderlo meno fragile e migliorarne la lavorabilità. Durante il processo di ricottura, la struttura cristallina dell'acciaio viene modificata, permettendo una maggiore mobilità degli

atomi e riducendo la presenza di tensioni interne. Questo contribuisce a migliorare le proprietà meccaniche dell'acciaio, rendendolo più adatto all'uso ferroviario.

## 5.2. Normalizzazione

Il trattamento di normalizzazione è ampiamente utilizzato per gli acciai strutturali impiegati nel settore ferroviario. Questo trattamento termico prevede il riscaldamento dell'acciaio a una temperatura superiore alla sua temperatura di ricottura critica, seguita da un rapido raffreddamento all'aria. L'obiettivo principale della normalizzazione è quello di omogeneizzare la struttura dell'acciaio, migliorando la sua resistenza meccanica. Durante il processo, le particelle di carbonio nell'acciaio vengono distribuite in modo più uniforme, rendendo la struttura più stabile. Questo porta a un migliore equilibrio tra resistenza e durezza dell'acciaio, rendendolo adatto alle sollecitazioni meccaniche a cui è sottoposto nel settore ferroviario.

## 5.3. Tempra

La tempra è un trattamento termico fondamentale per gli acciai strutturali utilizzati nel settore ferroviario, in quanto conferisce loro una maggiore durezza e resistenza. Durante la tempra, l'acciaio viene riscaldato a temperature elevate e poi raffreddato rapidamente in una soluzione di raffreddamento come l'acqua o l'olio. Questo processo di raffreddamento rapido favorisce la formazione di una struttura martensitica nell'acciaio, caratterizzata da una maggiore durezza. Tuttavia, è importante notare che la tempra può rendere l'acciaio fragile.

Di conseguenza, per ottenere una combinazione ottimale di durezza e tenacità, spesso si effettua anche un trattamento di rinvenimento. Questo consiste nel riscaldare l'acciaio temprato a una temperatura inferiore del processo di tempra e mantenerlo a quella temperatura per un periodo di tempo, al fine di ridurre la fragilità e aumentare la duttilità dell'acciaio.

## **Capitolo 6. Prove di laboratorio per la valutazione delle proprietà degli acciai strutturali per uso ferroviario**

Le prove di laboratorio sono fondamentali per valutare le proprietà degli acciai strutturali utilizzati nel settore ferroviario. Queste prove permettono di determinare la resistenza dei materiali e la loro capacità di sopportare carichi. Inoltre, le prove di laboratorio forniscono informazioni sulla resilienza, durezza e altre caratteristiche meccaniche degli acciai per uso ferroviario. Attraverso queste prove, è possibile verificare se gli acciai soddisfano i requisiti di resistenza e sicurezza necessari per essere utilizzati nell'ambito ferroviario.

### **6.1. Prova di trazione**

La prova di trazione è una delle prove di laboratorio più comuni per valutare le proprietà degli acciai strutturali per uso ferroviario. Questa prova consiste nel sottoporre un campione di acciaio a uno sforzo di trazione fino al punto di rottura. Durante la prova, vengono misurati la resistenza massima alla trazione, l'allungamento e la riduzione di area del campione. Questi parametri forniscono informazioni importanti sulla resistenza e duttilità dell'acciaio, che sono fondamentali per garantire la sicurezza e l'affidabilità delle strutture ferroviarie.

### **6.2. Prova di durezza**

La prova di durezza è utilizzata per valutare la resistenza superficiale degli acciai strutturali per uso ferroviario. Questa prova misura la resistenza del materiale all'indentazione o alla

penetrazione di un oggetto appuntito. La durezza può essere misurata utilizzando diversi metodi, come il test Brinell, il test Vickers o il test Rockwell. L'esito di questa prova fornisce informazioni sulle caratteristiche meccaniche dell'acciaio, come la resistenza allo scivolamento e all'usura, che sono importanti nella scelta dei materiali per le applicazioni ferroviarie.

### 6.3. Prova di resilienza

La prova di resilienza è finalizzata a valutare la capacità di assorbimento dell'energia degli acciai strutturali per uso ferroviario in caso di carichi improvvisi o impatti. Questa prova, nota anche come prova di resilienza Charpy, prevede l'impatto di un pendolo su una provetta di acciaio. La provetta viene successivamente esaminata per valutare quanta energia è stata assorbita dall'acciaio prima della rottura. Questo tipo di prova permette di valutare la tenacità dell'acciaio e la sua resistenza agli urti, informazioni fondamentali per garantire la sicurezza delle strutture ferroviarie e la protezione dei passeggeri.

## **Capitolo 7. Normative e standard per gli acciai strutturali per uso ferroviario**

Le normative e gli standard per gli acciai strutturali utilizzati nel settore ferroviario sono di fondamentale importanza per garantire la qualità e la sicurezza dei materiali impiegati. Queste normative definiscono i requisiti tecnici e le procedure di verifica che devono essere seguite per garantire che gli acciai utilizzati soddisfino determinati criteri di resistenza, durezza e proprietà meccaniche. Gli standard specifici per gli acciai strutturali per uso ferroviario possono variare a seconda del paese, ma tra i più diffusi ci sono gli standard UNI EN 13674-1, UNI EN 13674-2 e UNI EN 13674-3, che stabiliscono le specifiche per gli acciai delle rotaie ferroviarie.

### **7.1. UNI EN 13674-1**

La norma UNI EN 13674-1 definisce le specifiche per gli acciai delle rotaie ferroviarie di tipo R, utilizzate soprattutto su linee normali non ad alta velocità. Questa norma stabilisce i requisiti chimici e meccanici degli acciai, compresi i limiti di composizione chimica e le proprietà meccaniche richieste come la resistenza alla trazione, la resistenza all'usura e la tenacità. Inoltre, vengono specificate le caratteristiche geometriche delle rotaie, come la forma del profilo e le dimensioni. La norma UNI EN 13674-1 fornisce quindi un punto di riferimento essenziale per garantire la qualità delle rotaie ferroviarie utilizzate nelle reti di trasporto su rotaia.

## 7.2. UNI EN 13674-2

La norma UNI EN 13674-2 riguarda gli acciai per rotaie ferroviarie di tipo S, utilizzate principalmente su linee ad alta velocità. Questa norma specifica i requisiti tecnici e le proprietà richieste per gli acciai delle rotaie adatte all'utilizzo su linee ad alta velocità, che richiedono una maggiore resistenza meccanica e una migliore capacità di deformazione plastica. Vengono quindi definiti i limiti di composizione chimica, la resistenza alla trazione, la tenacità e altri requisiti che devono essere rispettati per garantire la sicurezza e l'affidabilità delle rotaie su linee ad alta velocità.

## 7.3. UNI EN 13674-3

La norma UNI EN 13674-3 riguarda gli acciai delle rotaie ferroviarie di tipo R260, R260Mn e R350HT. Questi acciai sono destinati a un utilizzo specifico nelle reti ferroviarie e devono soddisfare determinati requisiti tecnici. La norma definisce i limiti di composizione chimica, la resistenza alla trazione, la durezza e altre proprietà meccaniche che devono essere garantite per assicurare la qualità e la durabilità delle rotaie. Inoltre, vengono specificate le caratteristiche geometriche delle rotaie, come la forma del profilo e le dimensioni, in conformità alle esigenze delle reti ferroviarie.

## References:

1. BARONE E. Analisi FEM di un serbatoio Diesel per veicolo ferroviario. 2022. [univpm.it](https://www.univpm.it)
2. Bellezze T, Lallone A. Analisi delle difettosità di rivestimenti di zinco depositati su fili di acciaio. tesi.univpm.it. . [univpm.it](https://www.univpm.it)
3. Gjini R. Simulazione termica del contatto ruota-ceppo per veicoli ferroviari trasporto merci= Thermal simulation of wheel-shoe contact for rail freight vehicles. 2021. [polito.it](https://www.polito.it)

## Capitolo 8 – Procedure sperimentali

Durante il lavoro svolto in laboratorio per analizzare l'acciaio in analisi si è potuto usufruire di diverse macchine che hanno permesso di caratterizzare il materiale. La prima macchina utilizzata è stata una segatrice a nastro, Una segatrice a nastro per metalli è una macchina utensile utilizzata per tagliare vari tipi di metalli con precisione grazie alla quale da un assale intero della lunghezza di 2000 mm e un diametro di 150 mm sono stati ricavati dei dischi. In un secondo luogo grazie ad una troncatrice, una semplice macchina utensile che ha permesso di estrarre i campioni delle dimensioni adeguate, la macchina è composta da un disco messo in rotazione ad alte velocità da un motore elettrico trifase, da una morsa che permette di tenere il pezzo fermo in posizione e da un sistema di raffreddamento ad acqua per evitare l'innalzamento della temperatura del materiale a causa dell'attrito tra disco e materiale, rischiando di andare a modificare le caratteristiche meccaniche del materiale. I campioni ricavati per il mio studio sono diversi, e dato che erano delle dimensioni adeguate non c'è stato bisogno di inglobarli.

A questo punto bisogna procedere alla lucidatura utilizzando una lappatrice (Figura 1).



*Figura 1 Lappatrice doppio piatto*

La lappatrice ha un piatto rotativo dotato di carte abrasive di diverse granulometrie, è anche provvista di un getto di acqua che ha sia il compito di raffreddare i provini che stiamo lucidando, sia tenere puliti i fogli di carta abrasiva.

Le carte utilizzate hanno grana 180-320-600-1200-2500-4000 utilizzate dalla più ruvida alla meno ruvida, avendo l'accortezza di ruotare il campione di 90° quando si passa da una carta all'altra.

L'ultimo step della preparazione dei campioni è la lucidatura al panno, dove si impiega una macchina chiamata lucidatrice, questa è composta da un piatto girevole sopra il quale si incolla un panno sintetico. Questa macchina non ha il sistema di lubrificazione con acqua in quanto non è necessario, ma in più ha un potenziometro che ci permette di variare il numero di giri del piatto per diversi materiali.

Sul panno viene aggiunta una pasta diamantata di varie granulometrie a seconda delle necessità, nel mio caso ho utilizzato una pasta da 0.25 micron.

La pasta diamantata va bagnata con un lubrificante apposito che permette di fluidificarla, finita la lucidatura al panno che è un'operazione abbastanza lunga si avevano dei campioni sufficientemente puliti per poter essere analizzati con il microscopio ottico.

## 8.1. Caratterizzazione del Laser

Il laser utilizzato per le prove sperimentali è il modello Continuum NY60-10 YAG Q-Switched., un laser allo stato solido di tipo Nd. Questo dispositivo impiega un cristallo solido di granato di ittrio e alluminio (YAG) drogato al neodimio (Nd), lavorando principalmente nel regime dell'infrarosso.

Le Caratteristiche principali del Laser sono:

- **Materiale del Cristallo:** Granato di ittrio e alluminio (YAG) drogato al neodimio (Nd).
- **Tipo di Laser:** Nd

(Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet).

Il laser funziona attraverso impulsi controllati da un Q-switch. Questo componente ottico, posizionato all'interno della cavità risonante, rimane chiuso fino a raggiungere la massima inversione di popolazione. Una volta aperto, consente il rilascio dell'impulso laser accumulato. Regolando il tempo di ritardo nell'apertura del Q-switch, espresso in microsecondi ( $\mu\text{s}$ ), è possibile modulare la potenza di uscita dell'impulso laser.

Parametri Operativi

- **Lunghezza d'Onda:** 1064 nm
- **Repetition Rate:** 10 Hz
- **Energia dell'Impulso:** < 225 mJ
- **Durata dell'Impulso:** 7 ns
- **Diametro del Fascio Laser:** 6 mm

Il laser Continuum NY60-10, grazie alla sua struttura Nd offre un'alta efficienza e stabilità nel regime infrarosso, rendendolo adatto per una varietà di applicazioni sperimentali che richiedono precisione e potenza controllata. La tecnologia Q-switched permette di ottenere impulsi brevi e potenti, fondamentali per molteplici applicazioni scientifiche e industriali.

L'impiego di questo laser nelle prove sperimentali ha consentito di ottenere risultati di alta precisione grazie alla capacità di regolare l'energia degli impulsi e alla stabilità offerta dal sistema Nd. La

lunghezza d'onda di 1064 nm e la durata dell'impulso di 7 ns sono particolarmente utili per applicazioni che richiedono penetrazione e precisione, senza compromessi sulla qualità del fascio. Per una

completa caratterizzazione del laser Continuum NY60-10 Nd Q-Switched, è stata effettuata una misurazione della potenza in uscita variando il tempo di ritardo dell'apertura del Q-switch da 120 a 400 microsecondi ( $\mu\text{s}$ ). Questo ha permesso di ottenere una curva di potenza del laser, utile per comprendere come la potenza dell'impulso laser varia in funzione del tempo di ritardo.

Per la procedura di Caratterizzazione sono stati necessari i seguenti strumenti:

- Laser Nd Q-Switched (Continuum NY60-10)
- Cella di Peltier: Utilizzata per misurare l'energia degli impulsi laser

Il tempo di ritardo del Q-switch è stato variato sistematicamente tra 120 e 400  $\mu\text{s}$ . Per ogni valore di ritardo, sono stati registrati multipli impulsi per ottenere una media statistica della

potenza.

I

dati raccolti sono stati utilizzati per creare una curva di potenza del laser, rappresentando graficamente la potenza dell'impulso laser in funzione del tempo di ritardo del Q-switch, si nota che la potenza più elevata si registra a 220  $\mu$ s.

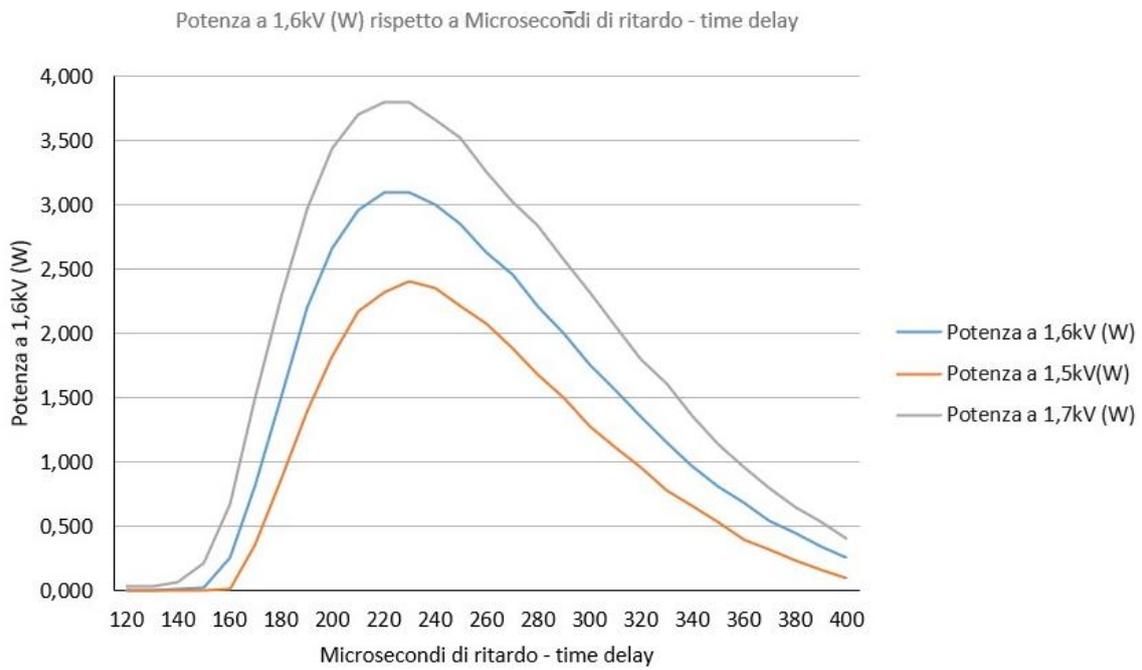


Figura 8.1.1 Curva di potenza del laser

## 8.2. Microscopia ottica

Il microscopio (dal greco: μικρόν mikrón "piccolo" e σκοπεῖν skoréin "guardare") è uno strumento scientifico che consente di ingrandire o produrre immagini di oggetti piccoli che sarebbero impossibili da studiare a occhio nudo. Permette di osservarne i dettagli mediante una osservazione diretta ad occhio nudo, oppure indiretta tramite la fotografia e/o sistemi elettronici.

Il microscopio è costituito da una parte meccanica, strutturale e una parte tradizionalmente chiamata ottica, funzionale. La parte meccanica deve essere robusta e sufficientemente pesante per consentire la necessaria stabilità al sistema. Lo stativo rappresenta il corpo principale del microscopio ed ha la funzione di fare da supporto ai meccanismi di movimento e di messa a fuoco ed alla parte ottica.

La parte meccanica del microscopio alloggia anche il sistema di illuminazione, in caso di sistemi con illuminazione incorporata. Il campione da osservare si pone sul tavolino portaoggetti, dotato di un carrello traslatore per mezzo del quale l'oggetto può essere spostato agevolmente con movimenti meccanici micrometrici.

La parte funzionale, in genere chiamata ottica per gli strumenti basati sull'utilizzo della luce, è formata da tre o quattro sistemi di lenti e dalla sorgente, che, nei sistemi composti a radiazione trasmessa, partendo dalla base del microscopio, sono: la sorgente, il collettore della sorgente o condensatore di campo, col diaframma di campo, il condensatore con il diaframma di apertura, l'obiettivo e l'oculare.

L'eventuale parte di microscopio, nella quale vanno inseriti gli obiettivi multipli, che possono essere scelti in base all'ingrandimento voluto, si chiama revolver.

La risoluzione laterale di un microscopio è quella minima distanza tra due punti, che permette ancora di distinguerli; se la distanza tra due punti è inferiore di quella minima, essi si confondono in uno solo. Nel caso che lo strumento si basi sull'utilizzo di radiazione con una propria lunghezza d'onda associata, come i tradizionali microscopi ottici, risoluzione e lunghezza d'onda utilizzata sono parametri tra loro strettamente correlati. Microscopi che si basano su diverse tecnologie, come ad esempio l'AFM, ovviamente rispondono a considerazioni differenti. In prima approssimazione, e non tenendo conto di aberrazioni ottiche, possiamo considerare che la relazione che lega la risoluzione laterale ( $d$ , ovvero la distanza tra due punti tra loro risolti), alla lunghezza d'onda della radiazione utilizzata, e l'apertura numerica (AN) di un sistema ottico (tutto il sistema) sia:  $d = 0,6098\lambda/AN$ , equazione nota come principio di Abbe.

Si definisce ingrandimento il rapporto tra le dimensioni dell'immagine ottenuta e quelle dell'oggetto originale.

Il microscopio ottico utilizza come sorgente la luce, intesa in senso generale come radiazione elettromagnetica dal vicino infrarosso all'ultravioletto, anche se i microscopi più diffusi utilizzano proprio la radiazione visibile. Ha una risoluzione tipicamente minore rispetto al microscopio elettronico, ma è generalmente economico e fornisce immagini a colori anche di organismi viventi.

Con il microscopio ottico in metallurgia, dopo lucidatura (senza attacco chimico), si possono evidenziare:

- Inclusioni
  
- Particelle intermetalliche grossolane

- Cavità

- Porosità

- Soffiature

- Cricche

- In casi particolari (strutture bifasiche), una delle fasi presenti (ad esempio particelle grossolane di Si nelle leghe ipereutettiche tipo Al-Si).

Dopo attacco chimico si possono osservare:

-Bordi di grano geminati (deformazione plastica)

-Linee di flusso (macrostruttura)

-Precipitati grossolani (fini non visibili).

### **References:**

1. (Marco Durante, 1995).

### 8.3. microscopia elettronica

L'introduzione alla microscopia elettronica offre una panoramica della storia e dello sviluppo di questa tecnica, dalle sue origini alle applicazioni moderne. Si esamina anche il funzionamento e i vantaggi della microscopia elettronica rispetto a quella ottica, evidenziando come l'uso di fasci di elettroni consenta di ottenere immagini ad altissima risoluzione. Si discute la necessità di una formazione specifica per utilizzare correttamente gli strumenti di microscopia elettronica e si presenta un quadro generale degli utilizzi più comuni in diversi settori scientifici e industriali. I principi fisici della microscopia elettronica includono concetti fondamentali come la focalizzazione e la risoluzione. La focalizzazione riguarda la capacità del microscopio elettronico di concentrare gli elettroni su un punto specifico del campione, mentre la risoluzione si riferisce alla capacità del microscopio di distinguere dettagli molto piccoli all'interno del campione. Questi principi sono essenziali per comprendere il funzionamento della microscopia elettronica e per ottenere immagini di alta qualità. Altri concetti fisici importanti includono l'interazione degli elettroni con il campione, la formazione dell'immagine e l'importanza della correzione delle aberrazioni ottiche per ottenere immagini accurate e dettagliate. La microscopia elettronica a scansione (SEM) utilizza un fascio di elettroni per esaminare la superficie di un campione, producendo immagini 3D ad alta risoluzione. Al contrario, la microscopia elettronica a trasmissione (TEM) passa un fascio di elettroni attraverso un sottile taglio del campione per produrre immagini ad alta risoluzione della struttura interna. La microscopia elettronica a scansione a trasmissione (STEM) combina entrambi i metodi, consentendo l'analisi di campioni spessi e sottili ad alta risoluzione. Infine, la microscopia elettronica a riflessione (REM) si

concentra sull'analisi delle proprietà ottiche ed elettriche della superficie del campione mediante l'uso di elettroni retro diffusi. La preparazione del campione per l'analisi tramite microscopia elettronica è un processo critico che richiede attenzione ai dettagli e precisione. Una delle fasi cruciali è la fissazione del campione, che può essere eseguita utilizzando metodi chimici o fisici a seconda del tipo di materiale analizzato. Successivamente, il campione deve essere disidratato per rimuovere l'acqua e quindi incorporato in una resina o altro materiale adatto per la sezione. Dopo la sezione, il campione può essere trattato con coloranti o reagenti specifici per evidenziare particolari strutture o composti. È importante seguire scrupolosamente i protocolli e le procedure per garantire la corretta preparazione del campione e ottenere risultati affidabili e significativi. Le applicazioni della microscopia elettronica sono molteplici e coprono una vasta gamma di settori scientifici e industriali. In ambito biologico, la microscopia elettronica è utilizzata per studiare dettagli cellulari, tessuti e organuli, permettendo di visualizzare strutture e processi al di là della risoluzione della microscopia ottica. Nel campo dell'ingegneria dei materiali, la microscopia elettronica viene impiegata per analizzare la morfologia delle superfici e delle fratture di materiali metallici, polimerici e ceramici. Nell'industria dei semiconduttori, la microscopia elettronica è cruciale per caratterizzare la struttura elettronica e la morfologia delle microstrutture. Inoltre, trova ampio impiego nella ricerca ambientale per l'analisi delle nanoparticelle, dei materiali biodegradabili e delle microplastiche presenti in campioni naturali e di rifiuto. Infine, la microscopia elettronica è fondamentale anche in ambito forense per l'analisi di tracce, impronte digitali e campioni biologici. (1)

### **References:**

1. [https://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio\\_elettronico](https://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio_elettronico)

## 8.4. Microscopia stereoscopica

La stereo microscopia, nota anche come microscopia stereoscopica, è una tecnica utilizzata per osservare campioni tridimensionali con una percezione della profondità. Questa tecnica è essenziale in vari campi scientifici e industriali grazie alla sua capacità di fornire immagini tridimensionali chiare e dettagliate. La stereo microscopia utilizza due percorsi ottici separati, uno per ciascun occhio. Questo setup crea due immagini leggermente diverse che il cervello combina, fornendo una percezione della profondità e una visione tridimensionale del campione. I microscopi stereoscopici offrono una gamma di ingrandimenti più bassa rispetto ai microscopi composti, tipicamente da 5x a 250x, sufficienti per molte applicazioni che richiedono la visione tridimensionale. La profondità di campo è maggiore rispetto ai microscopi composti, permettendo di mantenere a fuoco il campione a diverse profondità. Il campo visivo è Ampio, permettendo di osservare porzioni più grandi del campione. Le applicazioni maggiori si hanno nel campo della biologia e medicina, utilizzata per dissezioni, studi di tessuti e esame di organismi piccoli e trasparenti. Usata anche nell'industria e manifattura dove risulta Essenziale per il controllo qualità, l'ispezione di componenti elettronici e la produzione di piccoli componenti come orologi e dispositivi medici. Infine nella ricerca e sviluppo è Impiegata per studiare la morfologia di nuovi materiali, lo sviluppo di prodotti e l'analisi di superfici. (1)

Il Leica DVM6 è un esempio avanzato di microscopio digitale, progettato per offrire qualità ottica superiore, versatilità e facilità d'uso. Ecco una descrizione dettagliata delle sue caratteristiche principali:

- Dotato di lenti di alta qualità che forniscono immagini nitide e dettagliate. Minimizza le aberrazioni cromatiche e sferiche grazie al sistema ottico avanzato.

- Offre una gamma di ingrandimenti da 10x fino a 2.350x, permettendo di osservare sia panoramiche generali che dettagli minuti del campione. La funzione zoom motorizzata consente di cambiare rapidamente e facilmente l'ingrandimento.
- Equipaggiato con un sistema di illuminazione LED avanzato, che include illuminazione anulare, obliqua e a campo oscuro. Questo permette di ottimizzare l'illuminazione per diverse tipologie di campioni e ottenere immagini con un contrasto elevato.
- Progettato per un uso prolungato senza affaticare l'operatore. Facile da usare, con controlli intuitivi e un'interfaccia utente semplice.
- Sistema di imaging digitale integrato. Permette di acquisire, elaborare e analizzare immagini direttamente dallo strumento. Il software Leica Application Suite (LAS) offre potenti strumenti di misura e documentazione.

La stereo microscopia è una tecnica fondamentale per ottenere immagini tridimensionali di campioni, essenziale in molti campi scientifici e industriali. Il Leica DVM6 rappresenta un'eccellenza in questo settore, combinando qualità ottica, versatilità e facilità d'uso, rendendolo uno strumento indispensabile per chi necessita di osservazioni dettagliate e accurate. (2)

#### **Refereces:**

1. [https://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio\\_stereoscopico](https://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio_stereoscopico)
2. <https://www.leica-microsystems.com/it/prodotti/microscopi-digitali/p/leica-dvm6/specification/>

## 8.5. Durezza

In metallurgia, la durezza rappresenta la resistenza alla penetrazione di un materiale. Questa proprietà viene determinata attraverso prove di durezza, che consistono nel penetrare il materiale con un penetratore di varie forme, a seconda del tipo di prova effettuata. Al penetratore viene applicato un carico noto, che può variare da un minimo di 1 N (Newton) a un massimo di 30 kN. La durezza si determina misurando le dimensioni dell'impronta lasciata. Le prove più comuni sono le prove Brinell, Vickers e Rockwell, molto utilizzate poiché economiche, non distruttive e non richiedono preparazioni complicate dei materiali, eccetto la pulizia dei campioni per evitare contaminazioni da ossidi o sporcizia.

- Prova Brinell:

Si preme un penetratore sferico in acciaio temprato o metallo duro, di diametro  $D$ , contro la superficie del campione con un carico  $F$  (espresso in N). Si misura quindi il diametro  $d$  dell'impronta (una calotta sferica) lasciata sulla superficie dopo la rimozione della forza  $F$ .

- Prova Vickers:

Si utilizza un penetratore di diamante a forma di piramide retta con base quadrata e angolo di  $136^\circ$  tra le facce opposte al vertice. Il carico  $F$  (espresso in N) viene applicato sulla superficie del campione e si misura la diagonale media  $d$  dell'impronta lasciata dopo la rimozione della forza  $F$ .

- Prova Rockwell:

Questa prova viene eseguita in due tempi e con carichi diversi (carico iniziale  $F_0$  e carico totale  $F = F_0 + F_1$ , dove  $F_1$  è il carico addizionale, espresso in N). Un penetratore di acciaio temprato o diamante, di forma opportuna, viene premuto contro la superficie del campione e si misura l'accrescimento permanente dell'impronta dopo la rimozione del carico addizionale  $F_1$ . Le prove Rockwell sono regolate dalla norma UNI EN 6508-1 e differiscono significativamente dalle prove Brinell e Vickers, utilizzando un penetratore sferico o conico e un carico applicato in due tempi. **(1)**

**References:**

1. (<https://www.chimica-online.it/>, s.d.).

## 8.6. Microdurezza

La microdurezza si riferisce alla durezza rilevata con carichi di prova molto bassi ( $F \leq 0,981$  N,  $1 \text{ hgF} = 100 \text{ gF}$ ). Questo metodo viene utilizzato per pezzi di superficie limitata, spessore sottile, materiali fragili e per valutare la durezza di singole fasi costituenti il materiale. Il valore della microdurezza aumenta con il diminuire del carico applicato, secondo una legge specifica per ogni materiale, a causa del comportamento elasto-plastico del materiale stesso. La macchina di prova è il microdurometro, che include un microscopio ottico per localizzare la zona da testare e misurare l'impronta, oltre a un dispositivo per l'applicazione del carico. Il campione da analizzare deve essere liscio, piano e privo di materiali estranei, e deve essere esente da alterazioni dovute a riscaldamento e incrudimento. La prova può essere effettuata su superfici cilindriche, con correzioni specifiche definite dalla normativa. **(1)**

**References:**

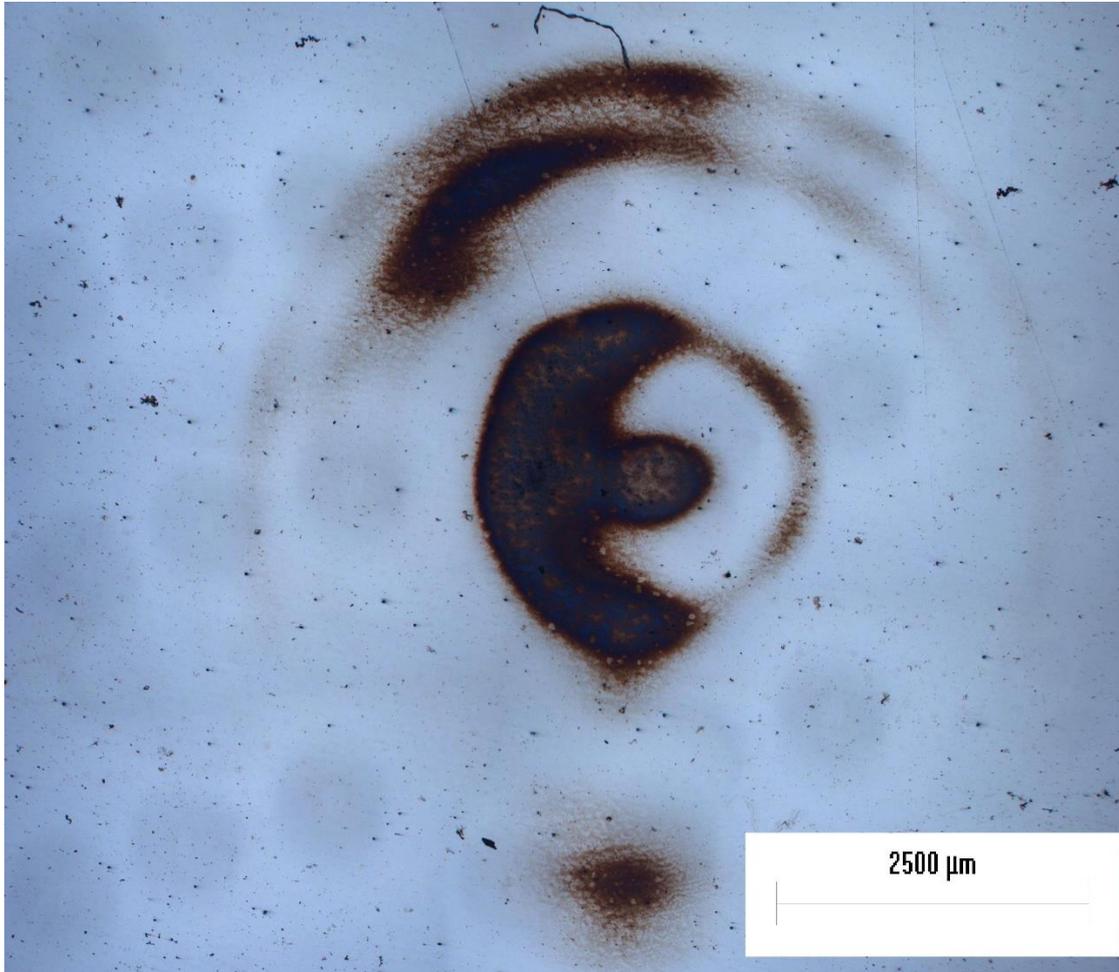
1.

(<https://www.solvingunion.com/>, s.d.).

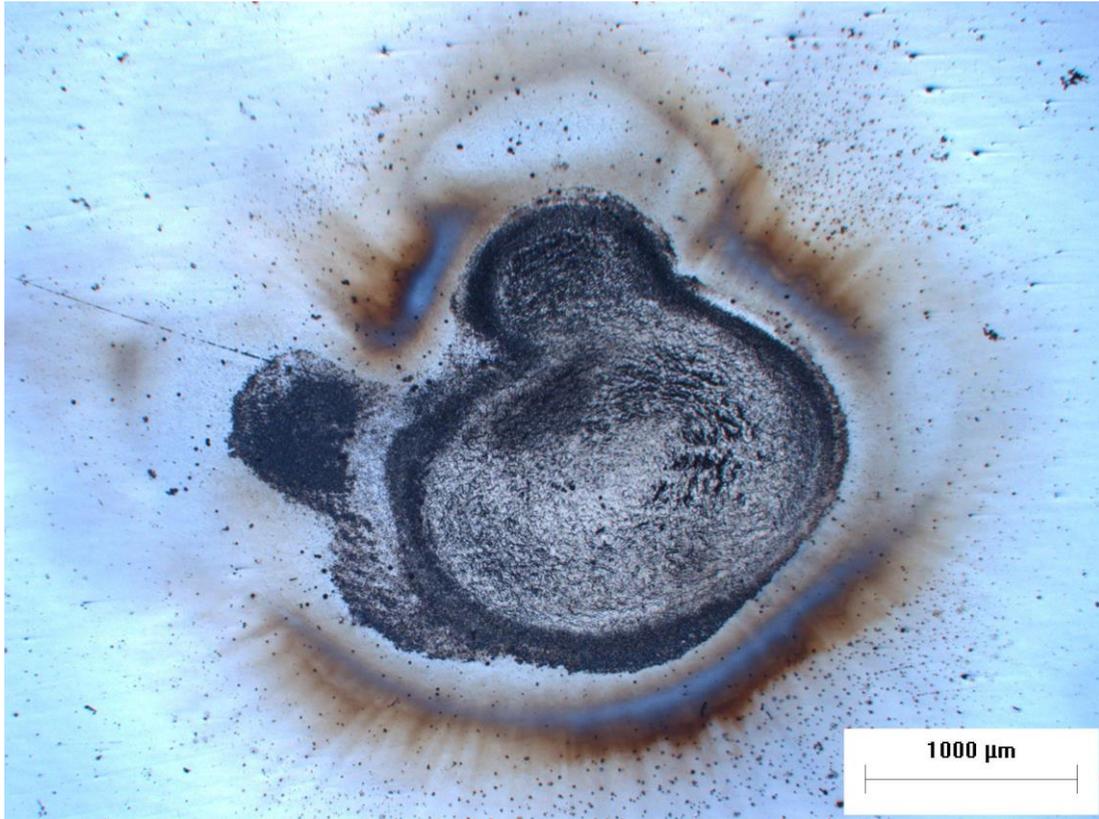
## Capitolo 9 - Risultati sperimentali

In questo capitolo si vanno a valutare i risultati sperimentali ottenuti in laboratorio, su otto campioni di acciaio prelevati da un assale ferroviario. Su ognuno di esso sono state fatte tre prove a diverse intensità di potenza del Laser. Le frequenze usate sono 1 Hertz e 10 Hertz, facendo due prove a 10 e 100 “spari”. Ovviamente l’indagine di analisi del difetto è iniziato dal provino sottoposto ai colpi di laser a intensità maggiore, in quanto dovrebbero essere quelli dove il difetto che si crea è più rilevante, successivamente si analizzeranno i provini sottoposti a colpi di laser a intensità minore finché non si trova l’intensità alla quale il materiale non subisce danni.

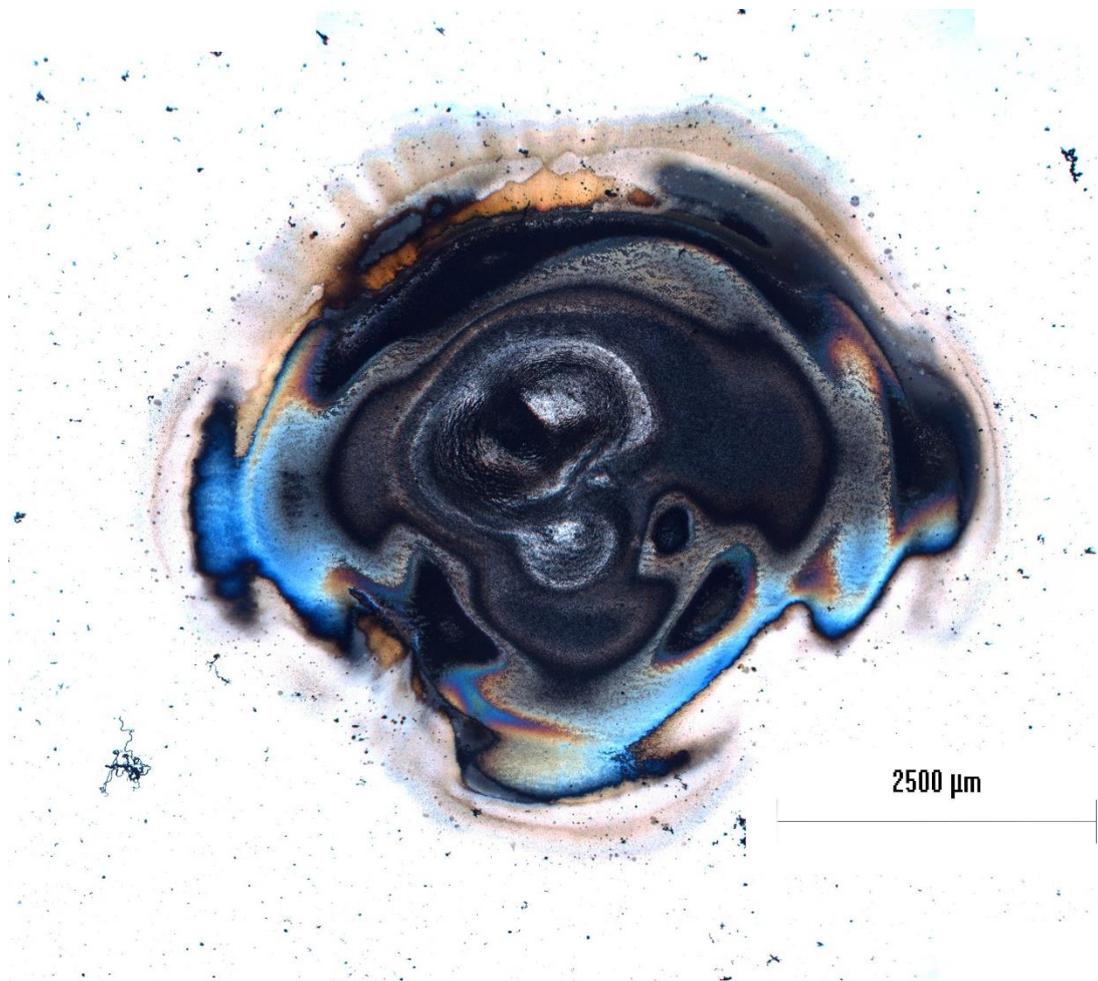
## 9.1. Micrografie dei provini



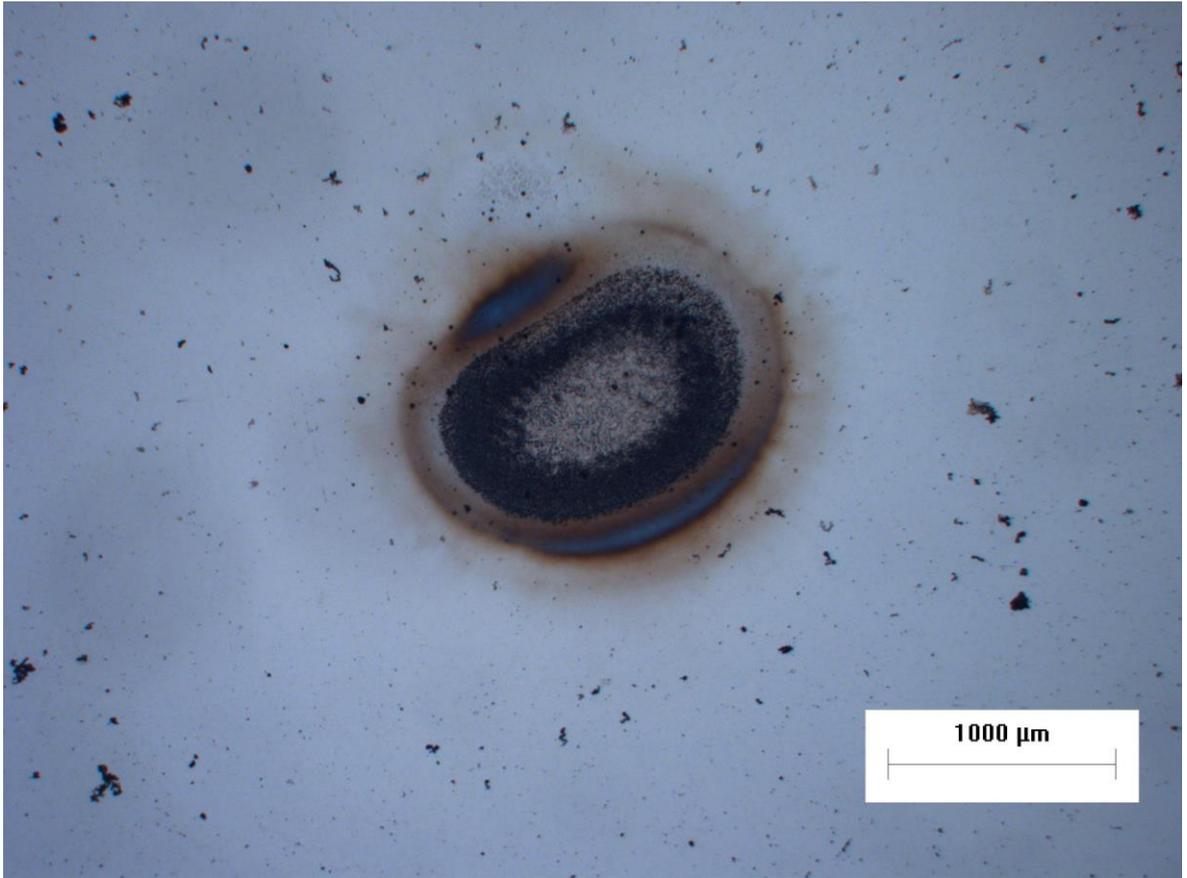
*Figura 9.1.1 1HZ\_100colpi 1.6kV 200 microsecond*



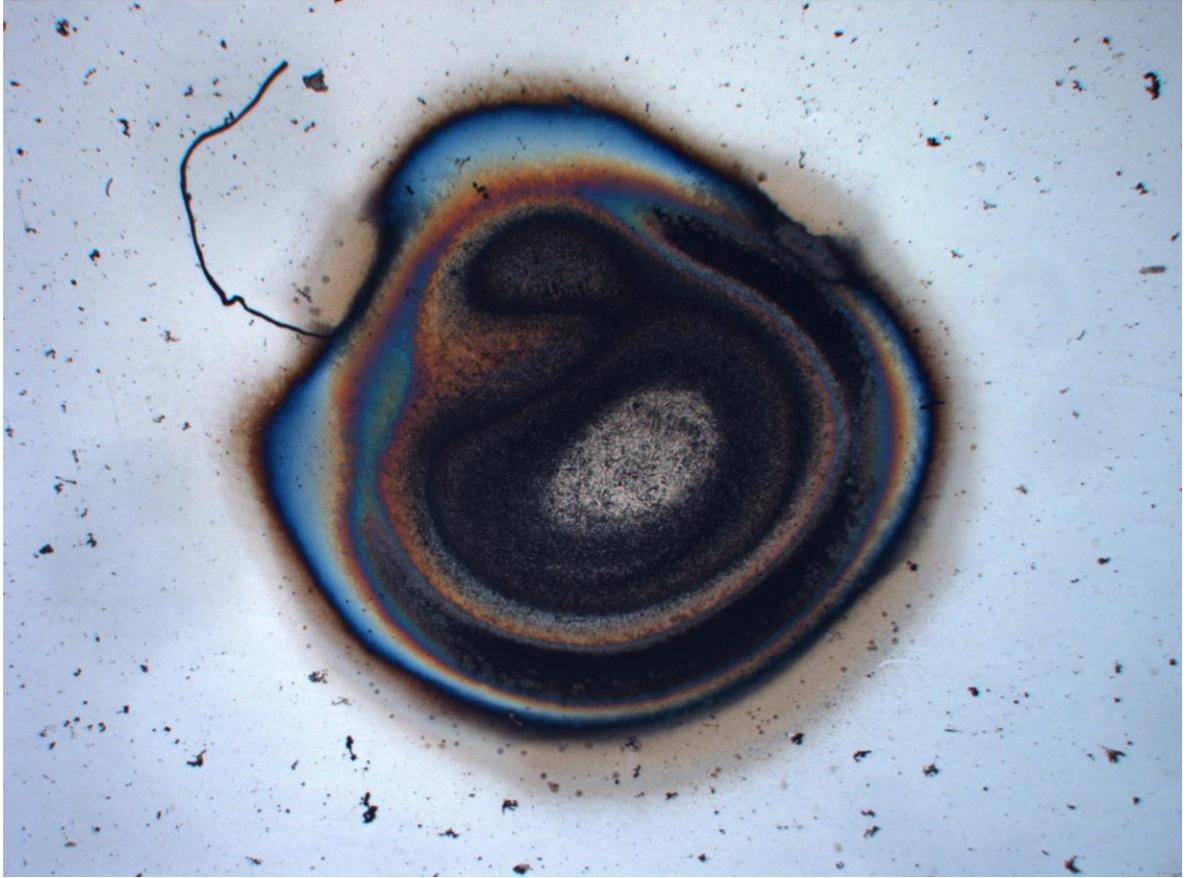
*Figura 9.1.2 10HZ\_10colpi 1.6kV 200 microsecond*



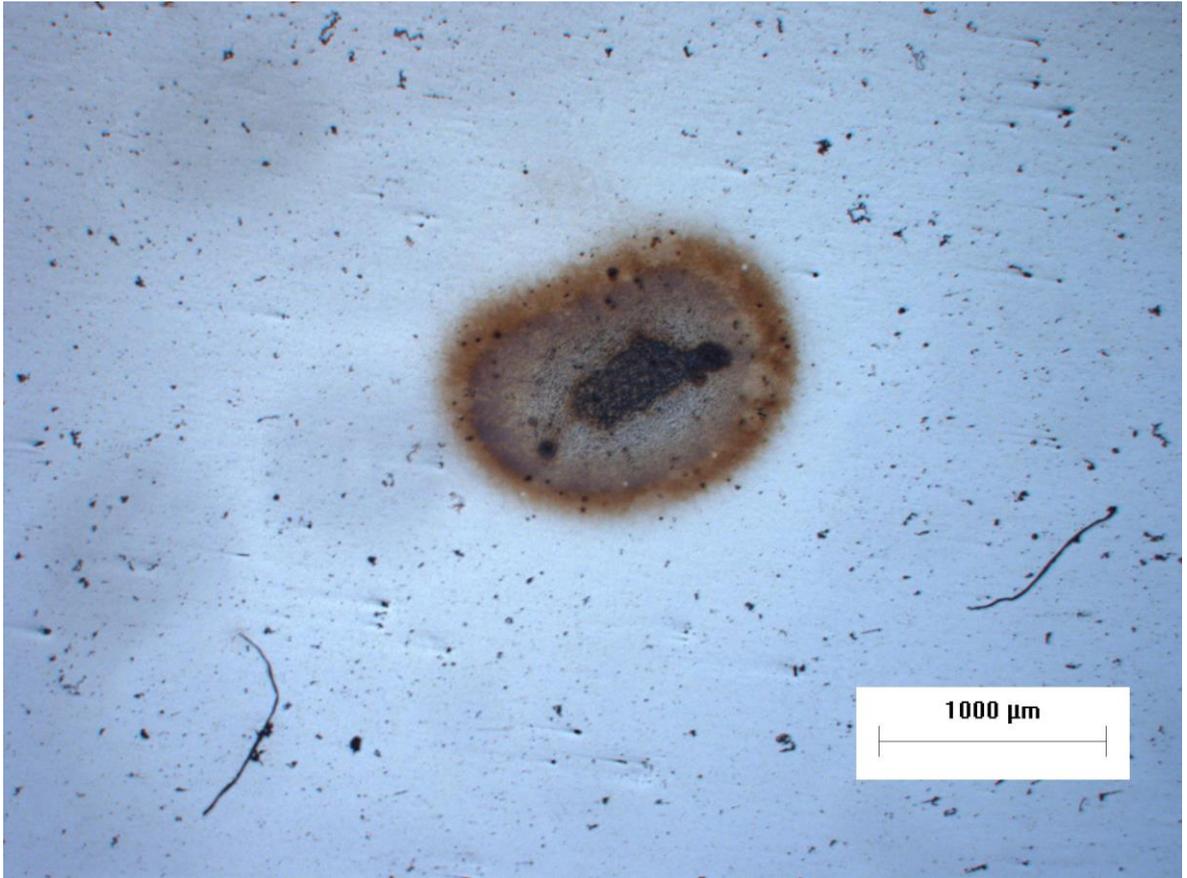
*Figura 9.1.3 10HZ\_100colpi 1.6kV 200 microsecond*



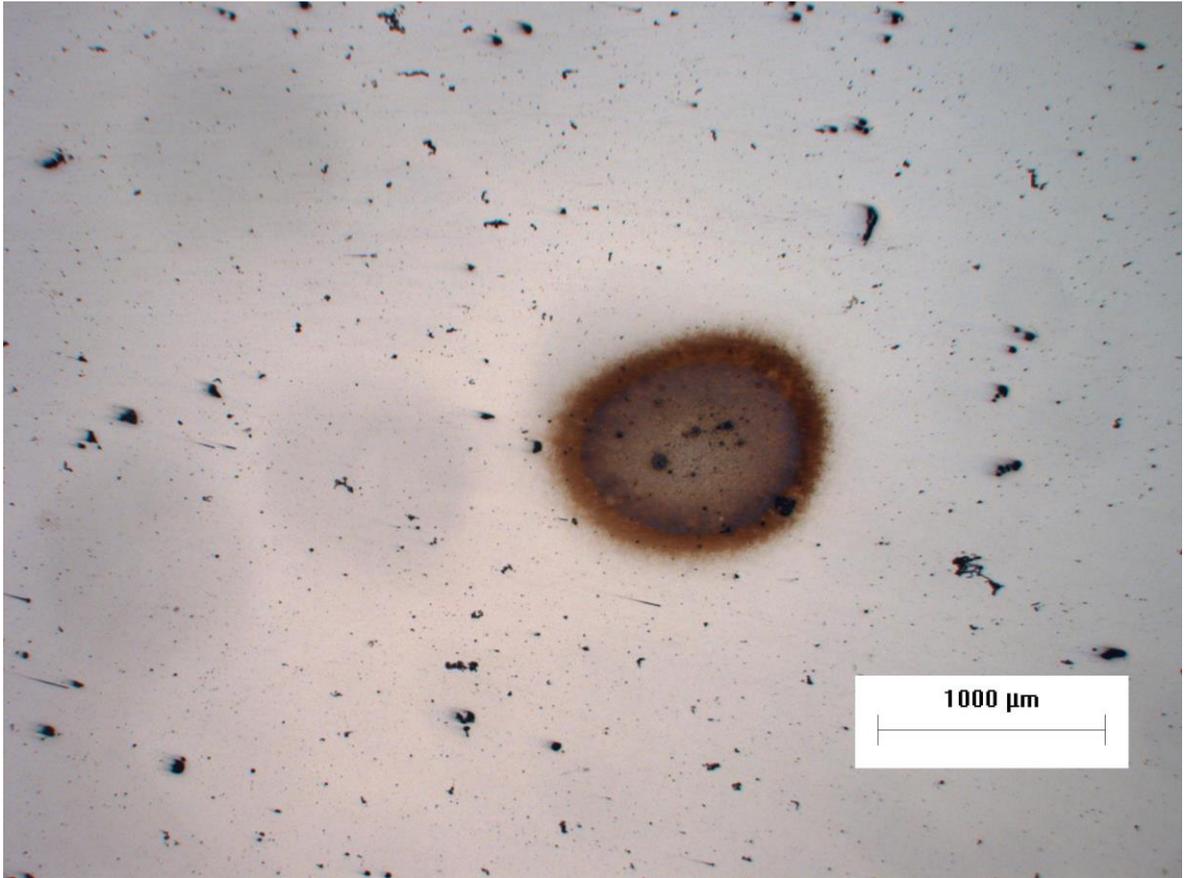
*Figura 9.1.4 10HZ\_10colpi 1.6kV 170 microsecond*



*Figura 9.1.5 10HZ\_100colpi 1.6kV 170 microsecond*



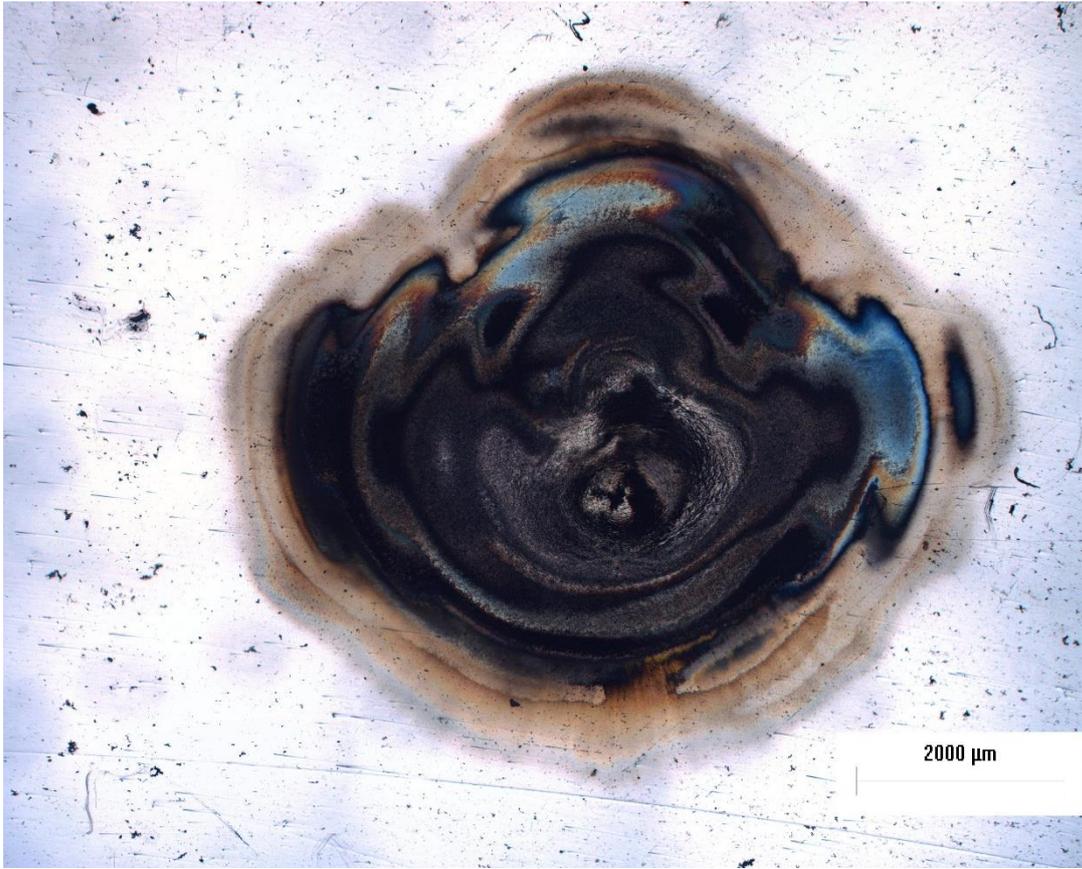
*Figura 9.1.6 10HZ\_100 colpi 1.6kV 160 microsecond*



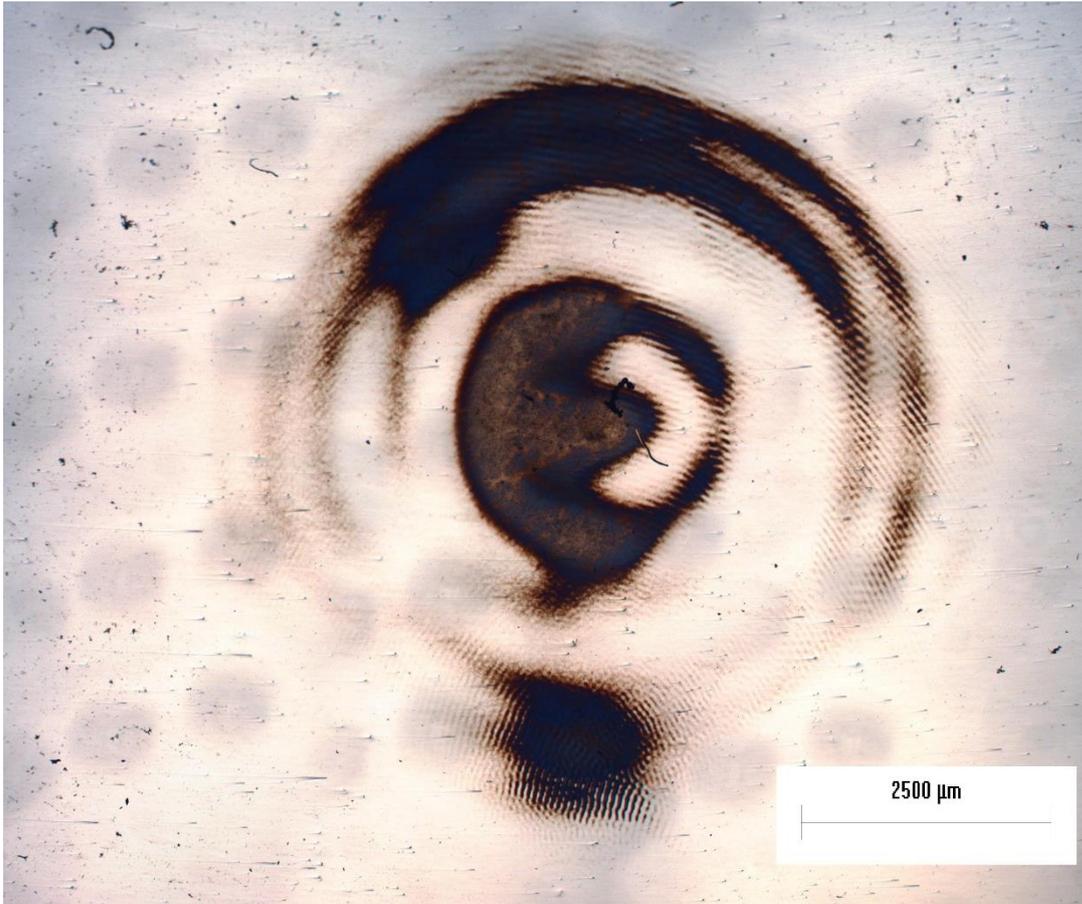
*Figura 9.1.7 10HZ\_100 colpi 1.7kV 150 microsecond*



*Figura 9.1.8 10HZ\_10 colpi 1.6kV 220 microsecond*



*Figura 9.1.9 10HZ\_100 colpi 1.6kV 220 microsecond*



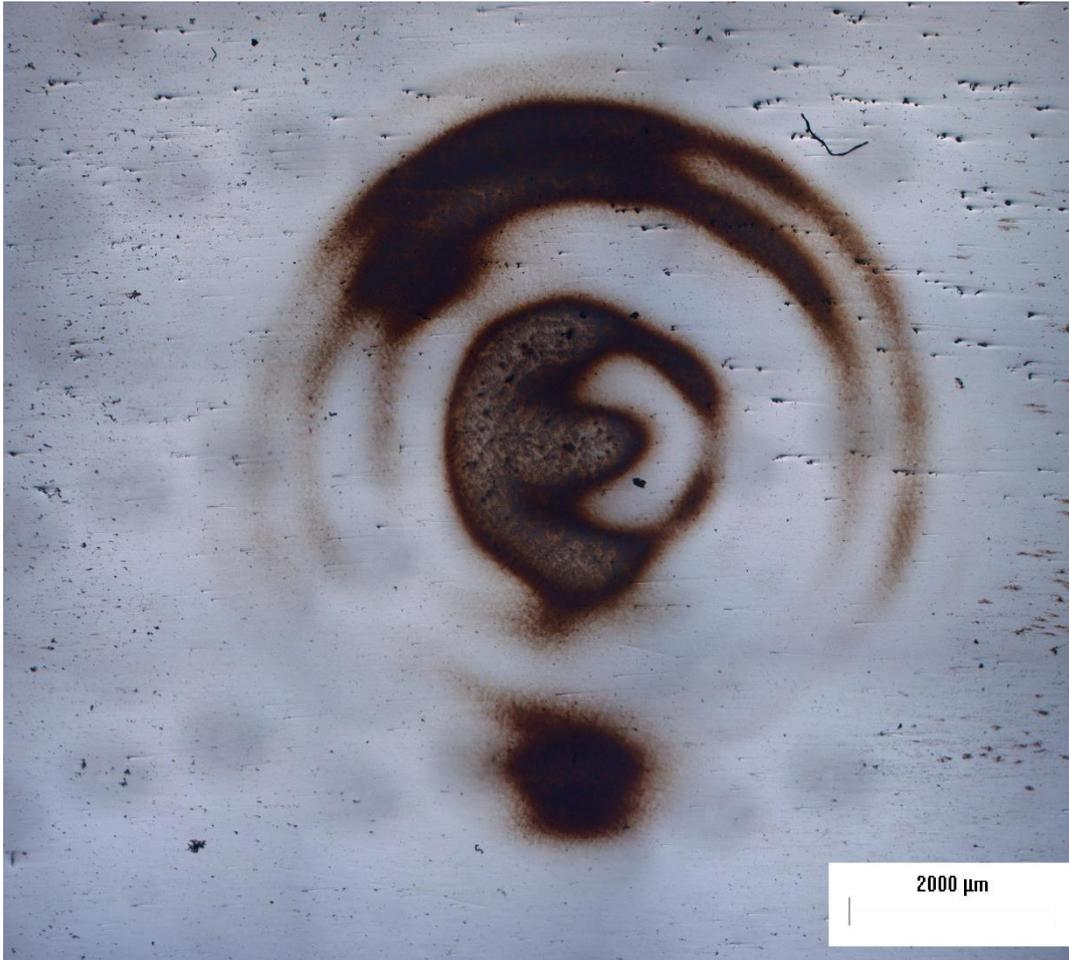
*Figura 9.1.10 1HZ\_100 colpi 1.6kV 220 microsecond*



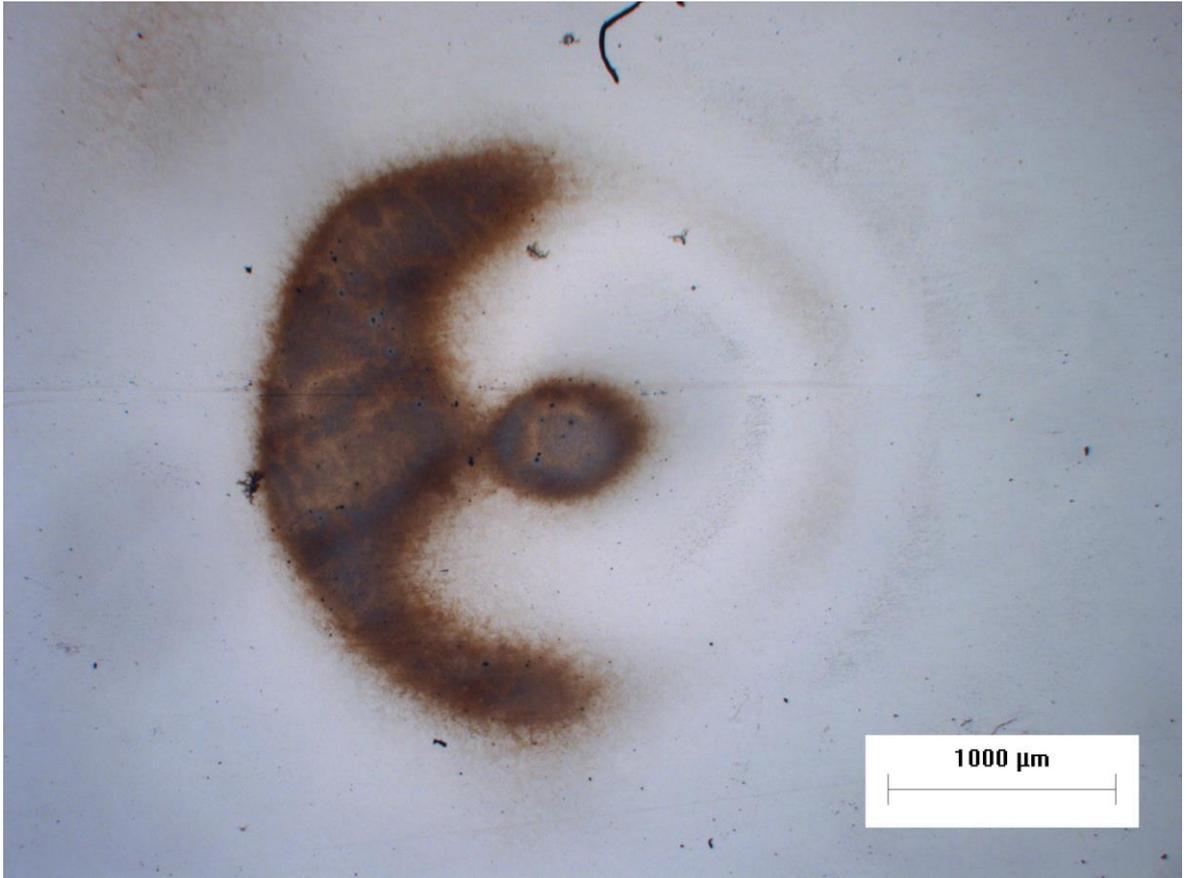
*Figura 9.1.11 10HZ\_10 colpi 1.6kV 210 microsecond*



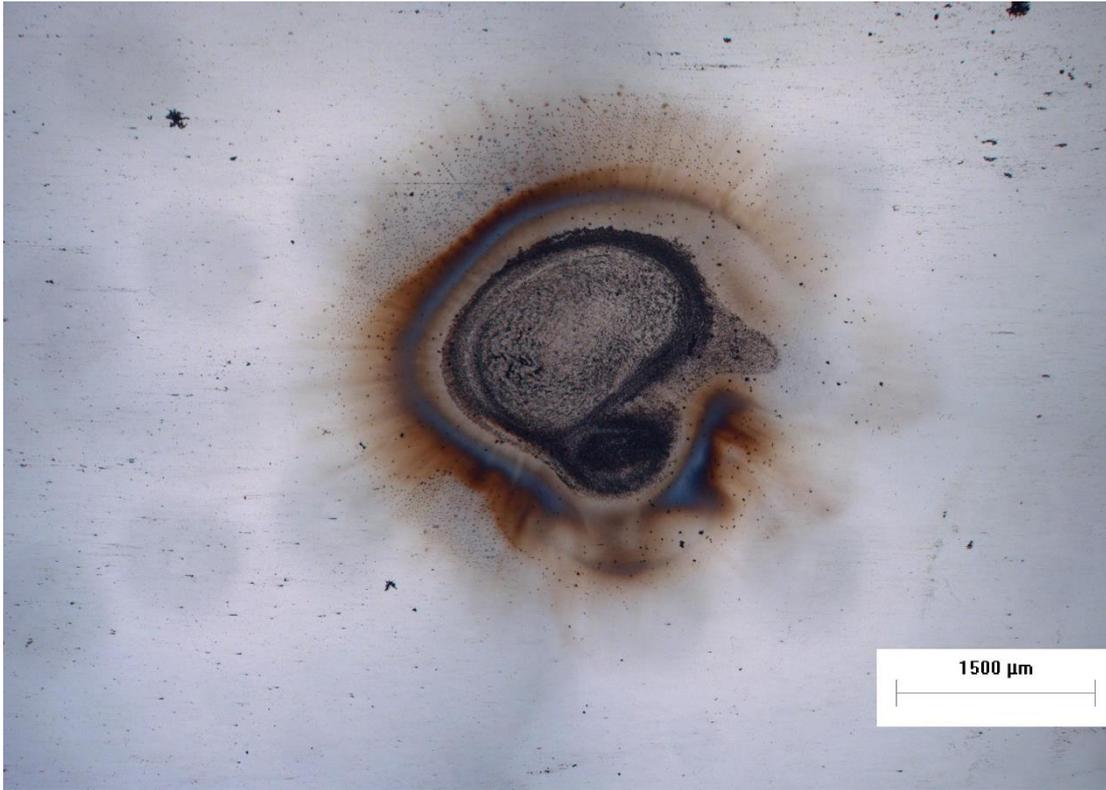
*Figura 9.1.12 10HZ\_100 colpi 1.6kV 210 microsecond*



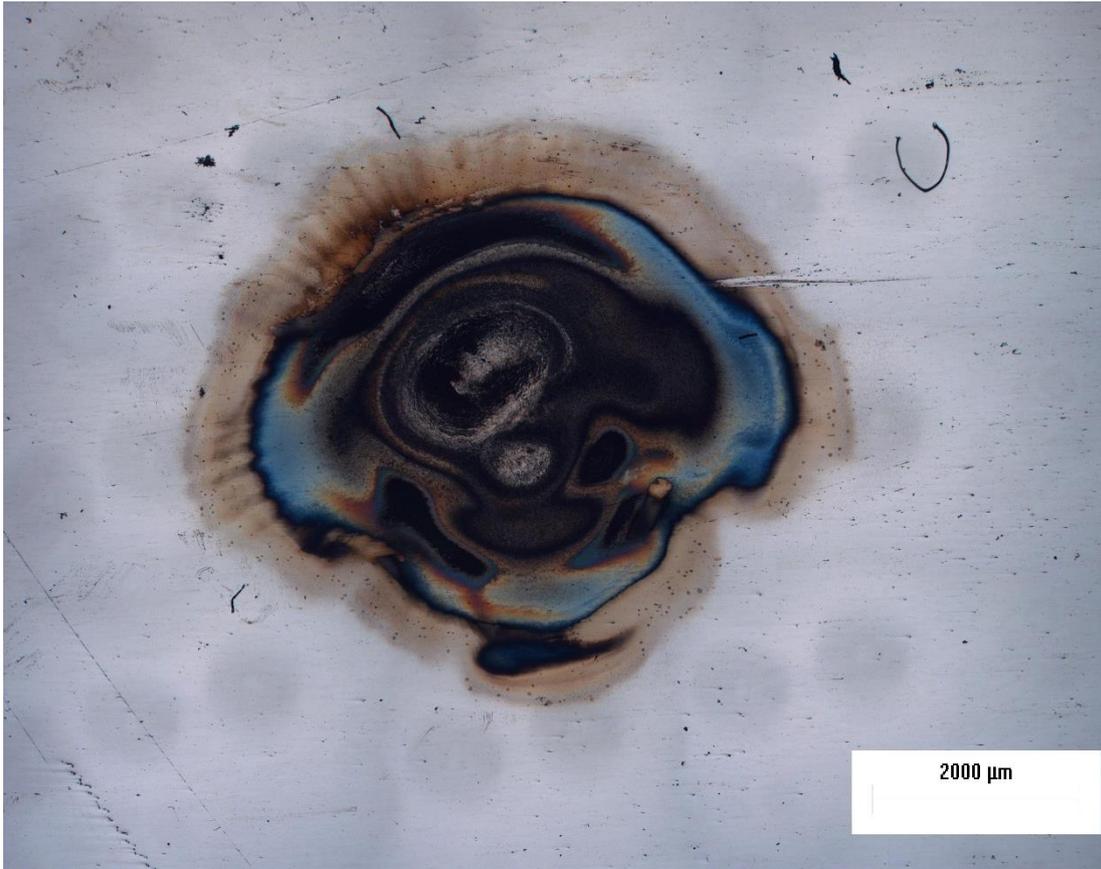
*Figura 9.1.13 1HZ\_100 colpi 1.6kV 210 microsecond*



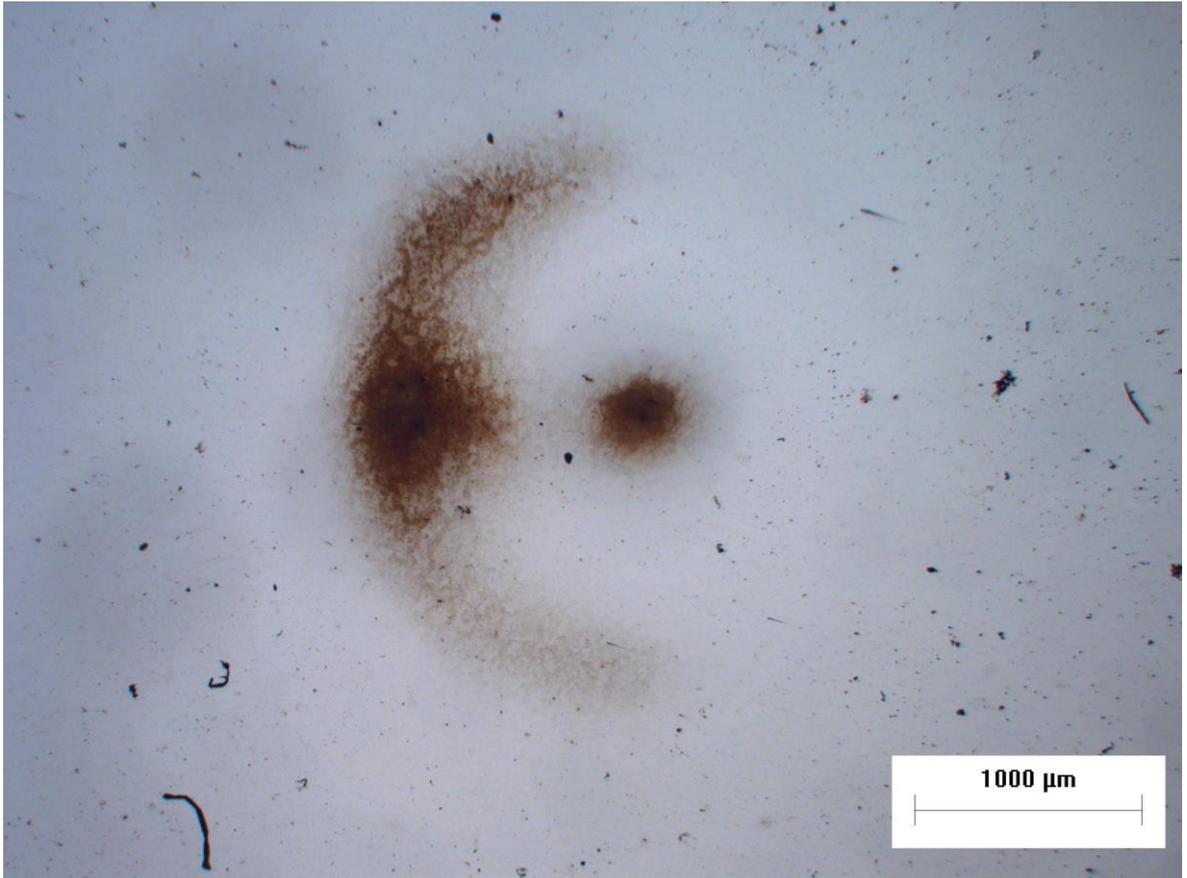
*Figura 9.1.14 1HZ\_100 colpi 1.6kV 190 microsecond*



*Figura 9.1.15 10HZ\_10 colpi 1.6kV 190 microsecond*



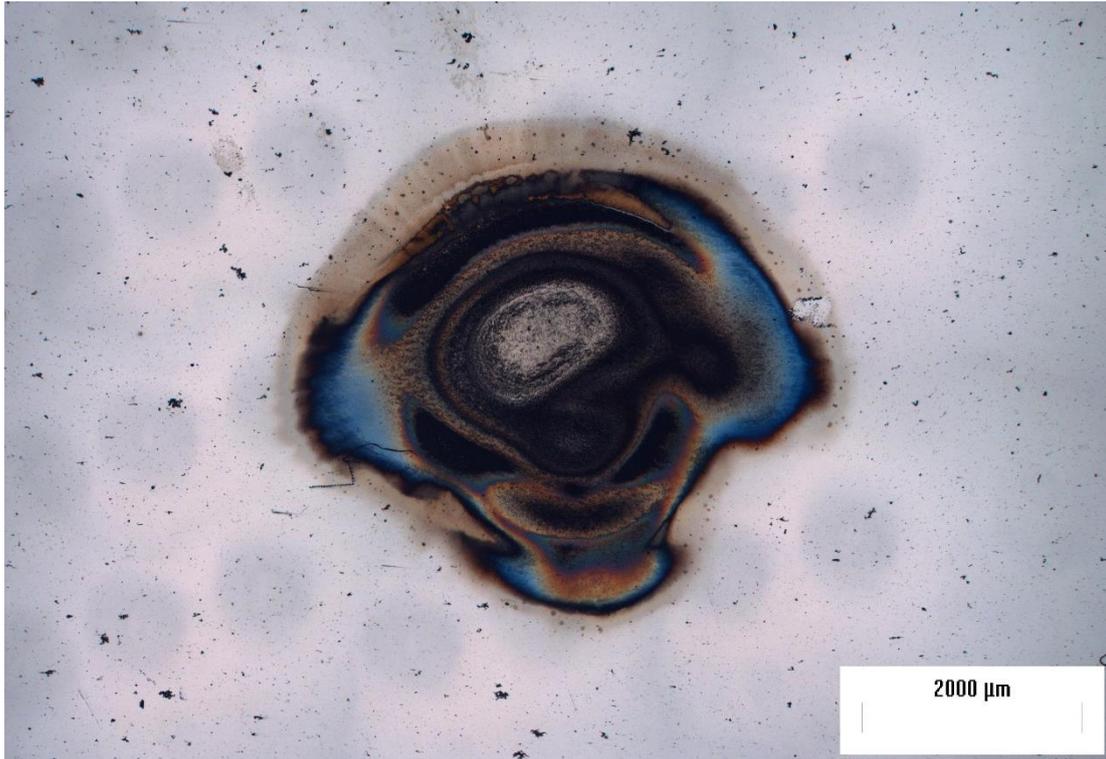
*Figura 9.1.16 10HZ\_100 colpi 1.6kV 190 microsecond*



*Figura 9.1.17 1HZ\_100 colpi 1.6kV 180 microsecond*



*Figura 9.1.17 10HZ\_10 colpi 1.6kV 180 microsecond*

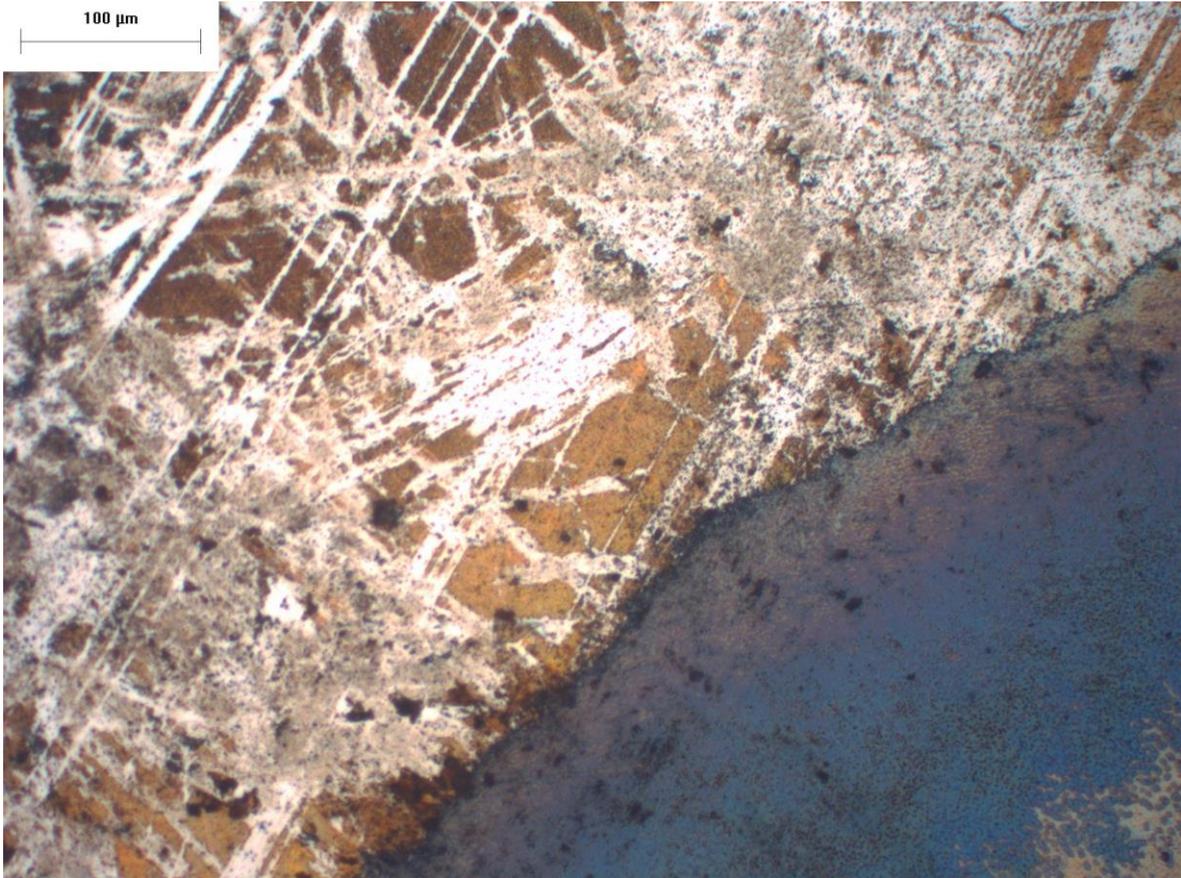


*Figura 9.1.18 10HZ\_100 colpi 1.6kV 180 microsecond*

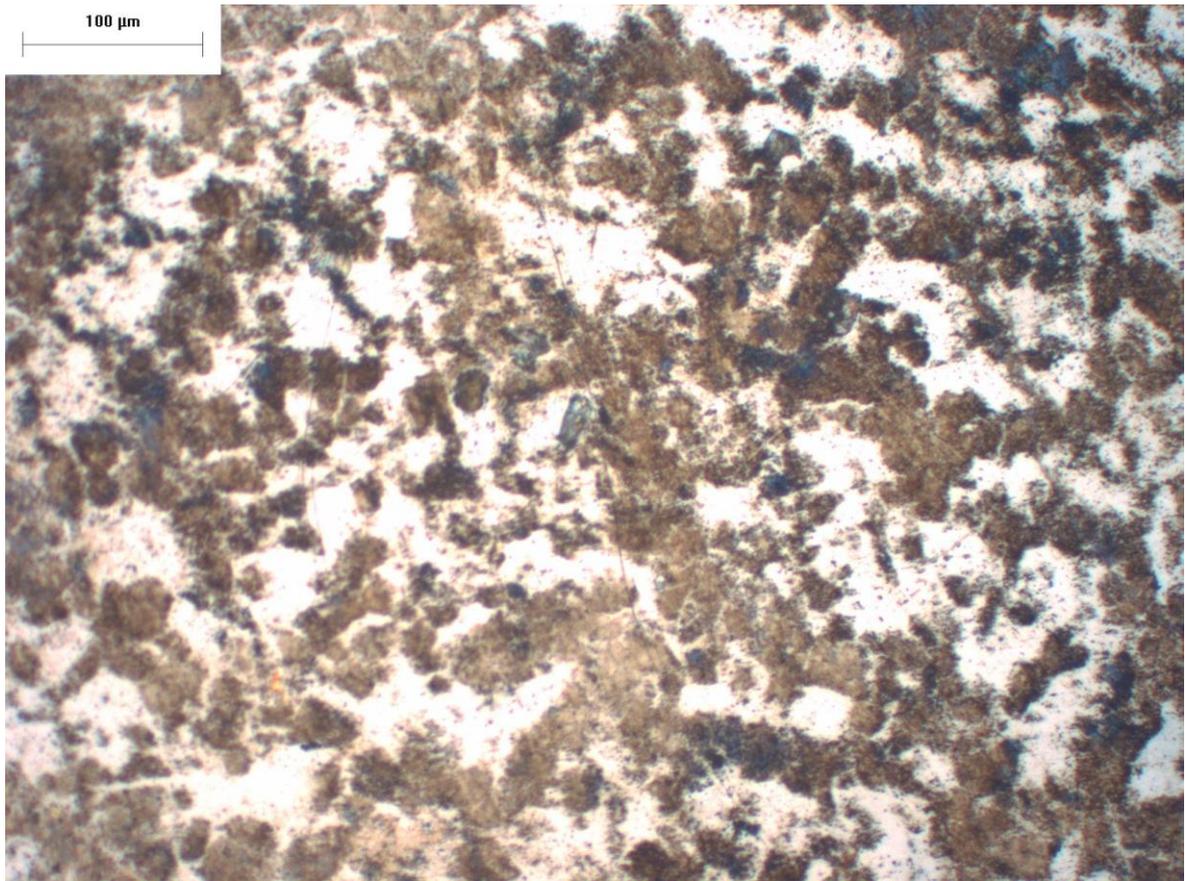
## 9.2. Procedure per determinare il materiale in analisi

Per scoprire di che tipo di acciaio fossero fatti i miei provini, ho seguito un processo dettagliato utilizzando sia il microscopio ottico che un attacco chimico. In primo luogo, ho preparato i campioni levigandoli e lucidandoli con cura per ottenere una superficie liscia e priva di graffi, condizione necessaria per un'analisi accurata. Una volta pronta la superficie, ho applicato un reagente chimico specifico per l'acciaio al carbonio, un processo chiamato attacco chimico. Questo reagente ha reagito con il metallo, mettendo in evidenza la microstruttura interna del campione.

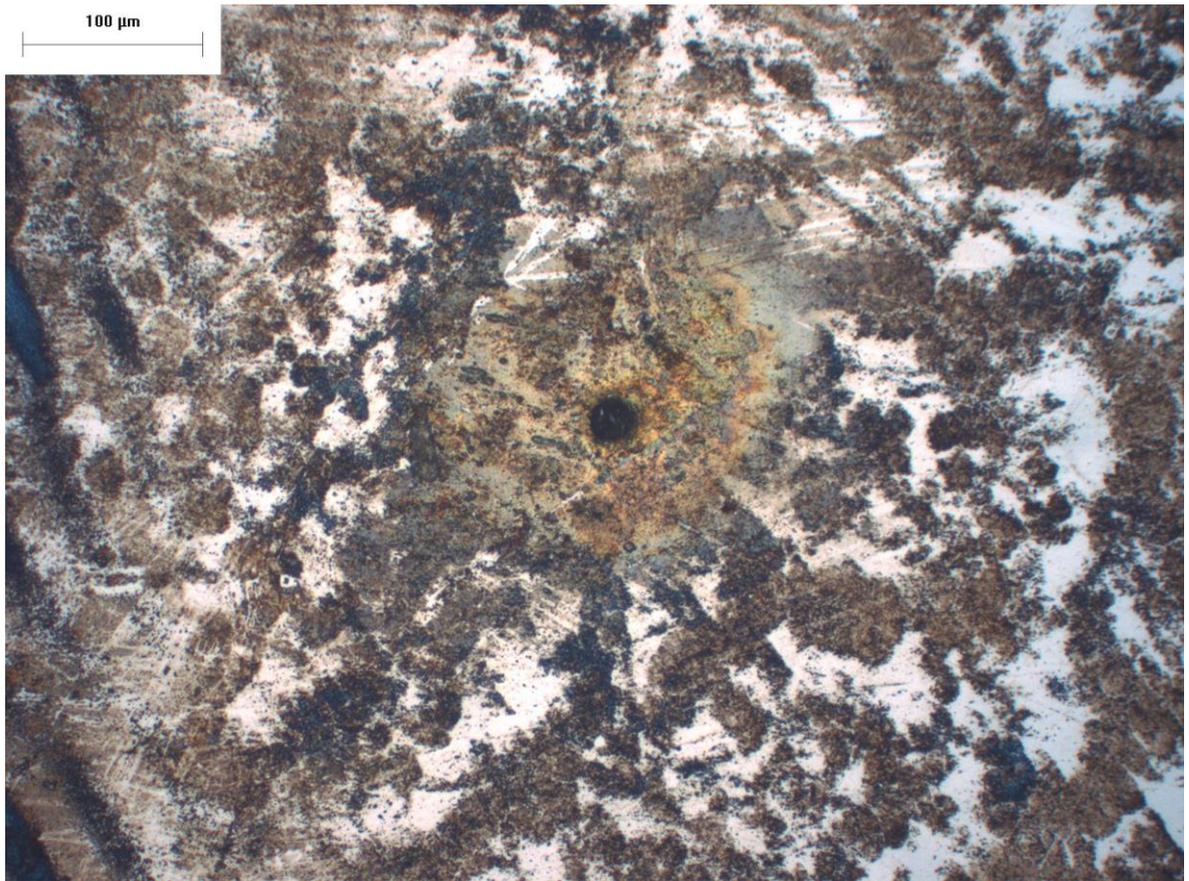
Dopo aver applicato l'attacco chimico, ho esaminato il campione al microscopio ottico. L'osservazione al microscopio ha rivelato una struttura costituita da ferrite e perlite, i componenti tipici degli acciai al carbonio. Analizzando attentamente la proporzione e la distribuzione di questi costituenti, e confrontandoli con le microstrutture note dei vari tipi di acciaio, ho concluso che il campione era un C40. Questa conclusione è stata possibile grazie alla caratteristica presenza di perlite e ferrite nella proporzione specifica di un acciaio con una percentuale di carbonio dello 0,40%. L'uso combinato del microscopio ottico e dell'attacco chimico si è rivelato fondamentale per identificare con precisione il tipo di acciaio dei miei provini.



*Figura 9.2.1 Micrografia acciaio dopo attacco chimico*



*Figura 9.2.2 Micrografia acciaio dopo attacco chimico*



*Figura 9.2.3 Micrografia acciaio dopo attacco chimico*



*Figura 9.2.4 Micrografia acciaio dopo attacco chimico*

Dalle micrografie ottenute, ho esaminato attentamente la zona attorno alla bruciatura lasciata dal laser. Utilizzando il microscopio ottico, ho analizzato la microstruttura per identificare eventuali distorsioni o alterazioni nei grani metallografici. Con mia sorpresa, non sono emerse distorsioni significative dei grani attorno alla zona bruciata. La struttura cristallina si è mantenuta uniforme e coerente con il resto del campione, senza mostrare segni di stress o deformazioni attribuibili all'azione del laser.

Questa osservazione è particolarmente significativa poiché indica che le bruciature laser, al momento, non possono essere definite come difetti strutturali del materiale. Non avendo rilevato alcuna alterazione negativa della microstruttura, posso concludere che l'integrità del materiale non è compromessa dalle bruciature osservate. Tuttavia, sarà importante

monitorare queste aree con ulteriori analisi e test per garantire che, a lungo termine, non emergano problematiche latenti.

### 9.3 Risultati durezza

Per approfondire l'analisi dell'effetto del laser sul materiale, abbiamo deciso di eseguire test di durezza e microdurezza. L'obiettivo di questi test era verificare se il laser avesse creato zone termicamente alterate (ZTA) attorno alla bruciatura e al suo interno, e se ci fosse stata la formazione di martensite.

I test di durezza ci hanno permesso di misurare la resistenza del materiale alla deformazione meccanica in diverse zone, mentre i test di microdurezza hanno fornito dati dettagliati su scala microscopica, consentendoci di esaminare piccole aree specifiche con precisione elevata. Confrontando i valori di durezza e microdurezza nelle aree colpite dal laser con quelli delle zone non trattate, non è emersa assolutamente nessuna variazione significativa. L'andamento irregolare dei valori di microdurezza, osservato durante i test, deriva dal fatto che il penetratore del microdurometro a volte colpiva le aree di perlite e altre volte quelle di ferrite. Questi due costituenti hanno differenti proprietà meccaniche: la perlite è più dura, mentre la ferrite è più morbida. Questa variabilità naturale nella microstruttura dell'acciaio C40 ha causato variazioni nei valori di microdurezza, ma non è stata influenzata dal trattamento laser.

Questi risultati indicano chiaramente che il calore del laser non ha creato zone termicamente alterate né ha provocato la formazione di martensite attorno alla bruciatura o al suo interno. L'assenza di variazioni di durezza conferma che la microstruttura del materiale è rimasta invariata e che l'integrità meccanica non è stata compromessa dal trattamento laser.

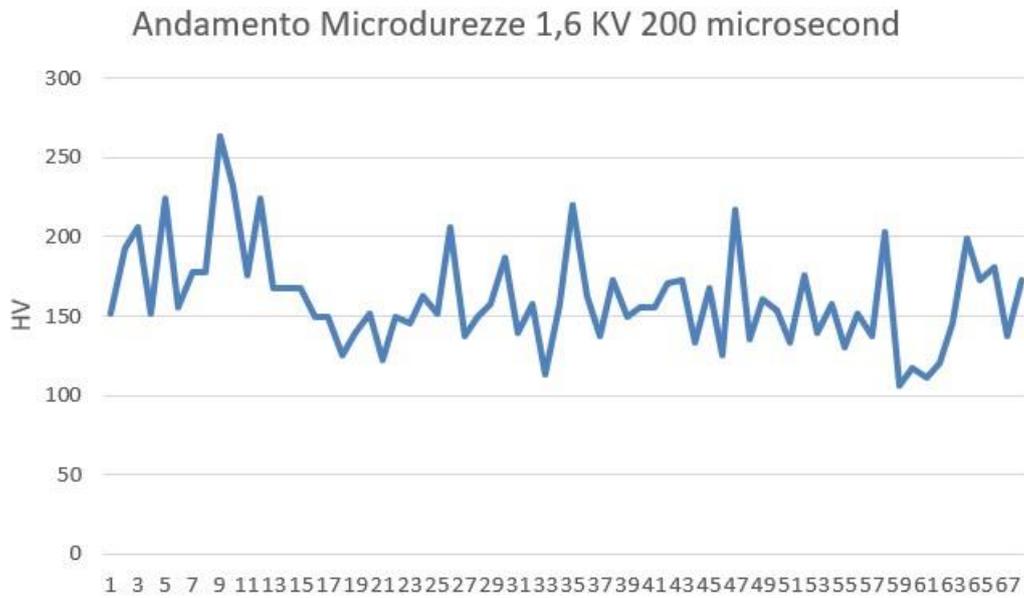


Figura 9.3.1 Andamento microdurezza 1.6 KV 200 microsecondi

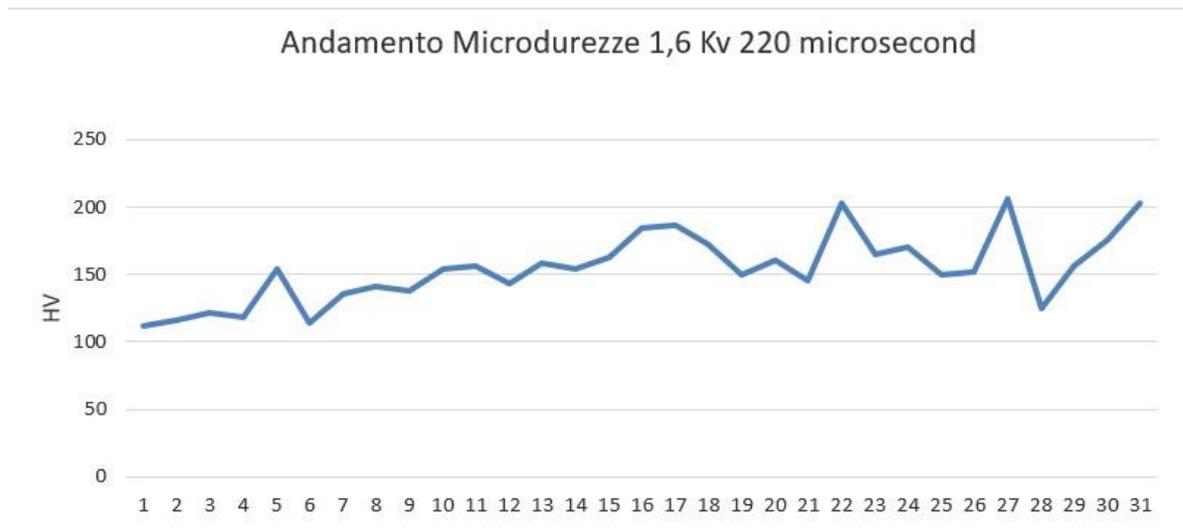


Figura 9.3.2 Andamento microdurezza 1.6 KV 200 microsecondi

Di seguito vengono riportati i valori delle durezze misurate su un campione torquale, sul provino 1 dove il laser è impostato a 1,6 KV 200 microsecondi 10 HZ e 100 colpi, mentre il provino 5 è caratterizzato dai parametri 1,6 KV 220 microsecondi 10 HZ e 100 colpi.

N° Prova	Durezza Rockwell Torquale
1	84
2	81
3	84
4	81
5	80
6	81

*Tabella 9.3.1 Risultati durezze torquale sfera 1/16 carico 100*

N° Prova	Durezza Rockwell
1	90
2	84
3	85
4	86
5	85
6	84

*Tabella 9.3.2 Risultati durezza provino 1 sfera 1/16 carico 100*

N° Prova	Durezza Rockwell
1	85
2	84
3	84
4	86
5	83
6	84

*Tabella 9.3.3 Risultati durezza provino 5 sfera 1/16 carico 100*

## 9.4 Risultati Microscopia elettronica

Il provino di acciaio è stato tagliato ortogonalmente alla superficie trattata con il laser. Questo metodo di preparazione permette di osservare la sezione trasversale del materiale e valutare eventuali modifiche strutturali sotto la superficie colpita.

L'obiettivo dell'Esame effettuato sfruttando la microscopia elettronica a scansione è verificare l'eventuale asportazione di materiale dovuta all'azione del laser e analizzare la microstruttura del campione per identificare eventuali deformazioni o alterazioni.

Le immagini SEM hanno mostrato la microstruttura tipica dell'acciaio, composta da grani cristallini. La morfologia dei grani e la loro distribuzione sono state analizzate attentamente e non sono stati rilevati segni significativi di asportazione di materiale sulla superficie o nella sezione trasversale del campione. La superficie appare intatta, con solo qualche minima distorsione dei grani. La minima distorsione dei grani osservata è probabilmente dovuta al processo di taglio del campione piuttosto che all'azione del laser. Queste distorsioni sono localizzate e non influenzano significativamente la struttura complessiva del materiale.

A parte le minime distorsioni, non sono emersi risultati significativi dall'analisi SEM.

La struttura interna del campione di acciaio non mostra modifiche rilevanti, indicando che l'azione del laser non ha provocato danni o rimozioni visibili di materiale.

Il campione di acciaio ha mantenuto la sua integrità strutturale dopo l'esposizione al laser, con l'assenza di asportazione di materiale visibile e solo minime distorsioni dei grani dovute al taglio.

L'uso del laser sul campione non ha causato effetti dannosi significativi, rendendo il metodo potenzialmente sicuro per applicazioni che richiedono la precisione e la non invasività del trattamento laser.

In sintesi, l'analisi SEM ha confermato che l'esposizione al laser non ha comportato asportazione di materiale e ha solo introdotto minime distorsioni dei grani, probabilmente dovute al taglio del campione. Questo risultato suggerisce che il trattamento laser non ha avuto un impatto significativo sulla microstruttura dell'acciaio, preservandone le caratteristiche principali.

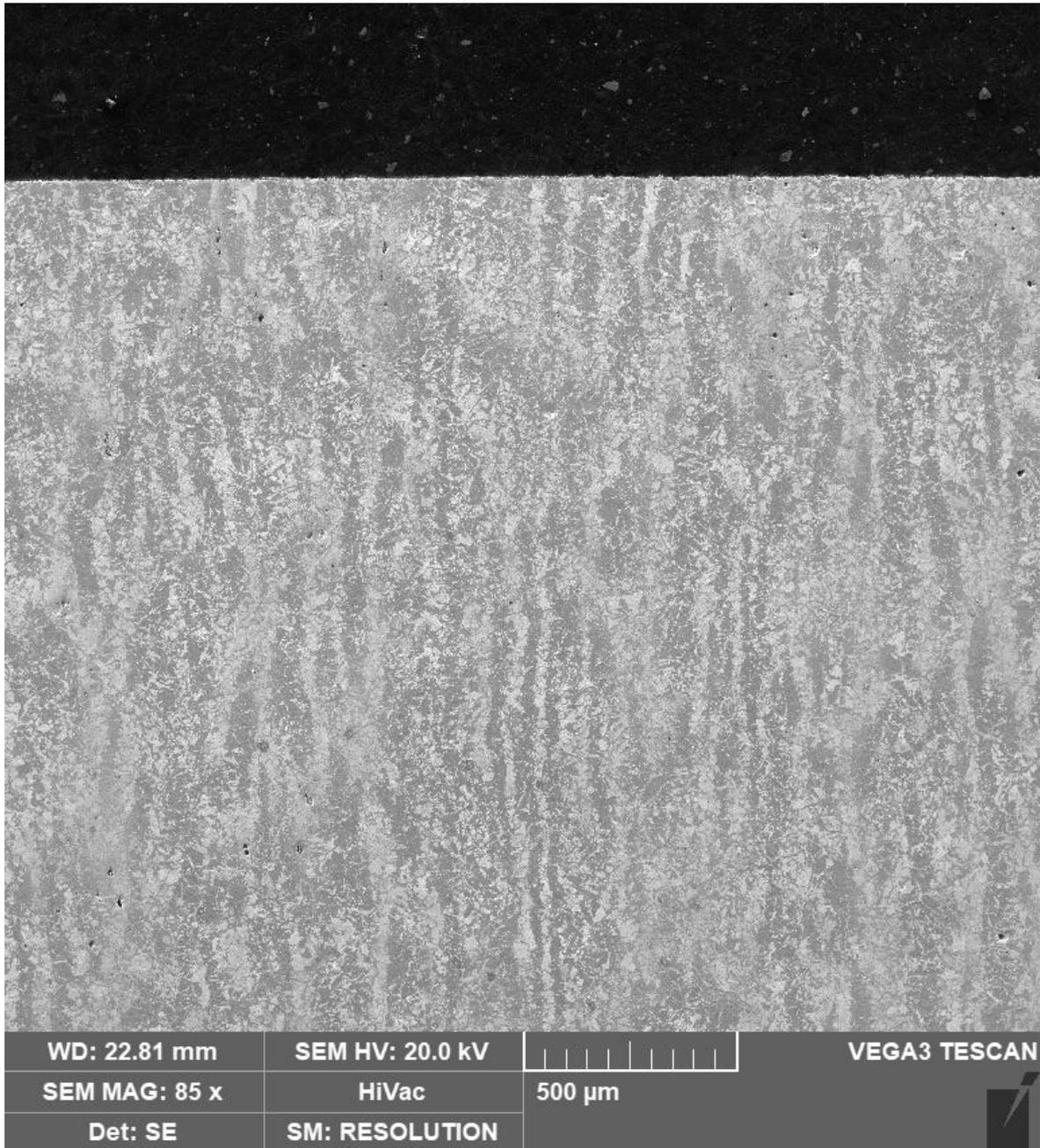
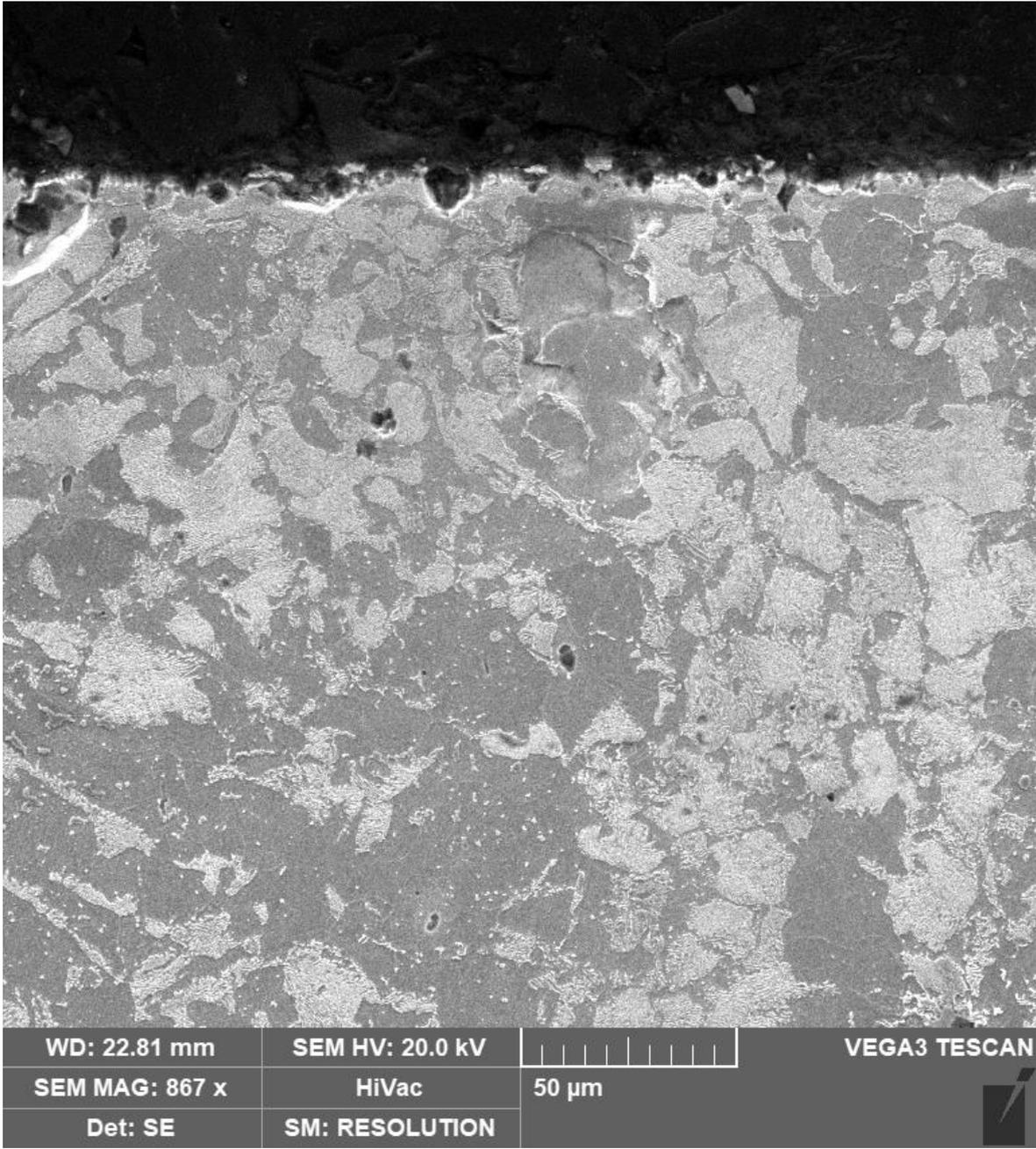
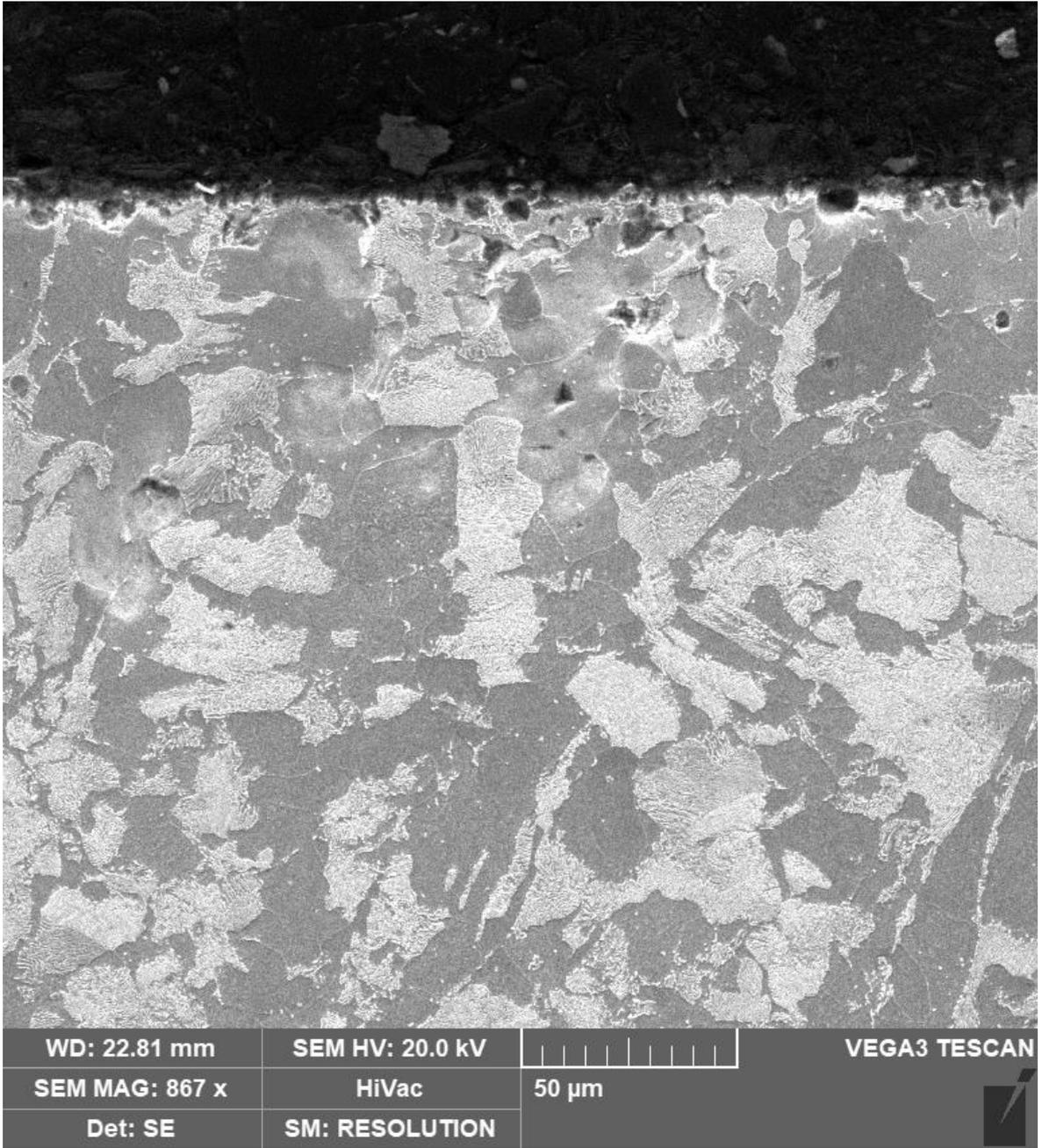


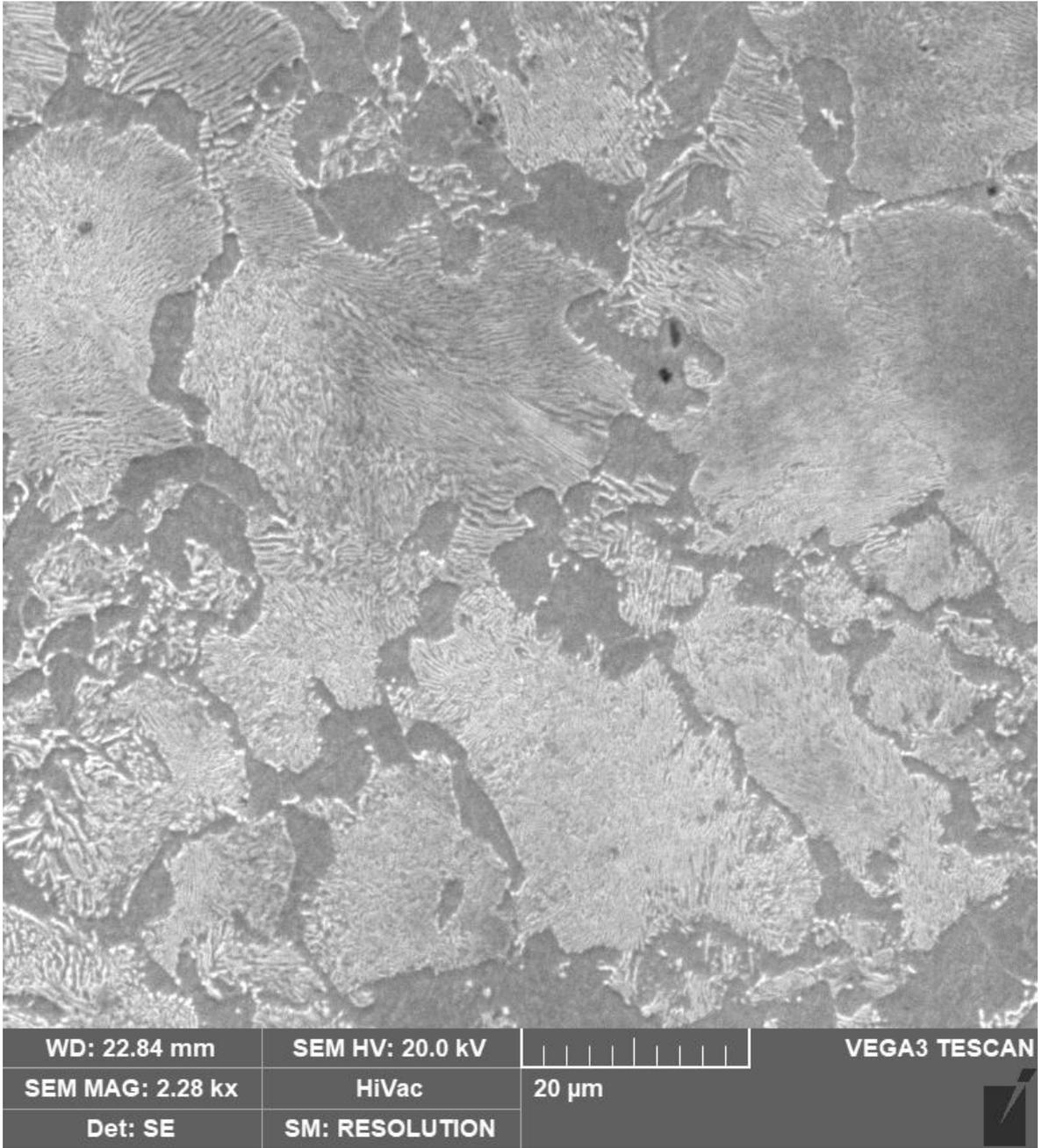
Figura 9.4.1 10HZ\_100 colpi 1.6kV 220 microsecond



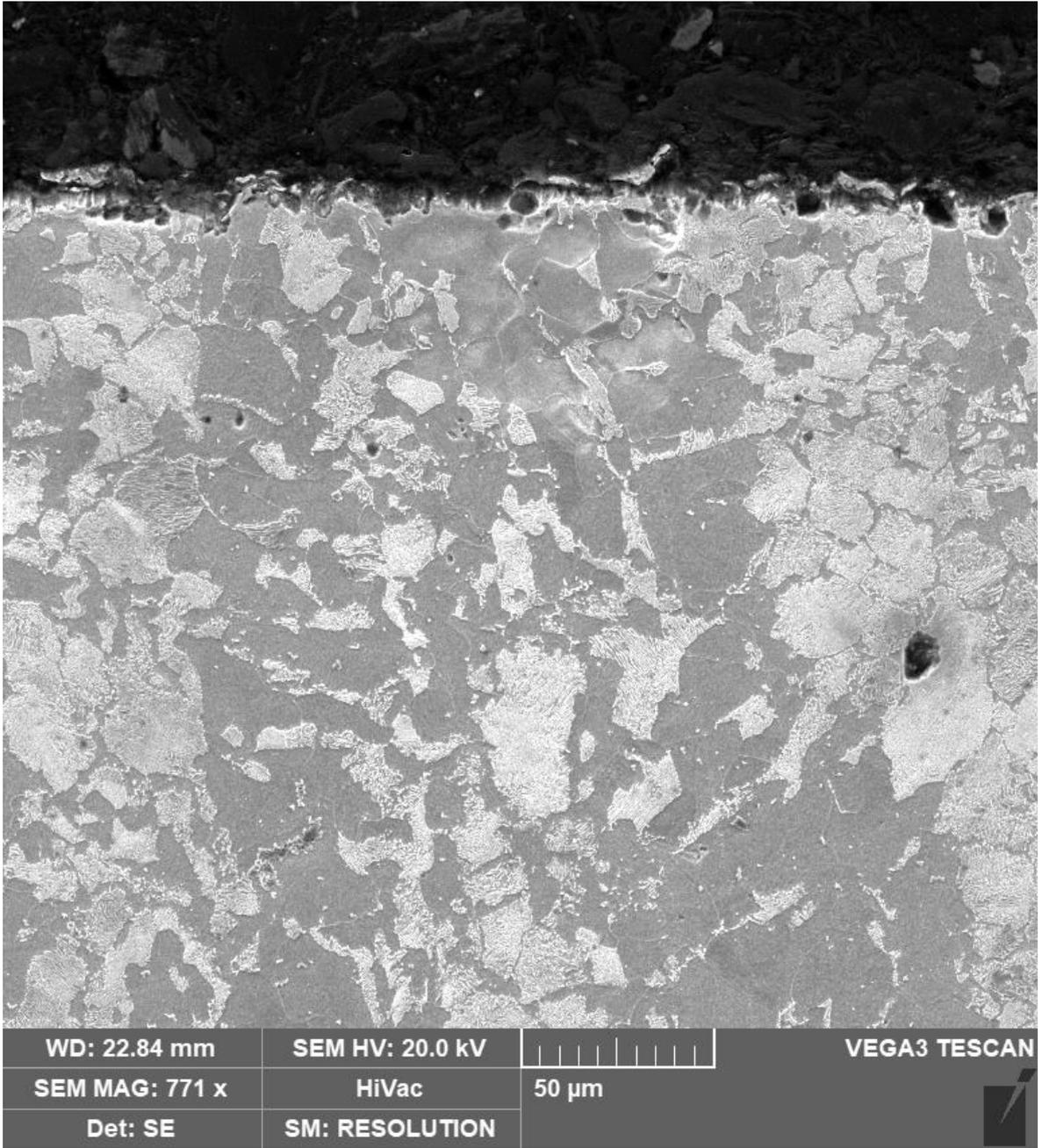
*Figura 9.4.2 10HZ\_100 colpi 1.6kV 220 microsecond*



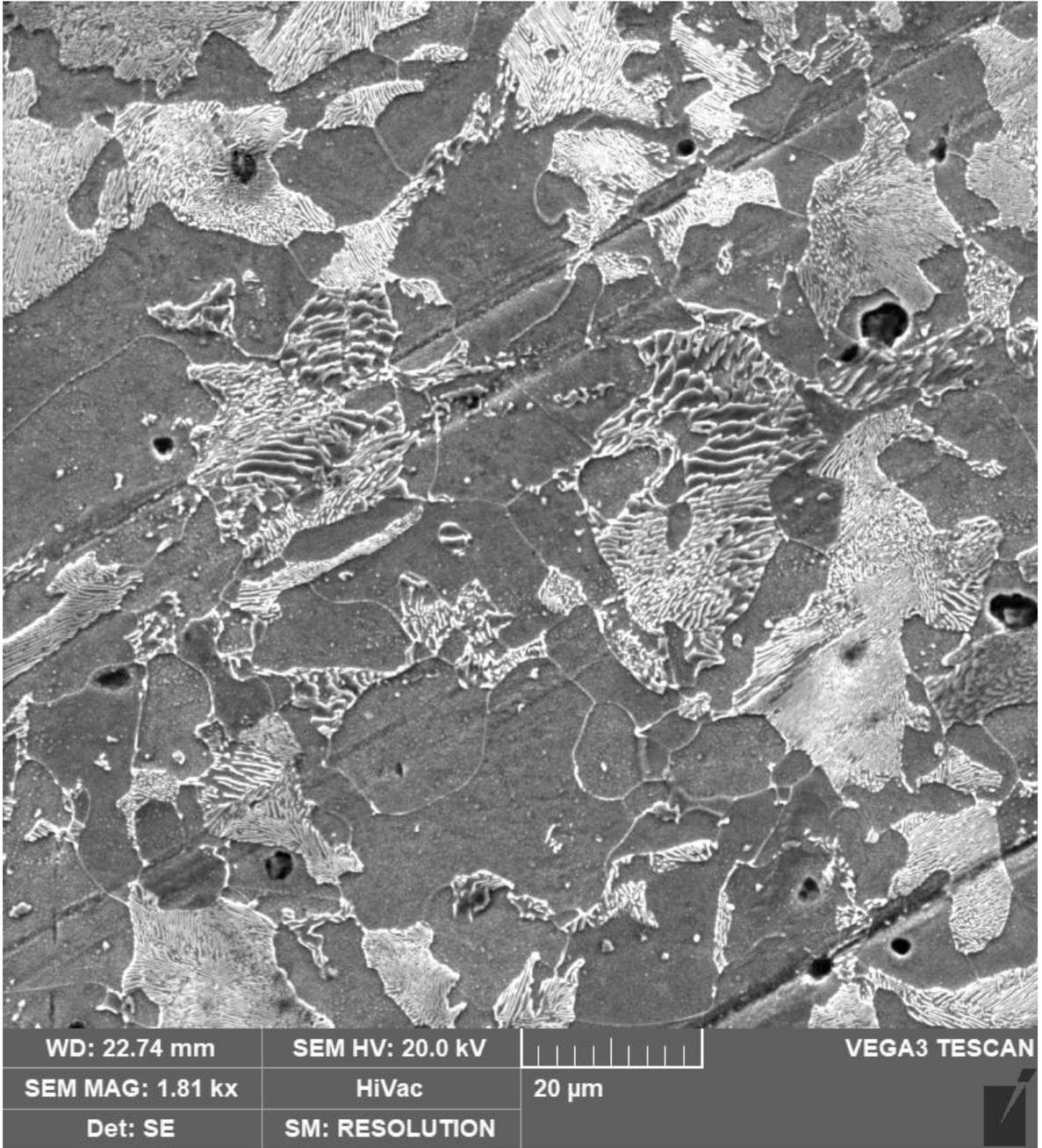
*Figura 9.4.3 10HZ\_100 colpi 1.6kV 220 microsecond*



*Figura 9.4.4 10HZ\_100 colpi 1.6kV 220 microsecond*

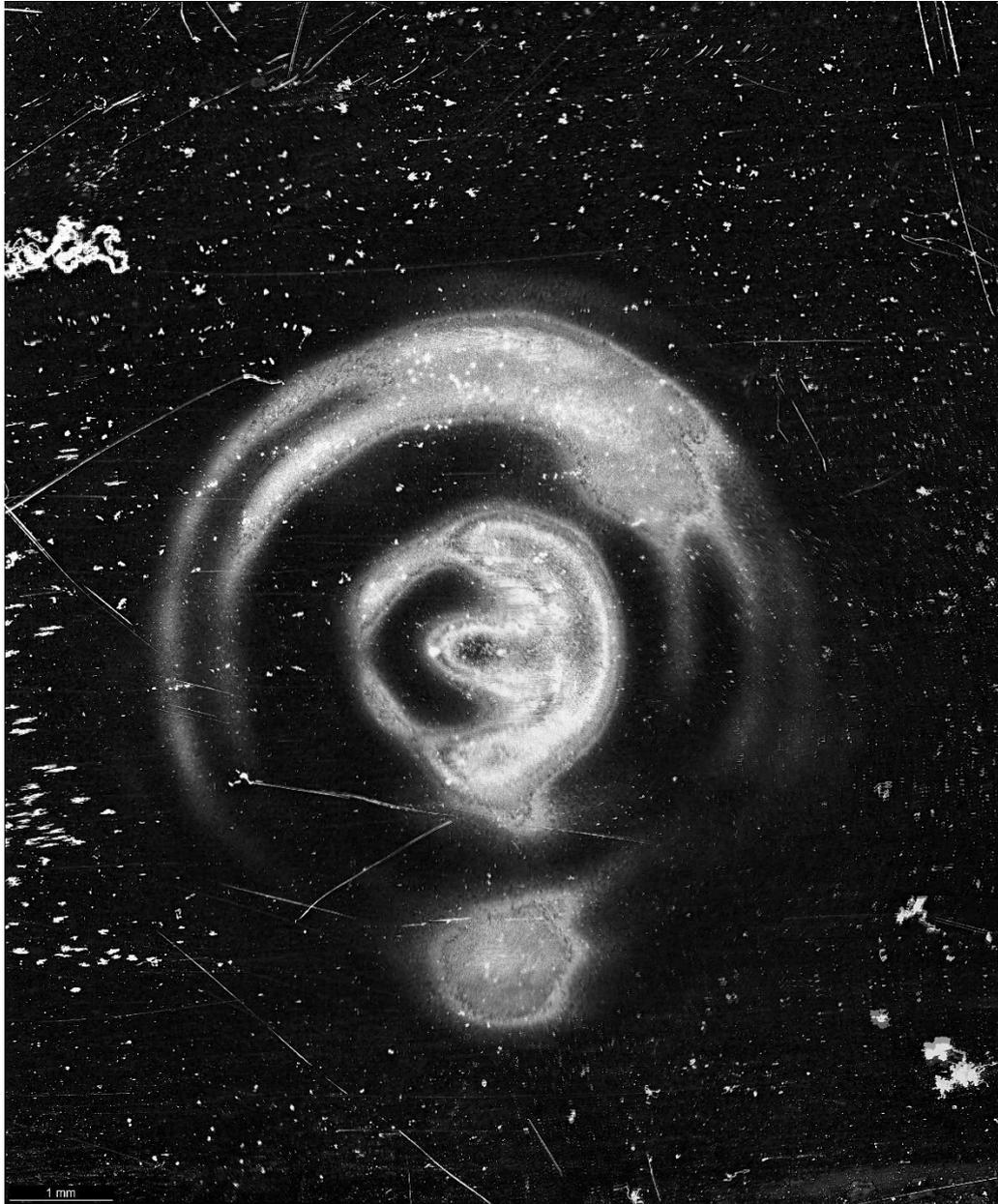


*Figura 9.4.5 10HZ\_100 colpi 1.6kV 220 microsecond*



*Figura 9.4.6 10HZ\_100 colpi 1.6kV 220 microsecond*

## 9.5 Risultati stereo microscopia



*Figura 9.5.1 Micrografia 1.6 KV 220 microsecond 10 HZ 100 Colpi*

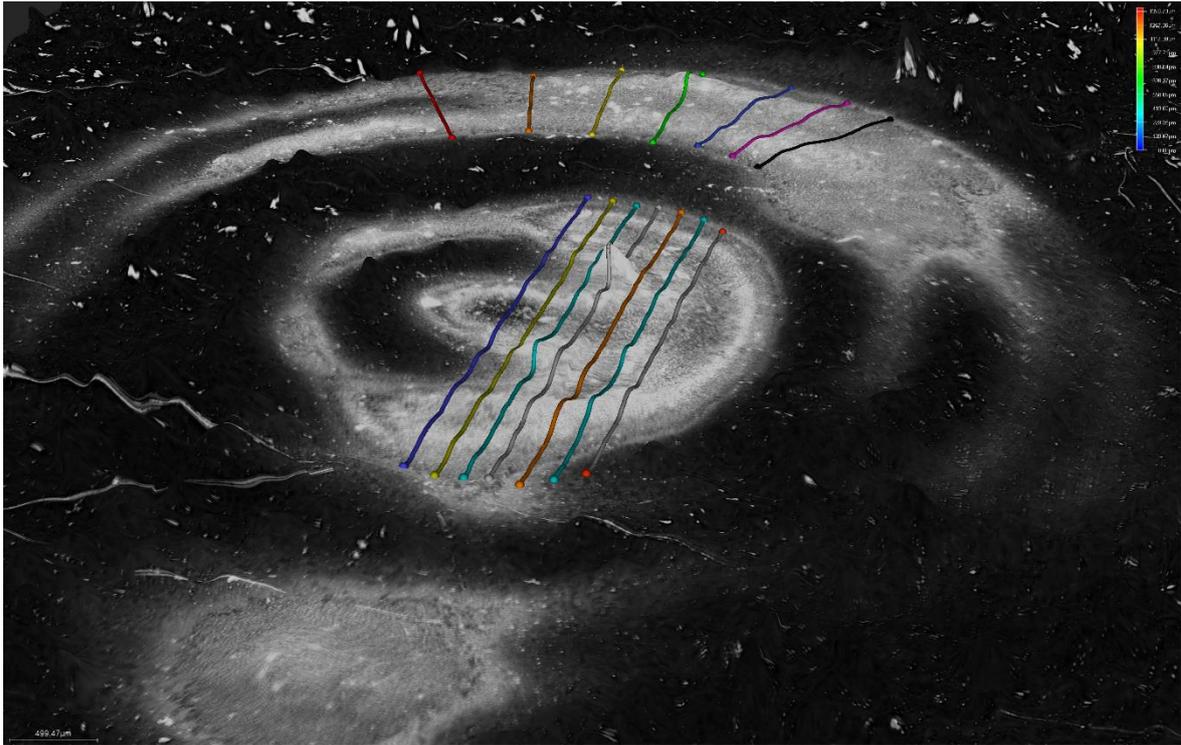


Figura 9.5.2 Profili analizzati

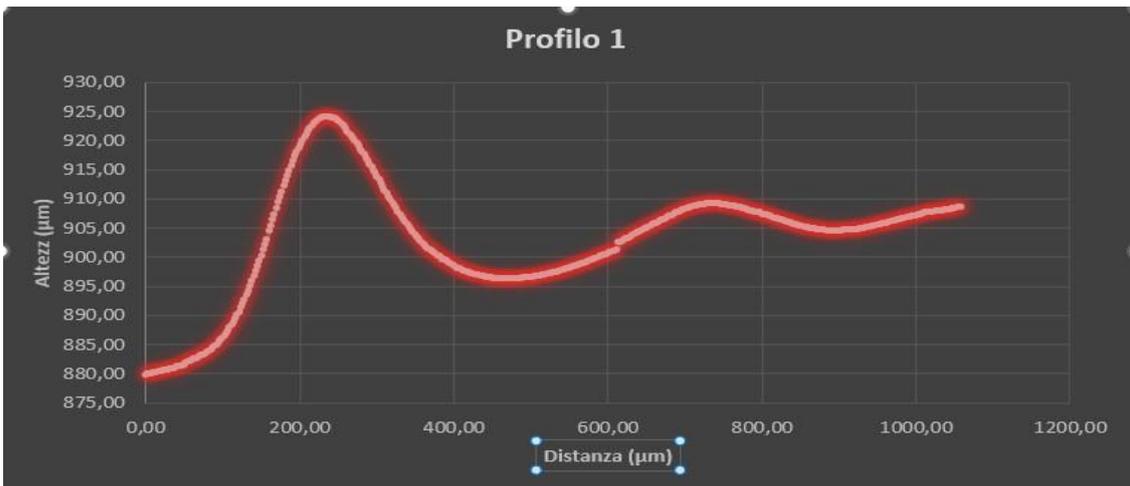


Figura 9.5.3 Profilo 1



Figura 9.5.4 Profilo 2

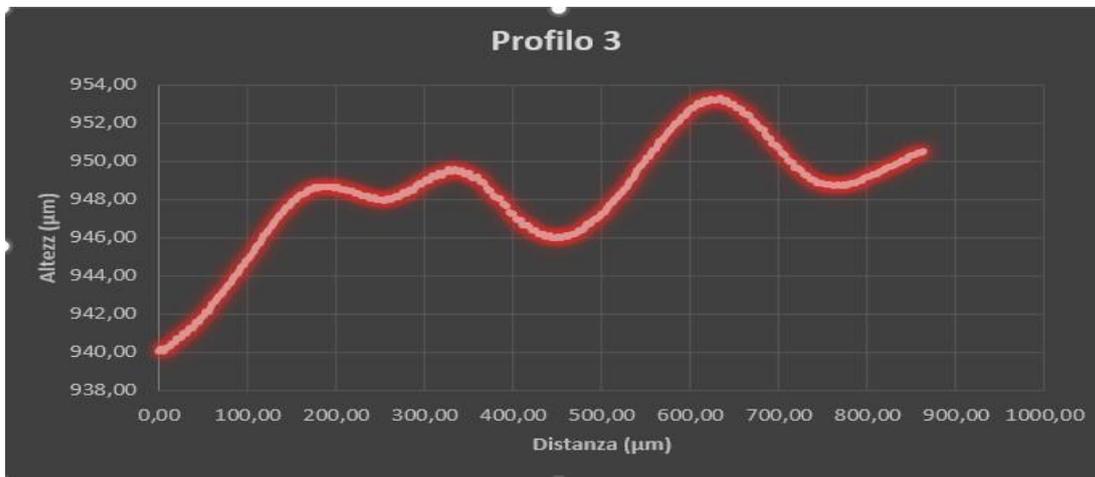


Figura 9.5.5 Profilo 3

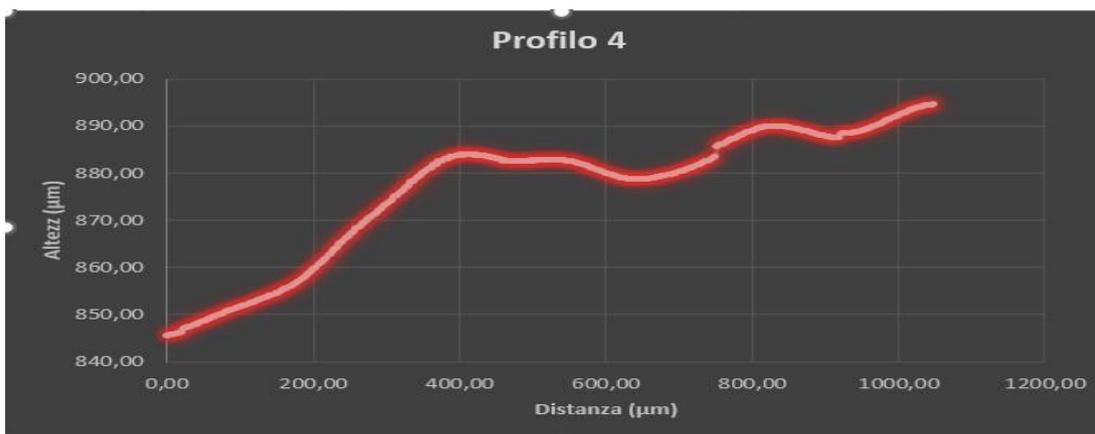


Figura 9.5.6 Profilo 4



Figura 9.5.7 Profilo 5



Figura 9.5.8 Profilo 6



Figura 9.5.9 Profilo 7



Figura 9.5.10 Profilo 8



Figura 9.5.11 Profilo 9



Figura 9.5.12 Profilo 10



Figura 9.5.13 Profilo 11



Figura 9.5.14 Profilo 12



Figura 9.5.15 Profilo 13



Figura 9.5.16 Profilo 14

N° profilo	Differenza tra altezza massima e minima ( $\mu\text{m}$ )
Profilo 1	44,25
Profilo 2	18,44
Profilo 3	13,24
Profilo 4	44,47
Profilo 5	50,56
Profilo 6	49,73
Profilo 7	15,93
Profilo 8	25,23
Profilo 9	28,20
Profilo 10	36,44
Profilo 11	86,32
Profilo 12	28,35
Profilo 13	23,97
Profilo 14	32,60

La stereo microscopia effettuata sul campione di acciaio danneggiato dal laser ha permesso di analizzare con precisione 14 profili differenti della superficie trattata. Per ciascun profilo, è stata misurata l'altezza minima e massima delle asperità presenti. Successivamente, calcolando la differenza tra queste due misure, è stato possibile determinare la profondità massima del danno causato dal laser. Dai dati raccolti, si è osservato che la massima profondità registrata tra tutti i profili analizzati è di 86.32 micrometri.

Questo valore rappresenta l'entità massima del danneggiamento superficiale indotto dal trattamento laser sul campione di acciaio esaminato, evidenziando la precisione e la capacità del laser di alterare significativamente la topografia del materiale.

## **10 – Conclusioni**

In conclusione, l'analisi dei campioni di acciaio danneggiati dal laser ha fornito risultati significativi per comprendere l'effetto delle bruciature laser sui componenti ferroviari. Attraverso l'uso di microscopia ottica ed elettronica, abbiamo osservato che le bruciature non hanno causato distorsioni significative nella microstruttura dei campioni. Questo indica che le bruciature laser, nelle condizioni testate, non compromettono l'integrità strutturale del materiale.

I test di durezza e microdurezza hanno ulteriormente confermato l'assenza di zone termicamente alterate o formazione di martensite nelle aree colpite dal laser. La variabilità naturale nei valori di microdurezza era attribuibile alla differenza intrinseca tra perlite e ferrite, piuttosto che a un effetto del laser stesso. Questi risultati suggeriscono che il trattamento laser, nelle condizioni sperimentali, non influisce negativamente sulle proprietà meccaniche dell'acciaio utilizzato negli assali ferroviari.

L'affidabilità delle misure senza contatto tramite laser è risultata cruciale, e la precisione delle rilevazioni è stata garantita dalla corretta calibrazione dei dispositivi e dalla minimizzazione delle interferenze ambientali. Questa ricerca non solo arricchisce il campo della metrologia laser, ma offre anche spunti pratici per migliorare la gestione e la manutenzione dei componenti ferroviari.

In sintesi, questa tesi evidenzia l'importanza delle tecnologie avanzate di microscopia e delle misurazioni senza contatto per l'analisi dei danni su materiali critici. I risultati ottenuti forniscono una base solida per ulteriori studi e applicazioni nel settore ferroviario, contribuendo potenzialmente a migliorare la sicurezza e l'affidabilità del trasporto su rotaia, inoltre, dai risultati emerge chiaramente che l'uso della tecnica laser non provoca alcun tipo

di danno. Di conseguenza, possiamo affermare con sicurezza che questo metodo è del tutto non distruttivo e non invasivo.