



Politecnico di Torino

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Valutazione dei coefficienti di sensibilità dei parametri operazionali nella misura di durezza Rockwell superficiale

Candidato:
Marcello Murgia
Matricola s267173

Relatori:
Prof. Gianfranco Genta
Prof. Alessandro Germak
Prof. Andrea Prato

Sommario

Il lavoro sperimentale condotto presso i laboratori dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologia (INRiM) ha lo scopo di analizzare, mediante prove sperimentali e successiva analisi dei dati, come influisce, sulle misure di durezza, una variazione dei parametri operazionali tempo e velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo. Lo studio è stato effettuato per le scale Rockwell superficiali HR15N, HR30N e HR45N.

L'influenza della variazione dei suddetti parametri operazionali è stata valutata con i coefficienti di sensibilità relativi agli stessi parametri. I coefficienti sono stati calcolati utilizzando un modello di regressione lineare che mette in relazione la variazione di durezza rispetto alla variazione dei parametri tempo e velocità di applicazione del carico aggiuntivo.

Nel primo capitolo, dopo una breve introduzione sulla scala di durezza Rockwell, viene descritto il ciclo di carico, ovvero il grafico Forza-Tempo e le diverse fasi che lo caratterizzano. Di seguito viene descritto come si calcola la durezza nelle diverse scale Rockwell e come le stesse si differenziano in base al tipo di indentatore utilizzato e ai livelli dei carichi applicati. Infine si descrive brevemente il fenomeno del creep e si analizza come una variazione dei parametri tempo e velocità di applicazione/rimozione dei carichi, nelle varie fasi che compongono il ciclo, rispetto ai valori delle procedure, possa incidere sul risultato delle misure di durezza.

Nel secondo capitolo si descrive come impostare i parametri di set del durezza metro, si descrivono i corrispondenti parametri di output e i grafici forniti dallo stesso al termine di ogni prova.

Il terzo capitolo descrive il piano sperimentale, ovvero i parametri sui quali si è deciso di investigare e i corrispondenti valori scelti per effettuare le prove sperimentali. Si descrivono inoltre le prove preliminari e la preparazione dei provini per effettuare le prove sperimentali.

Il quarto capitolo riguarda l'analisi dei dati ricavati mediante le prove sperimentali. Vengono mostrati i coefficienti di sensibilità rilevati per i parametri tempo e velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo per le tre scale HR15N, HR30N e HR45N. Infine si confrontano i coefficienti rilevati nei

laboratori dell'INRiM con quelli rilevati al National Physical Laboratory di Teddington (UK) e al National Institute of Standards and Technology a Gaithersburg (USA).

Indice

1	Scale di durezza Rockwell	1
1.1	Introduzione	1
1.2	Ciclo di carico	2
1.3	Calcolo della durezza	5
1.3.1	Esempio di calcolo	6
1.4	Scale Rockwell	6
1.5	Fenomeno del Creep	9
1.5.1	Comportamento a Creep	9
1.5.2	Effetti dello sforzo e della temperatura	10
1.6	Effetti della variazione dei carichi	11
1.7	Effetti della variazione del ciclo di carico	14
1.7.1	Fase 1	16
1.7.2	Fase 2	16
1.7.3	Fase 3	17
1.7.4	Fase 4	17
1.7.5	Fase 5	20
1.7.6	Fase 6	22
1.7.7	Fase 7	22
1.7.8	Fase 8	22
1.7.9	Sintesi	23
2	Durometro INRiM	25
2.1	Parametri di set del durometro	25
2.2	Parametri di output del durometro	27
2.3	Grafici delle prove di durezza	29
3	Prove sperimentali	33
3.1	Piano sperimentale	33
3.2	Prove preliminari	37
3.3	Valori dei parametri per le prove sperimentali	37
3.3.1	HR45N	38

3.3.2	HR30N	38
3.3.3	HR15N	39
3.4	Preparazione dei provini per le prove sperimentali	41
4	Analisi dei dati	43
4.1	Coefficienti di sensibilità	43
4.1.1	Scala HR15N	44
4.1.2	Scala HR30N	46
4.1.3	Scala HR45N	47
4.2	Confronto coefficienti di sensibilità	49
5	Conclusioni	55
A	Prove Preliminari	57
A.1	Scala HR15N	58
A.2	Scala HR30N	62
A.3	Scala HR45N	66
B	Prove Sperimentali	71
B.1	Scala HR15N	72
B.2	Scala HR30N	78
B.3	Scala HR45N	84

Elenco dei simboli

A_p	area totale del provino
A_s	area corona circolare provino
D_p	diamentro del provino
F	carico totale
F_0	precarico
N	costante della formula per il calcolo della durezza
S	divisione della scala di durezza
T	temperatura prova di durezza
T_{ap}	tempo di applicazione del precarico (schermata durometro)
T_{dl}	tempo di mantenimento del carico totale (schermata durometro)
T_{rf}	tempo di mantenimento del precarico fase 7
T_{rp}	tempo di mantenimento del precarico fase 3
V_a	velocità di contatto
V_{fal}	velocità media finale di applicazione del carico aggiuntivo (schermata durometro)
V_{fa}	velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo
α	angolo indentatore
h	profondità di penetrazione relativa alla seconda misura
h_0	profondità di penetrazione relativa alla prima misura

h_1	massima profondità di penetrazione
r	raggio indentatore Brale
r_1	raggio della prima corona circolare del provino
r_2	raggio della seconda corona circolare del provino
r_3	raggio della terza corona circolare del provino
t_{aa}	tempo di applicazione del carico aggiuntivo
t_{ar}	tempo di rimozione del carico aggiuntivo
t_{pa}	tempo di applicazione precarico
t_{pd}	tempo di mantenimento precarico fase 3
t_{rd}	tempo mantenimento precarico fase 7
t_{td}	tempo di mantenimento del carico totale
HR	valore di durezza Rockwell

Capitolo 1

Scale di durezza Rockwell

1.1 Introduzione

La prova di durezza Rockwell è una delle prove tra le più conosciute ed utilizzate, insieme alle prove Brinell e Vickers, per la misura della durezza dei materiali.

Questo metodo fu messo a punto dagli statunitensi Hugh M. Rockwell (1890-1957) e Stanley P. Rockwell (1886-1940) e fu brevettato nel 1914.

Rispetto alle prove Brinell e Vickers, la Rockwell è generalmente preferita per la sua facilità di realizzazione e per il minor tempo richiesto per eseguire la misura; infatti il risultato della misura viene fornito direttamente dalla macchina di prova e a differenza delle altre prove non richiede misure ottiche per determinare i parametri geometrici dell'impronta. Inoltre la prova Rockwell è non-distruttiva in quanto le dimensioni delle impronte sono piccole e normalmente non è richiesta una successiva lavorazione alle macchine utensili dell'elemento su cui viene misurata la durezza.

La maggior parte delle prove di durezza, tra cui anche la Rockwell, sottopongono il materiale del provino di cui si vuole misurare la durezza a dei carichi che vengono trasmessi per mezzo di specifici indentatori. Sulla superficie del provino si genera una impronta dovuta alle deformazioni plastiche subite dal materiale. Il valore di durezza viene quindi determinato mediante l'utilizzo di formule empiriche riferite alle caratteristiche geometriche dell'impronta generata. La misura della durezza è di conseguenza una misura della resistenza del materiale all'indentazione.

Nel caso della prova Rockwell è possibile utilizzare sia indentatori di forma conica con punta in diamante arrotondata (detti indentatori Brale), usati per le misure su materiali molto duri come acciai temprati e carburi cementati sia indentatori di forma sferica realizzati in carburo di tungsteno, disponibili

in varie misure e utilizzati per materiali non eccessivamente duri come ad esempio nel caso di leghe di acciaio-rame, alluminio, plastica ecc. Nella **figura [1.1]** è mostrato un indentatore di forma conica (indentatore Brale) con indicate le caratteristiche geometriche mentre in **figura [1.2]** è mostrato un indentatore di forma sferica con indicati i carichi applicati in tre successive fasi di misura e la deformazione che ne consegue.

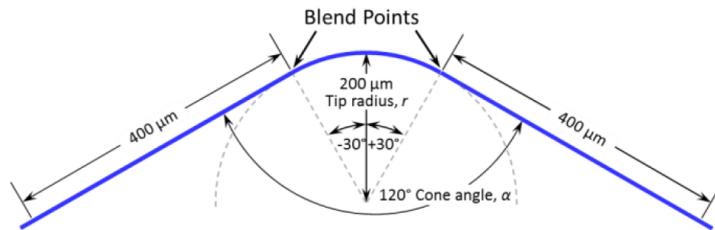


Figura 1.1: Indentatore conico con indicazione delle sue caratteristiche geometriche

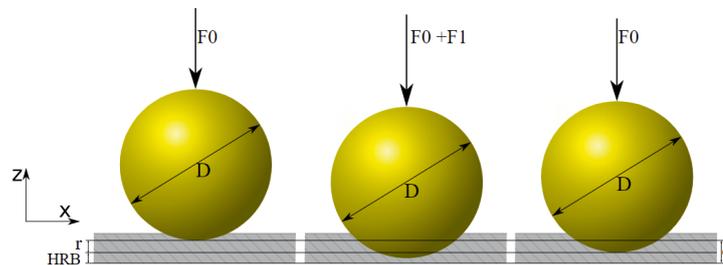


Figura 1.2: Indentatore sferico con indicazione dei carichi applicati e della profondità di penetrazione

1.2 Ciclo di carico

L'andamento del ciclo di carico della prova di durezza Rockwell è lo stesso per tutte le scale e quindi è indipendente dai livelli di carico applicati (precarico e carico totale) e dalla tipologia di indentatore utilizzata. La differenza fra i cicli di carico delle varie scale consiste unicamente nei livelli di carico raggiunti e pertanto in questo paragrafo si prende in considerazione un generico ciclo di carico.

Come si può vedere dal grafico di **figura [1.3]**, che riporta sia il ciclo di carico, ovvero il grafico Forza-Tempo, sia lo spostamento dell'indentatore in

funzione del tempo, il ciclo è caratterizzato da due differenti livelli di carico e da tre intervalli di tempo in cui il livello di carico rimane costante.

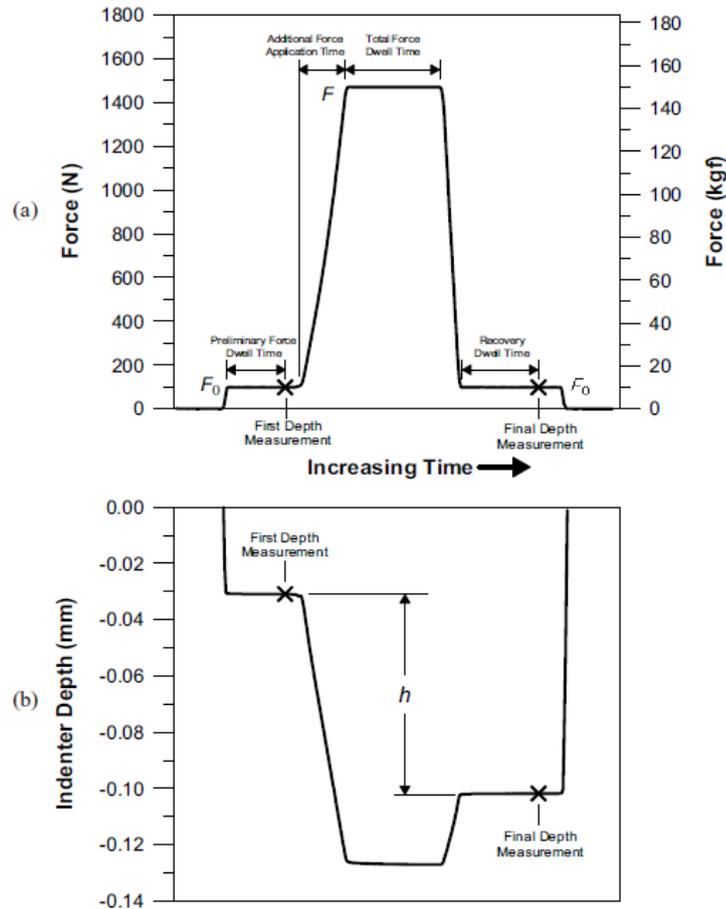


Figura 1.3: Grafico Forza-Tempo (a) e Spostamento-Tempo (b) di una prova di durezza HRC che mostra le fasi del ciclo di carico e la differenza h tra le due misure dello spostamento [9]

Il livello di carico inferiore F_0 è detto precarico (Preliminary Force) mentre il livello di carico superiore F è detto carico totale (Total Force) e la differenza fra il carico totale e il precarico è il carico aggiuntivo (Additional Force).

Una volta che il valore di precarico F_0 è stato raggiunto, il carico si mantiene costante per un certo intervallo di tempo (Preliminary Force Dwell Time) e viene eseguita la prima misura dello spostamento dell'indentatore (ovvero della profondità di penetrazione) indicata nel grafico dal simbolo \times .

Successivamente alla prima misurazione, viene gradualmente applicato il ca-

rico aggiuntivo in modo da raggiungere dopo un certo intervallo di tempo (Additional Force Application Time) il carico totale F .

Il carico totale si mantiene costante per un certo intervallo di tempo (Total Force Dwell Time) e successivamente viene riportato al livello di precarico F_0 , raggiunto il quale viene eseguita, dopo un certo intervallo di tempo (Recovery Dwell Time), la seconda misura dello spostamento dell'indentatore.

Infine il provino viene scaricato completamente e la prova è terminata.

Nella descrizione del ciclo di carico si è volutamente posta particolare attenzione sugli intervalli di tempo che lo caratterizzano, in quanto, come si vedrà in seguito, questi intervalli temporali, insieme alle velocità di applicazione/rimozione dei carichi, caratterizzano la prova stessa e sono quindi fondamentali al fine di ottenere una corretta misura di durezza.

La **figura [1.4]** mostra in modo schematico come varia la profondità di penetrazione al variare del livello di carico. Partendo dalla superficie del provino, a seguito dell'applicazione del precarico F_0 , si raggiunge la profondità di penetrazione h_0 e viene eseguita la prima misura di spostamento che costituisce il livello (o piano) di riferimento per la seconda misura.

Con l'applicazione del carico totale F si raggiunge la massima profondità di penetrazione h_1 e quando il carico viene riportato al valore di precarico F_0 la profondità diventa h , inferiore ad h_1 , per effetto del recupero elasto-plastico del materiale.

Il valore dello spostamento (profondità di penetrazione dell'indentatore) necessario per il calcolo della durezza è dato dalla differenza $h - h_0$, ma essendo h_0 il livello di riferimento, esso è semplicemente dato da h .

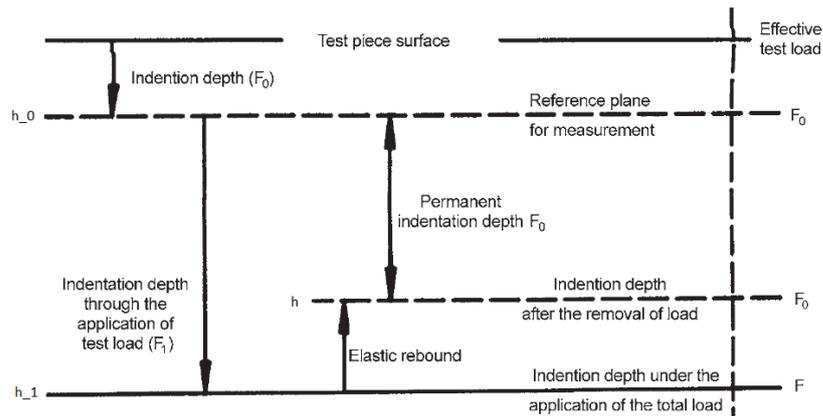


Figura 1.4: Grafico schematico che indica la profondità di penetrazione in funzione dei carichi applicati [6]

1.3 Calcolo della durezza

La durezza Rockwell è quindi calcolata tramite il valore misurato h secondo la formula generale valida per tutte le scale Rockwell

$$\text{HR} = N - \frac{h}{S}$$

in cui:

HR Rockwell Hardness;

N costante numerica (dipende dalla scala);

h profondità di penetrazione espressa in mm;

S divisione della scala espressa in mm.

Le differenti scale Rockwell differiscono per:

- il tipo di indentatore utilizzato
- i livelli di carico applicati (precarico e carico totale)
- il valore della costante N
- la divisione della scala S

In particolare quando si utilizza un penetratore conico con punta in diamante (penetratore Brale) si ottiene il valore di durezza mediante le seguenti formule

$$\text{Regular Rockwell Hardness} = 100 - \frac{h}{0,002 \text{ mm}}$$

$$\text{Rockwell Superficial Hardness} = 100 - \frac{h}{0,001 \text{ mm}}$$

Mentre quando si utilizza un indentatore sferico si ha

$$\text{Regular Rockwell Hardness} = 130 - \frac{h}{0,002 \text{ mm}}$$

$$\text{Rockwell Superficial Hardness} = 100 - \frac{h}{0,001 \text{ mm}}$$

1.3.1 Esempio di calcolo

Se si esegue una prova di durezza secondo la scala C Rockwell (sigla HRC), ovvero una scala Regular Rockwell Hardness che prevede l'utilizzo di un indentatore Brale, allora la costante numerica N è pari a 100 e la divisione della scala S è pari a 0,002 mm. Se si ottiene un valore h pari a 80 μm il risultato della prova è dato dalla seguente equazione

$$\text{HRC} = 100 - \frac{0,080}{0,002} = 100 - 40 = 60$$

Di conseguenza per sapere di quanto l'indentatore è affondato nel materiale rispetto al livello di riferimento, considerata la divisione della scala S , si avrà che

$$h = (100 - 60) \cdot 0,002 \text{ mm} = 0,080 \text{ mm}$$

In linea teorica quindi si ha che un materiale infinitamente duro avrà un valore di durezza pari a 100, il che significa che la profondità di penetrazione è nulla. Il valore nullo di durezza è in linea teorica possibile e si ottiene (per la scala HRC) quando il valore h è pari a 0,200 mm.

1.4 Scale Rockwell

Il motivo che ha determinato la necessità di diverse procedure (o scale) per la prova di durezza Rockwell, che differiscono, come già evidenziato, per la tipologia di indentatore utilizzato e per i livelli di carico applicati, sta nel fatto che si ha l'esigenza di misurare la durezza di pezzi che differiscono per caratteristiche geometriche (dimensioni, spessore ecc.) e sono costituiti da materiali che differiscono in modo sostanziale in quanto a durezza (metalli, leghe, materie plastiche ecc.).

Ogni combinazione di indentatore e livello dei carichi applicati costituisce una distinta scala di durezza Rockwell e viene designata mediante una sigla come riportato nella tabella di **figura [1.5]**.

Come si può osservare nella tabella, esistono 30 diverse scale Rockwell che vengono divise in due categorie: scale Rockwell regolari (Regular Rockwell Scales) e scale Rockwell superficiali (Superficial Rockwell Scales). Entrambe usano gli stessi due tipi di indentatori ma si distinguono per i livelli di carico applicati: maggiori per le scale regolari e minori per quelle superficiali che vengono tipicamente adoperate su pezzi aventi piccolo spessore.

Per le scale regolari la forza di precarico è 98,07 N (10 Kgf) e il carico totale può essere 588,4 N (60 Kgf), 980,7 N (100 Kgf) oppure 1471 N (150 Kgf).

Mentre per le scale superficiali la forza di precarico è 29,42 N (3 Kgf) e il carico totale può essere 147,1 N (15 Kgf), 294,2 N (30 Kgf) oppure 441,3 N (45 Kgf).

La tabella di **figura [1.5]** fornisce una sintesi di quanto appena detto e indica la sigla usata per identificare la scala, il tipo di indentatore utilizzato, i livelli dei carichi e la tipologia di materiali per cui ogni scala viene tipicamente adoperata.

Considerato il gran numero di scale, il risultato di una misura di durezza si scriverà quindi correttamente indicando, dopo il valore numerico ottenuto dalla prova, la sigla della procedura (o scala) utilizzata per eseguire la misura. A titolo d'esempio se si vuole indicare il risultato di una misura eseguita utilizzando la procedura (o scala) C mediante la quale si è ottenuto il valore di durezza 65 si dovrà scrivere il risultato della misura come 65 HRC (la sigla HR deriva dall'inglese Hardness Rockwell) e la lettera C sta ad indicare la scala.

	Scale Symbol	Indenter Type (Ball dimensions indicate diameter.)	Preliminary Force N (kgf)	Total Force N (kgf)	Typical Applications
Regular Rockwell Scales	A	Spheroconical Diamond	98.07 (10)	588.4 (60)	Cemented carbides, thin steel, and shallow case hardened steel.
	B	Ball - 1.588 mm (1/16 in.)	98.07 (10)	980.7 (100)	Copper alloys, soft steels, aluminum alloys, malleable iron, etc.
	C	Spheroconical Diamond	98.07 (10)	1471 (150)	Steel, hard cast irons, pearlitic malleable iron, titanium, deep case hardened steel, and other materials harder than HRB 100.
	D	Spheroconical Diamond	98.07 (10)	980.7 (100)	Thin steel and medium case hardened steel, and pearlitic malleable iron
	E	Ball - 3.175 mm (1/8 in.)	98.07 (10)	980.7 (100)	Cast iron, aluminum and magnesium alloys, and bearing metals
	F	Ball - 1.588 mm (1/16 in.)	98.07 (10)	588.4 (60)	Annealed copper alloys, and thin soft sheet metals.
	G	Ball - 1.588 mm (1/16 in.)	98.07 (10)	1471 (150)	Malleable irons, copper-nickel-zinc and cupro-nickel alloys.
	H	Ball - 3.175 mm (1/8 in.)	98.07 (10)	588.4 (60)	Aluminum, zinc, and lead.
	K	Ball - 3.175 mm (1/8 in.)	98.07 (10)	1471 (150)	Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that does not give anvil effect.
	L	Ball - 6.350 mm (1/4 in.)	98.07 (10)	588.4 (60)	
	M	Ball - 6.350 mm (1/4 in.)	98.07 (10)	980.7 (100)	
	P	Ball - 6.350 mm (1/4 in.)	98.07 (10)	1471 (150)	
	R	Ball - 12.70 mm (1/2 in.)	98.07 (10)	588.4 (60)	
	S	Ball - 12.70 mm (1/2 in.)	98.07 (10)	980.7 (100)	
V	Ball - 12.70 mm (1/2 in.)	98.07 (10)	1471 (150)		
Superficial Rockwell Scales	15N	Spheroconical Diamond	29.42 (3)	147.1 (15)	Similar to A, C and D scales, but for thinner gage material or case depth.
	30N	Spheroconical Diamond	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45N	Spheroconical Diamond	29.42 (3)	441.3 (45)	
	15T	Ball - 1.588 mm (1/16 in.)	29.42 (3)	147.1 (15)	Similar to B, F and G scales, but for thinner gage material.
	30T	Ball - 1.588 mm (1/16 in.)	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45T	Ball - 1.588 mm (1/16 in.)	29.42 (3)	441.3 (45)	
	15W	Ball - 3.175 mm (1/8 in.)	29.42 (3)	147.1 (15)	Very soft material.
	30W	Ball - 3.175 mm (1/8 in.)	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45W	Ball - 3.175 mm (1/8 in.)	29.42 (3)	441.3 (45)	
	15X	Ball - 6.350 mm (1/4 in.)	29.42 (3)	147.1 (15)	
	30X	Ball - 6.350 mm (1/4 in.)	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45X	Ball - 6.350 mm (1/4 in.)	29.42 (3)	441.3 (45)	
	15Y	Ball - 12.70 mm (1/2 in.)	29.42 (3)	147.1 (15)	
	30Y	Ball - 12.70 mm (1/2 in.)	29.42 (3)	294.2 (30)	
45Y	Ball - 12.70 mm (1/2 in.)	29.42 (3)	441.3 (45)		

Figura 1.5: Scale di durezza Rockwell con i corrispondenti tipi di indentatori utilizzati, carichi applicati e principali applicazioni [9]

1.5 Fenomeno del Creep

In questo paragrafo verrà brevemente esaminato il fenomeno del creep nei materiali metallici in quanto, come si vedrà nei prossimi due paragrafi, questo fenomeno è rilevante nelle prove di durezza. Una variazione dei parametri di prova rispetto a quelli delle procedure influisce sul fenomeno di creep e di conseguenza sul risultato della misura.

I materiali che vengono sottoposti a temperature elevate o a sforzi meccanici di tipo statico sono generalmente soggetti a questo fenomeno e le deformazioni che ne risultano vengono dette per scorrimento a caldo o creep.

Lo scorrimento a caldo o creep è la deformazione permanente che si verifica in un materiale sottoposto ad un carico ed è funzione del tempo di applicazione. E' normalmente un fenomeno indesiderato in quanto riduce la vita utile di un componente.

Si osserva in tutti i tipi di materiali e per i metalli diviene rilevante per temperature maggiori di $0,4 T_f$ in cui T_f è la temperatura assoluta di fusione.

1.5.1 Comportamento a Creep

Una tipica prova di scorrimento a caldo consiste nel sottoporre un provino ad un carico (o sforzo) costante ad una determinata temperatura. Si misura la deformazione (o l'allungamento) in funzione del tempo e si ottiene un grafico come quello mostrato in **figura [1.6]**.

Come si vede nel grafico, quando viene applicato il carico si verifica una deformazione istantanea. Successivamente si ha la deformazione permanente che è funzione del tempo di applicazione del carico e si ottiene l'andamento della curva di scorrimento a caldo mostrata in figura.

La curva può essere divisa in tre regioni, ciascuna delle quali ha una propria caratteristica di deformazione-tempo.

Il creep primario o creep transitorio si verifica per primo ed è caratterizzato da una velocità di scorrimento continuamente decrescente (infatti la pendenza della curva diminuisce con il tempo). Questo andamento è dovuto al fatto che il materiale sta aumentando la resistenza al creep o che sta avvenendo l'incrudimento da deformazione (la deformazione diviene più difficile man mano che aumenta).

Il creep secondario o creep stazionario è caratterizzato da una velocità di deformazione costante (l'andamento della curva è lineare). Questo stadio è spesso quello che ha la durata maggiore. L'andamento lineare di questo stadio si spiega sulle basi di un bilanciamento tra i processi competitivi di incrudimento da deformazione (iniziato nella prima fase) e il recovery. Il recovery è il processo mediante il quale un materiale diviene più duttile e

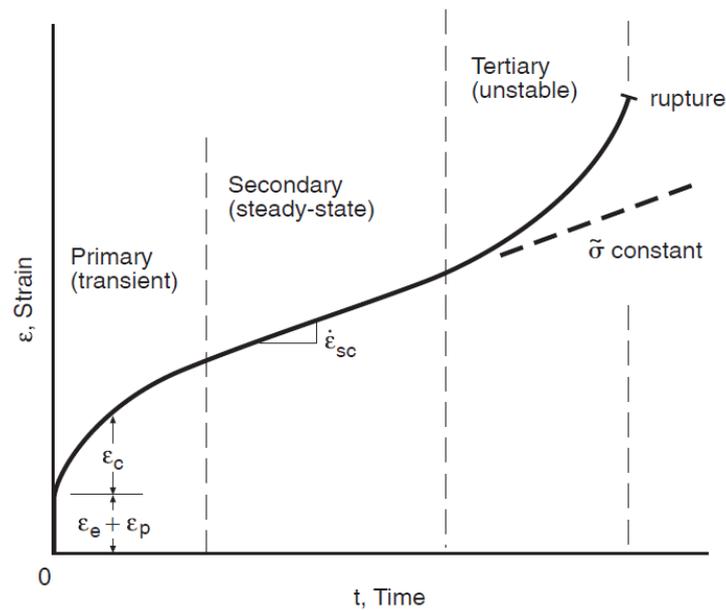


Figura 1.6: Tipica curva di creep della deformazione in funzione del tempo a carico costante e a temperatura elevata costante

ristabilisce la sua capacità di deformarsi.

La terza fase, caratterizzata da una accelerazione della deformazione fino al cedimento finale (o rottura), è definita creep terziario. Tale cedimento è il risultato di modificazioni microstrutturali e/o metallurgiche come ad esempio separazioni dei bordi dei grani e formazione di cricche interne, cavità e vuoti. In caso di carichi di trazione si verifica anche la formazione di una contrazione in alcune zone della zona deformata.

Ciò porta ad una diminuzione della sezione resistente e quindi ad un incremento della velocità di deformazione fino al cedimento finale.

Un parametro molto utile che si ricava dalle prove di scorrimento è la pendenza del tratto secondario della curva di scorrimento ($\Delta\epsilon/\Delta t$) che viene detta velocità di creep stazionario ($\dot{\epsilon}_{sc}$). Tale parametro viene utilizzato, in sede di progetto, per applicazioni a lungo termine.

Per applicazioni a breve termine, il parametro di progetto più importante è il tempo di vita a rottura t_r e le prove per determinarlo devono essere condotte fino al cedimento (prove di creep a rottura).

1.5.2 Effetti dello sforzo e della temperatura

Come si può vedere dal grafico di **figura [1.7]**, sia la temperatura che lo sforzo applicato influenzano le caratteristiche dello scorrimento a caldo.

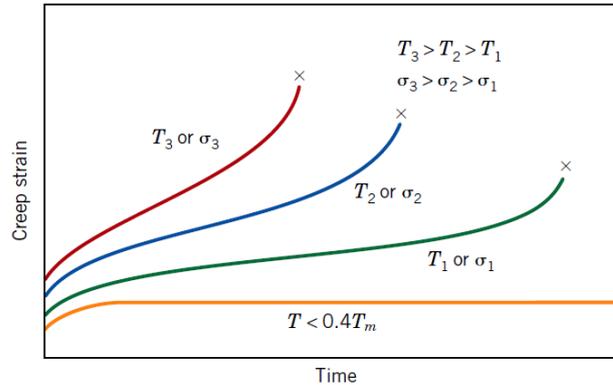


Figura 1.7: Influenza dello sforzo e della temperatura sul comportamento a creep

Al di sotto di $0,4T_f$ e dopo una deformazione iniziale, la deformazione è praticamente indipendente dal tempo (curva gialla). All'aumentare dello sforzo o della temperatura si nota che la deformazione istantanea al momento dell'applicazione del carico aumenta, che la velocità di creep stazionario aumenta e che la vita a rottura diminuisce.

La velocità di creep stazionario $\dot{\epsilon}_{sc}$ in funzione dello sforzo σ e della temperatura viene espressa mediante relazioni empiriche. Una sua possibile dipendenza dallo sforzo può essere rappresentata mediante la seguente

$$\dot{\epsilon}_{sc} = K_1 \sigma^n$$

in cui K_1 ed n sono costanti del materiale.

1.6 Effetti della variazione dei carichi

In questo paragrafo si descrive come una variazione dei carichi applicati, forza di precarico e forza totale, rispetto ai valori definiti nelle procedure, determini una variazione del risultato della misura di durezza.

Nella tabella di **figura [1.8]** sono indicate le tolleranze sui carichi prescritti per le prove di durezza Rockwell dalle norme ISO e ASTM.

Nei grafici di **figura [1.9]** sono mostrate le variazioni della misura di durezza determinate dall'incremento pari a 1 N del valore di precarico rispetto al valore stabilito dalle procedure, in funzione del valore nominale di durezza, per diverse scale Rockwell. Si può osservare come all'aumentare della durezza del provino la variazione del valore misurato di durezza, per effetto del

Test forces N (kgf)	ASTM Tolerances on Applied Forces N	ISO Tolerances on Applied Forces N
98.07 (10)	± 1.96	± 1.96
588.4 (60)	± 4.41	± 5.88
980.7 (100)	± 4.57	± 9.81
1471 (150)	± 8.83	± 14.71
29.42 (3)	± 0.589	± 0.588
147.1 (15)	± 0.981	± 1.471
294.2 (30)	± 1.961	± 2.942
441.3 (45)	± 2.943	± 4.413

Figura 1.8: Carichi e rispettive tolleranze definite dalle norme ASTM e ISO [9]

suddetto incremento, diminuisca per tutte le scale. Questo risultato deriva dal fatto che applicando un medesimo incremento di precarico ad un provino avente bassa durezza rispetto ad uno con elevata durezza si produce nel primo una deformazione maggiore e di conseguenza uno scostamento maggiore del valore di durezza.

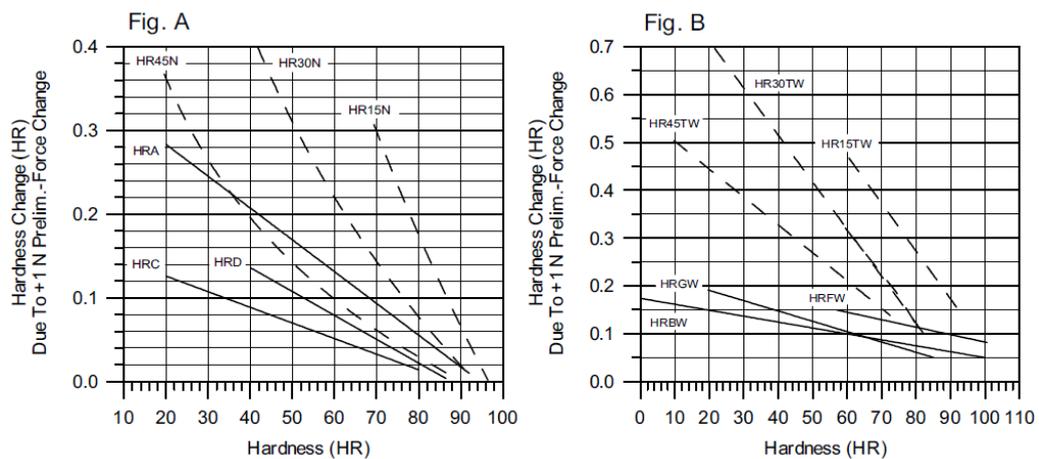


Figura 1.9: Variazione di durezza determinata dall'incremento del precarico pari a 1 N per le scale che utilizzano indentatori conici (A) e sferici (B) [9]

Nei grafici di **figura [1.10]** sono mostrate le variazioni di durezza determinate dall'incremento pari a 1 N del carico totale. Valgono le stesse considerazioni fatte nel caso della variazione del precarico, ovvero all'aumentare

della durezza del provino diminuisce la variazione rispetto al valore nominale.

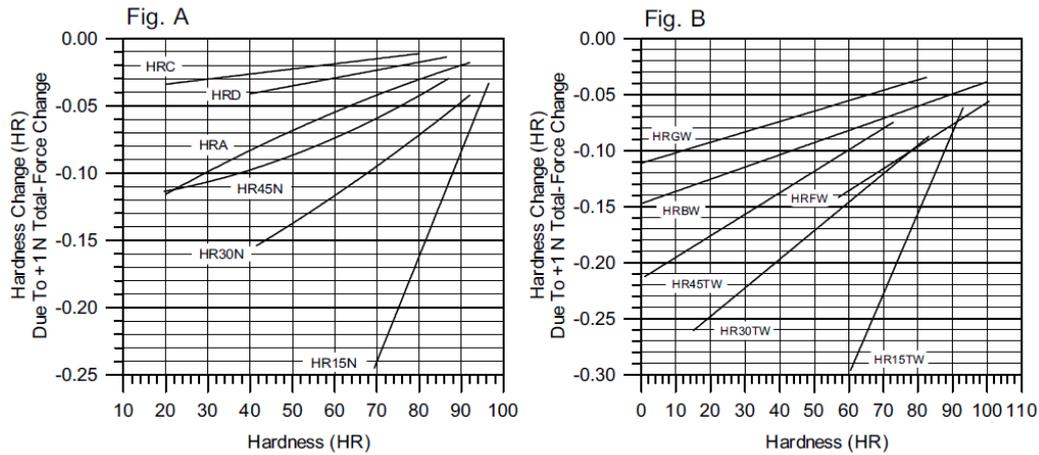


Figura 1.10: Variazione di durezza determinata dall'incremento del carico totale pari a 1 N per le scale che utilizzano indentatori conici (A) e sferici (B) [9]

Nei grafici di **figura [1.11]** sono mostrate le variazioni nei valori di durezza misurati, rispetto al valore nominale, per le scale che usano un indentatore del tipo Brale, nel caso in cui i valori dei carichi rimangano all'interno delle tolleranze ASTM e ISO.

Fig. A: ASTM

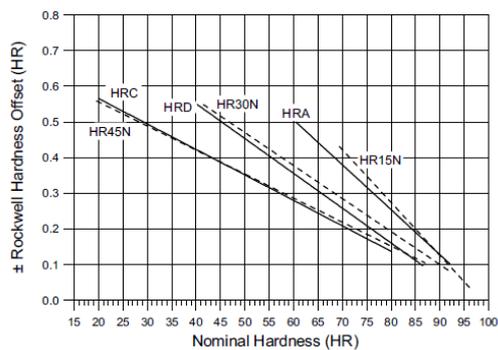


Fig. B: ISO

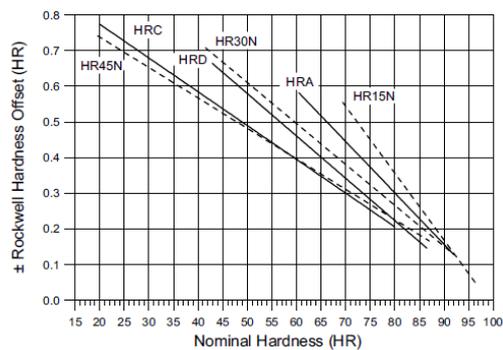


Figura 1.11: Variazioni di durezza che è possibile ottenere variando il valore del precarico e del carico totale rispettando le tolleranze prescritte dalla ASTM (A) e dalla ISO (B) [9]

1.7 Effetti della variazione del ciclo di carico

In questo paragrafo si descrive in che modo possono incidere sulle prove di durezza le variazioni degli intervalli di tempo in cui i carichi rimangono costanti e le variazioni delle velocità di applicazione/rimozione dei carichi (ovvero le variazioni di velocità di indentazione).

Per far ciò è utile dividere il ciclo di carico (Forza-Tempo) di **figura [1.12]** in otto fasi (o steps) ognuna delle quali caratterizzata da un certo intervallo di tempo nel quale il carico può variare o rimanere costante.

Di seguito vengono elencate le otto fasi in cui il ciclo è stato suddiviso mettendo in evidenza, per ogni fase, il parametro che incide sul risultato della misura di durezza.

1. Avvicinamento dell'indentatore alla superficie del provino caratterizzato dalla *velocità di contatto*;
2. applicazione del precarico (intervallo di tempo t_{pa}) caratterizzato dalla *velocità di applicazione del precarico*;
3. *tempo di mantenimento del precarico* (t_{pd}) che inizia nell'istante in cui il valore di precarico è stato raggiunto fino alla prima misura della profondità di penetrazione;
4. applicazione del carico aggiuntivo fino al raggiungimento del valore del carico totale (intervallo di tempo t_{aa}) caratterizzato dalla *velocità di applicazione del carico aggiuntivo*;
5. *tempo di mantenimento del carico totale* (t_{td});
6. scarico parziale del provino fino al valore di precarico (intervallo t_{ar}) caratterizzato dalla *velocità di rimozione del carico aggiuntivo*;
7. *tempo di mantenimento del precarico* (t_{rd}) che inizia da quando si è raggiunto il valore di precarico fino alla seconda misura della profondità di penetrazione;
8. scarico del provino caratterizzato dalla *velocità di scarico*.

Nelle fasi 1, 2, 4, 6 e 8 il carico varia e quindi il risultato della misura di durezza è influenzato dalla velocità di applicazione/rimozione del carico mentre nelle fasi 3, 5 e 7 il carico viene mantenuto costante e la misura è influenzata dal tempo di mantenimento del carico.

Le cause che determinano una variazione nelle misure di durezza dipendono

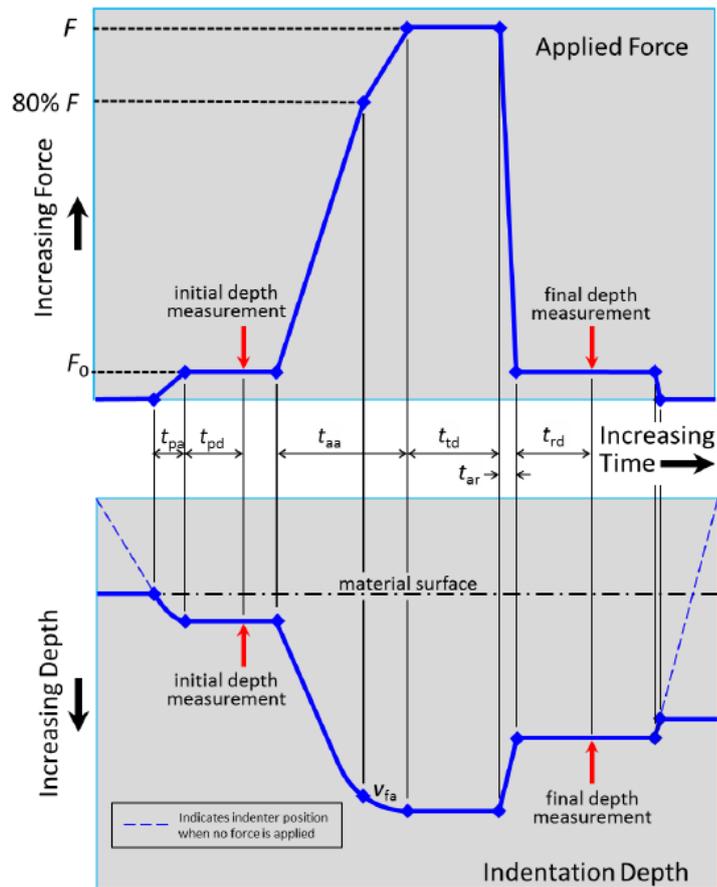


Figura 1.12: Ciclo di carico Forza-Tempo e grafico Spostamento-tempo

da effetti di tipo dinamico (superamento del valore del carico nominale o innesco di fenomeni vibratorii non trascurabili all'aumentare della velocità di applicazione del carico) e/o dalle caratteristiche del materiale sotto prova (ad esempio la sensibilità del materiale alla deformazione sotto carico dinamico) nelle fasi in cui il carico varia. Nelle fasi in cui il carico viene mantenuto costante dipendono dal recupero elasto-plastico del materiale e dal fenomeno di creep che si verifica sotto carico costante.

Poichè vi sono delle difficoltà di misurazione della velocità di indentazione o della velocità di applicazione del carico (velocità che normalmente non sono costanti ma variano durante l'applicazione del carico), le procedure stabiliscono degli intervalli di tempo in cui i carichi devono essere applicati o rimossi nelle fasi 2, 4, 6 e 8.

Le fasi del grafico Spostamento-Tempo di **figura [1.12]** in cui il carico rimane costante sono caratterizzate da uno spostamento che per semplicità è stato

considerato nullo. Questa è però una idealizzazione del comportamento del materiale sotto carico costante in quanto non si è considerato il fenomeno del creep e il ritorno elasto-plastico. Il reale comportamento del materiale nelle suddette fasi è evidenziato nel grafico Spostamento-Tempo di **figura [1.13]** che sarà utile nella successiva analisi.

Nel seguito si analizzano le fasi del ciclo di carico descrivendo in che modo i parametri tempo e velocità di carico influenzano il risultato della misura.

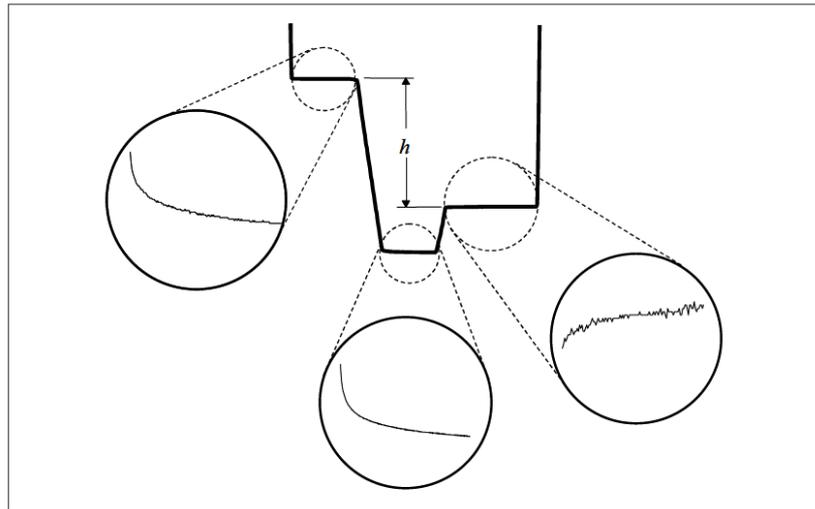


Figura 1.13: Grafico Spostamento-Tempo in cui sono state ingrandite le fasi in cui il carico è mantenuto costante [9]

1.7.1 Fase 1

L'effetto sulla misura dovuto alla velocità di contatto, ovvero la velocità con cui l'indentatore si avvicina al provino prima del contatto è dovuto principalmente ad effetti di natura dinamica.

Una elevata velocità di contatto può determinare un urto di notevole entità se il sistema di controllo della macchina non è in grado di rallentare o arrestare l'indentatore nel momento del contatto e prima dell'applicazione del precarico. Un urto può inoltre causare degli indesiderati fenomeni vibratorii sulla macchina di prova.

1.7.2 Fase 2

La seconda fase è quella in cui viene gradualmente applicato il precarico. Inizia nell'istante in cui l'indentatore tocca il provino e termina quando si

raggiunge il valore di precarico.

Gli effetti sulla misura, dovuti alla sensibilità del materiale al carico dinamico, in questa fase del ciclo non sono stati sufficientemente analizzati in quanto sono di entità trascurabile rispetto a quelli che si verificano in altre fasi del ciclo.

Se il tempo di applicazione del precarico dovesse essere troppo lungo potrebbero verificarsi fenomeni di creep nel materiale capaci di influenzare il comportamento del materiale nella successiva fase, in cui viene eseguita la prima misura della profondità di penetrazione e quindi influenzare il risultato della misura.

1.7.3 Fase 3

Questa fase è caratterizzata dal tempo di mantenimento del precarico e inizia non appena viene raggiunto il livello di precarico, che si manterrà costante per tutta la fase e termina dopo che la prima misura della profondità di penetrazione è stata eseguita.

Tempi di mantenimento del precarico troppo lunghi potrebbero far insorgere nel materiale del provino fenomeni di creep e quindi influenzare fortemente il risultato della misura di durezza in quanto la profondità di penetrazione non rimarrebbe costante. Di conseguenza il tempo di mantenimento del precarico incide fortemente sulla misura di durezza.

In **figura [1.14]** è mostrata la variazione della misura di durezza per tre provini aventi durezza nominale pari rispettivamente a 63 HRC, 45 HRC e 25 HRC in funzione del tempo di mantenimento del precarico.

Il grafico mette in evidenza che la variazione della misura di durezza è più accentuata con tempi di mantenimento del precarico brevi e tende a ridursi per tempi più lunghi fino a stabilizzarsi. Inoltre tale variazione è più significativa per i provini aventi durezza nominale inferiore e quindi il tempo di mantenimento del precarico incide maggiormente per livelli di durezza minori; infatti più un materiale è tenero maggiore è la sua duttilità e quindi la capacità di deformarsi plasticamente sotto carico.

1.7.4 Fase 4

Questa fase ha inizio quando viene applicato il carico aggiuntivo e termina una volta raggiunto il valore del carico totale.

A differenza delle altre fasi di applicazione/rimozione dei carichi, gli studi effettuati hanno messo in evidenza che il risultato della misura è significativamente alterato dalla velocità di applicazione del carico aggiuntivo.

La velocità di applicazione del carico non è costante ma varia durante questa

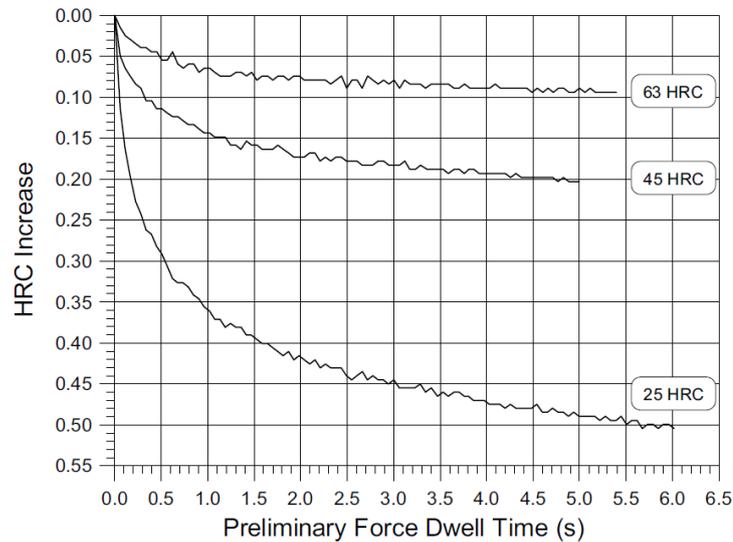


Figura 1.14: Variazione della misura di durezza al variare del tempo di mantenimento del precarico per tre provini aventi differenti durezza [9]

fase essendo normalmente più rapida nella prima parte e più lenta nella fase finale.

E' di fondamentale importanza quindi che la velocità non sia eccessiva per non superare il valore del carico totale e per evitare l'insorgere di vibrazioni nella macchina di prova. Il grafico di **figura [1.15]** mostra come una elevata velocità di applicazione del carico faccia insorgere vibrazioni.

Gli studi che sono stati condotti per analizzare come varia il risultato delle misure al variare della velocità di applicazione del carico aggiuntivo, sebbene non abbiano messo il luce il meccanismo che ne sta alla base, hanno evidenziato che è molto più significativa, sui risultati delle misure, la velocità finale della fase di carico.

Il grafico di **figura [1.16]** mostra l'effetto della velocità sul risultato della misura di durezza per un provino avente durezza nominale pari a 50 HRC. Come si può osservare la variazione nella misura di durezza è significativa quando la velocità di applicazione del carico aggiuntivo è inferiore a $10 \mu\text{m/s}$ e questo fa pensare che nel materiale a tali velocità possano insorgere fenomeni di creep.

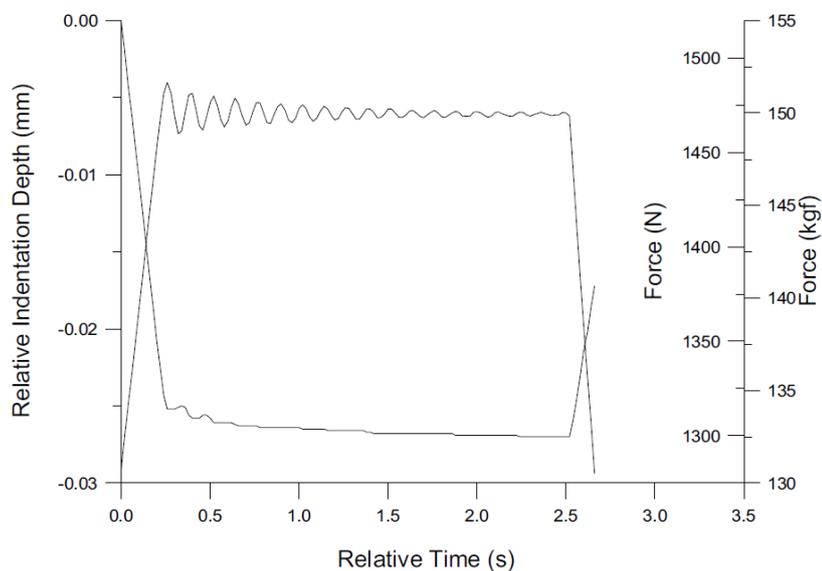


Figura 1.15: Oscillazioni del carico e dello spostamento dell'indentatore dovuti ad una velocità di applicazione del carico aggiuntivo elevata [9]

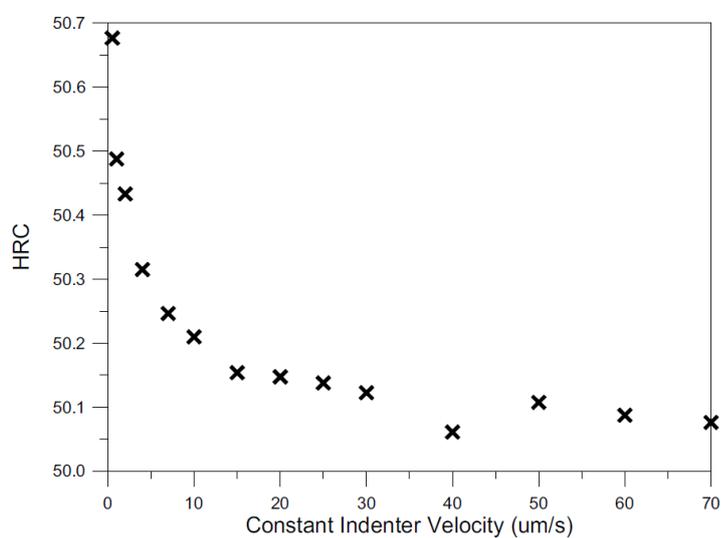


Figura 1.16: Variazioni di durezza per un provino avente durezza nominale pari a 50 HRC al variare della velocità di applicazione del carico aggiuntivo [9]

1.7.5 Fase 5

La fase 5 inizia nel momento in cui viene raggiunto il carico totale ed è caratterizzata dal tempo di mantenimento del carico totale. L'indentatore in questa fase continua progressivamente ad affondare nel materiale a causa dei fenomeni di creep.

Nei grafici di **figura [1.17]** e di **figura [1.18]** è mostrato il decremento della misura di durezza con un tempo di mantenimento del carico pari a 5 s per provini di diversa durezza per le scale HRC e HRB.

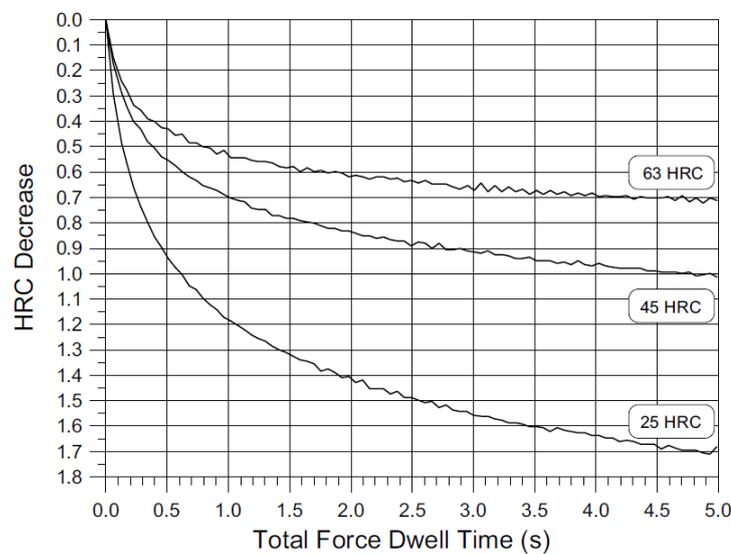


Figura 1.17: Variazione di durezza al variare del tempo di mantenimento del carico totale per tre provini aventi differenti durezza (scala HRC) [9]

Valgono considerazioni analoghe a quelle fatte per la fase 3 per il caso del tempo di mantenimento del precarico. La differenza sta nel fatto che in questo caso all'aumentare del tempo di mantenimento si ha un decremento di durezza perchè a causa dei fenomeni di plasticità e di creep l'indentatore continua ad affondare nel materiale.

La differenza nella forma delle curve dei due grafici consiste nel diverso indentatore che viene utilizzato per le scale HRC e HRB.

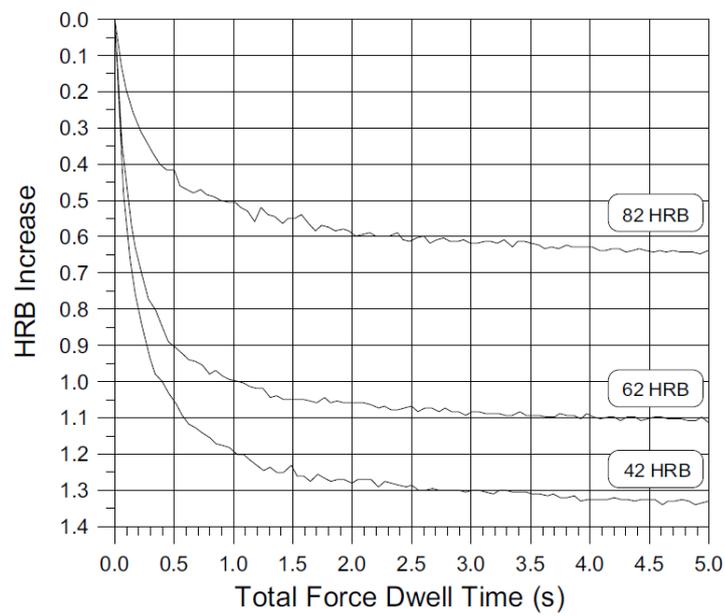


Figura 1.18: Variazione di durezza al variare del tempo di mantenimento del carico totale per tre provini aventi differenti durezza (scala HRB) [9]

1.7.6 Fase 6

La fase 6 è caratterizzata dalla velocità di rimozione del carico aggiuntivo e termina una volta che si è raggiunto nuovamente il valore di precarico. Gli effetti di questa fase sulla prova di durezza sono simili a quelli visti per la fase 2 di applicazione del precarico.

Questa fase è caratterizzata dal recupero elasto-plastico del materiale e di conseguenza si ha un piccolo spostamento dell'indentatore verso l'alto. Gli effetti della variazione della velocità di scarico sulla misura di durezza non sono stati sufficientemente analizzati ma comunque sono trascurabili anche rispetto a quelli determinati dalla velocità di applicazione del precarico (a loro volta trascurabili).

Tuttavia con una velocità di scarico troppo bassa possono comunque insorgere fenomeni di creep nel materiale che possono influire sulla fase successiva nella quale viene eseguita la seconda misura della profondità dell'indentatore e quindi alterare il valore della misura di durezza.

1.7.7 Fase 7

La fase 7 inizia quando il provino viene scaricato dal carico aggiuntivo e termina nell'istante in cui si esegue la seconda misura della profondità di penetrazione. Durante questa fase il carico è mantenuto costante.

Una volta che il provino viene parzialmente scaricato si ha un parziale recupero elasto-plastico del materiale che continua durante tutto il tempo di mantenimento del precarico. Per effetto di ciò all'aumentare del tempo della fase si ha un incremento del valore di durezza misurato perchè il recupero elasto-plastico del materiale avviene progressivamente nel tempo.

In **figura [1.19]** è mostrata la variazione di durezza misurata al variare del tempo di mantenimento del precarico per tre provini di durezza rispettivamente pari a 63 HRC, 45 HRC e 25 HRC per la scala HRC.

A differenza delle fasi 5 e 3 in cui l'effetto del tempo di mantenimento del carico, sulla misura, è più significativo per valori di durezza nominale inferiore, in questo caso si verifica il contrario. Il motivo è che nei materiali più duri si sperimenta un recupero elastico molto maggiore rispetto ai materiali teneri e pertanto a parità di altre condizioni si otterrà un valore di h inferiore.

1.7.8 Fase 8

La fase 8 non ha nessuna influenza sul risultato della misura in quanto è successiva alla fase in cui avviene la seconda misura della profondità di

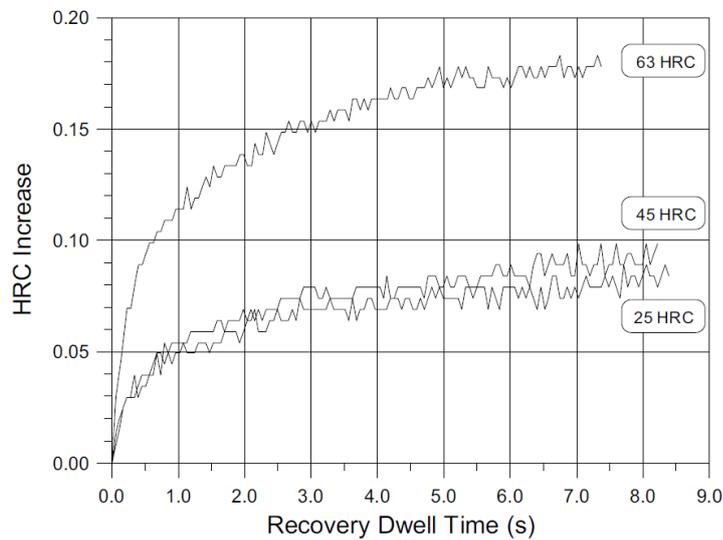


Figura 1.19: Variazione di durezza al variare del tempo di mantenimento del precarico per tre provini aventi differenti durezza (scala HRC) [9]

penetrazione.

1.7.9 Sintesi

Fra le fasi in cui il carico varia quella che incide maggiormente sulla misura è la fase 4 e cioè quella in cui viene applicato progressivamente il carico aggiuntivo.

Per le fasi in cui il carico è costante si possono riassumere i risultati come segue:

- La misura di durezza è più sensibile ai tempi di mantenimento del carico per intervalli brevi e tende a stabilizzarsi per intervalli sufficientemente lunghi.
- In generale, il valore di durezza misurato è maggiormente influenzato dal tempo di mantenimento del carico nella fase 5 e a seguire nella fase 3 e infine nella fase 7. Inoltre i tempi di mantenimento del carico incidono diversamente in relazione alla durezza nominale del provino.

Si è anche visto che l'influenza sulle misure di durezza della velocità di applicazione/rimozione dei carichi è trascurabile rispetto agli effetti della variazione dei tempi di mantenimento nelle fasi a carico costante.

E' anche possibile che variando i parametri di due o più fasi del ciclo di carico

(rispetto ai valori della prova standard definita dalle procedure) i rispettivi effetti possano in qualche modo compensarsi, totalmente o parzialmente, in modo da ridurre l'influenza sulla misura.

Capitolo 2

Durometro INRiM

2.1 Parametri di set del durometro

In questo paragrafo si descrivono i parametri di set che è possibile inserire tramite il software Primary 1.2.103 che controlla il durometro per impostare il ciclo di carico (Forza-Tempo) desiderato, ovvero un ciclo di carico in cui i tempi e le velocità di indentazione siano conformi ai valori indicati nelle procedure delle varie scale Rockwell al fine di eseguire una prova conforme di durezza.

La schermata per l'inserimento dei parametri di set è quella visibile in **figura [2.1]**.

In alto a sinistra è presente la sezione TIMES in cui è possibile preimpostare gli intervalli di tempo delle varie fasi del ciclo di carico. *Preload holding* consente di impostare il valore del tempo di mantenimento del precarico F_0 della fase in cui viene eseguita la prima misurazione della profondità di penetrazione (fase 1); tramite *Additional load holding* si imposta il tempo di mantenimento del carico totale F (fase 5) mentre con *Gap of the final reading* si imposta il tempo di mantenimento del precarico F_0 della fase in cui viene eseguita la seconda misura della profondità di penetrazione (fase 7).

Alla fine della prova, il durometro fornisce in output la durata effettiva delle varie fasi. Qualora i tempi di set non coincidano con quelli di output è necessario eseguire delle correzioni nei parametri di set fino ad ottenere i valori di output desiderati. La non coincidenza tra set e output può dipendere da vari fattori fra cui, ad esempio, la capacità del sistema di controllo della macchina a intervenire per effettuare le necessarie correzioni.

In alto a destra è presente la sezione VELOCITY in cui è possibile impostare le velocità di indentazione. Tramite *Approaching velocity* si imposta la velocità con cui l'indentatore si avvicina al provino (velocità di contatto) nella

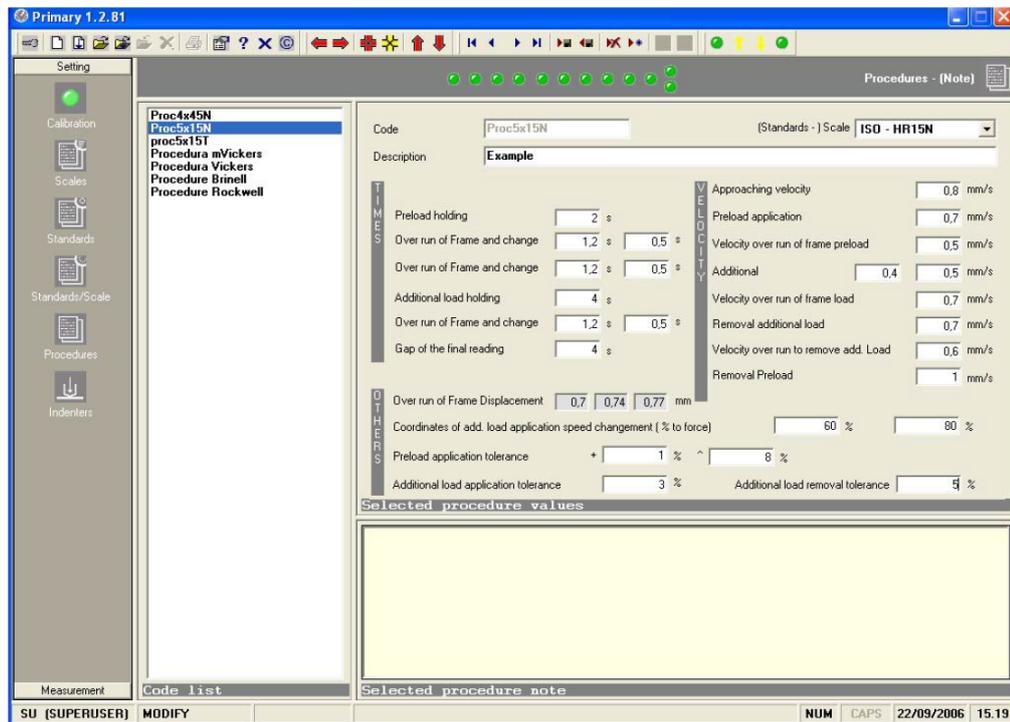


Figura 2.1: Schermata per l'impostazione dei parametri di set del durometro

fase 1.

Nella maggior parte delle prove eseguite non è stato necessario modificare il valore di default della velocità di contatto (pari a $0,08 \mu\text{m/s}$). Solo in alcuni casi si è dovuto ridurre il valore perché si generavano degli errori dovuti probabilmente al fatto che la velocità elevata generava delle grandi forze di inerzia che venivano interpretate dal sistema di controllo come l'inizio del contatto fra l'indentatore e la superficie del provino.

Con *Preload application* si imposta la velocità di applicazione del precarico F_0 nella fase 2. In tutte le prove questa velocità è stata mantenuta costante e pari a $0,14 \mu\text{m/s}$.

Tramite *Additional* si imposta la velocità iniziale e finale di applicazione del carico aggiuntivo nella fase 4. Questa fase del ciclo di carico può essere suddivisa in tre sotto-fasi caratterizzate da tre velocità di applicazione del carico. Nella prima sotto-fase la velocità è quella iniziale, nella seconda sotto-fase la velocità varia dal valore iniziale a quello finale e nella terza sotto-fase corrisponde alla velocità finale.

Con *Removal additional load* si imposta la velocità con cui viene scaricato il provino dal carico aggiuntivo (fase 6) mentre con *Removal preload* si imposta

la velocità con cui viene scaricato il provino dal precarico (fase 8). Queste velocità sono state mantenute fisse e pari a 0,5 μms in tutte le prove eseguite. In basso è presente la sezione OTHERS con cui è possibile variare il carico (espresso in percentuale del carico totale) in corrispondenza del quale viene modificata la velocità di applicazione del carico medesimo (*Coordinates of add. load application speed chngement*). Nella maggior parte delle prove eseguite le due percentuali sono state impostate rispettivamente al 30% e 70% del carico totale.

2.2 Parametri di output del durometro

In questo paragrafo si descrivono i dati di output forniti dal durometro, ovvero tutti i valori misurati dal sistema di controllo che caratterizzano il ciclo di carico della prova di durezza.

In **figura [2.2]** è mostrata la schermata che fornisce i risultati delle prove e i valori di output del ciclo di carico.

Alcuni intervalli di tempo o di velocità vengono indicati nella schermata del durometro con sigle differenti rispetto a quelle utilizzate nelle procedure delle scale Rockwell.

La prima colonna partendo da sinistra indica il numero progressivo delle misure eseguite e nella colonna successiva *Hardness* i relativi valori di durezza misurati.

Nella colonna T_{ap} sono riportati gli intervalli di tempo corrispondenti alla somma della metà del tempo di applicazione del precarico (t_{pa} nel grafico di **figura [2.3]**) e del tempo intercorrente tra il raggiungimento del valore di precarico e quello in cui si effettua la prima misurazione della profondità di penetrazione (t_{pd} nel grafico di **figura [2.3]**). La colonna dei tempi T_{rp} che appare nella schermata corrisponde agli intervalli di tempo t_{pd} nel grafico del ciclo di carico di **figura [2.3]**. In formule si ha

$$T_{rp} \equiv t_{pd}$$

$$T_{ap} = \frac{t_{pa}}{2} + T_{rp} = \frac{t_{pa}}{2} + t_{pd}$$

La colonna T_{aa} riporta gli intervalli di tempo che impiega il carico aggiuntivo a passare dal valore F_0 (precarico) al valore F (carico totale) e corrisponde al parametro t_{aa} del grafico del ciclo di carico di **figura [2.3]**.

T_{dl} sono i tempi di mantenimento del carico totale F e corrisponde a t_{td} nel grafico del ciclo di carico di **figura [2.3]**. T_{rf} sono gli intervalli di tempo di

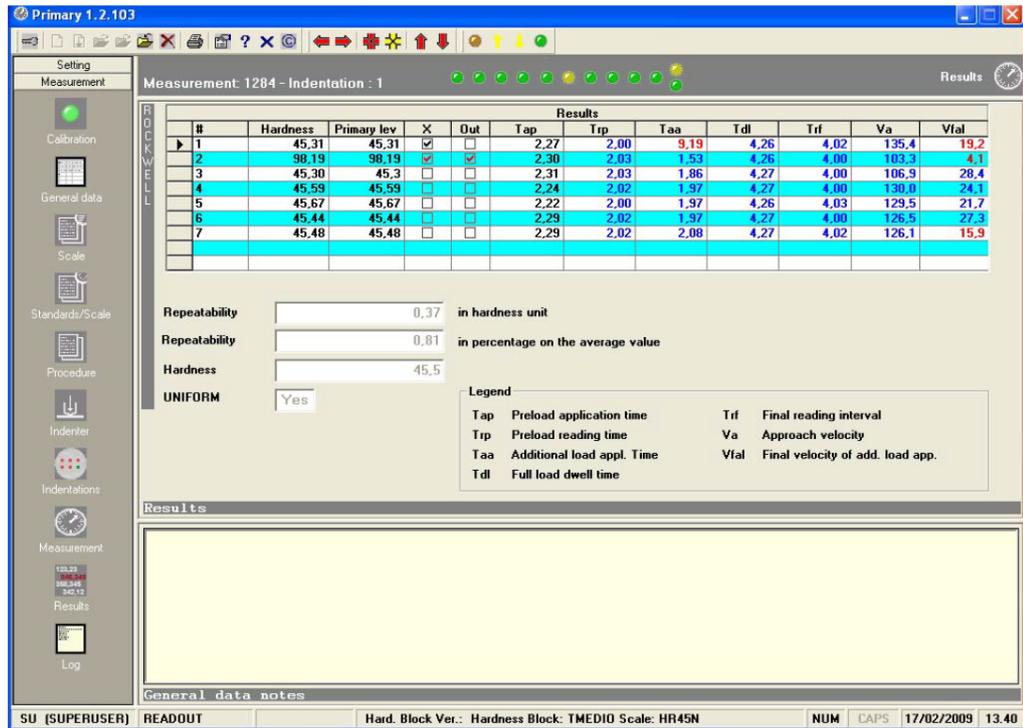


Figura 2.2: Schermata dei parametri di output del durometro

mantenimento del precarico F_0 nella fase in cui avviene la seconda misura della profondità di penetrazione e corrisponde a t_{rd} nel grafico di **figura [2.3]**. V_a è la velocità di contatto mentre V_{fal} è la velocità media finale di applicazione del carico aggiuntivo calcolata quando il carico è compreso tra 80% e 99% del carico totale. Questa velocità è utile come riferimento per capire se la velocità finale si avvicina a quella definita nella procedura. Tuttavia essendo quest'ultima una velocità media, è necessario verificare la velocità finale nel grafico Velocità-Tempi fornito dal durometro per conoscere il valore istantaneo.

Per chiarezza si riporta un riassunto con le rispettive equivalenze fra la simbologia usata per indicare gli intervalli temporali nelle procedure Rockwell e nei relativi grafici e quelli usati nella schermata di output del durometro.

- $T_{rp} \equiv t_{pd}$
- $T_{ap} = \frac{t_{pa}}{2} + T_{rp} = \frac{t_{pa}}{2} + t_{pd}$
- $T_{aa} \equiv t_{aa}$

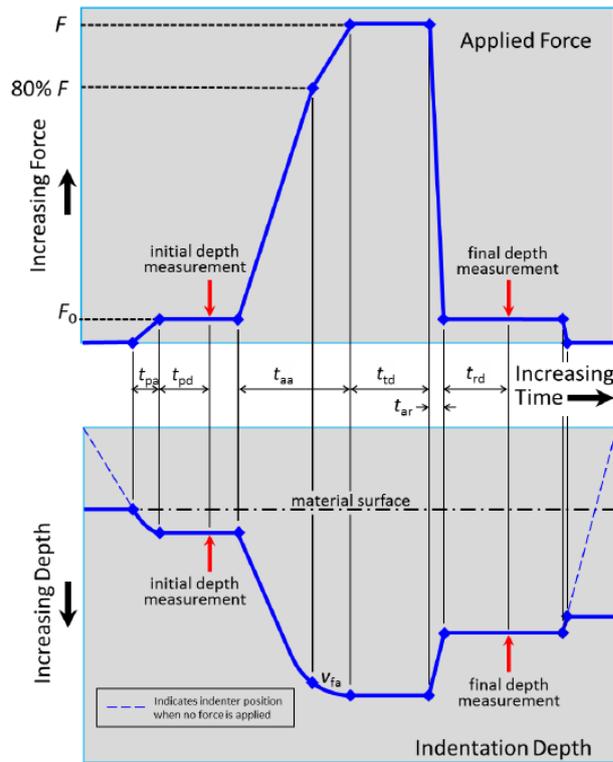


Figura 2.3: Ciclo di carico Forza-Tempo e grafico Spostamento-tempo

- $T_{dl} \equiv t_{td}$
- $T_{rf} \equiv t_{rd}$

2.3 Grafici delle prove di durezza

Per ogni prova di durezza eseguita il durometro fornisce diversi grafici tra cui quelli maggiormente utili per capire se la prova è stata eseguita correttamente sono il grafico del ciclo di carico (Forza-Tempo) e quello che riporta la velocità di indentazione in funzione del tempo (Velocità-Tempo).

In **figura [2.4]** è mostrata la schermata in cui compare il grafico del ciclo di carico insieme a quello Spostamento-Tempo che mostra come varia la posizione dell'indentatore durante la prova.

Il grafico del ciclo di carico è stato descritto nel paragrafo 1.2, pertanto in questo paragrafo si descrive solamente il significato delle linee colorate verticali che aiutano ad identificare le diverse fasi del ciclo.

La prima linea gialla partendo da sinistra indica l'istante in cui l'indentatore

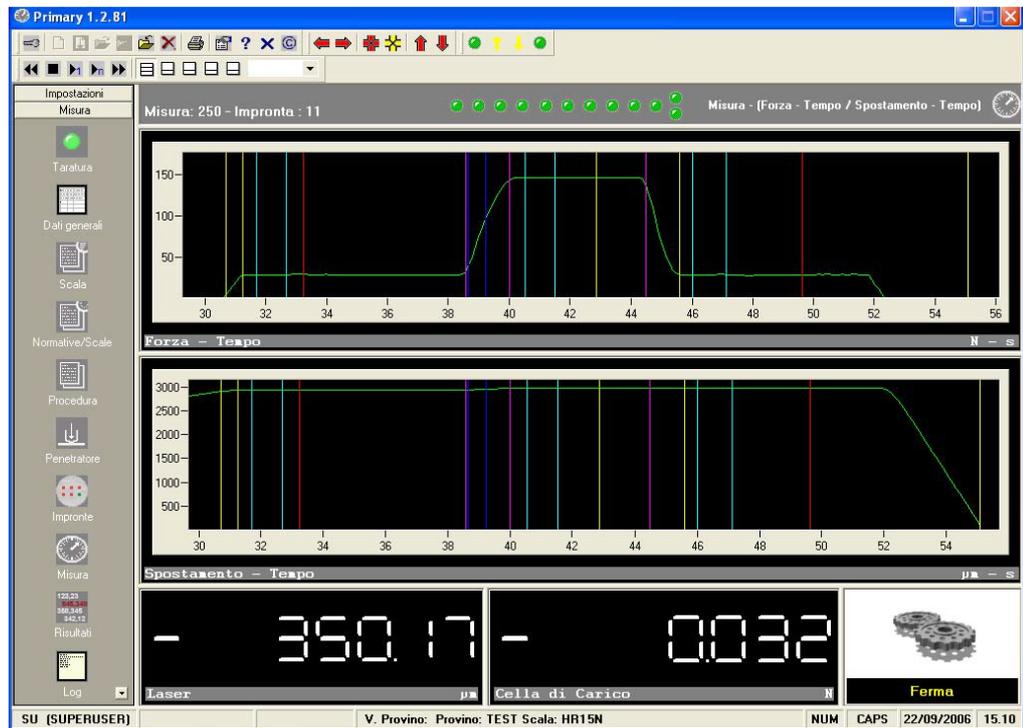


Figura 2.4: Schermata che mostra i grafici Forza-Tempo e Spostamento-Tempo

viene a contatto con la superficie del provino (inizio fase 2) e viene quindi gradualmente applicato il precarico. La seconda linea gialla individua l'istante in cui viene raggiunto il valore di precarico (fine fase 2). La prima linea rossa indica l'istante in cui viene eseguita la prima misurazione della posizione dell'indentatore (fase 3) mentre le successive due linee viola indicano l'inizio dell'applicazione del carico aggiuntivo e il raggiungimento del carico totale (fase 4).

Come è stato messo in evidenza nel paragrafo 2.1, possono essere impostate dall'utente due velocità definendo le percentuali del carico totale in cui si vogliono i cambi di velocità e il valore delle velocità stesse; di conseguenza le due linee blu indicano gli istanti temporali in cui si verificano i cambi di velocità.

La terza linea viola indica la fine dell'intervallo di mantenimento del carico totale, fase iniziata a partire dalla seconda linea viola partendo da sinistra (fase 5). La quarta linea gialla indica l'istante in cui il provino è stato parzialmente scaricato in modo da riportare il carico al valore di precarico (fase 6). L'inizio della fase di scarico del carico aggiuntivo è quindi indicata dalla terza linea viola mentre la fine dalla quarta linea gialla.

La seconda linea rossa indica l'istante in cui viene eseguita la seconda misura della profondità di penetrazione (fase 7); successivamente il provino viene completamente scaricato e la prova è conclusa.

Il grafico Spostamento-Tempo mostra la profondità di penetrazione dell'indentatore all'interno del materiale e riporta le stesse linee colorate verticali che individuano le diverse fasi del ciclo.

Oltre ai due grafici appena descritti è di fondamentale importanza anche quello che riporta la velocità di indentazione in funzione del tempo mostrato in figura [2.5].

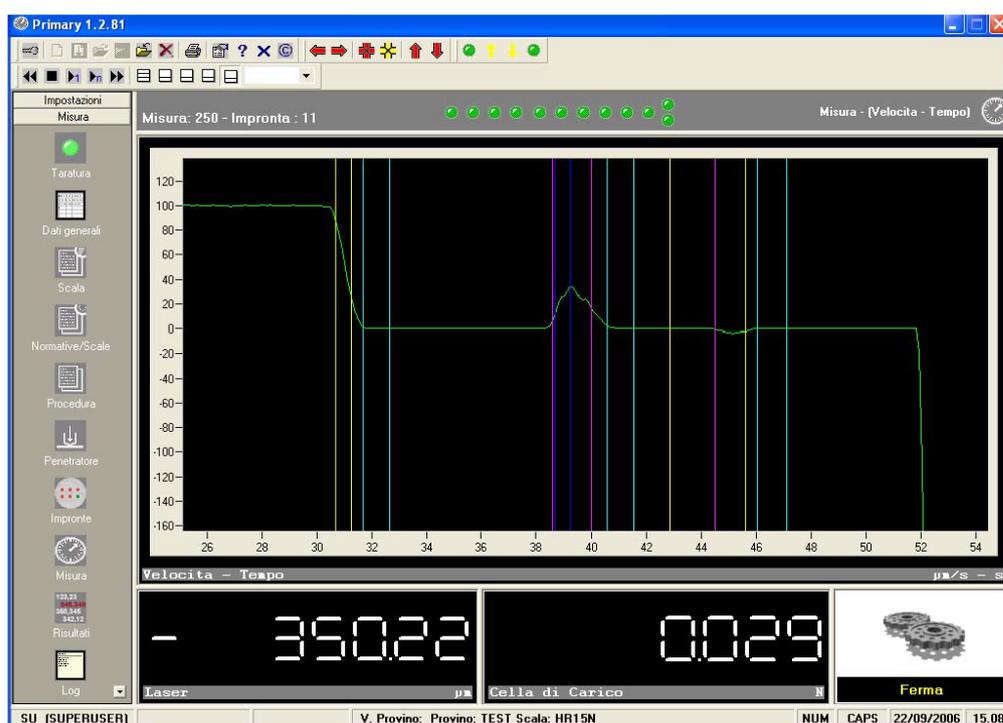


Figura 2.5: Schermata che mostra il grafico Velocità-Tempo

L'importanza di questo grafico risiede nel fatto che esso permette di valutare la velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo che corrisponde alla velocità (media) che deve essere mantenuta fra 80% e il 99% del carico totale. Questa velocità è infatti definita dalle procedure e deve essere verificata per ottenere una corretta misura di durezza. La velocità finale di carico può essere individuata, se il grafico che si ottiene lo consente, ingrandendo il grafico stesso nel punto in cui la velocità inizia a diminuire, cioè quando si è prossimi al carico totale.

Capitolo 3

Prove sperimentali

3.1 Piano sperimentale

Lo studio sperimentale si è focalizzato sulla fase 4 del ciclo di carico. In particolare si era detto che tra le fasi in cui il carico varia, la fase 4, caratterizzata dalla velocità di applicazione del carico aggiuntivo, è quella che incide maggiormente sul risultato della misura di durezza. Inoltre si è anche detto che la velocità di applicazione del carico non è costante durante la fase e ciò che incide maggiormente sulla misura è la velocità finale di applicazione del carico ovvero quella in prossimità del raggiungimento del carico totale.

Per questo motivo si è deciso di valutare, mediante prove sperimentali e successiva analisi dei dati, in che modo una variazione della velocità finale di applicazione del carico e una variazione del tempo impiegato per passare dal valore del precarico fino al valore del carico totale possano incidere sul risultato della misura.

Le procedure che definiscono le scale Rockwell superficiali indicano sia il tempo che deve essere impiegato per applicare il carico aggiuntivo sia il valore della velocità finale di applicazione del carico ovvero il valore di velocità finale come precedentemente definito nel paragrafo 2.1.

Si è deciso di condurre delle prove utilizzando per ogni scala Rockwell superficiale, un valore inferiore e uno superiore di tempo e velocità rispetto a quanto stabilito dalla procedura e il tempo e la velocità indicati dalla procedura stessa.

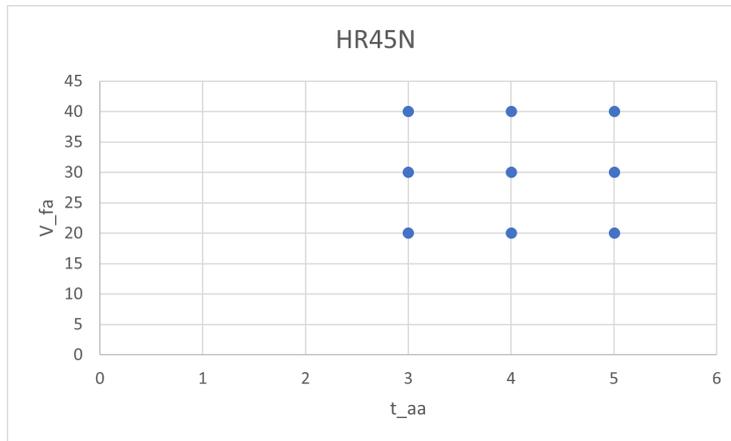
Si è cercato, per quanto possibile, di mantenere conformi a quanto stabilito dalla procedura tutti gli altri parametri.

Nei grafici di **figura [3.1]** sono indicate le combinazioni di tempi di applicazione del carico aggiuntivo e velocità finale di indentazione scelti per le tre scale HR45N, HR30N e HR15N. Per ogni valore di tempo di applicazione del

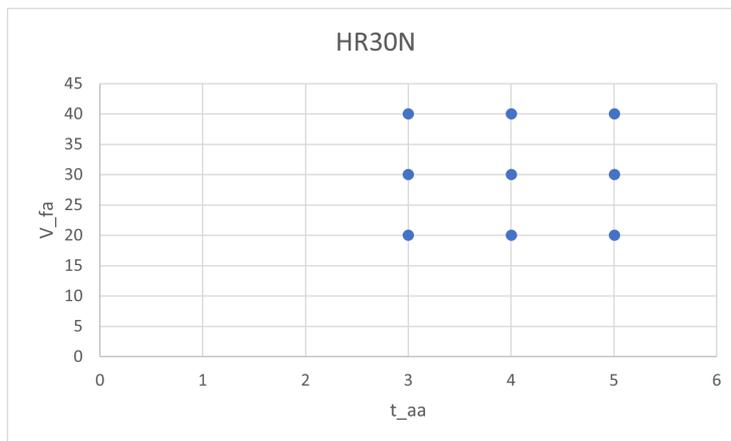
carico vengono eseguite tre prove con i tre diversi valori di velocità finale.

Come si è visto nel paragrafo 2.1 relativo ai parametri di set del durometro, è possibile impostare sia la velocità iniziale che quella finale di applicazione del carico aggiuntivo nonché le due percentuali del carico totale in cui si vuole ottenere la variazione di velocità. E' stato possibile ottenere i valori scelti di tempo di applicazione del carico aggiuntivo e velocità finale di applicazione del carico variando opportunamente la velocità iniziale di applicazione del carico e la percentuale del carico totale in cui far avvenire i cambi di velocità. Infatti quando si ha una combinazione di tempo di applicazione lungo e velocità finale elevata è necessario impostare una velocità iniziale piccola e viceversa nel caso in cui si ha un tempo di applicazione breve e una velocità finale piccola.

Nei grafici di **figura [3.2]** sono mostrate le combinazioni di tempi e velocità ottenuti nelle prove sperimentali. Ogni valore è dato dalla media dei valori ricavati dalle tre misure effettuate nelle tre zone del provino (come descritto nel paragrafo 3.4). Come si può osservare, si è riusciti ad ottenere delle combinazioni di valori che si avvicinano molto a quelli che si è scelto di utilizzare mostrati nei grafici di **figura [3.1]**.



(a)

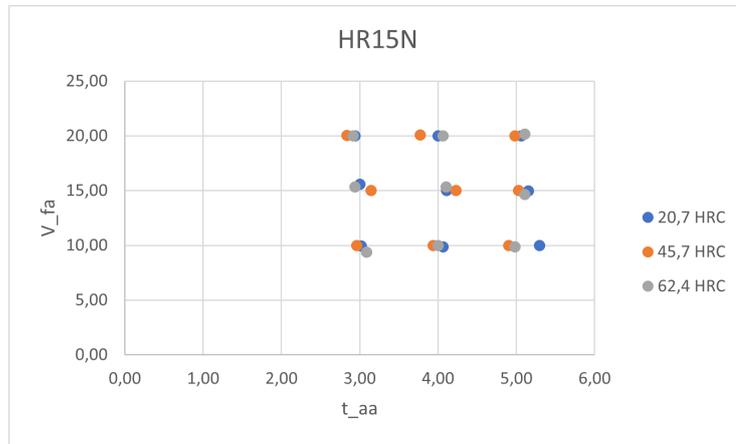


(b)

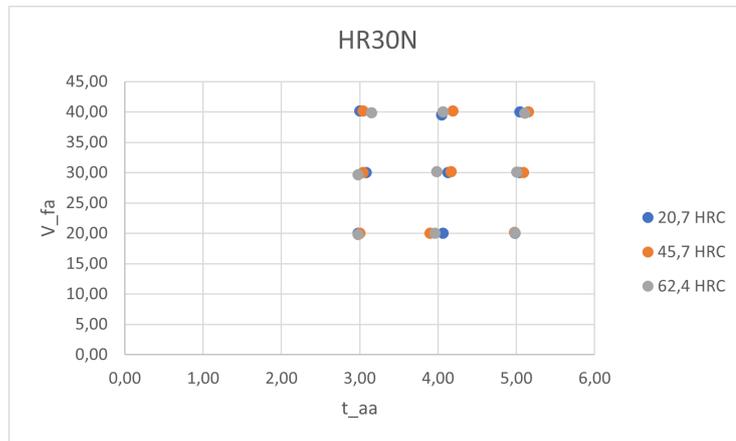


(c)

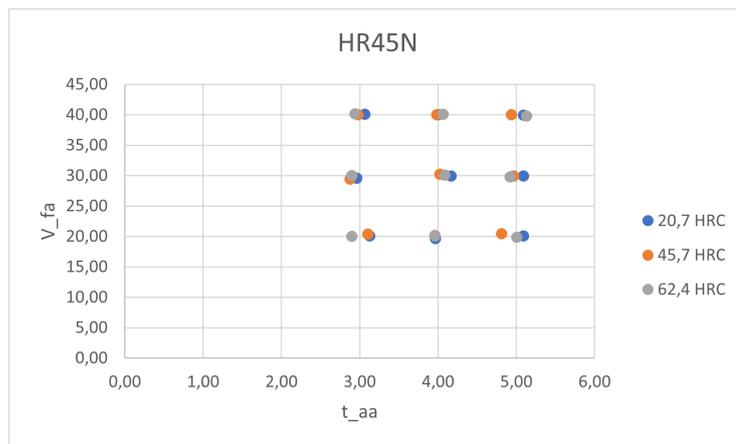
Figura 3.1: Combinazioni tempo di applicazione del carico aggiuntivo - velocità finale di applicazione del carico (valori scelti per le prove sperimentali)



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2: Combinazioni tempo di applicazione del carico aggiuntivo - velocità finale di applicazione del carico (valori ottenuti con le prove sperimentali)

3.2 Prove preliminari

Le prove preliminari sono le prove necessarie per trovare dei valori di set dei parametri del durometro in corrispondenza dei quali si ottengono i valori di output che definiscono il ciclo di carico richiesto.

Queste misure sono state eseguite su tre provini in parte già indentati, ovvero utilizzati per eseguire misure per un altro lavoro sperimentale, ma sui quali era presente sufficiente spazio per eseguire tutte le prove preliminari.

Questa fase del lavoro è quella che ha richiesto un tempo maggiore rispetto alle fasi successive che hanno riguardato l'esecuzione delle misure sperimentali e l'analisi ed elaborazione dei dati. Il motivo di ciò sta nel fatto che non essendo disponibili dati di precedenti misure di durezza superficiale è stato necessario eseguire un gran numero di prove per trovare i valori dei parametri di set del durometro.

Queste prove sono state condotte su tre provini aventi durezza nominale espressa nella scala C Rockwell pari a 64,3 HRC, 40,2 HRC e 20 HRC. In **figura [3.3]** sono mostrate le foto dei provini utilizzati per le prove preliminari.



Figura 3.3: Foto dei provini utilizzati per le prove preliminari

3.3 Valori dei parametri per le prove sperimentali

Si riportano per le tre scale Rockwell superficiali HR45N, HR30N e HR15N i valori dei parametri che sono stati scelti per condurre le prove sperimentali. Tutti i valori eccetto il tempo di applicazione del carico aggiuntivo e velocità finale di applicazione del carico, sono stati scelti in base alle definizioni operative per condurre le prove di durezza nelle tre scale. Per ogni scala viene quindi mostrata anche la corrispondente definizione operativa.

3.3.1 HR45N

In figura [3.4] è mostrata la tabella con i parametri che definiscono la prova di durezza della scala HR45N.

Reference values for HR45N				
Symbol	Test parameter	Reference value	Start measurement	Stop measurement
F_0	Preliminary test force	29,419 95 N ¹	-	-
F	Total test force	441,299 25 N ¹	-	-
α	Included angle of the indenter cone (between surface axial-plane line segments)	120°	Line segment start: $\pm 30^\circ$ (from the axis) ²	Line segment end: 400 μm on conical surface
r	Spherical tip radius of the indenter	200 μm	-30° (from the axis) ²	+30° (from the axis) ²
t_{pa}	Application time of preliminary test force	0,2 s $\leq t_{pa} \leq$ 2 s	$\sim 1\% F_0$	$\sim 99\% F_0$
t_{pd}	Duration time of constant preliminary test force before initial measurement	(3 - $t_{pa}/2$) s	$\sim 99\% F_0$	Measurement
t_{aa}	Application time of additional test force	≤ 4 s ³	$\sim 101\% F_0$	$\sim 99\% F$ (loading)
v_{fa}	Mean indentation velocity of final additional test force application	30 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\sim 80\% F$	$\sim 99\% F$
t_{td}	Duration time of total test force	5 s	$\sim 99\% F$ (loading)	$\sim 99\% F$ (unloading)
t_{ar}	Removal time of additional test force	≤ 2 s	$\sim 99\% F$ (unloading)	$\sim 101\% F_0$
t_{rd}	Duration time of recovery force before final measurement	4 s	$\sim 101\% F_0$	Measurement
T	Temperature of test	23 °C	Start of test	End of test
<p>¹ The defined values of preliminary test force and total test force are the SI equivalents of the original Rockwell hardness method-defined forces of 3 kgf and 45 kgf, respectively, converted to N by multiplying the kgf values by the conversion factor 9,806 65.</p> <p>² These dimensions define the theoretical points of blend between the spherical tip and conical surface of the diamond indenter (see Figure 2). The actual points of blend are usually different; therefore, the blend areas should not be included in the measurement of the tip radius or cone angle.</p> <p>³ The value of t_{aa} is dependent on the hardness of the material under test. The stated range of ≤ 4 s is to maintain compliance with consensus standards.</p>				

Figura 3.4: Definizione scala Rockwell superficiale HR45N

Di seguito vengono indicati i valori scelti per le prove sperimentali della scala HR45N.

- $t_{pa} = 2$ s
- $t_{pd} = 2$ s
- $t_{aa} = 3$ s; $t_{pa} = 4$ s; $t_{pa} = 5$ s
- $V_{fa} = 20$ μms ; $V_{fa} = 30$ μms ; $V_{fa} = 40$ μms
- $t_{td} = 5$ s
- $t_{ar} = 2$ s
- $t_{rd} = 4$ s

3.3.2 HR30N

In figura [3.5] è mostrata la tabella con i parametri che definiscono la prova di durezza della scala HR30N.

Di seguito vengono indicati i valori scelti per le prove sperimentali della scala HR30N.

Reference values for HR30N				
Symbol	Test parameter	Reference value	Start measurement	Stop measurement
F_0	Preliminary test force	29,419 95 N ¹	-	-
F	Total test force	294,199 5 N ¹	-	-
α	Included angle of the indenter cone (between surface axial-plane line segments)	120°	Line segment start: $\pm 30^\circ$ (from the axis) ²	Line segment end: 400 μm on conical surface
r	Spherical tip radius of the indenter	200 μm	-30° (from the axis) ²	$+30^\circ$ (from the axis) ²
t_{pa}	Application time of preliminary test force	$0,2 \text{ s} \leq t_{pa} \leq 2 \text{ s}$	$\sim 1\% F_0$	$\sim 99\% F_0$
t_{pd}	Duration time of constant preliminary test force before initial measurement	$(3 - t_{pa}/2) \text{ s}$	$\sim 99\% F_0$	Measurement
t_{aa}	Application time of additional test force	$\leq 4 \text{ s}$ ³	$\sim 101\% F_0$	$\sim 99\% F$ (loading)
V_{fa}	Mean indentation velocity of final additional test force application	30 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\sim 80\% F$	$\sim 99\% F$
t_{td}	Duration time of total test force	5 s	$\sim 99\% F$ (loading)	$\sim 99\% F$ (unloading)
t_{ar}	Removal time of additional test force	$\leq 2 \text{ s}$	$\sim 99\% F$ (unloading)	$\sim 101\% F_0$
t_{rd}	Duration time of recovery force before final measurement	4 s	$\sim 101\% F_0$	Measurement
T	Temperature of test	23 °C	Start of test	End of test

¹ The defined values of preliminary test force and total test force are the SI equivalents of the original Rockwell hardness method-defined forces of 3 kgf and 30 kgf, respectively, converted to N by multiplying the kgf values by the conversion factor 9,806 65.

² These dimensions define the theoretical points of blend between the spherical tip and conical surface of the diamond indenter (see Figure 2). The actual points of blend are usually different; therefore, the blend areas should not be included in the measurement of the tip radius or cone angle.

³ The value of t_{aa} is dependent on the hardness of the material under test. The stated range of $\leq 4 \text{ s}$ is to maintain compliance with consensus standards.

Figura 3.5: Definizione scala Rockwell superficiale HR30N

- $t_{pa} = 2 \text{ s}$
- $t_{pd} = 2 \text{ s}$
- $t_{aa} = 3 \text{ s}; t_{pa} = 4 \text{ s}; t_{pa} = 5 \text{ s}$
- $V_{fa} = 20 \mu\text{m/s}; V_{fa} = 30 \mu\text{m/s}; V_{fa} = 40 \mu\text{m/s}$
- $t_{td} = 5 \text{ s}$
- $t_{ar} = 2 \text{ s}$
- $t_{rd} = 4 \text{ s}$

3.3.3 HR15N

In figura [3.6] è mostrata la tabella con i parametri che definiscono la prova di durezza della scala HR15N.

Di seguito vengono indicati i valori scelti per le prove sperimentali della scala HR15N.

- $t_{pa} = 2 \text{ s}$
- $t_{pd} = 2 \text{ s}$
- $t_{aa} = 3 \text{ s}; t_{pa} = 4 \text{ s}; t_{pa} = 5 \text{ s}$

Reference values for HR15N				
Symbol	Test parameter	Reference value	Start measurement	Stop measurement
F_0	Preliminary test force	29,419 95 N ¹	-	-
F	Total test force	147,099 75 N ¹	-	-
α	Included angle of the indenter cone (between surface axial-plane line segments)	120°	Line segment start: $\pm 30^\circ$ (from the axis) ²	Line segment end: 400 μm on conical surface
r	Spherical tip radius of the indenter	200 μm	-30° (from the axis) ²	$+30^\circ$ (from the axis) ²
t_{pa}	Application time of preliminary test force	$0,2 \text{ s} \leq t_{pa} \leq 2 \text{ s}$	$\sim 1\% F_0$	$\sim 99\% F_0$
t_{pd}	Duration time of constant preliminary test force before initial measurement	$(3 - t_{pa}/2) \text{ s}$	$\sim 99\% F_0$	Measurement
t_{aa}	Application time of additional test force	$\leq 4 \text{ s}$ ³	$\sim 101\% F_0$	$\sim 99\% F$ (loading)
V_{fa}	Mean indentation velocity of final additional test force application	15 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\sim 80\% F$	$\sim 99\% F$
t_{td}	Duration time of total test force	5 s	$\sim 99\% F$ (loading)	$\sim 99\% F$ (unloading)
t_{ar}	Removal time of additional test force	$\leq 2 \text{ s}$	$\sim 99\% F$ (unloading)	$\sim 101\% F_0$
t_{rd}	Duration time of recovery force before final measurement	4 s	$\sim 101\% F_0$	Measurement
T	Temperature of test	23 °C	Start of test	End of test
<p>¹ The defined values of preliminary test force and total test force are the SI equivalents of the original Rockwell hardness method-defined forces of 3 kgf and 15 kgf, respectively, converted to N by multiplying the kgf values by the conversion factor 9,806 65.</p> <p>² These dimensions define the theoretical points of blend between the spherical tip and conical surface of the diamond indenter (see Figure 2). The actual points of blend are usually different; therefore, the blend areas should not be included in the measurement of the tip radius or cone angle.</p> <p>³ The value of t_{aa} is dependent on the hardness of the material under test. The stated range of $\leq 4 \text{ s}$ is to maintain compliance with consensus standards.</p>				

Figura 3.6: Definizione scala Rockwell superficiale HR15N

- $V_{fa} = 10 \mu\text{m/s}$; $V_{fa} = 15 \mu\text{m/s}$; $V_{fa} = 20 \mu\text{m/s}$
- $t_{td} = 5 \text{ s}$
- $t_{ar} = 2 \text{ s}$
- $t_{rd} = 4 \text{ s}$

3.4 Preparazione dei provini per le prove sperimentali

La durezza nominale del provino può variare sia muovendosi dal centro verso la circonferenza incisa sullo stesso ad indicare il confine entro il quale è possibile eseguire le misure sia circonferenzialmente ovvero muovendosi lungo il perimetro di una qualsiasi circonferenza di dato raggio.

Per tale ragione la superficie dei provini è stata divisa, usando un comune pennarello, un goniometro ed un righello, in tre settori circolari ed in tre corone circolari aventi raggio medio crescente partendo dal centro del provino, ovvero si sono ottenuti nove settori sui quali eseguire le misure.

Si è ritenuto opportuno eseguire tre misure per ogni combinazione di velocità finale e tempo di applicazione del carico, a tre diversi valori di raggio e nei tre diversi settori circolari, in modo che mediando i valori così ottenuti si ottiene un unico valore di durezza che rappresenta la durezza media misurata del provino.

Il provino è stato inizialmente diviso, usando il goniometro, in tre settori circolari tracciando tre raggi disposti a 120° l'uno dall'altro. Per dividere il provino nelle tre corone circolari si è inizialmente calcolata l'area totale della superficie utile del provino, si è divisa quest'area per tre in modo da ottenere per ogni corona la stessa superficie per eseguire le misure ed in seguito si sono calcolati i corrispondenti raggi per tracciare le tre circonferenze.

Si riportano di seguito i valori geometrici trovati e le formule utilizzate per il calcolo dei raggi.

$$\text{Diametro provino: } D_p = 56 \text{ mm}$$

$$\text{Area provino: } A_p = \pi \cdot (D_p/2)^2 = 2463 \text{ mm}^2$$

$$\text{Area corona circolare: } A_s = A_p/3 = 821 \text{ mm}^2$$

$$\text{Raggio 1: } r_1 = \sqrt{A_s/\pi} = 16,16 \text{ mm}$$

$$\text{Raggio 2: } r_2 = \sqrt{A_s/\pi + r_1^2} = 22,86 \text{ mm}$$

$$\text{Raggio 3: } r_3 = \sqrt{A_s/\pi + r_2^2} = 28 \text{ mm}$$

Per il calcolo dei raggi r_2 e r_3 si è utilizzata la formula per il calcolo dell'area di una corona circolare.

In **figura [3.7]** sono mostrate le foto dei provini utilizzati per le prove spe-

3.4 Preparazione dei provini per le prove sperimentali **Capitolo 3**

rimentali in cui sono stati tracciati i raggi e le circonferenze in modo da dividere la superficie nei diversi settori su cui eseguire le misure.



Figura 3.7: Foto dei provini suddivisi in settori

Capitolo 4

Analisi dei dati

4.1 Coefficienti di sensibilità

I coefficienti di sensibilità sono stati calcolati mediante la funzione REGR.LIN di Excel. Tramite questa funzione vengono calcolati oltre ai coefficienti di sensibilità, che non sono altro che i coefficienti del modello di regressione multipla, anche i valori di errore standard degli stessi coefficienti. I coefficienti di sensibilità rappresentano, nel modello di regressione multipla, costituito nel nostro caso dai due regressori tempo totale di applicazione del carico aggiuntivo (t_{aa}) e velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo (V_{fa}), la variazione della durezza per effetto della variazione unitaria di uno dei due regressori mantenendo l'altro costante.

Di seguito viene riportato il modello di regressione lineare utilizzato.

$$z = A + Bx + Cy$$

in cui z è la variabile dipendente, A è l'intercetta, ovvero l'intersezione del piano rappresentato dall'equazione del modello con l'asse z delle durezza, x e y sono le variabili indipendenti (regressori) e B e C rappresentano rispettivamente l'inclinazione di z rispetto alla variabile x mantenendo costante la y e l'inclinazione di z rispetto alla variabile y mantenendo costante la x .

Il modello può essere riscritto utilizzando la simbologia precedentemente usata per indicare i diversi parametri.

$$H = a V_{fa} + b t_{aa} + cost$$

in cui a e b sono i coefficienti di sensibilità che possono essere espressi mediante le seguenti relazioni

$$a = \left. \frac{\partial H}{\partial V_{fa}} \right|_{t_{aa}=const}$$

$$b = \left. \frac{\partial H}{\partial t_{aa}} \right|_{V_{fa}=const}$$

Di seguito vengono illustrati i grafici dei coefficienti di sensibilità in funzione della durezza nominale dei provini utilizzati nelle prove (durezza espressa nella scala Rockwell C). Nei grafici viene inoltre rappresentato l'errore standard associato ad ogni coefficiente di sensibilità mediante delle barre verticali.

4.1.1 Scala HR15N

In figura [4.1] è riportato il grafico che mostra, per il parametro tempo di applicazione del carico aggiuntivo t_{aa} , i coefficienti di sensibilità e gli errori standard associati, in funzione della durezza nominale HR15N dei provini utilizzati nelle prove sperimentali, per la scala HR15N.

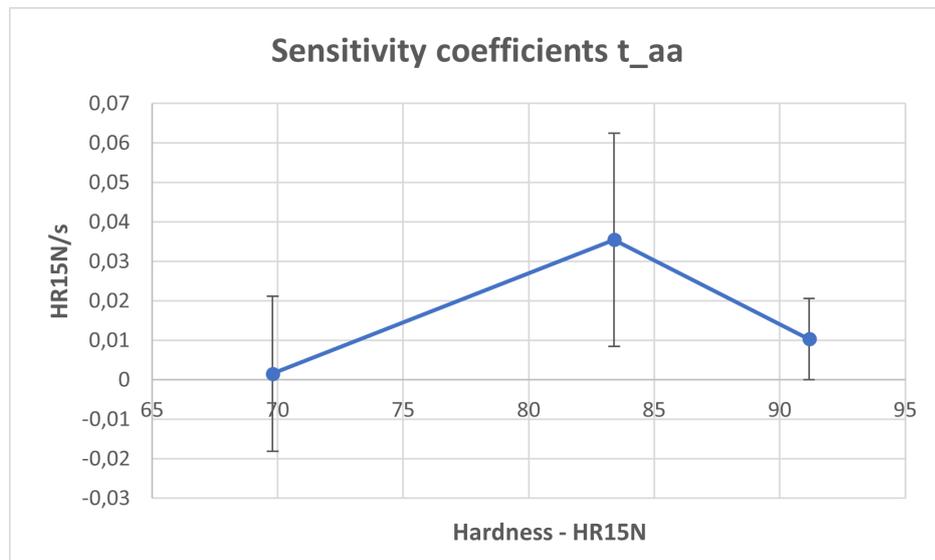


Figura 4.1: Coefficienti di sensibilità per il tempo t_{aa} di applicazione del carico aggiuntivo

Si può osservare come tutti e tre i coefficienti siano positivi e quindi incrementando il tempo t_{aa} di applicazione del carico aggiuntivo il valore di durezza misurato dovrebbe aumentare. Considerati però gli errori standard associati ai coefficienti relativi a valori di bassa ed elevata durezza, non si può

affermare che essi siano effettivamente coefficienti positivi, in quanto, come si vede chiaramente dal grafico, potrebbero anche essere negativi o nulli.

Il coefficiente di sensibilità per valori di bassa durezza risulta molto piccolo e ciò potrebbe indicare che il tempo di applicazione del carico non incida particolarmente ai bassi valori di durezza.

Gli errori standard associati sono elevati per tutti e tre i coefficienti ed in particolar modo per quello relativo alla media durezza.

In **figura [4.2]** è riportato il grafico che mostra, per il parametro velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo V_{fa} , i coefficienti di sensibilità e gli errori standard associati, in funzione della durezza nominale HR15N dei provini utilizzati nelle prove sperimentali, per la scala HR15N.

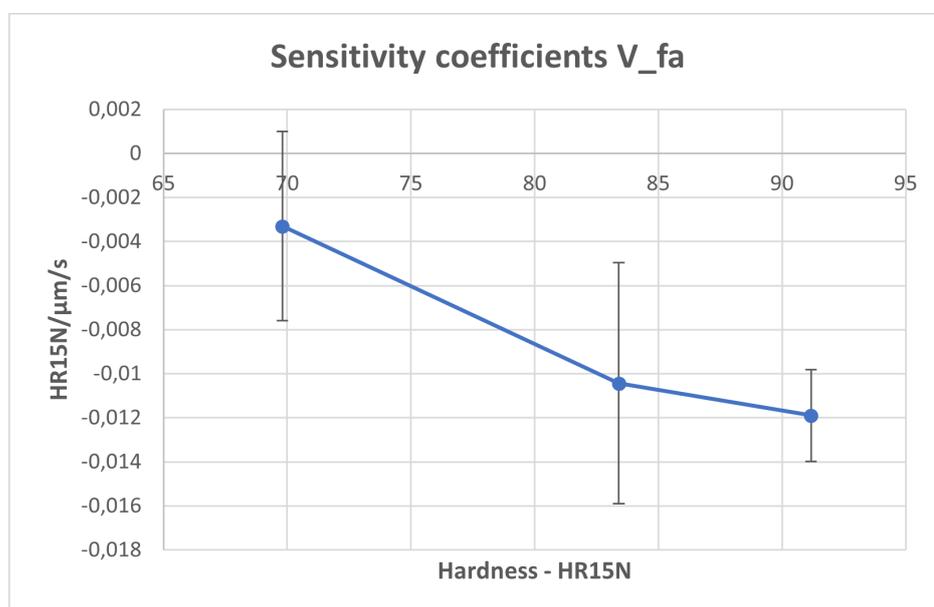


Figura 4.2: Coefficienti di sensibilità per la velocità finale V_{fa} di applicazione del carico aggiuntivo

Tutti i coefficienti risultano negativi e pertanto aumentando la velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo il valore di durezza misurato dovrebbe diminuire.

Gli errori standard associati sono elevati per tutti e tre i coefficienti ed in particolar modo, come nel caso del tempo di applicazione del carico, per quello di media durezza.

Il coefficiente per valori di bassa durezza è piccolo e considerato l'errore standard associato potrebbe risultare anche positivo.

A differenza dei coefficienti trovati per il tempo di applicazione del carico, in questo caso si ha un decremento monotono all'aumentare della durezza,

che può significare che la velocità finale di applicazione del carico incide maggiormente per valori di elevata durezza.

4.1.2 Scala HR30N

In **figura [4.3]** è riportato il grafico che mostra, per il parametro tempo di applicazione del carico aggiuntivo t_{aa} , i coefficienti di sensibilità e gli errori standard associati, in funzione della durezza nominale HR30N dei provini utilizzati nelle prove sperimentali, per la scala HR30N.

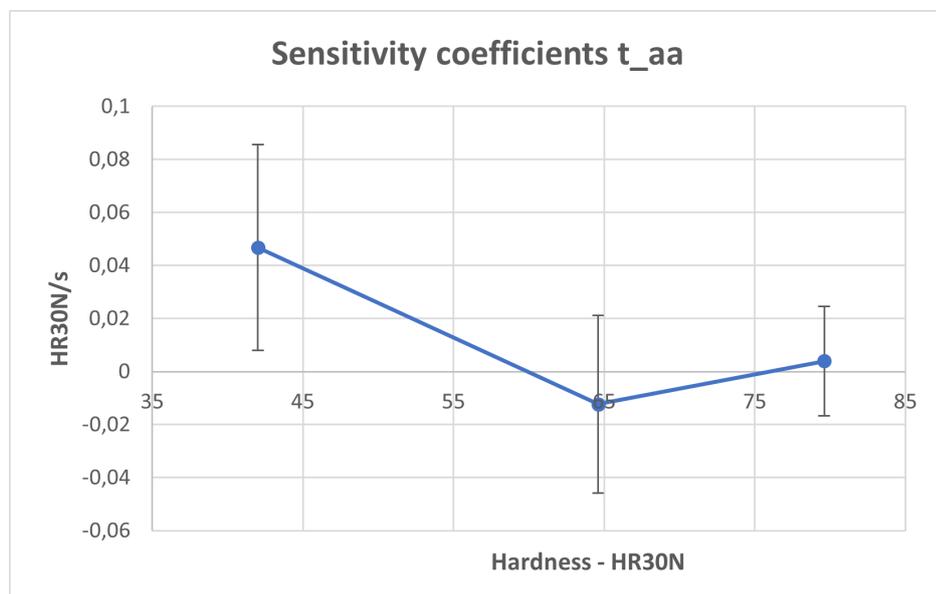


Figura 4.3: Coefficienti di sensibilità per il tempo t_{aa} di applicazione del carico aggiuntivo

I coefficienti, tenuto conto degli errori standard associati, potrebbero essere tutti positivi oppure quello relativo ai valori di bassa durezza positivo e gli altri positivi o negativi.

Gli errori standard associati sono tutti elevati ed in particolare per quello relativo ai valori di bassa durezza.

In **figura [4.4]** è riportato il grafico che mostra, per il parametro velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo V_{fa} , i coefficienti di sensibilità e gli errori standard associati, in funzione della durezza nominale HR30N dei provini utilizzati nelle prove sperimentali, per la scala HR30N.

Tutti i coefficienti risultano negativi, eccetto quello relativo alle basse durezza che potrebbe anche essere nullo.

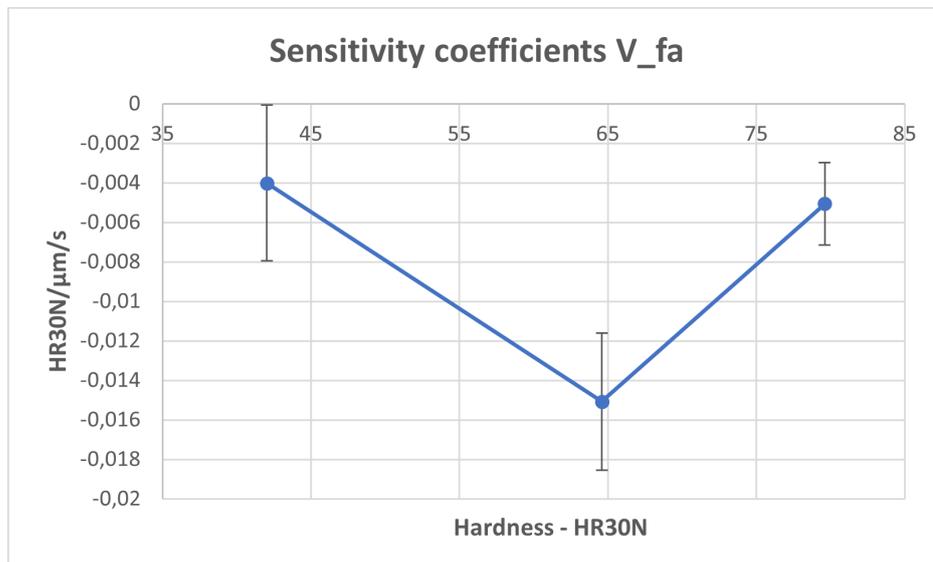


Figura 4.4: Coefficienti di sensibilità per la velocità finale V_{fa} di applicazione del carico aggiuntivo

4.1.3 Scala HR45N

In **figura [4.5]** è riportato il grafico che mostra, per il parametro tempo di applicazione del carico aggiuntivo t_{aa} , i coefficienti di sensibilità e gli errori standard associati, in funzione della durezza nominale HR45N dei provini utilizzati nelle prove sperimentali, per la scala HR45N.

Il coefficiente relativo ai valori di media durezza è negativo mentre quelli relativi alle basse ed elevate durezze possono essere positivi, negativi o nulli. In **figura [4.6]** è riportato il grafico che mostra, per il parametro velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo V_{fa} , i coefficienti di sensibilità e gli errori standard associati, in funzione della durezza nominale HR45N dei provini utilizzati nelle prove sperimentali, per la scala HR45N.

Il coefficiente relativo alle basse durezze, considerato il suo errore standard, può essere positivo, nullo o negativo mentre gli altri due sono negativi.

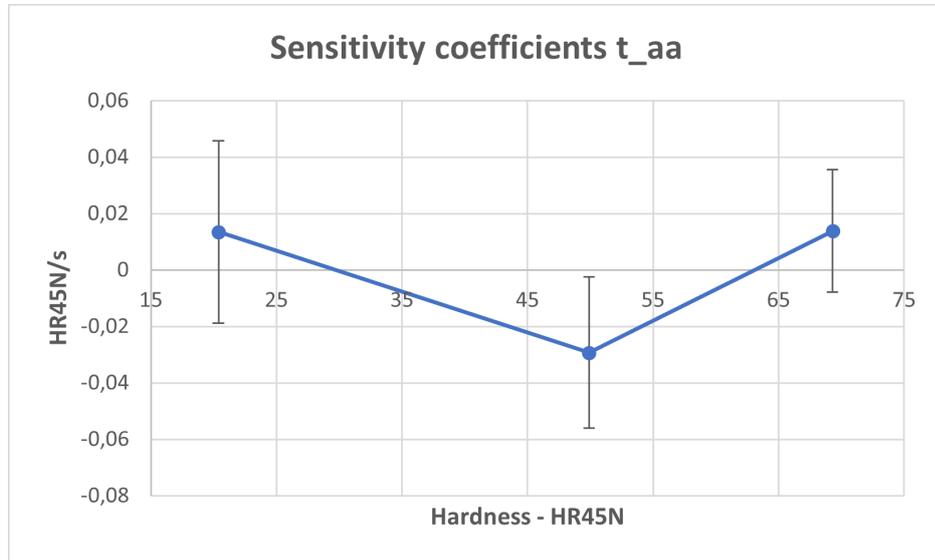


Figura 4.5: Coefficienti di sensibilità per il tempo t_{aa} di applicazione del carico aggiuntivo

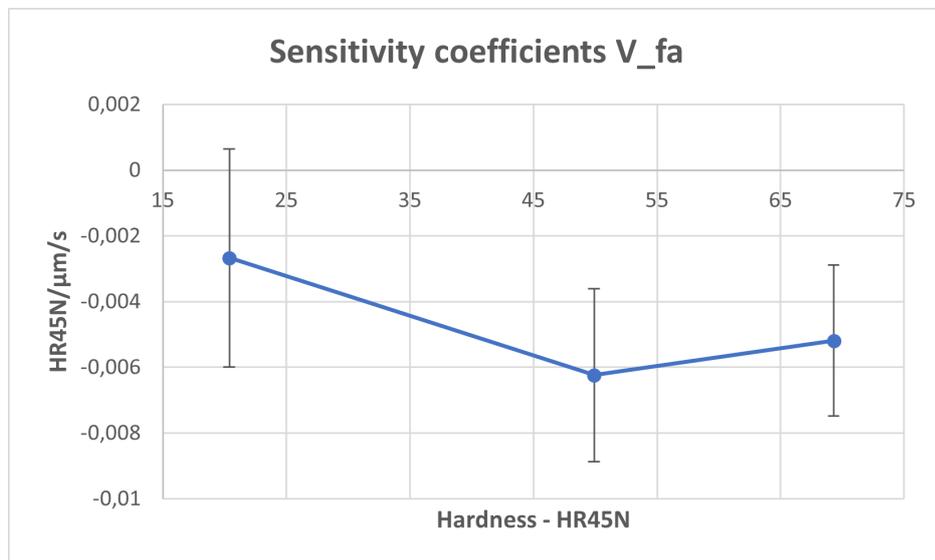


Figura 4.6: Coefficienti di sensibilità per il tempo t_{aa} di applicazione del carico aggiuntivo

4.2 Confronto coefficienti di sensibilità

In questo paragrafo si confrontano i coefficienti di sensibilità relativi al tempo di applicazione del carico aggiuntivo e alla velocità finale di applicazione del carico, discussi nel precedente paragrafo, con quelli rilevati nello studio condotto da Lauren Brice, Samuel Low e Rodney Jiggetts riportato nell'articolo [3]. Il lavoro sperimentale di cui sopra è stato condotto sia presso il National Physical Laboratory a Teddington (UK) che al National Institute of Standards and Technology a Gaithersburg (USA). Lo scopo di tale studio è stato il calcolo dei coefficienti di sensibilità per il tempo di mantenimento del precarico nella fase 3, del carico totale (fase 5), del precarico nella fase 7 nonché per il tempo di applicazione e per la velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo (fase 4), per le scale HRA, HR15N e HR30N.

In particolare per quanto ci interessa, vengono confrontati i coefficienti relativi al tempo e alla velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo, per le scale HR15N e HR30N, con quelli rilevati nelle prove eseguite nei laboratori dell'INRiM, oggetto del presente studio.

Al National Physical Laboratory (NPL) sono state eseguite, per ogni valore del parametro investigato, cinque prove sperimentali, in diverse zone del provino e successivamente è stata fatta la media dei cinque valori di durezza così ottenuti. I valori dei parametri tempo di applicazione del carico aggiuntivo scelti per le prove sono stati 1, 3, 5 e 8 s, mentre per la velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo 10, 20, 30 e 40 μms . Per ogni scala sono stati usati quattro provini aventi differente durezza nominale.

Al National Institute of Standards and Technology (NIST) sono state condotte delle prove simili che hanno però coperto un range maggiore di valori degli stessi parametri. In quest'ultimo studio sono stati utilizzati tre provini aventi differente durezza nominale e non è stato indagato il parametro velocità di applicazione del carico aggiuntivo.

Nelle tabelle di **figura [4.7]** e di **figura [4.8]** sono riportati i coefficienti di sensibilità per il tempo e per la velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo rilevati presso il NPL e il NIST per la scala HR15N e HR30N.

Nel grafico di **figura [4.9]** sono mostrati i coefficienti di sensibilità per il tempo t_{aa} rilevati al NPL (punti blu) e all'INRiM (punti arancioni). Le durezze in questo e nei successivi grafici sono riferite alla scala di riferimento (in questo caso HR15N).

Si può osservare che l'andamento delle due curve che interpolano i coefficienti è lo stesso, ovvero crescente fino al valore di durezza pari a circa 83 HR15N e poi decrescente, inoltre i valori rilevati al NPL e all'INRiM non si discostano molto tra di loro. Tenendo conto dell'errore standard associato a quelli rilevati all'INRiM potrebbe esserci sovrapposizione con quelli rilevati presso

Sensitivity Coefficient t_{aa} (NPL)			
Hardness/HR15N			
68	75	83	92
HR15N/s			
-0,014	0,006	0,019	0,016

(a)

Sensitivity Coefficient V_{fa} (NPL)			
Hardness/HR15N			
68	75	83	92
HR15N/ $\mu\text{m/s}$			
0	0,017	-0,001	-0,02
Sensitivity Coefficient V_{fa} (NIST)			
Hardness/HR15N			
\	72	83	91
HR15N/ $\mu\text{m/s}$			
\	0,001	-0,001	-0,002

(b)

Figura 4.7: Coefficienti di sensibilità per il tempo di applicazione del carico aggiuntivo t_{aa} e per la velocità finale di applicazione del carico V_{fa} per la scala HR30N rilevati presso NPL e NIST

Sensitivity Coefficient t_{aa} (NPL)			
Hardness/HR30N			
39	52	66	81
HR30N/s			
-0,008	-0,005	0,008	0,048

(a)

Sensitivity Coefficient V_{fa} (NPL)			
Hardness/HR30N			
39	52	66	81
HR30N/ $\mu\text{m/s}$			
-0,014	0,007	0,014	-0,001
Sensitivity Coefficient V_{fa} (NIST)			
Hardness/HR30N			
\	45	64	79
HR15N/ $\mu\text{m/s}$			
\	0,0004	-0,003	-0,008

(b)

Figura 4.8: Coefficienti di sensibilità per il tempo di applicazione del carico aggiuntivo t_{aa} e per la velocità finale di applicazione del carico V_{fa} per la scala HR30N rilevati presso NPL e NIST

il NPL.

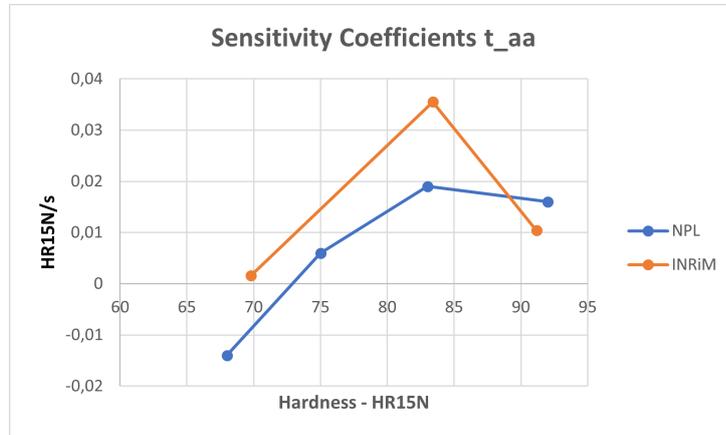


Figura 4.9: Coefficienti di sensibilità per il tempo t_{aa} di applicazione del carico aggiuntivo per la scala HR15N

Nel grafico di **figura [4.10]** sono mostrati i coefficienti di sensibilità per la velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo V_{fa} rilevati al NPL, all'INRiM e al NIST per la scala HR15N.

L'andamento delle curve che interpolano i coefficienti è simile nel caso dei coefficienti rilevati all'INRiM (curva arancione) e al NIST (curva grigia). L'andamento della curva che interpola i coefficienti rilevati al NPL si discosta dalle altre curve. I valori dei coefficienti sono abbastanza vicini tra di loro eccetto quello relativo al valore di durezza pari a 75 HR15N rilevato al NPL.

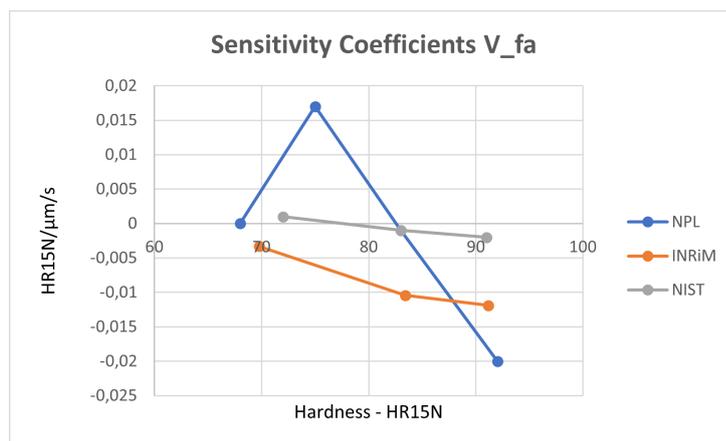


Figura 4.10: Coefficienti di sensibilità per la velocità V_{fa} di applicazione del carico aggiuntivo per la scala HR15N

Nel grafico di **figura [4.11]** sono mostrati i coefficienti di sensibilità per il tempo t_{aa} rilevati al NPL (punti blu) e all'INRiM (punti arancioni) per la scala HR30N.

Gli andamenti delle curve interpolatrici sono differenti ma i valori dei coefficienti rilevati al NPL e all'INRiM sono ragionevolmente vicini tra loro.

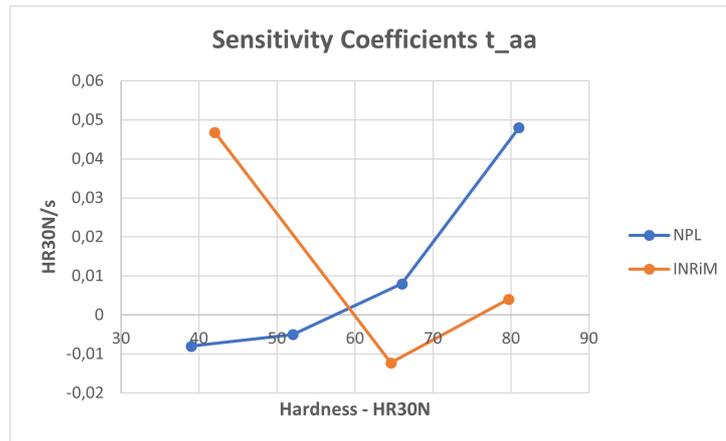


Figura 4.11: Coefficienti di sensibilità per il tempo t_{aa} di applicazione del carico aggiuntivo per la scala HR30N

Nel grafico di **figura [4.12]** sono mostrati i coefficienti di sensibilità per la velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo V_{fa} rilevati al NPL, all'INRiM e al NIST per la scala HR30N.

Gli andamenti delle curve interpolatrici sono differenti ma si può notare come i valori rilevati al NIST e quelli rilevati all'INRiM siano vicini tra loro. Un maggiore scostamento si ha in quelli rilevati al NPL.

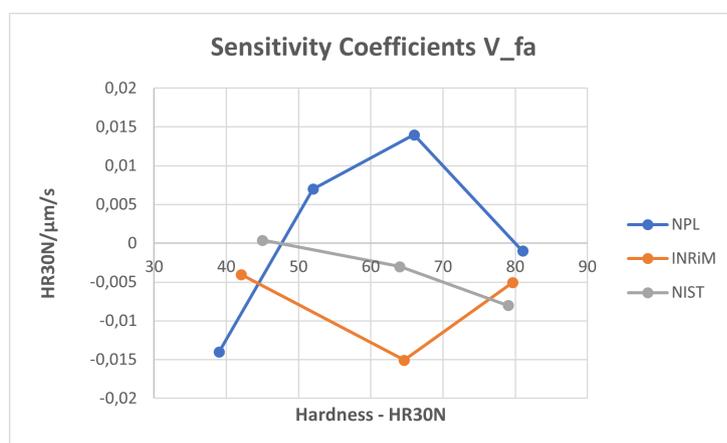


Figura 4.12: Coefficienti di sensibilità per la velocità V_{fa} di applicazione del carico aggiuntivo per la scala HR30N

Capitolo 5

Conclusioni

Come si è precedentemente visto, la misura della durezza di un materiale, espresso tramite una delle trenta scale Rockwell, è il risultato di una prova che deve essere eseguita rispettando le tolleranze, prescritte dalle norme ISO e ASTM, dei parametri operazionali che definiscono la prova stessa.

Il risultato di una prova (o misura) di durezza dipende quindi da numerosi parametri che sono: il livello dei carichi applicati, i tempi di mantenimento o applicazione/rimozione dei carichi, la velocità con cui vengono applicati/rimossi i carichi e le caratteristiche geometriche dell'indentatore utilizzato. Ognuno di questi parametri è affetto da una sua incertezza la quale contribuisce a determinare l'incertezza globale della misura stessa.

I coefficienti di sensibilità forniscono una indicazione della variabilità della misura in relazione a variazioni dei parametri operazionali. Essi esprimono la variazione di durezza che si ottiene al variare del valore di uno specifico parametro operazionale mantenendo costanti tutti gli altri.

Gli stessi coefficienti di sensibilità possono essere usati per apportare correzioni ai valori di durezza misurati laddove il valore di un determinato parametro operazionale si discosta da quello stabilito dalle procedure.

Per le suddette motivazioni il calcolo dei coefficienti di sensibilità è importante ai fini dell'ottenimento di una corretta misura.

Nel lavoro sperimentale si è fatto riferimento ai coefficienti di sensibilità relativi al tempo di applicazione del carico aggiuntivo e alla velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo per le scale Rockwell superficiali HR15N, HR30N e HR45N, in quanto come visto precedentemente, sono tra i parametri operazionali che influiscono maggiormente sulla misura.

Dai valori ottenuti nelle prove sperimentali dei coefficienti di sensibilità, per il range di valori investigati, per i parametri operazionali tempo e velocità di applicazione del carico aggiuntivo, si evince una influenza sulla misura di durezza poco significativa.

Si rileva infine una buona corrispondenza tra i coefficienti rilevati nel presente studio all'INRiM e quelli rilevati presso i laboratori del NPL e del NIST. Si ritiene che la presente sperimentazione possa pertanto fornire un contributo ai fini di una migliore comprensione dei fattori che influenzano la misura nonché una indicazione dei coefficienti di sensibilità che confermano peraltro i dati già forniti da precedenti studi.

La prosecuzione della sperimentazione in questo settore potrà fornire valori ancora più precisi per i coefficienti di sensibilità riferiti ai parametri operazionali che maggiormente influenzano la misura per l'ottenimento di misure sempre più precise nonché per lo sviluppo di strumenti di misura che tengano conto dei suddetti fattori.

Appendice A

Prove Preliminari

Nelle immagini seguenti sono riportati i dati in tabelle Excel delle prove preliminari di cui si è già discusso precedentemente.

Sono stati inseriti nelle tabelle solamente i dati delle prove i cui valori di output si avvicinano a quelli scelti per condurre le prove sperimentali.

Per ogni tabella è indicata la scala Rockwell a cui si riferisce unitamente al valore di durezza nominale (espresso nella scala Rockwell C) del provino utilizzato e il numero di serie del provino stesso.

Per ogni tabella, partendo dalla colonna a sinistra V_{fa} sino alla colonna *Hardness*, ad esclusione delle due colonne in cui sono riportate le due percentuali rispetto al carico totale in cui si verificano i cambi di velocità, sono riportati i valori di output del durometro, ovvero i tempi di applicazione dei carichi e le velocità di indentazione. La simbologia usata per indicare queste colonne è quella della schermata di output del durometro eccetto che per la velocità finale di applicazione del carico indicata, nella prima colonna a sinistra, come V_{fa} . Infatti questa velocità non viene fornita direttamente dal durometro ma deve essere individuata nel grafico Velocità-Tempo.

Dalla colonna *Preload holding* e fino alla colonna *Removal preload* sono riportati i valori di set del durometro. La simbologia utilizzata per indicare le colonne è quella della schermata di set del durometro.

La colonna *carico* riporta i valori del carico letti nel grafico Forza-Tempo, fornito dal durometro al termine della prova di misura, in corrispondenza del secondo cambio di velocità di applicazione del carico aggiuntivo.

Infine la colonna *tempo* V_{fa} riporta l'istante temporale, individuato nel grafico Velocità-Tempo, in cui si è raggiunta la velocità finale di applicazione del carico V_{fa} .

A.1 Scala HR15N

Prove Preliminari Scala HR15N. Provino 20 HRC (491-434)

V_fa	1%	11%	11%	I_ap	I_rp	I_aa	I_dl	I_rf	V_fa	Hardness	Preload holding	Additional load Holding	Gap of the final reading	Preload application	Additional I	Removal additional load	Removal Preload	carico	tempo_V_fa
9.3	10	30	3,11	2,14	3,13	5	4,03	13,6	67,98	2,1	4,9	0,14	0,48	0,03	0,5	0,5	125	30,2	
11	10	30	2,03	2,88	5	4,03	23	67,76	2,1	4,9	0,14	0,49	0,033	0,5	0,5	125	33,92		
10,2	10	30	3,08	2,14	3,13	5,06	4,03	22	67,91	2,1	4,9	0,14	0,49	0,032	0,5	0,5	115	19,24	
9,8	10	30	3,02	2,14	4	5,12	4,03	8,1	68,03	2,1	4,9	0,14	0,4	0,032	0,5	0,5	117	21,04	
10	10	30	3,02	2,14	3,75	4,94	4,02	11,3	68,06	2,1	4,8	0,14	0,4	0,032	0,5	0,5	115	21,88	
11	10	30	3,06	2,13	4,94	4,88	4,03	3,2	67,85	2,1	4,8	0,14	0,25	0,032	0,5	0,5	115	30,42	
9,3	10	30	3,14	2,23	4,94	5,06	4,03	4,6	67,89	2,2	4,9	0,14	0,28	0,032	0,5	0,5	117	33,66	
15,5	10	30	3,08	2,14	3,19	4,88	4,03	19,8	67,85	2,1	4,7	0,14	0,5	0,047	0,5	0,5	100	32,3	
14	10	30	3,03	2,13	2,75	4,94	4,03	27,1	67,9	2,1	4,8	0,14	0,5	0,046	0,5	0,5	115	32,67	
14,7	10	30	3,09	2,13	3	4,94	4,03	26,6	67,84	2,1	4,8	0,14	0,5	0,047	0,5	0,5	105	32,8	
15	10	30	3,11	2,14	2,94	5,06	4,03	7,7	67,92	2,1	4,9	0,14	0,5	0,047	0,5	0,5	110	34,54	
15,4	10	30	2,95	2,02	3,81	5	4,03	14,8	67,75	2	4,7	0,14	0,2	0,047	0,5	0,5	105	23,8	
15,1	10	30	3,05	2,14	3,94	5	4,03	5	67,86	2,1	4,9	0,14	0,6	0,046	0,5	0,5	95	26,8	
15	10	30	3,13	2,13	5	5	4,03	4,3	67,39	2,1	4,7	0,14	0,48	0,047	0,2	0,5	105	30,3	
15,2	10	30	3,05	2,11	4,81	4,94	4	4,7	67,81	2,1	4,8	0,14	0,1	0,046	0,5	0,5	95	25,28	
19,7	15	30	3,08	2,11	3,33	5,12	4	25,4	67,5	2,1	4,7	0,14	0,8	0,26	0,5	0,5	99	15,17	
20	15	30	3,08	2,11	3,06	4,94	4,03	28,9	67,77	2,1	4,6	0,14	0,8	0,26	0,5	0,5	92	16,35	
20	10	30	3,02	2,11	4	5,02	4	3,6	67,73	2,1	4,9	0,14	0,1	0,06	0,5	0,5	100	35,52	
20	10	30	3,05	2,11	3,94	4,88	4,03	11,6	68,04	2,1	4,6	0,14	0,08	0,26	0,5	0,5	100	26,9	
20,3	10	30	3,05	2,11	3,88	5,06	4,03	4,7	67,62	2,1	4,9	0,14	0,05	0,06	0,5	0,5	90	34,3	
20	8	30	3,05	2,11	5,19	5,06	4,03	2,3	67,6	2,1	4,9	0,14	0,05	0,06	0,5	0,5	95	38,16	
20	25	30	3,06	2,13	5,19	5	4,03	15,8	67,66	2,1	4,5	0,14	0,017	0,32	0,5	0,5	104	37,55	
20,3	25	30	3,06	2,13	5,13	5	4,03	15,2	67,36	2,1	4,5	0,14	0,018	0,31	0,5	0,5	112	40,35	

Figura A.1: Tabella prove preliminari scala Rockwell HR15N; provino (491-434) 20 HRC

Prove preliminari Scala HR15N, Provino 40.2 HRC (345-569)																				
V_fa	I%	I%	T_ap	T_pr	T_ala	T_dil	T_f	T_f	V_fall	Hardness	Prelod holding	Additional load Holding	Gap of the final reading	Prelod application	Additional I	Additional II	Removal additional load	Removal Prelod	carico	tempo V_fa
9,8	20	60	3,03	2,03	2,13	5	4,02	6,6	79,06		2		4,7	0,14	0,67	0,16	0,5	0,5	102	17,3
10,5	20	60	3	2,03	2,88	5	4,02	6,2	79,16		2		4,7	0,14	0,68	0,16	0,5	0,5	97	17,35
9,5	20	60	2,99	2,02	3,06	5	4,03	7,5	79,23		2		4,8	0,14	0,68	0,157	0,5	0,5	94	18,25
9,8	20	30	2,94	2	4,13	5	4,03	9,5	79,49		2		4,8	0,14	0,092	0,037	0,5	0,5	115	29,72
10,3	20	30	2,97	2	3,94	5	4,03	8,7	79,81		2		4,8	0,14	0,097	0,038	0,5	0,5	111	35,1
9,9	20	30	2,94	2	4	5	4	19,3	79,62		2		4,8	0,14	0,17	0,038	0,5	0,5	104	27,44
10,1	15	30	2,94	2	5,13	5	4	5,4	79,45		2		4,8	0,14	0,09	0,037	0,5	0,5	112	35,95
10,3	20	30	2,97	2	5,06	5,06	4,03	3,3	79,74		2		4,8	0,14	0,13	0,038	0,5	0,5	98	31,84
15,4	10	30	3,08	2,14	2,81	5	4	5,2	79,58		2,1		4,9	0,14	0,5	0,057	0,5	0,5	83	19,68
15,4	10	30	2,95	2,11	3	5,06	4,03	14,4	79,78		2,1		4,9	0,14	0,53	0,056	0,5	0,5	100	21,96
15,5	10	30	3,08	2,11	4,13	5,12	4	2,4	79,65		2,1		4,9	0,14	0,08	0,057	0,5	0,5	95	31,7
15,6	10	30	3,08	2,14	4,13	4,88	4	3,8	79,61		2,1		4,8	0,14	0,07	0,057	0,5	0,5	85	35
15,2	10	30	3,05	2,14	4,13	5,06	4,03	3,9	79,65		2,1		4,9	0,14	0,07	0,057	0,5	0,5	105	35,85
15	10	30	3,14	2,14	5,06	5	4,03	4,4	79,41		2,1		4,8	0,14	0,6	0,055	0,5	0,5	85	29
14,8	10	30	3	2	5,13	5	4	4,7	79,46		2		4,8	0,14	0,6	0,055	0,5	0,5	85	20,5
15,5	10	30	3,05	2,14	4,88	5	4	2,3	79,66		2,1		4,9	0,14	0,04	0,057	0,5	0,5	95	45,1
15,5	10	30	3,02	2,11	5,06	5,12	4,03	2,6	79,6		2,1		5	0,14	0,04	0,057	0,5	0,5	95	46,22
20,7	10	30	3,08	2,11	2,94	5,06	4,03	20,5	79,7		2,1		4,8	0,14	0,1	0,075	0,5	0,5	95	29,06
20,7	10	30	3,03	2,03	3	5	4,03	10,5	79,65		2		4,8	0,14	0,06	0,073	0,5	0,5	83	32,22
20,4	10	30	2,94	2	3,88	5	4	10,9	79,37		2		4,7	0,14	0,03	0,071	0,5	0,5	85	59,46
20,2	10	30	2,97	2	4	4,94	4	11,4	79,47		2		4,7	0,14	0,027	0,071	0,5	0,5	94	63,22
19,8	15	30	2,94	2	5	5	4	7,3	79,55		2		4,7	0,14	0,01	0,071	0,5	0,5	84	115,96

Figura A.2: Tabella prove preliminari scala Rockwell HR15N; provino (440-451) 64.3 HRC

Prove preliminari Scala HR15N. Provino 64.3 HRC (440-451)

V_fa	l%	l%	T_ap	T_rp	T_apa	T_dil	T_rf	V_fa	Hardness	Preload holding	Additional load Holding	Gap of the final reading	Preload application	Additional I	Additional II	Removal additional load	Removal Preload	carico	tempo V_fa
10.2	40	60	2,99	2,02	3,06	5	4,03	9,3	91,94	2	4,8	4	0,14	0,6	0,07	0,5	0,5	96	28,96
10.2	15	30	2,99	2,02	4,06	5,06	4,03	2,5	91,67	2	4,8	4	0,14	0,4	0,065	0,5	0,5	88	26,92
9.9	15	30	2,95	2,02	4	5,06	4,02	4,5	91,86	2	4,8	4	0,14	0,6	0,065	0,5	0,5	88	27,67
10.2	10	30	3	2,03	5	5,06	4,03	1,5	91,74	2	4,8	4	0,14	0,1	0,068	0,5	0,5	92	38,3
15.5	30	50	2,95	2,02	2,88	5,06	4,03	2,9	91,76	2	4,3	4	0,14	0,09	0,5	0,5	0,5	95	37,7
15.4	40	60	2,99	2,02	4,13	5,06	4,03	13,4	90,93	2	4,5	4	0,14	0,063	0,35	0,5	0,5	96	30,84
15.1	40	60	2,99	2,02	3,94	5,12	4,03	13,6	91,79	2	4,5	4	0,14	0,064	0,35	0,5	0,5	97	32,05
14.3	40	60	2,99	2,02	5,13	4,94	4,03	12,2	91,7	2	4,3	4	0,14	0,046	0,42	0,5	0,5	98	38,92
15	40	60	2,99	2,02	4,88	5	4,03	13	91,74	2	4,3	4	0,14	0,046	0,45	0,5	0,5	96	40,45
20.1	10	30	3,08	2,11	2,88	4,94	4,02	11,5	91,55	2,1	3,8	4	0,14	0,13	0,8	0,5	0,5	98	21,44
20.2	40	55	2,99	2,02	3	5,06	4,02	9,8	91,76	2	3,7	4	0,14	0,11	0,9	0,5	0,5	97	34,55
20.5	40	60	2,99	2,02	4,19	5	4,02	11,9	91,69	2	3,7	4	0,14	0,07	0,9	0,5	0,5	103	40,82
19.5	40	60	2,97	2	3,94	5,06	4	11,8	91,66	2	3,7	4	0,14	0,08	0,9	0,5	0,5	103	41,93
20.3	40	60	3,02	2,02	5,13	4,94	4,02	13,3	91,66	2	3,7	4	0,14	0,06	0,9	0,5	0,5	97	46,75
20.6	40	55	2,95	2,02	4,88	4,94	4,02	12,5	91,62	2	3,8	4	0,14	0,05	0,96	0,5	0,5	103	35,75
20.6	40	57	2,99	2,02	4,94	5	4	12,2	91,63	2	3,8	4	0,14	0,05	0,96	0,5	0,5	93	37,32

Figura A.3: Tabella prove preliminari scala Rockwell HR15N; provino (491-434) 20 HRC

A.2 Scala HR30N

Prove Preliminari Scala HR30N - Provino 20 HRC (491-434)

V. Ba	I. %	I. %	I. ap	I. aa	I. di	I. f	I. f	I. f	Hardness	Preload holding	Additional lead Holding	Gap of the final reading	Preload application	Additional I	Additional III	Removal additional load	Removal Preload	Approaching velocity	carico	tempo V. fa
155	60	80	2,97	2	3,13	4,88	4	16,4	38,96	2	4,3	4	0,14	0,3	0,45	0,5	0,5	0,05	260	17,81
156	60	80	3,02	2,02	3,13	5	4	20,2	39,14	2	4,4	4	0,14	0,05	0,45	0,5	0,5	0,05	263	20,56
157	60	80	2,97	2	2,94	5,06	4	19	38,83	2	4,4	4	0,14	0,32	0,46	0,5	0,5	0,05	249	23,83
20	60	80	3	2	4,19	5,12	4	17,5	39,31	2	4,4	4	0,14	0,14	0,45	0,5	0,5	0,05	261	25,8
20	60	80	3,03	2	4,06	5	4	18,6	39,04	2	4,3	4	0,14	0,163	0,45	0,5	0,5	0,05	258	38,7
19,6	60	80	3	2	5	5,06	4,02	19,9	39,26	2	4,4	4	0,14	0,125	0,45	0,5	0,5	0,05	261	22,31
30,7	40	70	3,05	2,02	2,84	4,84	4	27,4	39,5	2	4,7	4	0,14	0,8	0,06	0,5	0,5	0,08	215	24,125
30,7	13	60	2,97	2	4,06	5	4,02	15,3	39,17	2	4,7	4	0,14	0,6	0,098	0,5	0,5	0,08	180	25
30,7	15	60	2,97	2	3,94	5	4,02	16	39,29	2	4,7	4	0,14	0,6	0,098	0,5	0,5	0,08	89	36
30,5	10	30	3,05	2,02	5,13	5,06	4,02	25,2	39,09	2	4,8	4	0,14	0,8	0,095	0,5	0,5	0,05	133	19,45
30,5	10	30	2,99	2,02	5	5,06	4	26,5	39,27	2	4,8	4	0,14	0,8	0,097	0,5	0,5	0,05	155	20,7
40,7	15	60	2,95	2,02	2,81	5,19	4	23,7	39,45	2	4,7	4	0,14	0,4	0,3	0,5	0,5	0,08	175	24,2
40,7	15	60	2,99	2,02	2,81	5	4,02	24,9	39,38	2	4,5	4	0,14	0,4	0,3	0,5	0,5	0,08	178	25,687
40,7	15	60	2,96	2	3	5	4	23,4	39,28	2	4,5	4	0,14	0,39	0,3	0,5	0,5	0,08	182	26,937
40,7	15	60	3	2	3,88	4,94	4,02	34,9	39,71	2	4,5	4	0,14	0,22	0,3	0,5	0,5	0,08	187	32,96
39,4	30	80	3,09	2,13	4,94	5,06	4	9,4	39,18	2,1	4,7	4	0,14	0,127	0,18	0,5	0,5	0,08	170	18,375
40	30	80	3,08	2,11	4,94	5	4	7,7	39,24	2,1	4,7	4	0,14	0,153	0,13	0,5	0,5	0,05	174	35,05

Figura A.4: Tabella prove preliminari scala Rockwell HR30N; provino (491-434) 20 HRC

Prove Preliminari Scala HR30N, Provino 40.8 HRC (490-902)																				
V fa	1%	1%	T ap	T rp	T aa	T dl	T rl	V fa	Hardness	Preload holding	Additional load holding	Gap of the final reading	Preload application	Additional I	Additional II	Removal additional load	Removal preload	Approaching velocity	carico	tempo V fa
19	25	80	2,97	2	3	5,06	4,02	18,3	58,68	2	4,2	4	0,14	0,18	0,57	0,5	0,5	0,08	243	34
20,5	25	80	3,02	2,02	2,94	5,06	4	21	58,52	2	4,2	4	0,14	0,18	0,57	0,5	0,5	0,08	235	33,88
20,5	20	80	2,99	2,02	3,19	5	4	20,3	58,36	2	4,2	4	0,14	0,18	0,57	0,5	0,5	0,08	233	25
20	20	80	3,02	2,02	4,19	5	4	19,8	58,17	2	4,2	4	0,14	0,18	0,52	0,5	0,5	0,08	230	31,33
20,5	20	80	3,02	2,02	4,06	4,88	4	18,8	58,18	2	4,2	4	0,14	0,14	0,52	0,5	0,5	0,08	233	31,7
21	20	80	3	2	4,88	4,94	4	20,4	58,29	2	4,2	4	0,14	0,1	0,54	0,5	0,5	0,08	231	30,26
20,5	20	80	3,02	2,02	4,88	5	4,02	19,4	58,23	2	4,2	4	0,14	0,1	0,52	0,5	0,5	0,08	232	31,88
30 ?	20	80	2,99	2,02	3,19	5,12	4	23	58,16	2	4,1	4	0,14	0,23	0,7	0,5	0,5	0,08	224	21,4
30 ?	20	70	3	2	3,28	5,19	4	24,4	58,6	2	4,1	4	0,14	0,15	0,75	0,5	0,5	0,08	205	35
30 ?	20	65	3,02	2,02	3,28	5,12	4,02	25,4	58,49	2	4	4	0,14	0,11	0,83	0,5	0,5	0,08	200	28,415
30 ?	20	65	2,99	2,02	3,81	5	4	26	58,52	2	3,9	4	0,14	0,11	0,83	0,5	0,5	0,08	197	29,66
30 ?	20	68	2,95	2,02	3,88	5,06	4,02	27,3	58,44	2	3,9	4	0,14	0,11	0,83	0,5	0,5	0,08	202	31,41
30 ?	20	68	2,97	2	4	5	4	?	58,53	2	3,9	4	0,14	0,105	0,83	0,5	0,5	0,08	211	20,75
30,5 ?	20	70	3,05	2,02	5	5	4	25,4	58,3	2	3,9	4	0,14	0,08	0,82	0,5	0,5	0,08	210	24,072
30 ?	20	70	3	2	5,19	5,06	4	25,5	58,35	2	3,9	4	0,14	0,08	0,82	0,5	0,5	0,08	206	25,14
30 ?	20	70	2,97	2	5,19	5,12	4	26,1	58,24	2	3,9	4	0,14	0,08	0,825	0,5	0,5	0,08	209	26,7
40 ?	20	60	2,99	2,02	3,06	5,19	4,02	38,3	58,26	2	3,8	4	0,14	0,17	0,9	0,5	0,5	0,08	173	24,74
40 ?	20	60	2,97	2	3,06	5,19	4,02	35,3	58,25	2	3,8	4	0,14	0,165	0,9	0,5	0,5	0,08	185	25,9
40 ?	20	60	2,99	2,02	4,06	5,25	4	34,2	58,5	2	3,9	4	0,14	0,1	0,9	0,5	0,5	0,08	182	29,3
40 ?	20	60	3	2	3,84	5	4,02	34,8	58,34	2	3,8	4	0,14	0,1	0,9	0,5	0,5	0,08	183	30,9
40,5	50	70	3	2	5,19	5	4,02	3,3	58,55	2	4,7	4	0,14	0,16	0,99	0,5	0,5	0,03	147	36,45
39,5	25	80	3,14	2,11	5,08	5,12	4	14,7	58,5	2	2,1	4	0,14	0,11	0,99	0,5	0,5	0,03	140	46,56
40,2	25	80	3,09	2,13	4,94	5	4	15,7	58,52	2	4,4	4	0,14	0,11	0,99	0,5	0,5	0,03	150	50,18

Figura A.5: Tabella prove preliminari scala Rockwell HR30N; provino (490-902) 40.8 HRC

Prove Preliminari Scala HR30N. Provino 64.3 HRC (440-451)

V_fa	F	%	I	%	I	%	T_ap	T_rp	T_aa	T_dl	T_rf	V_fall	Hardness	Preload holding	Additional load Holding	Gap of the final reading	Preload application	Additional I	Additional II	Removal additional load	Removal Preload	Approaching velocity	critico	Tempo V_fa
20,8	10	70	2,95	2,02	5,18	5,06	4,02	11,8	80,56	2	4,5	4,5	80,56	2	4,5	4	0,14	0,3	0,38	0,5	0,5	0,08	210	20,8
20,8	10	70	3,02	2,02	5,06	5	4,03	11,8	80,76	2	4,4	4,4	80,76	2	4,4	4	0,14	0,3	0,38	0,5	0,5	0,08	205	24,23
20,8	10	70	3,01	2,02	3,81	4,94	4,03	7,3	80,87	2	4,4	4,4	80,87	2	4,4	4	0,14	0,25	0,3	0,5	0,5	0,08	213	27,3
20,8	10	70	2,99	2,02	3,88	4,94	4,03	7,3	81,1	2	4,4	4,4	81,1	2	4,4	4	0,14	0,25	0,28	0,5	0,5	0,08	205	28,5
20,8	10	70	3	2,03	4	4,94	4,02	7,2	81,14	2	4,4	4,4	81,14	2	4,4	4	0,14	0,23	0,28	0,5	0,5	0,08	208	30
20,8	10	70	3	2,03	4,88	5	4,02	8,2	80,85	2	4,5	4,5	80,85	2	4,5	4	0,14	0,15	0,28	0,5	0,5	0,08	207	33,1
20,4	10	70	3	2,03	4,94	5	4,03	8,2	81,15	2	4,5	4,5	81,15	2	4,5	4	0,14	0,15	0,27	0,5	0,5	0,08	206	38,48
29,5	20	50	3,08	2,14	3,08	4,94	4	16,8	81,11	2,1	4,6	4,6	81,11	2	4,6	4	0,14	0,55	0,2	0,5	0,5	0,08	142	22,3
30	20	50	2,94	2	5	4	16,6	81,21	2	2	4,6	4,6	81,21	2	4,6	4	0,14	0,55	0,2	0,5	0,5	0,08	141	23,5
30	20	60	2,97	2	4	4,94	4,03	14,6	80,96	2	4,4	4,4	80,96	2	4,4	4	0,14	0,13	0,3	0,5	0,5	0,08	164	44
30	20	60	3	2	4,94	5,06	4,03	10,6	80,86	2	4,4	4,4	80,86	2	4,4	4	0,14	0,1	0,35	0,5	0,5	0,08	169	47,6
40	20	60	3,03	2,03	3,35	4,94	4	13,7	80,95	2	3,9	3,9	80,95	2	3,9	4	0,14	0,14	0,73	0,5	0,5	0,08	167	35,6
40	20	60	3	2	3	4,94	4	20,3	80,99	2	3,9	3,9	80,99	2	3,9	4	0,14	0,15	0,73	0,5	0,5	0,08	163	37,95
40	20	50	2,97	2	4,13	5,06	4	34,4	80,8	2	3,9	3,9	80,8	2	3,9	4	0,14	0,09	0,85	0,5	0,5	0,08	134	26
40	20	50	2,97	2	3,94	5,12	4,03	31,7	80,97	2	3,9	3,9	80,97	2	3,9	4	0,14	0,097	0,85	0,5	0,5	0,08	140	27,4
40	25	40	2,97	2,03	4,88	5,12	4	40,3	80,82	2	4,3	4,3	80,82	2	4,3	4	0,14	0,08	0,52	0,5	0,5	0,08	110	29,4
40	25	40	2,96	2	4,88	4,94	4	40,3	80,86	2	4,2	4,2	80,86	2	4,2	4	0,14	0,08	0,52	0,5	0,5	0,08	110	30,5

Figura A.6: Tabella prove preliminari scala Rockwell HR30N; provino (440-451) 64.3 HRC

A.3 Scala HR45N

Prove Preliminari Scala HR45N, Provino 20 HRC (491-434)																				
V_fa	%H	II	%	I_sp	T_rp	T_aa	T_dl	T_rf	V_faI	Hardness	Preload holding	Additional load Holding	Gap of the final reading	Preload application	Additional I	Additional II	Removal additional load	Removal Preload	carico	tempo_V_fa
22	35	80	3	2.03	3.06	5	4.02	20.4	18.97	2	4.6	4	0.14	0.15	0.085	0.3	0.5	340	26.8	
22	30	70	3	2	3.63	4.94	4	23.6	19.17	2	4.6	4	0.14	0.19	0.08	0.5	0.5	316	30.42	
20.4	30	70	3.03	2.03	3.44	4.94	4	24.3	19.11	2	4.6	4	0.14	0.19	0.09	0.5	0.5	311	28.87	
21	30	70	3	2.03	3	5	4.03	20.8	18.92	2	4.6	4	0.14	0.17	0.078	0.3	0.5	300	19.1	
21	30	70	3.03	2	4.19	4.88	4	22.6	18.47	2	4.6	4	0.14	0.12	0.09	0.5	0.5	307	28.555	
19.5	35	80	3.02	2.02	4	4.94	4.03	22.5	18.41	2	4.6	4	0.14	0.12	0.09	0.5	0.5	308	29.9	
19.8	30	70	3.03	2	5.69	4.88	4.03	21.8	18.78	2	4.6	4	0.14	0.08	0.09	0.5	0.5	310	30.305	
20.8	30	70	3.03	2	5.5	4.94	4	21.8	18.51	2	4.6	4	0.14	0.08	0.09	0.5	0.5	308	29.059	
20.5	40	80	3.03	2.03	4.94	4.03	20.3	18.99	2	4.6	4	0.14	0.065	0.09	0.3	0.5	350	36.1		
40	30	70	3.05	2.02	2.94	5	4.03	38.2	18.82	2	4.6	4	0.14	0.14	0.17	0.5	0.5	315	27.687	
39.6	30	70	3.05	2.02	3.06	5	4.03	37.8	18.77	2	4.6	4	0.14	0.14	0.17	0.5	0.5	312	26.562	
40	30	80	3.06	2.13	3	5	4.03	30.8	18.46	2.1	4.4	4	0.14	0.13	0.18	0.3	0.5	350	29.65	
39.8	30	70	3.03	2.03	4.06	5	4.02	39.4	18.41	2	4.6	4	0.14	0.09	0.18	0.5	0.5	318	35.375	
39.8	30	70	3.03	2.03	4.06	5	4.02	39.1	18.5	2	4.6	4	0.14	0.09	0.18	0.5	0.5	318	34.75	
40.5	60	80	2.94	2	4.06	4.94	4	37.1	18.57	2	4.3	4	0.14	0.075	0.27	0.3	0.5	350	28.4	
39.5	60	80	3.14	2.14	4.94	5.06	4.03	36.3	18.7	2.1	4.4	4	0.14	0.065	0.24	0.3	0.5	350	30.92	
41	60	80	2.99	2.02	5	5.12	4.03	38.5	18.61	2	4.4	4	0.14	0.065	0.27	0.3	0.5	350	28.7	
41	60	80	3.02	2.05	4.94	5	4	38	18.52	2	4.3	4	0.14	0.065	0.27	0.3	0.5	350	30	
29.2	30	70	3.06	2.03	2.69	4.94	4.03	31.8	18.94	2	4.6	4	0.14	0.155	0.13	0.5	0.5	315	30.433	
29	30	70	3.02	2.02	2.94	4.94	4.02	32.2	18.92	2	4.6	4	0.14	0.155	0.13	0.5	0.5	308	29.81	
30.5	30	70	3.03	2.03	2.94	5.06	4.03	29.4	18.8	2	4.6	4	0.14	0.15	0.12	0.3	0.5	300	21.8	
31	30	70	3.02	2.02	3.87	4.94	4.02	30.8	18.63	2	4.6	4	0.14	0.1	0.13	0.5	0.5	317	27.935	
30.5	30	70	3	2.03	4.19	4.94	4.03	30.7	18.88	2	4.6	4	0.14	0.09	0.13	0.5	0.5	311	30.125	
29	30	70	3	2.03	4.06	5.06	4.02	29.2	18.81	2	4.6	4	0.14	0.1	0.12	0.3	0.5	310	26.8	
29.6	30	70	3.02	2.02	5.38	4.94	4.03	30.4	18.46	2	4.6	4	0.14	0.07	0.13	0.5	0.5	314	27.556	
30.6	30	70	3.02	2.02	5	4.94	4.03	30.4	18.51	2	4.6	4	0.14	0.07	0.13	0.5	0.5	312	41.812	
29	30	70	2.97	2.03	5	4.94	4.02	28.9	18.77	2	4.5	4	0.14	0.057	0.124	0.3	0.5	310	31.92	

Figura A.7: Tabella prove preliminari scala Rockwell HR45N; provino (491-434) 20 HRC

Prove Preliminari Scala HR45N, Provino 40.2 HRC (345-569)																				
V_fa	I%	II%	T_spd	T_ip	T_sa	T_dl	T_f	V_fa1	Hardness	Preload holding	Additional load holding	Gap of the final reading	Preload application	Additional I	Additional II	Removal additional load	Removal Preload	carico	tempo V_fa	
20	30	70	3.06	2.03	3	5	4.02	22.2	42.97	2	4.6	4	0.14	0.17	0.1	0.3	0.3	0.5	318	29.64
20	30	70	3.02	2.02	2.88	5	4.02	21.9	42.86	2	4.6	4	0.14	0.17	0.1	0.3	0.3	0.5	311	29.05
20.3	30	80	3.06	2.13	2.81	5	4.03	18.3	42.8	2.1	4.6	4	0.14	0.15	0.11	0.3	0.3	0.5	350	36.4
20.5	30	70	3.06	2.03	4	5	4.02	20.2	42.79	2	4.6	4	0.14	0.085	0.1	0.3	0.3	0.5	312	28.575
20.5	30	70	3.05	2.02	4.12	5	4.02	20.3	42.93	2	4.6	4	0.14	0.08	0.1	0.3	0.3	0.5	310	31.687
21	80	80	3.02	2.11	4.19	5	4.02	19.4	42.54	2.1	4.3	4	0.14	0.08	0.26	0.3	0.5	0.5	350	46
19.8	30	70	3.03	2.03	5.88	5.06	4.03	20.1	42.59	2	4.6	4	0.14	0.073	0.1	0.3	0.3	0.5	314	31.31
20.1	30	70	3.05	2.02	4.94	5.06	4.02	19.9	42.79	2	4.6	4	0.14	0.07	0.1	0.3	0.3	0.5	310	32.312
20.5	55	80	3.08	2.14	4.88	5	4.02	19.4	42.61	2.1	4.5	4	0.14	0.067	0.13	0.3	0.3	0.5	350	41.3
31	35	80	2.86	1.83	2.88	4.94	4.02	20.1	41.6	1.8	4.4	4	0.12	0.14	0.18	0.3	0.3	0.5	350	35
30	30	80	2.97	1.91	2.88	4.94	4	21.7	42.26	1.9	4.4	4	0.12	0.14	0.17	0.3	0.3	0.5	340	35.4
30	35	80	2.88	1.91	2.81	4.88	4	20.8	41.83	1.9	4.4	4	0.14	0.14	0.16	0.3	0.3	0.5	340	36.2
30	20	80	3.05	2.11	3.06	5.12	4	19.5	42.3	2.1	4.5	4	0.14	0.13	0.17	0.3	0.5	0.5	350	22.5
30	20	80	3.05	2.11	2.88	4.94	4.02	20.7	42.5	2.1	4.4	4	0.14	0.13	0.17	0.3	0.3	0.5	340	23
29.5	55	90	2.94	1.84	4.13	4.94	4	7.4	42.8	1.8	4.2	4	0.1	0.08	0.3	0.3	0.5	0.5	380	37.45
31	50	90	3.06	1.81	4.06	5	4	6.2	42.65	1.8	4.2	4	0.1	0.08	0.3	0.3	0.5	0.5	380	38.4
31	50	90	2.95	2.02	3.75	4.81	4.02	7.2	42.48	2	4.2	4	0.14	0.08	0.26	0.3	0.3	0.5	380	32.2
30.5	55	75	3.03	2.13	4.13	5	4.02	29.2	42.96	2.1	4.4	4	0.14	0.06	0.21	0.3	0.3	0.5	340	57.6
29.9	30	70	3.01	2.01	5	5.06	4	30.6	42.66	2	4.7	4	0.14	0.06	0.17	0.5	0.5	0.5	312	35.265
31.75	30	70	3	2	5	5.06	4.01	30.6	42.77	2	4.7	4	0.14	0.06	0.17	0.5	0.5	0.5	312.5	29.265
30	60	80	3.06	2.13	4.81	4.88	4.03	28.3	42.83	2.1	4.3	4	0.135	0.065	0.23	0.3	0.3	0.5	350	49
39	25	80	3.11	2.14	3.25	5.06	4	23.7	42.95	2.1	4.4	4	0.14	0.1	0.27	0.3	0.3	0.5	350	35
41.5	25	80	3.11	2.11	3.06	5.12	4.03	22.2	42.89	2.1	4.4	4	0.14	0.105	0.27	0.3	0.3	0.5	350	35.7
40.5	25	80	3.08	2.11	3	5	4.03	22.3	42.97	2.1	4.3	4	0.14	0.105	0.27	0.3	0.3	0.5	350	27.7
40.6	30	70	3.02	2.02	3.94	5	4.02	38.1	42.63	2	4.3	4	0.14	0.075	0.25	0.3	0.3	0.5	309	32.812
40.8	30	70	3.02	2.02	4.05	5.06	4.02	38.8	42.8	2	4.3	4	0.14	0.075	0.25	0.3	0.3	0.5	330	31.937
39.5	60	75	3.06	2.13	4.13	5.12	4.03	38.5	42.43	2.1	4.3	4	0.14	0.06	0.3	0.3	0.3	0.5	330	43.3
40	30	70	3.02	2.05	4.81	5	4.05	38.6	42.81	2	4.3	4	0.14	0.06	0.25	0.3	0.3	0.5	311.5	30.25
40.6	30	70	3.02	2.05	4.87	5	4.05	35.6	42.84	2	4.3	4	0.14	0.06	0.25	0.3	0.3	0.5	320	31.685
39	60	75	3.08	2.14	4.84	5.06	4.02	38.6	42.48	2.1	4.2	4	0.14	0.06	0.3	0.3	0.5	0.5	340	43.9

Figura A.8: Tabella prove preliminari scala Rockwell HR45N; provino (345-569) 40.2 HRC

Prove Preliminari Scala HR45N. Provino 64.3 HRC (440-451)																			
V_fa	I%	II%	T_ap	T_rp	T_sa	T_dl	T_rf	V_fa1	Hardness	Preload holding	Additional load Holding	Gap of the final reading	Preload application	Additional I	Additional II	Removal additional load	Removal Preload	carico	tempo V_fa
20	30	70	3.11	2.14	2.94	5	4.03	19.9	71.1	2.1	4.5	4	0.14	0.1	0.14	0.3	0.5	300	29.94
20	30	70	2.94	2.03	3.06	5	4.03	20	71.21	2	4.5	4	0.14	0.1	0.14	0.3	0.5	310	31.36
20	30	70	2.94	2.03	3	4.94	4.03	19.8	70.92	2	4.6	4	0.14	0.075	0.14	0.3	0.5	310	36.22
20	30	70	3.03	2.03	4	4.94	4	19.8	70.97	2	4.6	4	0.14	0.08	0.14	0.5	0.5	312	33.65
20	30	70	2.97	2	3.94	4.94	4	19.8	71.08	2	4.6	4	0.14	0.08	0.14	0.5	0.5	307	35.045
20	30	70	3.03	2.03	4.13	5	4.03	19.9	71.07	2	4.5	4	0.14	0.05	0.14	0.3	0.5	310	37.06
19.8	30	70	3	2.03	4.94	4.94	4.03	19.6	71.06	2	4.6	4	0.14	0.06	0.14	0.5	0.5	316	31.67
19.8	30	70	2.94	2	5	5	4.03	19.4	70.96	2	4.6	4	0.14	0.06	0.14	0.5	0.5	316	32.545
20	30	70	2.92	2.02	4.81	5	4.03	19.6	71.1	2	4.5	4	0.14	0.045	0.14	0.3	0.5	300	44.3
30	30	70	3.05	2.01	2.94	5.06	4.01	27.4	70.99	2	4.6	4	0.14	0.1	0.24	0.5	0.5	307	30.02
29.1	30	70	2.95	2.01	2.94	5.06	4	29.1	71.11	2	4.6	4	0.14	0.1	0.26	0.5	0.5	324	25.89
30	35	70	2.99	2.02	3	4.94	4.03	28	70.88	2	4.3	4	0.14	0.085	0.23	0.3	0.5	310	32.42
30.2	30	70	3.03	2.03	4.13	5.06	4.03	25.9	70.98	2	4.6	4	0.14	0.07	0.26	0.5	0.5	320	33.265
30.1	30	70	2.97	2	4.12	5.06	4.01	27.1	71.03	2	4.6	4	0.14	0.07	0.26	0.5	0.5	318	27.015
30	50	70	3.06	2.13	4	4.94	4.03	29.5	71	2.1	4.3	4	0.14	0.06	0.24	0.3	0.5	300	26.74
30	30	70	3.08	2.01	5.06	5.12	4.01	27	70.91	2	4.6	4	0.14	0.05	0.26	0.5	0.5	316	39.77
30.5	40	70	3.03	2.13	4.83	5.02	4.02	30.3	70.92	2.1	4.3	4	0.14	0.04	0.25	0.5	0.5	300	38.85
29	50	70	3.02	2.14	5.06	5	4.03	28.7	70.72	2.1	4.3	4	0.14	0.04	0.25	0.3	0.5	310	40.98
39	30	70	3	2.03	3.13	5.06	4.03	33.5	70.23	2	4.1	4	0.14	0.08	0.37	0.3	0.5	290	33.2
40	30	70	3.01	2.01	3.12	5	4	36	71.11	2	4.3	4	0.14	0.08	0.44	0.5	0.5	309	29.75
40	25	70	3	2.03	2.94	5.06	4.02	28.3	70.84	2	4.1	4	0.14	0.08	0.37	0.3	0.5	310	33.75
40	40	70	3.05	2.14	4.13	5	4.02	31.1	70.71	2.1	3.9	4	0.14	0.05	0.42	0.3	0.5	300	48.8
39.85	30	70	3.01	2.01	3.81	5	4.01	34.1	70.95	2	4.3	4	0.14	0.05	0.45	0.5	0.5	370	42.703
41	30	70	3.06	2.13	3.94	5	4.03	30	70.69	2.1	3.9	4	0.14	0.05	0.43	0.3	0.5	300	35.74
39.5	30	70	3.06	2.13	5.13	4.94	4.02	33.2	70.6	2.1	3.9	4	0.14	0.04	0.39	0.3	0.5	300	46.6
40	30	70	3	2	5.19	5.06	4	34.4	70.84	2	4.4	4	0.14	0.04	0.45	0.5	0.5	319	43.8
39.5	30	65	3.08	2.14	5.06	4.94	4.02	39.2	70.73	2.1	4	4	0.14	0.04	0.37	0.3	0.5	300	50.3

Figura A.9: Tabella prove preliminari scala Rockwell HR45N; provino (440-451) 64.3 HRC

Appendice B

Prove Sperimentali

Nelle immagini seguenti sono riportate le definizioni delle scale Rockwell superficiali HR15N, HR30N e HR45N e le tabelle Excel in cui sono presenti i dati delle prove sperimentali e le tabelle in cui gli stessi sono stati elaborati. Le prime tre tabelle di ogni sotto-appendice riportano i valori di set e output del durometro delle prove sperimentali.

In particolare, la prima colonna partendo da sinistra *Conf#* indica il numero progressivo delle misure. La seconda e terza colonna, V_{fa}^* e t_{aa}^* , riportano i valori della velocità finale di applicazione del carico aggiuntivo e il tempo di applicazione del carico aggiuntivo previsti dal piano sperimentale ai fini dell'effettuazione delle prove.

Dalla colonna *Appr. vel.* fino alla colonna *Removal preload* sono riportati i valori di set del durometro e la simbologia usata per indicare le diverse colonne è quella della schermata di set del durometro.

Dalla colonna V_{fa} fino alla colonna *Hardness* sono riportati i valori di output forniti dal durometro, di cui alcuni letti direttamente nella schermata di output e altri individuati nei grafici Forza-Tempo e Velocità-Tempo forniti dal durometro al termine di ogni prova.

Nelle tre tabelle intitolate *Medie Prove Sperimentali* sono riportate le medie dei valori di output del durometro. Sono state eseguite, come già detto, per ogni combinazione di tempo e velocità, tre misure in tre diversi settori del provino.

Nelle tre tabelle intitolate *Range Prove Sperimentali* sono riportati i valori massimi e minimi di tutti i parametri di output forniti dal durometro per le tre misure eseguite su diversi settori del provino per ogni combinazione di tempo e velocità. Oltre al valore massimo e minimo nelle colonne *RANGE* è indicata la differenza tra il valore massimo e minimo per ogni parametro.

B.1 Scala HR15N

Rockwell Hardness HR15N Scale Definition

Reference values for HR15N				
Symbol	Test parameter	Reference value	Start measurement	Stop measurement
F_0	Preliminary test force	29,419 95 N ¹	-	-
F	Total test force	147,099 75 N ¹	-	-
α	Included angle of the indenter cone (between surface axial-plane line segments)	120°	Line segment start: $\pm 30^\circ$ (from the axis) ²	Line segment end: 400 μ m on conical surface
r	Spherical tip radius of the indenter	200 μ m	-30° (from the axis) ²	$+30^\circ$ (from the axis) ²
t_{ps}	Application time of preliminary test force	$0,2 \text{ s} \leq t_{ps} \leq 2 \text{ s}$	$\sim 1 \% F_0$	$\sim 99 \% F_0$
t_{pd}	Duration time of constant preliminary test force before initial measurement	$(3 - t_{ps}) \text{ s}$	$\sim 99 \% F_0$	Measurement
t_{sa}	Application time of additional test force	$\leq 4 \text{ s}^3$	$\sim 101 \% F_0$	$\sim 99 \% F$ (loading)
v_{fa}	Mean indentation velocity of final additional test force application	15 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\sim 80 \% F$	$\sim 99 \% F$
t_{td}	Duration time of total test force	5 s	$\sim 99 \% F$ (loading)	$\sim 99 \% F$ (unloading)
t_{ur}	Removal time of additional test force	$\leq 2 \text{ s}$	$\sim 99 \% F$ (unloading)	$\sim 101 \% F_0$
t_{rd}	Duration time of recovery force before final measurement	4 s	$\sim 101 \% F_0$	Measurement
T	Temperature of test	23 °C	Start of test	End of test

¹ The defined values of preliminary test force and total test force are the SI equivalents of the original Rockwell hardness method-defined forces of 3 kgf and 15 kgf, respectively, converted to N by multiplying the kgf values by the conversion factor 9,806 65.

² These dimensions define the theoretical points of blend between the spherical tip and conical surface of the diamond indenter (see Figure 2). The actual points of blend are usually different; therefore, the blend areas should not be included in the measurement of the tip radius or cone angle.

³ The value of t_{sa} is dependent on the hardness of the material under test. The stated range of $\leq 4 \text{ s}$ is to maintain compliance with consensus standards.

Figure 1. Illustrations of the applied force and the resulting indentation-depth occurring during the HR15N test cycle.

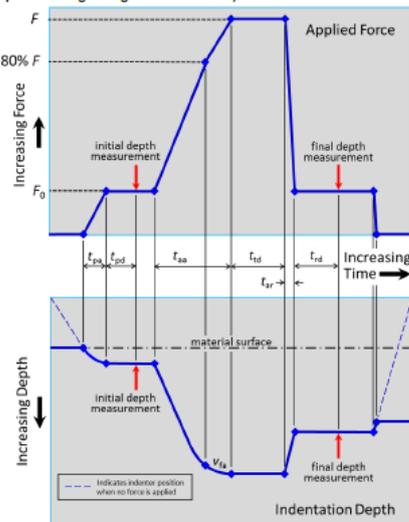


Figure 2. Illustration of the axial cross-section of an ideally-shaped diamond indenter indicating the dimensions specified above and the theoretical points of blend between the spherical tip and conical surface.

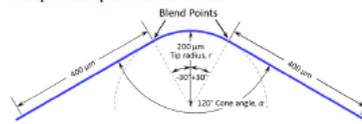


Figura B.1: Definizione scala Rockwell superficiale HR15N

Cont#		V _{gr}	t _{aan}	Appr. vel.	Preded appl.	Add. I	Add. II	%-III%	Preded loading	Add. load	Cap final reading	Removal add. load	Removal preded.	V _{fr}	t _{ap}	t _{cp}	t _{ca}	t _{df}	V _{fd}	final load	time f. load	time f. vel.	Hardness	
1	10	3	0,08	0,14	0,17	0,1	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	10	3,06	2,13	2,94	5	4,03	2,7	88	32,89	34,1	82,67
2	10	3	0,08	0,14	0,17	0,1	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	10	3,09	2,13	2,94	5	4,03	2,4	88	34,796	36,05	82,68
3	10	3	0,08	0,14	0,17	0,1	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	10	3,11	2,14	2,94	5	4,03	2,8	88	34,671	35,9	82,72
4	10	4	0,08	0,14	0,15	0,1	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	10	3,08	2,14	4,06	4,94	4,02	1,5	88	20,171	21,9	82,58
5	10	4	0,08	0,14	0,15	0,1	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	10	3,06	2,13	3,94	5	4,03	1,7	88,5	21,484	23,1	82,58
6	10	4	0,08	0,14	0,15	0,1	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	10	3,06	2,13	3,81	5	4,02	1,7	88,5	22,671	24,4	82,66
7	10	5	0,08	0,14	0,03	0,1	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	10	3,08	2,14	4,94	5	4,02	2,2	88	50,859	52,2	82,72
8	10	5	0,08	0,14	0,03	0,1	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	10	3,05	2,14	4,88	5	4,03	2,5	88	48,984	50,3	82,71
9	10	5	0,08	0,14	0,03	0,1	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	10	3,06	2,13	4,88	5	4,02	2,3	88	50,171	51,6	82,63
10	15	3	0,08	0,14	0,15	0,14	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	15	3,08	2,14	2,88	5,06	4	2,9	88	35,531	36,45	82,58
11	15	3	0,08	0,14	0,15	0,14	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	15	3,05	2,14	3,31	5,06	4,03	3,1	88	38,281	39,5	82,4
12	15	3	0,08	0,14	0,15	0,14	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	15	3,08	2,14	3,25	5	4	2,9	87,7	39,031	40,16	82,57
13	15	4	0,08	0,14	0,028	0,14	30-60	2,1	4,6	4,6	4	0,5	0,5	15	3,06	2,12	4,06	4,94	4	7,2	88,5	44,453	44,8	82,59
14	15	4	0,08	0,14	0,028	0,14	30-60	2,1	4,6	4,6	4	0,5	0,5	15	3,06	2,12	4,38	4,94	4	4,5	88	46,203	46,8	82,58
15	15	4	0,08	0,14	0,028	0,14	30-60	2,1	4,6	4,6	4	0,5	0,5	15	3,06	2,12	4,25	4,94	4	4,3	88	46,89	47,5	82,5
16	15	5	0,08	0,14	0,0291	0,14	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	15	3,05	2,11	5,13	5	4,03	2,8	88	57,968	59,2	82,49
17	15	5	0,08	0,14	0,0291	0,14	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	15	3,11	2,14	5	5,06	4	2,7	87,5	43,656	44,9	82,58
18	15	5	0,08	0,14	0,0291	0,14	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	15	3,05	2,11	4,94	5,06	4	3,1	88	46,906	48	82,61
19	20	3	0,08	0,14	0,08	0,23	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	20	3,02	2,11	2,94	5,12	4,02	17,7	88,4	42,703	42,8	82,37
20	20	3	0,08	0,14	0,08	0,23	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	19,5	3,05	2,11	2,94	5,12	4	17,3	89,5	44,265	44,39	82,15
21	20	3	0,08	0,14	0,08	0,23	30-60	2,1	4,7	4,7	4	0,5	0,5	20,65	3,09	2,12	2,89	5,12	4	19,1	90,5	24,378	24,703	82,57
22	20	4	0,08	0,14	0,025	0,2	30-60	2,1	4,6	4,6	4	0,5	0,5	20,7	3,09	2,12	3,81	5	4,02	12,6	90	51,765	52,14	82,65
23	20	4	0,08	0,14	0,025	0,2	30-60	2,1	4,6	4,6	4	0,5	0,5	20,1	3,05	2,11	3,75	5	4,02	12,2	89	53,203	53,64	82,62
24	20	4	0,08	0,14	0,025	0,2	30-60	2,1	4,6	4,6	4	0,5	0,5	20	3,09	2,12	3,75	5	4	11,8	88,5	54,078	54,46	82,72
25	20	5	0,08	0,14	0,02	0,2	30-60	2,1	4,6	4,6	4	0,5	0,5	20	3,09	2,12	5,19	5	4	14,3	90	68,89	69,2	82,57
26	20	5	0,08	0,14	0,02	0,2	30-60	2,1	4,6	4,6	4	0,5	0,5	20	3,08	2,11	4,88	5	4	13,5	91	70,64	70,95	82,65
27	20	5	0,08	0,14	0,02	0,2	30-60	2,1	4,6	4,6	4	0,5	0,5	20	3,06	2,12	4,88	5	4	13,7	90,5	58,703	59,04	82,63

Figura B.3: Tabella dati misure prove sperimentali scala Rockwell HR15N; provino (491-048) 45.7 HRC

Prove Sperimentali Scala HR15N, Provino 62.4 HRC (362-193)

Conf. #	V. fa	t. aa*	Appr. vel.	Preload appl.	Add. I	Add. II	I% - I%	Preload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal preload	V. fa	t. ap	t. rp	t. aa	t. dl	t. rf	V. fa	final load	time f. load	time f. vel.	Hardness
1	10	3	0.08	0.14	0.057	0.15	40-60	2	4.6	4	0.5	0.5	9.4	2.94	2.03	3.13	5	4.02	8.6	91	38.359	38.59	91.08
2	10	3	0.08	0.14	0.057	0.15	40-60	2	4.6	4	0.5	0.5	9.4	2.97	2.03	3.13	5	4.03	8.7	85	38.796	39.1	91.08
3	10	3	0.08	0.14	0.057	0.15	40-60	2	4.6	4	0.5	0.5	9.3	2.99	2.02	3	4.94	4.02	8.4	86.7	40.734	41.025	91.02
4	10	4	0.08	0.14	0.065	0.07	40-60	2	4.7	4	0.5	0.5	10	2.97	2.03	4.06	4.94	4.02	5.9	86.5	37.796	37.68	91.12
5	10	4	0.08	0.14	0.065	0.07	40-60	2	4.7	4	0.5	0.5	10	3	2.03	3.94	4.94	4.02	6.6	84	39.234	39.2	91.11
6	10	4	0.08	0.14	0.06	0.07	40-60	2	4.7	4	0.5	0.5	10	3	2.03	4	5	4.02	7.2	89	34.984	34.984	91.06
7	10	5	0.08	0.14	0.04	0.07	40-60	2	4.7	4	0.5	0.5	9.6	2.99	2.02	3.13	5	4.02	9.5	89	46.671	46.75	91.05
8	10	5	0.08	0.14	0.04	0.07	40-60	2	4.7	4	0.5	0.5	9.5	2.95	2.02	5	4.94	4.02	9.4	86	48.359	48.4	91.03
9	10	5	0.08	0.14	0.04	0.07	40-60	2	4.7	4	0.5	0.5	10.5	2.99	2.02	4.31	5	4.02	10.4	84	49.484	49.67	91.08
10	15	3	0.08	0.14	0.068	0.23	40-60	2	4.5	4	0.5	0.5	15.5	2.99	2.02	3	4.94	4.02	15	82.5	36.171	36.2	90.95
11	15	3	0.08	0.14	0.068	0.23	40-60	2	4.5	4	0.5	0.5	15	2.99	2.02	3.81	4.94	4.02	15.5	83	37.484	37.6	91
12	15	3	0.08	0.14	0.068	0.23	40-60	2	4.5	4	0.5	0.5	15.5	3	2.03	3	5	4.02	15.4	81	38.546	38.6	91.01
13	15	4	0.08	0.14	0.045	0.21	40-60	2	4.5	4	0.5	0.5	15.5	3.03	2.03	4.19	4.94	4.03	13.8	82	44.171	44.2	90.96
14	15	4	0.08	0.14	0.045	0.21	40-60	2	4.5	4	0.5	0.5	15	2.95	2.02	4.06	4.94	4.02	14.8	85.5	49.734	49.8	91
15	15	4	0.08	0.14	0.045	0.21	40-60	2	4.5	4	0.5	0.5	15.5	2.99	2.02	4.06	4.94	4.02	14.3	87	43.984	44	90.95
16	15	5	0.08	0.14	0.035	0.2	40-60	2	4.5	4	0.5	0.5	14.7	2.99	2.02	5.19	4.94	4.02	13.1	86.5	48.046	48	90.97
17	15	5	0.08	0.14	0.035	0.2	40-60	2	4.5	4	0.5	0.5	14.5	2.99	2.02	5.25	4.88	4.03	12.8	82.5	49.484	49.5	90.99
18	15	5	0.08	0.14	0.035	0.2	40-60	2	4.5	4	0.5	0.5	14.8	2.99	2.02	4.88	4.94	4.02	13.4	82	50.234	50.25	90.95
19	20	3	0.08	0.14	0.063	0.5	40-60	2	4.3	4	0.5	0.5	20	3	2.03	2.94	5.06	4.02	19	82	37.671	37.7	90.82
20	20	3	0.08	0.14	0.06	0.5	40-60	2	4.3	4	0.5	0.5	20	3	2.03	3	5.06	4.02	19.1	84.5	36.359	36.4	90.89
21	20	3	0.08	0.14	0.063	0.5	40-60	2	4.3	4	0.5	0.5	20	2.95	2.02	2.81	5.06	4.03	18	85.5	34.609	34.6	90.97
22	20	4	0.08	0.14	0.045	0.45	40-60	2	4.3	4	0.5	0.5	20	2.91	2.03	4.13	5	4.03	18.5	85	47.859	47.9	90.88
23	20	4	0.08	0.14	0.045	0.45	40-60	2	4.3	4	0.5	0.5	20	2.94	2.03	4.06	5.06	4.03	17.6	85	48.671	48.7	91
24	20	4	0.08	0.14	0.045	0.45	40-60	2	4.3	4	0.5	0.5	20	2.92	2.02	4	5	4.03	18.2	84.5	49.921	49.9	90.99
25	20	5	0.08	0.14	0.037	0.45	40-60	2	4.3	4	0.5	0.5	20	3.03	2.03	5.13	5.06	4.02	17.1	86.5	58.796	58.8	90.97
26	20	5	0.08	0.14	0.037	0.45	40-60	2	4.3	4	0.5	0.5	20.5	2.95	2.02	5.13	5	4.03	19.7	81.5	59.421	59.5	91.01
27	20	5	0.08	0.14	0.037	0.45	40-60	2	4.3	4	0.5	0.5	20	3.02	2.02	5.06	5	4.03	18.6	84	48.421	48.5	90.95

Figura B.4: Tabella dati misure prove sperimentali scala Rockwell HR15N; provino (362-193) 62.4 HRC

Medie Prove Sperimentali Scala HR15N, Provino 20.7 HRC (364-634)																					
Conf#	V fa*	t aa*	Appr. vel.	Pretload appl.	Add. I	Add. II	%-II%	Pretload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal pretload	V fa	t ap	t rp	t aa	t dl	t rf	V fa	final load	Hardness
1	10	3	0.08	0.14	0.25	0.19	25-30	2.1	4.6	4.7	0.5	0.5	9.93	3.00	2.13	3.02	4.96	4.03	13.37	42.20	68.66
2	10	4	0.08	0.14	0.13	0.19	25-30	2.1	4.7	4.7	0.5	0.5	9.87	3.03	2.13	4.06	5.02	4.02	9.97	43.60	68.67
3	10	5	0.08	0.14	0.02	0.19	25-30	2.1	4.7	4.7	0.5	0.5	9.97	3.06	2.13	3.29	5.02	4.03	10.43	43.80	68.59
4	15	3	0.08	0.14	0.1	0.29	25-30	2.1	4.5	4.5	0.5	0.5	15.60	3.04	2.12	3.00	4.98	4.00	14.00	44.17	68.55
5	15	4	0.08	0.14	0.029	0.26	25-30	2.1	4.5	4.5	0.5	0.5	15.00	3.00	2.13	4.11	4.94	4.01	13.13	44.33	68.49
6	15	5	0.08	0.14	0.012	0.31	25-30	2.1	4.5	4.5	0.5	0.5	14.97	3.01	2.12	3.13	4.94	4.01	15.17	44.33	68.57
7	20	3	0.08	0.14	0.05	0.34	25-30	2.1	4.4	4.4	0.5	0.5	20.00	3.08	2.14	2.94	4.90	4.02	16.47	43.00	68.56
8	20	4	0.08	0.14	0.025	0.34	25-30	2.1	4.4	4.4	0.5	0.5	20.00	3.07	2.13	4.00	4.92	4.02	15.40	44.00	68.63
9	20	5	0.08	0.14	0.015	0.34	25-30	2.1	4.4	4.4	0.5	0.5	20.00	3.07	2.12	3.06	4.92	4.00	16.07	44.33	68.63

Medie Prove Sperimentali Scala HR15N, Provino 45.7 HRC (491-048)																					
Conf#	V fa*	t aa*	Appr. vel.	Pretload appl.	Add. I	Add. II	%-II%	Pretload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal pretload	V fa	t ap	t rp	t aa	t dl	t rf	V fa	final load	Hardness
1	10	3	0.08	0.14	0.17	0.1	30-60	2.1	4.7	4.7	0.5	0.5	10.00	3.09	2.13	2.96	5.00	4.03	2.63	88.00	82.69
2	10	4	0.08	0.14	0.15	0.1	30-60	2.1	4.7	4.7	0.5	0.5	10.00	3.07	2.13	3.94	4.98	4.02	1.63	88.33	82.61
3	10	5	0.08	0.14	0.03	0.1	30-60	2.1	4.7	4.7	0.5	0.5	10.00	3.06	2.14	4.90	5.00	4.02	2.33	88.00	82.69
4	15	3	0.08	0.14	0.15	0.14	30-60	2.1	4.7	4.7	0.5	0.5	15.00	3.07	2.14	3.13	5.04	4.01	2.97	87.90	82.52
5	15	4	0.08	0.14	0.028	0.14	30-60	2.1	4.6	4.6	0.5	0.5	15.00	3.06	2.12	4.23	4.94	4.00	5.33	88.17	82.56
6	15	5	0.08	0.14	0.0291	0.14	30-60	2.1	4.7	4.7	0.5	0.5	15.00	3.07	2.12	3.02	5.04	4.01	2.87	87.83	82.56
7	20	3	0.08	0.14	0.08	0.23	30-60	2.1	4.7	4.7	0.5	0.5	20.05	3.05	2.11	2.83	5.12	4.01	18.03	89.47	82.36
8	20	4	0.08	0.14	0.025	0.2	30-60	2.1	4.6	4.6	0.5	0.5	20.10	3.08	2.12	3.77	5.00	4.01	12.20	89.17	82.66
9	20	5	0.08	0.14	0.02	0.2	30-60	2.1	4.6	4.6	0.5	0.5	20.00	3.08	2.12	4.98	5.00	4.00	13.83	90.50	82.62

Medie Prove Sperimentali Scala HR15N, Provino 62.4 HRC (362-153)																					
Conf#	V fa*	t aa*	Appr. vel.	Pretload appl.	Add. I	Add. II	%-II%	Pretload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal pretload	V fa	t ap	t rp	t aa	t dl	t rf	V fa	final load	Hardness
1	10	3	0.08	0.14	0.057	0.15	40-60	2	4.6	4.6	0.5	0.5	9.57	2.97	2.03	3.09	4.98	4.02	8.57	87.57	91.05
2	10	4	0.08	0.14	0.065	0.07	40-60	2	4.7	4.7	0.5	0.5	9.00	2.99	2.03	4.00	4.96	4.02	6.57	86.50	91.10
3	10	5	0.08	0.14	0.04	0.07	40-60	2	4.7	4.7	0.5	0.5	9.87	2.98	2.02	4.98	4.98	4.02	9.77	86.33	91.05
4	15	3	0.08	0.14	0.068	0.23	40-60	2	4.5	4.5	0.5	0.5	15.33	2.99	2.02	2.94	4.96	4.02	15.30	82.17	90.99
5	15	4	0.08	0.14	0.045	0.21	40-60	2	4.5	4.5	0.5	0.5	15.33	2.99	2.02	4.10	4.94	4.02	14.30	84.83	90.97
6	15	5	0.08	0.14	0.063	0.2	40-60	2	4.5	4.5	0.5	0.5	14.67	2.99	2.02	3.11	4.92	4.02	13.10	83.67	90.97
7	20	3	0.08	0.14	0.063	0.5	40-60	2	4.3	4.3	0.5	0.5	20.00	2.98	2.03	2.92	5.06	4.02	18.70	84.00	90.89
8	20	4	0.08	0.14	0.045	0.45	40-60	2	4.3	4.3	0.5	0.5	20.00	2.92	2.03	4.06	5.02	4.03	18.10	84.83	90.96
9	20	5	0.08	0.14	0.037	0.45	40-60	2	4.3	4.3	0.5	0.5	20.17	3.00	2.02	3.11	5.02	4.03	18.47	84.00	90.98

Figura B.5: Tabelle medie misure prove sperimentali scala Rockwell HR15N

Range Prove Sperimentali Scala HR15N, Provino 20,7 HRC (364-634)																																																			
Conf#	V	fn	MAN	V	fn	MAN	t	ep	MAN	t	cp	MAN	t	ep	MIN	RANGE	t	ep	MAN	t	cp	MAN	t	ep	MIN	RANGE	t	ep	MAN	t	cp	MAN	t	ep	MIN	RANGE	t	ep	MAN	t	cp	MAN	t	ep	MIN	RANGE	Hardness	MAN	Hardness	MIN	RANGE
1	10	3	10	9,8	0	3,06	2,97	0,09	2,14	2,13	0,01	3,06	3,00	0,06	5,00	4,94	0,06	15,30	15,20	0,30	42,80	41,20	1,60	68,73	68,62	0,11																									
2	10	4	10	9,8	0	3,05	3,00	0,05	2,14	2,13	0,01	4,25	3,88	0,37	5,06	5,00	0,06	10,30	9,70	0,30	44,20	42,50	1,50	68,73	68,57	0,16																									
3	10	5	10	9,8	0	3,09	3,02	0,07	2,14	2,13	0,01	3,38	3,23	0,15	5,06	5,00	0,06	10,30	10,40	0,10	44,50	43,50	1,00	68,73	68,58	0,06																									
4	15	3	15	11,7	0	3,06	3,02	0,04	2,13	2,11	0,02	3,06	2,84	0,22	5,00	4,94	0,06	15,30	15,30	0,30	45,00	44,00	1,00	68,60	68,44	0,16																									
5	15	4	15	11,7	0	3,06	3,02	0,04	2,13	2,11	0,02	4,06	3,56	0,50	5,00	4,94	0,06	15,30	15,30	0,30	45,00	44,00	1,00	68,60	68,44	0,16																									
6	15	5	15,1	14,8	0,3	3,03	3,00	0,03	2,13	2,11	0,02	5,10	4,56	0,54	4,94	4,94	0,00	15,40	14,80	0,30	45,00	44,00	1,00	68,65	68,47	0,18																									
7	20	3	20	20	0	3,11	3,05	0,06	2,14	2,14	0,00	3,00	2,88	0,12	4,94	4,88	0,06	15,60	15,30	0,30	45,00	43,00	2,00	68,64	68,46	0,18																									
8	20	4	20	20	0	3,08	3,05	0,03	2,14	2,11	0,03	4,06	3,94	0,12	4,94	4,88	0,06	15,60	15,70	0,40	44,00	44,00	0,00	68,66	68,60	0,06																									
9	20	5	20	20	0	3,08	3,05	0,03	2,14	2,11	0,03	5,13	5,00	0,13	4,94	4,88	0,06	15,70	15,70	0,60	45,00	44,00	1,00	68,69	68,59	0,10																									

Range Prove Sperimentali Scala HR15N, Provino 45,7 HRC (491-646)																																																			
Conf#	V	fn	MAN	V	fn	MAN	t	ep	MAN	t	cp	MAN	t	ep	MIN	RANGE	t	ep	MAN	t	cp	MAN	t	ep	MIN	RANGE	t	ep	MAN	t	cp	MAN	t	ep	MIN	RANGE	t	ep	MAN	t	cp	MAN	t	ep	MIN	RANGE	Hardness	MAN	Hardness	MIN	RANGE
1	10	3	10	10	0	3,11	3,06	0,05	2,14	2,13	0,01	3,00	2,94	0,06	5,00	5,00	0,00	2,80	2,40	0,40	88,00	88,00	0,00	82,72	82,67	0,05																									
2	10	4	10	10	0	3,08	3,06	0,02	2,14	2,13	0,01	4,06	3,81	0,25	5,00	4,94	0,06	1,70	1,50	0,20	88,50	88,00	0,50	82,66	82,58	0,08																									
3	10	5	10	10	0	3,08	3,05	0,03	2,14	2,13	0,01	4,94	4,88	0,06	5,00	5,00	0,00	2,50	2,20	0,30	88,00	88,00	0,00	82,72	82,63	0,09																									
4	15	3	15	15	0	3,08	3,05	0,03	2,14	2,14	0,00	3,31	2,88	0,43	5,06	5,00	0,06	3,10	2,90	0,20	88,00	87,70	0,30	82,58	82,40	0,18																									
5	15	4	15	15	0	3,06	3,06	0,00	2,12	2,12	0,00	4,38	4,06	0,32	4,94	4,94	0,00	7,20	4,30	2,90	88,50	88,00	0,50	82,59	82,50	0,09																									
6	15	5	15	15	0	3,11	3,05	0,06	2,14	2,11	0,03	5,13	4,94	0,19	5,06	5,00	0,06	3,10	2,70	0,40	88,00	87,50	0,50	82,61	82,49	0,12																									
7	20	3	20,65	19,5	1,15	3,09	3,02	0,07	2,12	2,11	0,01	2,94	2,62	0,32	5,12	5,12	0,00	19,10	17,40	1,80	90,50	88,40	2,10	82,57	82,15	0,42																									
8	20	4	20,2	20	0,2	3,09	3,05	0,04	2,12	2,11	0,01	3,81	3,75	0,06	5,00	5,00	0,00	12,60	11,80	0,80	90,00	88,50	1,50	82,72	82,62	0,10																									
9	20	5	20	20	0	3,09	3,06	0,03	2,12	2,11	0,01	5,19	4,88	0,31	5,00	5,00	0,00	14,30	13,50	0,80	91,00	90,00	1,00	82,65	82,57	0,08																									

Range Prove Sperimentali Scala HR15N, Provino 62,4 HRC (362-193)																																																			
Conf#	V	fn	MAN	V	fn	MAN	t	ep	MAN	t	cp	MAN	t	ep	MIN	RANGE	t	ep	MAN	t	cp	MAN	t	ep	MIN	RANGE	t	ep	MAN	t	cp	MAN	t	ep	MIN	RANGE	t	ep	MAN	t	cp	MAN	t	ep	MIN	RANGE	Hardness	MAN	Hardness	MIN	RANGE
1	10	3	10	9,4	0,3	2,99	2,94	0,05	2,03	2,02	0,01	3,13	3,00	0,13	5,70	4,94	0,66	8,70	8,40	0,30	91,00	87,00	4,00	91,08	91,02	0,06																									
2	10	4	10	10	0	2,99	2,97	0,03	2,03	2,03	0,00	4,06	3,94	0,12	5,00	4,94	0,06	7,30	5,90	1,30	89,00	84,00	5,00	91,12	91,06	0,06																									
3	10	5	10,5	9,5	1	2,99	2,95	0,04	2,02	2,02	0,00	5,13	4,81	0,32	5,00	4,94	0,06	10,40	9,40	1,00	89,00	84,00	5,00	91,08	91,03	0,05																									
4	15	3	15,5	15	0,5	3,00	2,99	0,01	2,03	2,02	0,01	3,00	2,81	0,19	5,00	4,94	0,06	15,50	15,00	0,50	83,00	81,00	2,00	91,01	90,95	0,06																									
5	15	4	15,5	15	0,5	3,03	2,95	0,08	2,03	2,02	0,01	4,19	4,06	0,13	4,94	4,94	0,00	14,80	13,80	1,00	87,00	82,00	5,00	91,00	90,95	0,05																									
6	15	5	14,8	14,5	0,3	2,99	2,99	0,00	2,02	2,02	0,00	5,25	4,88	0,37	4,94	4,88	0,06	13,40	12,80	0,60	86,50	82,00	4,50	90,99	90,95	0,04																									
7	20	3	20	20	0	3,00	2,95	0,05	2,02	2,02	0,01	3,00	2,81	0,19	5,06	5,06	0,00	19,10	18,00	1,10	85,50	82,00	3,50	90,97	90,82	0,15																									
8	20	4	20	20	0	2,94	2,91	0,03	2,02	2,02	0,01	4,13	4,00	0,13	5,06	5,00	0,06	18,50	17,60	0,90	85,00	84,50	0,50	91,00	90,88	0,12																									
9	20	5	20,5	20	0,5	3,03	2,95	0,08	2,03	2,02	0,01	5,13	5,06	0,07	5,06	5,00	0,06	19,70	17,10	2,60	86,50	81,50	5,00	91,01	90,95	0,06																									

Figura B.6: Tabelle range valori prove sperimentali scala Rockwell HR15N

B.2 Scala HR30N

Rockwell Hardness HR30N Scale Definition

Reference values for HR30N				
Symbol	Test parameter	Reference value	Start measurement	Stop measurement
F_0	Preliminary test force	29,419 95 N ¹	-	-
F	Total test force	294,199 5 N ¹	-	-
α	Included angle of the indenter cone (between surface axial-plane line segments)	120°	Line segment start: $\pm 30^\circ$ (from the axis) ²	Line segment end: 400 μ m on conical surface
r	Spherical tip radius of the indenter	200 μ m	-30° (from the axis) ²	+30° (from the axis) ²
t_{pa}	Application time of preliminary test force	0,2 s $\leq t_{pa} \leq$ 2 s	$\sim 1\% F_0$	$\sim 99\% F_0$
t_{pd}	Duration time of constant preliminary test force before initial measurement	(3 - t_{pa})/2 s	$\sim 99\% F_0$	Measurement
t_{aa}	Application time of additional test force	≤ 4 s ³	$\sim 101\% F_0$	$\sim 99\% F$ (loading)
v_a	Mean indentation velocity of final additional test force application	30 μ m·s ⁻¹	$\sim 80\% F$	$\sim 99\% F$
t_{td}	Duration time of total test force	5 s	$\sim 99\% F$ (loading)	$\sim 99\% F$ (unloading)
t_{ur}	Removal time of additional test force	≤ 2 s	$\sim 99\% F$ (unloading)	$\sim 101\% F_0$
t_{rd}	Duration time of recovery force before final measurement	4 s	$\sim 101\% F_0$	Measurement
T	Temperature of test	23 °C	Start of test	End of test

¹ The defined values of preliminary test force and total test force are the SI equivalents of the original Rockwell hardness method-defined forces of 3 kgf and 30 kgf, respectively, converted to N by multiplying the kgf values by the conversion factor 9,806 65.

² These dimensions define the theoretical points of blend between the spherical tip and conical surface of the diamond indenter (see Figure 2). The actual points of blend are usually different; therefore, the blend areas should not be included in the measurement of the tip radius or cone angle.

³ The value of t_{aa} is dependent on the hardness of the material under test. The stated range of ≤ 4 s is to maintain compliance with consensus standards.

Figure 1. Illustrations of the applied force and the resulting indentation-depth occurring during the HR30N test cycle.

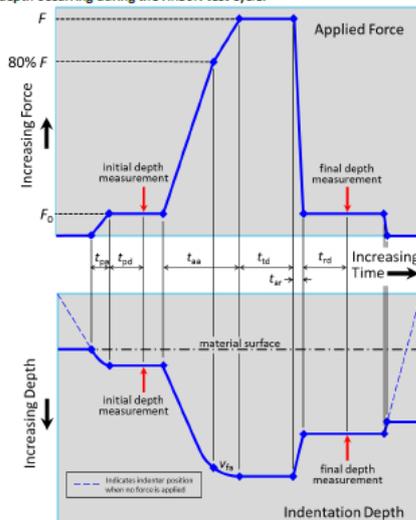


Figure 2. Illustration of the axial cross-section of an ideally-shaped diamond indenter indicating the dimensions specified above and the theoretical points of blend between the spherical tip and conical surface.

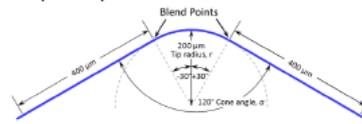


Figura B.7: Definizione scala Rockwell superficiale HR30N

Prove Sperimentali Scala HR30N; Provino 20.7 HRC (364-634)

Conf.#	V. G* t. aa*	Appr. vel.	Preload appl.	Add. I	Add. II	%-I%	Preload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal preload	V. fa	t. ap	t. rp	t. aa	t. dl	t. rf	V. fal	final load	time f. vel.	Hardness	
1	20	3	0.08	0.14	0.11	0.08	30-70	2.1	4.7	4	0.5	20	3.06	2.12	3.39	4.94	4.02	21	209.5	34.828	35	41.15
2	20	3	0.08	0.14	0.11	0.08	30-70	2.1	4.7	4	0.5	20	3.05	2.11	3.94	4.94	4	21.2	208	35.64	36	41.33
3	20	3	0.08	0.14	0.11	0.08	30-70	2.1	4.7	4	0.5	20	3.12	2.12	2.81	4.94	4.02	21.5	209	39.328	39.63	41.25
4	20	4	0.08	0.14	0.07	0.08	30-70	2.1	4.7	4	0.5	20	3.06	2.12	4.06	4.94	4	21.2	206	33.39	33.7	41.24
5	20	4	0.08	0.14	0.07	0.08	30-70	2.1	4.7	4	0.5	20	3.09	2.12	3.94	4.94	4	21.2	209.5	34.765	35.05	41.33
6	20	4	0.08	0.14	0.07	0.08	30-70	2.1	4.7	4	0.5	20	3.08	2.11	4.19	4.94	4	20.8	208.5	35.89	36.15	41.08
7	20	5	0.08	0.14	0.05	0.08	30-70	2.1	4.7	4	0.5	20	3.08	2.11	5	4.88	4	20.1	210	33.64	33.8	41.27
8	20	5	0.08	0.14	0.05	0.08	30-70	2.1	4.7	4	0.5	20	3.05	2.11	4.94	4.88	4	19.5	209.5	34.703	34.7	41.09
9	20	5	0.08	0.14	0.05	0.08	30-70	2.1	4.7	4	0.5	20	3.09	2.12	5	4.94	4	20.5	206	40.953	41.2	41.06
10	30	3	0.08	0.14	0.09	0.12	30-70	2.1	4.7	4	0.5	30	3.02	2.11	2.94	5	4.02	30.7	208	27.765	27.92	41.26
11	30	3	0.08	0.14	0.09	0.12	30-70	2.1	4.7	4	0.5	30	3.09	2.12	3.5	5	4.02	30.6	205	28.765	28.92	41.4
12	30	3	0.08	0.14	0.09	0.12	30-70	2.1	4.7	4	0.5	30	3.06	2.12	3.66	5	4.02	30.8	212	30.015	30.15	41.14
13	30	4	0.08	0.14	0.055	0.12	30-70	2.1	4.7	4	0.5	30	3.09	2.12	4.06	5	4.02	30.2	206	30.953	31.14	41.35
14	30	4	0.08	0.14	0.055	0.12	30-70	2.1	4.7	4	0.5	30	3.05	2.11	4.13	5	4.02	30.4	207	33.265	33.5	41.31
15	30	4	0.08	0.14	0.055	0.12	30-70	2.1	4.7	4	0.5	30	3.09	2.12	4.19	5	4.02	30.2	206	36.14	36.37	41.41
16	30	5	0.08	0.14	0.045	0.12	30-70	2.1	4.7	4	0.5	30	3.09	2.12	5.12	5	4	30.1	207	46.578	46.75	41.18
17	30	5	0.08	0.14	0.045	0.12	30-70	2.1	4.7	4	0.5	30	3.05	2.11	5.06	5	4.02	30	207	50.828	51.02	41.26
18	30	5	0.08	0.14	0.045	0.12	30-70	2.1	4.7	4	0.5	30	3.06	2.12	4.94	5	4.02	30.3	201	49.453	49.6	41.16
19	40	3	0.08	0.14	0.125	0.17	30-70	2.1	4.6	4	0.5	40	3.12	2.12	3.12	4.94	4	37.9	201.5	34.078	34.1	41.11
20	40	3	0.08	0.14	0.125	0.17	30-70	2.1	4.6	4	0.5	40	3.08	2.11	3	4.94	4.02	41.4	206	35.078	35.16	40.69
21	40	3	0.08	0.14	0.125	0.17	30-70	2.1	4.6	4	0.5	40	3.03	2.12	2.88	4.94	4	40.7	195	36.64	36.715	40.77
22	40	4	0.08	0.14	0.06	0.168	30-70	2.1	4.6	4	0.5	39.5	3.05	2.11	4.13	4.94	4	38.6	206.5	36.578	36.65	41.24
23	40	4	0.08	0.14	0.06	0.168	30-70	2.1	4.6	4	0.5	39.5	3.08	2.11	3.94	4.94	4	40.1	197.5	37.953	38.03	41.26
24	40	4	0.08	0.14	0.06	0.168	30-70	2.1	4.6	4	0.5	39.5	3.02	2.11	4.06	4.94	4	39.2	202	39.015	39.08	41.26
25	40	5	0.08	0.14	0.045	0.17	30-70	2.1	4.6	4	0.5	40.5	3.08	2.11	4.94	4.94	4	40.6	209.5	44.953	45.02	41.22
26	40	5	0.08	0.14	0.045	0.17	30-70	2.1	4.6	4	0.5	40	3.02	2.11	5	4.94	4	38.8	203.5	35.953	35.96	41.24
27	40	5	0.08	0.14	0.045	0.17	30-70	2.1	4.6	4	0.5	39.5	3.09	2.12	5.19	4.94	4.02	38.9	208	37.953	38.02	41.34

Figura B.8: Tabella dati misure prove sperimentali scala Rockwell HR30N; provino (364-634) 20.7 HRC

Prove Sperimentali Scala HR30N - Provino 45.7 HRC (491-048)																										
Conf#	V	Ga*	1 aa*	Appr. vel.	Preload appl.	Add. I	Add. II	%-II%	Preload holding	Add. load holding	Cap final reading	Removal add. load	Removal preload	V fa	t an	t an	t all	t rf	V fa	final load	time t load	time t vol	Hardness			
1	20	3	0.08	0.14	0.087	0.1	30-70	2	4.7	4.7	4	0.5	0.5	20	3.02	2.03	3	5	4.03	20.2	208.5	40.984	41.15	63.82		
2	20	3	0.08	0.14	0.087	0.1	30-70	2	4.7	4.7	4	0.5	0.5	20	3.02	2.03	3	5	4.03	20.3	207	41.609	41.75	63.82		
3	20	3	0.08	0.14	0.087	0.1	30-70	2	4.7	4.7	4	0.5	0.5	20	3.02	2.02	3	5	4.02	20.4	206	43.609	43.8	64.13		
4	20	4	0.08	0.14	0.06	0.1	30-70	2	4.7	4.7	4	0.5	0.5	20	3.05	2.02	4	5	4.03	19.9	209	33.359	33.55	63.97		
5	20	4	0.08	0.14	0.06	0.1	30-70	2	4.7	4.7	4	0.5	0.5	20	3.03	2.03	3.75	5	4.02	20.1	197.5	34.734	34.8	64.09		
6	20	4	0.08	0.14	0.06	0.1	30-70	2	4.7	4.7	4	0.5	0.5	20	2.99	2.02	3.94	5	4.02	20	197	36.671	35.75	64.19		
7	20	5	0.08	0.14	0.04	0.1	30-70	2	4.7	4.7	4	0.5	0.5	20	3.02	2.02	5.06	5	4.03	20.2	210	46.421	46.42	63.81		
8	20	5	0.08	0.14	0.04	0.1	30-70	2	4.7	4.7	4	0.5	0.5	20	3.06	2.03	4.81	4.94	4.03	20.1	208	46.984	47.14	63.95		
9	20	5	0.08	0.14	0.04	0.1	30-70	2	4.7	4.7	4	0.5	0.5	20	3	2.03	5.06	5	4.02	20.1	205	49.734	49.95	64.22		
10	30	3	0.08	0.14	0.09	0.19	30-70	2.1	4.6	4.6	4	0.5	0.5	30	3.09	2.13	3.13	5	4.02	19	205	39.875	39.8	63.74		
11	30	3	0.08	0.14	0.09	0.19	30-70	2.1	4.6	4.6	4	0.5	0.5	30	3.09	2.13	3.06	5	4.02	20.6	205.5	41.375	41.5	63.75		
12	30	3	0.08	0.14	0.09	0.19	30-70	2.1	4.6	4.6	4	0.5	0.5	30	3.13	2.13	2.98	5	4	19.1	205	22.937	22.85	63.85		
13	30	4	0.08	0.14	0.055	0.19	30-70	2.1	4.6	4.6	4	0.5	0.5	30	3.13	2.13	4.13	4.94	4.02	22.4	215	32.312	32.3	63.89		
14	30	4	0.08	0.14	0.055	0.19	30-70	2.1	4.6	4.6	4	0.5	0.5	30	3.09	2.13	4.31	5	4	23.3	211.5	36.125	36.1	63.88		
15	30	4	0.08	0.14	0.055	0.19	30-70	2.1	4.6	4.6	4	0.5	0.5	30	3.13	2.13	4.06	5	4.02	24.2	209	36.375	36.3	63.92		
16	30	5	0.08	0.14	0.04	0.19	30-70	2.1	4.6	4.6	4	0.5	0.5	30	3.11	2.11	5	5	4	23.8	206.5	49.562	49.6	63.69		
17	30	5	0.08	0.14	0.04	0.19	30-70	2.1	4.6	4.6	4	0.5	0.5	30	3.11	2.11	5.23	5	4	21.8	206.5	50.75	50.7	63.76		
18	30	5	0.08	0.14	0.04	0.19	30-70	2.1	4.6	4.6	4	0.5	0.5	30	3.13	2.13	5	4.94	4	24.1	207	39.687	39.7	63.77		
19	40	3	0.08	0.14	0.1	0.4	30-70	2.1	4.4	4.4	4	0.5	0.5	40	3.08	2.11	3.06	5.06	4.02	24.8	217	34.937	34.8	63.71		
20	40	3	0.08	0.14	0.1	0.4	30-70	2.1	4.4	4.4	4	0.5	0.5	40	3.09	2.13	2.69	5	4.02	30.2	198	37.375	37.32	63.76		
21	40	3	0.08	0.14	0.1	0.4	30-70	2.1	4.4	4.4	4	0.5	0.5	40	3.11	2.11	3.38	5.06	4	26.6	200.5	32.312	32.25	63.83		
22	40	4	0.08	0.14	0.05	0.35	30-70	2.1	4.4	4.4	4	0.5	0.5	40	3.11	2.11	4.38	5	4	27.1	207	39.25	39.2	63.56		
23	40	4	0.08	0.14	0.05	0.35	30-70	2.1	4.4	4.4	4	0.5	0.5	40	3.11	2.11	4.25	5	4	28.3	208	40.562	40.47	63.41		
24	40	4	0.08	0.14	0.05	0.35	30-70	2.1	4.4	4.4	4	0.5	0.5	40	3.09	2.13	3.94	5	4	27.9	213.5	47.062	46.97	63.92		
25	40	5	0.08	0.14	0.04	0.375	30-70	2.1	4.4	4.4	4	0.5	0.5	40	3.09	2.13	5	5	4.02	29.5	218	54.75	54.6	63.5		
26	40	5	0.08	0.14	0.04	0.375	30-70	2.1	4.4	4.4	4	0.5	0.5	40	3.09	2.13	5.23	5	4	25.9	201.5	42.75	42.65	63.74		
27	40	5	0.08	0.14	0.04	0.375	30-70	2.1	4.4	4.4	4	0.5	0.5	40	3.08	2.11	5.18	5	4.02	26	202.5	44.937	44.85	63.84		

Figura B.9: Tabella dati misure prove sperimentali scala Rockwell HR30N; provino (491-048) 45.7 HRC

Prove Sperimentali Scala HR30N: Provino 62.4 HRC (362-193)

Conf #	V _{fa}	t _{aa*}	Appr. vel.	Preload appl.	Add. I	Add. II	I% - II%	Preload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal preload	V _{fi}	t _{op}	t _{ip}	t _{at}	t _{dl}	t _{rf}	V _{fal}	final load	time f. load	time f. vel.	Hardness
1	20	3	0.08	0.14	0.08	0.13	30-70	2	4.7	4	0.5	0.5	19.7	3.03	2.03	2.94	5	4.02	17.3	211.5	39.234	39.18	78.6
2	20	3	0.08	0.14	0.08	0.13	30-70	2	4.7	4	0.5	0.5	19.9	3.03	2.03	3	5	4.02	16.8	212	28.109	28.06	78.89
3	20	3	0.08	0.14	0.08	0.13	30-70	2	4.7	4	0.5	0.5	19.8	3	2.03	3	5	4.03	17.9	208.5	29.421	29.43	78.92
4	20	4	0.08	0.14	0.05	0.132	30-70	2	4.7	4	0.5	0.5	20.1	2.99	2.02	3.94	5	4.02	19.1	207	39.859	39.94	78.78
5	20	4	0.08	0.14	0.05	0.132	30-70	2	4.7	4	0.5	0.5	20	3.02	2.03	3.94	5	4.03	18.9	207.5	32.359	32.43	78.96
6	20	4	0.08	0.14	0.05	0.132	30-70	2	4.7	4	0.5	0.5	20	3.03	2.03	4	5	4.02	19.9	213	35.609	35.68	78.94
7	20	5	0.08	0.14	0.035	0.132	30-70	2	4.7	4	0.5	0.5	20.2	2.99	2.02	5	5.06	4.03	19.6	205	47.234	47.3	78.77
8	20	5	0.08	0.14	0.035	0.132	30-70	2	4.7	4	0.5	0.5	20	3.02	2.02	5	5	4.02	19.6	211	47.671	47.68	78.97
9	20	5	0.08	0.14	0.035	0.132	30-70	2	4.7	4	0.5	0.5	20.1	2.99	2.02	4.94	5.06	4.03	19.9	207	51.046	51.18	78.87
10	30	3	0.08	0.14	0.063	0.24	30-70	2	4.6	4	0.5	0.5	30	3	2	3.093	5.06	4	28.4	210	40.593	40.593	78.66
11	30	3	0.08	0.14	0.063	0.24	30-70	2	4.6	4	0.5	0.5	29.5	3	2	2.833	5.06	4	29	207	41.343	41.343	78.81
12	30	3	0.08	0.14	0.063	0.24	30-70	2	4.6	4	0.5	0.5	29.5	3	2	3	5.06	4	28.8	207	42.468	42.468	78.84
13	30	4	0.08	0.14	0.039	0.26	30-70	2	4.6	4	0.5	0.5	30	2.97	2	3.883	5.06	4	26.6	214	48.593	48.6	78.82
14	30	4	0.08	0.14	0.039	0.26	30-70	2	4.6	4	0.5	0.5	30.5	2.97	2.03	4.13	5.06	4	26.2	215	50.218	50.25	78.82
15	30	4	0.08	0.14	0.039	0.26	30-70	2	4.6	4	0.5	0.5	30	3.03	2.03	3.94	5.12	4	25.5	218	51.156	51.156	78.75
16	30	5	0.08	0.14	0.028	0.26	30-70	2	4.5	4	0.5	0.5	29.8	3	2.03	4.94	4.94	4.03	26.4	213	50.781	50.765	78.74
17	30	5	0.08	0.14	0.028	0.26	30-70	2	4.5	4	0.5	0.5	30.1	3	2.03	4.94	5	4.03	27.5	207	51.483	51.483	78.81
18	30	5	0.08	0.14	0.028	0.26	30-70	2	4.5	4	0.5	0.5	30.4	2.97	2	5.13	5	4.03	28.3	207.5	55.343	55.343	78.77
19	40	3	0.08	0.14	0.06	0.32	30-70	2	4.2	4	0.5	0.5	39.6	3	2.03	3.13	5	4.03	31.5	205	48.593	48.47	78.82
20	40	3	0.08	0.14	0.06	0.32	30-70	2	4.2	4	0.5	0.5	40.1	2.94	2	3.19	5	4.03	31.5	205	28.906	28.845	78.74
21	40	3	0.08	0.14	0.06	0.32	30-70	2	4.2	4	0.5	0.5	39.9	3	2.03	3.13	5	4.03	24.6	218	29.718	29.593	78.81
22	40	4	0.08	0.14	0.035	0.53	30-70	2	4.2	4	0.5	0.5	39.9	2.97	2	4.06	5.06	4.03	30.7	207	52.531	52.468	78.64
23	40	4	0.08	0.14	0.035	0.53	30-70	2	4.2	4	0.5	0.5	40.2	3	2	3.94	5.06	4.03	29.4	209.5	55.156	55.093	78.79
24	40	4	0.08	0.14	0.035	0.53	30-70	2	4.2	4	0.5	0.5	40	3.03	2.03	4.19	5	4.03	30.7	206	56.093	56.02	78.77
25	40	5	0.08	0.14	0.029	0.53	30-70	2	4.3	4	0.5	0.5	39.3	3	2	5.19	5.06	4	26.6	215	51.381	51.22	78.66
26	40	5	0.08	0.14	0.029	0.53	30-70	2	4.3	4	0.5	0.5	39.9	3	2.03	5.13	5.06	4.03	30.8	206	51.968	51.89	78.77
27	40	5	0.08	0.14	0.029	0.53	30-70	2	4.3	4	0.5	0.5	40.2	3	2.03	5	5.12	4.03	28.6	210	54.218	54.14	78.79

Figura B.10: Tabella dati misure prove sperimentali scala Rockwell HR30N; provino (362-193) 62.4 HRC

Medie Prove Sperimentali Scala HR30N - Provino 20.7 HRC (364-634)																					
Cont#	V fa	t aa	Appr. vel.	Preload appl.	Add. I	Add. II	%-II%	Preload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal preload	V fa	t ap	t rp	t aa	t dl	t rf	V fa	final load	Hardness
1	20	3	0.08	0.14	0.11	0.08	30 -70	2.1	4.7	4	0.5	0.5	20.00	3.08	2.12	2.98	4.94	4.01	21.23	208.83	41.24
2	20	4	0.08	0.14	0.07	0.08	30 -70	2.1	4.7	4	0.5	0.5	20.00	3.08	2.12	4.06	4.94	4.00	21.07	208.00	41.22
3	20	5	0.08	0.14	0.05	0.08	30 -70	2.1	4.7	4	0.5	0.5	20.00	3.07	2.11	4.88	4.90	4.00	20.03	208.50	41.14
4	30	3	0.08	0.14	0.09	0.12	30 -70	2.1	4.7	4	0.5	0.5	30.00	3.06	2.12	3.08	5.00	4.02	30.70	208.33	41.27
5	30	4	0.08	0.14	0.055	0.12	30 -70	2.1	4.7	4	0.5	0.5	30.00	3.08	2.12	4.13	5.00	4.02	30.27	206.33	41.36
6	30	5	0.08	0.14	0.045	0.12	30 -70	2.1	4.7	4	0.5	0.5	30.00	3.07	2.12	5.04	5.00	4.01	30.13	205.00	41.20
7	40	3	0.08	0.14	0.125	0.17	30 -70	2.1	4.6	4	0.5	0.5	40.17	3.08	2.12	3.00	4.94	4.01	40.00	200.83	40.86
8	40	4	0.08	0.14	0.06	0.168	30 -70	2.1	4.6	4	0.5	0.5	39.50	3.05	2.11	4.04	4.94	4.00	39.30	202.00	41.25
9	40	5	0.08	0.14	0.045	0.17	30 -70	2.1	4.6	4	0.5	0.5	40.00	3.06	2.11	5.04	4.94	4.01	39.43	207.00	41.27

Medie Prove Sperimentali Scala HR30N - Provino 45.7 HRC (491-048)																					
Cont#	V fa	t aa	Appr. vel.	Preload appl.	Add. I	Add. II	%-II%	Preload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal preload	V fa	t ap	t rp	t aa	t dl	t rf	V fa	final load	Hardness
1	20	3	0.08	0.14	0.087	0.1	30 -70	2	4.7	4	0.5	0.5	20.00	3.02	2.02	3.00	5.00	4.03	20.30	207.17	63.92
2	20	4	0.08	0.14	0.06	0.1	30 -70	2	4.7	4	0.5	0.5	20.00	3.02	2.02	3.90	5.00	4.02	20.00	201.17	64.08
3	20	5	0.08	0.14	0.04	0.1	30 -70	2	4.7	4	0.5	0.5	20.13	3.03	2.03	4.98	4.98	4.03	20.13	207.67	63.99
4	30	3	0.08	0.14	0.09	0.19	30 -70	2.1	4.6	4	0.5	0.5	30.00	3.10	2.13	3.04	5.00	4.01	19.57	204.50	63.77
5	30	4	0.08	0.14	0.055	0.19	30 -70	2.1	4.6	4	0.5	0.5	30.17	3.12	2.13	4.17	4.98	4.01	23.30	211.83	63.90
6	30	5	0.08	0.14	0.04	0.19	30 -70	2.1	4.6	4	0.5	0.5	30.00	3.12	2.12	3.08	4.98	4.00	23.23	206.67	63.74
7	40	3	0.08	0.14	0.1	0.4	30 -70	2.1	4.4	4	0.5	0.5	40.17	3.09	2.12	3.04	5.04	4.01	27.20	205.17	63.77
8	40	4	0.08	0.14	0.05	0.35	30 -70	2.1	4.4	4	0.5	0.5	40.17	3.10	2.12	4.19	5.00	4.00	27.77	209.50	63.63
9	40	5	0.08	0.14	0.04	0.375	30 -70	2.1	4.4	4	0.5	0.5	40.00	3.09	2.12	3.15	5.00	4.01	27.13	207.33	63.69

Medie Prove Sperimentali Scala HR30N - Provino 62.4 HRC (362-193)																					
Cont#	V fa	t aa	Appr. vel.	Preload appl.	Add. I	Add. II	%-II%	Preload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal preload	V fa	t ap	t rp	t aa	t dl	t rf	V fa	final load	Hardness
1	20	3	0.08	0.14	0.08	0.13	30 -70	2	4.7	4	0.5	0.5	19.80	3.02	2.03	2.98	5.00	4.02	17.33	210.67	78.80
2	20	4	0.08	0.14	0.05	0.132	30 -70	2	4.7	4	0.5	0.5	20.03	3.01	2.02	3.96	5.00	4.02	19.30	209.17	78.89
3	20	5	0.08	0.14	0.035	0.132	30 -70	2	4.7	4	0.5	0.5	20.10	3.00	2.02	4.88	5.04	4.03	19.70	207.67	78.87
4	30	3	0.08	0.14	0.063	0.24	30 -70	2	4.6	4	0.5	0.5	29.67	3.00	2.00	2.98	5.06	4.00	28.73	208.00	78.77
5	30	4	0.08	0.14	0.039	0.26	30 -70	2	4.6	4	0.5	0.5	30.17	2.99	2.02	3.98	5.08	4.00	26.10	215.67	78.80
6	30	5	0.08	0.14	0.028	0.26	30 -70	2	4.5	4	0.5	0.5	30.10	2.99	2.02	5.00	4.98	4.03	27.40	209.17	78.77
7	40	3	0.08	0.14	0.06	0.52	30 -70	2	4.2	4	0.5	0.5	49.87	2.98	2.02	3.15	5.00	4.03	28.05	214.33	78.79
8	40	4	0.08	0.14	0.035	0.53	30 -70	2	4.2	4	0.5	0.5	40.03	3.00	2.01	4.06	5.04	4.03	30.27	207.50	78.73
9	40	5	0.08	0.14	0.029	0.53	30 -70	2	4.3	4	0.5	0.5	39.80	3.00	2.02	5.11	5.08	4.02	28.67	210.33	78.74

Figura B.11: Tabelle medie misure prove sperimentali scala Rockwell HR30N

Range Prove Sperimentali Scala HR30N, Provino 20.7 HRC (364-634)																															
Conf#	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	Hardness	MIN	RANGE	Hardness	MAX	MIN	RANGE
1	30	2	0	3.16	3.06	0.03	2.12	2.11	0.01	4.19	3.84	0.35	4.84	4.84	0.00	20.50	20.50	0.00	30.00	30.00	0.00	208.50	208.50	0.00	41.33	41.33	0.00	41.33	41.33	0.00	0.18
2	30	3	0	3.09	3.05	0.04	2.12	2.11	0.01	5.00	4.84	0.16	4.84	4.84	0.00	20.50	20.50	0.00	30.00	30.00	0.00	208.50	208.50	0.00	41.33	41.33	0.00	41.33	41.33	0.00	0.18
3	30	4	0	3.09	3.05	0.04	2.12	2.11	0.01	5.00	4.84	0.16	4.84	4.84	0.00	20.50	20.50	0.00	30.00	30.00	0.00	208.50	208.50	0.00	41.33	41.33	0.00	41.33	41.33	0.00	0.18
4	30	5	0	3.09	3.05	0.04	2.12	2.11	0.01	5.00	4.84	0.16	4.84	4.84	0.00	20.50	20.50	0.00	30.00	30.00	0.00	208.50	208.50	0.00	41.33	41.33	0.00	41.33	41.33	0.00	0.18
5	30	6	0	3.09	3.05	0.04	2.12	2.11	0.01	5.00	4.84	0.16	4.84	4.84	0.00	20.50	20.50	0.00	30.00	30.00	0.00	208.50	208.50	0.00	41.33	41.33	0.00	41.33	41.33	0.00	0.18
6	30	7	0	3.09	3.05	0.04	2.12	2.11	0.01	5.00	4.84	0.16	4.84	4.84	0.00	20.50	20.50	0.00	30.00	30.00	0.00	208.50	208.50	0.00	41.33	41.33	0.00	41.33	41.33	0.00	0.18
7	40	3	40.5	3.12	3.03	0.09	2.12	2.11	0.01	3.12	2.88	0.24	4.84	4.84	0.00	41.40	37.90	3.50	206.50	197.50	9.00	206.50	197.50	9.00	41.11	41.11	40.69	41.24	40.69	0.42	0.42
8	40	4	39.5	3.08	3.02	0.06	2.11	2.11	0.00	4.13	3.84	0.29	4.84	4.84	0.00	40.10	38.60	1.50	206.50	197.50	9.00	206.50	197.50	9.00	41.26	41.26	41.24	41.24	41.24	0.02	0.02
9	40	5	40.5	3.09	3.02	0.07	2.12	2.11	0.01	5.19	4.84	0.23	4.84	4.84	0.00	40.60	38.80	1.80	209.50	203.50	6.00	209.50	203.50	6.00	41.34	41.34	41.22	41.22	41.22	0.12	0.12

Range Prove Sperimentali Scala HR30N, Provino 45.7 HRC (401-048)																															
Conf#	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	Hardness	MIN	RANGE	Hardness	MAX	MIN	RANGE
1	20	3	20	3.03	3.02	0.01	2.03	2.02	0.01	3.13	2.88	0.25	5.00	5.00	0.00	20.40	20.20	0.20	208.50	206.00	2.50	208.50	206.00	2.50	64.13	64.13	63.82	64.13	63.82	0.31	0.31
2	20	4	20	3.05	3.00	0.06	2.03	2.02	0.01	4.00	3.75	0.25	5.00	5.00	0.00	20.10	19.90	0.20	209.00	197.00	12.00	209.00	197.00	12.00	64.19	64.19	63.97	64.19	63.97	0.22	0.22
3	20	5	20	3.06	3.00	0.06	2.03	2.02	0.01	5.06	4.81	0.25	5.00	5.00	0.00	20.20	20.10	0.10	210.00	205.00	5.00	210.00	205.00	5.00	64.22	64.22	63.81	64.22	63.81	0.41	0.41
4	30	3	30	3.13	3.09	0.04	2.13	2.13	0.00	3.13	2.94	0.19	5.00	5.00	0.00	20.60	19.00	1.60	205.00	203.50	1.50	205.00	203.50	1.50	63.83	63.83	63.74	63.83	63.74	0.09	0.09
5	30	4	30	3.13	3.09	0.04	2.13	2.13	0.00	4.31	4.06	0.25	5.00	5.00	0.00	24.20	22.40	1.80	215.00	209.00	6.00	215.00	209.00	6.00	63.92	63.92	63.88	63.92	63.88	0.04	0.04
6	30	5	30	3.13	3.11	0.02	2.13	2.11	0.02	5.25	5.00	0.25	5.00	5.00	0.00	24.10	21.80	2.30	207.00	206.50	0.50	207.00	206.50	0.50	63.77	63.77	63.69	63.77	63.69	0.08	0.08
7	40	3	40.5	3.11	3.08	0.03	2.13	2.11	0.02	3.38	2.69	0.69	5.06	5.06	0.00	30.20	24.80	5.40	198.00	198.00	0.00	198.00	198.00	0.00	63.83	63.83	63.71	63.83	63.71	0.12	0.12
8	40	4	40.5	3.11	3.09	0.02	2.13	2.11	0.02	4.38	3.94	0.44	5.00	5.00	0.00	28.50	27.10	1.20	213.50	207.00	6.50	213.50	207.00	6.50	63.92	63.92	63.41	63.92	63.41	0.51	0.51
9	40	5	40	3.09	3.08	0.01	2.13	2.11	0.02	5.25	5.00	0.25	5.00	5.00	0.00	29.50	25.90	3.60	218.00	201.50	16.50	218.00	201.50	16.50	63.84	63.84	63.50	63.84	63.50	0.34	0.34

Range Prove Sperimentali Scala HR30N, Provino 62.4 HRC (362-103)																															
Conf#	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	V	fn	fr	fm	Hardness	MIN	RANGE	Hardness	MAX	MIN	RANGE
1	30	2	30	3.03	3.00	0.03	2.03	2.03	0.00	4.00	3.84	0.16	5.00	5.00	0.00	19.90	18.90	1.00	207.00	205.00	2.00	207.00	205.00	2.00	78.72	78.72	78.58	78.72	78.58	0.14	0.14
2	30	3	30	3.02	3.00	0.02	2.02	2.02	0.00	5.00	4.84	0.16	5.00	5.00	0.00	19.90	18.90	1.00	211.00	207.00	4.00	211.00	207.00	4.00	78.97	78.97	78.77	78.97	78.77	0.20	0.20
3	30	4	30	3.02	3.00	0.02	2.02	2.02	0.00	5.00	4.84	0.16	5.00	5.00	0.00	19.90	18.90	1.00	211.00	207.00	4.00	211.00	207.00	4.00	78.97	78.97	78.77	78.97	78.77	0.20	0.20
4	30	5	30	3.02	3.00	0.02	2.02	2.02	0.00	5.00	4.84	0.16	5.00	5.00	0.00	19.90	18.90	1.00	211.00	207.00	4.00	211.00	207.00	4.00	78.97	78.97	78.77	78.97	78.77	0.20	0.20
5	30	6	30	3.03	3.00	0.03	2.00	2.00	0.00	3.06	3.06	0.00	5.06	5.06	0.00	30.60	19.00	11.60	210.00	207.00	3.00	210.00	207.00	3.00	78.84	78.84	78.66	78.84	78.66	0.18	0.18
6	30	7	30	3.03	3.00	0.03	2.00	2.00	0.00	4.13	3.88	0.25	5.12	5.06	0.06	34.20	22.40	11.80	218.00	214.00	4.00	218.00	214.00	4.00	78.82	78.82	78.75	78.82	78.75	0.07	0.07
7	40	3	40.1	3.00	2.94	0.06	2.03	2.00	0.03	3.19	3.13	0.06	5.00	5.00	0.00	30.20	24.80	5.40	220.00	203.00	17.00	220.00	203.00	17.00	78.82	78.82	78.74	78.82	78.74	0.08	0.08
8	40	4	40.2	3.03	2.97	0.06	2.03	2.00	0.03	4.19	3.84	0.23	5.06	5.06	0.00	28.30	27.10	1.20	209.50	206.00	3.50	209.50	206.00	3.50	78.79	78.79	78.64	78.79	78.64	0.15	0.15
9	40	5	40.2	3.03	3.00	0.03	2.00	2.00	0.00	5.19	5.00	0.19	5.12	5.06	0.06	29.50	25.90	3.60	215.00	206.00	9.00	215.00	206.00	9.00	78.79	78.79	78.66	78.79	78.66	0.13	0.13

Figura B.12: Tabelle range valori prove sperimentali scala Rockwell HR30N

B.3 Scala HR45N

Rockwell Hardness HR45N Scale Definition

Reference values for HR45N				
Symbol	Test parameter	Reference value	Start measurement	Stop measurement
F_0	Preliminary test force	29,419 95 N ¹	-	-
F	Total test force	441,299 25 N ¹	-	-
α	Included angle of the indenter cone (between surface axial-plane line segments)	120°	Line segment start: $\pm 30^\circ$ (from the axis) ²	Line segment end: 400 μ m on conical surface
r	Spherical tip radius of the indenter	200 μ m	-30° (from the axis) ²	+30° (from the axis) ²
t_{pa}	Application time of preliminary test force	$0,2 \text{ s} \leq t_{pa} \leq 2 \text{ s}$	$\sim 1 \% F_0$	$\sim 99 \% F_0$
t_{pd}	Duration time of constant preliminary test force before initial measurement	$(3 - t_{pa})/2 \text{ s}$	$\sim 99 \% F_0$	Measurement
t_{aa}	Application time of additional test force	$\leq 4 \text{ s}$ ³	$\sim 101 \% F_0$	$\sim 99 \% F$ (loading)
v_{fa}	Mean indentation velocity of final additional test force application	30 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\sim 80 \% F$	$\sim 99 \% F$
t_{td}	Duration time of total test force	5 s	$\sim 99 \% F$ (loading)	$\sim 99 \% F$ (unloading)
t_{ar}	Removal time of additional test force	$\leq 2 \text{ s}$	$\sim 99 \% F$ (unloading)	$\sim 101 \% F_0$
t_{rd}	Duration time of recovery force before final measurement	4 s	$\sim 101 \% F_0$	Measurement
T	Temperature of test	23 °C	Start of test	End of test

¹ The defined values of preliminary test force and total test force are the SI equivalents of the original Rockwell hardness method-defined forces of 3 kgf and 45 kgf, respectively, converted to N by multiplying the kgf values by the conversion factor 9,806 65.

² These dimensions define the theoretical points of blend between the spherical tip and conical surface of the diamond indenter (see Figure 2). The actual points of blend are usually different; therefore, the blend areas should not be included in the measurement of the tip radius or cone angle.

³ The value of t_{aa} is dependent on the hardness of the material under test. The stated range of $\leq 4 \text{ s}$ is to maintain compliance with consensus standards.

Figure 1. Illustrations of the applied force and the resulting indentation-depth occurring during the HR45N test cycle.

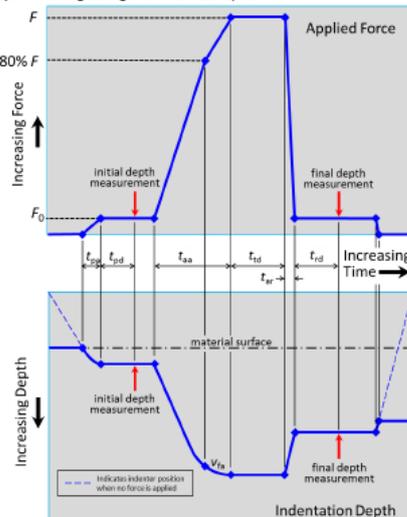


Figure 2. Illustration of the axial cross-section of an ideally-shaped diamond indenter indicating the dimensions specified above and the theoretical points of blend between the spherical tip and conical surface.

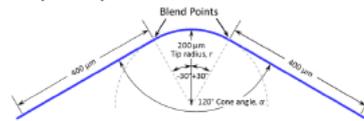


Figura B.13: Definizione scala Rockwell superficiale HR45N

Prove Sperimentali Scala HR45N, Provino 20.7 HRC (364-634)

Conf#	V. fa	t. aa*	Appr. vel.	Preload appl.	Add. I	Add. II	%-II%	Preload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal preload V. fa	t. ap	t. up	t. aa	t. dl	t. rf	V. fal	final load	time f. load	time f. vel.	Hardness	
1	20	3	0.08	0.14	0.12	0.09	30-70	2	4.6	4	0.3	0.5	20	3.03	2.03	3.19	4.94	4.03	21.7	315	27.046	27.44	19.99
2	20	3	0.08	0.14	0.12	0.09	30-70	2	4.6	4	0.3	0.5	20.2	3	2.03	3	5	4.02	22.5	310	27.921	28.43	20.05
3	20	3	0.08	0.14	0.12	0.09	30-70	2	4.6	4	0.3	0.5	20	2.99	2.02	3.19	5	4.02	22.1	309	29.859	30.45	19.75
4	20	4	0.08	0.14	0.09	0.09	30-70	2	4.6	4	0.3	0.5	19.6	3	2.03	4.13	4.94	4.03	17	308	34.109	34.88	19.96
5	20	4	0.08	0.14	0.09	0.09	30-70	2	4.6	4	0.3	0.5	19.4	3	2.03	3.88	4.94	4.02	21.5	313.5	37.046	37.62	19.9
6	20	4	0.08	0.14	0.09	0.09	30-70	2	4.6	4	0.3	0.5	20	2.99	2.02	3.88	4.94	4.02	21.9	308.5	38.421	38.95	20.01
7	20	5	0.08	0.14	0.06	0.09	30-70	2	4.6	4	0.3	0.5	20	2.95	2.02	5	5	4.02	21.9	309	45.546	46.1	19.93
8	20	5	0.08	0.14	0.06	0.09	30-70	2	4.6	4	0.3	0.5	20.3	2.95	2.02	5	5	4.02	21.9	312	46.921	47.38	20.07
9	20	5	0.08	0.14	0.06	0.09	30-70	2	4.6	4	0.3	0.5	20	3.03	2.03	5.25	5	4.02	15.5	308	36.734	37.4	19.92
10	30	3	0.08	0.14	0.12	0.13	30-70	2	4.5	4	0.3	0.5	30	2.97	2.03	3	4.94	4.02	30.6	317	30.046	30.2	20.08
11	30	3	0.08	0.14	0.12	0.13	30-70	2	4.5	4	0.3	0.5	29.6	2.97	2.03	2.94	4.94	4.02	30.7	318	31.046	31.24	20.05
12	30	3	0.08	0.14	0.12	0.13	30-70	2	4.5	4	0.3	0.5	29.2	3	2.03	2.94	5	4.02	30.6	310	31.984	32.24	19.97
13	30	4	0.08	0.14	0.068	0.13	30-70	2	4.5	4	0.3	0.5	30	2.99	2.02	4.19	4.94	4.02	29.9	308	37.296	37.46	20.1
14	30	4	0.08	0.14	0.068	0.13	30-70	2	4.5	4	0.3	0.5	29.8	3.02	2.02	4.25	4.94	4.02	29.6	309	40.859	40.94	20.11
15	30	4	0.08	0.14	0.068	0.13	30-70	2	4.5	4	0.3	0.5	30	2.99	2.02	4.05	5	4.03	29.7	309	42.046	42.18	19.86
16	30	5	0.08	0.14	0.054	0.14	30-70	2	4.4	4	0.3	0.5	30	3.02	2.02	4.94	4.88	4.02	32.2	315	38.296	38.58	19.67
17	30	5	0.08	0.14	0.054	0.14	30-70	2	4.4	4	0.3	0.5	29.8	3.02	2.02	5.25	4.88	4.03	30.2	315	40.859	41	19.92
18	30	5	0.08	0.14	0.054	0.14	30-70	2	4.4	4	0.3	0.5	30	3	2.03	5.06	4.81	4.03	32.2	308	39.671	40	19.98
19	40	3	0.08	0.14	0.11	0.2	50-70	2	4.4	4	0.3	0.5	40	3	2.03	3.13	5	4.03	39.9	312	36.359	36.57	19.64
20	40	3	0.08	0.14	0.11	0.2	50-70	2	4.4	4	0.3	0.5	40.3	3	2.03	3.05	5	4.03	39.6	318	37.921	38.11	19.95
21	40	3	0.08	0.14	0.11	0.2	50-70	2	4.4	4	0.3	0.5	40	3.03	2.03	3	4.94	4.02	40.4	319	39.234	39.43	19.79
22	40	4	0.08	0.14	0.07	0.19	50-70	2	4.4	4	0.3	0.5	40	3	2.03	3.94	5	4.02	38.6	316	46.109	46.31	19.65
23	40	4	0.08	0.14	0.07	0.19	50-70	2	4.4	4	0.3	0.5	40	3.03	2.03	3.88	4.94	4.02	37.7	308	46.546	46.81	20.06
24	40	4	0.08	0.14	0.07	0.19	50-70	2	4.4	4	0.3	0.5	40	3.03	2.03	4.19	5	4.02	38.3	318	49.421	49.62	20
25	40	5	0.08	0.14	0.052	0.19	30-70	2	4.4	4	0.3	0.5	39.8	3	2.03	5	4.94	4.03	39.4	307	41.421	41.56	20.05
26	40	5	0.08	0.14	0.052	0.19	30-70	2	4.4	4	0.3	0.5	40	3.03	2.03	5.13	4.94	4.03	41.2	313	40.671	40.83	20.02
27	40	5	0.08	0.14	0.052	0.19	30-70	2	4.4	4	0.3	0.5	40	2.95	2.02	5.13	5	4.03	41.3	312	42.359	42.5	19.94

Figura B.14: Tabella dati misure prove sperimentali scala Rockwell HR45N; provino (364-634) 20.7 HRC

Prove Sperimentali Scala HR45N - Provino 45.7 HRC (491-048)																										
Conf #	V	fa	t	ma	Appr. val.	Preload appl.	Add. I	Add. II	%-1%	Preload holding	Adt. load holding	Gap final reading	Removal adt. load	Removal preload	V	fa	t	DI	t	fa	Final load	time t	load	time t	vel.	Hardness
1	20	3	0.08	0.14	0.11	0.12	20-80	2.1	2.1	4.6	4.6	4	0.3	0.5	20.7	3.09	2.13	3.06	5	4.02	21.3	352	39.859	40.04	49.16	
2	20	3	0.08	0.14	0.11	0.12	20-80	2.1	2.1	4.6	4.6	4	0.3	0.5	20	3.06	2.13	3.06	5.06	4.03	20.9	356	27.234	27.36	49.07	
3	20	3	0.08	0.14	0.11	0.12	20-80	2.1	2.1	4.6	4.6	4	0.3	0.5	20.8	3.06	2.13	3.19	5	4.02	21.3	355	27.734	27.86	49.03	
4	20	4	0.08	0.14	0.06	0.12	20-80	2.1	2.1	4.6	4.6	4	0.3	0.5	20.2	3.08	2.14	4	5	4.02	20.6	353	34.234	34.415	48.98	
5	20	4	0.08	0.14	0.06	0.12	20-80	2.1	2.1	4.6	4.6	4	0.3	0.5	20	3.03	2.13	4	5	4.02	20.5	351.5	36.359	36.545	49.19	
6	20	4	0.08	0.14	0.06	0.12	20-80	2.1	2.1	4.6	4.6	4	0.3	0.5	20.3	3.06	2.13	3.88	5	4.03	20.3	360	39.921	40.045	49.15	
7	20	5	0.08	0.14	0.048	0.12	20-80	2.1	2.1	4.6	4.6	4	0.3	0.5	20.4	3.09	2.13	3.94	5	4.02	20.7	353	45.984	46.165	49.29	
8	20	5	0.08	0.14	0.048	0.12	20-80	2.1	2.1	4.6	4.6	4	0.3	0.5	20.5	3.11	2.14	4.75	5	4.02	20.5	355	35.796	35.959	49.14	
9	20	5	0.08	0.14	0.048	0.12	20-80	2.1	2.1	4.6	4.6	4	0.3	0.5	20.5	3.09	2.13	4.75	5	4.03	20.9	357	36.171	36.312	49.19	
10	30	3	0.08	0.14	0.09	0.18	20-80	2.1	2.1	4.4	4.4	4	0.3	0.5	29.5	3.11	2.14	3.81	4.88	4.02	27.3	360	33.171	33.17	48.93	
11	30	3	0.08	0.14	0.09	0.18	20-80	2.1	2.1	4.4	4.4	4	0.3	0.5	29.6	3.09	2.13	3.88	4.84	4.02	28	358	34.17	34.17	49.04	
12	30	3	0.08	0.14	0.09	0.18	20-80	2.1	2.1	4.4	4.4	4	0.3	0.5	29.1	3.11	2.14	3.94	4.94	4.02	26.3	355	34.734	34.734	49.14	
13	30	4	0.08	0.14	0.05	0.19	20-80	2.1	2.1	4.4	4.4	4	0.3	0.5	30	3.03	2.13	4.19	4.94	4.03	26.7	364	46.071	46.6	48.96	
14	30	4	0.08	0.14	0.05	0.19	20-80	2.1	2.1	4.4	4.4	4	0.3	0.5	30.5	3.09	2.13	3.94	4.94	4.02	29.2	356.5	47.296	47.31	49.13	
15	30	4	0.08	0.14	0.05	0.19	20-80	2.1	2.1	4.4	4.4	4	0.3	0.5	30.2	3.08	2.14	3.94	5	4.03	27.9	353	35.234	35.295	49.21	
16	30	5	0.08	0.14	0.06	0.2	20-80	2.1	2.1	4.4	4.4	4	0.3	0.5	29.7	3.09	2.13	3.9	5.06	4.02	21	359.5	34.796	34.74	48.96	
17	30	5	0.08	0.14	0.06	0.2	20-80	2.1	2.1	4.4	4.4	4	0.3	0.5	30	3.09	2.13	3.18	5	4.03	19.6	362	35.484	35.37	48.79	
18	30	5	0.08	0.14	0.06	0.2	20-80	2.1	2.1	4.4	4.4	4	0.3	0.5	30.2	3.14	2.14	4.75	5	4.03	26.5	360	39.484	39.48	49.15	
19	40	3	0.08	0.14	0.09	0.28	20-80	2.1	2.1	4.2	4.2	4	0.3	0.5	40	3.08	2.14	3	4.94	4.03	26.1	360.5	31.421	31.31	49.1	
20	40	3	0.08	0.14	0.09	0.28	20-80	2.1	2.1	4.2	4.2	4	0.3	0.5	40	3.06	2.13	3.94	4.88	4.02	25.5	365	33.609	33.5	49.04	
21	40	3	0.08	0.14	0.09	0.28	20-80	2.1	2.1	4.2	4.2	4	0.3	0.5	40	3.06	2.13	3	5	4.03	24.1	368	37.796	37.7	49.11	
22	40	4	0.08	0.14	0.07	0.28	20-80	2.1	2.1	4.2	4.2	4	0.3	0.5	39.7	3.11	2.14	4.13	5	4.03	26.7	359	29.296	29.21	49.03	
23	40	4	0.08	0.14	0.07	0.22	20-80	2.1	2.1	4.2	4.2	4	0.3	0.5	40	3.11	2.14	3.88	5	4.02	26.6	354	30.109	30.1	49.02	
24	40	4	0.08	0.14	0.07	0.22	20-80	2.1	2.1	4.2	4.2	4	0.3	0.5	40.4	3.08	2.14	3.94	4.94	4.02	27.6	358	30.071	30.01	49.06	
25	40	5	0.08	0.14	0.05	0.3	20-80	2.1	2.1	4.2	4.2	4	0.3	0.5	40	3.08	2.14	3.06	5.06	4.02	23.4	354	40.984	40.925	48.94	
26	40	5	0.08	0.14	0.05	0.3	20-80	2.1	2.1	4.2	4.2	4	0.3	0.5	40	3.06	2.13	4.94	5	4.02	26.6	357.5	42.671	42.6	48.77	
27	40	5	0.08	0.14	0.05	0.3	20-80	2.1	2.1	4.2	4.2	4	0.3	0.5	40	3.08	2.14	4.94	5	4.03	22.5	366	43.609	43.48	49	

Figura B.15: Tabella dati misure prove sperimentali scala Rockwell HR45N; provino (491-048) 45.7 HRC

Medie Prove Sperimentali Scala HR45N, Provino 20.7 HRC (364-634)																																
Conf#	V	fa*	t	aa*	t	aa*	Appr. vel.	Preload appl.	Add. I	Add. II	I%-II%	Preload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal preload	V	fa	t	ap	t	ap	t	aa	t	dl	t	rf	V	fa	final load	Hardness
1	20	3	0.08	0.14	0.12	0.09	30-70	2	4.6	0.3	0.5	20.07	3.01	2.03	3.13	4.98	4.02	22.10	311.33	19.93												
2	20	4	0.08	0.14	0.09	0.09	30-70	2	4.6	0.3	0.5	19.67	3.00	2.03	3.96	4.94	4.02	20.13	310.00	19.96												
3	20	5	0.08	0.14	0.06	0.09	30-70	2	4.6	0.3	0.5	20.10	2.98	2.02	5.08	5.00	4.02	19.77	309.67	19.97												
4	30	3	0.08	0.14	0.12	0.13	30-70	2	4.5	0.3	0.5	29.60	2.98	2.03	2.96	4.96	4.02	30.63	315.00	20.03												
5	30	4	0.08	0.14	0.06	0.13	30-70	2	4.5	0.3	0.5	29.93	3.00	2.02	4.17	4.96	4.02	29.73	308.67	20.02												
6	30	5	0.08	0.14	0.05	0.14	30-70	2	4.4	0.3	0.5	29.93	3.01	2.02	5.08	4.86	4.03	31.53	312.67	19.86												
7	40	3	0.08	0.14	0.11	0.2	50-70	2	4.4	0.3	0.5	40.10	3.01	2.03	3.06	4.98	4.03	39.97	316.33	19.79												
8	40	4	0.08	0.14	0.07	0.19	50-70	2	4.4	0.3	0.5	40.00	3.02	2.03	4.00	4.98	4.02	38.20	314.00	19.90												
9	40	5	0.08	0.14	0.05	0.19	50-70	2	4.4	0.3	0.5	39.93	2.99	2.03	5.09	4.96	4.03	40.63	310.67	20.00												

Medie Prove Sperimentali Scala HR45N, Provino 45.7 HRC (491-048)																																
Conf#	V	fa*	t	aa*	t	aa*	Appr. vel.	Preload appl.	Add. I	Add. II	I%-II%	Preload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal preload	V	fa	t	ap	t	ap	t	aa	t	dl	t	rf	V	fa	final load	Hardness
1	20	3	0.08	0.14	0.11	0.12	20-80	2.1	4.6	0.3	0.5	20.57	3.07	2.13	3.10	5.02	4.02	21.17	354.33	49.09												
2	20	4	0.08	0.14	0.06	0.12	20-80	2.1	4.6	0.3	0.5	20.17	3.06	2.13	3.96	5.00	4.02	20.47	354.83	49.11												
3	20	5	0.08	0.14	0.04	0.12	20-80	2.1	4.6	0.3	0.5	20.47	3.10	2.14	4.81	5.00	4.02	20.70	355.00	49.21												
4	30	3	0.08	0.14	0.09	0.18	20-80	2.1	4.4	0.3	0.5	29.40	3.10	2.14	2.88	4.92	4.02	27.20	357.67	49.04												
5	30	4	0.08	0.14	0.05	0.19	20-80	2.1	4.4	0.3	0.5	30.23	3.07	2.13	4.02	4.96	4.03	27.93	357.83	49.10												
6	30	5	0.08	0.14	0.06	0.2	20-80	2.1	4.4	0.3	0.5	29.97	3.11	2.13	4.96	5.02	4.03	22.37	360.50	48.97												
7	40	3	0.08	0.14	0.09	0.28	20-80	2.1	4.2	0.3	0.5	40.00	3.07	2.13	2.98	4.94	4.03	25.23	364.50	49.08												
8	40	4	0.08	0.14	0.07	0.28	20-80	2.1	4.2	0.3	0.5	40.03	3.10	2.14	3.98	4.98	4.02	26.97	357.00	49.04												
9	40	5	0.08	0.14	0.05	0.3	20-80	2.1	4.2	0.3	0.5	40.00	3.07	2.14	4.99	5.02	4.02	24.17	359.17	48.90												

Medie Prove Sperimentali Scala HR45N, Provino 62.4 HRC (362-193)																																
Conf#	V	fa*	t	aa*	t	aa*	Appr. vel.	Preload appl.	Add. I	Add. II	I%-II%	Preload holding	Add. load holding	Gap final reading	Removal add. load	Removal preload	V	fa	t	ap	t	ap	t	aa	t	dl	t	rf	V	fa	final load	Hardness
1	20	3	0.08	0.14	0.14	0.13	30-70	2	4.6	0.5	0.5	20.00	2.97	2.01	2.90	4.94	4.00	19.77	311.00	68.49												
2	20	4	0.08	0.14	0.08	0.14	30-70	2	4.6	0.5	0.5	20.10	2.97	2.00	3.96	4.94	4.00	20.33	307.67	68.56												
3	20	5	0.08	0.14	0.06	0.14	30-70	2	4.6	0.5	0.5	19.90	3.02	2.01	5.00	4.94	4.01	20.30	308.67	68.57												
4	30	3	0.08	0.14	0.15	0.23	30-70	2	4.6	0.5	0.5	30.03	2.97	2.00	2.90	5.06	4.00	24.53	308.33	68.61												
5	30	4	0.08	0.14	0.08	0.25	30-70	2	4.6	0.5	0.5	30.10	2.97	2.00	4.08	5.06	4.00	28.60	305.33	68.57												
6	30	5	0.08	0.14	0.05	0.24	30-70	2	4.6	0.5	0.5	29.83	2.99	2.02	4.92	5.06	4.02	26.33	305.00	68.51												
7	40	3	0.08	0.14	0.09	0.41	30-70	2	4.3	0.5	0.5	40.13	3.01	2.00	2.94	4.94	4.01	36.53	317.00	68.39												
8	40	4	0.08	0.14	0.05	0.44	30-70	2	4.3	0.5	0.5	40.07	2.98	2.01	4.06	5.00	4.02	33.77	321.00	68.43												
9	40	5	0.08	0.14	0.04	0.44	30-70	2	4.3	0.5	0.5	39.83	2.97	2.00	5.13	5.00	4.00	35.90	312.33	68.48												

Figura B.17: Tabelle medie misure prove sperimentali scala Rockwell HR45N

Range Prove Sperimentali Scala HR45N, Provino 20,7 HRC (364-634)																										
Conf#	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	Hardness	MAX	Hardness	MIN	RANGE
1	20	3	20,8	20	0,8	3,09	3,06	0,03	2,13	2,13	0,00	3,19	3,06	0,13	5,06	5,00	0,06	21,30	20,90	0,40	356,00	352,00	4,00	49,16	49,03	0,13
2	20	4	20,3	20	0,3	3,08	3,03	0,05	2,14	2,13	0,01	4,00	3,88	0,12	5,00	5,00	0,00	20,60	20,30	0,30	360,00	351,50	8,50	49,19	48,98	0,21
3	20	5	20,5	20,4	0,1	3,11	3,09	0,02	2,14	2,13	0,01	4,94	4,75	0,19	5,00	5,00	0,00	20,90	20,30	0,60	370,00	353,00	17,00	49,29	49,14	0,15
4	30	3	29,6	29,1	0,5	3,11	3,09	0,02	2,14	2,13	0,01	2,94	2,81	0,13	4,94	4,88	0,06	28,00	26,30	1,70	360,00	353,00	7,00	49,14	48,95	0,21
5	30	4	29,5	29,0	0,5	3,09	3,05	0,04	2,14	2,13	0,01	4,19	3,94	0,25	5,00	4,94	0,06	29,30	26,70	2,60	364,00	353,00	11,00	49,21	48,96	0,25
6	30	5	29,8	29,2	0,6	3,12	3,08	0,04	2,14	2,13	0,01	3,40	3,25	0,15	4,94	4,88	0,06	28,70	26,10	2,60	368,00	356,50	11,50	49,17	48,94	0,23
7	40	3	40,3	40	0,3	3,03	3,00	0,03	2,03	2,03	0,00	3,13	3,00	0,13	5,00	4,94	0,06	40,40	39,60	0,80	319,00	312,00	7,00	19,95	19,65	0,31
8	40	4	40	40	0	3,03	3,00	0,03	2,03	2,03	0,00	4,19	3,88	0,31	5,00	4,94	0,06	38,60	37,70	0,90	318,00	308,00	10,00	20,06	19,65	0,41
9	40	5	40	39,8	0,2	3,03	2,95	0,08	2,03	2,02	0,01	5,13	5,00	0,13	5,00	4,94	0,06	41,30	39,40	1,90	313,00	307,00	6,00	20,05	19,84	0,21

Range Prove Sperimentali Scala HR45N, Provino 45,7 HRC (491-949)																										
Conf#	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	Hardness	MAX	Hardness	MIN	RANGE
1	20	3	20,8	20	0,8	3,09	3,06	0,03	2,13	2,13	0,00	3,19	3,06	0,13	5,06	5,00	0,06	21,30	20,90	0,40	356,00	352,00	4,00	49,16	49,03	0,13
2	20	4	20,3	20	0,3	3,08	3,03	0,05	2,14	2,13	0,01	4,00	3,88	0,12	5,00	5,00	0,00	20,60	20,30	0,30	360,00	351,50	8,50	49,19	48,98	0,21
3	20	5	20,5	20,4	0,1	3,11	3,09	0,02	2,14	2,13	0,01	4,94	4,75	0,19	5,00	5,00	0,00	20,90	20,30	0,60	370,00	353,00	17,00	49,29	49,14	0,15
4	30	3	29,6	29,1	0,5	3,11	3,09	0,02	2,14	2,13	0,01	2,94	2,81	0,13	4,94	4,88	0,06	28,00	26,30	1,70	360,00	353,00	7,00	49,14	48,95	0,21
5	30	4	29,5	29,0	0,5	3,09	3,05	0,04	2,14	2,13	0,01	4,19	3,94	0,25	5,00	4,94	0,06	29,30	26,70	2,60	364,00	353,00	11,00	49,21	48,96	0,25
6	30	5	29,8	29,2	0,6	3,12	3,08	0,04	2,14	2,13	0,01	3,40	3,25	0,15	4,94	4,88	0,06	28,70	26,10	2,60	368,00	356,50	11,50	49,17	48,94	0,23
7	40	3	40,3	40	0,3	3,03	3,00	0,03	2,03	2,03	0,00	3,13	3,00	0,13	5,00	4,94	0,06	40,40	39,60	0,80	319,00	312,00	7,00	19,95	19,65	0,31
8	40	4	40	40	0	3,03	3,00	0,03	2,03	2,03	0,00	4,19	3,88	0,31	5,00	4,94	0,06	38,60	37,70	0,90	318,00	308,00	10,00	20,06	19,65	0,41
9	40	5	40	39,8	0,2	3,03	2,95	0,08	2,03	2,02	0,01	5,13	5,00	0,13	5,00	4,94	0,06	41,30	39,40	1,90	313,00	307,00	6,00	20,05	19,84	0,21

Range Prove Sperimentali Scala HR45N, Provino 62,4 HRC (362-193)																										
Conf#	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	V	fa	MAN	Hardness	MAX	Hardness	MIN	RANGE
1	20	3	20,8	20	0,8	3,09	3,06	0,03	2,13	2,13	0,00	3,19	3,06	0,13	5,06	5,00	0,06	21,30	20,90	0,40	356,00	352,00	4,00	49,16	49,03	0,13
2	20	4	20,3	20	0,3	3,08	3,03	0,05	2,14	2,13	0,01	4,00	3,88	0,12	5,00	5,00	0,00	20,60	20,30	0,30	360,00	351,50	8,50	49,19	48,98	0,21
3	20	5	20,5	20,4	0,1	3,11	3,09	0,02	2,14	2,13	0,01	4,94	4,75	0,19	5,00	5,00	0,00	20,90	20,30	0,60	370,00	353,00	17,00	49,29	49,14	0,15
4	30	3	29,6	29,1	0,5	3,11	3,09	0,02	2,14	2,13	0,01	2,94	2,81	0,13	4,94	4,88	0,06	28,00	26,30	1,70	360,00	353,00	7,00	49,14	48,95	0,21
5	30	4	29,5	29,0	0,5	3,09	3,05	0,04	2,14	2,13	0,01	4,19	3,94	0,25	5,00	4,94	0,06	29,30	26,70	2,60	364,00	353,00	11,00	49,21	48,96	0,25
6	30	5	29,8	29,2	0,6	3,12	3,08	0,04	2,14	2,13	0,01	3,40	3,25	0,15	4,94	4,88	0,06	28,70	26,10	2,60	368,00	356,50	11,50	49,17	48,94	0,23
7	40	3	40,3	40	0,3	3,03	3,00	0,03	2,03	2,03	0,00	3,13	3,00	0,13	5,00	4,94	0,06	40,40	39,60	0,80	319,00	312,00	7,00	19,95	19,65	0,31
8	40	4	40	40	0	3,03	3,00	0,03	2,03	2,03	0,00	4,19	3,88	0,31	5,00	4,94	0,06	38,60	37,70	0,90	318,00	308,00	10,00	20,06	19,65	0,41
9	40	5	40	39,8	0,2	3,03	2,95	0,08	2,03	2,02	0,01	5,13	5,00	0,13	5,00	4,94	0,06	41,30	39,40	1,90	313,00	307,00	6,00	20,05	19,84	0,21

Figura B.18: Tabelle range valori prove sperimentali scala Rockwell HR45N

Bibliografia

- [1] Giulio Barbato, Alessandro Germak e Sergio Desogus. «Experimental analysis on the influence quantities in the Rockwell C hardness Test». In: *Conference Paper* (January 1998).
- [2] Giulio Barbato, Alessandro Germak e Ginafranco Genta. *Misurare per Decidere*. A cura di Società editrice Esculapio. Torino, 2019.
- [3] Lauren Brice, Samuel Low e Rodney Jiggetts. «Determination of sensitivity coefficients for Rockwell hardness scale HR15N, HR30N and HRA». In: *XVIII IMEKO World Congress on Metrology for a Sustainable Development* (September 2006).
- [4] Galileo Durometria. *The Hardness Standardization Machine*. A cura di LTF S.p.a. Torino, 2009.
- [5] «Guidelines on the Estimation of Uncertainty in Hardness Measurements». In: *EURAMET cg-16* (2011).
- [6] ASM International. *Hardness Testing*. A cura di Konrad Herrmann. Ohio, 2009.
- [7] «ISO 6508-1:2002: Metallic materials - Rockwell hardness test - Part 1: Test method». In: *ISO TC 164/SC 3 N 821* (2002).
- [8] S. Low e R. R. Machado. «Determination of test cycle sensitivity coefficients for the Rockwell HRA hardness scale». In: *Journal of Physics: Conference Series* 1065.062008 (2018).
- [9] Samuel R. Low. *Rockwell Hardness Measurement of Metallic Materials*. A cura di NIST. USA, 2001.
- [10] «Metallic materials — Rockwell hardness test — Part 2: Vérification and calibration of testing machines». In: *ISO TC 164/SC 3 N 823* (2002).
- [11] «Metallic materials — Rockwell hardness test — Part 3: Calibration of reference blocks». In: *ISO TC 164/SC 3 N 825* (2002).

- [12] OIML. *The Unification of Hardness Measurement*. A cura di OIML. Paris, 1991.
- [13] Jr William D. Callister e David G. Rethwisch. *Materials Science and Engineering - An Introduction*. A cura di John Wiley. USA, 2009.