



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA**

**SCUOLA POLITECNICA**

CORSO DI LAUREA IN:

*INGEGNERIA CIVILE AMBIENTALE LM23/LM35*

Preside: Chiar.mo Prof. A.F. Massardo

*[Estratto da Tesi di Laurea Magistrale]*

**METODO DI INDAGINE NON DISTRUTTIVA  
SULL'ACCIAIO DA CALCESTRUZZO ARMATO**

*Sviluppo di correlazione sperimentale tra durezza superficiale e resistenza a snervamento  
tramite prove in situ con durometro di Leeb.*

Laureando:  
*Fabio Campeggio*

Relatore:  
*Chiar.mo Prof. Antonio BRENCICH*

Correlatore  
*Ing. Filippo L. BOVIO*

## Indice

INTRODUZIONE .....	2
SPERIMENTAZIONE .....	3
REPERIMENTO DEI CAMPIONI .....	3
LO STRUMENTO .....	3
PROBLEMATICHE APPLICATIVE .....	4
SVILUPPO DEL CICLO DI LEVIGATURA.....	5
SVILUPPO DELLA CORRELAZIONE SPERIMENTALE .....	9
APPLICAZIONE IN CAMPO .....	11
CONCLUSIONI.....	14
IMMAGINI .....	16

## INTRODUZIONE

Nonostante le moderne tecnologie stiano compiendo passi da gigante, tale sviluppo iperbolico non è caratteristico del settore delle costruzioni, a meno di non considerare applicazioni di razionalizzazione energetica e domotica integrata. Da alcuni anni, nel nostro Paese, ma in generale nel contesto Europeo, si è vissuta una netta inversione di tendenza nel settore delle costruzioni, si è passati dalla fervente edificazione di palazzine residenziali e costituzione di quartieri “dormitorio” al recupero di patrimonio edilizio al fine di renderlo fruibile ed adatto alla moderna costruzione normativa. Per programmare un efficace intervento di ristrutturazione, spesso si trascurava un fondamentale passaggio dell’iter progettuale: quello delle indagini. Proprio come un’opera, importante o secondaria che sia, deve essere fondata a regola d’arte, in base a ciò che si rileva al suo contorno, anche un intervento strutturale, di qualsiasi genere, dovrebbe essere concepito su una base solida, pena lo spreco di risorse o peggio ancora, il rischio di vita degli utenti<sup>1</sup>.

Il tecnico ha una vasta scelta di metodi d’indagine, più o meno affidabili, più o meno speditivi, adatti a diversi materiali, a diverse tipologie costruttive, a diverse condizioni di campo; nello specifico, il lavoro ivi presentato, tratta dell’applicazione di uno strumento già noto e collaudato, il durometro di Leeb<sup>2</sup>. Tale strumento è stato utilizzato per misurare la durezza superficiale di ferri d’armatura di elementi in calcestruzzo armato, per poi comparare tale valore, alla resistenza a snervamento della barra d’armatura stessa, presupponendo l’esistenza di un legame tra queste due grandezze. L’impegno ha preso questa direzione per sviluppare un metodo tale da esemplificare le indagini sulle armature di strutture in calcestruzzo armato, che in passato dovevano essere asportate, sottoposte a prove di trazione, e successivamente ripristinate, con una procedura lunga, costosa e che permetteva di ottenere scarsi risultati da impiegare nella successiva fase di progetto/ verifica.

Particolare cura è stata dedicata allo sviluppo del ciclo di levigatura della superficie, che, se non appropriatamente preparata, avrebbe comportato errori di misura inaccettabili. Inoltre un ulteriore affinamento della tecnica è avvenuto grazie all’applicazione in campo del metodo di indagine che ha fornito solidi parametri e sviluppo di standard procedurali. I dati raccolti sono stati confrontati con quelli della prova inversa, su ferri di caratteristiche note, dando risultati più che soddisfacenti.

Confrontando il metodo di misura della durezza con altre tecnologie oggi disponibili, se ne è constatata la superiore precisione e il maggiore atteggiamento al campo di parametri degli acciai utilizzati per l’armatura del calcestruzzo.

Non essendo presente nessun lavoro analogo, il presente costituisce un punto d’inizio per lo sviluppo di un nuovo metodo non distruttivo di indagine sulle strutture.

---

1 “L’incertezza è il peggiore dei mali, fino al momento in cui la realtà ce la fa rimpiangere.” Alphonse Karr, Genoveffa, 1838.

2 Tradizionalmente la durezza viene determinata con l’ausilio di macchine per prove secondo i metodi Vickers, Rockwell o Brinell. Per le misurazioni mobili esiste il metodo a rimbalzo Leeb utilizzato per la prima volta nel 1978. Questo prevede che un corpo d’impatto venga spinto contro il provino. L’urto del corpo d’impatto provoca una deformazione della superficie e una conseguente perdita di energia cinetica. Tale perdita di energia viene rilevata tramite una misurazione di velocità e in base ad essa viene calcolato il valore di durezza in Leeb (HL).

## SPERIMENTAZIONE

### REPERIMENTO DEI CAMPIONI

Il primo passo per lo sviluppo di un metodo sperimentale è stato quello di reperire il maggior numero di campioni possibili, e per far questo, la ricerca ha spaziato in diversi contesti, da un ponte collassato a Carasco (GE)<sup>3</sup> a muri di sostegno demoliti, a risulta di materiale da costruzione, e persino a ferri d'armatura reimpiegati per la costruzione di manufatti. I campioni risultavano essere in condizioni varie, da quelli profondamente



Figura 1: alcuni dei campioni di acciaio d'armatura catalogati.

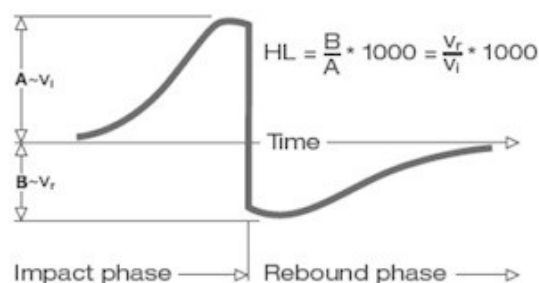
ossidati a quelli appena separati dal calcestruzzo, in totale circa 280 barre di differenti caratteristiche. I campioni sono stati catalogati per diametro, tipo e provenienza, ottenendo una notevole varietà di base dati. Detta ricerca, di fatto non si è mai conclusa, accogliendo come preziosa fonte di dati sperimentali ogni spezzone di ferro d'armatura che si poteva reperire da centri di raccolta ferraglie, cantieri, strutture diroccate, ecc..

### LO STRUMENTO

Il metodo di prova della durezza a rimbalzo tipo Leeb è stato sviluppato nel 1975 da Leeb e Brandestini alla Proceq SA per fornire un durometro portatile per metalli. E' stato sviluppato come alternativa ai tradizionali metodi di misura della durezza, spesso complicati e ingombranti. Il primo misuratore di durezza che sfrutta il principio Leeb del rimbalzo fu chiamato "Equotip", un termine che ancora oggi è usato come sinonimo per il test di durezza a rimbalzo in scala Leeb. Il principio dinamico di Leeb si basa sul fatto che il valore di durezza viene derivato dalla perdita di energia di un corpo di impatto, detto dardo, dopo essere stato scagliato contro il provino, ed essere appunto rimbalzato. Il quoziente Leeb ( $v_r/v_i$ ) viene considerato come espressione dell'energia persa dal dardo nell'impatto grazie alla deformazione plastica del provino: il dardo rimbalzerà più velocemente per corpi con maggiore durezza rispetto a corpi più morbidi. Il valore della scala Leeb è ottenibile dalla seguente formula:

$$HL = 1000 \times (v_r/v_i)$$

Dove HL è il valore di durezza in scala Leeb,  $v_r$  è la velocità di rimbalzo del dardo,  $v_i$  è la velocità di impatto del dardo. Suddetto dardo è magnetizzato e nella parte di appoggio della sonda ad impatto è posta una bobina, questo permette di misurarne la velocità. E' noto che un magnete in movimento all'interno della bobina indurrà una tensione nel filo della



<sup>3</sup> Ponte collassato a seguito di violento nubifragio avvenuto il 22 ottobre 2013.

bobina, e che questa tensione è direttamente proporzionale alla velocità del magnete che passa nella bobina. Praticamente quindi la scala di Leeb è ottenuta dalla formula  $1000 \times (V_r/V_i)$  dove  $V_r$  e  $V_i$  sono le tensioni rispettivamente di rimbalzo e di impatto misurate sulla bobina<sup>4</sup>.



Nei durometri a rimbalzo, il sensore di durezza è chiamato dispositivo o sonda ad impatto, ed è composto sempre dagli stessi elementi. Quello che può variare, a seconda delle applicazioni cui viene utilizzata, sono le dimensioni, la geometria e il peso del dardo, la forza della molla interza oppure la forma della base di appoggio. Generalmente, il dispositivo di impatto è composto come indicato in figura.

A seconda della sonda ad impatto utilizzata nella prova di durezza a rimbalzo, è necessario esprimere il valore con una apposita scala. Ad esempio, se effettuiamo una prova dinamica di durezza utilizzando un dispositivo di impatto tipo D, la misura verrà espressa in HLD, cioè scala Leeb (HL) ottenuta con dispositivo ad impatto tipo D (suffisso D). Per un valore di durezza utilizzando un dispositivo tipo G il valore di durezza sarà espresso in HLG e così via.

Lo strumento utilizzato nella sperimentazione si

presentava composto da un'unità digitale con display a cristalli liquidi retroilluminato, dove visualizzare in tempo reale i risultati di prova, il cablaggio di collegamento alla sonda, la sonda di tipo B e una stampante ad infrarossi con carta bisfenolica con la quale si sono stampati per poi archivarli, tutti i risultati delle oltre 1500 prove.

Figura 2: onda tipo B. 1.Dardo; 2. Anello di supporto; 3. Bobina; 4. Cavo; 5. Pinza; 6. Tubo di carico; 7. Bottone di rilascio.

## PROBLEMATICHE APPLICATIVE

Una volta reperiti e classificati i campioni, veniva a presentarsi il primo ostacolo all'applicazione dello strumento: la finitura superficiale. La tipologia di misurazione, per sua dinamica, molto delicata, imponeva una finitura del pezzo da testare che risultasse al di sotto dei 40  $\mu\text{m}$  di scabrezza media per avere risultati accettabili, finitura questa, non ottenibile con tradizionali metodi di levigatura speditivi. La velocità nel trattamento risultava essere un elemento vitale per dare vita ad un metodo di levigatura valido che facesse da giusto supporto per un metodo d'indagine vincente, che fosse in potenza cioè, di fornire una mole di dati, con minimo scarto, in tempi accettabili. I limiti applicativi dettati dai tempi e dagli spazi di cantiere imponevano, in aggiunta, l'impiego di utensili maneggevoli, di rapido utilizzo se pur senza intaccare le caratteristiche fisiche del metallo, il quale avrebbe potuto subire fenomeni di tempra locale e conseguenti variazioni di reticolo cristallino.

Dopo svariate serie di cicli di levigatura, misurazioni e procedure per ridurre gli scarti fra le varie battute dello strumento, è emersa una nuova problematica, che portava ad un'indeterminazione nella risoluzione del problema, la condizione di vincolo del campione. Tale condizione è risultata così pregiudizievole da creare più difficoltà nell'effettuazione delle prove in laboratorio che in situ. Infatti, la prima tecnica di ancoraggio dei campioni è stata abbandonata dopo i primi cicli di prove a causa di risultati variabili in maniera

<sup>4</sup> DIN 50156 "Metallic materials – Leeb hardness test" - DGZfP Guideline "Mobile Härteprüfung" - VDI/VDE Guideline 2616 Part 1 "Hardness testing of metallic materials" - ASTM A956 "Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products".

crescente all'allontanarsi dal punto di vincolo<sup>5</sup>, alla quale è subentrato un ancoraggio in morsa di ghisa su di un piano in granito di circa 900 kg di massa.



Figura 3: ancoraggio fallace di provino a tavolo preparazione ferri

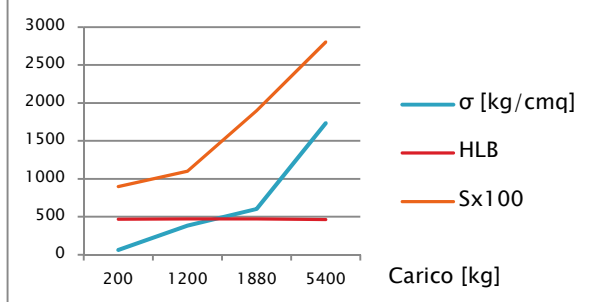
Definite le condizioni di vincolo ideali, tali cioè da ridurre le prove in laboratorio a quelle con massa infinita, riscontrabili su un elemento strutturale in opera, si è proceduto con la verifica di influenza tensionale sui campioni tenuti in tiro da una macchina per le prove di trazione. Si è partiti da un provino di acciaio d'armatura appropriatamente preparato ed ammorsato alla macchina, successivamente si è portato il

provino su livelli tensionali da 65 a 1700 kg/cm<sup>2</sup> misurando ad ogni step di tensione l'influenza<sup>6</sup> sulle misurazioni.

Tabella 1: Tramite questa esperienza si è appurato che l'influenza tensionale, nel range di normale utilizzo dei ferri d'armatura<sup>7</sup>, non ne pregiudica le caratteristiche meccaniche di durezza tratto rosso del grafico), in quanto lo scarto tra tutte le misurazioni risulta inferiore all'1%.

$\phi_{eq}$ [mm]	L [m]	P [kg]	Ps [kg/m <sup>3</sup> ]	A [cm <sup>2</sup> ]
19.9	0.629	1.499	7650	3.1

Campione 1 - T 22°C - P 1016 KPa



T [kg]	σ [kg/cm <sup>2</sup> ]	HLB	S	S%
200	64.2	467	9	1.9
1200	385.2	472	11	2.3
1880	603.5	473	19	4.0
5400	1733.4	464	28	6.0

Valor medio di HLB 469 Scarto tot <1%

Consolidato ciò, è emerso che nemmeno sottoponendo il provino ad uno stato di tensione monoassiale a carattere corticale<sup>8</sup>, esso subisca variazioni sensibili di durezza superficiale.

## SVILUPPO DEL CICLO DI LEVIGATURA

Il processo sistematico di sviluppo del ciclo di levigatura è stato elemento imprescindibile della fase di ricerca, senza le adeguate tecniche, le misurazioni fatte con il durometro, non

<sup>5</sup> In prima battuta, il vincolo della barra d'armatura era rappresentato da dei fermi in acciaio che tenevano ancorato il campione ad un tavolo in legno di massa considerevole.

<sup>6</sup> Gli scarti (in arancio) fra le misurazioni di uno stesso step tensionale avvengono a causa della risposta in frequenza del sistema vibrante barra d'acciaio-mordacchie che varia la sua frequenza propria di vibrazione in funzione della tensione applicata e va ad interessare l'entità del ritorno del percussore.

<sup>7</sup> Range di normale utilizzo assunto pari e comunque non superiore a 1000 kg/cm<sup>2</sup>.

<sup>8</sup> Il carattere corticale dello stato di tensione deriva dal fatto che la barra di acciaio viene sollecitata a trazione dalle mordacchie, le quali ammorsandosi sulla superficie esterna, trasmettono sollecitazioni localmente superiori alla parte più esterna del ferro d'armatura. Questo fenomeno, più accentuato nei ferri di grande diametro, provoca gradiente tensionale tra parte esterna della sezione e nocciolo centrale.

avrebbero potuto essere trasferite dal contesto dell'ingegneria meccanica a quello dell'ingegneria civile, dai test di fabbrica ai test in cantiere.

Tenendo conto delle caratteristiche allotropiche del Fe-C, si sono stabiliti i limiti di temperatura ed esposizione da non superare nella fase di lavorazione della superficie. Per acciaio a basso tenore di carbonio il limite è stato stabilito alla temperatura di 200°C ad esposizione indefinita<sup>9</sup>, oltre la quale si inizierebbero a verificare trasformazioni del reticolo classificate come "tempre deboli". Le tecniche più aggressive quali impiego smerigliatrici angolari con disco abrasivo si sono rivelate eccessivamente veementi, per cui si è scelta la tecnologia delle spazzole in fibre composite nylon-carburi di silicio unitamente ad una smerigliatrice angolare a controllo elettronico che ne permettesse un utilizzo continuativo, a bassa velocità. La caratteristica saliente delle spazzole abrasive è l'utilizzo a **limite di temperatura 90°C**, infatti oltrepassata questa, il filamento subirebbe deformazioni plastiche importanti ovvero scioglimento locale che verrebbe mostrato all'operatore da una traccia sull'area di lavoro, imponendo di interrompere la lavorazione o raffreddare la superficie. Questo limite applicativo delle **tecno-spazzole SIT** è stato sfruttato a tutto vantaggio della necessità di evitare la temperatura di tempra. Tuttavia l'utilizzo delle sole spazzole in nylon risultava di scarsa efficacia su superfici di limitata area nonché di elevata scabrezza ed a volte con impurità e difetti di forma da neutralizzare, come ad esempio strati molto profondi di ruggine o calcestruzzo aderente. A questo problema si è ovviato utilizzando in prima passata il metodo più aggressivo: disco abrasivo a 11000 rpm, circa 80 m/s che, rimuovendo un considerevole strato in brevissimo tempo, evitava le prolisse tempistiche, nonché l'anomala usura delle fibre delle spazzole abrasive. I risultati di trattamento sono stati analizzati grazie alle strumentazioni e al supporto prestato dal C.N.R. Area della Ricerca di Genova, nonché dal laboratorio di scienza dei materiali della Scuola Politecnica di Genova. La preziosa collaborazione, ha permesso l'inglobamento di campioni in resina epossidica ad elevata aderenza al fine di esaminare le superfici laterali, ovvero la bontà del metodo, in modo tale da relazionare questa valutazione della micro scabrezza con i risultati delle prove di durezza dinamiche condotte preventivamente all'inglobamento. Successivamente alla lucidatura della faccia ortogonale a quella trattata, tramite una mola a piatto con grana decrescente<sup>10</sup>, i campioni sono stati



Figura 4: Campione di acciaio inglobato in resina

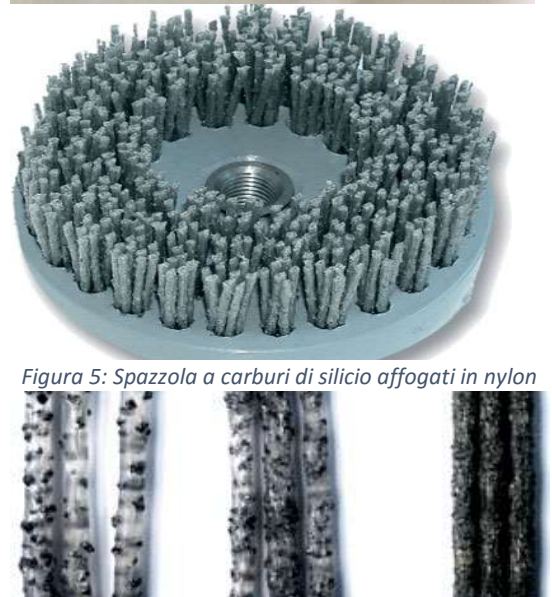


Figura 5: Spazzola a carburi di silicio affogati in nylon

<sup>9</sup> In relazione al diagramma TTT Fe-C che definisce le curve di formazione della martensite (elemento a durezza superiore), si è stabilito di permanere al di sotto del valore limite di austenite stabile a tempo infinito.

<sup>10</sup> I provini sono stati lucidati con 5 step di levigatura della faccia ortogonale a quella su cui fare le misurazioni, ovvero le basi del cilindro, i dischi abrasivi impiegati partivano dalla grana FEPA P180 fino ad arrivare alla FEPA P2500, in modo tale da avere un'immagine chiara del profilo e quindi della scabrezza superficiale della porzione soggetta al ciclo di levigatura.

sottoposti ad un'analisi sia con microscopio ottico fino a 500 ingrandimenti che al microscopio elettronico a scansione sulla faccia oggetto del trattamento in modo da rilevare l'impronta degli inerti abrasivi<sup>11</sup>.

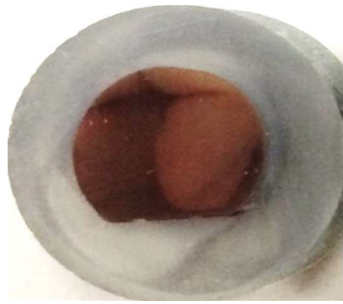


Figura 6: **A destra**, Immagine a 200 ingrandimenti della sezione di un campione, si noti che il metallo (parte in basso) ad occhio nudo ha una finitura a specchio (sopra), mentre il microscopio ottico mostra le tracce della lavorazione con mola a piatto (circa 8  $\mu$ m). Si noti inoltre l'effetto parificante dell'ossido di ferro (parte intermedia) e la scabrezza del metallo (quotato in verde) pari a 25  $\mu$ m nella sezione di osservazione.

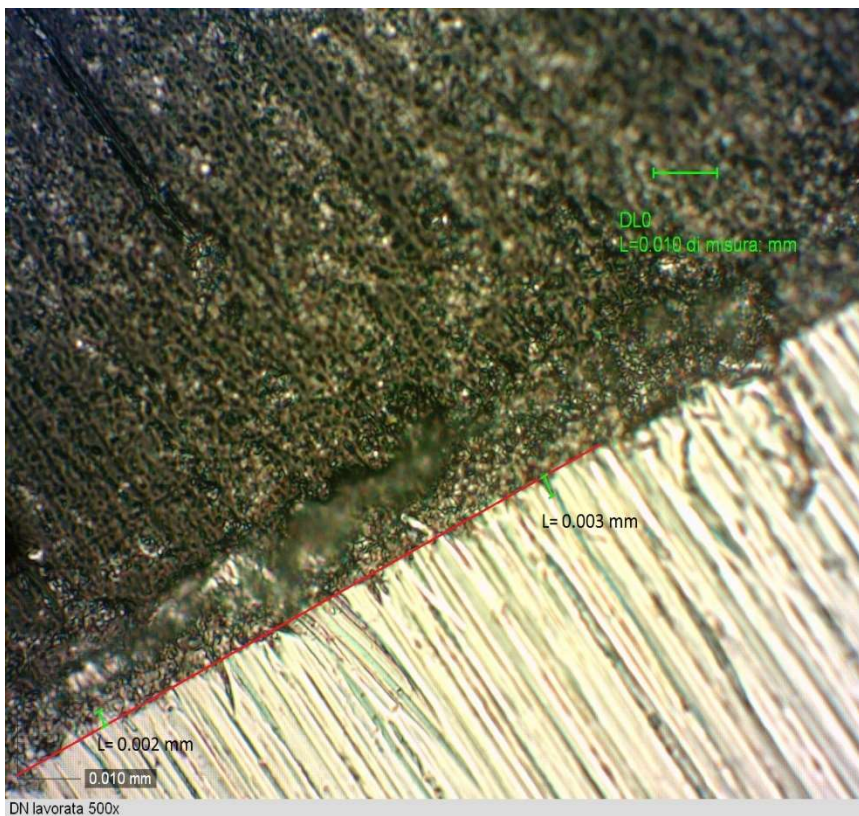
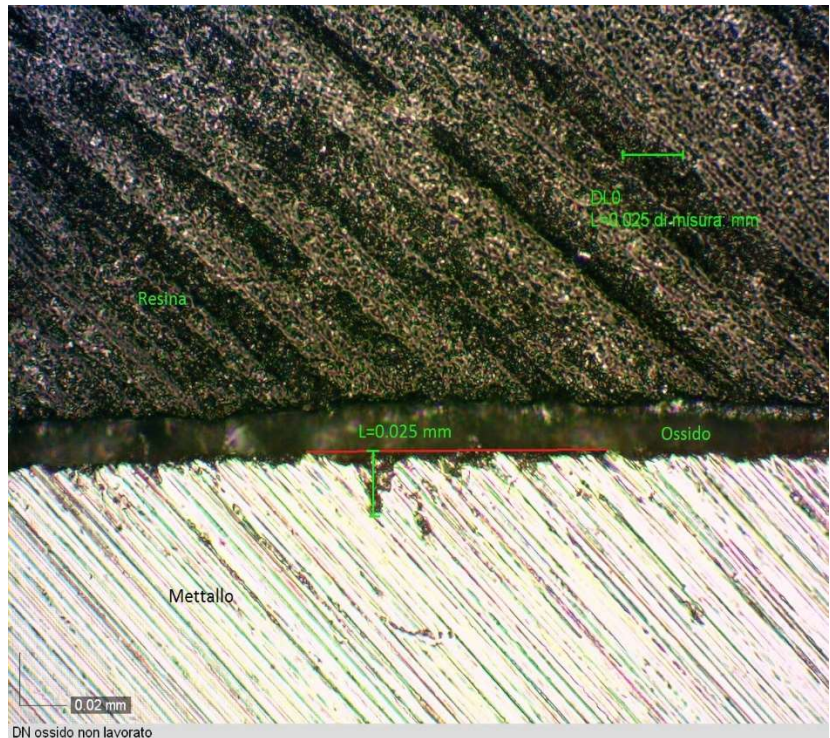


Figura 7: Immagine da microscopio ottico del tratto lavorato. Si osservi la linea di superficie media in rosso e la quota di massimo cavo/picco indicata in verde misurata pari a 3 $\mu$ m, un risultato dieci volte inferiore al limite di utilizzo del durometro, imposto dalla ditta Proceq pari a 40  $\mu$ m. Grazie a questa finitura superficiale si è riusciti ad ottenere scarti di misurazione molto contenuti, nell'ordine del 4% tra le 5 battute di una singola misurazione, e comunque non superiore al 6% su più misurazioni.

<sup>11</sup> Il microscopio elettronico a scansione è stato puntato frontalmente alla superficie oggetto del ciclo di levigatura, in modo tale da rilevare le tracce degli inerti che, in un processo di asportazione teorico di materiale, andrebbero ad essere via via eliminate con il susseguirsi degli step di levigatura a grane decrescenti, fino a lasciare tracce visibili unicamente del diametro medio relativo all'ultima passata di spazzola abrasiva.

Tabella 2: i valori di durezza di una serie, sono ottenuti come media su cinque battute dello strumento. Ad ogni serie corrisponde uno scarto (s) indice della bontà delle misurazioni della serie. Un valore di durezza viene assunto come valore mediato di 5 serie e, analogamente a quanto viene fatto per una singola serie, si calcola lo scarto (S) tra suddetti valori. Come esposto nella tabella di seguito, la tecnica di levigatura descritta in precedenza, permette di ottenere valori di durezza con S<6% i quali si possono considerare più che accettabili.

Serie (5 battute)	HLD	Valor medio	S	S%
1	361	349HLD	19 HLD	5.4
2	350			
3	344			
4	346			
5	342			

Una volta determinata la qualità dei risultati in termini di scarto minimo sul valore di durezza rilevato nelle 5 serie di 5 battute ognuna, si sono riportati i risultati in una tabella riassuntiva al fine di esaminare i pro e contro:

Metodo	Valor medio	Scarto	Pro	Contro
<b>D</b>	321-368	7-26%	Estrema velocità Economicità	Grande variabilità risultati Difficile esecuzione prova Possibile trattamento termico
<b>N</b>	330-343	4-11%	Risultati accettabili	Usura spazzole Utilizzo limitato
<b>SN</b>	321-332	4-11%	Risultati accettabili no usura spazzole nylon	Difficoltà di lavorazione Possibile brasatura superficie
<b>DN</b>	342-351	4-6%	Risultati accettabili Compromesso costi/benefici	
<b>DSN</b>	345-350	4-8%	Risultati accettabili	Tempi eccessivi Possibile brasatura superficie
<b>DS</b>	301-362	30-65%		inaccettabile
<b>S</b>	322-338	22-40%		inaccettabile

Il ciclo di levigatura più efficace si è rivelato quindi il "DN":

- Passata di sgrossatura con disco abrasivo ad alta velocità;
- Passata con spazzola in nylon-carburi P46;
- Passata con spazzola nylon-carburi P80;
- Passata con spazzola nylon-carburi P160;
- Passata con spazzola nylon-carburi P320;

## SVILUPPO DELLA CORRELAZIONE SPERIMENTALE

La durezza non ha un'unità di misura stabilita dal sistema internazionale, per cui è sempre stata una misurazione molto discussa in ambito tecnico, risultando definita da un'ampia varietà di metodi. Diversamente da questa, la resistenza a snervamento è definita come la cuspidè che segna la fine della fase elastica e l'inizio di quella plastica in un diagramma sforzi deformazioni.

Il risultato che premeva ottenere da questo studio è stato raggiunto misurando la durezza superficiale dei circa 500 campioni<sup>12</sup> preparati con la medesima tecnica di trattamento della superficie, per poi effettuare delle prove di trazione<sup>13</sup> e ricavarne la corrispondenza  $\sigma$ - $\epsilon$  dalla quale dedurre il valore di tensione di snervamento (fig. A1 crv. verde continua). Questi punti sono stati riportati in un diagramma avente come ordinate le tensioni  $\sigma$  espresse in MPa e in ascisse i valori di durezza unitamente agli scarti di misurazione  $s$  fra le varie battute. Al fine di confrontare la correlazione con quanto esistente in letteratura, si è unito il diagramma sperimentale ricavato dalle esperienze dirette con una curva frutto di conversione<sup>14</sup> della correlazione sviluppata da E.J. Pavlina e C.J. Van Tyne nel 2008<sup>15</sup> (fig A1 crv. Rossa) .

Si è scelto di schematizzare anche una problematica applicativa, quella relativa all'influenza dello stato di vincolo, e quindi utilizzare comunque i dati ricavati da misurazioni fatte su barre ancorate in modo non sufficientemente rigido, per dare contezza a quanto questo limite possa influenzare il risultato finale in un processo di sviluppo correlazione durezza-resistenza a snervamento (fig. 8).

Un ferro d'armatura aderisce al conglomerato cementizio in maniera tale da costituire un'unica massa, quindi andando misurando dinamicamente la durezza, la massa partecipante risulterà essere quella dell'intera struttura, o più verosimilmente una buona parte di quella dell'elemento strutturale che ospita il ferro. Tale comportamento è emerso durante l'applicazione del metodo diagnostico in cantiere, ove, lo scarto tra le battute del durometro, risultava essere inferiore rispetto a quello rilevato in sede di taratura. Tutta la serie di prove fatte prima dell'applicazione in situ è stata quindi rivista, in quanto il metodo di ancoraggio tramite sergenti al tavolo di preparazione ferri, se pur plausibile, è risultato poco congruo al tipo di prova. Le indicazioni fornite da Proceq, la ditta elvetica che ha brevettato e diffuso lo strumento, prescrivono una massa ancorata di almeno 5 kg, non facendo riferimento alla rigidità dello stesso.

---

<sup>12</sup> Le 280 barre di differenti caratteristiche sono state suddivise in più campioni a beneficio dell'aumento dei dati sperimentali, nonché per comodità di manipolazione.

<sup>13</sup> Per le prove di trazione è stata utilizzata una macchina METROCOM engineering s.p.a. a controllo elettronico con cella di carico che ha fornito una tracciatura del diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  di ogni campione, dal quale si è ricavato il punto di snervamento come punto approssimato di variazione della derivata.

<sup>14</sup> DIN EN ISO 18265/2013. Metallic materials – Conversion of hardness values.

<sup>15</sup> Van Tyne, E. P. (2008.). Correlation of Yield Strength and tensile Strength with Hardness for Steels,. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17(6), Volume 17, issue 6, pp 888-893. doi:10.1007/s11665-008-9225-5.

Considerato ciò, il metodo di ancoraggio in laboratorio è stato rivisto, ed è stata impiegata una morsa in ghisa ancorata ad un piano in granito di circa 900 kg di massa e considerevole rigidità. Questo metodo è risultato di gran lunga più efficace, in quanto, come si può intuire, il vincolo del ferro risulta più efficiente e continuo, garantendo un'area di test sulla superficie maggiore ma anche una maggiore precisione della misura a parità di finitura superficiale.

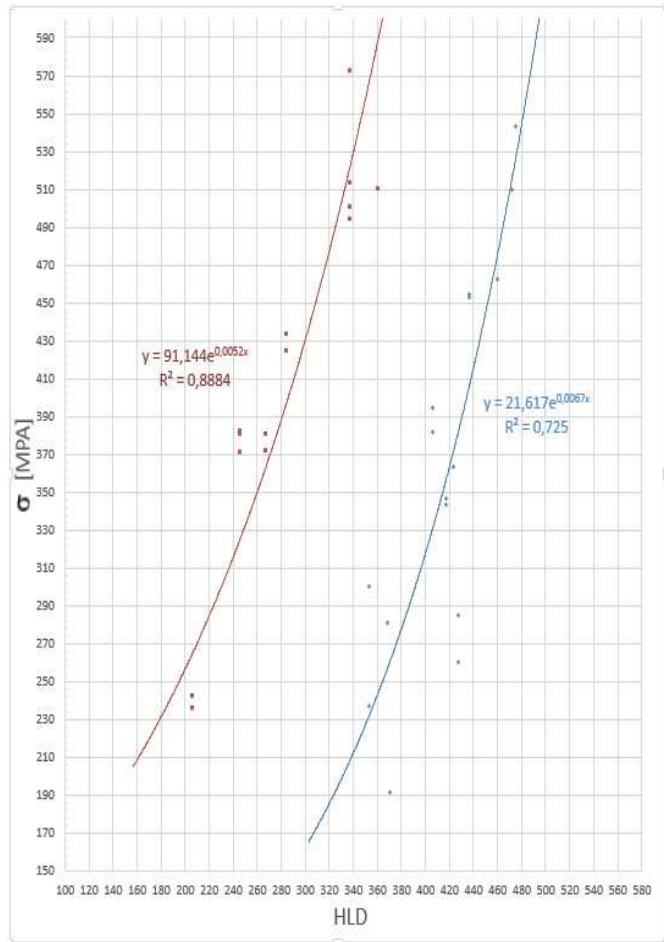


Figura 8: Grafico di correlazione affetto da errore a causa della scarsa rigidità del vincolo (curva rossa, ferro ancorato con sergenti): i valori di durezza risultano inferiori ai reali a parità di resistenza a snervamento, scarto delle misurazioni pari a 08884. Grafico di correlazione con condizioni di vincolo rigide (curva blu, ancoraggio con morsa), presenta valori di durezza effettiva (confrontati successivamente con correlazione Pavlina-Van Tyne) maggiore a parità di resistenza a snervamento e scarto quadratico sulla distribuzione di punti inferiore.

Una volta stabilito lo standard di prova, e corretto le prove a condizione di vincolo inadeguata, si è ottenuta una distribuzione di punti sperimentali con scarto quadratico pari a 0.85 da una linea di tendenza esponenziale di equazione riportata in figura A1, nonché tutti i punti sperimentali contenuti in una banda d'errore dalla linea di tendenza di +/- 8% (crv. verdi tratteggiate). Nel tratto iniziale le due correlazioni sono contenute nella banda d'errore dell'8% il che è un risultato accettabile, considerata anche la banda d'errore della curva Pavlina-Van Tyne (crv. rossa), di origine sperimentale.

Come descritto nell'articolo<sup>15</sup> sopra citato, per acciai di qualità superiore, cioè ad alta resistenza e armonici, la correlazione si linearizza, quindi il problema di correlazione sperimentale più arduo da risolvere, si concentra nel campo delle basse resistenze, dai 100 ai 330 MPa. In questi casi, viene suggerito dagli autori, l'utilizzo del metodo di misurazione di durezza tramite penetrazione sferica (di tipo Brinnell), il quale garantirebbe una

maggior precisione nella lettura dell'impronta, e quindi una maggiore accuratezza. Proprio a tal proposito, volendo spaziare nelle applicazioni di misura durezza portatili, si annovera il metodo TDT<sup>16</sup>, di comprovata validità per la misura di durezza, ma come segnalato dallo studio di Pavlina-Van Tyne di scarsa utilità nell'utilizzo su acciai di tipo ordinario. Il metodo di Leeb utilizzato, fornisce dati accettabili, anche non disponendo di un laboratorio attrezzato per la lettura penetrometrica, banchi di vincolo sofisticati e atmosfera controllata, inoltre, risulta **applicabile sugli acciai comuni**, i quali costituiscono **la maggior parte della popolazione esistente** per quanto concerne le armature del calcestruzzo. Queste qualità sono l'ideale per implementare l'utilizzo del durometro di Leeb nelle indagini in situ non distruttive, avendo un utile strumento di diagnosi specialmente per quelle strutture costituite da materiali di scarsa ovvero ben nota qualità.

#### APPLICAZIONE IN CAMPO

Il metodo di deduzione della resistenza a trazione dalla durezza superficiale è stato applicato alle strutture di un edificio incendiato<sup>17</sup> successivamente ad una richiesta di campagna d'indagine da parte del professionista incaricato dei lavori di ristrutturazione/demolizione al fine di:

- Vagliare l'effettiva applicabilità pratica del trattamento superficiale del metallo;
- Ottenere dati su un campione ancorato a massa praticamente infinita per fare valutazioni in merito ai metodi di ancoraggio in laboratorio;
- Perfezionare il processo di preparazione-prova in funzione delle tempistiche di cantiere e dei limiti posti dall'ambiente degradato di prova.

Il fabbricato oggetto della campagna d'indagine, un attico con struttura intelaiata risalente agli anni '70, è stato interessato da un incendio di ingente entità. In tal senso, il laboratorio della Scuola Politecnica di Genova, è stato chiamato a fornire dati sull'attuale degrado dei materiali successivamente all'evento calamitoso. In prima battuta sono stati effettuati dei rilievi pacometrici per individuare la posizione dei ferri d'armatura, in secondo luogo sono state effettuate varie prove di pull-out e successivamente, sono state effettuate delle prove con durometro di Leeb ottenendo i seguenti risultati:

Battuta	HLD
1	349
2	354
3	351
4	349
5	354
HLD Med	351
s =5 HLD	1.4%

Battuta	HLD
1	378
2	381
3	378
4	379
5	388
HLD Med	381
s = 10 HLD	2.6%

<sup>16</sup> TDT: Trough-diamond-technique, tecnica portatile di misura della durezza assimilabile alla tecnica Vickers. Questo metodo si serve di uno speciale penetrometro con sensori ottici digitali in grado di misurare l'impronta di un prisma impresso con data forza su una superficie metallica.

<sup>17</sup> (Vedova, Alberto Maria, Il Secolo XIX, 1/7/2014), Incendio in appartamento di via Assarotti, Genova.



Figura 9: Effetti distruttivi di un incendio domestico, si notino gli operatori che eseguono prove di pull-out.



Figura 10: Preparazione della superficie del ferro d'armatura per l'esecuzione delle prove di durezza Leeb. Si notino le tracce delle armature tracciate sull'elemento strutturale in colore blu.



Figura 11: Superficie di un ferro d'armatura parzialmente affiorante levigato, pronto per prova di durezza. Si noti il foro lasciato da una prova di pull-out.

I risultati, in termini di scarto tra le misurazioni sono stati sorprendenti, in quanto, e da questi si è dedotta l'enorme influenza della massa d'ancoraggio, cioè quella che contribuisce al rimbalzo del percussore nella misurazione dinamica. Infatti, la precisione della misura supera quella fatta sul blocco di taratura, con uno scarto inferiore secondo percentile. Mettendo a confronto questa misurazione con la migliore ottenuta in laboratorio, si può osservare come la "massa partecipante" sia di gran lunga il fattore più influente sulla precisione della misura, con un incidenza del 50 % sull'errore totale<sup>18</sup>. Da questo si è potuto appurare che il metodo di ancoraggio dei campioni tramite sergenti ad un tavolo da lavoro in legno, risultava poco efficace, quindi si è deciso di ripetere tutte le prove con differenti condizioni di vincolo. Il processo di prova è risultato perfettamente in linea con le tempistiche di cantiere e non ha comportato particolari difficoltà, inoltre la struttura non è stata danneggiata più di quanto non lo fosse già.

L'unica difficoltà applicativa è sorta nel momento in cui si è incorsi nel distacco ferro-calcestruzzo, in questi tratti i dati ricavati si sono rivelati mendaci visti il mancato vincolo del ferro d'armatura. Bisognerebbe porre particolare attenzione anche nell'esporre il ferro d'armatura, in quanto l'ammorsamento sufficiente del ferro "affogato" potrebbe venir meno in seguito a urti sul ferro stesso in fase di sgrossatura con martello e scalpello o con martello percussore.

---

<sup>18</sup> La stima dell'errore è stata fatta tenendo conto degli scarti rilevati da prove su finitura non consona e su finitura a specchio (incidenza del 30% ca.), dell'errore umano (10% ca. per operatore esperto), dell'errore dello strumento (5% ca.) e di una percentuale del 5% legata alle condizioni ambientali.

I dati raccolti su varie porzioni della struttura hanno evidenziato l'influenza negativa dell'incendio sui ferri d'armatura inferiori delle travi, che, sottoposti ad un processo analogo alla ricottura oltre il punto critico, risultano avere tensione di snervamento pressoché dimezzata rispetto a quella che presumibilmente avesse il materiale in origine.



Figura 12: Risultato del trattamento superficiale

Per quanto riguarda le armature dei pilastri e quelle superiori delle stesse travi, non si può fare un discorso analogo dato che sicuramente non sono state soggette allo stesso tipo di stress.

Concludendo, si può affermare che:

- il metodo di diagnosi tramite il durometro di Leeb è risultato facilmente applicabile in un reale campo di prova ed ha dato risultati molto validi;
- Grazie a quanto osservato si è cambiata la metodologia di ancoraggio in laboratorio per ottenere dati quanto più possibile affini alla realtà.
- Il processo di preparazione-prova si è rivelato efficace in un reale cantiere, sia come tempistiche che come facilità di esecuzione.

## CONCLUSIONI

La sperimentazione ha portato a risultati di comprovato successo, in buona parte corrispondenti a correlazioni già esistenti in precedenza citate<sup>15</sup>, ma di maggiore attagliamentamento per il campo d'interesse. È bene sottolineare che la correlazione sperimentale riportata graficamente nel diagramma A1, evidenzia come si possa giungere ad un valore di resistenza a snervamento indicativo da confrontare con una distribuzione proveniente da indagini storiche sulla popolazione di prodotti metallurgici presente in letteratura<sup>19</sup>. Data la grande variabilità delle caratteristiche del materiale, inteso come prodotto metallurgico proveniente da stabilimenti diversi, diverse epoche e avente diverse qualità, non si può dare carattere deterministico a questo metodo di indagine, bensì utilizzare i risultati delle prove, per determinare la tipologia di acciaio e quindi ottenere un valore di resistenza a snervamento a carattere probabilistico. Questo procedimento, se pur

<sup>19</sup> (Gerardo Mario Verderame, Paolo Ricci, Marilena Esposito, Filippo Carlo Sansiviero, 2001)

articolato, tutela maggiormente il fruitore del metodo da errori di valutazione, in quanto le caratteristiche meccaniche del metallo non saranno mai univoche anche per uno stesso valore di durezza superficiale. Il giusto metodo di utilizzo dei dati raccolti consta nel riportare i valori di HLB sul suddetto diagramma A1, per poi confrontare la nuvola di punti con le distribuzioni gaussiane riportate nell'articolo pubblicato dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II<sup>19</sup>, il quale fornisce dati stocastici da poter utilizzare nelle valutazioni del caso, una volta determinata la tipologia di acciaio.

Al fine di avere conferma della validità dei risultati, si è effettuata una prova inversa su un ferro d'armatura ad aderenza migliorata di moderna produzione B450C, dalla quale è emerso un valore di durezza di  $437 \text{ HLD} \pm 5\%$  (fig. A1) pienamente in linea con la curva di correlazione esponenziale approssimata.

La bontà del metodo è stata testata in campo, e questo ha aiutato a individuare margini di miglioramento nella calibrazione e nell'interpretazione dei valori ottenuti, nonché nello sviluppo delle tecniche applicative al fine di standardizzare la corretta conduzione della tecnica d'indagine.

In quanto metodo sperimentale, resta aperto al perfezionamento, e l'aggiunta di preziosi punti di calibrazione della curva di correlazione non potrà essere considerata attività terminata, in ferma logica di Kaizen.

## IMMAGINI

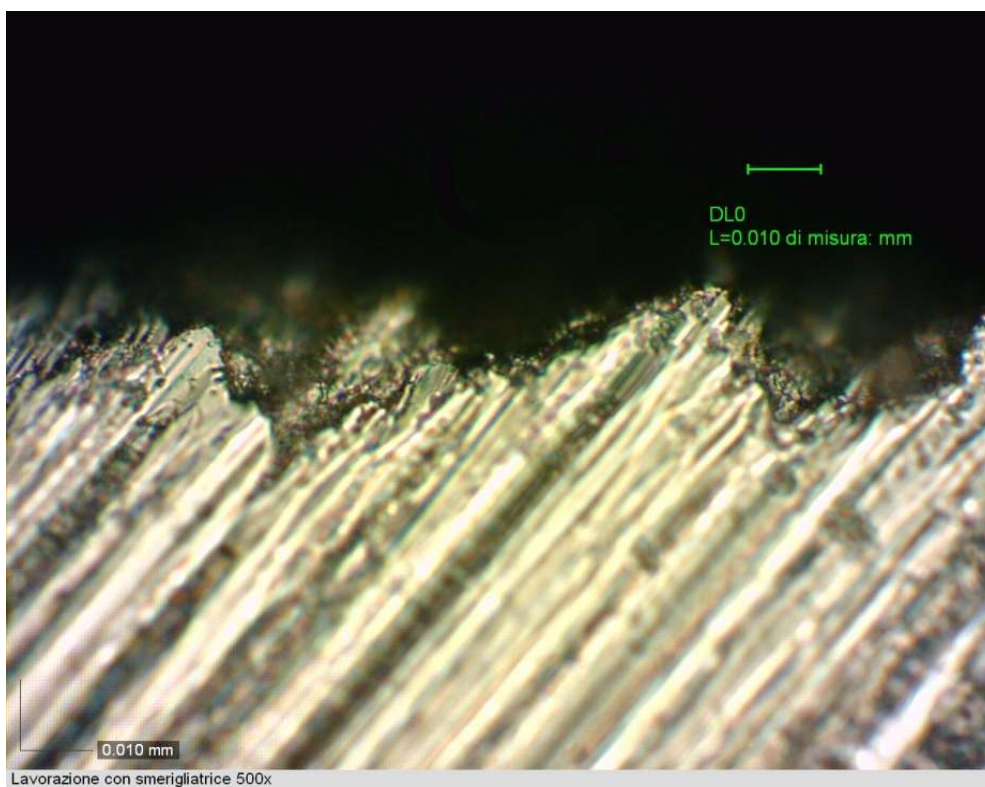


Figura 13: Lavorazione con smerigliatrice e disco abrasivo, 500 ingrandimenti.

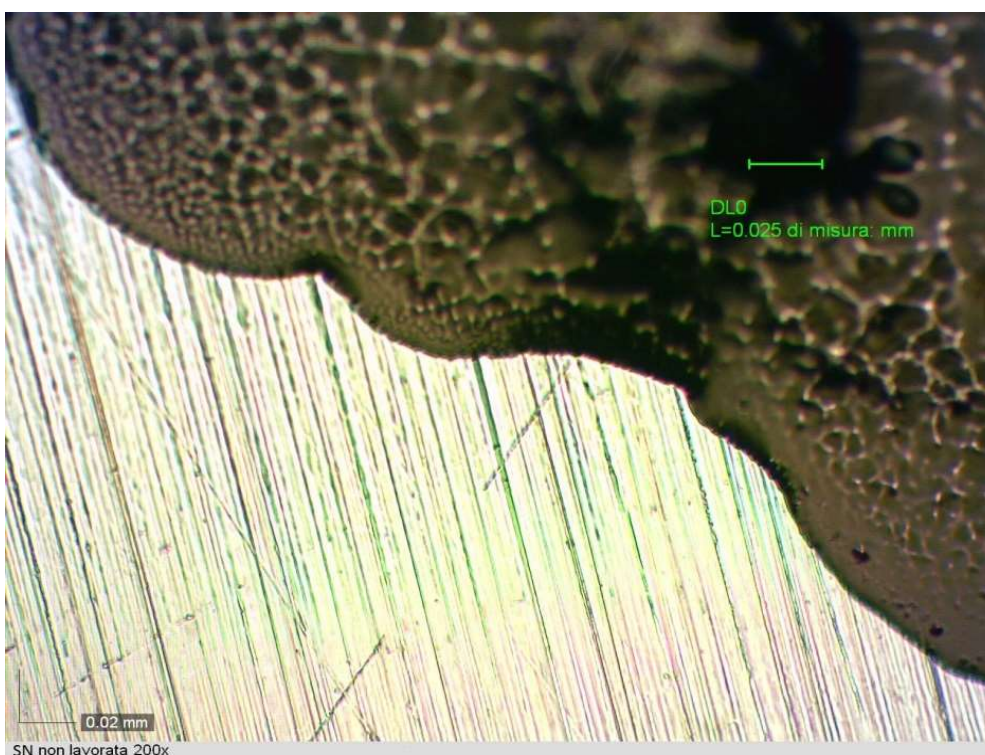


Figura 14: : Si notino le asperità presenti sul campione in un tratto di superficie non lavorata, immagine 200x

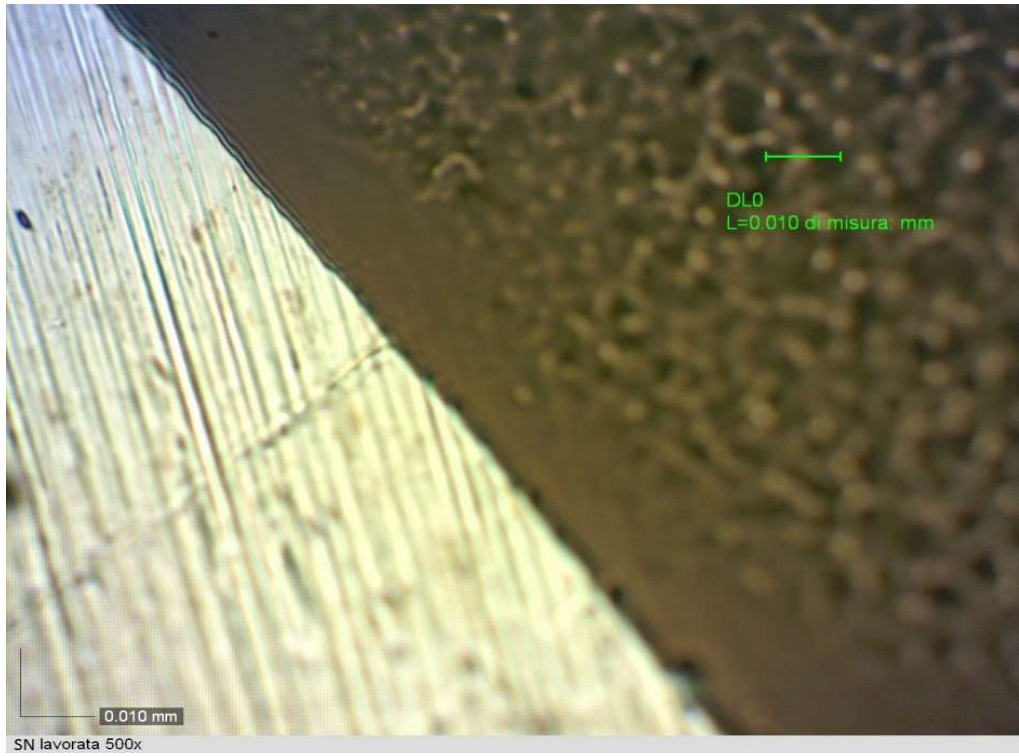


Figura 15: Micrografia a 500x della superficie lavorata con procedura SN, si noti come pur ingrandendo 2 volte e mezzo rispetto alla figura precedente, non si percepisce la minima asperità che risulta essere in questo particolare tratto a 3 centesimi di millimetro.



Figura 16: campione levigato con eccessiva veemenza, si noti il cambiamento di colore della superficie che indica una tempra superficiale.

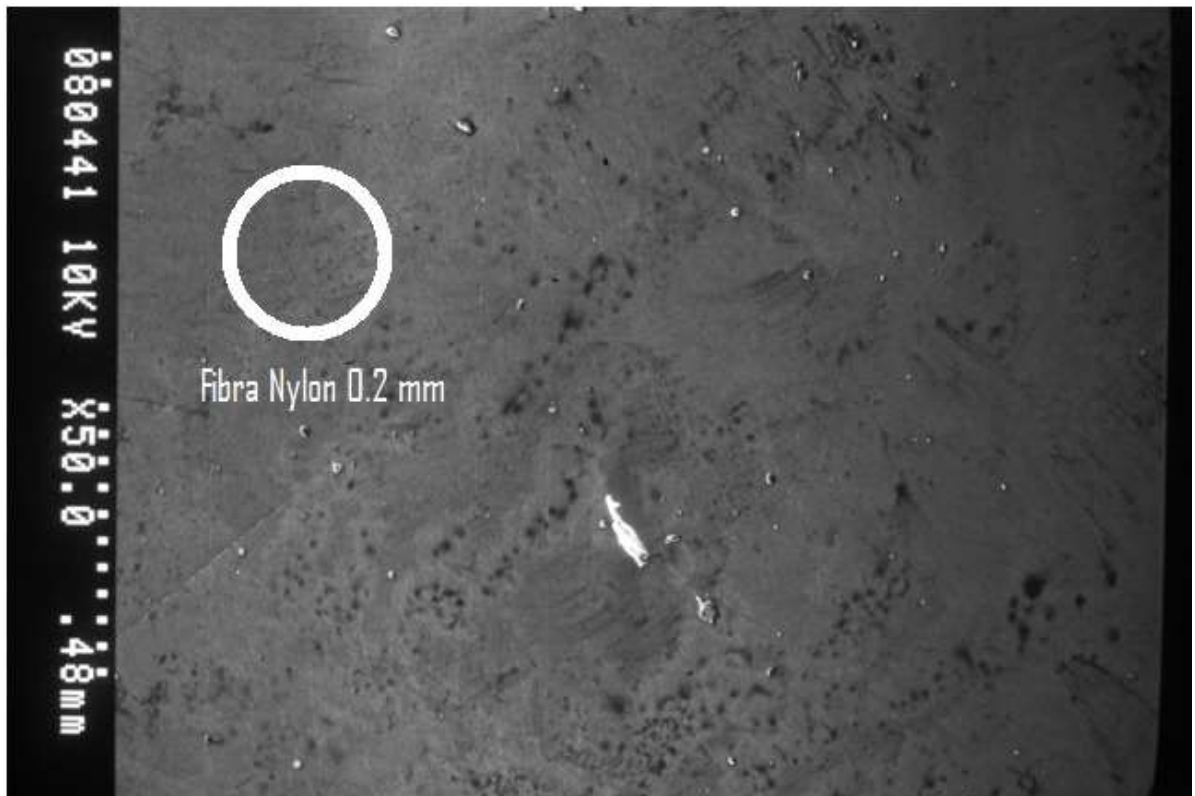


Figura 17: micrografia da S.E.M. della superficie lavorata su cui il durometro impatta, la fibra di nylon, come si può notare, non lascia tracce.

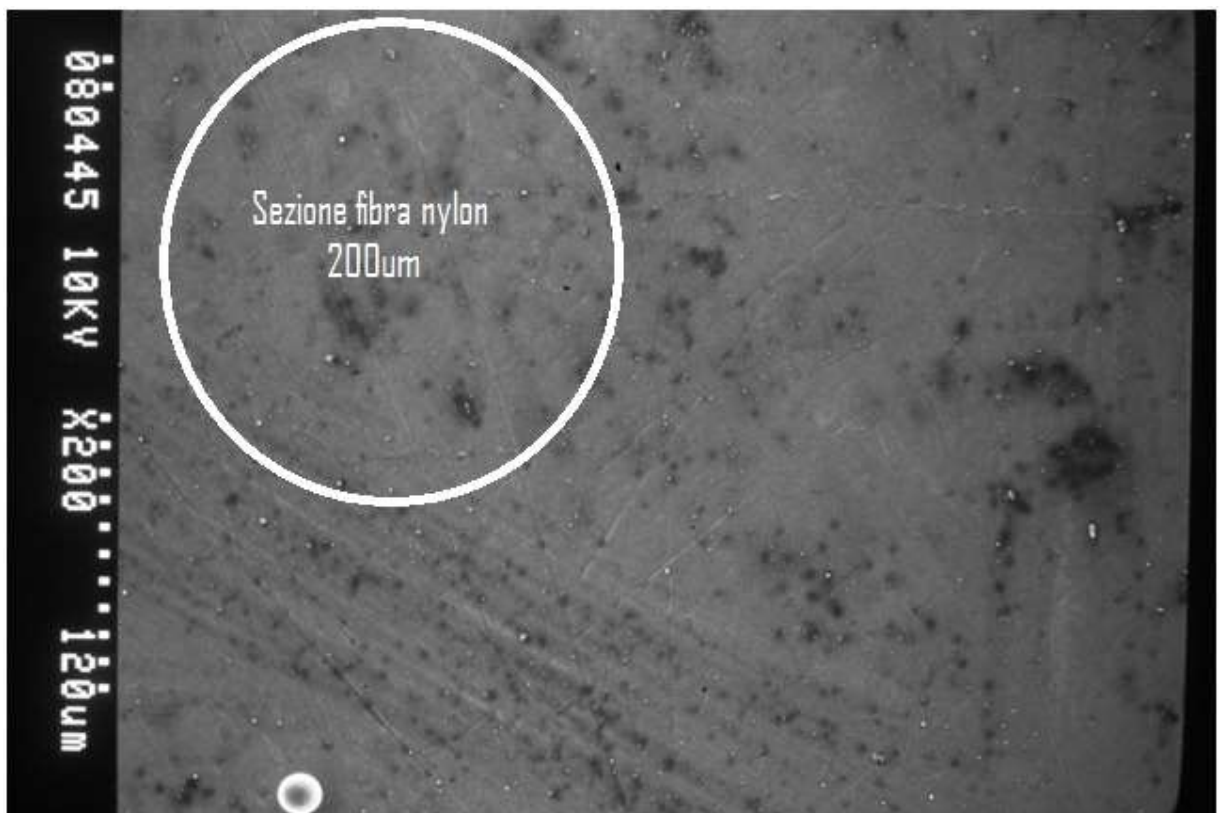


Figura 18: Immagine relativa a un quarto della precedente

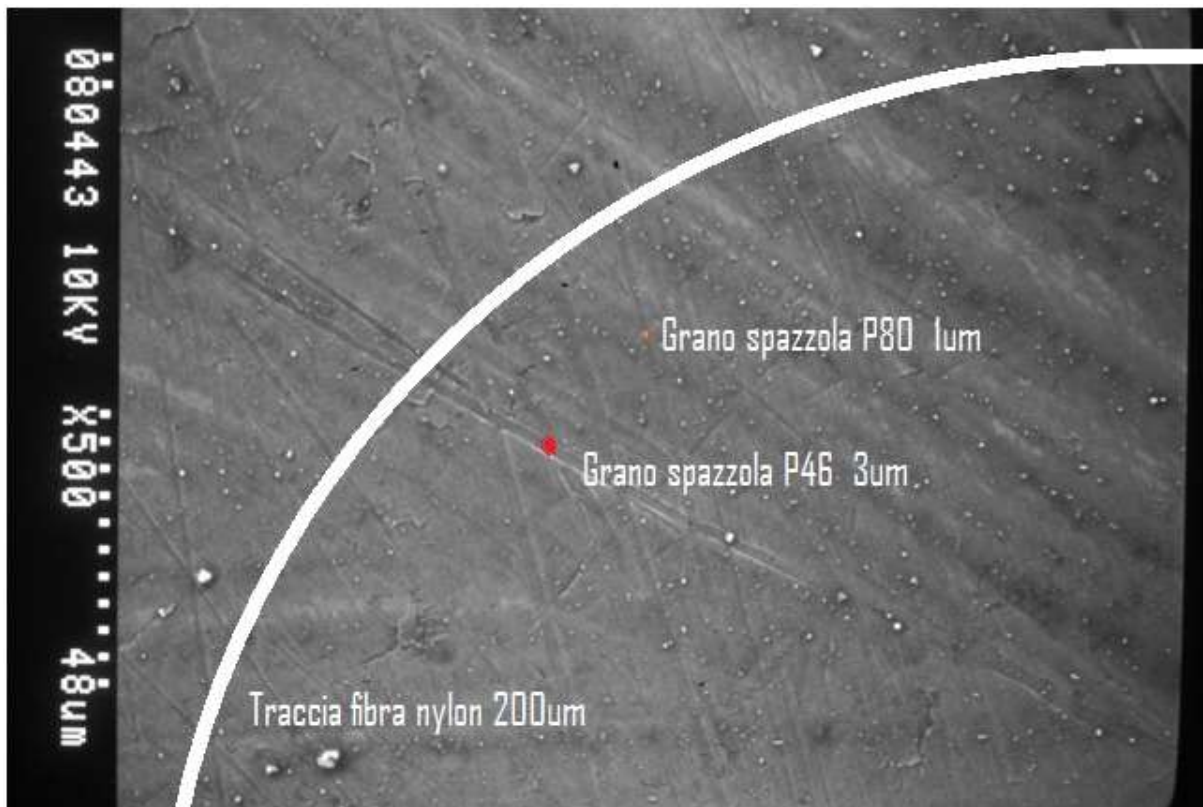


Figura 19: Immagine ingrandita 2,5 volte la precedente, non è più possibile raffigurare l'intera sezione della fibra in nylon ma si possono rappresentare le dimensioni di alcuni grani di carburo di silicio.

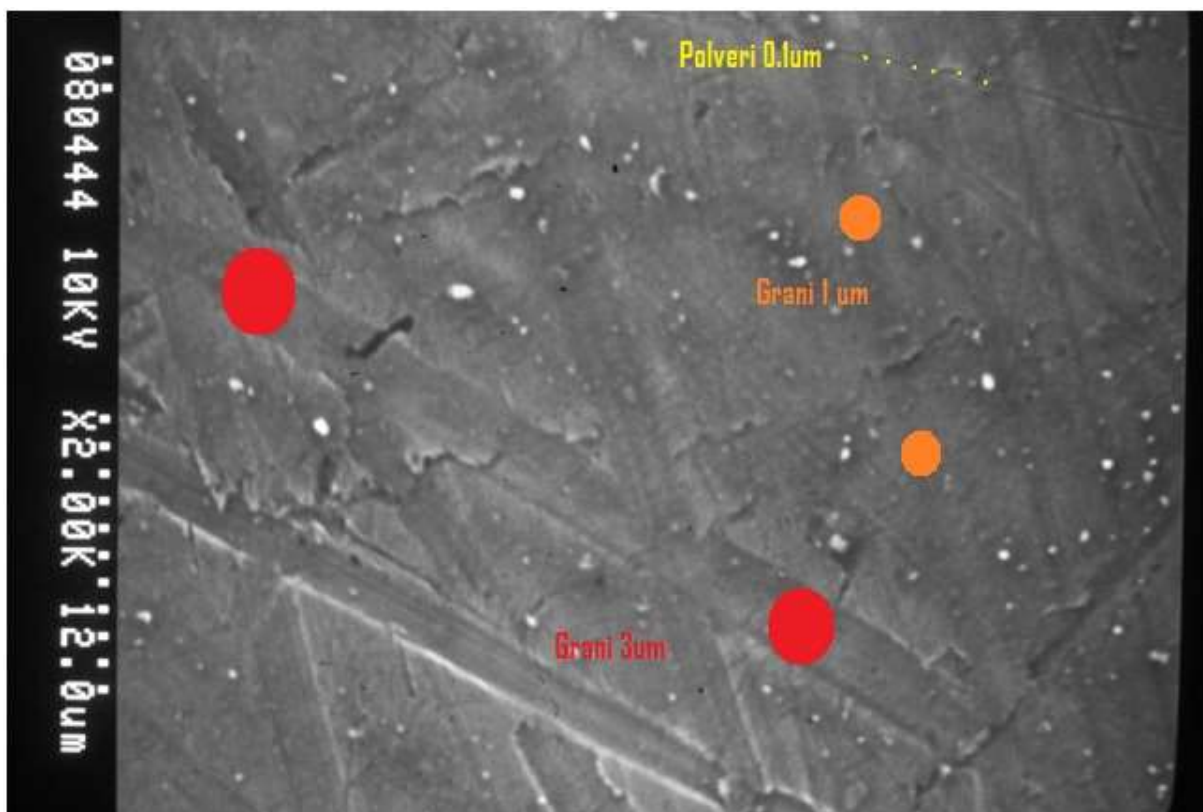


Figura 20: Immagine relativa ad un quarto della precedente, si distinguono appieno le tracce dei grani di carburo più grossi e si intravedono quelle delle polveri di carburo relative alle grane P180 e P320.

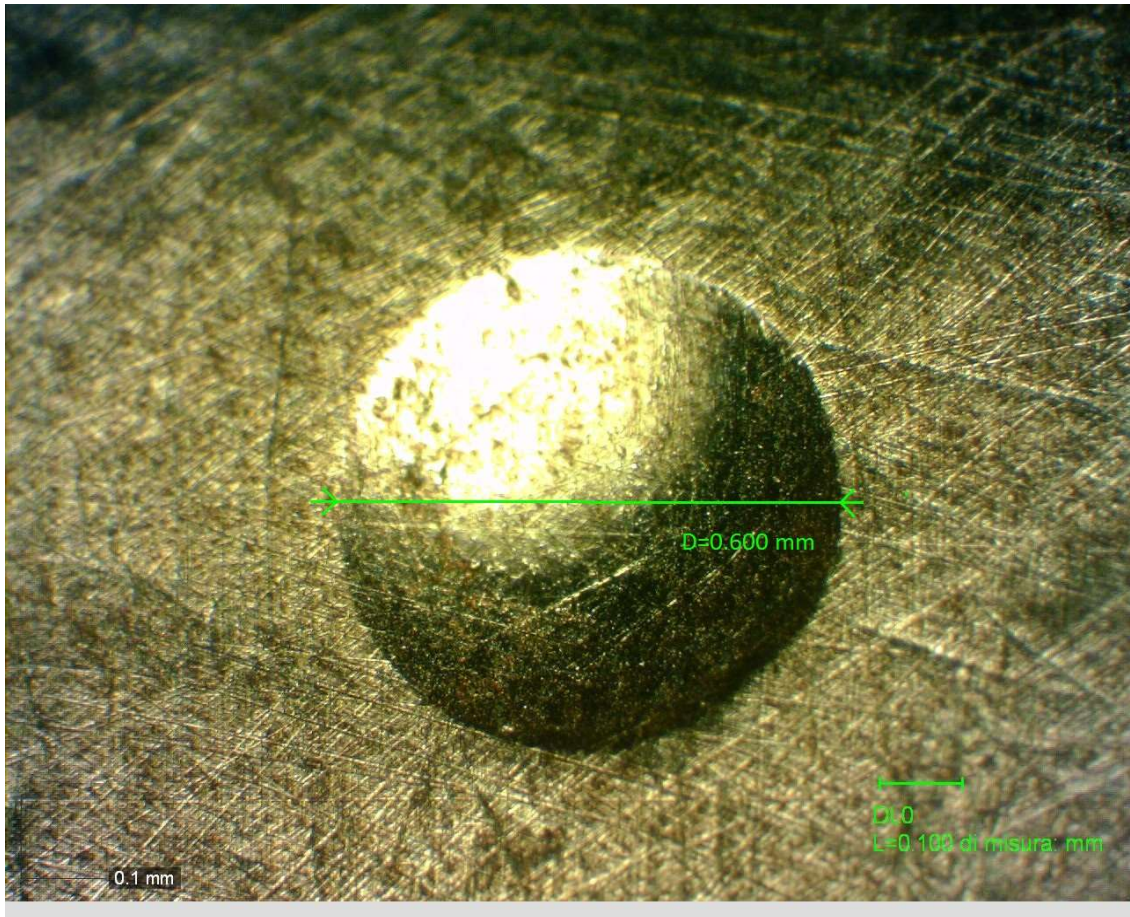


Figura 21: superficie interessata dall'impatto del percussore, lo stesso ha un diametro di mezzo millimetro, ma, sebbene questa sia una dimensione tangibile, le misurazioni dello strumento vengono fortemente interessate da asperità 100 volte più piccole.

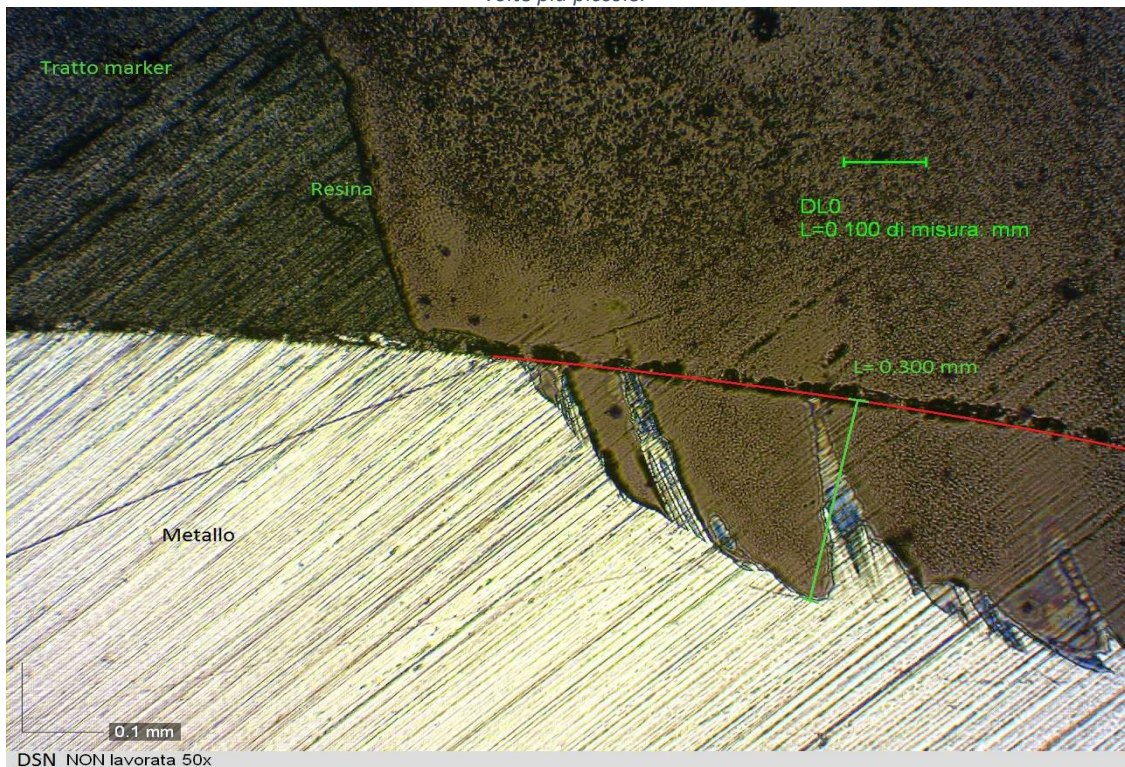


Figura 22: In questa immagine si nota il punto di distacco tra superficie lavorata a sinistra e superficie scabra priva di ossido, si è tracciato in rosso il perimetro ideale della sezione liscia. Si consideri che l'altezza dell'asperità è circa la metà diametro del percussore nella sonda D.