



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea Magistrale  
In Ingegneria Gestionale

A.A. 2024/2025  
Sessione di Laurea  
8 Aprile 2025

# **Analisi dell'effetto di creep nelle misure di durezza Brinell, Vickers e Knoop**

Relatore:

Prof. Gianfranco Genta

Candidata:

Chiara Merolli

Correlatori:

Dott. Andrea Prato  
Dott. Alessandro Germak

Matricola:

292372







*“Misurare è conoscere.  
Se non puoi misurarlo, non puoi migliorarlo.”  
LORD KELVIN*



# Indice

Indice delle figure.....	ix
Indice delle tabelle .....	x
Abstract.....	1
1. Introduzione .....	2
2. Background Teorico .....	4
2.1 Concetto di misura .....	4
2.2 Qualità nelle misure .....	6
2.3 INRIM – Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica.....	7
2.4 Progetto 22RPT01 TracInd BVK-H.....	9
2.5 Dwell Time – creep.....	12
2.6 Prove di durezza .....	14
2.6.1 Durezza Brinell .....	15
2.6.2 Durezza Vickers .....	17
2.6.3 Durezza Knoop.....	20
3. Misure .....	24
3.1 Materiali testati .....	24
3.2 Metodi e procedura sperimentale .....	26
3.2.1 Brinell.....	28
3.2.2 Vickers .....	32
3.2.3 Knoop.....	38
4. Analisi dati.....	40
5. Conclusioni e sviluppi futuri.....	51
Bibliografia e sitografia .....	54
Appendice A – Dati Sperimentali.....	56
Appendice B – Codice Matlab .....	66
Appendice C – Risultati.....	67

<b>Ringraziamenti.....</b>	<b>86</b>
----------------------------	-----------

## Indice delle figure

Figura 1: Catena di riferibilità .....	7
Figura 2: Principio prova Brinell .....	16
Figura 3: Principio prova Vickers.....	18
Figura 4: Distanza minima per impronte Vickers.....	20
Figura 5: Principio prova Knoop .....	22
Figura 6: Distanza minima per impronte Knoop .....	23
Figura 7: Durometro PHS DW & PRIMARY .....	28
Figura 8: Parametri impostati su Primary .....	31
Figura 9: Grafici carico e spostamento in funzione del tempo .....	31
Figura 10: MHSM, Micro Hardness Standardization Machine.....	33
Figura 11: Parametri impostati su GalVision .....	35
Figura 12: Grafici carico e spostamento in funzione del tempo .....	36
Figura 13: Impronta 700 HV 1 .....	37
Figura 14: Microdurometro Galileo (DG 901) .....	38
Figura 15: Modello lineare .....	47

## Indice delle tabelle

Tabella 1: Obiettivi e impatti .....	10
Tabella 2: Provini utilizzati.....	25
Tabella 3: Dwell time selezionati .....	26
Tabella 4: Piano sperimentale.....	27
Tabella 5: Misure sperimentali .....	40
Tabella 6: Dati sperimentali HBW 2,5/187,5 .....	44
Tabella 7: Risultati per la configurazione HBW2,5/187,5 .....	47
Tabella 8: Risultati ottenuti.....	48

# Abstract

La tesi si concentra sull'analisi delle misure di durezza per diverse configurazioni di materiali e scale, con particolare attenzione all'influenza del tempo di mantenimento della forza di carico (dwell time) correlato al creep del materiale. Lo scopo principale della tesi è stato quello di determinare i coefficienti di sensibilità, che definiscono la variazione della durezza in funzione del dwell time e le relative incertezze, utilizzando un approccio basato sul metodo Monte Carlo. È stato utilizzato questo metodo per superare le limitazioni dei metodi tradizionali nella stima delle incertezze, raggiungendo così una maggiore affidabilità nei risultati.

L'analisi è stata svolta su 34 configurazioni sperimentali, comprendenti scale di durezza Brinell, Vickers e Knoop, con materiali differenti, provini di diversi livelli di durezza e carichi applicati variabili. I dati sperimentali sono stati elaborati utilizzando il software MATLAB per implementare il metodo Monte Carlo, che consente di generare molteplici iterazioni per ogni configurazione. I coefficienti di sensibilità e le loro incertezze sono stati calcolati per ogni iterazione, propagando i contributi derivanti dalla variabilità dei dati sperimentali e dalle distribuzioni probabilistiche associate alle variabili in gioco.

I risultati evidenziano che l'influenza del dwell time è significativa solo per configurazioni specifiche, come quelle con materiali molto duri e carichi elevati (es. 700 HBW 2,5/187,5), dove il fenomeno del creep assume un ruolo rilevante. In queste condizioni, infatti, i coefficienti di sensibilità risultano negativi e statisticamente significativi ( $p$ -value < 20 %), confermando una diminuzione della durezza con l'aumentare del dwell time. Al contrario, per materiali più morbidi o scale con carichi bassi, il dwell time non ha un'influenza significativa rispetto alla disomogeneità dei provini o al rumore sperimentale.

La tesi mostra, inoltre, che la disomogeneità dei provini rappresenta un fattore critico che può coprire gli effetti del dwell time, soprattutto per scale (HV0,2) dove lo scarto tipo della disomogeneità raggiunge valori importanti (fino al 5 %). Infine, l'obiettivo finale dell'analisi è evidenziare l'importanza di standardizzare le procedure di misura della durezza per ridurre l'incertezza complessiva e migliorare la riferibilità delle misurazioni.

# 1. Introduzione

Misurare è essenziale in ogni ambito scientifico, industriale e tecnologico. Una misura accurata, precisa e affidabile consente di prendere decisioni in modo consapevole, migliorare processi produttivi, garantire conformità agli standard e assicurare la qualità e la sicurezza dei prodotti.

L'accuratezza e la riferibilità delle misure sono fondamentali in ogni ambito scientifico e industriale. Misurare correttamente significa ridurre gli errori, migliorare la ripetibilità e la riproducibilità dei risultati per garantire la riferibilità rispetto a riferimenti metrologici (campioni) riconosciuti.

L'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) svolge un ruolo chiave in Italia, garantendo la corretta realizzazione e manutenzione dei campioni nazionali per le unità di misura del Sistema Internazionale (SI). In questo contesto, il progetto 22RPT01 TracInd BVK-H mira a migliorare la riferibilità nelle misure di durezza Brinell, Vickers e Knoop (BVK), identificando e mitigando i fattori che influenzano le prove e sviluppando metodologie standardizzate tra NMI e laboratori di prova.

La presente tesi si inserisce in questo scenario con l'obiettivo di analizzare i fattori che influenzano le misure di durezza BVK, concentrandosi in particolare sull'effetto del tempo di mantenimento della forza di carico (dwell time). Nelle prove di durezza, il dwell time, influenza i risultati delle misure a causa del creep del materiale. Il creep è una deformazione plastica o viscoso elastica che si verifica nel tempo sotto carico costante. Materiali sottoposti a carichi elevati sono più suscettibili al creep, causando un'impronta più ampia del previsto e, di conseguenza, una sottostima della durezza. La tesi si concentra sull'analisi dell'effetto di creep poiché comprendere e controllare questo parametro è importante per ottenere misurazioni accurate e confrontabili.

Affinché si riesca a valutare l'influenza del dwell time sulle misure di durezza è necessario: determinare i coefficienti di sensibilità che quantificano l'influenza del dwell time sulla durezza, valutare le incertezze associate a tali coefficienti e analizzare l'impatto della disomogeneità dei provini sui risultati delle misurazioni.

Grazie al supporto dell'INRiM e all'utilizzo di strumentazioni metrologiche avanzate, questa tesi mira a fornire un contributo concreto alla metrologia delle durezza.

È importante evidenziare come piccole variazioni nei parametri misurati possono avere un impatto importante sulle prestazioni, sulla durabilità e sulla sicurezza dei componenti e dei materiali utilizzati.

Un processo sicuramente rilevante è la gestione delle attività di misura e delle prove, definito impegnativo e complesso e che non può essere trattato in modo semplificato, ma soprattutto non deve limitarsi a un approccio formale. Infatti, l'attività deve essere basata su una comprensione concreta dei problemi, senza eseguire valutazioni approssimate.

Il concetto di misura è essenziale in un sistema di qualità e bisogna essere molto chiari nel delimitare gli scopi. Nei sistemi di Qualità dell'Industria, si ha quindi una via ben definita sulla quale muoversi per superare le difficoltà inerenti alla valutazione dell'incertezza di misura. L'incertezza di una misura è necessaria definirla sia per necessità oggettiva, ovvero per trasmettere l'informazione contenuta nella misura stessa, sia per richieste normative.

La metrologia, la statistica e la definizione di incertezza di misura sono elementi essenziali per migliorare il controllo qualità. Misurare richiede esperienza e valutazione critica dei metodi, non può considerarsi un'attività pressoché abitudinaria.

È importante ottimizzare le operazioni di misurazione e prova, riducendo l'incertezza di misura quando necessario, o aumentandola in modo strategico, se ciò non compromette il raggiungimento degli obiettivi prefissati. In questo modo, si mira a ottenere risultati affidabili, minimizzando i costi, ove possibile.

Avere misure accurate in settori industriali come l'ingegneria, la medicina, l'aerospaziale e la produzione di materiali avanzati è indispensabile, soprattutto al giorno d'oggi. Nello specifico, nelle prove di durezza dei materiali, una misura definita non accurata può portare a valutazioni errate sulle proprietà meccaniche, compromettendo la sicurezza e l'affidabilità di strutture e dispositivi. È fondamentale, quindi, investire in strumenti di misura appropriati, procedure standardizzate e formazione del personale per migliorare il controllo qualità, ridurre costi e sprechi e ottimizzare le prestazioni complessive di un sistema o processo produttivo.

Misurare bene è un requisito essenziale per l'innovazione e il successo, soprattutto in un mondo moderno sempre più orientato alla precisione e alla competitività.

## 2. Background Teorico

### 2.1 Concetto di misura

Il concetto di misura è strettamente legato alla quantificazione di una grandezza fisica rispetto a un'unità di riferimento. In altre parole, misurare significa confrontare un oggetto o un fenomeno con un campione di valore noto, stabilendo così un valore numerico che rappresenta la caratteristica di interesse.

Secondo il Vocabolario Internazionale di Metrologia (VIM), la **misura** è definita come *“il processo volto a ottenere sperimentalmente uno o più valori che possono essere ragionevolmente attribuiti a una grandezza”* [19].

In ambito scientifico e ingegneristico, la misura è il processo mediante il quale si determina il valore di una grandezza fisica (come lunghezza, massa, tempo, temperatura, durezza, ecc.), utilizzando strumenti appropriati e metodi standardizzati [20]. La misurazione deve essere sempre effettuata tenendo conto dell'**incertezza**, ovvero *“parametro non negativo che caratterizza un intervallo di valori attribuiti a un misurando”* [23], necessaria per l'interpretazione dei risultati.

Una misura è caratterizzata da alcuni aspetti chiave come:

- **Precisione:** *“La precisione di misura è la stretta concordanza tra valori ottenuti in misurazioni ripetute della stessa grandezza, nelle stesse condizioni”* (VIM 2.15) [3]. In altre parole, la capacità di ottenere lo stesso risultato in misure ripetute nelle stesse condizioni. Tuttavia, la precisione non implica necessariamente che i risultati siano vicini al valore vero o al valore di riferimento della grandezza misurata, ma si concentra sulla ripetibilità dei risultati [3].
- **Accuratezza:** *“L'accuratezza di misura è la concordanza tra il valore misurato e un valore di riferimento vero o accettato”* (VIM 2.13) [3]. L'accuratezza indica quanto il risultato di una misurazione si avvicina al valore reale o al valore di riferimento accettato della grandezza misurata. L'accuratezza si concentra sull'affidabilità e la correttezza dei risultati rispetto al valore vero [3].

- **Riferibilità:** *“La riferibilità metrologica è la proprietà di un risultato di misura che lo collega a un riferimento tramite una catena ininterrotta di tarature, ognuna con una incertezza dichiarata” (VIM 2.41) [3].* In altri termini, è la proprietà di un risultato di misurazione che può essere messo in relazione con un riferimento (tipicamente un’unità di misura definita), tramite una catena di confronti, dove ogni confronto ha una incertezza ben definita. La riferibilità è essenziale per la comparabilità internazionale delle misure; garantisce l’affidabilità e la validità dei dati misurati a livello globale [3].
- **Ripetibilità:** *“La ripetibilità di misura si riferisce a misurazioni eseguite su aliquote dello stesso materiale da un solo operatore, utilizzando la stessa procedura di misura, nelle stesse condizioni operative e in un breve periodo di tempo.” (VIM 2.21) [3].* Si riferisce alla capacità di ottenere risultati coerenti quando una misurazione viene ripetuta nelle stesse condizioni operative [3].
- **Riproducibilità:** *“La riproducibilità di misura si ottiene dai risultati di misura prodotti da diversi laboratori. Indica misurazioni eseguite sulla stessa porzione dello stesso materiale da operatori che lavorano in laboratori diversi” (VIM 2.25) [3].* Indica la capacità di ottenere risultati coerenti quando una misurazione viene eseguita in condizioni diverse, in particolare in laboratori diversi o con strumenti e operatori differenti [3].
- **Comparabilità:** il VIM 3 definisce la comparabilità come *“idoneo a essere confrontato”* [3], senza implicare necessariamente una grandezza simile. Un confronto è significativo, ovvero i risultati sono comparabili metrologicamente, solo se i risultati sono relativi allo stesso riferimento, ad esempio un’unità di misura standardizzata o un materiale di riferimento certificato [3].

Nel contesto industriale, la misurazione è fondamentale per il controllo qualità, la produzione di componenti e l’ottimizzazione dei processi. È attraverso una corretta misurazione che si possono garantire la coerenza e la conformità alle specifiche, ridurre il rischio di difetti e migliorare continuamente i prodotti e i servizi.

## 2.2 Qualità nelle misure

La metrologia si occupa non solo della definizione e della realizzazione delle unità di misura, ma anche dello sviluppo di tecniche e strumenti per garantire l'affidabilità, la precisione e l'accuratezza delle misurazioni. Nel contesto moderno, le misure metrologiche sono essenziali per il progresso scientifico e per la qualità dei processi industriali, assicurando che le misurazioni siano corrette, ripetibili e riconosciute a livello internazionale.

La misura è un elemento fondamentale nei processi di controllo e garanzia della qualità, poiché consente di valutare con precisione le caratteristiche di un prodotto o di un materiale, assicurando che soddisfino i requisiti prestabiliti. In ambito industriale e metrologico, una misura accurata e affidabile è essenziale per garantire la conformità agli standard internazionali, ridurre il rischio di errori e migliorare l'efficienza produttiva [20].

Una misurazione di qualità oltre ad essere accurata, precisa e riferibile deve essere:

- **Affidabile**, ovvero ripetibile e riproducibile, indipendentemente dall'operatore o dallo strumento utilizzato. Secondo il VIM, il termine affidabile si riferisce a un risultato di misurazione che, sotto determinate condizioni, è costante e ripetibile, cioè può essere ripetuto con risultati coerenti e può essere considerato come valido in base ai criteri stabiliti [3].
- **Rilevante**, ovvero un risultato di misurazione che è significativo per il contesto specifico e che influenza in modo sostanziale le conclusioni o le decisioni prese in base alla misurazione stessa [3].

Nel contesto metrologico, quindi, è essenziale che le misurazioni siano accurate, precise, riferibili e affidabili, ma anche che siano appropriate e pertinenti rispetto agli scopi per cui vengono effettuate. Nell'ambito della qualità industriale, il ruolo della metrologia è determinante per garantire che le misurazioni siano eseguite secondo metodologie standardizzate, riducendo diversità tra i vari laboratori e stabilendo una base comune per il confronto dei risultati. L'implementazione di catene di riferibilità metrologica robuste permette di minimizzare le incertezze e migliorare la coerenza delle misurazioni lungo tutta la filiera, dal laboratorio di calibrazione fino all'utente finale, garantendo un controllo di qualità più efficace e una maggiore competitività sul mercato. In definitiva, una solida comprensione dei principi metrologici e una rigorosa applicazione delle pratiche di misura sono determinanti per ottenere dati affidabili, che siano fondamentali per il progresso scientifico, l'innovazione tecnologica e la qualità dei processi in molti settori.

## 2.3 INRIM – Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica

L'INRiM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica), è un Ente pubblico nazionale vigilato dal Ministero dell'Università e della Ricerca, regolamentato e istituito con D.lgs. del 21 gennaio 2004 N.38 [1].

L'istituto sostiene la ricerca metrologica, sviluppando campioni e metodi di misura avanzati con relative tecnologie. Realizza e mantiene i campioni nazionali per le unità di misura necessari per la riferibilità e il valore legale delle misure nei settori industriali, di commercio, di ricerca scientifica, di salvaguardia della salute e dell'ambiente, compreso qualsiasi altro settore in cui la ricerca metrologica trovi applicazioni (figura 1).

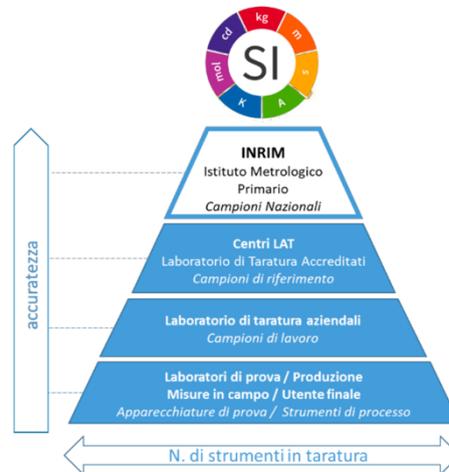


Figura 1: Catena di riferibilità  
Fonte: [1]

Tra le sue funzioni l'INRiM valorizza la ricerca e lo sviluppo tecnologico, diffondendo e trasferendo conoscenze e risultati nella scienza delle misure e nella ricerca sui materiali, con l'obiettivo di migliorare la qualità della vita e dei servizi di ogni singolo cittadino.

Esso svolge attività puramente metrologiche, costituendo il presidio principale della metrologia attraverso la realizzazione, il mantenimento e lo sviluppo dei campioni di riferimento nazionali delle sette unità di base del Sistema Internazionale (SI), ovvero, metro, kilogrammo, secondo, ampere, kelvin, mole e candela, con rispettive unità derivate. Attraverso i campioni, assicura e valorizza l'affidabilità delle misure a livello nazionale e la loro comparabilità a livello internazionale.

Per rispondere alle esigenze delle industrie, l'Istituto possiede una struttura strettamente dedicata all'innovazione e al miglioramento di servizi tecnologici avanzati, che si interfaccia

direttamente con le aziende e il mondo della produzione, prestando servizi di consulenza, taratura e prova. A tal fine, esso opera a sostegno del sistema Nazionale di Taratura, garantendo la qualità dei riferimenti metrologici e curando la diffusione dei campioni nazionali delle unità di misura.

L'INRiM, inoltre, è membro di EURAMET (European Association of National Metrology Institutes), che coordina la collaborazione tra gli istituti metrologici europei, e dell'Associazione Italiana di Magnetismo (AIMagn), che promuove la ricerca nel settore del magnetismo [1].

L'attività dell'INRiM si articola in quattordici settori scientifici, che coprono ricerca e sviluppo, metrologia nazionale e trasferimento della conoscenza. Uno dei settori di punta è la Metrologia della massa e delle grandezze apparentate, che comprende misure di massa, forza, durezza, pressione, densità, viscosità e accelerazione gravitazionale [1]. Gli esperti dell'INRiM partecipano ai gruppi di lavoro del Comitato Consultivo per la Massa e le relative quantità (CCM), contribuendo allo sviluppo degli standard internazionali.

Infine, il laboratorio di maggior interesse nella presente analisi è quello di durezza, dedicato allo sviluppo, mantenimento e disseminazione delle scale di durezza, utilizzando macchine campione primario, progettate internamente per garantire la massima accuratezza. L'INRiM realizza e dissemina le scale di durezza Rockwell, Brinell, Vickers e Knoop e fornisce riferibilità per la caratterizzazione geometrica dei penetratori di diamante. La disseminazione delle scale avviene attraverso la taratura dei durometri campione dei laboratori accreditati e dei blocchi primari di riferimento utilizzati dai laboratori accreditati per la taratura dei durometri nel settore industriale [1].

Con questa ampia gamma di attività, l'INRiM si conferma un pilastro fondamentale per la scienza delle misure in Italia, contribuendo allo sviluppo tecnologico e alla competitività del sistema industriale nazionale.

## 2.4 Progetto 22RPT01 TracInd BVK-H

Il lavoro di tesi svolto è parte del progetto JRP - 22RPT01 TracInd BVK-H, che si concentra sulla riferibilità delle misure di durezza nelle scale Brinell-Vickers-Knoop (BVK) [2].

È un progetto europeo finanziato da EURAMET che mira a sviluppare una metodologia di misurazione più precisa e unificata per le scale di durezza BVK, sviluppando metodi standardizzati per migliorare la compatibilità tra Istituti Metrologici Nazionali (NMI) e laboratori di prova, garantendo una migliore riferibilità e affidabilità dei risultati.

La durata del progetto è pari a 36 mesi, avviato il 1° settembre 2023 e coordinato da Cihan Kuzu (TUBITAK-UME).

I principali soggetti partecipanti sono:

- Istituti metrologici nazionali (NMI) tra cui INRIM (Italia), PTB (Germania), TUBITAK-UME (Turchia), CMI (Repubblica Ceca) e GUM (Polonia)
- Università e Istituzioni di Ricerca come Politecnico di Torino e Università di Zenica
- Aziende e partner industriali ovvero EASYDUR SRL, LTF S.p.A., MPA NRW

Il progetto nasce dalla necessità di conoscere le proprietà dei materiali, fondamentali per la costruzione, la progettazione e l'ingegneria. Comprendere le proprietà meccaniche critiche dei materiali utilizzati nella produzione e nell'edilizia è essenziale per prevenire rischi per la sicurezza, controllare i costi e migliorare la qualità dei prodotti. Tuttavia, attualmente esistono notevoli incoerenze nelle misurazioni della durezza tra gli NMI e i laboratori di prova, a causa dell'assenza di metodologie ben definite per i vari strumenti di misurazione delle impronte. Il progetto mira a risolvere questi problemi, stabilendo metodologie e riferimenti per misurazioni della durezza coerenti, unificate, affidabili e riferibili dal livello NMI ai laboratori di prova. Nello specifico viene valutata la durezza, proprietà fondamentale dei materiali, determinata misurando la dimensione dell'impronta lasciata su una superficie sottoposta a prove nelle scale Brinell, Vickers e Knoop. Questo progetto indagherà il fenomeno della misurazione delle impronte per stabilire una metodologia di misurazione più chiara, coerente, uniforme, affidabile e riferibile. L'obiettivo è superare le attuali incoerenze tra gli Istituti Nazionali di Metrologia e i livelli più bassi di misurazione della durezza.

I risultati del progetto saranno utilizzati nella prossima generazione di definizioni di durezza, strumenti di misurazione e standardizzazione per migliorare l'accuratezza delle prove sui

materiali in settori come aerospaziale, automobilistico, sanitario, industriale, ricerca e sviluppo.

È fondamentale sottolineare i vari impatti del progetto sul mondo reale, affinché si riesca a restituire la giusta importanza ad esso:

In Tabella 1 si mostrano obiettivi e impatti del progetto.

<b>Obiettivo generale</b>	
Migliorare l'affidabilità e la tracciabilità delle misure di durezza nelle scale BVK	
<b>Principali obiettivi del progetto</b>	<b>Impatto previsto</b>
<b>Definizione universale delle durezza BVK</b>	✓ <b>Industria e utenti finali</b>
Stabilire criteri chiari per i confini delle durezza e identificare i parametri di misurazione ottimali.	Maggiore affidabilità nelle misure di durezza. Produzione di strumenti di misura più precisi e conformi a standard internazionali.
<b>Sviluppo di standard di riferimento per la durezza</b>	✓ <b>Comunità metrologica e scientifica</b>
Creare campioni di durezza stabili e tracciabili per garantire misure affidabili su scala industriale.	Nuove definizioni e metodologie per la misurazione delle indentazioni BVK. Standardizzazione dei metodi di test per migliorare la coerenza a livello globale.
<b>Creazione di una catena di riferibilità dalle NMI agli utenti finali</b>	✓ <b>Normative e standard internazionali</b>
Definire modelli di incertezza avanzati e fornire specifiche tecniche per strumenti di calibrazione e test della durezza.	Revisione e miglioramento degli standard ISO e ASTM relativi alla durezza (es. ISO 6506, 6507, 4545)
<b>Automazione delle misurazioni di durezza</b>	✓ <b>Impatto economico, ambientale e sociale</b>
Ottimizzare il software esistente per migliorare l'accuratezza e ridurre gli errori operativi nelle misure di durezza.	Riduzione dei costi di produzione grazie a misurazioni più precise. Maggiore sicurezza nei prodotti industriali. Minore rischio ambientale attraverso materiali più affidabili per infrastrutture e gestione di sostanze pericolose.
<b>Diffusione e implementazione dei risultati</b>	
Collaborare con istituti metrologici, industrie e organismi normativi per garantire l'adozione delle nuove metodologie.	

*Tabella 1: Obiettivi e impatti  
Fonte: Elaborazione personale*

Inoltre, il progetto è suddiviso in sei pacchetti di lavoro (Work Package), nello specifico si focalizzerà l'attenzione sul WP3, relativo alla catena di riferibilità dagli NMI al livello utente.

L'obiettivo di questo pacchetto di lavoro è fornire una metodologia dettagliata per garantire una solida catena di riferibilità per le misure di durezza Brinell, Vickers e Knoop, dagli Istituti Nazionali di Metrologia fino agli utenti finali nei laboratori di prova industriali.

Attualmente, la catena di riferibilità disponibile si basa su condizioni ideali che non rispecchiano le reali condizioni operative, copre solo forze statiche uniassiali, applicate perfettamente attraverso un penetratore noto, a temperatura costante, su provini che reagiscono in modo puramente asimmetrico. Tuttavia, questo non riflette le condizioni reali, in cui si verificano effetti aggiuntivi dovuti a creep a breve termine legato ai diversi tempi di applicazione della forza, alla geometria del penetratore, alla temperatura, all'allineamento, alle misurazioni ottiche della dimensione dell'impronta e alla fabbricazione dei manufatti utilizzati come standard di trasferimento.

Per questo motivo, è necessario analizzare tutte le possibili applicazioni delle prove di durezza Brinell, Vickers e Knoop a livello industriale e degli utenti, nonché la principale strumentazione utilizzata per eseguire tali prove e tarare gli strumenti secondo gli standard internazionali.

Nel dettaglio, il WP3 si concentrerà sullo studio degli effetti dei principali fattori che influenzano le prove e tarature BVK a tutti i livelli della catena di riferibilità.

L'attività di interesse, nonché argomento della seguente tesi, è l'attività relativa all'identificazione e valutazione degli effetti dei principali fattori che influenzano la durezza Brinell, Vickers e Knoop durante le prove e le tarature a tutti i livelli della catena di riferibilità. L'obiettivo specifico prevede di ottenere misure di durezza, tenendo conto dei fattori di influenza e sviluppando modelli di incertezza. Si effettuerà, pertanto, un'indagine sui fattori che influenzano le prove di durezza Brinell, Vickers e Knoop.

Alcuni di questi fattori sono già stati studiati e i loro effetti possono essere derivati da dati disponibili in letteratura. Tuttavia, questa attività si concentrerà su fattori per i quali le informazioni sono solo parzialmente note o del tutto sconosciute, in particolare: creep a breve termine.

## 2.5 Dwell Time – creep

Il Dwell Time è uno dei principali fattori che influenzano le prove di durezza, ovvero il tempo di mantenimento del carico applicato. Più accuratamente, esso rappresenta l'intervallo di tempo durante il quale il penetratore rimane all'interno del provino, dopo che il carico applicato ha raggiunto il 98 % del valore massimo previsto. Il tempo di mantenimento, quindi, risulta essere un parametro con un ruolo sostanziale, poiché può incidere significativamente sulla misurazione della durezza del materiale, portando a possibili variazioni nei valori ottenuti.

Uno degli aspetti più rilevanti legati al dwell time è l'influenza dello short-term creep, un fenomeno di deformazione plastica o viscoelastica che si verifica quando un materiale è sottoposto a un carico costante per un breve periodo di tempo. Questo fenomeno si rivela con una progressiva penetrazione del penetratore nel materiale, anche dopo che il carico massimo è stato raggiunto, con conseguente sottostima della durezza misurata.

In particolare, il creep a breve termine influisce in modo diverso a seconda della scala di durezza utilizzata, come nel caso della Brinell, Vickers e Knoop, che prevedono metodi di indagine differenti e interazioni variabili con la microstruttura del materiale analizzato. Il creep può essere maggiore per materiali con comportamento viscoelastico pronunciato, come il rame e l'ottone, rispetto a materiali con struttura più rigida e meno soggetta a deformazioni permanenti, come l'acciaio.

Per analizzare gli effetti dello short-term creep sulla durezza del materiale, sono stati considerati diversi tempi di mantenimento del carico, pari a 5 s, 10 s, 13 s, 15 s, 20 s, 50 s.

L'analisi svolta permette di quantificare come il tempo di mantenimento condizioni la misura della penetrazione e, di conseguenza, la durezza risultante. Studi precedenti hanno dimostrato che un tempo di mantenimento più lungo tende a ridurre il valore di durezza registrato, poiché il penetratore continua ad affondare nel materiale a causa degli effetti del creep.

Per analizzare in modo dettagliato l'influenza del dwell time sulla durezza, è necessario introdurre il concetto di coefficiente di sensibilità, un parametro che descrive

quantitativamente l'effetto delle variazioni delle condizioni di prova sulla misura della durezza [25].

In particolare, il coefficiente di sensibilità  $c$  per una particolare variabile  $x$  è dato da:

$$c(x) = \Delta H / \Delta x \quad (7)$$

dove  $\Delta H$  rappresenta la variazione della durezza misurata e  $\Delta x$  indica la variazione della variabile  $x$  (in questo caso il dwell time).

I coefficienti di sensibilità vengono determinati sperimentalmente, misurando la durezza di un materiale in specifiche condizioni e analizzando le differenze nei risultati ottenuti. Lo scopo è quello di quantificare la sensibilità di ciascun materiale alle variazioni del dwell time e comprendere come la misura della durezza possa essere corretta oppure ottimizzata per minimizzare gli effetti del creep.

Lo studio corrente è stato sviluppato mantenendo costanti gli altri parametri di prova, come le velocità di penetrazione e le condizioni ambientali, variando esclusivamente il dwell time.

L'obiettivo è quello di determinare l'influenza specifica del tempo di mantenimento per ciascun materiale e stabilire correlazioni tra dwell time, creep e durezza misurata nelle diverse scale di prova.

L'analisi del dwell time e dello short-term creep è fondamentale per garantire misure di durezza affidabili, accurate e riproducibili. Infine, poiché materiali diversi rispondono in modo differente alla variazione del tempo di mantenimento, è cruciale adottare strategie sperimentali adeguate a minimizzare le difformità nei risultati e standardizzare i metodi di prova. Mediante la determinazione dei coefficienti di sensibilità si possono sviluppare modelli predittivi utili a perfezionare le misure e adattare alle caratteristiche specifiche di ciascun materiale.

## 2.6 Prove di durezza

Le prove di durezza sono fondamentali per la valutazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali e sono utilizzate per determinare la resistenza di un materiale alla deformazione plastica sotto l'azione di una forza. Le prove consentono di ottenere informazioni utili sulla qualità del materiale e sulla sua idoneità a specifici impieghi, oltre a fornire indicazioni sulla sua resistenza all'usura. Tra i principali metodi di prova di durezza, si possono evidenziare ad esempio la prova Brinell, Vickers e Rockwell, che differiscono sia per il tipo di carico applicato e sia per la geometria dell'impronta lasciata sulla superficie del campione.

La scelta della prova dipende da vari fattori, tra cui i più rilevanti le caratteristiche del materiale da testare, l'accuratezza richiesta e le specifiche tecniche della norma di riferimento.

Le norme ISO (International Organization for Standardization) sono un insieme di standard internazionali che stabiliscono criteri e linee guida per garantire la qualità, la sicurezza e l'efficienza dei prodotti, dei servizi e dei sistemi in vari settori. In particolare, le norme ISO relative alle prove di durezza forniscono un quadro completo per l'esecuzione delle prove, assicurando che i risultati siano riproducibili e confrontabili a livello globale. La durezza di un materiale è una proprietà fondamentale che influenza direttamente il suo comportamento sotto carico, la sua durabilità e la sua resistenza all'usura. Per questo motivo, le prove di durezza sono regolamentate da specifiche norme ISO che definiscono metodologie standardizzate per misurare questa caratteristica. Tra le principali norme ISO per le prove di durezza troviamo l'ISO 6506 [11][12][13], che regola la prova di durezza Brinell, l'ISO 6507 [8][9][10], che descrive la prova di durezza Vickers e l'ISO 4545 [14][15][16], che definisce la prova di durezza Knoop.

Le norme ISO, pur essendo universali, consentono anche una sorta di flessibilità nell'adattarsi a diverse applicazioni industriali, dando modo di rispondere a specifiche necessità di accuratezza e di tipo di materiale. Il rispetto di queste norme è cruciale per garantire la coerenza e la qualità delle prove di durezza, riducendo al minimo la variabilità dei risultati e favorendo l'adozione di metodi scientifici e standardizzati.

Le norme ISO citate rappresentano un riferimento fondamentale per l'industria metallurgica e meccanica, garantendo che le misurazioni della durezza Brinell, Vickers e Knoop siano eseguite con precisione, ripetibilità e riferibilità. Il rispetto delle specifiche e delle procedure indicate è essenziale per ottenere dati affidabili nel controllo qualità dei materiali metallici.

### 2.6.1 Durezza Brinell

La prova di durezza Brinell utilizza un penetratore sferico in carburo di tungsteno, che viene premuto sulla superficie del materiale con una forza definita. Dopo la rimozione della forza, viene misurato il diametro medio dell'impronta e la durezza è calcolata con la formula:

$$HBW = \frac{0.102 \times F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

dove:

- $F$  è la forza applicata (in N)
- $D$  è il diametro del penetratore (in mm)
- $d$  è il diametro medio dell'impronta  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$  (in mm)

È sicuramente semplice e veloce, adatto per prove su larga scala, utilizzabile su superfici grezze e poco lavorate e si ottiene una misura efficace per materiali teneri e mediamente duri. La scelta del metodo dipende dalla durezza del materiale, dallo spessore del campione e dal tipo di applicazione.

La norma ISO 6506-1:2014 [11] stabilisce il metodo di prova per la determinazione della durezza Brinell nei materiali metallici. Le prove di durezza Brinell sono ampiamente utilizzate nell'industria per valutare la resistenza alla penetrazione di metalli e leghe, specialmente per materiali con superfici ruvide o non uniformi. Il metodo si basa sull'applicazione di un carico definito mediante un penetratore sferico in carburo di tungsteno, che viene premuto sulla superficie del campione di prova per un determinato tempo. Dopo la rimozione del carico, viene misurato il diametro medio dell'impronta risultante e il valore di durezza Brinell (HBW) viene calcolato in funzione della forza applicata e dell'area dell'impronta secondo una formula standardizzata.

$$\begin{aligned} HBW &= \frac{\text{Forza (N)}}{\text{Area ideale della superficie dell'impronta (mm}^2\text{)}} \times \text{costante} = \\ &= 0,102 \times \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right)} \end{aligned} \quad (2)$$

Con costante =  $0.102 \approx \frac{1}{9,80665}$ .

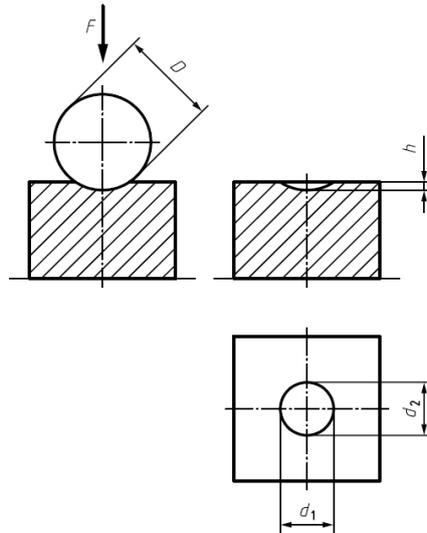


Figura 2: Principio prova Brinell  
Fonte: [11]

Il metodo definisce vari parametri chiave, tra cui:

- Forze di prova comprese tra 9,807 N e 29,42 kN, in base al diametro della sfera e al materiale da testare.
- Dimensione del penetratore, che può variare da 1 mm a 10 mm.
- Tempo di applicazione del carico, generalmente compreso tra 10 e 15 secondi, con una tolleranza di  $\pm 2$  secondi.
- Intervallo di diametro delle impronte accettabili, che deve essere tra il 24 % e il 60 % del diametro del penetratore per garantire un risultato accurato.

Per ottenere risultati affidabili, il campione di prova deve avere una superficie liscia e pulita, priva di ossidazioni, contaminanti o lubrificanti. Inoltre, deve avere uno spessore minimo pari ad almeno otto volte la profondità dell'impronta per evitare la deformazione della superficie posteriore, il che potrebbe influenzare la precisione della misurazione. Le prove devono essere condotte in condizioni ambientali comprese tra 10 °C e 35 °C, con una temperatura di riferimento ideale di  $23 \pm 5$  °C.

La prova viene eseguita in più fasi:

1. Applicazione del carico: il penetratore viene premuto sulla superficie del campione in modo perpendicolare e senza vibrazioni o urti.
2. Mantenimento della forza: il carico viene mantenuto per il tempo stabilito.

3. Misurazione dell'impronta: viene misurato il diametro medio dell'impronta lungo due direzioni perpendicolari tra loro.
4. Calcolo della durezza Brinell (HBW): viene utilizzata la formula standard riportata nella norma per determinare il valore della durezza.

Per prove su superfici curve, la norma fornisce fattori di correzione per compensare gli effetti della geometria della superficie sulla misurazione. Inoltre, la distanza minima tra due impronte deve essere di almeno 3 volte il diametro medio dell'impronta, mentre la distanza dal bordo del campione deve essere almeno 2,5 volte il diametro medio [11].

La norma specifica rigorose procedure per la verifica periodica delle macchine di prova, che devono essere controllate giornalmente mediante blocchi di riferimento certificati. Se la differenza tra il valore misurato e quello certificato del blocco supera i limiti di errore ammessi, è necessario eseguire una calibrazione indiretta o una manutenzione della macchina.

### 2.6.2 Durezza Vickers

La prova di durezza Vickers è un metodo di misurazione della resistenza alla penetrazione di materiali metallici e non metallici. Si basa sull'applicazione di un carico definito su un penetratore in diamante a forma di piramide quadrangolare, con angoli opposti di 136°. Dopo la rimozione del carico, vengono misurate le diagonali dell'impronta e la durezza è calcolata come il rapporto tra la forza applicata e l'area della superficie dell'impronta, utilizzando la formula:

$$HV = \frac{0.1891 \times F}{d^2} \quad (3)$$

dove:

- $F$  è la forza applicata (in N)
- $d$  è la media delle diagonali dell'impronta (in mm)

La prova può essere eseguita con carichi variabili da 0,009807 N (1 gf) fino a 980,7 N (100 kgf) con misura su materiali molto duri e sottili, come rivestimenti, strati superficiali, pellicole metalliche e microstrutture, in cui le impronte sono molto piccole, permettendo analisi di dettagli microscopici [6].

Tra i vantaggi si possono notare:

- Misurazione accurata e ripetibile anche su superfici molto piccole.
- Applicabilità a un'ampia gamma di materiali (dal più tenero al più duro).
- Possibilità di utilizzare carichi bassi per la micro-durezza.

Al contrario, tra gli svantaggi:

- Tempo di misurazione lungo, dovuto alla necessità di misurare otticamente le diagonali.
- Richiesta (o necessità) di superfici ben preparate per una lettura precisa.

La norma ISO 6507-1:2018 [8] stabilisce il metodo di prova per la determinazione della durezza Vickers dei materiali metallici, comprese le leghe dure e altri carburi cementati. Questo metodo si basa sull'applicazione di un penetratore in diamante, dalla caratteristica forma piramidale con base quadrata, sulla superficie del provino con una forza predefinita, per poi misurare l'impronta risultante e calcolare il valore di durezza.

$$HV = \frac{1}{g_n} \times \frac{\text{Forza (N)}}{\text{Area della superficie dell'impronta (mm}^2\text{)}} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{g_n} \times \frac{F}{d^2 / (2 \sin \frac{\alpha}{2})} = \frac{1}{g_n} \times \frac{2F \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2}$$

Angolo nominale  $\alpha=136^\circ$ .

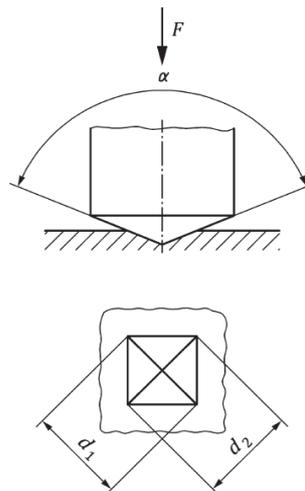


Figura 3: Principio prova Vickers  
Fonte:[8]

La durezza Vickers è determinata dividendo la forza applicata per l'area della superficie inclinata dell'impronta, assumendo che questa sia una piramide regolare. La norma definisce

tre categorie principali di prove, in base all'entità della forza applicata: la prova di durezza Vickers standard, la prova di durezza Vickers a basso carico e la prova di micro durezza Vickers, con forze di prova che variano da un minimo di 0,009807 N a un massimo di 980,7 N. L'intervallo di diagonali delle impronte considerate valide è compreso tra 0,002 mm e 1,400 mm, con l'indicazione che per impronte più piccole potrebbero verificarsi incertezze significative a causa delle limitazioni della misurazione ottica e delle possibili imperfezioni del penetratore.

Per garantire risultati accurati e riproducibili, la norma stabilisce requisiti rigorosi per la macchina di prova, il sistema di misurazione e il penetratore. Quest'ultimo deve essere realizzato in diamante e avere un angolo nominale tra le facce opposte della piramide pari a  $136^\circ$ , mentre la macchina di prova deve essere in grado di applicare le forze con precisione e senza vibrazioni o urti. Inoltre, il sistema di misurazione delle diagonali deve garantire un'elevata risoluzione e deve essere periodicamente verificato per mantenere l'accuratezza delle letture. La norma, poi, specifica i criteri per la preparazione del provino, che deve avere una superficie liscia e pulita, priva di ossidazioni, lubrificanti o contaminanti che possano influenzare la misurazione. Lo spessore minimo del provino deve essere almeno 1,5 volte la lunghezza della diagonale dell'impronta, evitando così effetti di deformazione sul lato opposto del campione.

La norma fornisce, inoltre, linee guida per le misurazioni su superfici curve, indicando i fattori di correzione da applicare in base al raggio di curvatura della superficie testata. Particolare attenzione è data anche alla verifica periodica della macchina di prova, che deve essere eseguita almeno una volta alla settimana (preferibilmente ogni giorno di utilizzo), con l'ausilio di blocchi di riferimento certificati. Questi blocchi, la cui durezza è nota con precisione, vengono utilizzati per controllare il bias della macchina di prova e garantire che rientri nei limiti ammissibili.

Per ogni prova, è necessario redigere un rapporto di prova che includa tutte le informazioni essenziali, tra cui: il riferimento alla norma ISO 6507-1:2018 [8], i dettagli del provino, la data della prova, il valore di durezza ottenuto e qualsiasi circostanza che possa aver influenzato il risultato. Se la prova viene eseguita a una temperatura fuori dall'intervallo standard di  $10\text{ }^\circ\text{C} - 35\text{ }^\circ\text{C}$ , questo deve essere riportato nel rapporto. La norma, inoltre, avverte che la conversione della durezza Vickers in altre scale di durezza o in resistenza alla

trazione non è universalmente affidabile, a meno che non sia stata stabilita da prove comparative rigorose.

Le distanze minime tra impronte adiacenti e tra un'impronta e il bordo del campione di prova sono illustrate nella figura 4.

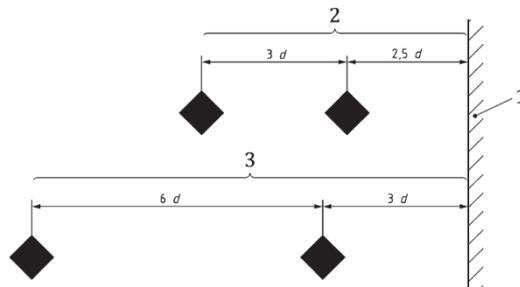


Figura 4: Distanza minima per impronte Vickers  
Fonte:[8]

La distanza tra il centro di qualsiasi impronta e il bordo del campione deve essere almeno 2,5 volte la lunghezza media della diagonale dell'impronta nel caso di acciaio, rame e leghe di rame, mentre deve essere almeno tre volte la lunghezza media della diagonale dell'impronta nel caso di metalli leggeri, piombo, stagno e le loro leghe.

Allo stesso modo, la distanza tra i centri di due impronte adiacenti deve essere almeno tre volte la lunghezza media della diagonale dell'impronta per acciaio, rame e leghe di rame, mentre deve essere almeno sei volte la lunghezza media della diagonale dell'impronta per metalli leggeri, piombo, stagno e le loro leghe. Se due impronte adiacenti presentano dimensioni diverse, la distanza minima deve essere calcolata in base alla lunghezza media della diagonale dell'impronta più grande.

Infine, la norma include appendici informative e normative che trattano argomenti quali l'incertezza di misura, la riferibilità delle misurazioni di durezza Vickers, i metodi di verifica dell'attrezzatura e l'aggiustamento dei sistemi di illuminazione Köhler per migliorare la qualità delle misurazioni ottiche.

### 2.6.3 Durezza Knoop

La prova Knoop è simile alla prova Vickers ma utilizza un penetratore in diamante con una forma asimmetrica, ovvero una piramide allungata con angoli di  $172,5^\circ$  e  $130^\circ$ . Questo consente di generare un'impronta molto sottile e allungata, particolarmente utile per testare materiali estremamente sottili o rivestimenti delicati.

La durezza Knoop è calcolata con la formula:

$$HK = \frac{1,451 \times F}{d^2} \quad (5)$$

dove:

- $F$  è la forza applicata (in N)
- $d$  è la lunghezza della diagonale maggiore dell'impronta (in mm)

Viene spesso utilizzata per applicazioni come analisi di strati superficiali molto sottili, come pellicole PVD e CVD, prove su materiali fragili, come ceramiche, vetri, smalti e caratterizzazione di microstrutture e zone di transizione in materiali trattati termicamente.

La prova di durezza Knoop è ideale per materiali estremamente sottili e fragili, si ha il minimo danneggiamento del campione e consente di analizzare gradienti di durezza su spessori ridotti [6]. Nonostante ciò, si ha difficoltà nella misurazione ottica della diagonale maggiore e non è adatta per materiali molto duri a causa delle ridotte dimensioni dell'impronta.

La norma ISO 4545-1:2017 [14] definisce il metodo di prova per la determinazione della durezza Knoop dei materiali metallici, con forze di prova comprese tra 0,009807 N e 19,613 N. La prova di durezza Knoop è particolarmente indicata per materiali sottili, rivestimenti metallici e analisi di microdurezza, poiché consente di misurare la resistenza alla penetrazione con un'impronta allungata, riducendo il rischio di deformazioni e migliorando la precisione in strati superficiali sottili. Il metodo prevede l'uso di un penetratore in diamante con una geometria a piramide rombica, caratterizzata da due angoli opposti pari a 172,5° e 130°, che viene premuto sulla superficie del provino con una forza specificata. Dopo la rimozione del carico, viene misurata la lunghezza della diagonale maggiore dell'impronta per calcolare il valore di durezza Knoop, che è il rapporto tra la forza applicata e l'area proiettata dell'impronta.

$$HK = \frac{1}{g_n} \times \frac{\text{Forza di prova (N)}}{\text{Area proiettata della superficie dell'impronta(mm}^2\text{)}} \quad (6)$$

$$= \frac{1}{g_n} \times \frac{F}{cd^2}$$

Con  $c=0.07028$ .

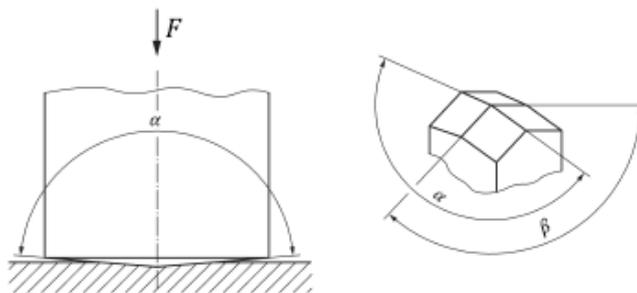


Figura 5: Principio prova Knoop  
Fonte: [14]

La norma stabilisce le specifiche tecniche per la macchina di prova, che deve essere in grado di applicare forze accurate e controllate senza urti o vibrazioni. Il penetratore in diamante deve avere una forma conforme ai requisiti ISO e deve essere controllato periodicamente per evitare difetti che potrebbero influenzare i risultati. Il sistema di misurazione delle diagonali deve garantire un'accuratezza elevata, con un ingrandimento ottico compreso tra il 25 % e il 75 % del campo visivo massimo. La norma, inoltre, specifica le risoluzioni minime richieste per la misurazione della diagonale dell'impronta, con una tolleranza di 0,0004 mm per le diagonali inferiori a 0,08 mm.

Per ottenere risultati affidabili, il campione di prova deve avere una superficie liscia e pulita, priva di ossidazioni, contaminanti o lubrificanti che potrebbero alterare la misurazione. Lo spessore minimo del provino deve essere almeno un terzo della lunghezza della diagonale maggiore dell'impronta, per evitare che la deformazione influenzi la precisione della misura. Inoltre, per campioni instabili o di piccole dimensioni, la norma consiglia l'uso di supporti dedicati o l'incapsulamento del provino in resina.

La procedura prevede che la prova venga eseguita a una temperatura compresa tra 10 °C e 35 °C, con condizioni di riferimento a  $23 \pm 5$  °C per garantire uniformità nei risultati. Il carico di prova deve essere applicato in modo graduale, senza superare una velocità di 0,070 mm/s, e mantenuto per un tempo compreso tra 14 s e 19 s. La distanza minima tra due impronte adiacenti deve essere di almeno 3,5 volte la diagonale minore dell'impronta quando sono parallele e 2 volte la diagonale maggiore quando sono allineate in serie, per evitare sovrapposizioni e influenze tra le misurazioni.

Le distanze minime tra impronte adiacenti e tra un'impronta e il bordo del campione di prova sono illustrate nella figura 6.

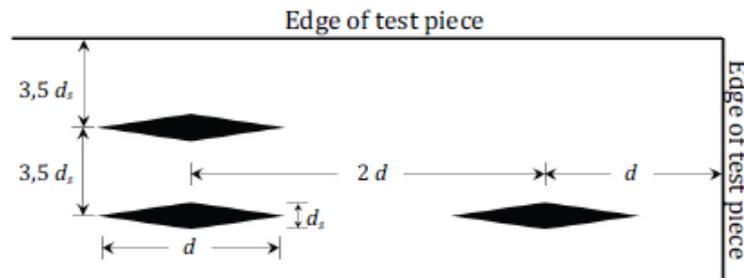


Figura 6: Distanza minima per impronte Knoop  
Fonte:[14]

La distanza minima tra il bordo del campione e il centro di un'impronta orientata parallelamente al bordo deve essere almeno 3,5 volte la lunghezza della diagonale corta dell'impronta. Se l'impronta è orientata perpendicolarmente al bordo, la distanza minima tra il bordo e il centro dell'impronta deve essere almeno pari alla lunghezza della diagonale lunga dell'impronta. Allo stesso modo, la distanza minima tra i centri di due impronte adiacenti disposte affiancate (side-by-side) deve essere almeno 3,5 volte la lunghezza della diagonale corta. Per impronte allineate longitudinalmente (end-to-end), la distanza minima tra i loro centri deve essere almeno il doppio della lunghezza della diagonale lunga. Se due impronte hanno dimensioni diverse, la distanza minima da rispettare deve essere calcolata in base alla diagonale dell'impronta più grande.

Per garantire l'affidabilità dei risultati, la norma impone verifiche periodiche delle macchine di prova, dei penetratori e dei sistemi di misurazione. La verifica settimanale o giornaliera deve essere effettuata utilizzando blocchi di riferimento certificati e il valore di durezza misurato deve rientrare entro i limiti di errore accettabili, pari a  $\pm 4\%$  del valore nominale. Se il sistema non supera questa verifica, è necessario effettuare una calibrazione indiretta o una manutenzione correttiva.

Il rapporto di prova deve includere dettagli precisi sulla misurazione, come il riferimento alla norma ISO 4545-1:2017 [14], il valore di durezza Knoop ottenuto, la forza di prova applicata, il tempo di mantenimento del carico, la data della prova e qualsiasi circostanza che potrebbe aver influenzato il risultato. La norma avverte che non esiste una conversione diretta tra la durezza Knoop e altre scale di durezza o resistenza alla trazione.

La norma, infine, include appendici informative e normative che approfondiscono argomenti come la riferibilità della misura della durezza Knoop, i metodi di verifica dell'attrezzatura, l'aggiustamento dell'illuminazione Köhler per migliorare la qualità delle immagini ottiche e le procedure per la valutazione dell'incertezza di misura.

## 3. Misure

Nel paragrafo corrente verranno riportate le misure prese in laboratorio, caratterizzandole per tipologia di prova di durezza, eseguita con i rispettivi materiali, strumenti e parametri utilizzati.

Al fine di restituire un'analisi dettagliata relativa all'influenza di alcuni parametri sulle prove di durezza nelle scale Brinell, Vickers e Knoop. Nello specifico, si focalizza l'attenzione sul tempo di mantenimento del carico durante le prove. Per le tre scale appena citate sono state effettuate molteplici prove con diversi carichi e provini di materiali, dimensioni e livelli di durezza differenti.

### 3.1 Materiali testati

I materiali selezionati per l'analisi sono:

- **Acciaio:** caratterizzato da un comportamento elastico-plastico con creep ridotto.
- **Rame:** materiale duttile e con elevata propensione alla deformazione viscoelastica.
- **Ottone:** lega con comportamento intermedio tra acciaio e rame.

I provini utilizzati hanno differenti dimensioni e scale di durezza.

Nella tabella sottostante vengono riportate le foto dei provini con le rispettive caratteristiche.

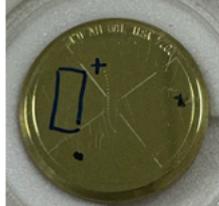
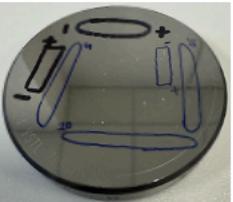
ACCIAIO		OTTONE	
	<b>HV 100</b> - spessore 14,5 mm - diametro 64,1 mm		<b>HV 100</b> - spessore 9,4 mm - diametro 64 mm
	<b>HV 300</b> - spessore 15,1 mm - diametro 63,8 mm		<b>HV 100</b> - spessore 5,93 mm - diametro 25,05 mm
	<b>HV 500</b> - spessore 15,2 mm - diametro 63,8 mm	RAME	
	<b>HV 700</b> - spessore 14,9 mm - diametro 64,2 mm		<b>HV 40</b> - spessore 6,35 mm - diametro 24,3 mm

Tabella 2: Provini utilizzati  
Fonte: Elaborazione personale

Su ogni provino sono state delineate zone specifiche per ogni scala dove effettuare le penetrazioni. Si delimita, infatti, una piccola porzione sulla superficie nella quale vengono generate le impronte, in modo da risentire meno della disomogeneità del materiale.

Nei provini in tabella si contraddistinguono le seguenti aree di colori e forme diverse:

- Ovale blu, per prove Brinell; ad ogni ovale appartiene una scala di durezza Brinell con indice differente ovvero HBW 2,5/31,25 (indice 5), HBW 2,5/62,5 (indice 10), HBW 2,5/187,5 (indice 30).
- Ovale nero, per prove Vickers; lato – per scale Vickers HV 1 e lato + per HV 0,2.
- Rettangolo blu, per prove Knoop; lato – per scale Knoop HK 2 e lato + per HK 0,2.
- Rettangolo nero, per valutare la disomogeneità.

In ogni area menzionata vengono eseguite serie da 6 impronte per ogni scala con sei differenti dwell time (5 s, 10 s, 13 s, 15 s, 20 s, 50 s), rispettando sempre la distanza minima tra due impronte, definita dalle normative viste nel capitolo 2.

### 3.2 Metodi e procedura sperimentale

Questa sezione descrive nel dettaglio i metodi e le procedure adottati per condurre l'analisi sperimentale e raccogliere i dati.

Per garantire l'affidabilità dei risultati, come già accennato nel paragrafo precedente, su ciascun provino sono state selezionate aree specifiche, al fine di minimizzare gli effetti derivanti dalle eventuali disomogeneità del materiale. La scelta di tali aree, pertanto, è stata effettuata per assicurare che la durezza misurata fosse il meno possibile influenzata dalla disomogeneità. In ogni area di prova, delimitata da un ovale o un rettangolo, sono state generate sei impronte. L'unico parametro variabile tra le diverse impronte è stato il tempo di mantenimento del carico (dwell time), mentre tutti gli altri parametri sono stati mantenuti costanti per garantire la comparabilità dei risultati. Inoltre, per assicurare la conformità agli standard internazionali, è stata rispettata la distanza minima tra due impronte consecutivamente generate, come indicato dalle normative di riferimento [8][11][14].

Per ogni prova, sono stati considerati sei differenti dwell time, in ordine crescente, come riportato di seguito.

<b>ID impronta</b>	<b>Dwell Time</b>
1	5s
2	10s
3	13s
4	15s
5	20s
6	50s

*Tabella 3: Dwell time selezionati  
Fonte: Elaborazione personale*

Ogni prova ha, quindi, prodotto sei valori di durezza, consentendo di analizzare la variazione della durezza in funzione del tempo di applicazione del carico per poi studiarne l'andamento. Attraverso questo metodo sperimentale si vogliono identificare eventuali effetti del creep sulla durezza.

In questa fase preliminare vengono riportate tutte le prove eseguite per ciascuna scala di durezza, specificando gli strumenti utilizzati e le modalità operative impiegate per ottenere tutte le misurazioni.

La tabella sottostante sintetizza il piano sperimentale adottato per condurre l'analisi.

<i>Legenda</i>		<i>ACCIAIO</i>				<i>OTTONE</i>	<i>RAME</i>
		<i>Soft</i>	<i>Medium soft</i>	<i>Medium hard</i>	<i>Hard</i>		
○	<i>Presenza misure</i>						
⊗	<i>Assenza misure</i>	100,6 HV 30	297,1 HV 30	509,4 HV 30	723,2 HV 30	104,8 HV 30	36,7 HV 30
<b>BRINELL</b>	<i>HBW 2,5/31,25</i>	○	○	○	○	○	⊗
	<i>HBW 2,5/62,5</i>	○	○	○	○	○	⊗
	<i>HBW 2,5/187,5</i>	○	○	○	○	○	⊗
<b>VICKERS</b>	<i>HV 0,2</i>	○	○	○	○	⊗	○
	<i>HV 1</i>	○	○	○	○	⊗	⊗
<b>KNOOP</b>	<i>HK 0,2</i>	○	○	○	○	⊗	⊗
	<i>HK 2</i>	○	○	○	○	○	○

*Tabella 4: Piano sperimentale  
Fonte: Elaborazione personale*

In tabella, si riporta il valore “target” della durezza per la scala Vickers, ottenuta con un dwell time pari a 13 s e un carico massimo di 30 kgf (294,2 N).

È bene puntualizzare che alcuni dati risultano assenti a causa di limitazioni sperimentali:

- Per prove Brinell, non è stato possibile effettuare misurazioni per il rame, a causa della mancanza di provini in rame di dimensioni adeguate.
- Per prove Vickers e Knoop, sono state escluse le misure caratterizzate da un comportamento anomalo (che verrà mostrato successivamente nell'analisi dati), dovuto a carichi bassi nei materiali molto morbidi come rame e ottone.

Per ogni scala di durezza analizzata, inoltre, sono stati utilizzati carichi e tipologie di provini differenti. Questo aspetto è rilevante poiché si ha lo scopo di ottimizzare la precisione delle misure e garantire la validità dei confronti tra le diverse condizioni di prova.

Per migliorare la chiarezza dell'analisi, infine, lo studio è stato suddiviso in sezioni specifiche per ciascuna scala di durezza. Tale suddivisione è stata necessaria poiché le prove sono state condotte con strumentazioni differenti, sia per la generazione delle impronte, che per la loro misurazione. Nei sottoparagrafi successivi (3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3) vengono descritti in dettaglio gli strumenti utilizzati e le procedure adottate per ottenere tutte le misurazioni sperimentali.

### 3.2.1 Brinell

Per le scale Brinell sono stati selezionati quattro provini in acciaio di durezze differenti e uno in ottone. Su ciascun provino sono state svolte prove con tre diversi indici 5, 10 e 30 che corrispondono rispettivamente a HBW 2,5/31,21, HBW 2,5/62,5 e HBW2,5/187,5. Il valore 2,5 indica il diametro, in mm, del penetratore sferico utilizzato, mentre 31,2, 62,5 e 187,5 rappresentano i carichi applicati durante le prove. È importante distinguere le due fasi della fase sperimentale, ovvero, quella di generazione dell'impronta e quella di misurazione della stessa, poiché sono stati utilizzati due strumenti differenti.

Per la generazione dell'impronta si è utilizzato il PHS DW & PRIMARY, in figura 7, ovvero un durometro campione sviluppato dall'INRiM e costruito da LTF S.p.A. [5].



*Figura 7: Durometro PHS DW & PRIMARY  
Fonte:[5]*

È uno strumento che viene impiegato per misurare la durezza dei materiali attraverso metodi standardizzati come Rockwell, Brinell e Vickers. Questo strumento è stato progettato per

garantire un'elevata accuratezza e precisione, essendo utilizzato in ambito metrologico e industriale per tarare altri durometri e validare procedure di prova.

I componenti principali, necessari per garantire il corretto funzionamento dello strumento, del durometro sono:

- Pannello di controllo e joystick di movimento, per il controllo e la gestione dello strumento. Il primo permette la selezione tra modalità manuale o automatica e la gestione delle impostazioni del test. Il secondo viene utilizzato per controllare manualmente il telaio e posizionare correttamente il penetratore.
- Sistema di applicazione del carico, mediante un meccanismo a servomotore che garantisce una discesa controllata del penetratore e una misura accurata della profondità dell'impronta. Il carico viene applicato in due fasi: iniziale, fornito dal cestello di carico e aggiuntivo, fornito da masse supplementari.
- Sistema di alimentazione pneumatico, per il controllo del movimento delle guide. Il sistema pneumatico richiede una pressione di 4-6 bar e un'erogazione di 30-50 NL/min. Questo sistema assicura che il penetratore si muova in modo fluido e controllato, evitando vibrazioni indesiderate che potrebbero influenzare la misura.
- Software di gestione ("Primary.exe"), che consente di impostare i parametri della prova, controllare il ciclo di misura e acquisire automaticamente i dati. Quest'ultimi vengono elaborati e salvati in un database, con possibilità di esportazione in Word, Excel e Access.

A seconda della scala di durezza scelta (Rockwell, Brinell, Vickers), la procedura di generazione dell'impronta segue diverse fasi. Si sofferma l'attenzione sulla scala Brinell oggetto dell'analisi.

La procedura per generare un'impronta Brinell con il durometro PHS DW & PRIMARY segue un ciclo standardizzato, basato sulla normativa UNI-EN-ISO 6506-3 [13]. Di seguito viene descritto il processo, passo dopo passo, relativo alle fasi operative dello strumento.

Nella fase iniziale, ovvero, di preparazione della prova, si procede nel modo seguente:

1. Accendere il durometro e verificare che il sistema pneumatico sia attivo con una pressione minima di 4 bar.
2. Controllare che il software Primary.exe sia operativo.

3. Configurare il software, selezionando la scala di durezza Brinell (HBW).
4. Scegliere il carico appropriato, in base al materiale da testare e al diametro del penetratore.
5. Installare il penetratore sferico Brinell.
6. Assicurarsi che il penetratore sia ben fissato e allineato con il pezzo da testare.
7. Collocare il provino sul supporto e centrarlo sotto il penetratore.
8. Regolare l'altezza del provino, per garantire un corretto contatto con il penetratore.

Nella fase di applicazione del carico, invece, si prosegue suddividendo in sottofasi il processo:

1. Fase di approccio: il telaio inizia la discesa con una velocità di avvicinamento controllata (0.2 mm/sec) per evitare oscillazioni o forze d'inerzia indesiderate. Quando il sensore rileva il contatto con il pezzo, si applica il carico preimpostato.
2. Fase di applicazione del carico: il carico viene applicato gradualmente fino al valore target, con una velocità regolata in due step per minimizzare gli errori. Il sistema monitora costantemente il valore di forza per assicurare che sia all'interno della tolleranza del 99 % del valore nominale.
3. Fase di mantenimento del carico: il carico viene mantenuto sul campione per il tempo stabilito (nella seguente analisi 5 s, 10 s, 13 s, 15 s, 20 s, 50 s). Il controllo avviene tramite un timer interno al software.
4. Rimozione del carico: il carico viene rimosso progressivamente con una velocità definita. Il telaio risale fino alla posizione di partenza, liberando il penetratore dal provino.

Nelle prove svolte si sono impostati i parametri riportati in figura 8 prestando attenzione a mantenere il Load application Time tra 6 s e 8 s come richiede la normativa [13].

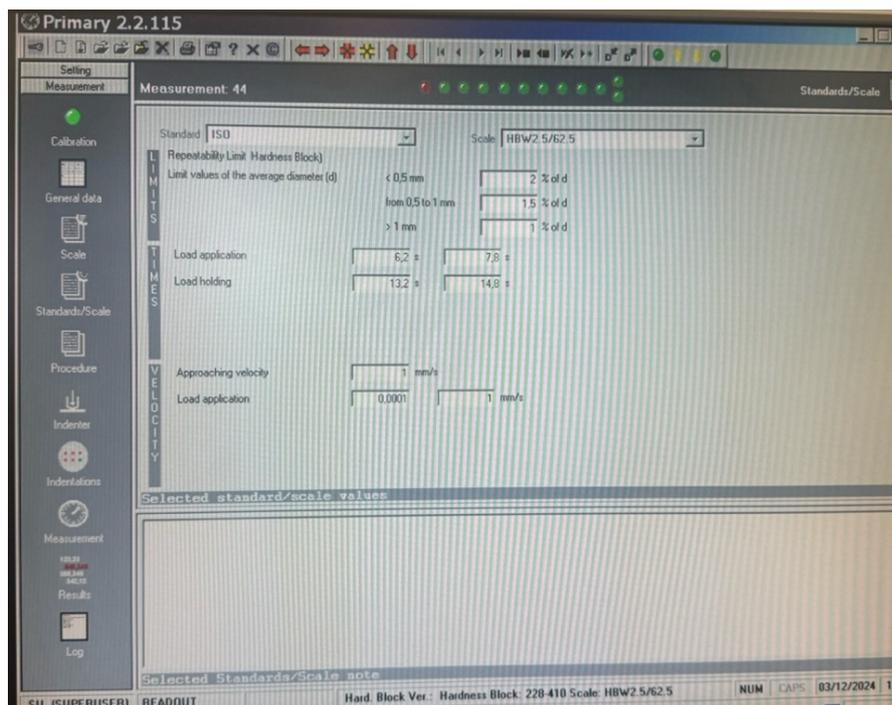


Figura 8: Parametri impostati su Primary  
Fonte: Interfaccia software [5]

Si riporta, inoltre, in figura 9, un esempio dei grafici che restituisce il software dopo la generazione di ogni singola impronta, riguardanti lo spostamento del penetratore in funzione del tempo e del carico applicato al penetratore, anch'esso in funzione del tempo.

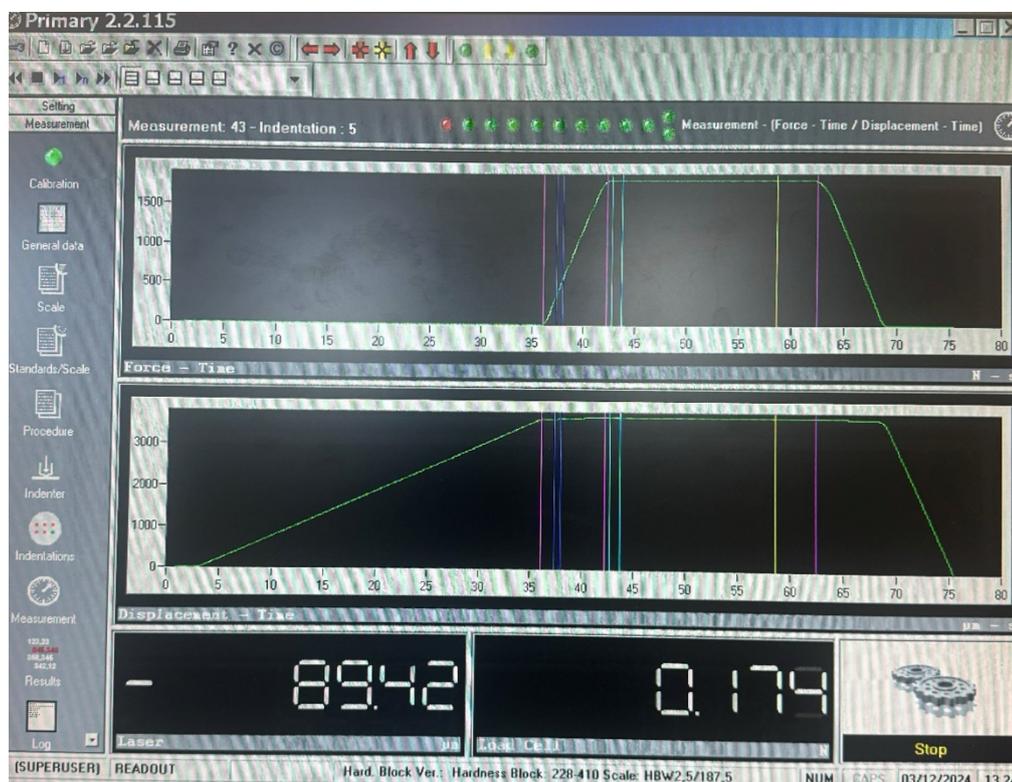


Figura 9: Grafici carico e spostamento in funzione del tempo  
Fonte: Interfaccia grafica [5]

Durante la fase di generazione dell'impronta, è emerso che i tempi di mantenimento impostati non corrispondevano a quelli effettivi. Per tale motivo i dwell time sono stati calcolati dal grafico e risultano essere maggiorati.

Al termine della fase di generazione dell'impronta, l'impronta Brinell deve essere misurata per determinare la durezza del materiale. La misurazione avviene mediante un altro strumento che verrà utilizzato anche per generare e misurare le impronte Vickers, pertanto, la fase di misurazione si illustrerà nel dettaglio nel successivo paragrafo. La procedura, ovviamente, è analoga per entrambe le scale; l'unica differenza risiede nel calcolo della durezza, poiché nelle scale Brinell il software misura il diametro medio dell'impronta, mentre nelle scale Vickers, come si vedrà, la diagonale media.

Concludendo, le tabelle complete dei parametri sperimentali e delle misure prese in laboratorio, relative alle prove di durezza Brinell, sono riportate in APPENDICE A.1.

### **3.2.2 Vickers**

Per le scale Vickers sono stati selezionati quattro provini in acciaio di durezza differenti e uno in rame. Su ciascun provino di acciaio sono state svolte prove HV 0,2 e HV 1 ovvero, con carichi pari a 0,2 kgf e 1 kgf, mentre sul provino in rame solo HV 0,2.

Queste prove sono state svolte mediante l'utilizzo del durometro campione MHSM, Micro Hardness Standardization Machine, in figura 10 [26]. È uno strumento progettato per la standardizzazione delle misure di microdurezza, in particolare per le scale Vickers, sviluppato da Galileo Durometria (LTF Spa) in collaborazione con l'INRiM. È un sistema avanzato che permette di generare impronte e misurarle con un'elevata accuratezza poiché segue una procedura automatizzata che permette di garantire precisione e conformità agli standard UNI-EN-ISO 6507-3 [10].



*Figura 10: MHSM, Micro Hardness Standardization Machine  
Fonte:[26]*

L'MHSM consente di: generare impronte Vickers e Brinell con elevata ripetibilità, misurare il diametro o le diagonali delle impronte tramite un sistema di acquisizione immagini avanzato e automatizzare il processo di misura, migliorando l'accuratezza e riducendo gli errori operativi.

È uno strumento ideale per laboratori di metrologia, ricerca e controllo qualità industriale, poiché è caratterizzato da un software avanzato e combinazione di componenti meccaniche di precisione.

I componenti principali, ognuno con un ruolo specifico, del sistema MHSM sono:

- Microscopio di acquisizione immagini, dotato di una camera CCD ad alta definizione per la visualizzazione delle immagini su PC. Dotato, inoltre, di una torretta rotante con cinque obiettivi, che consentono ingrandimenti variabili per le misurazioni delle impronte (5X, 10X, 20X, 50X, 100X) e due oculari da 10X, che permettono all'operatore di osservare direttamente il campione.
- Stazione di penetrazione, composta da tre sezioni: parte superiore, per gestire i comandi di movimentazione; parte centrale, contenente il cestello per l'applicazione del carico, il motore di indentazione e il laser di misurazione; infine, parte inferiore che contiene il penetratore, che può essere Vickers o Brinell.
- Tavola porta campioni (X, Y, Z, R), che permette il posizionamento e la traslazione del campione durante la misura. L'Asse X consente lo spostamento laterale del campione per allinearlo con il penetratore o il microscopio. L'Asse Y permette il

movimento avanti/indietro per centrare l'impronta nel campo visivo. L'Asse Z regola l'altezza per mettere a fuoco la superficie del provino. L'Asse R (rotante) ruota il campione per allineare l'impronta con il sistema di misura.

- Tavola antivibrazione, per ridurre al minimo gli effetti delle vibrazioni ambientali, il sistema è installato su un tavolo antivibrazione ThorLabs Nexus B75120B. Un box in plexiglass protegge lo strumento da correnti d'aria che potrebbero alterare le misurazioni.
- Sistema pneumatico di movimentazione, con guide pneumatiche per il controllo di precisione del carico di indentazione e alimentazione d'aria a 6 bar con una portata di 30-50 NL/min, filtrata e asciutta.
- Software GalVision, per la gestione delle misurazioni, compatibile con modalità automatica, manuale e semiautomatica. Consente l'analisi delle impronte, la calibrazione degli obiettivi e la registrazione dei dati di misura.

Anche in questo caso, a seconda della scala di durezza scelta (Brinell o Vickers), la procedura di generazione dell'impronta segue diverse fasi. Si sofferma l'attenzione sulla scala Vickers oggetto dell'analisi.

La procedura per generare un'impronta Vickers con il durometro MHSM segue una serie di passaggi standardizzati. Di seguito vengono descritti i vari step che garantiscono la corretta procedura di esecuzione della prova.

Nella fase iniziale, è necessario eseguire una serie di passaggi che garantiscono la corretta posizione e applicazione del carico sul provino.

Relativamente alla fase preliminare di preparazione e configurazione della prova si deve:

1. Creare una nuova misura o aprirne una già esistente nel software.
2. Impostare la posizione del campione sotto l'obiettivo, utilizzando il pulsante di zeroing per allineare il provino nella finestra di visualizzazione.
3. Selezionare il tipo di prova da eseguire con la relativa scala e parametri scelti.
4. Definire il numero di impronte che si vogliono generare sulla superficie del campione.

Durante questa fase il provino viene collocato sulla tavola porta campioni e viene fissato per evitare spostamenti durante la penetrazione. Il sistema di movimentazione automatizzata

(assi X, Y, Z, R) permette di regolare la posizione del campione in modo preciso. L'operatore, inoltre, può: visualizzare il campione tramite il microscopio e centrare l'area di interesse; definire una matrice di impronte, scegliendo il numero e la disposizione delle impronte sulla superficie del provino; regolare la distanza minima tra le impronte, in accordo con le normative Vickers. In questa fase è fondamentale impostare i parametri principali della prova, ovvero, carico da applicare, tempo di mantenimento del carico (dwell time) e velocità di applicazione del carico. È un sistema che permette di eseguire impronte precise, gestendo in modo controllato l'applicazione del carico e il posizionamento del provino.

Nelle prove svolte, nella seguente analisi, i parametri impostati nel software GalVision vengono mostrati in figura 11.

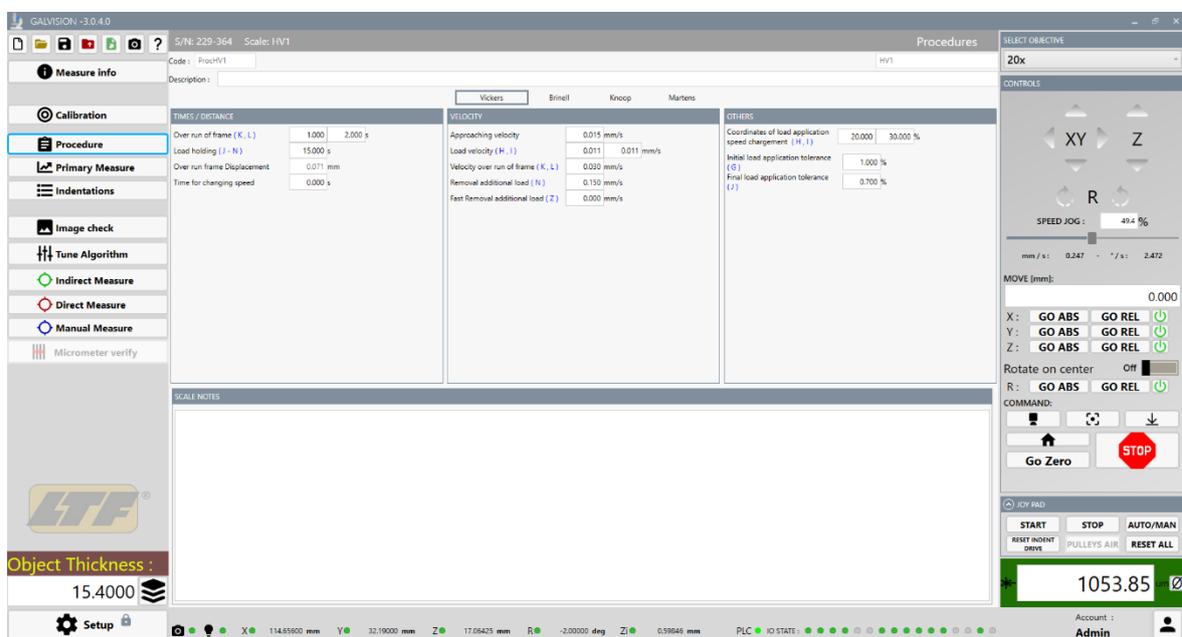


Figura 11: Parametri impostati su GalVision  
Fonte: Interfaccia software [26]

Al termine della configurazione della prova si procede con la generazione dell'impronta Vickers.

Durante la fase di generazione dell'impronta l'operatore deve avviare il processo selezionando un'esecuzione singola o multipla per generare una o più impronte consecutive.

Dopo l'avvio, il sistema esegue le seguenti operazioni automaticamente:

1. Movimentazione della tavola porta campioni, per allineare il campione con il penetratore.
2. Abbassamento controllato del penetratore fino al contatto con la superficie del provino.
3. Applicazione graduale del carico, evitando urti o sollecitazioni non controllate.
4. Mantenimento del carico, per il tempo impostato (dwell time).
5. Rilascio progressivo del carico per evitare il ritorno elastico del materiale.

Durante il processo, per monitorare lo stato delle impronte il software utilizza un codice a colori: rosso, impronta programmata ma non ancora eseguita; giallo, impronta in fase di generazione; blu, impronta generata ma non ancora misurata; verde, impronta generata e misurata.

Si riporta, anche per le Vickers, in figura 12, un esempio dei grafici che restituisce il software GalVision per ogni singola impronta, riguardanti lo spostamento del penetratore e carico in funzione del tempo.

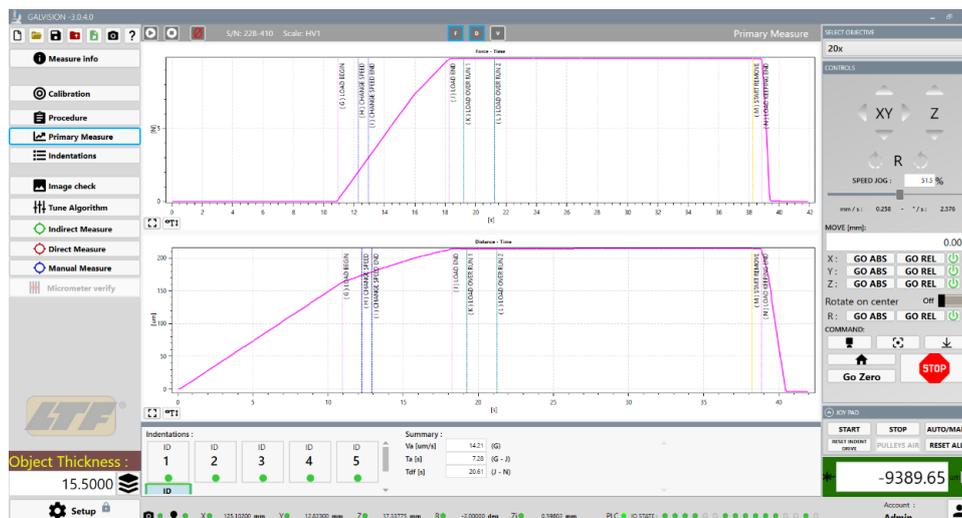


Figura 12: Grafici carico e spostamento in funzione del tempo  
Fonte: Interfaccia software [26]

Una volta generata l'impronta il sistema permette di misurarla in modo diretto, indiretto e manuale. Nel seguente lavoro si descrive la metodologia utilizzata, ovvero, la procedura relativa alla misura indiretta dell'impronta.

La misura indiretta utilizza l'acquisizione automatica delle diagonali dell'indentazione. Nel dettaglio, la misurazione avviene nel seguente modo:

1. L'operatore sceglie se creare una nuova misura o aprire una sessione di misura già esistente.
2. L'operatore avvia la misura, mediante il pulsante "Indirect Measure" nel software.
3. L'operatore verifica la qualità dell'immagine accedendo alla finestra "Image Check".
4. Il software mostra due segmenti viola ai lati dell'immagine e l'operatore li trascina per allinearli con i due vertici orizzontali dell'impronta.
5. L'operatore regola la messa a fuoco e l'illuminazione. Il software mostra un profilo di transizione dei pixel tra bianco e nero. Il livello ottimale di bianco deve essere compreso tra 200 e 250, evitando la saturazione. Un'errata regolazione porta a un contrasto eccessivo o insufficiente, compromettendo l'accuratezza della misura.
6. Il software misura automaticamente entrambe le diagonali (X e Y) dell'impronta, evitando la necessità di ruotare il campione di 90°, come richiesto nella misura diretta.
7. Il risultato viene registrato e visualizzato nella finestra "MEASURES COLLECTION", con i dati relativi a diagonali e durezza calcolata.

Si mostra, infine, un esempio di un'impronta generata su un provino di acciaio (700 HV 1 e dwell time pari a 20 s) e misurata con il MHSM (Figura 13).

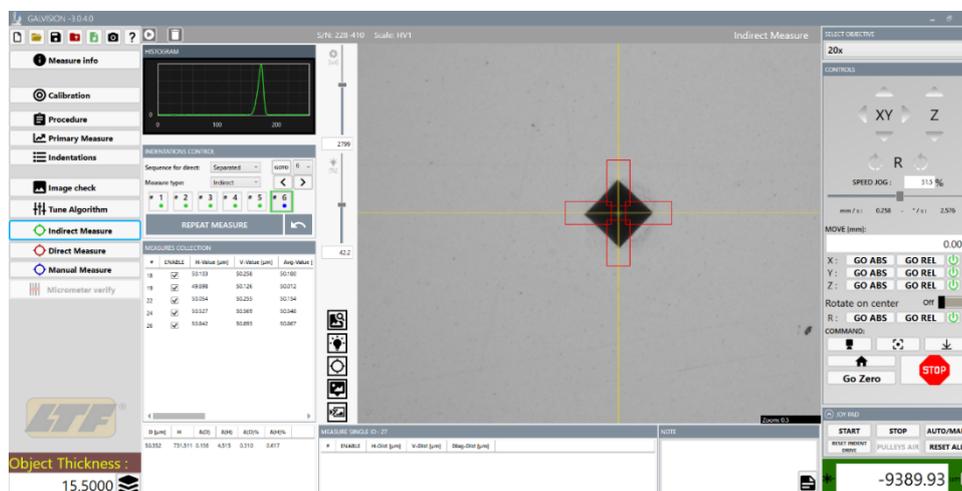


Figura 13: Impronta 700 HV 1  
Fonte: Interfaccia software [26]

Le tabelle complete dei parametri sperimentali e delle misure prese in laboratorio, relative alle prove di durezza Vickers, sono riportate in APPENDICE A.2.

### 3.2.3 Knoop

Per le scale Knoop sono stati selezionati quattro provini in acciaio di durezza differenti, uno in rame e uno in ottone. Su ciascun provino di acciaio sono state svolte prove HK 0,2 e HK 2, ovvero, con carichi pari a 0,2 kgf e 2 kgf, mentre sui provini in rame e in ottone solo HK 2. Queste prove sono state svolte mediante l'utilizzo di un durometro manuale commerciale, modello DG901 (Figura 14). È uno strumento progettato per la generazione di impronte di microdurezza, in particolare per le scale Vickers e Knoop, sviluppato da Officine Galileo, in collaborazione con l'INRiM. È un sistema manuale che permette solamente di generare impronte, non misurarle, rispettando la normativa UNI -ISO/FDIS 4545-3 [16].

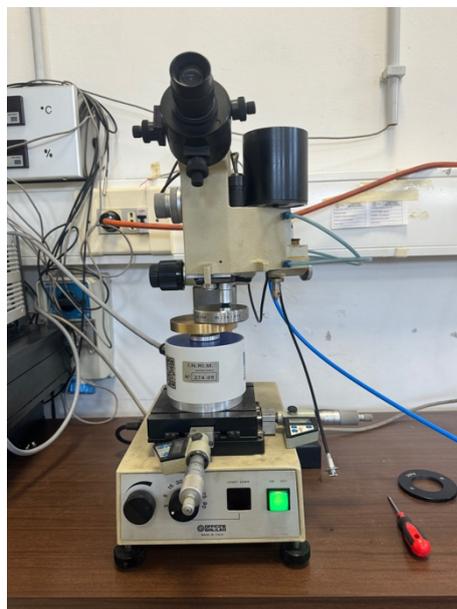


Figura 14: Microdurometro Galileo (DG 901)  
Fonte: Foto personale

Il Microdurometro è composto essenzialmente da un sistema di penetrazione, da un microscopio di lettura delle dimensioni dell'impronta e da un tavolino di sostegno per gli oggetti da misurare. Il sistema di penetrazione e il microscopio, meccanicamente uniti, sono sostenuti da una colonna con basamento. Il basamento porta anche il tavolino portaoggetti e i comandi elettrici dello strumento.

Il sistema di penetrazione e misura può essere spostato lungo la colonna per fare posto a oggetti di varie dimensioni. Il tavolino portaoggetti è dotato di traslazione micrometrica in due sensi per la ricerca del punto esatto del campione sul quale deve essere eseguita la penetrazione. Per facilitare tale ricerca il microscopio di lettura porta anche un obiettivo con minore numero di ingrandimenti e campo più grande, sostituibile all'obiettivo di misura

col semplice spostamento di una levetta. Il sistema di penetrazione è dotato di penetratori intercambiabili Vickers e Knoop e di una serie di masse per predisporre carichi da 15 a 5000 g. È un sistema con guide ad aria che, essendo manuale, non consente di controllare la velocità, ma ha un freno idraulico che permette di regolarla tramite valvola manuale. Ha, inoltre, un temporizzatore con avvisatore ottico e acustico per la durata della penetrazione e un timer per il conteggio di applicazione del carico che emette un segnale sonoro al termine, dopo il quale avviene la rimozione manuale.

Per maggiore chiarezza si riporta la procedura di esecuzione delle impronte Knoop:

1. Montare il penetratore e posizionarlo a circa 0,15 mm dal piano di prova messo a fuoco dall'obbiettivo di misura del microscopio. È importante agire con cautela negli spostamenti del penetratore dalla posizione di battuta a quella di penetrazione e viceversa.
2. Spostare il penetratore verso sinistra fino a battuta (gli urti devono essere sempre leggeri). In questa fase il penetratore si trova sopra la zona del provino osservata in precedenza dal microscopio.
3. Appoggiare le masse sul piattello.
4. Rilasciare il carico mediante un pulsante per far iniziare a scendere il penetratore. Quando il penetratore entra in contatto con la superficie del provino si spegne la spia verde e si accende quella rossa. Trascorso il tempo di mantenimento desiderato si accende la spia gialla e suona l'avvisatore.
5. Risollevarlo il penetratore premendo un pulsante così da far riaccendere la spia verde, che segnala il termine della prova; lo strumento è pronto per una nuova prova.

Essendo uno strumento manuale, purtroppo, non ci sono parametri da impostare nel sistema e non si ha il grafico che rappresenta l'andamento della forza durante l'applicazione del carico.

Infine, dopo esser stata generata l'impronta viene misurata con il software GalVision del MHSM citato nel paragrafo 3.2.2. Anche per ottenere le misure della scala Knoop è stata utilizzata la misura indiretta.

Le tabelle complete dei parametri sperimentali e delle misure prese in laboratorio relative alle prove di durezza Knoop sono riportate in APPENDICE A.3.

## 4. Analisi dati

In quest'ultima sezione vengono analizzati i dati ottenuti dalle prove sperimentali, con l'obiettivo di valutare e descrivere i risultati derivati.

In primo luogo si mostrano, nella tabella riassuntiva sottostante, le misure di durezza ottenute durante l'esecuzione di tutte le prove.

<b>MISURE</b>		<b>ACCIAIO</b>				<b>OTTONE</b>	<b>RAME</b>
		<i>Soft</i>	<i>Medium soft</i>	<i>Medium hard</i>	<i>Hard</i>		
		<i>100,6 HV 30</i>	<i>297,1 HV 30</i>	<i>509,4 HV 30</i>	<i>723,2 HV 30</i>		
<b>BRINELL</b>	<i>HBW 2,5/31,25</i>	86,993	255,971	413,214	553,503	106,983	-
	<i>HBW 2,5/62,5</i>	91,052	269,548	445,442	599,941	114,424	-
	<i>HBW 2,5/187,5</i>	102,121	285,583	487,044	672,207	118,655	-
<b>VICKERS</b>	<i>HV 0,2</i>	96,649	289,729	506,566	755,235	-	40,325
	<i>HV 1</i>	101,781	297,337	507,314	737,218	-	-
<b>KNOOP</b>	<i>HK 0,2</i>	105,812	307,024	519,054	720,472	-	-
	<i>HK 2</i>	106,446	312,540	502,844	692,880	108,06	35,31

*Tabella 5: Misure sperimentali  
Fonte: Elaborazione personale*

Si riportano tutti i valori di durezza “target” per ogni scala. Questi sono stati calcolati con un tempo di mantenimento pari a 13 s, poiché si rispetta il range definito dalle normative [10][13][16].

Una volta ottenuti i dati sperimentali è necessario analizzarli in modo tale da ottenere i valori dei coefficienti di sensibilità e le incertezze [18]. Per far ciò è necessario scegliere un metodo di analisi, programmare un software di analisi e discuterne le varie operazioni.

L'analisi per l'elaborazione statistica dei dati è stata condotta impiegando il software di calcolo numerico MATLAB per applicare il metodo Monte Carlo, mentre per la rappresentazione grafica si è utilizzato Excel. L'analisi Monte Carlo è una tecnica di simulazione utilizzata per calcolare l'incertezza nei risultati di una prova, che coinvolge variabili casuali [4]. Si basa sulla generazione di molteplici scenari possibili, nei quali ogni variabile viene trattata come una variabile casuale, con una distribuzione di probabilità associata (es. normale).

Nel dettaglio, i coefficienti di sensibilità vengono valutati operando una regressione lineare, che si sarebbe potuta ottenere anche mediante Excel, ma si è scelto l'utilizzo del metodo Monte Carlo, poiché permette di eseguire un elevato numero di regressioni e i risultati ottenuti considerano tutte le iterazioni che vengono compiute.

Nonostante questo metodo sia più complesso, poiché richiede la stesura di uno script che poi verrà eseguito dal software MATLAB, si è preferito il suo utilizzo, perché permette di tener conto di tutte le incertezze in gioco e di poterle propagare.

La scelta del metodo Monte Carlo per calcolare i coefficienti di sensibilità e le loro incertezze, pertanto, è stata effettuata per superare le limitazioni dei metodi tradizionali nella stima delle incertezze, offrendo una maggiore affidabilità nei risultati.

Il metodo proposto, infatti, migliora la valutazione delle incertezze nei coefficienti di sensibilità, fornendo risultati più affidabili rispetto ai metodi convenzionali, che spesso sottostimano le incertezze; ciò è particolarmente rilevante per standardizzare le procedure di misura della durezza, soprattutto nel caso di fattori come creep che influenzano significativamente i risultati [4].

L'analisi Monte Carlo può essere effettuata esclusivamente per lo stesso campione di dati, quindi, saranno necessarie in totale 34 simulazioni Monte Carlo (per ogni configurazione in tabella 5) per avere risultati per ogni scala su provini di diversa durezza.

Si spiega in breve il metodo Monte Carlo, per poi andare a mostrare nel dettaglio, a titolo d'esempio, la procedura svolta durante l'analisi per una specifica configurazione (700 HBW 2,5/187,5).

In primo luogo, si definisce il modello matematico di riferimento [24] che è il seguente:

$$H = H_0 + c_{T_{ai}} \cdot \ln(T_{ai}) \quad (8)$$

È un modello di regressione lineare,  $Y=Y_0 + mx$ , dove:

- $H$  è la durezza generica misurata (nel caso in analisi son state valutate durezze Brinell, Vickers e Knoop);

- $H_0$  è l'intercetta, o termine noto, in corrispondenza della variabile  $x=0$  (nel caso specifico la variabile  $x$  è il tempo di mantenimento del carico, dwell Time, quindi  $T_{dl}=0$ );
- $c_{T_{dl}}$  è il coefficiente angolare, ovvero, la pendenza della retta (nell'analisi è il coefficiente di sensibilità in funzione del dwellTime).

In secondo luogo, si spiega l'algoritmo del metodo Monte Carlo che consiste nei seguenti passaggi:

- Generazione di campioni casuali per ogni variabile (input e output), basati sulle loro distribuzioni di probabilità.
- Applicazione della regressione lineare per ogni campionamento, ottenendo un piano di regressione che include i coefficienti di sensibilità ( $c_{T_{dl}}$ ).
- Ripetizione del processo per un numero elevato di iterazioni (nel caso specifico  $N=10^4$ ) per costruire una distribuzione dei coefficienti di sensibilità.

Una volta ottenuti  $N$  valori dello stesso coefficiente e le rispettive incertezze è necessario stimare un unico valore per lo stesso, con un unico valore di incertezza che venga correttamente propagato [7][17].

Il valore del coefficiente può essere stimato come la media dei valori dello stesso coefficiente trovati in tutte le  $N$  iterazioni. Per tale ragione, il coefficiente  $\bar{c}$  è pari a:

$$\bar{c} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N c_i \quad (9)$$

dove:

- $\bar{c}$  è il valore stimato del coefficiente  $c$ , ovvero, il valore del coefficiente di sensibilità;
- $c_i$  è il valore che è stato calcolato per il coefficiente  $a$  nella  $i$ -esima iterazione;
- $N$  è il numero totale di iterazioni usate per il metodo Monte Carlo.

Dopo aver definito il coefficiente  $\bar{c}$  come media di tutti i  $c_i$  ottenuti dalle  $N$  iterazioni, si concentra l'attenzione sulla determinazione dell'incertezza relativa al coefficiente stesso.

Per valutare l'incertezza di  $\bar{c}$  si devono considerare tutti i contributi dell'incertezza sui coefficienti [21], ovvero:

### le incertezze dei coefficienti calcolate nelle $N$ regressioni

Si considera il contributo generato dalle  $N$  incertezze sui coefficienti trovate nelle  $N$  regressioni con il metodo Monte Carlo. Questo contributo verrà chiamato  $u_{REGR}$ , poiché sono incertezze che derivano dall'utilizzo della regressione lineare e si ottiene calcolando la media del quadrato delle incertezze tipo trovate nelle  $N$  regressioni in Monte Carlo:

$$u_{REGR}^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N u^2(c_i) \quad (10)$$

### l'incertezza sui valori dei coefficienti calcolati nelle $N$ regressioni

Si valuta il contributo dell'incertezza generata dalla presenza di  $N$  coefficienti  $c_i$  trovati con il procedimento Monte Carlo. Questo contributo verrà indicato con  $u_{MC}$ , poiché la presenza di molteplici coefficienti  $c_i$  è dovuta all'utilizzo del metodo Monte Carlo. Inoltre, poiché il valore  $\bar{c}$  è stato calcolato partendo da  $N$  valori  $c_i$ , è necessario valutare nell'incertezza anche questa discrepanza. Per propagare tale incertezza è necessario determinare quanto i valori  $c_i$  si scostano dal valore stimato  $\bar{c}$ , dunque, è necessario calcolare lo scarto tipo dei vari coefficienti  $c_i$  mediante la seguente relazione:

$$u_{MC} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (c_i - \bar{c})^2} \quad (11)$$

### l'incertezza di base dei valori ottenuti sperimentalmente

Le incertezze sui dati sperimentali sono state inserite nell'algoritmo Monte Carlo per cui si considera che esse siano già state propagate attraverso questo metodo. Per tale ragione non è stato considerato un nuovo contributo per queste incertezze.

Dopo aver ottenuto i contributi dell'incertezza è necessario metterli in relazione per ottenere l'incertezza totale sul coefficiente  $\bar{c}$  che si ottiene con la formula sottostante:

$$u_{TOT} = \sqrt{u_{MC}^2 + u_{REGR}^2} \quad (12)$$

Si è scelto di calcolarlo mediante la somma in quadratura, poiché permette di estendere l'intervallo di incertezza senza perdere aderenza con la realtà. Si ottiene così il valore dell'incertezza sul coefficiente di sensibilità.

Come già anticipato, si applica ora il metodo Monte Carlo ad una delle 34 configurazioni analizzate, nello specifico viene riportato l'esempio di una prova Brinell con penetratore sferico di diametro 2,5 mm e carico pari a 187,5 kgf (1839 N).

Si parte dal mostrare i dati sperimentali ottenuti durante la prova in laboratorio nella tabella 6.

DATI SPERIMENTALI							
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Tdl [s]	ln(Tdl)	d [um]	HB sperimentale
Acciaio	HBW 2,5/187,5	30	700	5,5000	1,7047	590,3415	675,4290
				10,3800	2,3399	591,4515	672,8600
				13,4400	2,5982	591,7345	672,2070
				15,3100	2,7285	592,1235	671,3100
				20,2500	3,0082	592,5940	670,2290
				50,3000	3,9180	593,8990	667,2440

Tabella 6: Dati sperimentali HBW 2,5/187,5  
Fonte: Elaborazione personale

Si inseriscono sul software MATLAB i dati relativi alle misure di durezza (HB sperimentale) e ai tempi misurati ( $T_{dl}$ ) per svolgere la simulazione Monte Carlo. Sono state eseguite 10000 iterazioni ( $N=10^4$ ) e per ogni iterazione del programma verranno generati nuovi valori, che varieranno normalmente rispetto ai dati sperimentali e per ogni iterazione del programma verranno presi 6 (nel software  $M=6$ ) nuovi valori di durezza.

Questi nuovi valori sono legati ai dati sperimentali secondo la seguente relazione:

$$H_{ij} = H_i + z \cdot u(H_i) \quad (13)$$

con  $i=1, \dots, 6$ , dove:

- $H_{ij}$  è il nuovo valore della durezza calcolato partendo dall' $i$ -esimo dato sperimentale.

- $H_i$  è il valore della durezza misurato per l'i-esimo dato sperimentale.
- $u(H_i)$  è il valore stimato considerando  $u = \frac{U}{2} = \frac{\left(1 + \frac{240}{d_{medio}}\right)\% \cdot H}{2}$ ; nell'esempio in questione è stata considerata la CMC pari a  $1 + 240/d_{medio}$  [22] per le scale Brinell.
- $z$  è un valore variabile che varia in maniera normale, esattamente come la  $z$  in una distribuzione normale standardizzata, ovvero, da  $-\infty$  a  $+\infty$  con valore medio 0 e deviazione standard 1.

Questa relazione permette di ottenere un valore di  $H_{ij}$  che vari normalmente intorno al valore di  $H_i$ . Questi valori sono stati generati in ogni iterazione dalla funzione “randn()” e salvati nella “Matrice1” del software di dimensioni  $M \times 1$ : la colonna di questa matrice verrà riportata nel vettore “H1” di lunghezza M. Dopo aver ottenuto i valori temporanei della durezza è necessario effettuare la regressione lineare per questa iterazione. I valori salvati in “H1” vengono elaborati dalla funzione “fitlm()”, che genera un modello lineare che verrà salvato in “mdl”.

Infine, i valori dei coefficienti e delle incertezze sono poi salvati nella i-esima riga delle matrici “bi” e “bt”, che sono dette matrici dei coefficienti, rispettivamente dell'intercetta (hardness) e del tempo (dwell Time). Queste matrici hanno  $N$  righe, in modo da immagazzinare tutti i dati delle  $N$  iterazioni, e 2 colonne, dove sulla prima ci saranno i valori dei coefficienti e sulla seconda il valore dell'incertezza del coefficiente.

È bene puntualizzare che affinché lo script funzioni è necessario dichiarare alcune variabili prima che il ciclo for inizi ad operare, quindi, nello script vengono dichiarate: le matrici che conterranno i coefficienti delle regressioni, con le rispettive incertezze (“bi”, “bt”); i vettori che conterranno i valori temporanei di durezza; la matrice “Matrice1”, che conterrà i valori generati in ogni iterazione dalla funzione “randn()”.

Una volta ottenuti  $N$  valori dello stesso coefficiente e le rispettive incertezze è necessario stimare un unico valore per lo stesso, con un unico valore di incertezza.

Quanto appena detto viene calcolato dal software mediante le formule descritte precedentemente e fornendoci, quindi, come risultati finali  $\bar{c}$ ,  $u_{REGR}$ ,  $u_{MC}$ ,  $u_{TOT}$ . A questo punto si riesce a determinare l'incertezza estesa  $U = u_{TOT} \cdot 2$  e i valori teorici relativi alle misure di durezza ottenute con dwell time differenti con la seguente formula:

$$H_{i,T} = \bar{H}_0 + c_{T\_dl} \cdot \ln(T\_dl) \quad (14)$$

Tutti i valori citati, ovvero,  $\bar{c}$ ,  $u_{REGR}$ ,  $u_{MC}$ ,  $u_{TOT}$  e  $H_{i,T}$  vengono restituiti dal software nella matrice risultati.

Per maggiore chiarezza il codice utilizzato per svolgere l'analisi viene mostrato in Appendice B.

Al termine della simulazione Monte Carlo si è ritenuto opportuno valutare la significatività dell'influenza del dwell Time sulla misura di durezza rispetto alla disomogeneità del provino.

Per valutare la significatività è stato effettuato il test di Fisher considerando il rapporto tra la varianza relativa la disomogeneità del provino e la varianza dei residui.

Per valutare la varianza della disomogeneità sono stati utilizzati i valori calcolati dai confronti internazionali [22] che si differenziano per scala, carico e livello di durezza del provino.

Si ha pertanto:

- Scarto tipo relativo disomogeneità per HV1 = 1,5 %
- Scarto tipo relativo disomogeneità per HV0,2 = 5 %
- Scarto tipo relativo disomogeneità per 90 HB = 0,62 %
- Scarto tipo relativo disomogeneità per 250 HB = 0,51 %
- Scarto tipo relativo disomogeneità per 450 HB = 0,37 %
- Scarto tipo relativo disomogeneità per 600 HB = 0,26 %

Si calcolano quindi la varianza della disomogeneità e la varianza dei residui con le formule seguenti:

$$var_{Dis} = (0,26\% \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{HB_{isperimentali}}{6})^2 \quad (15)$$

$$var_{res} = \frac{(\sum_{i=1}^6 (H_{i,T} - H_i))^2}{6 - 1} \quad (16)$$

Il rapporto tra le due è pari a:

$$r = \frac{var_{Dis}}{var_{res}}$$

Dopo aver calcolato il rapporto  $r$ , si determina il **p-value**, confrontandolo con la distribuzione  $F$  con (6-1) gradi di libertà sia per il numeratore sia per il denominatore.

Per l'analisi è stato considerato un livello di fiducia dell'80 %, accettando un rischio di errore massimo del 20 %, per cui i valori aventi  $p\text{-value} > 20\%$  non si ritengono significativi e la prova si ritiene non valida.

In conclusione, si riportano (tabella 7) tutti i risultati ottenuti per la configurazione 700 HBW2,5/187,5 con il relativo grafico (figura 15), che segue il modello lineare di partenza.

Per le altre 33 configurazioni i risultati ottenuti sono disponibili in Appendice C.

RISULTATI OTTENUTI						Legenda	
HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR	u_TOT	Ho	
675,3028	Hardness	681,6335	0,0120	0,3698	0,3700	c	
672,9442	Dwell Time	-3,7136	0,0043	0,1322	0,1322	u(c)	
671,9848	Incertezza estesa	Test F					U(c)
671,5010							
670,4625	0,2645	% Dis	Var_Dis	Var_Res	r	p-value	
667,0838		0,26%	3,0486	0,0378	80,6085	0,01%	

Tabella 7: Risultati per la configurazione HBW2,5/187,5  
Fonte: Elaborazione personale

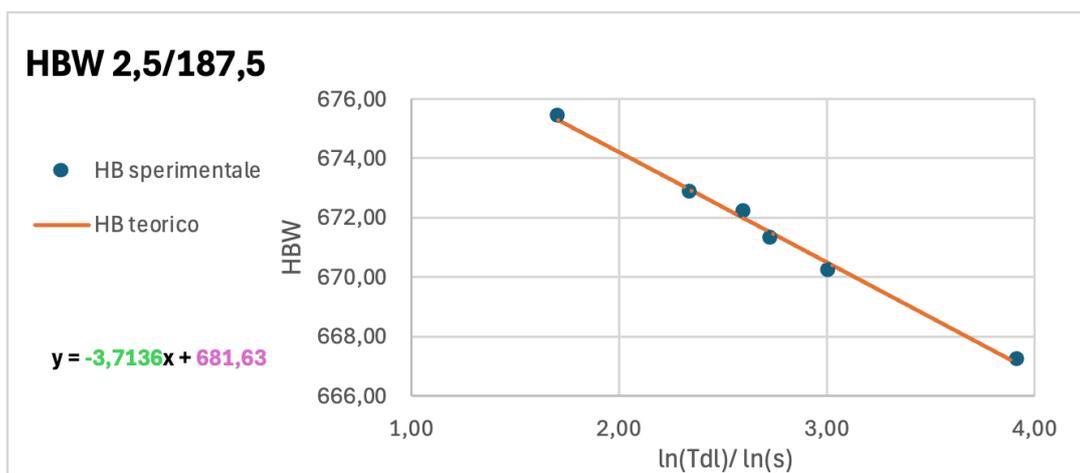


Figura 15: Modello lineare  
Fonte: Elaborazione personale

Dai risultati conseguiti e dal grafico mostrato per questa configurazione, il modello teorico risulta essere quasi uguale al modello sperimentale, ciò è ben evidente dal valore molto basso del  $p$ -value. In questo caso si può affermare, quindi, che il dwell time influenza significativamente la misura di durezza del materiale in esame.

Pertanto, nel caso di prove Brinell con provino di acciaio molto duro e carico elevato (700 HBW 2,5/187,5), è importante valutare il tempo di mantenimento del carico poiché diventa un parametro critico a causa del fenomeno del creep.

Al termine dell'analisi si riportano i risultati finali di tutte le configurazioni, esprimendo per ognuna di esse il coefficiente di sensibilità, l'incertezza estesa e il  $p$ -value, mediante i quali si possono trarre le conclusioni finali del lavoro di tesi. La tabella sottostante riassume i risultati delle analisi sperimentali condotte utilizzando il metodo Monte Carlo, per stimare i coefficienti di sensibilità e i relativi  $p$ -value. Questi dati sono fondamentali per valutare l'influenza del tempo di mantenimento del carico (dwell time) sulle misurazioni di durezza, in diverse configurazioni (materiale, scala e livello di durezza).

COEFFICIENTI SENSIBILITA' ± INCERTEZZA ESTESA (P-VALUE)		ACCIAIO				OTTONE	RAME
		Soft	Medium soft	Medium hard	Hard		
		100,6 HV 30	297,1 HV 30	509,4 HV 30	723,2 HV 30		
BRINELL	HBW 2,5/31,25	-1,48 ± 0,56 (23,32 %)	-1,64 ± 0,34 (0,10 %)	-0,88 ± 2,26 (51,78 %)	-6,99 ± 6,84 (98,95 %)	-0,5 ± 0,9 (42,53 %)	-
	HBW 2,5/62,5	-1,52 ± 0,74 (44,76 %)	-1,87 ± 0,56 (0,89 %)	-2,26 ± 0,59 (0,49 %)	-3,43 ± 3,63 (85,82 %)	0,08 ± 0,49 (7,93 %)	-
	HBW 2,5/187,5	-2,04 ± 0,46 (9,55 %)	-2,13 ± 0,69 (1,94 %)	-1,2 ± 0,95 (2,95 %)	-3,71 ± 0,26 (0,01 %)	1,22 ± 1,33 (72,81 %)	-
VICKERS	HV 0,2	4,97 ± 5,2 (25,66 %)	4,78 ± 8,33 (4,02 %)	3,1 ± 4,63 (0,02 %)	-9,54 ± 16,17 (1,31 %)	-	-1,2 ± 1,67 (17 %)
	HV 1	-1,03 ± 1,84 (39,81 %)	-0,07 ± 3,12 (8,57 %)	-3,87 ± 3,69 (1,94 %)	-16,36 ± 6,52 (4,65 %)	-	-
KNOOP	HK 0,2	-3,5 ± 8,6 (59,15 %)	-0,88 ± 6,76 (1,21 %)	-6,84 ± 7,02 (0,15 %)	2,68 ± 14,46 (0,94 %)	-	-
	HK 2	-3,54 ± 1,33 (15,73 %)	-1,58 ± 0,99 (0,05 %)	-1,69 ± 1,41 (0,03 %)	-2,93 ± 3,16 (0,28 %)	-0,62 ± 0,72 (1,5 %)	-0,49 ± 0,73 (51 %)

Tabella 8: Risultati ottenuti  
Fonte: Elaborazione personale

Per agevolare la lettura e semplificare la discussione della tabella, è stato evidenziato con colori differenti il valore del coefficiente di sensibilità (che rappresenta la variazione della durezza rispetto al logaritmo del tempo di mantenimento) e del  $p$ -value (probabilità che il coefficiente di sensibilità sia statisticamente significativo rispetto alla variabilità dei dati).

In rosso, si evidenziano i coefficienti di sensibilità positivi, poiché rappresentano un comportamento totalmente anomalo contraddicendo la natura del fenomeno fisico, per cui

non è possibile graficarne l'andamento. Questi risultati potrebbero derivare da errori sperimentali o dalla non omogeneità dei provini.

In blu, si indicano i  $p$ -value (riportati in termini % essendo probabilità) superiori al 20 %, che non possono essere considerati perché non significativi (rischio di errore troppo elevato). Ciò implica che l'effetto del dwell time non è distinguibile dalla disomogeneità dei provini o dal rumore sperimentale; la disomogeneità dei provini in molti casi risulta essere molto più influente rispetto all'aumento del dwell time. Per disomogeneità dei provini si intende la variabilità intrinseca delle proprietà meccaniche all'interno dello stesso campione, causata da fattori come composizione chimica non uniforme, microstruttura eterogenea, difetti interni e rugosità superficiale. Questa variabilità influenza significativamente i risultati delle misurazioni di durezza, mascherando l'effetto di altri parametri, come il tempo di mantenimento del carico (dwell time).

In verde, infine, si individuano i  $p$ -value significativi e i coefficienti di sensibilità negativi, che indicano una diminuzione della durezza con l'aumentare del dwell time; quindi, hanno andamento coerente con il fenomeno fisico del creep, che porta a un rilassamento del materiale sotto carico.

In queste configurazioni si può valutare l'influenza del dwell time sulle misure di durezza.

Le configurazioni con materiali più duri e carichi elevati (es. 700 HBW 2,5/187,5) tendono a mostrare  $p$ -value bassi (es. 0,01 %), confermando la significativa influenza del dwell time sulla durezza; il tempo di mantenimento del carico è un parametro critico per queste prove a causa del fenomeno del creep.

Al contrario, in altre configurazioni, per materiali più morbidi o scale con carichi minori, i  $p$ -value sono spesso elevati (>20 %), suggerendo che l'effetto del dwell time è trascurabile rispetto ad altri fattori, tra cui la disomogeneità dei provini, che spesso domina sugli effetti del dwell time.

La disomogeneità è stata identificata come un fattore critico che può influenzare significativamente i risultati. Ad esempio, per scale come HV0,2, lo scarto tipo della disomogeneità raggiunge il 5 %, rendendo difficile isolare l'effetto del dwell time. La qualità e l'omogeneità dei provini pertanto sono aspetti critici per garantire misurazioni affidabili e ripetibili.

Infine, in alcuni casi, l'incertezza è elevata, indicando una variabilità significativa nei dati sperimentali o una scarsa precisione nel modello.

In sintesi, i risultati finali ottenuti mostrano che:

- In configurazioni con  $p$ -value basso e coefficienti negativi significativi, il modello teorico si adatta bene ai dati sperimentali. Tuttavia, per configurazioni con  $p$ -value alto (>20 %), il modello potrebbe non essere adeguato a descrivere completamente il fenomeno.
- L'effetto del dwell time sulla durezza è significativo solo in alcune configurazioni specifiche: materiali duri e carichi elevati. In questi casi, è fondamentale considerarlo come parametro critico per evitare errori sistematici nelle misurazioni.
- La disomogeneità rappresenta una limitazione significativa per molte configurazioni, specialmente per materiali morbidi o scale con carichi bassi.
- L'uso del metodo Monte Carlo ha permesso una stima più realistica delle incertezze rispetto ai metodi tradizionali. Tuttavia, l'elevata complessità computazionale richiede un'accurata progettazione sperimentale per ottenere risultati affidabili.

Questa analisi evidenzia l'importanza di standardizzare le procedure di misura della durezza e migliorare la qualità dei provini per ridurre l'impatto della disomogeneità sui risultati sperimentali.

## 5. Conclusioni e sviluppi futuri

La tesi tratta una problematica cruciale nell'ambito della metrologia: l'influenza dell'effetto di creep nelle misure di durezza Brinell, Vickers e Knoop.

A tal proposito l'obiettivo finale è quello di analizzare l'effetto del tempo di mantenimento della forza di carico (dwell time) nelle misure di durezza BVK. Durante l'analisi sono stati determinati i coefficienti di sensibilità, che descrivono la variazione della durezza in funzione del dwell time, le relative incertezze ed è stata sottolineata l'importanza della disomogeneità dei provini utilizzati.

L'analisi è stata eseguita su 34 configurazioni sperimentali differenti caratterizzate da: scale Brinell Vickers e Knoop, materiali con diversi livelli di durezza e carichi applicati variabili. Per calcolare i coefficienti di sensibilità e le incertezze è stato implementato il metodo Monte Carlo tramite il software MATLAB. Questo approccio ha permesso di generare molteplici iterazioni per ogni configurazione, propagando i contributi derivanti dalla variabilità dei dati sperimentali e dalle distribuzioni probabilistiche associate alle variabili. I dati sperimentali sono stati raccolti utilizzando macchine campione primario (durometro PHS DW & PRIMARY e MHSM) e strumenti avanzati come il microdurometro Galileo DG 901. Dall'analisi condotta è risultato piuttosto evidente come diversi fattori influenzino i risultati delle prove, tra cui: il fenomeno del creep, la disomogeneità dei provini, l'accuratezza e la precisione degli strumenti utilizzati. Questi aspetti sono particolarmente rilevanti nel contesto industriale e metrologico, dove è essenziale garantire misurazioni accurate e riferibili per soddisfare gli standard internazionali.

Le misurazioni di durezza, infatti, sono fondamentali per caratterizzare le proprietà meccaniche dei materiali, influenzando direttamente la sicurezza e l'affidabilità di strutture e componenti. Per tale ragione lo studio in questione ambisce a proporre raccomandazioni per migliorare la standardizzazione delle procedure di misura, ridurre l'incertezza complessiva e garantire una maggiore riferibilità delle misurazioni.

Il seguente lavoro di tesi ha dimostrato che il tempo di mantenimento del carico (dwell time) può influenzare significativamente le misurazioni di durezza in configurazioni specifiche. In particolare, per materiali molto duri e carichi elevati (es. 700 HBW 2,5/187,5), il dwell time è un parametro critico a causa del fenomeno del creep. In queste configurazioni, i coefficienti di sensibilità sono negativi e statisticamente significativi ( $p$ -value < 20 %), confermando una diminuzione della durezza con l'aumentare del tempo. Viceversa, per materiali più morbidi o scale con carichi bassi (es. HV0,2), l'effetto del dwell time è trascurabile rispetto alla

disomogeneità dei provini. In questi casi, i  $p$ -value elevati ( $>20\%$ ) indicano che non è possibile distinguere l'influenza del dwell time dal rumore sperimentale.

I risultati ottenuti mostrano, inoltre, l'importanza della qualità dei provini presi in considerazione. La disomogeneità è stata considerata come un fattore dominante in molte configurazioni, rendendo difficile isolare gli effetti del dwell time. Ad esempio, per la scala HV0,2 lo scarto tipo della disomogeneità raggiunge il  $5\%$ , mentre per scale come 600 HB lo scarto tipo è inferiore allo  $0,3\%$ , andando ad evidenziare una maggiore stabilità.

Il metodo Monte Carlo si è rivelato uno strumento efficace per stimare le incertezze associate ai coefficienti di sensibilità, che rispetto ai metodi tradizionali, basati su regressioni lineari semplici (es. Excel), ha permesso di considerare tutte le fonti di incertezza e di propagarle correttamente attraverso il modello matematico.

Tra i punti di forza di questo studio vi è sicuramente l'utilizzo di strumenti campioni dell'INRiM che garantiscono una raccolta dati precisa e controllata.

Ciò nonostante, alla luce dei risultati ottenuti, gli sviluppi futuri di questa ricerca potrebbero concentrarsi sull'ottimizzazione delle condizioni di prova per ridurre le disomogeneità riscontrate, nonché sull'applicazione di modelli avanzati di simulazione Monte Carlo per affinare l'analisi dell'incertezza.

La disomogeneità dei provini rappresenta una delle principali limitazioni emerse durante l'analisi. Studi futuri dovrebbero concentrarsi sul miglioramento dei processi produttivi dei provini standardizzati per ridurre la variabilità intrinseca.

Lo sviluppo di algoritmi più efficienti per l'elaborazione Monte Carlo, inoltre, potrebbe ridurre i tempi computazionali e migliorare la gestione dei dati per effettuare un'analisi più efficiente. Si potrebbe ulteriormente ampliare lo studio esaminando più configurazioni, includendo una gamma più ampia di materiali, scale e dwell time maggiori per generalizzare i risultati.

Il fenomeno del creep, infatti, potrebbe essere analizzato in modo più approfondito attraverso prove a lungo termine, che includano tempi di mantenimento superiori a quelli analizzati nella tesi; ciò permetterebbe di modellare meglio il comportamento dei materiali sotto carico prolungato.

Si può, infine, pensare di ampliare lo studio valutando l'andamento dei coefficienti di sensibilità ottenuti in funzione della durezza.

Tutti i possibili sviluppi futuri proposti aspirano a migliorare ulteriormente l'accuratezza e la riferibilità delle misure, contribuendo alla standardizzazione internazionale nel campo della metrologia meccanica.

I risultati ottenuti, infatti, hanno particolare importanza per raggiungere l'obiettivo del progetto di partenza, ovvero, raggiungere la standardizzazione internazionale delle misure di durezza. Potrebbero, pertanto, essere utilizzati come base per proporre aggiornamenti alle normative internazionali sulle misurazioni di durezza (Brinell, Vickers, Knoop) e collaborazioni con enti metrologici internazionali come il CCM-BIPM, garantendo una maggiore coerenza tra laboratori.

In conclusione, questa tesi definisce un passo avanti significativo nella comprensione dell'influenza del dwell time sulle misurazioni di durezza e nell'applicazione del metodo Monte Carlo per la stima delle incertezze metrologiche.

## Bibliografia e sitografia

- [1] <https://www.inrim.it/it>
- [2] Kuzu, Cihan, Alessandro Germak, Febo Menelao, Anton Štibler, Gianfranco Genta, Moritz Loewit, Jiří Borovský, et al. «Traceability for Indentation Measurements in Brinell-Vickers-Knoop Hardness». *Measurement: Sensors*, dicembre 2024.
- [3] [https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/TAM\\_2011\\_IT.pdf](https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/TAM_2011_IT.pdf)
- [4] Rizza, Pierluigi, Andrea Prato, Renato R. Machado, e Alessandro Germak. «The Role of Influence Coefficients in Hardness Measurements: A Case Study in Rockwell Hardness Measurements». *Measurement* 213 (Maggio 2023).  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023>.
- [5] PHS DW & PRIMARY The Hardness Standardization Machine - User's Guide - January 2009 Edition
- [6] Broitman, Esteban. «Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview». *Tribology Letters* 65, fasc. 1 (marzo 2017): 23.  
<https://doi.org/10.1007/s11249-016-0805-5>.
- [7] JCGM 100: 2008 (GUM 1995 with minor corrections), Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement
- [8] ISO 6507-1:2018. Metallic materials — Vickers hardness test - Part 1: Test method
- [9] ISO 6507-2:2018. Metallic materials — Vickers hardness test - Part 2: Verification and calibration of testing machines
- [10] ISO 6507-3:2018. Metallic materials — Vickers hardness test - Part 3: Calibration of reference blocks
- [11] ISO 6506-1:2014. Metallic materials — Brinell hardness test - Part 1: Test method
- [12] ISO 6506-2:2014. Metallic materials — Brinell hardness test - Part 2: Verification and calibration of testing machines
- [13] ISO 6506-3:2014. Metallic materials — Brinell hardness test - Part 3: Calibration of reference blocks
- [14] ISO 4545-1:2017. Metallic materials — Knoop hardness test - Part 1: Test method
- [15] ISO 4545-2:2017. Metallic materials — Knoop hardness test - Part 2: Verification and calibration of testing machines
- [16] ISO 4545-3:2017. Metallic materials — Knoop hardness test - Part 3: Calibration of reference blocks

- [17] EURAMET cg-16 Ver. 2.0, Guidelines on the Estimation of Uncertainty in Hardness Measurements, 2011
- [18] Gabauer, W. Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials, The Estimation of Uncertainties in Hardness Measurements, Project, No. SMT4-CT97-2165, UNCERT COP 14: 2000
- [19] VIM. International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms, VIM, 3rd edition (2008 version with minor corrections), JCGM 200: 2012
- [20] Giulio Barbato - Alessandro Germak - Gianfranco Genta. *Misurare per decidere*, s.d.
- [21] <https://link.springer.com/article/10.1007/s00769-003-0690-0>
- [22] <https://www.bipm.org/en/home>
- [23] <https://www.samatools.it/Incertezza-di-misura>
- [24] "Creep and Stress Rupture" (PDF). *NC State University*. 2017-03-29.
- [25] Tanaka, Yukimi, Koichiro Hattori, e Masahiro Yoshioka. «Determining the Sensitivity Coefficients of Factors Contributing to Rockwell Hardness for Uncertainty Evaluation».
- [26] MHSM - The Micro Hardness Standardization Machine - User's Guide - February 2023 Edition

# Appendice A – Dati Sperimentali

## A.1 Tabelle misure scala Brinell

### Acciaio

SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	ZONA (considera mo tutte impronte vicine)	TEMPO MANTENIMENTO impostato	VELOCITA' di discesa impostata	Dwell time dal grafico	ID impronta	Ta [s]	Tdl [s]	Va [mm/s]	Vial [mm/s]	ID misura	d1	d2	d [um]	HB		
HBW 2,5/31,25	5	100	foto blocco x zona impronte ovale lato 5	5s	0,05 mm/s	6,9	1	6,31	4,75	109,70	11,30	2	668,731	667,7420	668,2365	87,496		
				10s	0,05 mm/s	11,6	2	6,5	9,75	109,5	11,4	3	665,373	673,191	669,282	87,217		
				13s	0,05 mm/s	14,8	3	6,31	12,69	109,8	11,5	5	671,041	669,217	670,129	86,993		
				15s	0,05 mm/s	16,6	4	6	14,69	109,7	11,1	8	668,789	669,332	669,0605	87,276		
				20s	0,05 mm/s	22,2	5	6,2	19,69	87,5	11,4	11	672,998	674,051	673,5245	86,101		
				50s	0,05 mm/s	52,4	6	6	49,62	86,6	11,5	14	670,364	687,834	679,099	84,666		
		300	foto blocco x zona impronte ovale lato 5	5s	0,05 mm/s	6,1	1	5,70	4,7	5,70	4,7	67,8	6,5	5	392,444	390,486	391,465	258,076
				10s	0,05 mm/s	11,4	2	5,7	9,62	77,3	6,5	2	392,71	392,022	392,366	256,884		
				13s	0,05 mm/s	14,8	3	5,6	12,69	82,9	6,5	3	392,977	393,146	393,0615	255,971		
				15s	0,05 mm/s	16,7	4	5,9	14,69	93,7	6,5	15	393,101	392,635	392,868	256,224		
				20s	0,05 mm/s	21,5	5	6	19,62	83,2	6,5	11	393,666	392,885	393,2755	255,691		
				50s	0,05 mm/s	51,6	6	5,7	49,56	87	6,6	13	394,379	393,914	394,1465	254,554		
		500	foto blocco x zona impronte ovale lato 5	5s	0,05 mm/s	6,4	1	5,6	4,69	4,69	4,69	79,9	5,6	2	309,083	308,948	309,0155	415,137
				10s	0,05 mm/s	11,6	2	5,5	9,62	77,3	5,5	4	309,717	310,268	309,9925	412,515		
				13s	0,05 mm/s	14,7	3	5,5	12,62	88,3	5,5	6	309,589	309,873	309,731	413,214		
				15s	0,05 mm/s	16,6	4	5,5	14,69	77,9	5,5	14	308,268	309,08	308,674	416,059		
				20s	0,05 mm/s	21,8	5	5,9	19,75	73,8	5,4	9	308,529	309,198	308,8635	415,546		
				50s	0,05 mm/s	51,1	6	5,6	49,62	75	5,5	12	309,988	310,271	310,1295	412,149		
		700	foto blocco x zona impronte ovale lato 5	5s	0,05 mm/s	6,6	1	5,63	4,62	4,62	4,62	109,00	5,30	1	267,789	269,531765	268,660383	549,86792
				10s	0,05 mm/s	12,2	2	6	9,69	108,9	5	2	266,359	267,807865	267,083433	556,419501		
13s	0,05 mm/s			14,8	3	5,69	13	108,8	5	3	266,209	269,359375	267,784188	553,502792				
15s	0,05 mm/s			16,8	4	5,5	15,06	109,20	4,90	4	270,089	267,807865	268,948433	548,707237				
20s	0,05 mm/s			22,1	5	5,81	20,06	109,30	5,00	5	271,81	269,979979	270,89499	540,826997				
50s	0,05 mm/s			51,7	6	5,69	50	109,3	5	6	271,459	270,82469	271,141845	539,83976				

		HBW 2,5/62,5										10									
<b>100</b>	foto blocco x zona impronte ovale lato 10	5s	0,05 mm/s	5,9	1	8,06	4,94	109,40	11,20	1	910,124	904,488	907,306	93,37							
		10s	0,05 mm/s	10,6	2	8	10	109,1	11	5	920,49	915,606	918,048	91,11							
		13s	0,05 mm/s	13,6	3	7,88	12,94	109,4	11,1	7	922,88	913,863	918,3715	91,052							
		15s	0,05 mm/s	15,6	4	7,94	15	109,5	11,1	11	921,244	915,664	918,454	91,035							
		20s	0,05 mm/s	20,7	5	7,94	19,94	109,4	10,8	13	924,569	919,115	921,842	90,342							
		50s	0,05 mm/s	50,5	6	8	49,94	92	11,1	16	926,922	921,744	924,333	89,837							
<b>300</b>	foto blocco x zona impronte ovale lato 10	5s	0,05 mm/s	6	1	7,44	5	109,5	6,1	2	539,214	538,628	538,921	270,765							
		10s	0,05 mm/s	10,6	2	7,45	10	88,7	6,1	4	540,165	540,115	540,14	269,53							
		13s	0,05 mm/s	13,6	3	7,2	13	105,4	6	7	540,239	540,005	540,122	269,548							
		15s	0,05 mm/s	15,8	4	7,2	15	95,4	6	9	540,907	540,088	540,4975	269,169							
		20s	0,05 mm/s	20,9	5	7,15	19,94	85,4	6,1	11	541,932	542,101	542,0165	267,644							
		50s	0,05 mm/s	50,8	6	7,2	50	81,5	6,1	14	543,153	542,284	542,7185	266,944							
<b>500</b>	foto blocco x zona impronte ovale lato 10	5s	0,05 mm/s	5,8	1	7,25	5,00	109,6	4,9	2	421,085	420,208	420,6465	446,517							
		10s	0,05 mm/s	11	2	7,19	9,94	109,7	4,8	4	421,492	420,437	420,9645	445,637							
		13s	0,05 mm/s	14,4	3	7,4	13	107,6	4,8	6	421,692	420,608	421,15	445,442							
		15s	0,05 mm/s	15,8	4	7,13	14,94	109,5	4,8	9	423,656	419,84	421,748	444,17							
		20s	0,05 mm/s	20,8	5	7,19	20	109,7	4,8	11	423,799	419,786	421,7925	444,076							
		50s	0,05 mm/s	50,8	6	7,13	50	109,8	4,8	13	424,874	420,839	422,8565	441,327							
<b>700</b>	foto blocco x zona impronte ovale lato 10	5s	0,05 mm/s	5,8	1	7,13	5	109,20	4,40	2	362,578	360,486	361,532	605,616							
		10s	0,05 mm/s	11,1	2	7,19	10	109,4	4,3	6	362,545	362,219	362,382	602,762							
		13s	0,05 mm/s	13,7	3	7,06	13	109,5	4,4	9	363,372	363,085	363,2265	599,941							
		15s	0,05 mm/s	15,7	4	7,12	15	109,50	4,30	11	364,77	364,32	364,545	595,593							
		20s	0,05 mm/s	20,75	5	7,06	20	109,40	4,30	14	363,639	363,921	363,78	598,115							
		50s	0,05 mm/s	50,6	6	7,13	49,94	109,6	4,4	18	364,506	362,837	363,6715	598,472							

HBW 2,5/187,5		30		300		500		700				
5s	0,16 mm/s	foto 1	1	6,38	5,5	108,8	16,5	2	898,172	897,457	897,8145	286,329
10s	0,16 mm/s	foto 2	2	6,38	10,38	109	16,3	4	899,932	899,961	899,9465	284,925
13s	0,16 mm/s	foto 3	3	6,38	13,31	109,1	16,4	12	898,63	899,259	898,9445	285,583
15s	0,16 mm/s	foto 4	4	6,38	15,31	109,2	16,2	13	900,903	901,539	901,221	284,091
20s	0,16 mm/s	foto 5	5	6,38	20,31	109,4	16,4	19	900,877	901,155	901,016	284,225
50s	0,16 mm/s	foto 6	6	6,38	50,38	109,3	16,4	23	906,214	904,029	905,1215	281,56
5s	0,16 mm/s	foto 1	1	6,25	5,50	109,4	12,5	1	690,852	691,582	691,217	489,998
10s	0,16 mm/s	foto 2	2	6,25	10,38	109,5	12,4	2	692,042	692,785	692,4135	488,271
13s	0,16 mm/s	foto 3	3	6,19	13,38	109,5	12,5	3	692,998	693,537	693,2675	487,044
15s	0,16 mm/s	foto 4	4	6,25	15,38	109,5	12,4	4	692,469	693,617	693,043	487,366
20s	0,16 mm/s	foto 5	5	6,25	20,38	109,7	12,5	8	693,704	691,613	692,6585	487,919
50s	0,16 mm/s	foto 6	6	6,19	50,25	109,5	12,4	6	695,213	691,404	693,3085	486,985
5s	0,16 mm/s	foto 1	1	6,19	5,5	109,50	11,00	1	589,96	590,723	590,3415	675,429
10s	0,16 mm/s	foto 2	2	6,19	10,38	109,8	10,8	4	591,277	591,626	591,4515	672,86
13s	0,16 mm/s	foto 3	3	6,19	13,44	109,7	10,8	6	591,464	592,005	591,7945	672,207
15s	0,16 mm/s	foto 4	4	6,13	15,31	109,70	10,80	8	591,977	592,27	592,1235	671,31
20s	0,16 mm/s	foto 5	5	6,13	20,25	109,70	10,80	10	593,152	592,036	592,594	670,229
50s	0,16 mm/s	foto 6	6	6,14	50,3	109,8	10,8	11	593,913	593,885	593,899	667,244

# Ottone

SCALA	INDICE	MATERIALE	LIVELLO DUREZZA	ZONA (consideriam o tutte impronte vicine)	TEMPO MANTENIM ENTO Impostato	VELOCITA' DIDISCESA impostato	Dwell time dal grafico (delta)	ID impronta	Ta [s]	Td [s]	Va [mm/s]	Vfal [mm/s]	ID misura	d1	d2	d [um]	HB
HBW 2,5/31,25	5	OTTONE	30T 62	foto blocco x zona impronte ovale lato 5	5s	0,05 mm/s	6,8	1	6,00	5,25	109,5	11	1	600,238	604,52	602,379	106,053
					10s	0,05 mm/s	11,6	2	5,94	10,12	109,5	11	5	602,667	602,799	602,733	107,924
					13s	0,05 mm/s	14,6	3	5,94	13,19	109,8	11,3	7	604,736	605,939	605,338	106,983
					15s	0,05 mm/s	17,2	4	6,13	15,19	9,7	11	8	603,226	596,138	600,682	106,673
					20s	0,05 mm/s	21,8	5	5,94	20,12	109,6	11,1	16	603,651	601,3	602,476	108,017
					50s	0,05 mm/s	51,7	6	5,94	50,12	110	11,1	18	605,98	605,437	605,709	106,85
HBW 2,5/62,5	10	OTTONE	30T 62	foto blocco x zona impronte ovale lato 10	5s	0,06 mm/s	5,6	1	6,62	5,12	109,4	12,6	3	822,12	823,807	822,964	114,22
					10s	0,06 mm/s	10,8	2	6,63	10,12	109,3	12,6	6	825,098	824,376	824,737	113,715
					13s	0,06 mm/s	13,7	3	6,63	13,06	109,6	12,8	7	819,765	824,741	822,253	114,424
					15s	0,06 mm/s	15,6	4	6,63	15,06	109,6	12,6	10	827,31	821,955	824,633	113,745
					20s	0,06 mm/s	20,4	5	6,63	20,06	109,7	12,6	12	820,596	822,561	821,579	114,617
					50s	0,06 mm/s	50,2	6	6,63	50,12	109,8	12,6	15	823,487	822,746	823,117	114,177
HBW 2,5/187,5	30	OTTONE	30T 62	foto blocco x zona impronte ovale lato 30	5s	0,16 mm/s	foto 1	1	6,94	5,5	109,7	30,7	1	1376,873	1349,479	1363,176	118,098
					10s	0,16 mm/s	foto 2	2	6,88	10,31	109,7	30,8	2	1368,538	1374,357	1371,448	116,541
					13s	0,16 mm/s	foto 3	3	6,94	13,38	109,2	30,6	3	1364,183	1356,326	1360,255	118,655
					15s	0,16 mm/s	foto 4	4	6,94	15,44	109,3	30,5	9	1359,744	1352,772	1356,258	119,423
					20s	0,16 mm/s	foto 5	5	6,94	20,31	109,4	30,6	5	1364,396	1363,186	1363,791	117,982
					50s	0,16 mm/s	foto 6	6	6,94	50,31	109,4	31	7	1353,638	1348,532	1351,085	120,426

## A.2 Tabelle misure scala Vickers

### Acciaio

SCALA	MATERIALE	LIVELLO DUREZZA	ZONA (consideriamo tutte impronte vicine)	TEMPO MANTENIMENTO impostato	VELOCITA' di discesa impostata	ID impronta	Va [ $\mu\text{m/s}$ ]	Ta [s]	Tdf [s]	d1 (orizzontale)	d2 (verticale)	d [ $\mu\text{m}$ ]	HV
HV 0.2	ACCIAIO	100	foto blocco x zona impronte (lato +)	5s	0,003 mm/s	# 2	5,72	7,77	5,62	59,994	60,393	60,1935	102,29
				10s	0,003 mm/s	# 3	5,66	7,63	10,63	60,124	60,649	60,3865	101,637
				13s	0,003 mm/s	# 4	5,65	7,7	13,63	62,986	60,865	61,9255	96,649
				15s	0,003 mm/s	# 5	5,67	7,69	15,63	61,652	59,156	60,404	101,578
				20s	0,003 mm/s	# 6	5,63	7,65	20,62	58,282	58,668	58,475	108,392
				50s	0,003 mm/s	# 7	5,73	7,69	50,62	58,269	57,208	57,7985	111,172
				5s	0,003 mm/s	# 2	5,64	6,63	5,62	36,555	36,413	36,484	278,439
		10s	0,003 mm/s	# 3	5,67	6,62	10,62	35,713	35,616	35,6645	291,376		
		13s	0,003 mm/s	# 4	5,68	6,7	13,62	35,759	35,773	35,766	289,729		
		15s	0,003 mm/s	# 5	5,67	6,69	15,63	35,315	35,037	35,176	299,527		
		20s	0,003 mm/s	# 6	5,65	6,72	20,62	36,31	35,694	36,002	285,944		
		50s	0,003 mm/s	# 7	5,67	6,79	50,63	35,776	35,452	35,614	292,207		
		5s	0,003 mm/s	# 4	5,65	6,60	5,63	27,007	27,184	27,0955	504,821		
		10s	0,003 mm/s	# 5	5,71	6,70	10,63	27,048	27,118	27,083	505,291		
13s	0,003 mm/s	# 6	5,65	6,54	13,63	26,963	27,135	27,049	506,566				
15s	0,003 mm/s	# 7	5,67	6,62	15,62	26,946	26,7	26,823	515,135				
20s	0,003 mm/s	# 8	5,67	6,52	20,62	27,193	26,64	26,9165	511,551				
50s	0,003 mm/s	# 9	5,67	6,54	50,63	27,079	26,818	26,9485	510,328				
5s	0,003 mm/s	# 1	5,73	6,5	5,64	22,372	22,237	22,3045	744,988				
10s	0,003 mm/s	# 2	5,67	6,33	10,62	22,59	22,297	22,4435	735,797				
13s	0,003 mm/s	# 3	5,69	6,35	13,62	22,187	22,118	22,1525	755,235				
15s	0,003 mm/s	# 4	5,63	6,38	15,62	22,815	22,659	22,737	716,906				
20s	0,003 mm/s	# 5	5,64	6,39	20,64	22,584	22,371	22,4775	733,552				
50s	0,003 mm/s	# 6	5,69	6,47	50,62	22,667	22,553	22,61	724,979				

SCALA	MATERIALE	LIVELLO DUREZZA	ZONA (consideriamo tutte impronte vicine)	TEMPO MANTENIMENTO impostato	VELOCITA' di discesa impostata	Va [ $\mu\text{m/s}$ ]	Ta [s]	Tdf [s]	d1 (orizzontale)	d2 (verticale)	d [ $\mu\text{m}$ ]	HV
HV 1	ACCIAIO	100	foto blocco x zona impronte (lato -)	5s	0,012 mm/s	14,13	7,21	5,60	133,548	136,530	135,039	101,694
				10s	0,012 mm/s	14,07	7,22	10,61	136,121	135,951	136,036	100,208
				13s	0,012 mm/s	13,94	7,17	13,61	138,069	131,892	134,981	101,781
				15s	0,012 mm/s	14,02	7,18	15,61	132,434	135,155	133,795	103,594
				20s	0,012 mm/s	14,04	7,21	20,61	134,278	136,65	135,464	101,056
				50s	0,012 mm/s	14,32	7,27	50,61	136,709	136,927	136,818	99,066
		300	foto blocco x zona impronte (lato -)	5s	0,012 mm/s	14,10	6,86	5,63	79,305	79,042	79,1735	295,837
				10s	0,012 mm/s	14,14	6,86	10,61	78,904	79,05	78,977	297,312
				13s	0,012 mm/s	14,15	6,88	13,62	79,047	78,9	78,9735	297,337
				15s	0,012 mm/s	14,27	6,77	15,62	80,048	79,366	79,707	291,892
				20s	0,012 mm/s	14,07	6,77	20,63	79,325	79,665	79,495	293,446
				50s	0,012 mm/s	13,9	6,73	50,62	79,314	78,74	79,027	296,933
		500	foto blocco x zona impronte (lato -)	5s	0,011 mm/s	14,44	7,20	5,61	59,717	59,887	59,802	518,544
				10s	0,011 mm/s	13,99	7,20	10,61	60,147	60,093	60,120	513,063
				13s	0,011 mm/s	14,14	7,18	13,61	60,242	60,677	60,460	507,314
				15s	0,011 mm/s	14,01	7,16	15,61	60,108	60,25	60,179	512,056
				20s	0,011 mm/s	14,32	7,16	20,60	60,179	60,371	60,275	510,424
				50s	0,011 mm/s	14,04	7,12	50,60	60,467	60,24	60,354	509,099
		700	foto blocco x zona impronte (lato -)	10s (#2)	0,011 mm/s	14,35	7,08	10,61	50,103	50,258	50,1805	736,454
				13s (#4)	0,011 mm/s	13,99	7,02	13,61	50,054	50,255	50,1545	737,218
				15s (#5)	0,011 mm/s	13,93	7,02	15,60	50,527	50,569	50,548	725,774
20s (#6)	0,011 mm/s			14,21	7,28	20,61	50,842	50,893	50,8675	716,689		
50s (#7)	0,011 mm/s			14,12	7,16	50,61	51,214	51,071	51,1425	709,01		

# Rame

MATERIALE	LIVELLO DUREZZA	SCALA	ZONA (considera mo tutte impronte vicine)	TEMPO MANTENIME NTO impostato	VELOCITA' di discesa impostata	ID impronta	Va	Ta (s)	Tdf	d1 (orizzontale )	d2 (verticale)	d (um)	HV
RAME	40	HV0,2	lato +	5s	0,005 mm/s	#1 (file 05/11)	5,7	7,49	5,35	94,941	96,363	95,652	40,508
				10s	0,005 mm/s	#3 (file 05/11)	5,68	7,42	10,34	94,44	94,701	94,5705	41,44
				13s	0,005 mm/s	#5 (#1 del file 06/11)	5,72	7,44	13,33	95,217	96,521	95,869	40,325
				15s	0,005 mm/s	#6 (#2 del file 06/11)	5,66	6,73	15,38	98,541	100	99,2705	37,609
				20s	0,005 mm/s	#8 (#3 del file 06/11)	5,745	6,66	20,35	103,233	94,096	98,6645	38,072
				50s	0,005 mm/s	#9 (#4 del file 06/11)	5,71	6,77	50,34	98,67	97,117	97,8935	38,674



HK 0.2	ACCIAIO	100	Rettangolo blu (lato +)	#1	5	5,53	1	156,051	116,845
							3	156,022	116,889
				#3	10	10,86	4	151,587	123,829
							5	151,371	124,182
				#4	13	13,58	7	163,985	105,812
							8	163,844	105,995
				#6	15	15,45	2	163,044	107,037
							3	163,364	106,618
				#8	20	20,48	9	157,994	113,989
							10	157,938	114,070
				#9	50	50,58	11	160,154	110,935
							12	160,376	110,628
300	Rettangolo blu (lato +)	#1	5	5,51	1	94,105	321,307		
					2	94,153	320,979		
		#2	10	10,56	5	95,04	315,016		
					6	95,07	314,817		
		#4	13	13,63	7	96,231	307,266		
					8	96,289	307,024		
		#5	15	15,36	12	95,685	310,783		
					13	95,658	310,958		
		#6	20	20,28	1	94,667	317,503		
					2	94,677	317,436		
					6	94,75	316,947		
					7	94,78	316,746		
500	Rettangolo blu (lato +)	#1	5	5,36	3	73,466	527,196		
					4	73,478	527,024		
		#2	10	10,38	6	73,22	530,745		
					7	73,288	530,049		
		#3	13	13,06	9	74,026	519,250		
					10	74,04	519,054		
		#5	15	15,08	12	74,024	519,278		
					16	74,061	518,759		
		#6	20	20,35	20	74,675	510,264		
					22	74,675	510,264		
					24	74,277	515,747		
					25	74,214	516,623		
700	Rettangolo blu (lato +)	#1	5	5,58	6	63,807	698,889		
					7	63,895	696,965		
		#2	10	10,36	26	62,799	721,505		
					27	62,766	722,264		
		#3	13	13,41	29	62,801	721,459		
					31	62,844	720,472		
		#4	15	15,34	15	63,036	716,090		
					17	63,088	714,910		
		#5	20	20,37	20	63,809	698,845		
					21	63,838	698,211		
					10	63,11	714,412		
					12	63,186	712,694		

## Rame

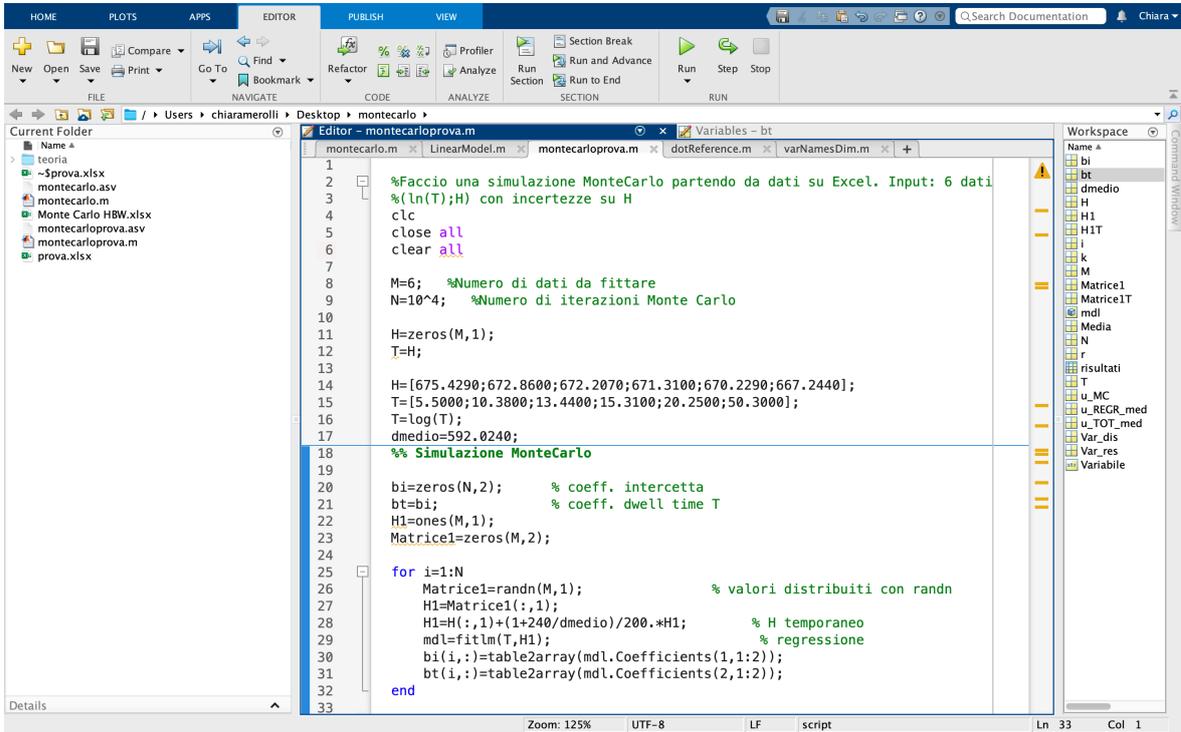
SCALA	MATERIALE	LIVELLO DUREZZA	ZONA (consideriamo tutte impronte vicine)	ID impronta	Dwell Time "impostato" [s]	Dwell Time effettivo [s] *	ID misura	d maggiore [um]	HK
HK2	RAME	40	rettangolo blu lato +	#1	5	5,55	1	900,66	35,08
				#2	10	10,4	2	902,76	34,92
				#3	13	13,58	3	897,71	35,31
				#4	15	15,41	4	898,15	35,28
				#5	20	20,35	6	893,35	35,66
				#6	50	50,05	7	917,54	33,80

## Ottone

SCALA	MATERIALE	LIVELLO DUREZZA	ZONA (consideriamo tutte impronte vicine)	ID impronta	Dwell Time "impostato" [s]	Dwell Time effettivo [s] *	ID misura	d maggiore [um]	HK
HK2	OTTONE	100	rettangolo blu lato +	#1	5	5,34	5	510,356	109,26
				#2	10	10,48	7	513,1	108,10
				#3	13	13,03	12	513,193	108,06
				#4	15	15,5	15	510,256	109,30
				#5	20	20,35	22	512,013	108,55
				#6	50	50,36	1	514,436	107,53

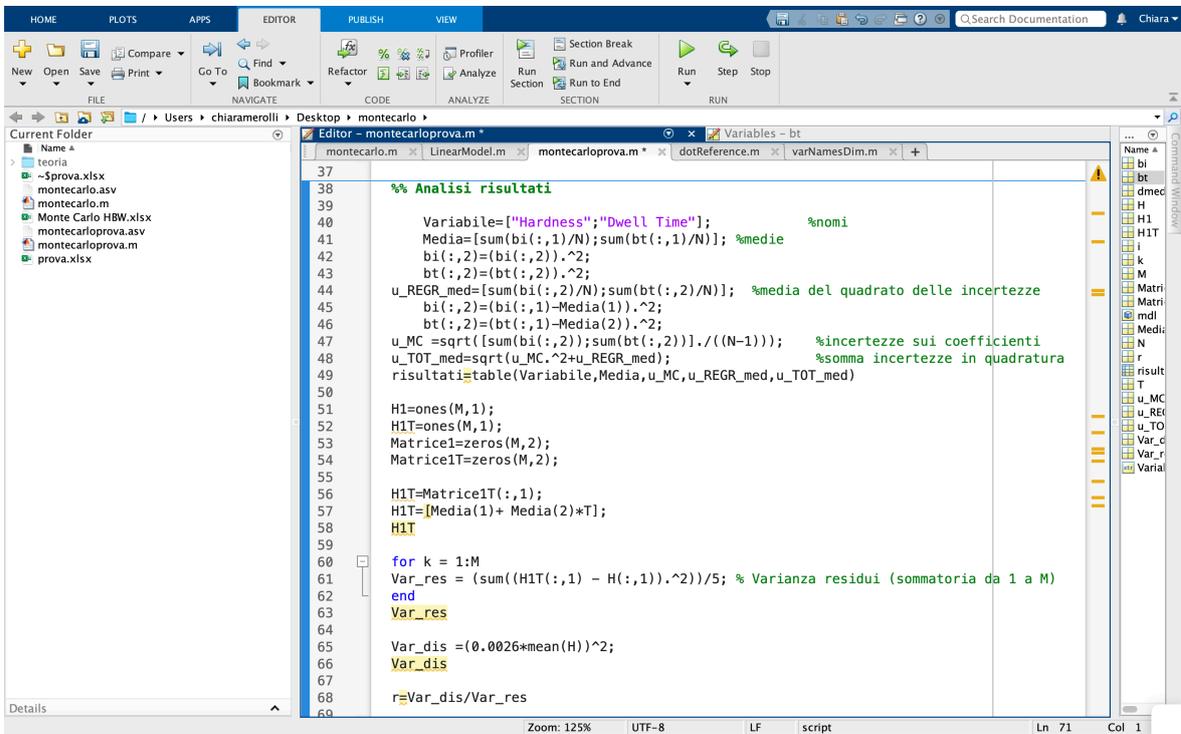
## Appendice B – Codice Matlab

### B.1 Script Matlab per simulazione Monte Carlo



```
1
2 %Faccio una simulazione MonteCarlo partendo da dati su Excel. Input: 6 dati
3 %(\ln(T);H) con incertezze su H
4 clc
5 close all
6 clear all
7
8 M=6; %Numero di dati da fittare
9 N=10^4; %Numero di iterazioni Monte Carlo
10
11 H=zeros(M,1);
12 T=H;
13
14 H=[675.4290;672.8600;672.2070;671.3100;670.2290;667.2440];
15 T=[5.5000;10.3800;13.4400;15.3100;20.2500;50.3000];
16 T=log(T);
17 dmedio=592.0240;
18
19 %% Simulazione MonteCarlo
20
21 bi=zeros(N,2); % coeff. intercetta
22 bt=bi; % coeff. dwell time T
23 H1=ones(M,1);
24 Matrice1=zeros(M,2);
25
26 for i=1:N
27     Matrice1=randn(M,1); % valori distribuiti con randn
28     H1=Matrice1(:,1);
29     H1=H(:,1)+(1+240/dmedio)/200.*H1; % H temporaneo
30     mdl=fitlm(T,H1); % regressione
31     bi(i,:)=table2array(mdl.Coefficients(1,1:2));
32     bt(i,:)=table2array(mdl.Coefficients(2,1:2));
33 end
```

### B.2 Script Matlab per analisi risultati



```
37
38 %% Analisi risultati
39
40 Variabile=["Hardness";"Dwell Time"]; %nomi
41 Media=[sum(bi(:,1)/N);sum(bt(:,1)/N)]; %medie
42 bi(:,2)=(bi(:,2)).^2;
43 bt(:,2)=(bt(:,2)).^2;
44 u_REGR_med=[sum(bi(:,2)/N);sum(bt(:,2)/N)]; %media del quadrato delle incertezze
45 bi(:,2)=(bi(:,2)-Media(1)).^2;
46 bt(:,2)=(bt(:,2)-Media(2)).^2;
47 u_MC=sqrt([sum(bi(:,2));sum(bt(:,2))]/(N-1)); %incertezze sui coefficienti
48 u_TOT_med=sqrt(u_MC.^2+u_REGR_med); %somma incertezze in quadratura
49 risultati=table(Variabile,Media,u_MC,u_REGR_med,u_TOT_med)
50
51 H1=ones(M,1);
52 H1T=ones(M,1);
53 Matrice1=zeros(M,2);
54 Matrice1T=zeros(M,2);
55
56 H1T=Matrice1T(:,1);
57 H1T=[Media(1)+ Media(2)*T];
58 H1T
59
60 for k = 1:M
61     Var_res = (sum((H1T(:,1) - H(:,1)).^2))/5; % Varianza residui (sommatoria da 1 a M)
62 end
63 Var_res
64
65 Var_dis=(0.0026*mean(H)).^2;
66 Var_dis
67
68 r=Var_dis/Var_res
69
```

# Appendice C – Risultati

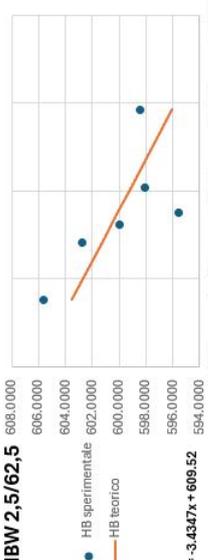
## C.1 Tabelle risultati scala Brinell

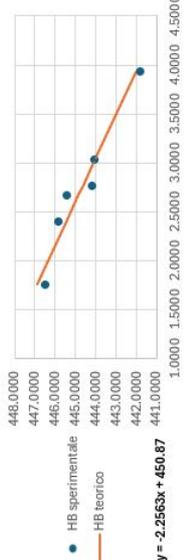
DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	d [µm]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HBW 2,5/187,5	30	700	5.5000	1.7047	590.3415	675.4290	675.3028	Hardness	681.6335	0.0120	0.3698	0.3700		
				10.3800	2.3399	591.4515	672.8600	672.9442	Dwell Time	-3.7136	0.0043	0.1322	0.1322		
				13.4400	2.5982	591.7345	672.2070	671.9848	<b>HBW 2,5/187,5</b> 						
				15.3100	2.7285	592.1235	671.3100	671.5010							
				20.2500	3.0082	592.5940	670.2290	670.4625							
				50.3000	3.9180	593.8990	667.2440	667.0838							
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [µm]	r	p-value							
(1+240/dmed)	0.26%	3.0486	0.0378	0.1322	0.2645	592.0240	80.6085	0.01%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	d [µm]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HBW 2,5/187,5	30	500	5.5000	1.7047	691.2170	489.9980	489.1476	Hardness	491.1971	0.0115	1.3362	1.3363		
				10.3800	2.3399	692.4135	488.2710	488.3841	Dwell Time	-1.2022	0.0041	0.4774	0.4774		
				13.3800	2.5938	693.2675	487.0440	488.0788	<b>HBW 2,5/187,5</b> 						
				15.3800	2.7331	693.0430	487.3660	487.9114							
				20.3800	3.0146	692.6585	487.9190	487.5729							
				50.2500	3.9170	693.3085	486.9850	486.4880							
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [µm]	r	p-value							
(1+240/dmed)	0.37%	3.2593	0.4942	0.4774	0.9548	692.6513	6.5951	2.95%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI				
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Td[s]	ln(Td)	d [µm]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med	
Acciaio	HBW 2,5/187,5	30	300	5.5000	1.7047	897.8145	286.3290	286.6000	Hardness	290.2229	0.0106	0.9691	0.9691	
				10.3800	2.3399	899.9465	284.9250	285.2502	Dwell Time	-2.1252	0.0038	0.3464	0.3464	
				13.3100	2.5885	898.9445	285.5830	284.7218	<b>HBW 2,5/187,5</b>  $y = -2.1252x + 290.22$					
				15.3100	2.7285	901.2210	284.0910	284.4243						
				20.3100	3.0111	901.0160	284.2250	283.8237						
50.3800	3.9196	905.1215	281.5600	281.8930										
<b>cmc</b>	<b>% Dis</b>	<b>Var_Dis</b>	<b>Var_Res</b>	<b>u(c)</b>	<b>U(c)</b>	<b>dmed [µm]</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>						
(1+240/dmed)	0.51%	2.1045	0.2608	0.3464	0.6929	900.6773	8.0704	1.94%						

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI				
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Td[s]	ln(Td)	d [µm]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med	
Acciaio	HBW 2,5/187,5	30	100	5.5600	1.7156	1444.5000	103.9407	103.8672	Hardness	107.3721	0.0100	0.6396	0.6396	
				10.3100	2.3331	1450.0000	103.0649	102.6056	Dwell Time	-2.0430	0.0036	0.2286	0.2286	
				13.3800	2.5938	1457.0000	101.9644	102.0731	<b>HBW 2,5/187,5</b>  $y = -2.0430x + 107.37$					
				15.3800	2.7331	1460.5000	101.4200	101.7885						
				20.3100	3.0111	1464.0000	100.8794	101.2205						
50.1900	3.9158	1472.0000	99.6579	99.3722										
<b>cmc</b>	<b>% Dis</b>	<b>Var_Dis</b>	<b>Var_Res</b>	<b>u(c)</b>	<b>U(c)</b>	<b>dmed [µm]</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>						
(1+240/dmed)	0.62%	0.3985	0.1124	0.2286	0.4572	1458.0000	3.5458	9.55%						

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Tdl [s]	ln(Tdl)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HBW 2,5/62,5	10	700	5.8000	1.7579	361.5320	605.6160	603.4865	Hardness	609.5242	0.0147	5.1338	5.1338		
				11.1000	2.4069	362.3820	602.7620	601.2571	Dwell Time	-3.4347	0.0052	1.8167	1.8168		
				13.7000	2.6174	363.2285	599.9410	600.5342	<b>HBW 2,5/62,5</b>  $y = -3.4347x + 609.52$						
				15.7000	2.7537	364.5450	595.5930	600.0662							
				20.7500	3.0325	363.7800	598.1150	599.1083							
50.6000	3.9240	363.6715	598.4720	596.0466											
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value							
(1+240/dmed)	0.26%	2.4343	6.8061	1.8168	3.6335	363.1898	0.3577	85.82%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Tdl [s]	ln(Tdl)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HBW 2,5/62,5	10	500	5.8000	1.7579	420.6465	446.5170	446.9006	Hardness	450.8668	0.0136	0.8362	0.8363		
				11.0000	2.3979	420.9645	445.8370	445.4565	Dwell Time	-2.2563	0.0048	0.2950	0.2950		
				14.4000	2.6672	421.1500	445.4420	444.8488	<b>HBW 2,5/62,5</b>  $y = -2.2563x + 450.87$						
				15.8000	2.7600	421.7480	444.1700	444.6394							
				20.8000	3.0350	421.7925	444.0760	444.0191							
50.8000	3.9279	422.8565	441.8270	442.0044											
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value							
(1+240/dmed)	0.37%	2.7066	0.1798	0.2950	0.5900	421.5263	15.0551	0.49%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Td [s]	ln(Tdl)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HBW 2,5/62,5	10	300	6.0000	1.7918	538.9210	270.7650	270.7220	Hardness	274.0721	0.0128	0.7956	0.7957		
				10.6000	2.3609	540.1400	269.5300	269.6579	Dwell Time	-1.8697	0.0045	0.2816	0.2817		
				13.6000	2.6101	540.1220	269.5480	269.1919	<b>HBW 2,5/62,5</b> 						
				15.8000	2.7600	540.4975	269.1690	268.9116							
				20.9000	3.0397	542.0165	267.6440	268.3885							
50.8000	3.9279	542.7185	266.9440	266.7279											
<b>cmc</b>	<b>% Dis</b>	<b>Var_Dis</b>	<b>Var_Res</b>	<b>u(c)</b>	<b>U(c)</b>	<b>dmed [um]</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>							
(1+240/dmed)	0.51%	1.8812	0.1625	0.2817	0.5633	540.7359	11.5795	0.89%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Td [s]	ln(Tdl)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HBW 2,5/62,5	10	100	5.9000	1.7750	907.3060	93.3700	92.5889	Hardness	95.2803	0.0112	1.0431	1.0432		
				10.6000	2.3609	918.0480	91.1100	91.7006	Dwell Time	-1.5163	0.0040	0.3702	0.3702		
				13.6000	2.6101	918.3715	91.0520	91.3227	<b>HBW 2,5/62,5</b> 						
				15.6000	2.7473	918.4540	91.0350	91.1146							
				20.7000	3.0301	921.8420	90.3420	90.6857							
50.5000	3.9220	924.3330	89.8370	89.3335											
<b>cmc</b>	<b>% Dis</b>	<b>Var_Dis</b>	<b>Var_Res</b>	<b>u(c)</b>	<b>U(c)</b>	<b>dmed [um]</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>							
(1+240/dmed)	0.62%	0.3192	0.2820	0.3702	0.7404	918.0591	1.1318	44.76%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HBW 2,5/31,25	5	700	6.6000	1.8871	268.6604	549.8879	554.7527	Hardness	567.9522	0.0178	9.8925	9.8925		
				12.2000	2.5014	267.0834	556.4195	550.4554	Dwell Time	-6.9947	0.0061	3.4204	3.4204		
				14.8000	2.6946	267.7842	553.5028	549.1040	<b>HBW 2,5/31,25</b> 						
				16.8000	2.8214	268.9484	548.7072	548.2174							
				22.1000	3.0956	270.8950	540.8270	546.2995							
				51.7000	3.9455	271.1418	539.8398	540.3548							
<b>cmc</b>	<b>% Dis</b>	<b>Var_Dis</b>	<b>Var_Res</b>	<b>u(c)</b>	<b>U(c)</b>	<b>dmed [um]</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>							
(1+240/dmed)	0.26%	2.0315	21.8079	3.4204	6.8408	269.0855	0.0932	98.95%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HBW 2,5/31,25	5	500	6.4000	1.8563	309.0155	415.1370	414.9402	Hardness	416.5907	0.0166	3.2517	3.2518		
				11.6000	2.4510	309.9925	412.5150	414.4147	Dwell Time	-0.8837	0.0058	1.1316	1.1316		
				14.7000	2.6878	309.7310	413.2140	414.2054	<b>HBW 2,5/31,25</b> 						
				16.6000	2.8094	308.6740	416.0590	414.0980							
				21.8000	3.0819	308.8635	415.5460	413.8571							
				51.1000	3.9338	310.1295	412.1490	413.1043							
<b>cmc</b>	<b>% Dis</b>	<b>Var_Dis</b>	<b>Var_Res</b>	<b>u(c)</b>	<b>U(c)</b>	<b>dmed [um]</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>							
(1+240/dmed)	0.37%	2.3476	2.4482	1.1316	2.2633	309.4010	0.9589	51.78%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Tdl [s]	ln(Tdl)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variable	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HBW 2,5/31,25	5	300	6.1000	1.8083	391.4650	258.0760	257.9459	Hardness	260.8045	0.0144	0.4853	0.4856		
				11.4000	2.4336	392.3660	256.8840	256.8228	Dwell Time	-1.6361	0.0050	0.1692	0.1693		
				14.8000	2.6946	393.0615	255.9710	256.3958	<b>HBW 2,5/31,25</b>						
				16.7000	2.8154	392.8680	256.2240	256.1981							
				21.5000	3.0681	393.2755	255.6910	255.7848	$y = -1.6361x + 260.8$						
51.6000	3.9435	394.1465	254.5540	254.3524											
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value							
(1+240/dmed)	0.51%	1.7077	0.0574	0.1693	0.3386	392.8638	29.7297	0.10%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	INDICE	LIVELLO DUREZZA	Tdl [s]	ln(Tdl)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variable	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HBW 2,5/31,25	5	100	6.9000	1.9315	668.2365	87.4960	87.9439	Hardness	90.7978	0.0129	0.8076	0.8077		
				11.6000	2.4510	669.2820	87.2170	87.1763	Dwell Time	-1.4776	0.0045	0.2793	0.2793		
				14.8000	2.6946	670.1290	86.9930	86.8163	<b>HBW 2,5/31,25</b>						
				16.6000	2.8094	669.0605	87.2760	86.6468							
				22.2000	3.1001	673.5245	86.1010	86.2172	$y = -1.4776x + 90.798$						
52.4000	3.9589	679.0990	84.6660	84.9483											
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value							
(1+240/dmed)	0.62%	0.2884	0.1445	0.2793	0.5586	671.5553	1.9959	23.32%							

DATI SPERIMENTALI						RISULTATI OTTENUTI							
MATERIALE	SCALA	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med	
OTTONE	HBW 2,5/31,25	30T 62	1.9169	6.8000	602.3790	108.0530	108.2008	Hardness	109.1575	0.0133	1.2996	1.2997	
			2.4510	11.6000	602.7330	107.9240	107.9343	Dwell Time	-0.4991	0.0046	0.4501	0.4501	
			2.6810	14.6000	605.3375	106.9830	107.8195	<b>HBW 2,5/31,25</b>					
			2.8449	17.2000	600.6820	108.6730	107.7377						
			3.0819	21.8000	602.4755	108.0170	107.6194						
			3.9455	51.7000	605.7085	106.8500	107.1884						
% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value						
0.62%	0.4463	0.3738	0.4501	0.9002	603.2193	1.1939	42.53%						

DATI SPERIMENTALI						RISULTATI OTTENUTI							
MATERIALE	SCALA	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med	
OTTONE	HBW 2,5/62,5	30T 62	1.7228	5.6000	822.9635	114.2200	114.0694	Hardness	113.9326	0.0111	0.6901	0.6902	
			2.3795	10.8000	824.7370	113.7150	114.1216	Dwell Time	0.0794	0.0040	0.2454	0.2454	
			2.6174	13.7000	822.2530	114.4240	114.1405	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <b>IMPOSSIBILE</b>  <b>CONTRO NATURA DEL FENOMENO FISICO</b> </div>					
			2.7473	15.6000	824.6325	113.7450	114.1508						
			3.0155	20.4000	821.5785	114.6170	114.1721						
			3.9160	50.2000	823.1165	114.1770	114.2436						
% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value						
0.62%	0.5009	0.1271	0.2454	0.4908	823.2135	3.9414	7.93%						

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI				
MATERIALE	SCALA	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
OTTONE	HBW2.5/187,5	30T 62	1.7047	5.5000	1363.1760	118.0980	117.2849	Hardness	115.2022	0.0099	1.8588	1.8588		
			2.3331	10.3100	1371.4475	116.5410	118.0526	Dwell Time	1.2217	0.0036	0.6642	0.6642		
			2.5938	13.3800	1360.2545	118.6550	118.3711	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> IMPOSSIBILE  CONTRO NATURA DEL FENOMENO FISICO </div>						
			2.7370	15.4400	1356.2580	119.4230	118.5460							
			3.0111	20.3100	1363.7910	117.9820	118.8810							
% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value							
0.62%	0.5400	0.9589	0.6642	1.3285	1361.0020	0.5631	72.81%							

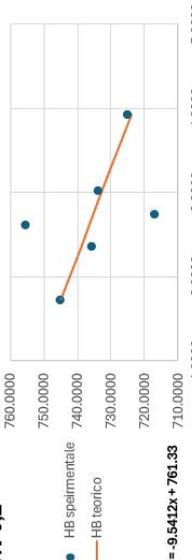
## C.2 Tabelle risultati scala Vickers

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HV1	9.807	700	1.7246	5.6100	50.0120	741.4210	744.2527	Hardness	772.4722	0.0120	9.1668	9.1668		
				2.3618	10.6100	50.1805	736.4540	733.8252	Dwell Time	-16.3634	0.0042	3.2590	3.2590		
				2.6108	13.6100	50.1545	737.2180	729.7506	<b>HV 1</b> 						
				2.7473	15.6000	50.5480	725.7740	727.5175							
				3.0258	20.6100	50.8675	716.6890	722.9603							
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value							
1+20/diagmed	1.50%	119.1681	22.7245	3.2590	6.5180	50.4842	5.2440	4.65%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HV1	9.807	500	1.7246	5.6100	59.8020	518.5440	515.6464	Hardness	522.3138	0.0115	5.1945	5.1945		
				2.3618	10.6100	60.1200	513.0630	513.1828	Dwell Time	-3.8661	0.0041	1.8468	1.8468		
				2.6108	13.6100	60.4595	507.3140	512.2201	<b>HV 1</b> 						
				2.7479	15.6100	60.1790	512.0560	511.6900							
				3.0253	20.6000	60.2750	510.4240	510.6176							
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value							
1+20/diagmed	1.50%	58.9248	7.2952	1.8468	3.6936	60.1982	8.0772	1.94%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI						
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdl [s]	ln(Tdl)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med			
Acciaio	HV1	9.807	300	1.7281	5.6300	79.1735	295.8370	295.5299	Hardness	295.6508	0.0108	4.3949	4.3949			
				2.3618	10.6100	78.9770	297.3120	295.4856		Dwell Time	-0.0700	0.0038	1.5620	1.5620		
				2.6115	13.6200	78.9735	297.3370	295.4681			HV 1					
				2.7486	15.6200	79.7070	291.8920	295.4585								
				3.0267	20.6300	79.4950	293.4460	295.4391								
3.9243	50.6200	79.0270	296.9330	295.3763												
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value								
1+20/diagmed	1.50%	19.6417	5.2077	1.5620	3.1239	79.2255	3.7716	8.57%								

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI						
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdl [s]	ln(Tdl)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med			
Acciaio	HV1	9.807	100	1.7228	5.6000	135.0390	101.6940	102.2696	Hardness	104.0386	0.0099	2.5841	2.5841			
				2.3618	10.6100	136.0360	100.2080	101.6135		Dwell Time	-1.0268	0.0035	0.9187	0.9187		
				2.6108	13.6100	134.9805	101.7810	101.3578			HV 1					
				2.7479	15.6100	133.7945	103.5940	101.2170								
				3.0258	20.6100	135.4640	101.0560	100.9317								
3.9241	50.6100	136.8180	99.0660	100.0092												
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value								
1+20/diagmed	1.50%	2.3058	1.8082	0.9187	1.8375	135.3553	1.2752	39.81%								

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdl [s]	ln(Tdl)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HV0,2	1.9613	700	1.7299	5.6400	22.3045	744.9880	744.8238	Hardness	761.3290	0.0162	22.7561	22.7561		
				2.3627	10.6200	22.4435	735.7970	738.7856	Dwell Time	-9.5412	0.0057	8.0865	8.0865		
				2.6115	13.6200	22.1525	755.2350	736.4118	<b>HV0,2</b> 						
				2.7486	15.6200	22.7370	716.9060	735.1045							
				3.0272	20.6400	22.4775	733.5520	732.4456							
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value							
1+20/diagmed	5.00%	1351.4551	139.3754	8.0865	16.1730	22.4542	9.6965	1.31%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdl [s]	ln(Tdl)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HV0,2	1.9613	500	1.7281	5.6300	27.0955	504.8210	505.8223	Hardness	500.4507	0.0149	6.5206	6.5206		
				2.3637	10.6300	27.0830	505.2910	507.7978	Dwell Time	3.1083	0.0053	2.3172	2.3172		
				2.6123	13.6300	27.0490	506.5660	508.5705	<div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center; color: red;"> <b>IMPOSSIBILE</b>  <b>CONTRO NATURA DEL FENOMENO FISICO</b> </div>						
				2.7486	15.6200	26.8230	515.1350	508.9941							
				3.0263	20.6200	26.9165	511.5510	509.8574							
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [um]	r	p-value							
1+20/diagmed	5.00%	647.5719	11.4546	2.3172	4.6343	26.9859	56.5338	0.02%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI				
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	d [µm]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med	
Acciaio	HV0,2	1.9613	300	1.7263	5.6200	36.4840	278.4390	284.7274	Hardness	276.4829	0.0133	11.7236	11.7236	
				2.3627	10.6200	35.6645	291.3760	287.7667	Dwell Time	4.7757	0.0047	4.1666	4.1666	
				2.6115	13.6200	35.7660	289.7290	288.9549						
				2.7492	15.6300	35.1760	299.5270	289.6123						
				3.0263	20.6200	36.0020	285.9440	290.9355						
				3.9245	50.6300	35.6140	292.2070	295.2254						
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [µm]	r	p-value						
1+20/diagmed	5.00%	209.5792	37.0995	4.1666	8.3332	35.7844	5.6491	4.02%						

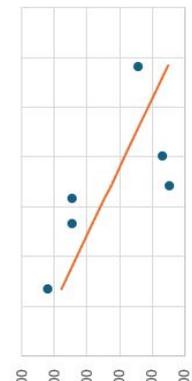
IMPOSSIBILE  
CONTRO NATURA DEL FENOMENO FISICO

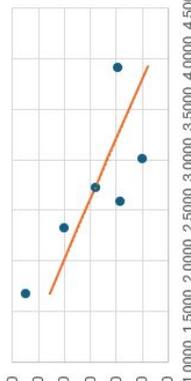
DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI				
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	d [µm]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med	
Acciaio	HV0,2	1.9613	100	1.7263	5.6200	60.1935	102.2900	98.6106	Hardness	90.0264	0.0115	7.3192	7.3192	
				2.3637	10.6300	60.3865	101.6370	101.7799	Dwell Time	4.9725	0.0041	2.6011	2.6011	
				2.6123	13.6300	61.9755	96.6490	103.0160						
				2.7492	15.6300	60.4040	101.5780	103.6968						
				3.0263	20.6200	58.4750	108.3920	105.0746						
				3.9243	50.6200	57.7385	111.1720	109.5403						
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	dmed [µm]	r	p-value						
1+20/diagmed	5.00%	26.8426	14.4508	2.6011	5.2022	59.8538	1.8575	25.66%						

IMPOSSIBILE  
CONTRO NATURA DEL FENOMENO FISICO

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	LIVELLO DUREZZA	Tdl [s]	ln(Tdl)	d [um]	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med			
RAME	HV0,2	40	1.6771	5.3500	95.6520	40.5080	40.6829	Hardness	42.7017	0.0100	2.3304	2.3304			
				10.3400	94.5705	41.4400	39.8898	Dwell Time	-1.2037	0.0036	0.8337	0.8337			
				13.3300	95.8690	40.3250	39.5840	<b>HV 0,2</b>							
				15.3800	99.2705	37.6090	39.4118								
				20.3500	98.6645	38.0720	39.0748								
50.3400	97.8935	38.6740	37.9845												
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	r	p-value								
1+20/dmed	5.00%	3.8884	1.5428	0.8337	1.6674	2.5204	16.66%								

### C.3 Tabelle risultati scala Knoop

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI				
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HK2	19.6133	700	1.6734	5.3300	694.3596	693.5826	Hardness	698.4832	0.0083	4.4194	4.4194		
				2.3380	10.3600	692.9145	691.6362	Dwell Time	-2.9286	0.0030	1.5821	1.5821		
				2.5900	13.3300	692.8803	690.8980	<b>HK 2</b>  <p><math>y = -2.9286x + 698.48</math></p>						
				2.7160	15.1200	686.9223	690.5290							
				3.0180	20.4500	687.3545	689.6446							
				3.9190	50.3500	688.8636	687.0059							
<b>cmc</b>	<b>% Dis</b>	<b>Var_Dis</b>	<b>Var_Res</b>	<b>u(c)</b>	<b>U(c)</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>							
1.00%	1.50%	107.2931	5.5747	1.5821	3.1642	19.2465	0.28%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI				
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HK2	19.6133	500	1.6827	5.3800	506.4655	505.5771	Hardness	508.4221	0.0085	1.9798	1.9798		
				2.3370	10.3500	504.9944	504.4709	Dwell Time	-1.6907	0.0030	0.7079	0.7079		
				2.5997	13.4600	502.8443	504.0267	<b>HK 2</b>  <p><math>y = -1.6907x + 508.42</math></p>						
				2.7298	15.3300	503.7671	503.8067							
				3.0121	20.3300	501.9999	503.3295							
				3.9190	50.3500	502.9373	501.7961							
<b>cmc</b>	<b>% Dis</b>	<b>Var_Dis</b>	<b>Var_Res</b>	<b>u(c)</b>	<b>U(c)</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>							
1.00%	1.50%	57.1161	1.1063	0.7079	1.4157	51.6300	0.03%							

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdl [s]	ln(Tdl)	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med			
Acciaio	HK2	19.6133	300	1.6864	5.4000	314.7451	313.8337	Hardness	316.5014	0.0084	1.3804	1.3805			
				2.3370	10.3500	311.6262	312.8046	Dwell Time	-1.5819	0.0030	0.4932	0.4932			
				2.6027	13.5000	312.5398	312.3843	<b>HK 2</b>							
				2.7460	15.5800	312.1404	312.1576								
				3.0082	20.2500	311.3521	311.7429	<p>● HB sperimentale — HB teorico</p> <p><math>y = -1.5819x + 316.5</math></p>							
3.9154	50.1700	310.8276	310.3077												
<b>cmc</b>	<b>% Dis</b>	<b>Var_Dis</b>	<b>Var_Res</b>	<b>u(c)</b>	<b>U(c)</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>								
1.00%	1.50%	21.9312	0.5335	0.4932	0.9865	41.1078	0.05%								

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdl [s]	ln(Tdl)	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med			
Acciaio	HK2	19.6133	100	1.6827	5.3800	111.4858	110.2129	Hardness	116.1711	0.0085	1.8642	1.8642			
				2.3456	10.4400	106.8905	107.8655	Dwell Time	-3.5409	0.0030	0.6660	0.6660			
				2.6012	13.4800	106.4465	106.9606	<b>HK 2</b>							
				2.7415	15.5100	105.3750	106.4639								
				3.0052	20.1900	106.2397	105.5301	<p>● HB sperimentale — HB teorico</p> <p><math>y = -3.5409x + 116.17</math></p>							
3.9200	50.4000	102.8866	102.2910												
<b>cmc</b>	<b>% Dis</b>	<b>Var_Dis</b>	<b>Var_Res</b>	<b>u(c)</b>	<b>U(c)</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>								
1.00%	1.50%	2.5546	0.9764	0.6660	1.3320	2.6164	15.73%								

DATI SPERIMENTALI						RISULTATI OTTENUTI									
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Td [s]	ln(Td)	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med			
Acciaio	HK0,2	19.6133	700	1.7192	5.5800	696.9655	708.1186	Hardness	703.5189	0.0086	20.2366	20.2366			
				2.3380	10.3600	721.5053	709.7742	Dwell Time	2.6756	0.0031	7.2286	7.2286			
				2.5960	13.4100	720.4724	710.4646	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <b>IMPOSSIBILE</b>  <b>CONTRO NATURA DEL FENOMENO FISICO</b> </div>							
				2.7305	15.3400	714.9102	710.8244								
				3.0141	20.3700	698.2106	711.5831								
		3.9144	50.1200	712.6943	713.9921										
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	r	p-value								
1.00%	5.00%	1263.0661	111.8712	7.2286	14.4573	11.2904	0.94%								

DATI SPERIMENTALI						RISULTATI OTTENUTI									
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Td [s]	ln(Td)	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med			
Acciaio	HK0,2	19.6133	500	1.6790	5.3600	527.0240	527.1713	Hardness	538.6636	0.0085	9.7901	9.7901			
				2.3399	10.3800	530.0494	522.6474	Dwell Time	-6.8449	0.0030	3.5108	3.5108			
				2.5696	13.0600	519.0536	521.0753	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <b>HK 0,2</b>  <span style="color: blue;">•</span> HB sperimentale  <span style="color: orange;">—</span> HB teorico </div> </div>							
				2.7134	15.0800	518.7593	520.0909								
				3.0131	20.3500	510.2635	518.0394								
		3.9140	50.1000	515.7465	511.8726										
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	r	p-value								
1.00%	5.00%	676.3888	27.2267	3.5108	7.0216	24.8429	0.15%								

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI							
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	TdI [s]	ln(TdI)	HB sperimentale	HB teorico	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HK0,2	19.6133	300	1.7066	5.5100	320.9790	315.5280	317.0347	0.0085	9.4848	9.4848	317.0347	0.0085	9.4848	9.4848		
				2.3571	10.5600	314.8169	314.9537	-0.8829	0.0030	3.3826	3.3826						
				2.6123	13.6300	307.0238	314.7284	<b>HK 0,2</b> 									
				2.7318	15.3600	310.7830	314.6229										
				3.0096	20.2800	317.4359	314.3776										
				3.9194	50.3700	316.7463	313.5744										
<b>cmc</b>	<b>% Dis</b>	<b>Var_Dis</b>	<b>Var_Res</b>	<b>u(c)</b>	<b>U(c)</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>										
1.00%	5.00%	247.4814	24.6495	3.3826	6.7652	10.0400	1.21%										

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI							
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	TdI [s]	ln(TdI)	HB sperimentale	HB teorico	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med		
Acciaio	HK0,2	19.6133	100	1.7102	5.5300	116.8455	116.5214	122.5003	0.0086	12.0856	12.0856	122.5003	0.0086	12.0856	12.0856		
				2.3851	10.8600	123.8286	114.1619	-3.4961	0.0031	4.2988	4.2988						
				2.6086	13.5800	105.8124	113.3805	<b>HK 0,2</b> 									
				2.7376	15.4500	106.6184	112.9295										
				3.0194	20.4800	113.9892	111.9441										
				3.9236	50.5800	110.6283	108.7833										
<b>cmc</b>	<b>% Dis</b>	<b>Var_Dis</b>	<b>Var_Res</b>	<b>u(c)</b>	<b>U(c)</b>	<b>r</b>	<b>p-value</b>										
1.00%	5.00%	31.8962	39.6517	4.2988	8.5975	0.8044	59.15%										

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med			
RAME	HK2	19.6133	30T 62	1.7138	5.5500	35.0824	35.5045	Hardness	36.3487	0.0085	1.0176	1.0176			
				2.3418	10.4000	34.9193	35.1951	Dwell Time	-0.4926	0.0030	0.3632	0.3632			
				2.6086	13.5800	35.3136	35.0637	<b>HK 2</b>							
				2.7350	15.4100	35.2790	35.0014	<p> <math>y = -0.4926x + 36.349</math>            • HB sperimentale            — HB teorico         </p>							
				3.0131	20.3500	35.6590	34.8644								
				3.9130	50.0500	33.8034	34.4211								
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	r	p-value								
1.00%	1.50%	0.2758	0.2826	0.3632	0.7265	0.9759	51.04%								

DATI SPERIMENTALI										RISULTATI OTTENUTI					
MATERIALE	SCALA	FORZA [N]	LIVELLO DUREZZA	Tdt [s]	ln(Tdt)	HB sperimentale	HB teorico	Variabile	Media	u_MC	u_REGR_med	u_TOT_med			
OTTONE	HK 2	19.6133	30T 62	1.6752	5.3400	109.2610	109.1054	Hardness	110.1387	0.0084	1.0106	1.0106			
				2.3495	10.4800	108.0954	108.6895	Dwell Time	-0.6168	0.0030	0.3616	0.3616			
				2.5673	13.0300	108.0563	108.5552	HK 2							
				2.7408	15.5000	109.3038	108.4482								
				3.0131	20.3500	108.5549	108.2802								
				3.9192	50.3600	107.5347	107.7213								
cmc	% Dis	Var_Dis	Var_Res	u(c)	U(c)	r	p-value								
1+20/diagmed	1.50%	2.6471	0.2903	0.3616	0.7232	9.1171	0.0150								

# Ringraziamenti