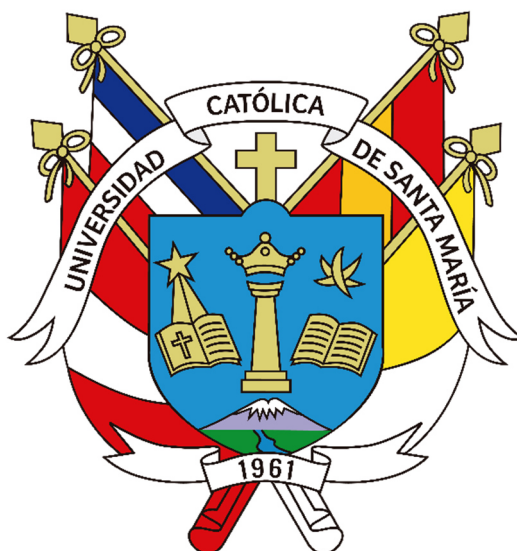


Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica



IMPLEMENTACIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE UN MÓDULO DE DURÓMETROS PORTÁTILES PARA EVALUAR LA DUREZA SUPERFICIAL DE COMPONENTES MECÁNICOS SEGÚN LAS NORMAS ASTM A-956 Y ASTM A-1038 PARA EL LABORATORIO DE MATERIALES DE LA EPIMMEM DE LA UCSM

Tesis presentada por los Bachilleres:

Escalante Quispe, Jordi Fredy

Sanjines Hualpa, Juan Augusto

para optar por el Título Profesional de:

Ingeniero Mecánico

Asesor:

Dr. Almiron Baca, Jonathan Joseph

Arequipa – Perú

2023

DICTAMEN APROBATORIO

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 11 de Enero del 2023

Dictamen: 007526-C-EPIMMEM-2023

Visto el borrador del expediente 007526, presentado por:

2012243061 - ESCALANTE QUISPE JORDI FREDY

2008244321 - SANJINES HUALPA JUAN AGUSTO

Titulado:

**IMPLEMENTACIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE UN MÓDULO DE DURÓMETROS
PORTÁTILES PARA EVALUAR LA DUREZA SUPERFICIAL DE COMPONENTES MECÁNICOS
SEGÚN LAS NORMAS ASTM A-956 Y ASTM A-1038 PARA EL LABORATORIO DE MATERIALES DE
LA EPIMMEM DE LA UCSM**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**1469 - CHIRE RAMIREZ EMILIO
DICTAMINADOR**



**1734 - ALVAREZ FLOREZ DARWIN REYNALDO
DICTAMINADOR**



**1828 - GORDILLO ANDIA CARLOS ALBERTO
DICTAMINADOR**



Dedicatoria

Agradezco en primer lugar a Dios por acompañarme en cada paso de mi vida y darme las fuerzas para seguir adelante; luego agradezco a mis padres y hermanos por su esfuerzo, sacrificio, apoyo y amor que me han brindado a lo largo de mi vida; finalmente agradezco a mis amigos Carlos, Junior, Juan, Luis y todas las personas que he conocido a lo largo de la carrera universitaria que de manera directa e indirecta han aportado en mi formación profesional.

Escalante Quispe, Jordi Fredy

Mi tesis lo dedico con todo mi amor a nuestro padre celestial, que me dio la oportunidad de vivir y darme una familia maravillosa, con mucho cariño principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento.

Sanjines Hualpa, Juan Augusto

RESUMEN

El presente trabajo tiene como fin la implementación y estimación de la incertidumbre de medida de un módulo de durómetros portátiles para evaluar la dureza superficial de componentes mecánicos según las normas ASTM A-956 y ASTM A-1038 para el laboratorio de materiales de la EPIMMEM de la UCSM. El módulo está compuesto por 2 tipos de pruebas de dureza, la prueba de dureza Leeb o de rebote y la prueba de dureza de impedancia de contacto ultrasónico (UCI).

Para determinar la exactitud de medida de los durómetros portátiles (Leeb y UCI) respecto a los durómetros estáticos del laboratorio de materiales (Rockwell, Brinell y Vickers) se utilizó un patrón de dureza de 57.0 HRC y 2 probetas de acero AISI 1045 y AISI 4140, cabe resaltar que estas probetas poseen diferentes acabados superficiales en cada cara. Los valores de dureza obtenidos por los diferentes durómetros sobre el patrón de dureza Rockwell se compararon con la dureza de referencia y de esta manera se determinó la exactitud de estos resultados en la escala Rockwell C. Respecto a las escalas de dureza Brinell y Vickers se realizaron mediciones con los durómetros estáticos sobre las probetas de acero AISI 1045 y AISI 4140 respectivamente sobre la cara que posee mejor acabado superficial, los resultados obtenidos con los durómetros estáticos sobre estas probetas se compararon con los valores de dureza medidos por los métodos portátiles en ambas caras de cada probeta.

En cuanto a la incertidumbre de medida se estableció el procedimiento y se identificó las fuentes de incertidumbre (repetibilidad, no uniformidad, deriva, calibración y resolución) para estimar la incertidumbre de medida.

Finalmente se elaboró un procedimiento y una guía de laboratorio para realizar pruebas de dureza sobre superficies metálicas; que ayudaran al operador del equipo y a los estudiantes a identificar el principio de funcionamiento de los métodos portátiles, seguir el procedimiento recomendados por las normas y realizar el reporte de resultados respecto a las pruebas de dureza portátiles.

Palabras clave: Prueba de dureza Leeb, Prueba de dureza UCI, incertidumbre de medida, exactitud.

ABSTRACT

The purpose of this work is to implement and estimate the measurement uncertainty of a portable durometer module to evaluate the surface hardness of mechanical components according to ASTM A-956 and ASTM A-1038 standards for the EPIMMEM materials laboratory in the UCSM. The module is composed of 2 types of hardness tests, the Leeb or rebound hardness test and the ultrasonic contact impedance (UCI) hardness test.

To determine the measurement accuracy of the portable durometers (Leeb and UCI) with respect to the static durometers of the materials laboratory (Rockwell, Brinell and Vickers), a hardness standard of 57.0 HRC and 2 AISI 1045 and AISI 4140 steel test tubes were used, it should be noted that these specimens have different surface finishes on each side. The hardness values obtained by the different durometers on the Rockwell hardness standard were compared with the reference hardness and thus the accuracy of these results on the Rockwell C scale was determined. Regarding the Brinell and Vickers hardness scales, measurements with the static durometers on the AISI 1045 and AISI 4140 steel specimens respectively on the face that has the best surface finish, the results obtained with the static durometers on these specimens were compared with the hardness values measured by the portable methods in both faces of each specimen.

Regarding the measurement uncertainty, the procedure was established and the sources of uncertainty (repeatability, non-uniformity, drift, calibration and resolution) were identified to estimate the measurement uncertainty.

Finally, a procedure and a laboratory guide to carry out hardness tests on metallic surfaces were elaborated; that will help the operator of the equipment and the students to identify the principle of operation of the portable methods, follow the procedure recommended by the standards and report the results regarding the portable hardness tests.

Keywords: Leeb hardness test, UCI hardness test, measurement uncertainty, accuracy.

INTRODUCCIÓN

Utilizando las pruebas de dureza se consigue información sobre las propiedades mecánicas de un material, no sólo de la dureza, sino también de la resistencia al desgaste y otras propiedades correlacionadas como la vida útil y la resistencia a la tracción. (Herrmann, 2007)

La mayoría de las pruebas de dureza utilizadas actualmente en la industria se basan en principios desarrollados a inicios de siglo XX que hasta el día de hoy se han mantenido sin cambios. Las pruebas de dureza que utilizan los métodos estáticos más comunes van acompañadas de mediciones directas de la geometría de la huella de indentación (prueba de dureza Brinell, Vickers y Knoop) o la profundidad de penetración de la huella de indentación (prueba de dureza Rockwell). Los valores de dureza están determinados por la relación entre la carga de prueba y los parámetros geométricos de la huella de indentación. (Herrmann, 2011)

Las pruebas de dureza que se basan en los métodos estáticos tienen limitaciones respecto al análisis de elementos estructurales, máquinas y equipos industriales por lo que generalmente están asociadas a la necesidad del corte y preparación muestras especiales para realizar el análisis de dureza. (Syasko & Nikazov, 2021)

El avance de la tecnología ha permitido el desarrollo de nuevos métodos y procedimientos de medición que hacen posible implementar durómetros portátiles, lo que favorece a realizar pruebas de dureza en las instalaciones de las industrias de producción, en el entorno de fabricación, en los laboratorios e inclusive cuando los componentes a medir se encuentren en funcionamiento.

ÍNDICE

DICTAMEN APROBATORIO

DEDICATORIA

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1 Definición del problema	1
1.2 Formulación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Alcances.....	2
1.5 Limitaciones	3
1.6 Justificación	3
CAPÍTULO II	4
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Propiedades de los materiales.....	4
2.1.1 Propiedades mecánicas	4
2.1.1.1 Ductilidad	5
2.1.1.2 Maquinabilidad.....	5
2.1.1.3 Resistencia.....	5
2.1.1.4 Templabilidad.....	6
2.1.1.5 Tenacidad de impacto.....	6
2.1.1.6 Dureza	6
2.2 Sistemas de dureza.....	6

2.3	Pruebas de dureza	7
2.3.1	Prueba de dureza de Mohs.....	7
2.3.2	Prueba de dureza superficial con limas	8
2.3.2.1	Procedimiento de la prueba de dureza con limas	8
2.3.3	Prueba de dureza Brinell.....	9
2.3.3.1	Principio de medición de la prueba de dureza Brinell	9
2.3.3.2	Especificación del número de dureza Brinell.....	11
2.3.3.3	Correlación con el esfuerzo ultimo	11
2.3.3.4	Ventajas y desventajas de la prueba de dureza Brinell	11
2.3.4	Prueba de dureza Rockwell	12
2.3.4.1	Tipos de prueba de dureza Rockwell	12
2.3.4.2	Principio de medición de la prueba de dureza Rockwell	12
2.3.4.3	Especificación del número de dureza Rockwell	15
2.3.4.4	Ventajas y desventajas de la prueba de dureza Rockwell	15
2.3.5	Prueba de dureza Vickers	16
2.3.5.1	Principio de medición de la prueba de dureza Vickers	16
2.3.5.2	Especificación del número de dureza Vickers	17
2.3.5.3	Ventajas y desventajas de la prueba de dureza Vickers	17
2.3.6	Prueba de dureza Knoop.....	18
2.3.6.1	Principio de medición de la prueba de dureza Knoop.....	18
2.3.6.2	Especificación del número de dureza Knoop.....	19
2.3.6.3	Ventajas y desventajas de la prueba de dureza Knoop.....	20
2.3.7	Prueba de dureza Leeb.....	20
2.3.7.1	Principio de funcionamiento	21
2.3.7.2	Especificación del número de dureza Leeb.....	23
2.3.7.3	Ventajas y desventajas de la prueba de dureza Leeb	24
2.3.8	Prueba de dureza de impedancia de contacto ultrasonico (UCI).....	24

2.3.8.1	Principio de funcionamiento	25
2.3.8.2	Especificación del número de dureza UCI.....	27
2.3.8.3	Ventajas y desventajas de la prueba de dureza UCI.....	27
2.4	Conversión de escalas de dureza	28
2.5	Medidas de dispersión	29
2.5.1	Repetibilidad.....	29
2.5.2	Varianza.....	29
2.5.3	Desviación estándar de la muestra.....	29
2.6	Error.....	30
2.6.1	Error aleatorio.....	31
2.6.2	Error sistemático.....	31
2.7	Exactitud y precisión	31
2.8	Incertidumbre de medición.....	32
2.8.1	Medición directa e indirecta	32
2.8.2	Procedimiento general para estimar la incertidumbre de medición	33
2.8.2.1	Especificación del mensurando.....	33
2.8.2.2	Tipos de incertidumbre.....	34
2.8.2.2.1	Incertidumbre tipo A.....	34
2.8.2.2.2	Incertidumbre tipo B.....	34
2.8.2.2.2.1	Distribución normal	35
2.8.2.2.2.2	Distribución rectangular	36
2.8.2.2.2.3	Distribución triangular	36
2.8.2.3	Fuentes de incertidumbre	37
2.8.2.3.1	Incertidumbre debido a la repetibilidad	37
2.8.2.3.2	Incertidumbre debido a la calibración del equipo.....	37
2.8.2.3.3	Incertidumbre debido a la deriva	38
2.8.2.3.4	Incertidumbre debido a la temperatura	38
2.8.2.3.5	Incertidumbre debido a la inestabilidad de la medida	38

2.8.2.3.6	Incertidumbre debida a la resolución.....	39
2.8.3	Calculo de la incertidumbre combinada.....	39
2.8.4	Calculo de la incertidumbre expandida.....	40
2.9	Cadena metrológica en dureza.....	40
CAPÍTULO III	.....	43
3.	Procedimiento Experimental.....	43
3.1	Principio de medición.....	43
3.2	Equipos y materiales utilizados.....	43
3.3	Procedimiento experimental de la prueba de dureza Rockwell C.....	44
3.4	Procedimiento experimental de la prueba de dureza Brinell.....	46
3.4.1	Procedimiento experimental de la prueba de dureza Vickers.....	48
3.5	Procedimiento experimental de la prueba de dureza Leeb.....	50
3.5.1.1	Probeta de prueba.....	50
3.5.1.2	Procedimiento de prueba de dureza Leeb.....	51
3.6	Procedimiento experimental de la prueba de dureza de impedancia de contacto ultrasónico (UCI).....	56
3.6.1.1	Probeta de prueba.....	56
3.6.1.2	Procedimiento de la prueba de dureza UCI.....	57
CAPÍTULO IV	.....	62
4.	Estimación de la incertidumbre.....	62
4.1	Estimación de la incertidumbre del patrón de dureza Rockwell utilizado la prueba de dureza Leeb.....	62
4.1.1	Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad.....	62
4.1.2	Estimación de la incertidumbre debido a la calibración.....	63
4.1.3	Incertidumbre debido a la resolución.....	63
4.1.4	Incertidumbre debido a la deriva del instrumento.....	63
4.1.5	Incertidumbre combinada y expandida.....	63
4.2	Estimación de la incertidumbre del patrón de dureza Rockwell utilizado la prueba de dureza UCI.....	64

4.2.1	Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad.....	64
4.2.2	Estimación de la incertidumbre debido a la calibración.....	64
4.2.3	Incertidumbre debido a la resolución	64
4.2.4	Incertidumbre debido a la deriva del instrumento	65
4.2.5	Incertidumbre combinada y expandida.....	65
4.3	Estimación de la incertidumbre de la probeta pulida AISI 1045 utilizado la prueba de dureza Leeb.....	65
4.3.1	Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad.....	65
4.3.2	Estimación de la incertidumbre debido a la calibración.....	66
4.3.3	Incertidumbre debido a la resolución	66
4.3.4	Incertidumbre debido a la deriva del instrumento.....	66
4.3.5	Incertidumbre combinada y expandida.....	67
4.4	Estimación de la incertidumbre de la probeta sin pulir AISI 1045 utilizado la prueba de dureza Leeb.....	67
4.4.1	Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad.....	67
4.4.2	Estimación de la incertidumbre debido a la calibración.....	68
4.4.3	Incertidumbre debido a la resolución	68
4.4.4	Incertidumbre debido a la deriva del instrumento.....	68
4.4.5	Incertidumbre combinada y expandida.....	68
4.5	Estimación de la incertidumbre de la probeta pulida AISI 1045 utilizado la prueba de dureza UCI.....	69
4.5.1	Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad.....	69
4.5.2	Estimación de la incertidumbre debido a la calibración.....	69
4.5.3	Incertidumbre debido a la resolución	69
4.5.4	Incertidumbre debido a la deriva del instrumento.....	70
4.5.5	Incertidumbre combinada y expandida.....	70
4.6	Estimación de la incertidumbre de la probeta sin pulir AISI 1045 utilizado la prueba de dureza UCI.....	70

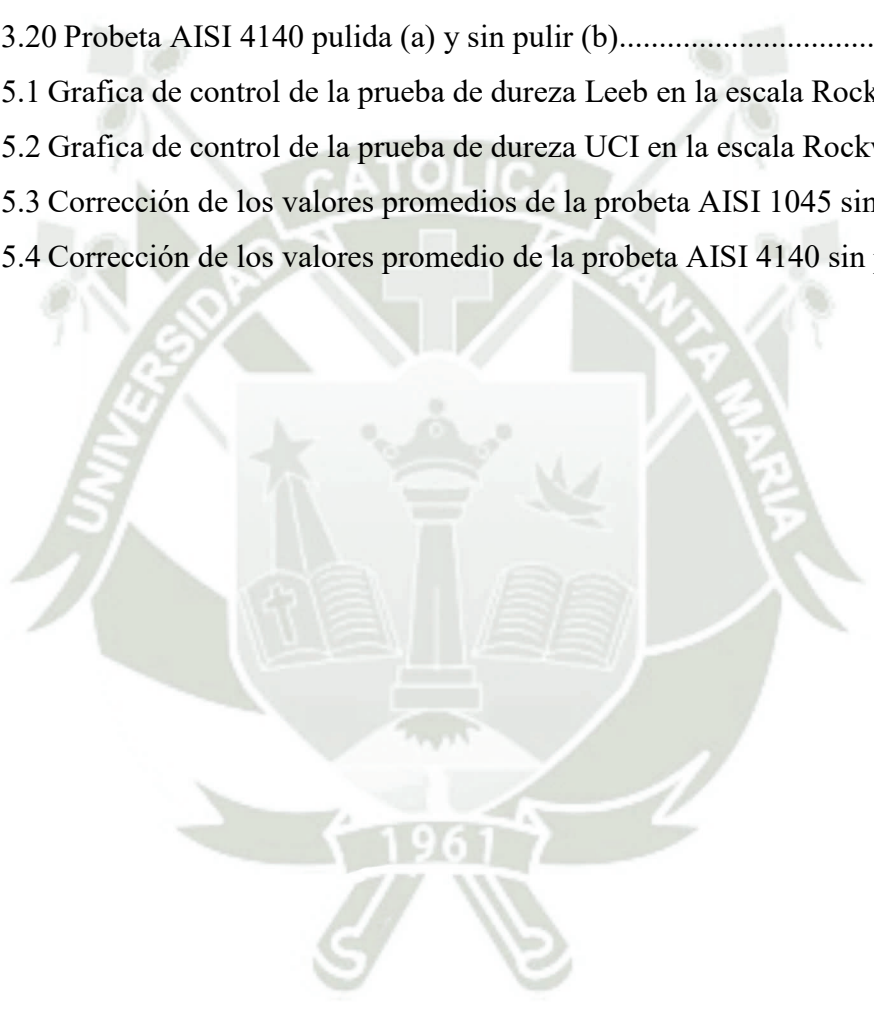
4.6.1	Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad.....	70
4.6.2	Estimación de la incertidumbre debido a la calibración.....	71
4.6.3	Incertidumbre debido a la resolución	71
4.6.4	Incertidumbre debido a la deriva del instrumento	71
4.6.5	Incertidumbre combinada y expandida.....	71
4.7	Estimación de la incertidumbre de la probeta pulida AISI 4140 utilizado la prueba de dureza Leeb.....	72
4.7.1	Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad.....	72
4.7.2	Estimación de la incertidumbre debido a la calibración.....	73
4.7.3	Incertidumbre debido a la resolución	73
4.7.4	Incertidumbre debido a la deriva del instrumento.....	73
4.7.5	Incertidumbre combinada y expandida.....	73
4.8	Estimación de la incertidumbre de la probeta sin pulir AISI 4140 utilizado la prueba de dureza Leeb.....	74
4.8.1	Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad.....	74
4.8.2	Estimación de la incertidumbre debido a la calibración.....	74
4.8.3	Incertidumbre debido a la resolución	74
4.8.4	Incertidumbre debido a la deriva del instrumento.....	75
4.8.5	Incertidumbre combinada y expandida.....	75
4.9	Estimación de la incertidumbre de la probeta pulida AISI 4140 utilizado la prueba de dureza UCI.....	75
4.9.1	Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad.....	75
4.9.2	Estimación de la incertidumbre debido a la calibración.....	76
4.9.3	Incertidumbre debido a la resolución	76
4.9.4	Incertidumbre debido a la deriva del instrumento.....	76
4.9.5	Incertidumbre combinada y expandida.....	76
4.10	Estimación de la incertidumbre de la probeta sin pulir AISI 4140 utilizado la prueba de dureza UCI.....	77

4.10.1	Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad.....	77
4.10.2	Estimación de la incertidumbre debido a la calibración.....	77
4.10.3	Incertidumbre debido a la resolución	78
4.10.4	Incertidumbre debido a la deriva del instrumento	78
4.10.5	Incertidumbre combinada y expandida.....	78
CAPÍTULO V	.....	80
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	.....	80
5.1	Análisis de resultados obtenidos en la escala de dureza Rockwell	80
5.1.1	Comparación de los resultados en la escala Rockwell	80
5.1.2	Carta de control de la prueba de dureza Leeb	81
5.1.3	Carta de control de la prueba de dureza UCI.....	82
5.2	Análisis de resultados obtenidos en la escala de dureza Brinell.....	83
5.3	Análisis de resultados obtenidos en la escala de dureza Vickers	85
CONCLUSIONES	.....	87
RECOMENDACIONES	.....	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....	89
ANEXOS	.....	93
Anexo A:	GUÍA DE LABORATORIO.....	103
Anexo B:	PROCEDIMIENTO PARA MEDIR LA DUREZA SUPERFICIAL DE COMPONENTES MECÁNICOS.....	94
Anexo C:	ASTM A956.....	121
Anexo D:	ASTM A1038	127
Anexo E:	AISI 1045	134
Anexo F:	AISI 4140	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de esfuerzo-deformación de un material dúctil	5
Figura 2.2 Principio de medición de la prueba de dureza Brinell	9
Figura 2.3 Principio de medición de la prueba de dureza Rockwell	13
Figura 2.4 Principio de medición de la prueba de dureza Vickers	16
Figura 2.5 Principio de medición de la prueba de dureza Knoop.....	19
Figura 2.6 Prueba de dureza Leeb	21
Figura 2.7 Esquema de medición de dureza Leeb	22
Figura 2.8 Señal de voltaje de inducción típica generada por el imán permanente dentro del cuerpo de impacto durante las principales fases de prueba de una prueba de dureza EQUOTIP.....	22
Figura 2.9 Prueba de dureza de impedancia de contacto ultrasonico	25
Figura 2.10 Esquema del principio de funcionamiento de la prueba de dureza UCI	26
Figura 2.11 Curvas de referencia de distintos materiales	26
Figura 2.12 Comparación de varias escalas de dureza	28
Figura 2.13 Distinción entre exactitud y precisión.....	32
Figura 2.14 Distribución normal de probabilidad.....	35
Figura 2.15 Distribución rectangular de probabilidad.....	36
Figura 2.16 Distribución rectangular de probabilidad	37
Figura 2.17 Estructura de la cadena metrológica para la definición y difusión de las escalas de dureza.....	41
Figura 3.1 Equipos y materiales	44
Figura 3.2 Procedimiento de la prueba de dureza Rockwell	45
Figura 3.3 Patrón de dureza antes (a) y después de la prueba de dureza Rockwell (b).....	45
Figura 3.4 Procedimiento de la prueba de dureza Brinell	47
Figura 3.5 Probeta antes (a) y después de la prueba de dureza Brinell (b) cara superior....	47
Figura 3.6 Procedimiento de la prueba de dureza Vickers	49
Figura 3.7 Probeta antes (a) y después de la prueba de dureza Vickers (b) cara superior ..	49
Figura 3.8 Preparación de la probeta de prueba AISI 1045.....	51
Figura 3.9 Conexión (a) y operación remota del equipo NOVOTEST T-UD2 (b).....	51
Figura 3.10 Selección del tipo de material (a) y selección de la escala de dureza (b).	52
Figura 3.11 Carga del dispositivo de impacto	52
Figura 3.12 Medición de dureza superficial utilizando el dispositivo de impacto tipo D...53	53

Figura 3.13 Resultado del proceso de medición en la interfaz de la aplicación.....	53
Figura 3.14 Esquema de indentaciones realizadas por la prueba de dureza Leeb.....	54
Figura 3.15 Probeta AISI 1045 pulida (a) y sin pulir (b).....	54
Figura 3.16 Conexión (a) y sujeción (b) de la sonda de 50 N.....	57
Figura 3.17 Procedimiento de medición prueba de dureza UCI.....	58
Figura 3.18 Procedimiento de medición prueba de dureza UCI con banco.....	58
Figura 3.19 Esquema de indentaciones UCI.....	59
Figura 3.20 Probeta AISI 4140 pulida (a) y sin pulir (b).....	59
Figura 5.1 Grafica de control de la prueba de dureza Leeb en la escala Rockwell.....	82
Figura 5.2 Grafica de control de la prueba de dureza UCI en la escala Rockwell.....	83
Figura 5.3 Corrección de los valores promedios de la probeta AISI 1045 sin pulir.....	85
Figura 5.4 Corrección de los valores promedio de la probeta AISI 4140 sin pulir.....	86



LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Escala de dureza Mohs.....	7
Tabla 2-2 Set de limas de dureza.....	8
Tabla 2-3 Durezas típicas de distintos tipos de materiales en la escala Brinell	10
Tabla 2-4 Escala de dureza Rockwell regular	14
Tabla 2-5 Escala de dureza Rockwell superficial.....	14
Tabla 2-6 Dispositivos de impacto y aplicaciones del método Leeb	23
Tabla 2-7 Aplicaciones típicas de la prueba de dureza UCI en función de la carga de prueba	27
Tabla 3-1 Resultados de la prueba dureza Rockwell sobre el patrón de dureza	46
Tabla 3-2 Resultados de la prueba dureza Brinell sobre la probeta AISI 1045.....	48
Tabla 3-3 Resultados de la prueba dureza Vickers sobre la probeta AISI 4140	50
Tabla 3-4 Resultados de la prueba dureza Leeb sobre el patrón de dureza 57.0 HRC.....	55
Tabla 3-5 Resultados de la prueba dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 1045.....	55
Tabla 3-6 Resultados de la prueba dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 1045	55
Tabla 3-7 Resultados de la prueba dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 4140.....	56
Tabla 3-8 Resultados de la prueba dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 4140	56
Tabla 3-9 Resultados de la prueba de dureza UCI sobre el patrón de dureza 57.0 HRC...	60
Tabla 3-10 Resultados de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 1045	60
Tabla 3-11 Resultados de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 1045.	60
Tabla 3-12 Resultados de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 4140	61
Tabla 3-13 Resultados de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 4140.	61
Tabla 4-1 Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza Leeb sobre el patrón de 57.0 HRC	62
Tabla 4-2 Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza Leeb sobre el patrón de 57.0 HRC	63
Tabla 4-3 Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza UCI sobre el patrón de 57.0 HRC	64
Tabla 4-4 Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza UCI sobre el patrón de 57.0 HRC	65
Tabla 4-5 Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 1045.....	66

Tabla 4-6 Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 1045	67
Tabla 4-7 Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 1045	67
Tabla 4-8 Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 1045	68
Tabla 4-9 Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 1045.....	69
Tabla 4-10 Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 1045	70
Tabla 4-11 Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 1045	70
Tabla 4-12 Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 1045	72
Tabla 4-13 Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 4140	72
Tabla 4-14 Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 4140	73
Tabla 4-15 Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 4140	74
Tabla 4-16 Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 4140	75
Tabla 4-17 Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 4140.....	75
Tabla 4-18 Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 4140	77
Tabla 4-19 Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 4140	77
Tabla 4-20 Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 4140	78
Tabla 4-21 Incertidumbre de medida sobre el patrón de dureza	79
Tabla 4-22 Incertidumbre de medida sobre la probeta AISI 1045	79
Tabla 4-23 Incertidumbre de medida sobre la probeta AISI 4140	79
Tabla 5-1 Resultados obtenidos sobre el patrón de dureza Rockwell	80

Tabla 5-2 Datos de la prueba de dureza Leeb para la gráfica de control	81
Tabla 5-3 Datos de la prueba de dureza UCI para la gráfica de control.....	83
Tabla 5-4 Resultados obtenidos sobre la probeta AISI 1045 en la escala Brinell.....	84
Tabla 5-5 Comparación de resultados obtenidos sobre la probeta AISI 4140	85



CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1 Definición del problema

Determinar las propiedades mecánicas de los materiales tienen una gran importancia para definir su comportamiento bajo fuerzas externas llamadas cargas y permite especificar e identificar los materiales. Las propiedades mecánicas más comunes son: la resistencia, dureza, ductilidad, fragilidad, tenacidad, rigidez y resistencia al impacto.

La dureza está definida como la resistencia de un material a la deformación permanente de su superficie provocada por el efecto de un cuerpo geoméricamente definido, este valor se determina tradicionalmente mediante la prueba de dureza estática.

Uno de los problemas de los durómetros estáticos es la necesidad de una muestra del componente para evaluar su dureza. A esto se le suma que la prueba de dureza estática se realiza en posición vertical y la huella dejada por el indentador puede ser demasiado grande para su aplicación.

Por otro lado, los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica de la Universidad Católica de Santa María, no cuentan con un módulo referido a ensayos de dureza superficial no destructivos, el cual podría complementar la información teórica brindada por los docentes.

1.2 Formulación del problema

¿Será posible implementar y estimar la incertidumbre de medida un módulo de durómetros portátiles para evaluar la dureza superficial de componentes mecánicos según las normas ASTM A-956 y ASTM A-1038 para el laboratorio de materiales de la EPIMMEM de la UCSM?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Implementar y estimar la incertidumbre de medida de un módulo de durómetros portátiles para evaluar la dureza superficial de componentes mecánicos según las normas ASTM A-956 y ASTM A-1038 para el laboratorio de materiales de la EPIMMEM de la UCSM.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar la exactitud de medida del durómetro portátil de impedancia de contacto ultrasónico y Leeb a comparación de los durómetros estáticos de Rockwell, Brinell y Vickers del laboratorio de materiales de la EPIMMEM de la UCSM.
- Estimar la incertidumbre de medida del durómetro portátil de impedancia de contacto ultrasónico y Leeb.
- Elaborar un procedimiento para medir la dureza superficial de componentes mecánicos y una guía de laboratorio para las prácticas de medición de dureza superficial según las normas ASTM A-956 y ASTM A-1038.

1.4 Alcances

El presente trabajo contempla la implementación y determinación de la incertidumbre de medida de un módulo de durómetros portátiles para evaluar la dureza superficial de componentes mecánicos. Para determinar incertidumbre y exactitud del instrumento se utilizará un patrón de dureza de 57 HRC Y 2 probetas de acero AISI 1045 y AISI 4140; los resultados obtenidos por los métodos portátiles sobre estas probetas se compararán con los valores medidos por los durómetros estáticos digital Rockwell modelo HRS-150 y analógico HBRVU-187.5 que posee el laboratorio de materiales. Además, se implementará un banco de mediciones que tendrá la función de posicionar la sonda de contacto ultrasónico a 90°

respecto de la probeta y adicionalmente podrá ser usado como una base rígida para realizar la prueba de dureza Leeb para componentes que presenten un peso menor a 5 kgf.

1.5 Limitaciones

El tamaño de huella dejado por los indentadores y su influencia en el funcionamiento no serán estudiados en este trabajo.

1.6 Justificación

Ante la dificultad de realizar ensayos de dureza con los durómetros estáticos sin la necesidad de una muestra del componente mecánico, resulta de especial interés averiguar cuáles son los tipos de medidores de dureza no destructivos actualmente usados en la industria, y a partir de ahí, conocer cuáles son las ventajas, desventajas, aplicaciones y limitaciones de estos equipos.

El presente proyecto surge de la necesidad realizar pruebas de dureza superficial no destructivos dentro del laboratorio de materiales, el cual consistirá en la implementación de un módulo de durómetros portátiles y la estimación de la incertidumbre de medida mediante una comparación con los durómetros estáticos del laboratorio de materiales siguiendo los procedimientos que exigen las normas. Creemos que el modulo será de gran utilidad a nivel académico y ayudará a los estudiantes a conocer los métodos actuales para realizar pruebas de dureza no destructivas.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales son el conjunto de características que hacen que el material reaccione de una manera determinada ante estímulos externos como la luz, el calor, las fuerzas, el ambiente, etc.

La clasificación de las propiedades del material son las siguientes:

- Propiedades físicas
- Propiedades químicas
- Propiedades térmicas
- Propiedades eléctricas
- Propiedades magnéticas
- Propiedades ópticas
- Propiedades mecánicas

2.1.1 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas describen cómo reacciona un material ante esfuerzos mecánicos. Determinan el alcance y los límites de la funcionalidad de un material, también establecen la vida útil o el rendimiento esperado. (Groover, 2007)

Las propiedades mecánicas comunes que se consideran en una amplia gama de materiales son la ductilidad, maquinabilidad, resistencia, templabilidad, dureza, entre otras.

2.1.1.1 Ductilidad

La ductilidad es la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin fracturarse, conserva la nueva forma cuando se retira la carga. La ductilidad a menudo se mide usando una prueba de tracción como un porcentaje de elongación, o la reducción en el área de la sección transversal de la muestra antes de la falla. (Mott & Untener, 2018)

2.1.1.2 Maquinabilidad

La maquinabilidad es la facilidad o dificultad con la que un material puede ser cortado por una herramienta de corte. Un material que se puede cortar con una fuerza mínima sin causar deformación de las áreas circundantes se mecaniza mejor que uno que requiere mayor fuerza. (Groover, 2007)

2.1.1.3 Resistencia

La resistencia de un material es su capacidad para resistir las diversas fuerzas a las que se le somete durante una prueba o en servicio sin llegar a la fractura. Suele definirse como resistencia a la tracción, resistencia a la compresión, resistencia al corte, etc. (Rajput, 2011)

La resistencia de un material se define bajo el diagrama de esfuerzo deformación como se observa en la Figura 2.1.

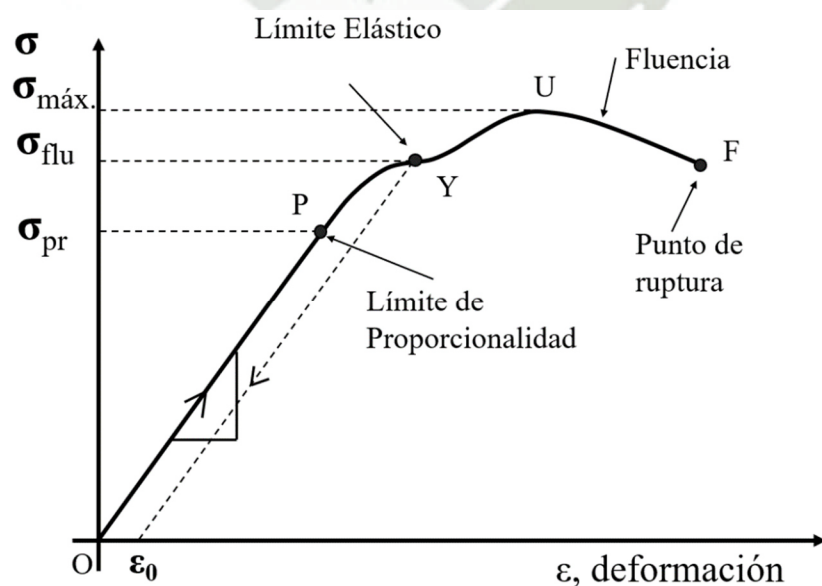


Figura 2.1 Diagrama de esfuerzo-deformación de un material dúctil
Fuente: (TECSUP, 2015)

2.1.1.4 Templabilidad

La templabilidad es la capacidad de un acero para alcanzar una cierta dureza a una profundidad determinada, mediante un tratamiento térmico y un enfriamiento rápido adecuado desde una temperatura alta. (Groover, 2007)

2.1.1.5 Tenacidad de impacto

La resistencia al impacto es una medida de la capacidad de un material para resistir un golpe sin llegar a fracturarse. El efecto del impacto que ocurre en un corto período de tiempo suele ser mayor que el efecto de una fuerza más débil aplicada durante un período más largo. El impacto a menudo se mide a través de la prueba de Charpy. (Mott & Untener, 2018)

2.1.1.6 Dureza

La dureza se define como la capacidad de un material para resistir una deformación plástica, generalmente causada por indentación o rayado. A diferencia de las deformaciones elásticas, las deformaciones plásticas son permanentes. Esto significa que el material no volverá a su forma original después de que ya no se aplique ninguna carga.

Las tres formas de medir la dureza de dureza son: dureza al rayado, al rebote y a la indentación. Medir cada tipo de dureza requiere un conjunto de diferentes herramientas y escalas, sin embargo, existen tablas de conversión para establecer la comparabilidad.

- Dureza al rayado, describe la deformación plástica o fractura debido a la fricción.
- Dureza a la indentación, describe la resistencia a la deformación plástica localizada debido a una carga de compresión constante.
- Dureza de rebote, está relacionada con la elasticidad del material y describe la altura del rebote de un martillo con punta de diamante que se deja caer sobre el material desde una altura específica.

2.2 Sistemas de dureza

Las pruebas de dureza se dividen en 2 rangos:

- Macroindentación: también conocido como macrodureza, se caracteriza por el hecho de que el indentador penetra una profundidad apreciable en el material bajo prueba, la indentación abarca todas las fases del material y la dureza medida representa la mayor parte del material. Las pruebas de dureza que generan macroindentaciones son Rockwell, Brinell y Vickers. (Bhargava & Sharma, 2011)

- Microidentación: también llamado microdureza, estas pruebas se realizan para determinar la dureza de los granos individuales, fase de los componentes estructurales de las aleaciones, componentes delgados y dureza de los recubrimientos, pero no determinan la dureza representativa del material. La carga aplicada varía en un rango de 5 gf hasta 1000 gf. Los indentadores Knoop y Vickers son los que se utilizan para realizar la prueba de microdureza. (Bhargava & Sharma, 2011)

2.3 Pruebas de dureza

En la industria existen diferentes pruebas para medir la dureza de los materiales a continuación se describe las principales pruebas:

2.3.1 Prueba de dureza de Mohs

Una de las primeras escalas de dureza es la escala de dureza de Mohs, propuesta por un mineralogista alemán, Friedrich Mohs, en 1822. (Herrmann, 2011)

La prueba de dureza de Mohs se parece más a una prueba de dureza comparativa en la que se compara la dureza de un material con un mineral conocido. En la Tabla 2-1 se detalla la clasificación de los minerales en la escala de Mohs de baja dureza a alta dureza. La dureza de Mohs no es adecuada en el área de la metalmeccánica ya que la dureza de los materiales de ingeniería es bastante amplia, pero sigue siendo utilizada en mineralogía. (Callister & Rethwisch, 2010)

Tabla 2-1
Escala de dureza Mohs

Dureza Mohs	Mineral	Prueba de rayado
1	Talco	Se puede rayar fácilmente con la uña
2	Yeso	Se puede rayar con la uña con más dificultad
3	Calcita	Se puede rayar con una moneda de cobre
4	Fluorita	Se puede rayar con un cuchillo de acero
5	Apatito	Se puede rayar difícilmente con un cuchillo
6	Ortosa	Se puede rayar con una lija para acero
7	Cuarzo	Se puede rayar con vidrio
8	Topacio	Rayado por herramientas de carburo de tungsteno

9	Corindón	Rayado por herramientas de carburo de silicio
10	Diamante	Rayado por otro diamante

Fuente: (Lacey et al., 2018)

2.3.2 Prueba de dureza superficial con limas

La prueba de dureza superficial con limas es otro método de rayado aplicado en la industria de los metales, este método es rápido y fácil de usar para determinar la dureza del material, consiste esencialmente en desgastar la superficie de las piezas metálicas y aproximar la dureza por la sensación. (SAE J864, 1993)

Un conjunto de limas es utilizado para el desgaste del material. El conjunto incluye seis de limas codificadas por colores como se observa en la Tabla 2-2, la dureza de las limas oscila entre 40 y 66 HRC.

2.3.2.1 Procedimiento de la prueba de dureza con limas

Utilice la lima que posea mayor dureza y pase la lima sobre el material, si la lima desgasta el material esto significara que el material es más blando que la lima, repita el procedimiento con la siguiente lima de menor dureza y continúe el procedimiento hasta que la lima no desgaste el material, entonces la dureza del material estará ubicada entre la dureza de las dos últimas limas. (SAE J864, 1993)

Tabla 2-2
Set de limas de dureza

Color	Dureza del archivo	Indicación de dureza del material
Rojo	40-42 HRC 392-412 HV	40 HRC
Amarillo	45-47 HRC 446-471 HV	45 HRC
Verde lima	50-52 HRC 513-544 HV	50 HRC
Verde	55-57 HRC 595-633 HV	55 HRC
Azul	60-62 HRC 697-746 HV	60 HRC
Negro	64-66 HRC 800-865 HV	65 HRC

Fuente: (TRAVERS, 2021)

2.3.3 Prueba de dureza Brinell

La prueba de dureza Brinell fue propuesta por el ingeniero sueco Johan August Brinell en 1900, la prueba es conocida como prueba de dureza Brinell y está definida en la norma ASTM E10. (Herrmann, 2011)

En la prueba de dureza Brinell, la dureza de un metal se determina midiendo el diámetro superficial de la muesca producida por un indentador sobre la superficie del material. Los materiales que poseen mayor dureza producirán muescas poco profundas mientras que los materiales más blandos producirán muescas más profundas. (Groover, 2007)

2.3.3.1 Principio de medición de la prueba de dureza Brinell

En este método de prueba se aplica una fuerza predeterminada sobre una bola de carburo cementado o tungsteno contra una superficie metálica y se mantiene durante un período de tiempo predeterminado como se indica en la Tabla 2-3. El indentador esférico crea una huella (deformación permanente) en la superficie del metal de prueba; esta huella se mide en dos o más diámetros y luego se promedia para obtener el diámetro promedio de la huella. (ASTM E10, 2015)

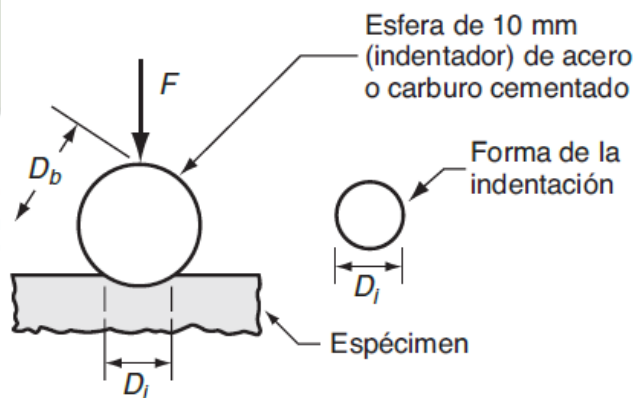


Figura 2.2 Principio de medición de la prueba de dureza Brinell
Fuente: (Groover, 2007)

Una vez que se obtiene el diámetro promedio de la huella de indentación, el número de dureza Brinell se encuentra usando tablas de la norma ASTM E10 o se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D_b \left(D_b - \sqrt{D_b^2 - d_i^2} \right)} \quad (2.1)$$

Dónde:

HB : Numero de dureza Brinell [kg-f/mm^2]

F : Fuerza de prueba [kgf]

D_b : Diámetro de la bola del indentador [1, 2.5, 5, 10 mm]

d_i : Diámetro promedio de la huella de indentación [mm]

La profundidad de la indentación puede determinarse como:

$$h = \frac{1}{2} \cdot \left(D_b - \sqrt{D_b^2 - d_i^2} \right) \quad (2.2)$$

Dónde:

h : Profundidad de la indentación [mm]

D_b : Diámetro de la bola del indentador [mm]

d_i : Diámetro medio de la huella de indentación [mm]

Las durezas típicas de los materiales y el tiempo de aplicación de la fuerza de prueba se indican en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3
Durezas típicas de distintos tipos de materiales en la escala Brinell

Material	Dureza (HB)	Tiempo de aplicación (s)
Hierro dulce, acero, acero colado, fundición maleable, aleación de titanio	67-500	10-15
Metales ligeros para fundición y forja, aleaciones de fundición inyectables, cobre, latón, bronce, níquel y aleaciones de aluminio	22-35	30
Aluminio puro, magnesio, zinc, latón fundido	11-158	60
Metales antifricción	6-78	60
Plomo, estaño, soldadura blanda	3-39	60
Metal blando con temperaturas más elevadas	1-15	60

Fuente: (Falk et al., 1986)

2.3.3.2 Designación del número de dureza Brinell

Las condiciones en las que se ha realizado la prueba de dureza Brinell deben estar incluidas la designación del número de dureza Brinell como se muestra a continuación:

$$nnn \text{ HB } yy/zzzz/xx$$

Dónde:

nnn: Numero de dureza en la escala Brinell.

HB: Identificador del ensayo de dureza Brinell.

yy: Diámetro de la bola en milímetros.

zzzz: Carga de prueba en kilogramos fuerza.

xx: Tiempo de aplicación de la carga cuando difiere de 10 a 15 segundos.

2.3.3.3 Correlación con el esfuerzo ultimo

Se ha establecido una relación entre el esfuerzo ultimo a la tracción (S_{ult}) y el número de dureza Brinell. (Kalpakjian & Schmid, 2020).

Para aceros la relación está dada por:

$$S_{ult} = 3.5 \cdot HB \quad (2.3)$$

Dónde:

S_{ult} : Esfuerzo ultimo a la tracción [MPa]

HB: Numero de dureza en la escala Brinell [HB]

2.3.3.4 Ventajas y desventajas de la prueba de dureza Brinell

Según Bhargava y Sharma (2011) la prueba de dureza de Brinell tiene las siguientes ventajas:

- Se puede medir la dureza de las muestras rugosas, lo que es difícil con otros métodos.
- Es posible la aplicación de cargas de prueba elevadas hasta 3.000 kgf.
- Amplio rango de medición debido a la disponibilidad de una variedad de tamaños de indentadores y cargas.
- Un probador de dureza Brinell puede determinar la dureza de todo tipo de metales.
- Proporciona resultados fiables.

Sin embargo, la prueba de dureza Brinell también tiene algunas desventajas:

- Podría haber errores de medición debido al uso de instrumentos ópticos.
- Las imperfecciones de la superficie pueden interferir con el resultado de la prueba si la superficie no se prepara a fondo.
- El requisito de una superficie plana hace que esta prueba sea redundante para superficies cilíndricas.

2.3.4 Prueba de dureza Rockwell

La prueba de dureza Rockwell es uno de los métodos de prueba de dureza más utilizados y precisos que prevalecen en las industrias. Esta prueba es más fácil de realizar en comparación con la prueba de dureza Brinell o Vickers. Según el nombre de los inventores, Sr. Hugh M. Rockwell y Sr. Stanley P. Rockwell, esta prueba de dureza se conoce como prueba de dureza Rockwell y está definida en la norma ASTM E-18. (Kumar, 2021)

La prueba de dureza Rockwell se utiliza ampliamente para aceros al carbono, plomo, latón, zinc, aluminio, carburos cementados, hierro, titanio, aleaciones de cobre y ciertos plásticos. Esta prueba se considera uno de los métodos de prueba de dureza simples y rápidos.

2.3.4.1 Tipos de prueba de dureza Rockwell

La prueba de dureza Rockwell se clasifica en dos grupos dependiendo de las magnitudes de las cargas mayores y menores durante la prueba. (ASTM E-18, 2019)

- Prueba de dureza Rockwell regular donde la carga menor es de 10 kgf y la carga mayor es de 60, 100 o 150 kgf.
- Prueba de dureza Rockwell superficial donde la carga menor aplicada es de 3 kgf y la carga mayor es de 15, 30 o 45 kgf

2.3.4.2 Principio de medición de la prueba de dureza Rockwell

La prueba de dureza Rockwell consiste en la aplicación de una carga menor seguida de una carga mayor sobre probeta de prueba utilizando un indentador de diamante con forma cónica o de bola. (ASTM E-18, 2019)

En la Figura 2.3 se puede observar el principio de medición de la prueba de dureza Rockwell, la profundidad generada por la carga menor se considera como una línea de referencia para medir la profundidad total generada por carga mayor y menor aplicadas simultáneamente sobre la probeta en un tiempo de 2 a 6 segundos, una vez transcurrido este tiempo se procede

a retirar la carga mayor y se espera un tiempo de 0.2 a 5 segundos para permitir la recuperación elástica del material y finalmente medir la profundidad de la indentación respecto a la línea de referencia. (ASTM E-18, 2019)

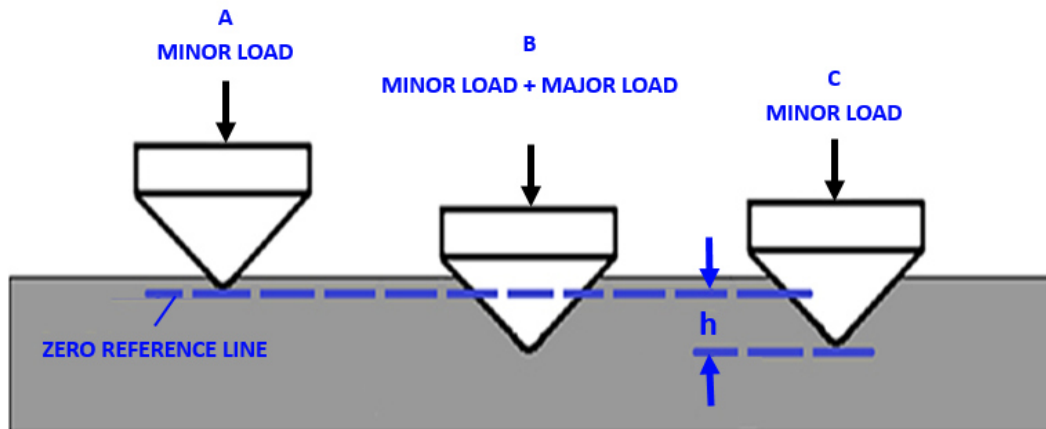


Figura 2.3 Principio de medición de la prueba de dureza Rockwell
Fuente: (EUROLAB, 2017)

Una vez determinada la profundidad de indentación, se puede calcular el número de dureza Rockwell para metales utilizando la siguientes formulas:

- Dureza Rockwell regular con indentador cónico de diamante.

$$\text{Dureza Rockwell} = 100 - \frac{h}{0.002} \quad (2.4)$$

- Dureza Rockwell superficial con indentador cónico de diamante.

$$\text{Dureza Rockwell} = 100 - \frac{h}{0.001} \quad (2.5)$$

- Dureza Rockwell regular con indentador bola.

$$\text{Dureza Rockwell} = 130 - \frac{h}{0.002} \quad (2.6)$$

- Dureza Rockwell superficial con indentador bola.

$$\text{Dureza Rockwell} = 100 - \frac{h}{0.001} \quad (2.7)$$

Hay varias escalas de dureza Rockwell, diferenciadas por varias letras que requieren diferentes cargas o indentadores durante la prueba de dureza. En la Tabla 2-4 y Tabla 2-5 se indican las diferentes escalas de dureza Rockwell utilizadas. (ASTM E-18, 2019)

Tabla 2-4
Escala de dureza Rockwell regular

Símbolo de escala	Penetrador	Carga (kg)	Aplicaciones
B	Bola de 1/16"	100	Aleaciones de cobre, aceros blandos, aleaciones de aluminio, hierro maleable.
C	Diamante cónico	150	Carburos cementados, acero delgado y acero cementado poco profundo
A	Diamante cónico	60	Carburos cementados, acero delgado y acero cementado poco profundo.
D	Diamante cónico	100	Acero delgado y acero de cementación media, y hierro maleable perlítico.
E	Bola de 1/8"	100	Hierro fundido, aleaciones de aluminio y magnesio
F	Bola de 1/16"	60	Bronce y cobre recocidos.
G	Bola de 1/16"	150	Bronce, cobre-berilio, cobre-níquel, fundición maleable.
H	Bola de 1/8"	60	Aluminio, zinc, plomo.
K	Bola de 1/8"	150	Rayado por herramientas de carburo de silicio
L	Bola de 1/4"	60	Rayado por otro diamante
M	Bola de 1/4"	100	
P	Bola de 1/4"	150	
R	Bola de 1/4"	60	Metales para cojinetes y otros materiales muy blandos o delgados
S	Bola de 1/4"	100	
V	Bola de 1/4"	150	

Fuente: (Lacey et al., 2018)

Tabla 2-5
Escala de dureza Rockwell superficial

Símbolo de escala	Penetrador	Carga (kg)	Aplicaciones
15N	Diamante	15	Similar a las escala A, C, D pero mayor calibre.
30N	Diamante	30	Similar a las escala A, C, D pero mayor calibre.
45N	Diamante	45	Similar a las escala A, C, D pero mayor calibre.

15T	Bola de 1/16"	15	Similar a las escala B, F, G pero mayor calibre.
30T	Bola de 1/16"	30	Similar a las escala B, F, G pero mayor calibre.
45T	Bola de 1/16"	45	Similar a las escala B, F, G pero mayor calibre.
15W	Bola de 1/8"	15	Bronce, latón y aceros blandos.
30W	Bola de 1/8"	30	Bronce, latón y aceros blandos.
45W	Bola de 1/8"	45	Bronce, latón y aceros blandos.
15X	Bola de 1/4"	15	Bronce, latón y aceros blandos.
30X	Bola de 1/4"	30	Bronce, latón y aceros blandos.
45X	Bola de 1/4"	45	Bronce, latón y aceros blandos.
15Y	Bola de 1/2"	15	Bronce, latón y aceros blandos.
30Y	Bola de 1/2"	30	Bronce, latón y aceros blandos.
45Y	Bola de 1/2"	45	Bronce, latón y aceros blandos.

Fuente: (Lacey et al., 2018)

2.3.4.3 Designación del número de dureza Rockwell

El número de dureza Rockwell se designa de la siguiente manera:

$$nn \text{ HR(Letra)}$$

Dónde:

nn: Numero de dureza en la escala Rockwell.

HR: Identificador de la prueba de dureza Rockwell.

(Letra): Tipo de escala de Rockwell.

2.3.4.4 Ventajas y desventajas de la prueba de dureza Rockwell

Según Bhargava y Sharma (2011) la prueba de dureza de Rockwell tiene las siguientes ventajas:

- El valor de dureza se puede lograr en menos tiempo en comparación con otros métodos de prueba de dureza.
- La lectura directa del número de dureza se obtiene a través del dial de la máquina.
- También se puede utilizar para comprobar la dureza de muestras cilíndricas.
- Es una prueba menos destructiva en comparación con la prueba de dureza Brinell debido al pequeño tamaño de la muesca.

Sin embargo, el método de prueba de Rockwell también tiene algunas desventajas:

- Debido al gran número de escalas, se debe tener cuidado para seleccionar una escala adecuada para un material adecuado.
- En extremos de alta dureza de las escalas, la vida útil del indentador de diamante puede reducirse por fractura.

2.3.5 Prueba de dureza Vickers

La prueba de dureza Vickers se desarrolló en 1924 por Robert L. Smith y George E. Sandland para reemplazar a la prueba de dureza Brinell que posee limitaciones respecto al espesor del material. La prueba de prueba de dureza Vickers también se puede usar como un método de prueba de microdureza, que se usa principalmente para piezas pequeñas y secciones delgadas. (Buehler, 2018)

2.3.5.1 Principio de medición de la prueba de dureza Vickers

La prueba de dureza Vickers consiste en penetrar el material de prueba con un indentador de diamante con forma de pirámide recta de base cuadrada y un ángulo de 136 grados entre las caras opuestas; la carga de prueba varía de 1 a 120 kgf para la escala macro y de 10 a 1000 gf en la escala micro. La carga se aplica en un tiempo de 10 a 15 segundos. Las dos diagonales de la huella de indentación que se encuentran en la superficie del material de prueba se miden usando un microscopio y se calcula su promedio para finalmente determinar la dureza en la escala Vickers. (ASTM E92, 2017)

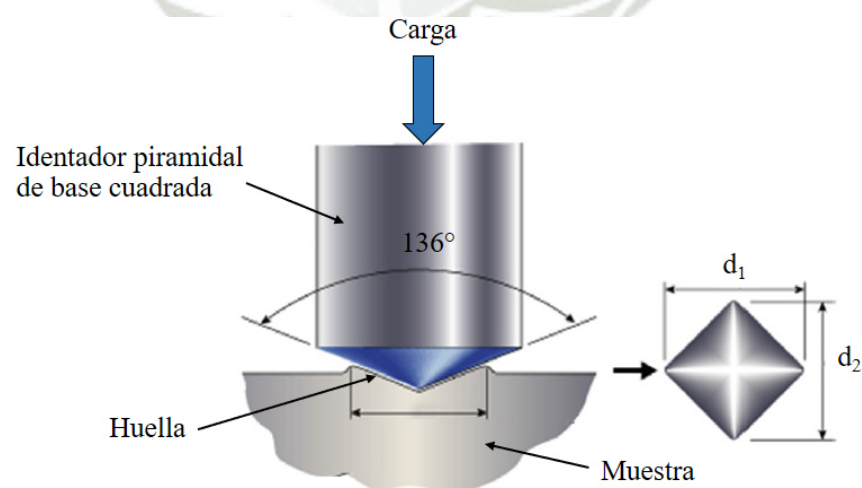


Figura 2.4 Principio de medición de la prueba de dureza Vickers
Fuente: (EUROLAB, 2017)

La dureza Vickers se calcula con la siguiente formula:

$$HV = 1.8544 \cdot \frac{F}{d_v^2} \quad (2.8)$$

Dónde:

HV : Numero de dureza en la escala Vickers [kgf/mm^2]

F : Carga de prueba [kgf]

d_v : Promedio de las diagonales de la huella de indentación [mm]

La profundidad de la indentación puede determinarse como:

$$h_v = 0.143 \cdot d_v \quad (2.9)$$

Dónde:

h_v : Profundidad de la indentación [mm]

d_v : Promedio de las diagonales de la muesca [mm]

2.3.5.2 Designación del número de dureza Vickers

La dureza en la escala Vickers se designa de la siguiente manera:

$$xxx \text{ HV } yy/zz$$

Donde:

xxx : Numero de dureza en la escala Vickers.

HV : Símbolo de la prueba de dureza Vickers.

yy : Carga aplicada en kilogramos fuerza.

zz : Tiempo de aplicación de la carga cuando difiere de 10 a 15 segundos.

2.3.5.3 Ventajas y desventajas de la prueba de dureza Vickers

Según Bhargava y Sharma (2011) la prueba de dureza Vickers tiene las siguientes ventajas:

- Se puede utilizar con todos y cada uno de los materiales y especímenes de prueba, desde blandos hasta duros, ya que el procedimiento cubre todo el rango de dureza.
- Solo hay un tipo de indentador, que se puede usar para todos los métodos Vickers.

- Es posible realizar pruebas no destructivas, por lo que la muestra de prueba se puede utilizar para otros fines.

Sin embargo, el método de prueba de dureza Vickers también tiene algunas desventajas:

- La calidad de la superficie de la muestra debe ser buena, ya que la huella se mide ópticamente. Esto significa que la ubicación de la prueba debe estar preparada (pulida), de lo contrario, es difícil realizar una evaluación precisa.
- El proceso es bastante lento (en comparación con el método Rockwell). El ciclo de prueba dura entre 30 y 60 segundos, sin incluir el tiempo necesario para preparar la muestra.
- Debido a la necesidad de realizar una evaluación de indentación óptica, los equipos de dureza Vickers deben estar provistos con un sistema óptico, lo que hace que su compra sea más cara que la de los equipos de dureza Rockwell.

2.3.6 Prueba de dureza Knoop

Esta prueba, desarrollada por F. Knoop, en 1939, es similar a la prueba de dureza Vickers con la diferencia de que el indentador no es una pirámide regular si no que posee un indentador alargado en una dirección que deja una huella fina y alargada como se observa en la Figura 2.5. La carga aplicada generalmente oscila entre 1 gf y 1000 gf, debido a las cargas ligeras aplicadas, esta prueba es una prueba de microdureza y es adecuada para muy especímenes pequeños o muy delgados, y para materiales tan frágiles como carburos, cerámica y vidrio. (Kalpakjian & Schmid, 2020)

2.3.6.1 Principio de medición de la prueba de dureza Knoop

La prueba de dureza Knoop tiene el mismo principio de medición que la prueba de dureza Vickers, inclusive se puede utilizar el mismo equipo si la carga lo permite, la principal diferencia radica en que la prueba de dureza Vickers se evalúa el área superficial de la huella y que en la prueba de dureza Knoop el área proyectada. (ASTM E92, 2017)

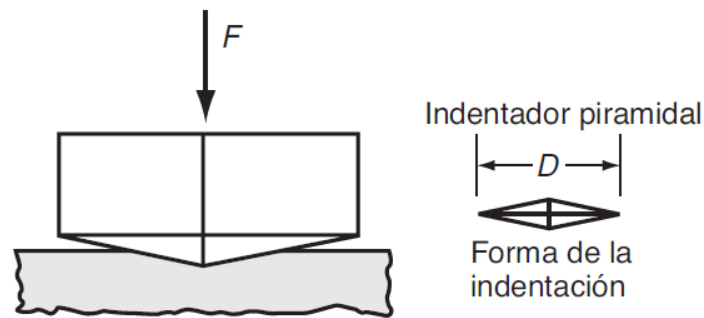


Figura 2.5 Principio de medición de la prueba de dureza Knoop
Fuente: (Groover, 2007)

La dureza Knoop se calcula con la siguiente formula:

$$HK = 14.229 \cdot \frac{F}{D^2} \quad (2.10)$$

Dónde:

HK : Numero de dureza en la escala Knoop [kgf/mm^2]

F : Carga de prueba [kgf]

D : Diagonal más larga de la huella de indentación [mm]

La profundidad de la indentación puede determinarse como:

$$h_k = 0.143 \cdot D \quad (2.11)$$

Dónde:

h_k : Profundidad de la indentación [mm]

D : Diagonal más larga de la huella de indentación [mm]

2.3.6.2 Designación del número de dureza Knoop

La dureza en la escala Knoop se designa de la siguiente manera:

$$xxx \text{ HK } yy/zz$$

Donde:

xxx : Numero de dureza en la escala Knoop.

HK: Símbolo de la prueba de dureza Knoop.

yy: Carga aplicada.

zz: Tiempo de la carga cuando difiere de 10 a 15 segundos.

2.3.6.3 Ventajas y desventajas de la prueba de dureza Knoop

Según Herrmann (2011) la prueba de dureza Knoop tiene las siguientes ventajas:

- Utilizado en materiales duros y frágiles donde la prueba de dureza Vickers podría generar grietas.
- Solo hay un tipo de indentador, que se puede usar para todos los métodos Knoop.
- Puede detectar anisotropía en los materiales al realizar las pruebas en diferentes direcciones.

Sin embargo, la prueba de dureza Knoop tiene las siguientes desventajas:

- Se necesita mayor preparación en la superficie de prueba.
- Las anisotropías no detectadas pueden generar error.
- Al igual que la prueba de dureza Vickers se necesita un dispositivo óptico para evaluar la muesca producida por el indentador.

2.3.7 Prueba de dureza Leeb

Las pruebas de dureza tradicionales como Brinell, Rockwell o Vickers se realizan en laboratorios o áreas de prueba, se cortan muestras de las partes seleccionadas y se realiza la prueba de dureza de manera vertical.

La prueba de dureza de Leeb o la prueba de dureza de rebote de Leeb es una prueba de dureza dinámica, creada a mediados de la década de 1970 por Leeb y Brandestini en Proceq SA para proporcionar una prueba de dureza portátil para metales. (Frank's et al., 2019)

Los dispositivos Leeb son los dispositivos portátiles de medición de dureza más utilizados por su flexibilidad, sencillez de uso, rapidez y la repetibilidad de los resultados durante un largo periodo de tiempo. Debido a la alta facilidad de uso y los resultados consistentes, los dispositivos actualmente se utilizan para supervisar series de producción completas. (Herrmann, 2011)



Figura 2.6 Prueba de dureza Leeb
Fuente: (NOVOTEST, 2017)

2.3.7.1 Principio de funcionamiento

Los equipos de dureza de Leeb funcionan de una manera diferente, aunque el tamaño de la muesca de prueba generada está relacionado con la dureza del material, se mide indirectamente a través de la pérdida de energía de un cuerpo de impacto.

El cuerpo de impacto con una masa definida es acelerado hacia la superficie del objeto de prueba e incide sobre la superficie a una velocidad definida, es decir con una energía cinética, el impacto sobre la superficie crea una deformación plástica, es decir, una hendidura, por lo que el cuerpo de impacto pierde parte de su velocidad original o energía, perderá más velocidad al crear una muesca más grande en un material más blando. Este principio de medición de dureza se implementa con un cuerpo de impacto como se observa en la Figura 2.7 que tiene una punta esférica de carburo de tungsteno y que es acelerado sobre la superficie de prueba por la fuerza de un resorte. (Herrmann, 2011)

La velocidad del cuerpo de impacto es registrada a través de la fuerza electromotriz (FEM) generada por un imán instalado dentro del cuerpo de impacto, que pasa a través de la bobina inductora montada en el tubo guía del equipo de dureza. La FEM inducida es proporcional a la velocidad del imán. Se registra la señal FEM inducida y los valores máximos del voltaje inducido que se usan para calcular los valores de dureza Leeb. (Aoyama et al., 2013)

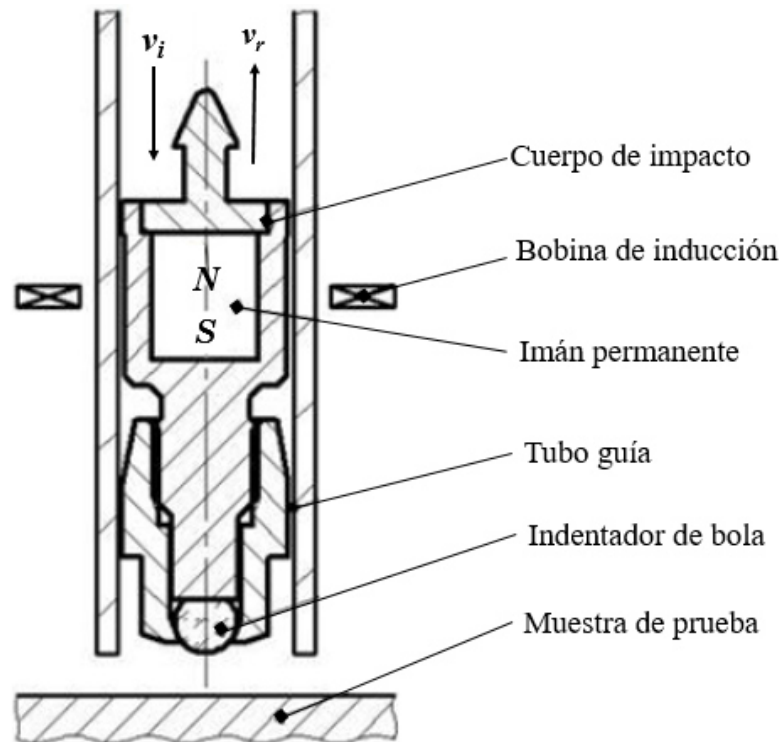


Figura 2.7 Esquema de medición de dureza Leeb
Fuente: (Gogolinskii et al., 2019)

La señal de voltaje de inducción mostrada en la Figura 2.8 se registra en un dispositivo electrónico y los voltajes de inducción pico antes y después del impacto se procesan para dar el número de dureza de Leeb,

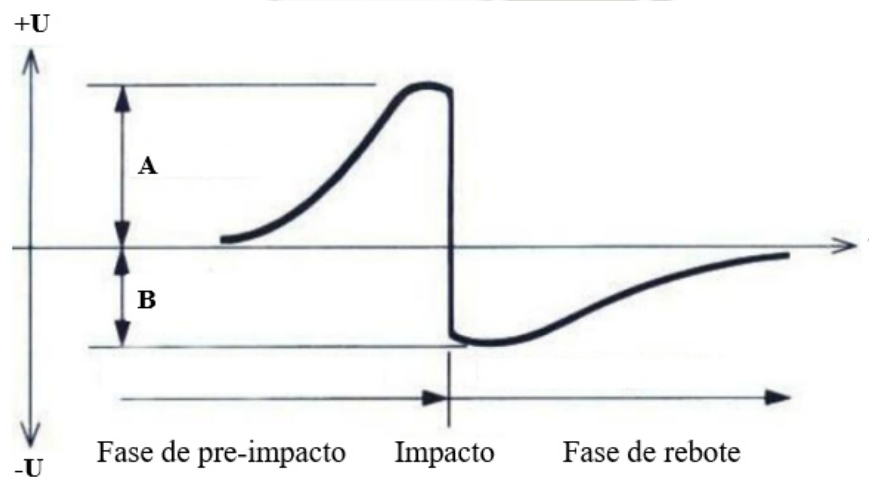


Figura 2.8 Señal de voltaje de inducción típica generada por el imán permanente dentro del cuerpo de impacto durante las principales fases de prueba de una prueba de dureza EQUOTIP
Fuente: (Kompatscher, 2004)

El valor de dureza Leeb se determina con la siguiente ecuación:

$$HL = \frac{B}{A} \cdot 1000 \approx \frac{v_r}{v_i} \cdot 1000 \quad (2.12)$$

Dónde:

HL : Numero de dureza en la escala Leeb [-]

A : Voltaje pico en la fase de pre-impacto [mV]

B : Voltaje pico en la fase de rebote [mV]

v_r : Velocidad de rebote del cuerpo de impacto [m/s]

v_i : Velocidad de impacto del cuerpo de impacto [m/s]

2.3.7.2 Designacion del número de dureza Leeb

Según la norma ASTM A956 (2017) el número de dureza Leeb se designa de la siguiente manera:

xxxHL(N)

Donde:

xxx: Valor de la prueba de dureza Leeb.

HL: identificador del ensayo de dureza Rockwell.

(N): Dispositivo de impacto.

Hay varias escalas Leeb, cada escala posee una aplicación diferente. En la Tabla 2-6 se indica las diferentes escalas utilizadas en la prueba de dureza Leeb.

Tabla 2-6
Dispositivos de impacto y aplicaciones del método Leeb

Símbolo de escala	Aplicaciones
D	Dispositivo universal, adecuado para la mayoría de las tareas de prueba, el material del indentador es de carburo de tungsteno.
DC	Similar al tipo D con la diferencia de que tiene una longitud más corta que le permite realizar la prueba de dureza dentro del componente.
S	Utilizado en áreas de producción, donde se realizan pruebas continuas, el indentador dura 10 veces más que el tipo D.

E	Aplicación en metales muy duros hasta 72 HRC, el material del indentador es de diamante sintético.
D+15	Mismas aplicaciones que el tipo D posee el cuerpo de impacto más prologando que le permite realizar las pruebas de dureza en orificios o cavidades.
DL	El extremo de impacto del dispositivo DL es angosto y alargado lo cual le permite acceder a lugares estrechos.
C	Piezas de paredes delgadas o sensibles a las muesca, piezas templadas superficialmente (cementadas) y capas con un espesor máximo de 0,3 mm.
G	Aplicado en piezas fundidas y forjadas de grano muy grueso o heterogéneas, acero y fundición de acero, hierro fundido.

Fuente: (Herrmann, 2011)

2.3.7.3 Ventajas y desventajas de la prueba de dureza Leeb

La prueba de dureza Leeb tiene las siguientes ventajas:

- Su uso no está restringido al laboratorio.
- Es una prueba de dureza no destructiva.
- La prueba de dureza se realiza en un menor tiempo a comparación de las pruebas de dureza estaticas.
- La prueba de dureza Leeb se puede realizar en diferentes ángulos.
- Utilizado en materiales ferrosos y no ferrosos.

Sin embargo, el método de prueba de dureza Leeb también tiene algunas desventajas:

- Solo determina la dureza superficial.
- La pieza de prueba debe de tener un espesor mínimo de 10 mm y un peso mayor a 5 kgf.
- Debido a su funcionamiento la lectura puede ser afectada por campos magnéticos residuales.
- La superficie de la probeta o componentes mecánico necesita un mejor acabado.

2.3.8 Prueba de dureza de impedancia de contacto ultrasonico (UCI)

La prueba de dureza de impedancia de contacto ultrasónico (UCI) es uno de los métodos de prueba de dureza portátiles más utilizados. Fue inventado por Claus Kleesattel en 1968 y está ampliamente establecido en la actualidad. Es popular debido a su alta portabilidad y las

mediciones rápidas, simples y confiables. Además, la sonda se puede colocar fácilmente en superficies irregulares, como en cordones de soldadura, lo que brinda una accesibilidad sin igual a superficies donde son difíciles de realizar las pruebas de dureza. (Frehner et al., 2017)

La prueba de dureza UCI es similar a la prueba de Vickers, con la diferencia que no necesita del análisis óptico por microscopio, ya que el valor de la dureza se determina directamente en el momento de la penetración del indentador como se observa en la Figura 2.9. Este hecho demuestra ser ventajoso para las pruebas automatizadas, mejorando así la flexibilidad en la práctica y soportando también ciclos de producción extremadamente rápidos. (Tietze, 2021)



Figura 2.9 Prueba de dureza de impedancia de contacto ultrasónico
Fuente: (NOVOTEST, 2017)

2.3.8.1 Principio de funcionamiento

En la Figura 2.10 se observa el esquema del principio de funcionamiento de los durómetros de impedancia de contacto ultrasónico y se basan en la medición de la variación de la frecuencia de una varilla, que oscila longitudinalmente a una frecuencia ultrasónica con un indentador Vickers en su extremo inferior, cuando el indentador se presiona sobre la probeta de prueba con una fuerza de prueba definida controlada por un resorte metálico las oscilaciones se amortiguan y se produce un cambio de frecuencia que se puede medir. (Frehner et al., 2017)

La variación de frecuencia se determina bajo la carga de prueba y depende del tamaño del área de contacto, así como del módulo de elasticidad efectivo del material.

$$\Delta f = f(E_{\text{eff}}, A) \quad (2.13)$$

Dónde:

Δf : Variación de la frecuencia longitudinal [kHz]

E_{eff} : Módulo de elasticidad efectivo [GPa]

A: Área de contacto [mm^2]

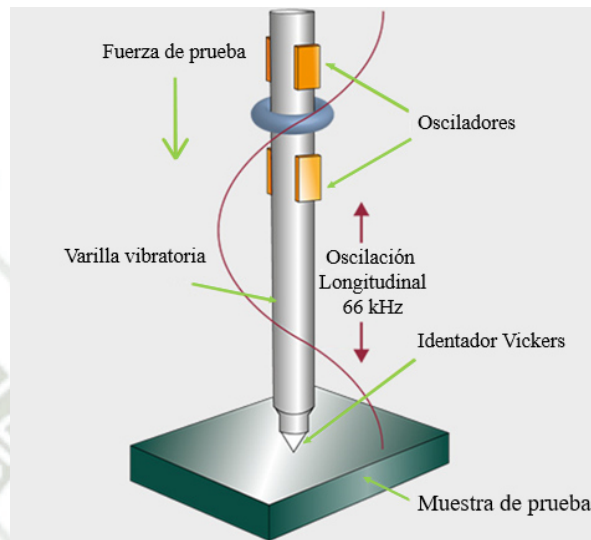


Figura 2.10 Esquema del principio de funcionamiento de la prueba de dureza UCI
Fuente: (Tietze, 2021)

Las curvas de referencia de los materiales que se observan en la Figura 2.11 relacionan la variación de frecuencia con la dureza en la escala Vickers. La variación de frecuencia será mayor cuando la huella de indentación sea más grande, es decir, cuando el diamante penetre más profundamente en el material. Análogamente, una variación de frecuencia más pequeña se produce con materiales de prueba más duros. (Tietze, 2021)

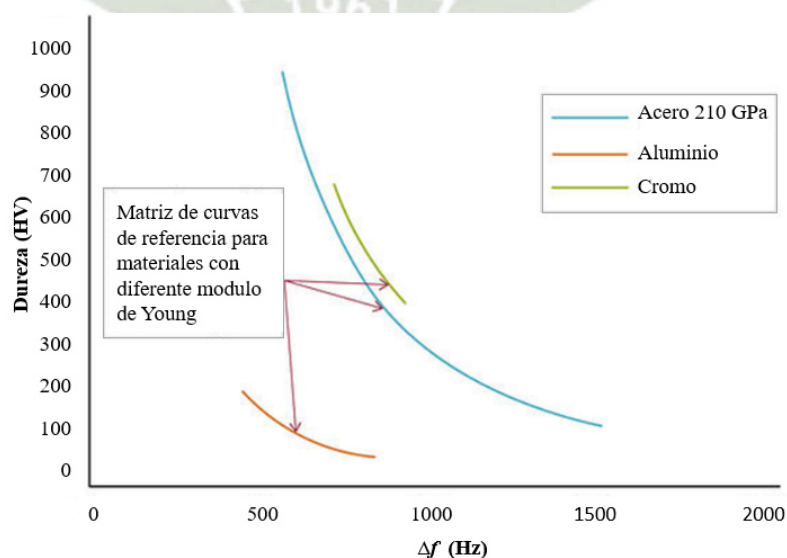


Figura 2.11 Curvas de referencia de distintos materiales
Fuente: (Tietze, 2021)

2.3.8.2 Designación del número de dureza UCI

Según la norma ASTM A1038 (2017) el valor de la dureza UCI se designa en la escala Vickers:

$$xxx \text{ HV(UCI) } yy$$

Donde:

xxx: Numero de dureza en la escala Vickers.

HV: Símbolo de la prueba de dureza Vickers.

yy: Carga de prueba.

UCI: El número de dureza ha sido determinado por la prueba de dureza UCI.

Las diferentes aplicaciones de la prueba de dureza UCI se detallan en la Tabla 2-7 y están en función a la carga de prueba.

Tabla 2-7
Aplicaciones típicas de la prueba de dureza UCI en función de la carga de prueba

Fuerza de Prueba	Aplicaciones
98 N	Pequeñas piezas forjadas, uniones soldadas, zona afectada térmicamente.
50 N	Piezas endurecidas por inducción o piezas cementadas, como árboles de levas, turbinas, uniones soldadas, zona afectada térmicamente.
10 N	Utilizada donde se requiere una huella pequeña, para medir la dureza de las capas endurecidas superficiales.

Fuente: (NOVOTEST, 2017)

2.3.8.3 Ventajas y desventajas de la prueba de dureza UCI

Según Frehner et al. (2017) la prueba de dureza UCI tiene las siguientes ventajas:

- Su uso no está restringido al laboratorio.
- Es una prueba de dureza no destructiva.
- Mediciones son rápidas y confiables.
- El tamaño y profundidad de la muesca es pequeño a comparación de las otras pruebas de dureza.
- La prueba de dureza se puede realizar desde varios ángulos diferentes.

Sin embargo, la prueba de dureza UCI también tiene algunas desventajas:

- Solo determina la dureza superficial.
- Requiere de mayor habilidad del operador.
- No es recomendado para material de grano grueso.

2.4 Conversión de escalas de dureza

Debido a que existen muchos métodos de prueba de dureza y a las diferencias experimentales en cada método, no se ha ideado un esquema de conversión de escalas de dureza completa. La conversión de escalas de dureza depende del tipo y de las características que posea el material, por lo tanto, se necesitan tablas de conversión para cada material. Las tablas de conversión detalladas para varios otros metales y aleaciones se encuentran en la norma ASTM E 140. (Callister & Rethwisch, 2010)

En la Figura 2.12 se muestra una gráfica de conversión de escalas de dureza.

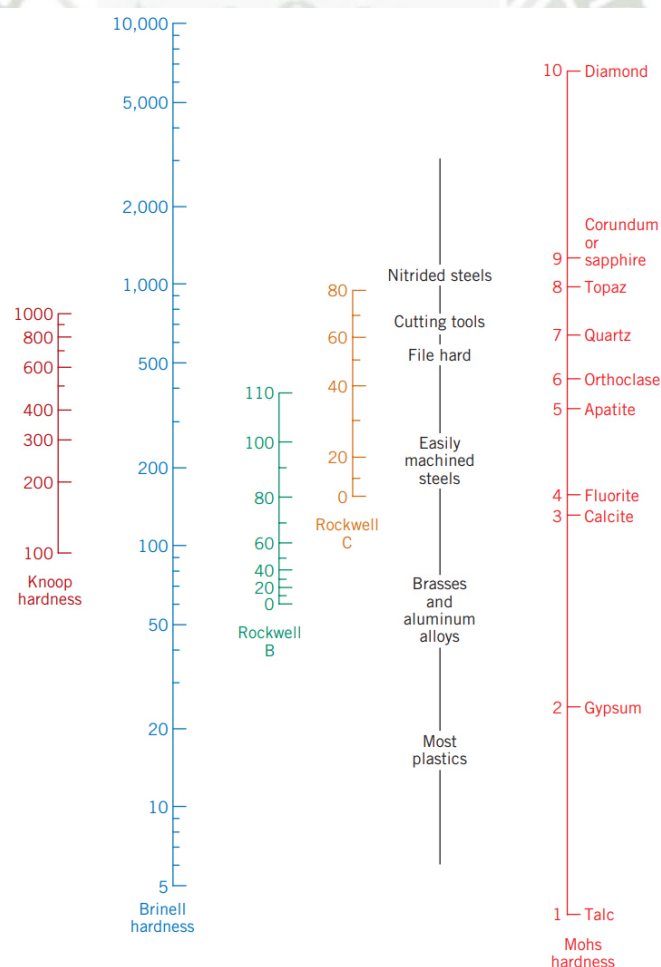


Figura 2.12 Comparación de varias escalas de dureza
Fuente: (Callister & Rethwisch, 2010)

2.5 Medidas de dispersión

Son conjuntos de medidas que se utilizan en el estudio de la variabilidad de una determinada distribución y que permiten obtener información más completa sobre la forma de esa característica. (Silva, 2012)

2.5.1 Repetibilidad

La repetibilidad es la diferencia entre los valores más grandes y más pequeños en un conjunto de datos o distribución.

$$R = X_{max} - X_{min} \quad (2.14)$$

Dónde:

R : Repetibilidad.

X_{max} : Valor máximo.

X_{min} : Valor mínimo.

2.5.2 Varianza

La varianza es la medida que permite evaluar el grado de dispersión de los valores de las variables con relación a la media aritmética.

$$s(x)^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 \quad (2.15)$$

Donde:

$s(x)^2$: Varianza de la muestra.

\bar{x} : Media aritmética de los valores individuales observados.

n : Número de pruebas.

2.5.3 Desviación estándar de la muestra

La desviación estándar de la muestra también permite evaluar el grado de dispersión de los valores de las variables con relación a la media aritmética y representa la raíz cuadrada de la varianza.

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (2.16)$$

Donde:

$s(x)$: Desviación estándar experimental de la muestra.

\bar{x} : Media aritmética de los valores individuales observados.

n : Número de pruebas.

2.6 Error

Las mediciones siempre están sujetas a errores, la interacción de diferentes factores influye en los resultados, por lo que es importante dar algún tipo de indicación de la confiabilidad de las mediciones. (Silva, 2012)

El Vocabulario Internacional de Metrología: conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM, 2012) “Define el error de medición como la diferencia entre el valor medido de una magnitud y un valor de referencia” (p. 32).

El error de medición se calcula con la siguiente ecuación:

$$E = \bar{x} - x_{ref} \quad (2.17)$$

Dónde:

E : Error de medición.

\bar{x} : Media aritmética de los valores individuales observados.

x_{ref} : Valor de referencia o valor verdadero.

El error relativo es calculado como un porcentaje del error (Ecuación 2.18).

$$E_{rel} = 100 \cdot \left(\frac{\bar{x} - x_{ref}}{x_{ref}} \right) \quad (2.18)$$

El error en medición se puede dividir en dos tipos principales, errores sistemáticos y aleatorios.

2.6.1 Error aleatorio

Los errores aleatorios son aquellos que varía de manera aleatoria y que se produce por variaciones impredecibles y desconocidas en el proceso de medición. Cualquier tipo de error que sea inconsistente y no se repita en la misma magnitud o dirección se considera un error aleatorio. Los errores aleatorios no se pueden eliminar, pero estimar su valor mediante métodos estadísticos. Este error no es considerado un gran problema debido a que los resultados de las mediciones están dispersos y al promediar los resultados se acerca al valor verdadero. (Gutierrez, 2006)

2.6.2 Error sistemático

Como su nombre lo indica, es un error constante y repetible que se desvía del valor real de la medición en una cantidad fija y en la misma dirección, dando resultados que están consistentemente por encima del valor verdadero o consistentemente por debajo del valor verdadero. Los errores sistemáticos pueden descubrirse experimentalmente al comparar un resultado dado por otro resultado obtenido de un instrumento de medición diferente o utilizando un método distinto. (Silva, 2012)

Los errores sistemáticos se consideran más problemáticos que los errores aleatorios porque pueden sesgar los datos para llevarlo a conclusiones falsas. (Silva, 2012)

Las fuentes del error sistemático son las siguientes:

- Instrumental: ocurren cuando un instrumento da una lectura incorrecta. La mayoría de las veces, se puede corregir los errores instrumentales recalibrando el instrumento.
- Ambiental: cuando el entorno circundante provoca errores en el proceso de medición.
- Observacional: mala lectura por parte del experimentador.
- Teórico: surgen debido al procedimiento experimental o cuando se realiza suposiciones.

2.7 Exactitud y precisión

La exactitud se refiere a la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero de la magnitud que se mide. La precisión se refiere simplemente a la cercanía entre los resultados obtenidos por mediciones repetidas sobre el mismo objeto con un mismo equipo y bajo condiciones estipuladas. (Pallás, 2006)



Figura 2.13 Distinción entre exactitud y precisión

Fuente: (Sang & Litvinyuk, 2014)

La precisión es independiente de la exactitud. Eso significa que es posible ser muy preciso, pero no muy exacto, y también es posible ser exacto sin ser preciso.

2.8 Incertidumbre de medida

La incertidumbre de medida es la duda asociada respecto al resultado de la medición. Independientemente de cuán cuidadoso es el procedimiento de medición, todos los resultados de las mediciones están sujetas a errores e incertidumbres. Nunca podemos estar absolutamente seguros de que el resultado de una medición sea el valor verdadero. Por lo tanto, se debe de establecer un intervalo donde es más probable que se encuentre el valor verdadero de una magnitud medida.

El Vocabulario Internacional de Metrología: conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM, 2012) “Define la incertidumbre de medición como un parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores de cantidad que se atribuyen a un mensurando a partir de la información que se utiliza” (p. 34).

Las incertidumbres de medida tienen diferentes componentes. Se pueden cuantificar mediante una estimación tipo A o tipo B.

2.8.1 Medición directa e indirecta

Cuando el mensurando se obtienen directamente utilizando un instrumento de medida se les consideran mediciones directas, pero si el mensurando se obtienen a partir de otras magnitudes se les denomina medición indirecta.

2.8.2 Procedimiento general para estimar la incertidumbre de medición

Con los siguientes pasos se puede estimar la incertidumbre

- Especificación del mensurando
- Identificación de las fuentes de incertidumbre
- Cuantificación de la incertidumbre
- Calculo de la incertidumbre combinada
- Informar de la incertidumbre

2.8.2.1 Especificación del mensurando

Para mediciones indirectas el mensurando (Y) se determina utilizando otras magnitudes ($X_1, X_2, X_3 \dots X_N$).

$$Y = f(X_1, X_2, X_3 \dots X_N) \quad (2.19)$$

Donde:

Y : Magnitud de salida del mensurando.

$X_1, X_2, X_3 \dots X_N$: Magnitudes de entrada.

f : relación funcional.

N : Cantidad de magnitudes de entrada.

La relación funcional f incluye las correcciones y factores de corrección de cada magnitud de entrada, que contribuyen con componentes significativos de incertidumbre al mensurando. De la ecuación (2.19) se obtiene una estimación del mensurando (y), utilizando las estimaciones de las magnitudes de entrada (x_1, x_2, \dots, x_N). (Escamilla, 2015)

$$y = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_N) \quad (2.20)$$

Donde:

y : Estimación de la magnitud de salida del mensurando

$x_1, x_2, x_3 \dots x_N$: Estimación de las magnitudes de entrada

f : relación funcional

N : Cantidad de magnitudes de entrada

2.8.2.2 Tipos de incertidumbre

2.8.2.2.1 Incertidumbre tipo A

La evaluación de la incertidumbre tipo A se realiza mediante un análisis estadístico. Para determinar este tipo de incertidumbre se debe realizar una serie de repeticiones bajo las mismas condiciones de repetibilidad. La mejor forma de estimar la incertidumbre tipo A es en base a la desviación estándar experimental.

Utilizando la ecuación 2.21 se calcula la incertidumbre tipo A.

$$s(\bar{x}) = u_A(x_i) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (2.21)$$

Donde:

$s(\bar{x})$: Desviación estándar experimental de la media.

$s(x)$: Desviación estándar experimental de la muestra.

$u_A(x_i)$: Incertidumbre estándar tipo A.

n : Número de pruebas.

2.8.2.2.2 Incertidumbre tipo B

Cuando la estimación de una magnitud de entrada no se pudo evaluar a través de observaciones repetidas, la incertidumbre estándar $u_B(x_i)$ se evalúan mediante criterios científicos basados en toda la información disponible del instrumento y el proceso de medición. (Escamilla, 2015)

Esta información puede incluir:

- Datos de mediciones anteriores.
- Experiencia general o conocimiento del comportamiento y propiedades de materiales e instrumentos relevantes.
- Especificaciones del fabricante.
- Datos proporcionados en certificados de calibración u otros certificados.
- Incertidumbres relacionadas con datos de referencia extraídos de manuales.
- Resolución de los instrumentos.

2.8.2.2.1 Distribución normal

La distribución normal es una función que representa la distribución de muchas variables aleatorias como un gráfico simétrico en forma de campana, donde el pico está centrado sobre la media y se distribuye simétricamente de acuerdo con la desviación estándar como se observa en la Figura 2.14.

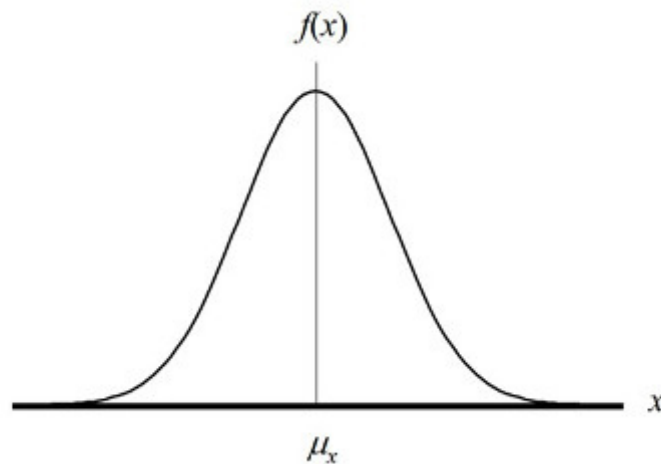


Figura 2.14 Distribución normal de probabilidad

Fuente: (Sang & Litvinyuk, 2014)

La incertidumbre proporcionada por un fabricante como en los certificados de calibración suelen venir acompañados con un nivel de confianza (90,95 o 99) % que tiene una relación con un factor de cobertura (k). Si no se indica el tipo de distribución utilizada se asume que se utilizó una distribución normal y para obtener la incertidumbre estándar se utiliza la siguiente formula:

$$u_B(x_i) = \frac{U}{k} \quad (2.22)$$

Donde:

U : Incertidumbre expandida.

$u_B(x_i)$: Incertidumbre estándar tipo B.

k : Factor de cobertura.

2.8.2.2.2 Distribución rectangular

La distribución rectangular es una función que representa una distribución uniforme continua y probabilidad constante como se observa en la Figura 2.15. En una distribución rectangular, todos los resultados tienen la misma probabilidad de ocurrir. La distribución rectangular es la distribución de probabilidad más utilizada en el análisis de incertidumbre.

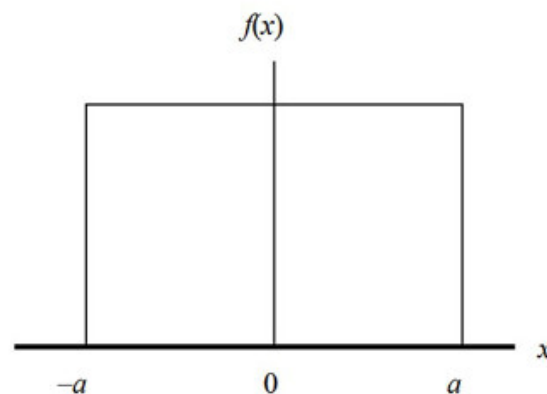


Figura 2.15 Distribución rectangular de probabilidad
Fuente: (Sang & Litvinyuk, 2014)

La distribución uniforme debe usarse cuando solo se dispone de un rango de valores, es decir, un intervalo con los valores mínimo y máximo, y no se dispone de información detallada sobre la probabilidad de valores dentro de este intervalo. La incertidumbre estándar asociada con dicho intervalo viene dada por:

$$u_B(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.23)$$

Donde:

a : Semi-intervalo del rango para distribución rectangular

$u_B(x_i)$: Incertidumbre estándar tipo B

2.8.2.2.3 Distribución triangular

La distribución triangular se puede utilizar cuando existe una fuerte evidencia de que el valor más probable se encuentra en la mitad de un intervalo dado, pero aún sin saber exactamente cómo se comporta esta probabilidad dentro del intervalo.

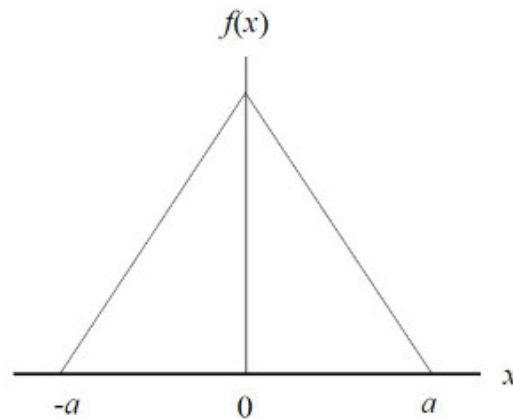


Figura 2.16 Distribución triangular de probabilidad
Fuente: (Sang & Litvinyuk, 2014)

La incertidumbre asociada a este intervalo se estima como:

$$u_B(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (2.24)$$

Donde:

$u_B(x_i)$: Incertidumbre estándar tipo B

a : Semi-intervalo del rango para distribución triangular

2.8.2.3 Fuentes de incertidumbre

2.8.2.3.1 Incertidumbre debido a la repetibilidad

Esta fuente de incertidumbre es del tipo A y se estima utilizando la Ecuación 2.25, si las mediciones de repetibilidad se basan en pruebas realizadas en la superficie del material, es probable que el valor de repetibilidad incluya una contribución significativa a la incertidumbre debido a la falta de uniformidad del material. (ASTM E18, 2019)

$$u_{rep \& unif} = u_A(x_i) \quad (2.25)$$

2.8.2.3.2 Incertidumbre debido a la calibración del equipo

Esta fuente de incertidumbre es proporcionada por el fabricante y normalmente se trata de incertidumbre tipo B con distribución normal, y se estima utilizando la Ecuación 2.22.

2.8.2.3.3 Incertidumbre debido a la deriva

La incertidumbre de deriva se determina a partir de la calibración del equipo, mediante el cambio del error o su corrección en el proceso de medición en el tiempo, este tipo de incertidumbre es del tipo B con distribución rectangular. (Zipaquirá & Porras, s. f.)

$$u_D = \frac{|C_n - C_{n-1}|_{max}}{\sqrt{3}} \quad (2.26)$$

Donde:

u_D : Incertidumbre debido a la deriva.

C_n : Corrección del certificado de calibración n.

C_{n-1} : Corrección del certificado de calibración n-1.

Si la deriva del instrumento es desconocida se puede aproximar usando la exactitud del instrumento de medida de medida proporcionada por el fabricante. (Zipaquirá & Porras, s. f.)

$$u_D = \frac{Exactitud}{\sqrt{3}} \quad (2.27)$$

2.8.2.3.4 Incertidumbre debido a la temperatura

La incertidumbre debido a la temperatura se considera siempre y cuando no se trabaje dentro de los márgenes de temperatura para los que el equipo está garantizado. En caso de que el fabricante considere que este tipo de incertidumbre contribuya a la incertidumbre total deberá proporcionar un límite máximo, salvo que se especifique de otra forma, este tipo de incertidumbre es del tipo B con distribución rectangular. (Zipaquirá & Porras, s. f.)

$$u_T = \frac{Limite}{\sqrt{3}} \quad (2.28)$$

Donde:

u_T : Incertidumbre debido a la temperatura.

Limite: Límite establecido por el fabricante.

2.8.2.3.5 Incertidumbre debido a la inestabilidad de la medida

La incertidumbre debido a la inestabilidad de la medida se debe a la magnitud que se desea medir y al propio equipo de medición. Cuando en el presupuesto de la incertidumbre

considera la incertidumbre tipo A no se considera la incertidumbre debido a la inestabilidad de la medida.

$$u_I = \frac{X_{max} - \bar{x}}{\sqrt{3}} \text{ o } u_I = \frac{\bar{x} - X_{min}}{\sqrt{3}} \quad (2.29)$$

Donde:

u_I : Incertidumbre debido a la inestabilidad de la medida.

X_{max} : Valor máximo.

X_{min} : Valor mínimo.

\bar{x} : Media aritmética de los valores medidos.

2.8.2.3.6 Incertidumbre debida a la resolución

La incertidumbre debida a la resolución es importante porque considera las limitaciones de los equipos de medición. No importa cuán cuidadosos o científicos sea el procedimiento de medición, los resultados de medición están limitados por la resolución del equipo y la unidad bajo prueba.

$$u_{resol} = \frac{r}{\sqrt{12}} \quad (2.30)$$

Donde:

u_{resol} : Incertidumbre debido a la resolución.

r : Resolución del equipo.

2.8.3 Calculo de la incertidumbre combinada

Cuando el resultado de la incertidumbre estándar de una medición se obtiene a partir de otras magnitudes, es igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo estos términos la varianza y las covarianzas de estas otras magnitudes ponderadas de acuerdo a cómo el resultado de la medición varía con respecto a cambio en estas magnitudes.

La incertidumbre estándar combinada se determina mediante:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial Y}{\partial x_i} \frac{\partial Y}{\partial x_j} u^2(x_i) u^2(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (2.31)$$

Donde:

$u_c(y)$: Incertidumbre estándar del mensurando Y.

$u(x_i)$: Incertidumbre estándar estimada de la magnitud de entrada.

$\frac{\partial Y}{\partial x_i} = c_1$: Coeficiente de sensibilidad de la magnitud de entrada.

$u^2(x_i) u^2(x_j) \cdot r(x_i, x_j)$: Covarianza asociada a la magnitud de entrada.

r : Coeficiente de correlación entre cada par de magnitudes de entrada.

Cuando las magnitudes de entrada no están correlacionadas el segundo término de la ecuación (2.31) desaparece y la incertidumbre combinada se reduce a:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n c_1^2 \cdot u^2(x_i) \quad (2.32)$$

2.8.4 Cálculo de la incertidumbre expandida

Si bien la incertidumbre estándar combinada se usa para expresar la incertidumbre de muchos resultados de medición, a menudo en algunas aplicaciones comerciales e industriales se necesita un nivel de confianza mayor que ofrece la incertidumbre combinada.

La medida de incertidumbre destinada a satisfacer este requisito se considera una incertidumbre expandida y se obtiene multiplicando la incertidumbre combinada por un factor de cobertura, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$U = u_c(y) \cdot k \quad (2.33)$$

Donde:

U : Incertidumbre expandida.

$u_c(y)$: Incertidumbre estándar del mensurando Y.

k : Factor de cobertura.

2.9 Cadena metrológica en dureza

La Figura 2.17 muestra la estructura de la cadena metrológica dividida en cuatro niveles, necesarios para la reproducción y difusión de las escalas de dureza. (EURAME g-16, 2011)

- La cadena metrológica comienza a nivel internacional utilizando definiciones internacionales de las diferentes escalas de dureza para llevar a cabo intercomparaciones internacionales.
- En nivel nacional, las máquinas de normalización de dureza sirven para reproducir y calibrar los bloques de dureza de referencia primaria para el nivel de los laboratorios de calibración, la precisión de las máquinas normalizadoras de dureza nacionales está garantizada por comparaciones internacionales y calibraciones directas al más alto nivel.
- A nivel de laboratorio de calibración, los bloques de referencia de dureza primarios se utilizan para cualificar las máquinas de calibración de dureza, que también deben calibrarse directa e indirectamente, estas máquinas se utilizan luego para calibrar los bloques de referencia de dureza para el nivel del usuario.
- A nivel de usuario, los bloques de referencia de dureza se utilizan para calibrar las máquinas industriales de prueba de dureza de forma indirecta, después de haber sido calibradas directamente.

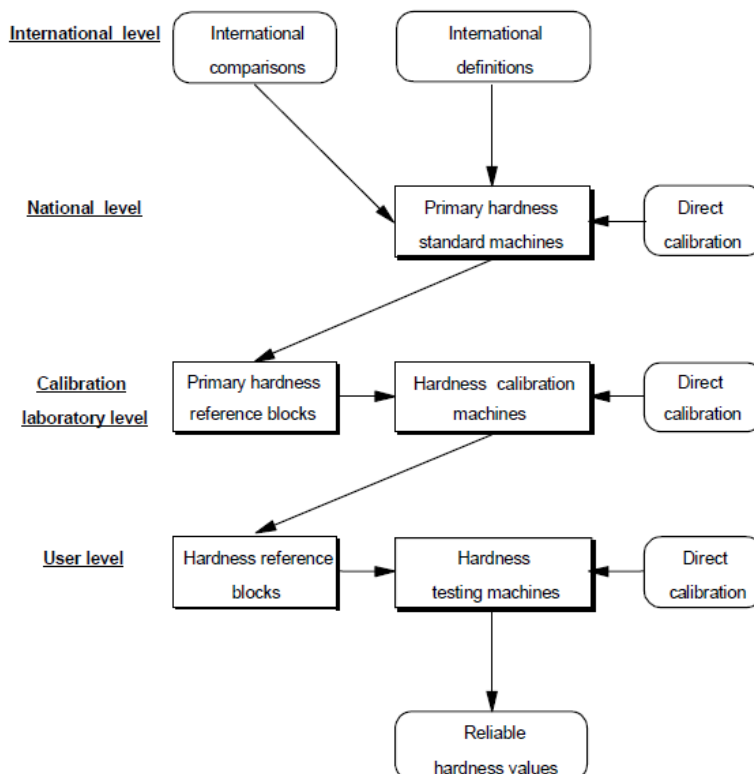


Figura 2.17 Estructura de la cadena metrológica para la definición y difusión de las escalas de dureza

Fuente: (EURAME g-16, 2011)

La calibración directa garantiza el correcto funcionamiento del dispositivo de medición en correspondencia con las definiciones de dureza y los parámetros establecidos en las mismas.

Mediante la calibración indirecta con bloques de dureza se comprueba el funcionamiento general del dispositivo de medición.



CAPÍTULO III

3. Procedimiento Experimental

3.1 Principio de medición

Los procedimientos de las pruebas dureza Rockwell, Brinell y Vickers se realizaron siguiendo las normas ASTM E18-2019, ASTM E10-2015 y ASTM E92-2017 respectivamente, mientras que las pruebas de dureza Leeb y UCI con la cual se compara los resultados de las pruebas anteriores se realiza de acuerdo a las normas A956-17 y ASTM A1038-17 respectivamente

3.2 Equipos y materiales utilizados

En la Figura 3.1 se muestran los equipos y materiales utilizados.

- Durómetro portátil NOVOTEST T-UD2.
- Durómetro digital de Rockwell HRS-150.
- Durómetro universal analógico HBRVU-187.5.
- Rugotest.
- Indicador de campo magnético residual.
- Identador de cono de diamante.
- Identador de bola de 2.5 mm
- Identador de pirámide de diamante.
- Cronometro.

- Colocar la probeta sobre la plataforma del durómetro estático y subir la plataforma girando la manivela hasta que la punta del indentador entre en contacto con la superficie de la probeta como se observa en la Figura 3.2a.
- Aplicar la precarga de 10 kgf durante un tiempo de 1 a 8 segundos subiendo la plataforma del durómetro hasta que el contador marque 580.
- Aplicar la fuerza de prueba y la precarga en un tiempo de 2 a 6 segundos.
- Finalmente se lee los resultados de dureza obtenidos en la pantalla del durómetro digital (Figura 3.2b).



Figura 3.2 Procedimiento de la prueba de dureza Rockwell
Fuente: **Elaboración propia**

En este procedimiento se realizó 5 indentaciones sobre el patrón de dureza como se muestra en la Figura 3.3b, debe de tenerse en cuenta que la distancia entre el centro de las indentaciones debe ser mayor a 3 veces el diámetro de las indentaciones. Y la distancia entre el borde de la probeta y el centro de la indentación debe ser mayor a 2.5 veces el diámetro de la indentación.

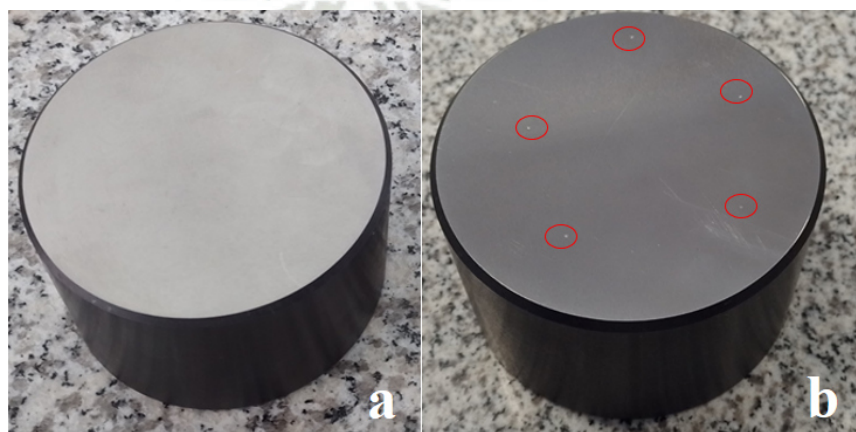


Figura 3.3 Patrón de dureza antes (a) y después de la prueba de dureza Rockwell (b).
Fuente: **Elaboración propia**

Los resultados obtenidos sobre el patrón de dureza de 57 HRC utilizando el durómetro digital de Rockwell se muestran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1
Resultados de la prueba dureza Rockwell sobre el patrón de dureza

Ensayo	Dureza (HRC)
1	56.30
2	56.10
3	56.10
4	56.20
5	56.40

Fuente: Elaboración propia

3.4 Procedimiento experimental de la prueba de dureza Brinell

La prueba de dureza Brinell se realizó con el durómetro estático universal HBVRU-187.5 del laboratorio de materiales ubicado en el salón O-207, la probeta que se analizó con este procedimiento es el acero AISI 1045 fabricado por BOHLER, según la ficha técnica este acero posee una dureza máxima de 193 Brinell (Anexo E).

El procedimiento que se realizó para obtener la dureza del acero AISI 1045 después realizar la calibración indirecta del durómetro es el siguiente:

- Preparar la superficie de la probeta con cuidado evitando endurecimiento superficial debido al maquinado o al pulido.
- Verificar la horizontalidad del durómetro con el nivel de burbuja.
- Verificar que la temperatura del ambiente este entre 10 y 35°C.
- Seleccionar el tipo de prueba de dureza.
- Seleccionar el diámetro del indentador y la fuerza de prueba según la dureza aproximada del material, para esta prueba de dureza el diámetro de la bola es de 2.5 mm y la fuerza de prueba de 187.5 kg-f.
- Colocar la probeta sobre la plataforma del durómetro estático y subir la plataforma girando la manivela hasta que la punta del indentador entre con contacto con la superficie de la probeta como se observa en Figura 3.4a.
- Subir la plataforma del durómetro hasta que la línea de la pantalla este alineada con el set del durómetro como se puede ver en la Figura 3.4b

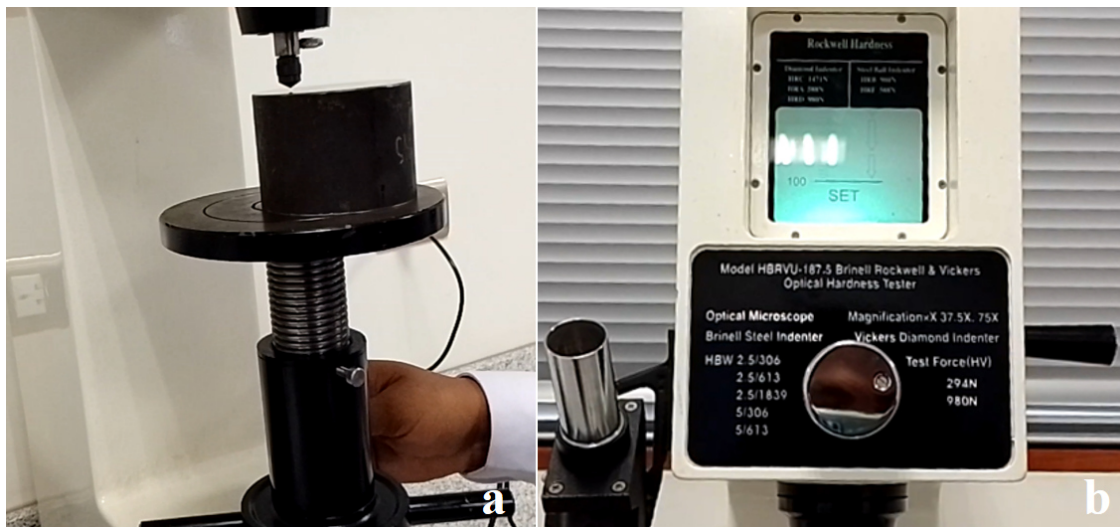


Figura 3.4 Procedimiento de la prueba de dureza Brinell
Fuente: **Elaboración propia**

- Aplicar la fuerza de prueba en un tiempo de 15 segundos.
- Retirar la probeta para realizar las mediciones de los diámetros de las indentaciones.
- Medir 2 veces el diámetro de la indentación de forma perpendicular y el diámetro promedio se utiliza para el cálculo del número de dureza en la escala Brinell.

En este procedimiento se realizará 5 indentaciones en la cara de la probeta superior como se observa en la Figura 3.5b, pero debe de tenerse en cuenta que la distancia entre el centro de la indentaciones debe ser mayor a 3 veces el diámetro de las indentaciones y la distancia entre el borde de la probeta y el centro de la indentación debe ser mayor a 2.5 veces el diámetro de la indentación.

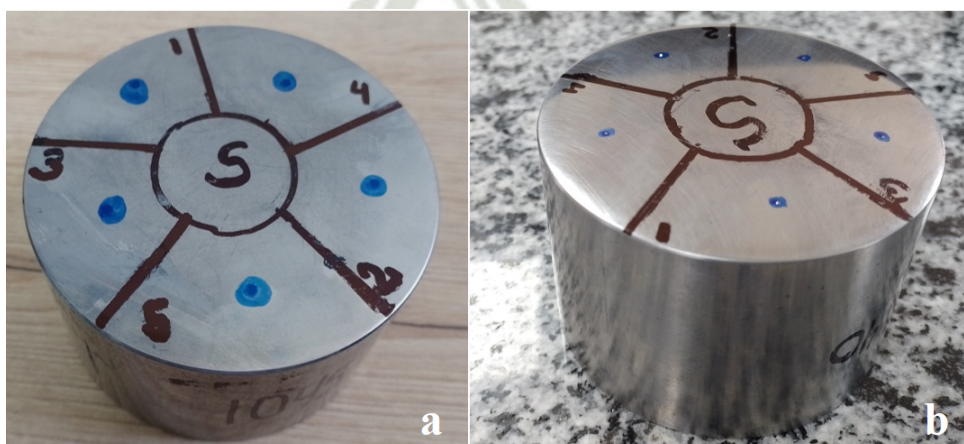


Figura 3.5 Probeta antes (a) y después de la prueba de dureza Brinell (b) cara superior
Fuente: **Elaboración propia**

Con el diámetro promedio de la huella de indentación se obtiene el número de dureza en la escala Brinell utilizando la Ecuación 2.1.

Tabla 3-2
Resultados de la prueba dureza Brinell sobre la probeta AISI 1045

Ensayo	Diámetro promedio (mm)	Dureza (HB)
Cara superior		
1	1.090	190.88
2	1.088	191.63
3	1.086	192.37
4	1.082	193.87
5	1.088	191.63

Fuente: Elaboración propia

3.4.1 Procedimiento experimental de la prueba de dureza Vickers

La prueba de dureza Vickers se realizó con el durómetro estático universal HBVRU-187.5 del laboratorio de materiales ubicado en el salón O-207, la probeta que se analizó con este procedimiento es el acero AISI 4140 fabricado por BOHLER, según la ficha técnica este acero posee una dureza entre 250 y 350 Brinell (Anexo F).

El procedimiento que se realizó para obtener la dureza del acero AISI 4140 después realizar la calibración indirecta del durómetro es el siguiente:

- Preparar la superficie de la probeta con cuidado evitando endurecimiento superficial debido al maquinado o al pulido.
- Verificar la horizontalidad del durómetro con el nivel de burbuja.
- Verificar que la temperatura del ambiente este en un rango entre 10 y 35°C.
- Seleccionar el tipo de prueba de dureza.
- Seleccionar el indentador de punta de diamante piramidal y la fuerza de prueba de 100 kgf.
- Colocar la probeta sobre la plataforma del durómetro estático y subir la plataforma girando la manivela hasta que la punta del indentador entre con contacto con la superficie de la probeta como se muestra en la Figura 3.6a.

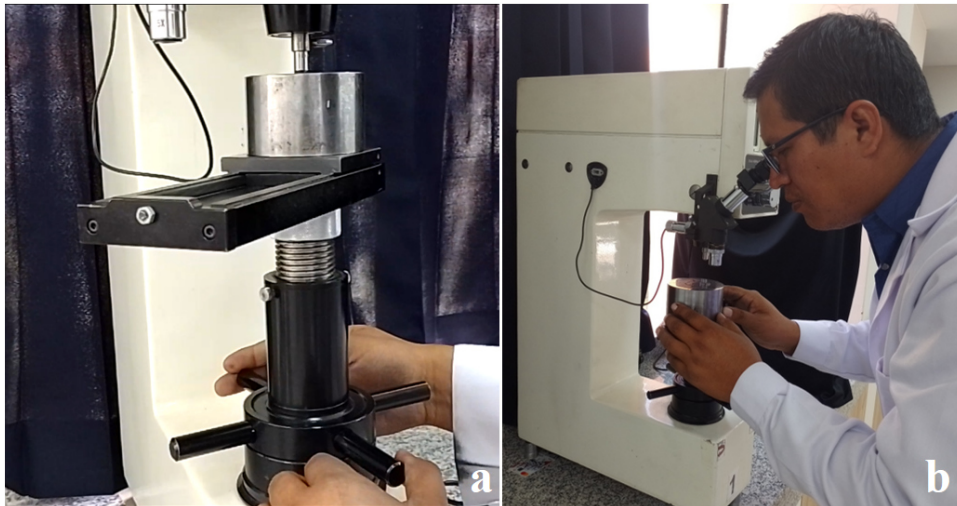


Figura 3.6 Procedimiento de la prueba de dureza Vickers
Fuente: **Elaboración propia**

- Subir la plataforma del durómetro hasta que la línea de la pantalla este alineada con el set del durómetro.
- Aplicar la fuerza de prueba en un tiempo de 10-15 segundos.
- Retirar la probeta para realizar las mediciones de las diagonales de las indentaciones.
- Utilizando el microscopio medir las longitudes de las 2 diagonales de la indentación y el promedio de las longitudes de las 2 diagonales se utiliza para el cálculo del número de dureza en la escala Vickers.

En este procedimiento se realizaron 5 indentaciones sobre la cara superior de la probeta, teniendo en consideración que la distancia entre el centro de la indentaciones debe ser mayor a 2.5 veces la longitud de las diagonales y la distancia entre el borde de la probeta y el centro de la indentación debe ser mayor a 2.5 veces la diagonal promedio de la indentación.

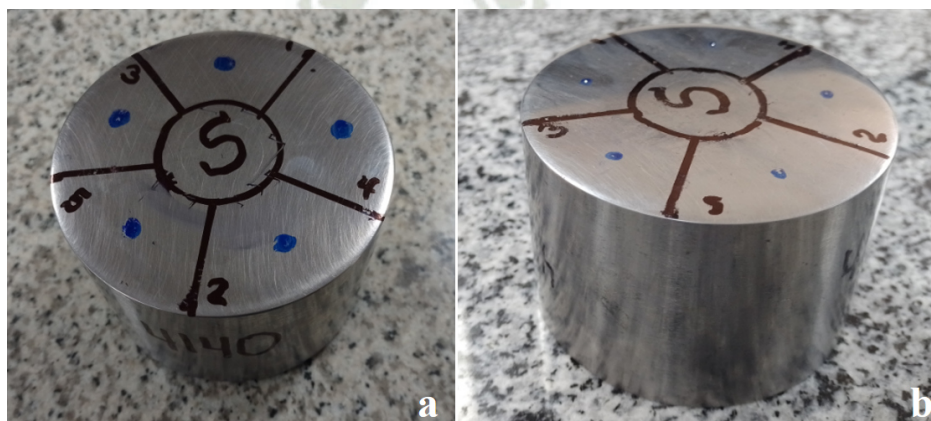


Figura 3.7 Probeta antes (a) y después de la prueba de dureza Vickers (b) cara superior
Fuente: **Elaboración propia**

Una vez obtenido el promedio de las longitudes de las diagonales de la indentación utilizando la Ecuación 2.8 se calcula la dureza en la escala Vickers como se observa en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3
Resultados de la prueba dureza Vickers sobre la probeta AISI 4140

Ensayo	Diagonal promedio (mm)	Dureza (HV)
Cara superior		
1	0.802	288.12
2	0.802	287.40
3	0.805	285.97
4	0.804	286.69
5	0.804	286.69

Fuente: Elaboración propia

3.5 Procedimiento experimental de la prueba de dureza Leeb

La prueba de dureza Leeb se realizó con el durómetro portátil NOVOTEST T-UD2 utilizando el dispositivo de impacto tipo D en el laboratorio de materiales ubicado en el salón O-207. Las pruebas de dureza se realizaron sobre el patrón de dureza de 57.0 HRC, la probeta de acero AISI 1045 y AISI 4140.

3.5.1.1 Probeta de prueba

Las probetas deben prepararse y cumplir las siguientes condiciones para realizar la prueba de dureza Leeb:

- Durante la preparación de la superficie debe evitarse la alteración de la dureza superficial debido al calentamiento causado por el esmerilado, maquinado, pulido y corte.
- Comprobar que la rugosidad superficial de la probeta sea menor a $3.2 \mu\text{m}$ utilizando un comparador de rugosidad superficial o un rugosímetro.
- Medir que el campo magnético residual de la probeta y comprobar que sea menor a 4 G como podemos ver en la Figura 3.8a.
- Verificar que la probeta posea un peso mayor a 5 kg y en caso de utilizar una superficie rígida verificar que el peso sea mayor a 2 kg como se observa en la Figura 3.8b.
- Verificar que la temperatura de la probeta este entre 4 y 38°C .



Figura 3.8 Preparación de la probeta de prueba AISI 1045
Fuente: **Elaboración propia**

3.5.1.2 Procedimiento de prueba de dureza Leeb

Para realizar la prueba de dureza Leeb debe de seguirse el siguiente procedimiento:

- En la Figura 3.9a se muestra la conexión del dispositivo de impacto, la conexión se realiza cuando el equipo se encuentra apagado, después de conectar la sonda recién se procede a prender el equipo.
- Una vez prendido el equipo mediante bluetooth se procede a conectar al celular para operar remotamente como se observa en la Figura 3.9b.



Figura 3.9 Conexión (a) y operación remota del equipo NOVOTEST T-UD2 (b)
Fuente: **Elaboración propia**

- Una vez ubicado en la interfaz de la aplicación se procede a seleccionar el tipo de material y la escala de dureza como se muestra en la Figura 3.10a y Figura 3.10b.

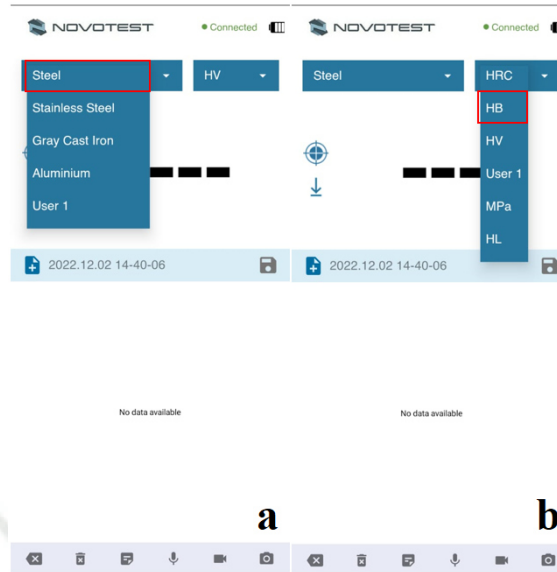


Figura 3.10 Selección del tipo de material (a) y selección de la escala de dureza (b).
Fuente: **Elaboración propia**

- Después de colocar la probeta debidamente preparada sobre el soporte rígido se procede a cargar el dispositivo de impacto presionando el tubo de carga hacia abajo como se observa en la Figura 3.11.



Figura 3.11 Carga del dispositivo de impacto
Fuente: **Elaboración propia**

- Luego de cargar el dispositivo de impacto este se pone en contacto con la pieza de prueba y se sujeta firmemente con una mano mientras que la otra mano se ubica en la parte superior para activar el dispositivo de carga (Figura 3.12).

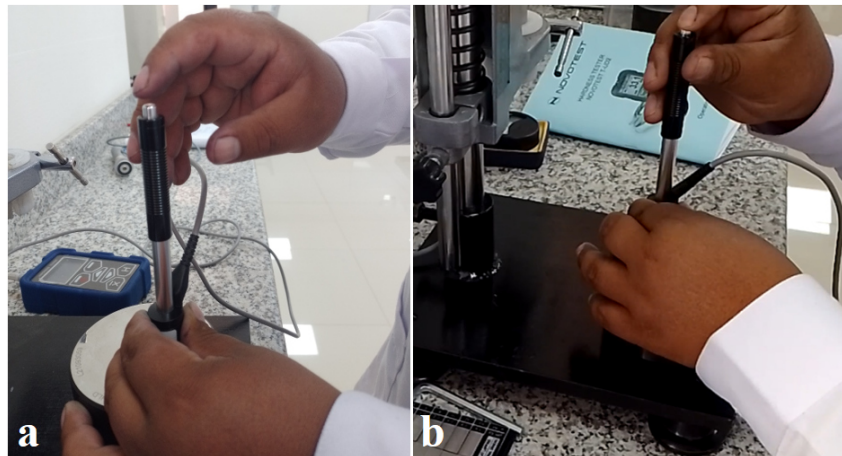


Figura 3.12 Medición de dureza superficial utilizando el dispositivo de impacto tipo D
Fuente: **Elaboración propia**

- Luego de presionar el pulsador y activar el mecanismo de liberación del cuerpo de impacto el valor de la dureza se muestra en la interfaz de la aplicación del durómetro portátil.

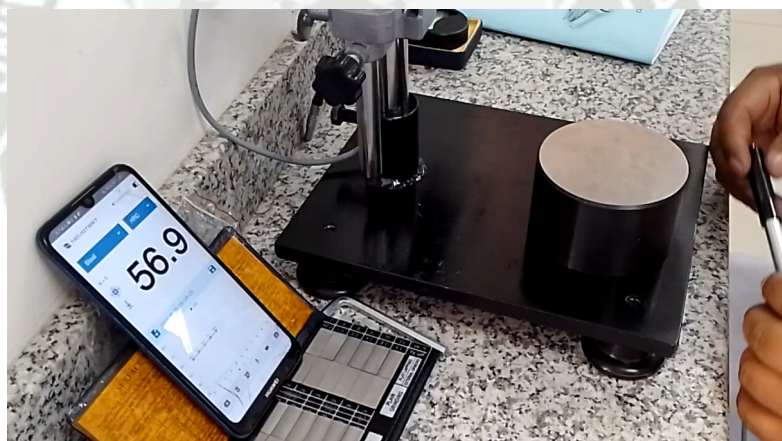


Figura 3.13 Resultado del proceso de medición en la interfaz de la aplicación.
Fuente: **Elaboración propia**

Se realizaron 25 indentaciones en cada cara de la probeta, cada 5 indentaciones realizadas en un área aproximada de 1 pulgada cuadrada se considera una prueba de dureza Leeb. La distancia entre los bordes de 2 indentaciones no debe ser inferior a dos veces el diámetro de la indentación y la distancia entre el borde de la indentación y el borde de la probeta no debe ser menor de tres veces el diámetro de la indentación.

Las indentaciones realizadas por el dispositivo de impacto se ubicaron alrededor de las indentaciones anteriormente realizadas por los durómetros estáticos como se observa en la Figura 3.14.

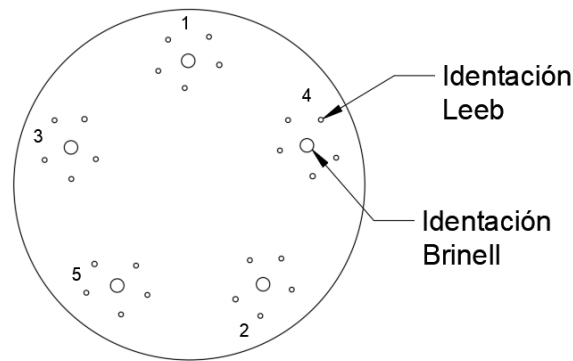


Figura 3.14 Esquema de indentaciones realizadas por la prueba de dureza Leeb
Fuente: **Elaboración propia**

En la Figura 3.15a se observa el acabado superficial de la cara superior de la probeta AISI 1045, este acabado se logró mediante un pulido manual; mientras que el acabado de la cara inferior mostrado en la Figura 3.15b es el acabado obtenido mediante el refrentado de la probeta.

Según la comparación superficial realizada con el rugotest la cara superior tiene una rugosidad entre 0.2 y 0.4 μm , mientras que la cara inferior tiene una rugosidad entre 1.6 y 3.2 μm .

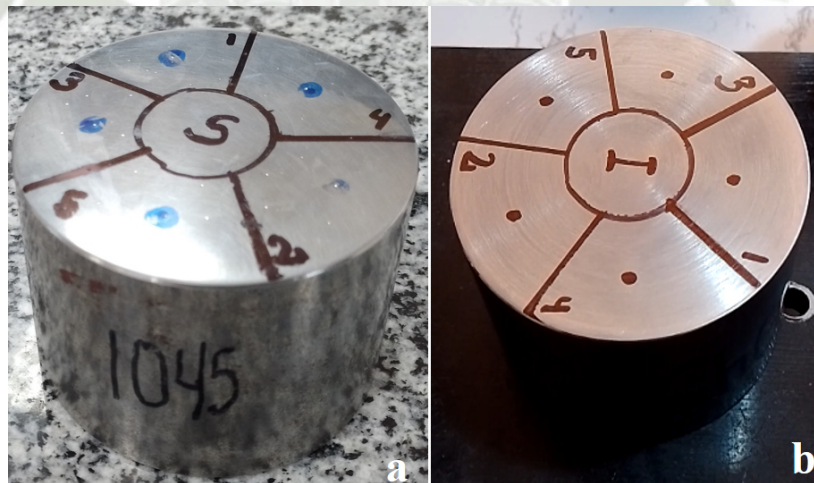


Figura 3.15 Probeta AISI 1045 pulida (a) y sin pulir (b)
Fuente: **Elaboración propia**

Las condiciones con las que se realizaron las pruebas de dureza Leeb son:

- Temperatura: 21°C
- Humedad relativa: 17%
- Presión atmosférica: 76.7 kPa

Los resultados de las mediciones se muestran en la Tabla 3-4, Tabla 3-5, Tabla 3-6, Tabla 3-7 y Tabla 3-8.

Tabla 3-4

Resultados de la prueba dureza Leeb sobre el patrón de dureza 57.0 HRC

Medida	Prueba 1 HRC(HLD)	Prueba 2 HRC(HLD)	Prueba 3 HRC(HLD)	Prueba 4 HRC(HLD)	Prueba 5 HRC(HLD)
1	57.3	56.8	57.1	56.6	57.3
2	56.9	57.1	55.9	57.6	57.4
3	57.0	56.9	56.6	57.1	57.5
4	56.4	57.1	56.0	56.7	57.7
5	56.7	56.9	56.8	56.9	56.8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-5

Resultados de la prueba dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 1045

Ensayo	Prueba 1 HB(HLD)	Prueba 2 HB(HLD)	Prueba 3 HB(HLD)	Prueba 4 HB(HLD)	Prueba 5 HB(HLD)
1	191	190	190	191	190
2	191	188	192	186	186
3	199	193	195	186	194
4	191	192	198	194	196
5	189	195	187	188	192

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-6

Resultados de la prueba dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 1045

Ensayo	Prueba 1 HB(HLD)	Prueba 2 HB(HLD)	Prueba 3 HB(HLD)	Prueba 4 HB(HLD)	Prueba 5 HB(HLD)
1	188	178	190	184	178
2	186	186	189	187	186
3	188	189	176	181	189
4	199	190	180	176	190
5	183	187	186	186	187

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-7
Resultados de la prueba dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 4140

Ensayo	Prueba 1 HV(HLD)	Prueba 2 HV(HLD)	Prueba 3 HV(HLD)	Prueba 4 HV(HLD)	Prueba 5 HV(HLD)
1	289	292	292	289	292
2	287	298	295	289	278
3	297	277	296	289	284
4	298	276	279	282	298
5	279	292	281	273	279

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-8
Resultados de la prueba dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 4140

Ensayo	Prueba 1 HV(HLD)	Prueba 2 HV(HLD)	Prueba 3 HV(HLD)	Prueba 4 HV(HLD)	Prueba 5 HV(HLD)
1	296	281	267	278	288
2	287	264	272	273	280
3	274	278	287	289	267
4	282	279	280	293	290
5	272	298	290	299	285

Fuente: Elaboración propia

3.6 Procedimiento experimental de la prueba de dureza de impedancia de contacto ultrasónico (UCI)

La prueba de dureza UCI se realizó con el durómetro portátil NOVOTEST T-UD2 utilizando la sonda de 50 N en el laboratorio de materiales del salón O-207. Las pruebas de dureza se realizaron sobre el patrón de dureza de 57.0 HRC, la probeta de acero AISI 1045 y AISI 4140. El procedimiento que se realizó es el siguiente:

3.6.1.1 Probeta de prueba

Las probetas deben prepararse y cumplir las siguientes condiciones para realizar la prueba de dureza UCI:

- Durante la preparación de la superficie debe evitarse la alteración de la dureza superficial debido al calentamiento causado por el esmerilado, maquinado, pulido y corte.

- Medir la rugosidad superficial y comprobar que la rugosidad superficial no exceda $2.5 \mu\text{m}$.
- Verificar que la probeta posea un peso mayor a 0.3 kgf y en caso de tener un peso menor a 0.3 kgf se requiere un acoplamiento a una superficie más pesada.
- Comprobar que el espesor sea mayor a 15 mm , si el espesor es menor se debe acoplar la probeta a una superficies gruesa y más pesada mediante alguna película de una pasta viscosa.

3.6.1.2 Procedimiento de la prueba de dureza UCI

Para realizar la prueba de dureza Leeb debe de seguirse el siguiente procedimiento:

- La sonda de 50 N debe de conectarse al equipo cuando este se encuentre apagado como se observa Figura 3.16a, una vez conectada la sonda recién se procede a prender el equipo.
- Una vez prendido el equipo mediante bluetooth se procede a conectar al celular para operar remotamente, luego en la interfaz de la aplicación se procede a seleccionar el tipo de material y la escala de dureza.
- Después de colocar la probeta debidamente preparada sobre el soporte rígido la sonda se sujeta firmemente sobre la boquilla deslizante utilizando las 2 manos como se muestra en Figura 3.16b, la posición de la sonda debe de ser perpendicular con respecto a la superficie y la desviación angular máxima de la posición perpendicular debe ser inferior a 5 grados.



Figura 3.16 Conexión (a) y sujeción (b) de la sonda de 50 N
Fuente: **Elaboración propia**

- Luego se empuja la boquilla deslizante hasta que la punta del indentador entre en contacto con la superficie de la probeta como se observa en la Figura 3.17a y seguidamente ejerza con cuidado una carga constante de 5 kgf sobre la probeta de prueba como se muestra Figura 3.17b, el descenso de la sonda debe realizarse con una velocidad lenta y constante en un tiempo aproximado de 0.5 segundos. El durómetro mediante un sonido indicara que la medición ha finalizado y se retira la sonda.

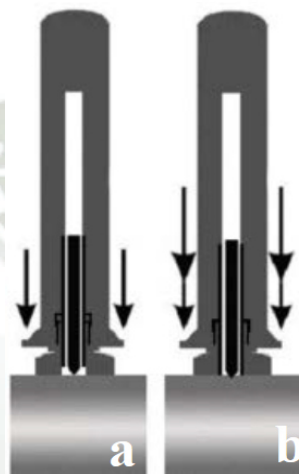


Figura 3.17 Procedimiento de medición prueba de dureza UCI
Fuente: **Elaboración propia**

- En la Figura 3.18 se muestra otra forma de realizar la medición en la prueba de dureza UCI utilizando un banco de medición conectado al soporte rígido que tiene como objetivo mantener la sonda perpendicular a la superficie de la probeta, además permite ubicar de manera más precisa el lugar donde se realizara la indentación.

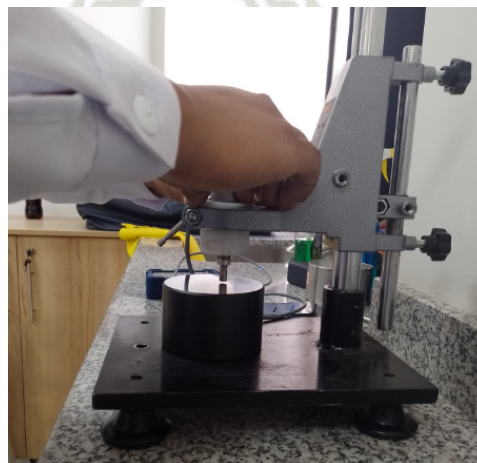


Figura 3.18 Procedimiento de medición prueba de dureza UCI con banco
Fuente: **Elaboración propia**

Este procedimiento se realizó 25 veces en cada cara de la probeta, cada 5 indentaciones en un área aproximada de 1 pulgada cuadrada se considera una prueba de dureza. La distancia entre los bordes de 2 puntos de impacto no debe ser inferior a dos veces la diagonal de la indentación y la distancia entre el borde del punto de impacto y el borde de la probeta no debe ser menor de tres veces la diagonal de la indentación. En la Figura 3.19 se observa el esquema de indentaciones realizadas por la sonda UCI, las indentaciones estarán ubicadas entre las indentaciones de la prueba de dureza Leeb.

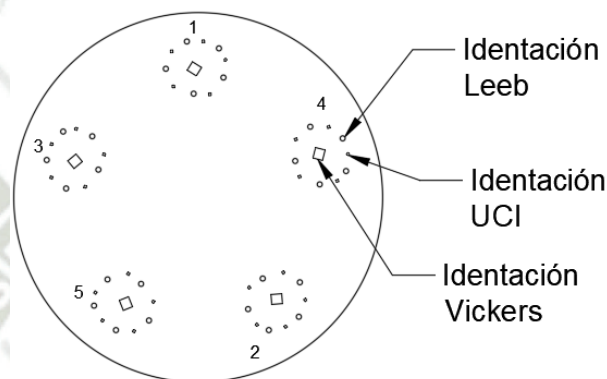


Figura 3.19 Esquema de indentaciones UCI
Fuente: **Elaboración propia**

En la Figura 3.20a se observa el acabado superficial de la cara superior de la probeta AISI 4140, este acabado se logró mediante un pulido manual; mientras que el acabado de la cara inferior mostrado en la Figura 3.20b es el acabado obtenido mediante el refrentado de la probeta. Según la comparación superficial realizada con un rugotest la cara superior tiene una rugosidad entre 0.2 y 0.4 μm , mientras que la cara inferior tiene una rugosidad entre 1.6 y 3.2 μm .

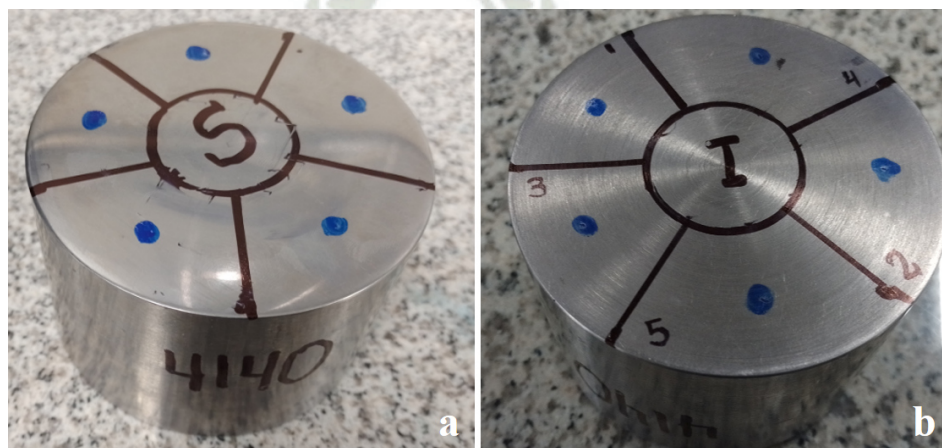


Figura 3.20 Probeta AISI 4140 pulida (a) y sin pulir (b)
Fuente: **Elaboración propia**

Las condiciones con las que se realizaron las pruebas de dureza son:

- Temperatura: 22°C
- Humedad relativa: 17%
- Presión atmosférica: 76.7 kPa

Los resultados de las mediciones se muestran en la Tabla 3-9, Tabla 3-10, Tabla 3-11, Tabla 3-12 y Tabla 3-13.

Tabla 3-9
Resultados de la prueba de dureza UCI sobre el patrón de dureza 57.0 HRC

Ensayo	Prueba 1 HRC(HLD)	Prueba 2 HRC(HLD)	Prueba 3 HRC(HLD)	Prueba 4 HRC(HLD)	Prueba 5 HRC(HLD)
1	56.5	56.6	57.2	56.9	56.6
2	57.5	57.0	57.0	56.3	56.4
3	57.0	56.2	55.7	56.7	57.0
4	56.8	54.7	54.9	56.1	56.8
5	55.8	54.9	56.1	55.3	56.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-10
Resultados de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 1045

Ensayo	Prueba 1 HB (HLD)	Prueba 2 HB(HLD)	Prueba 3 HB(HLD)	Prueba 4 HB(HLD)	Prueba 5 HB(HLD)
1	185	198	192	188	184
2	198	178	192	191	197
3	189	186	189	189	191
4	187	191	197	188	193
5	189	197	188	204	203

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-11
Resultados de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 1045

Ensayo	Prueba 1 HB (HLD)	Prueba 2 HB(HLD)	Prueba 3 HB(HLD)	Prueba 4 HB(HLD)	Prueba 5 HB(HLD)
1	186	182	179	181	192
2	192	183	193	188	178
3	182	187	181	168	181
4	181	197	192	189	178
5	188	177	187	178	182

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-12

Resultados de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 4140

Ensayo	Prueba 1 HV(HLD)	Prueba 2 HV(HLD)	Prueba 3 HV(HLD)	Prueba 4 HV(HLD)	Prueba 5 HV(HLD)
1	293	289	278	288	285
2	279	286	288	286	287
3	288	279	279	279	291
4	294	295	282	295	289
5	289	282	293	282	288

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-13

Resultados de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 4140

Ensayo	Prueba 1 HV(HLD)	Prueba 2 HV(HLD)	Prueba 3 HV(HLD)	Prueba 4 HV(HLD)	Prueba 5 HV(HLD)
1	291	269	291	267	291
2	277	294	301	287	301
3	288	274	275	278	275
4	289	276	277	291	277
5	279	280	270	277	270

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

4. Estimación de la incertidumbre

4.1 Estimación de la incertidumbre de la prueba de dureza Leeb sobre el patrón de 57.0 HRC

4.1.1 Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad

Utilizando la Ecuación 2.21 se determina la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de cada prueba de dureza de la Tabla 3-4, los resultados se muestra en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1
Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza Leeb sobre el patrón de 57.0 HRC

Medida	Prueba 1 HRC(HLD)	Prueba 2 HRC(HLD)	Prueba 3 HRC(HLD)	Prueba 4 HRC(HLD)	Prueba 5 HRC(HLD)
1	57.3	56.8	57.1	56.6	57.3
2	56.9	57.1	55.9	57.6	57.4
3	57.0	56.9	56.6	57.1	57.5
4	56.4	57.1	56.0	56.7	57.7
5	56.7	56.9	56.8	56.9	56.8
\bar{X}	56.86	56.96	56.48	56.98	57.34
$s(x)$	0.336	0.134	0.517	0.396	0.336
N	5	5	5	5	5
$u_{rep \& unif}$	0.15	0.06	0.23	0.18	0.15

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Estimación de la incertidumbre debido a la calibración

Mediante la Ecuación 2.22 y la incertidumbre de calibración proporcionado por el fabricante se estima la incertidumbre debido a la calibración:

$$u_{cal} = \frac{1.38}{2} = 0.69 \text{ HRC}$$

4.1.3 Incertidumbre debido a la resolución

Reemplazando la resolución del equipo proporcionada en la Ecuación 2.30 se obtiene:

$$u_{rel} = \frac{0.1}{\sqrt{12}} = 0.03 \text{ HRC}$$

4.1.4 Incertidumbre debido a la deriva del instrumento

Como no se tiene calibraciones anteriores del equipo, la deriva del equipo se estima con la exactitud del instrumento proporcionada por el fabricante utilizando la Ecuación 2.28.

$$u_{der} = \frac{0.3}{\sqrt{3}} = 0.173 \text{ HRC}$$

4.1.5 Incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre combinada y expandida se obtiene reemplazando todas las fuentes de incertidumbre en la Ecuación 2.32 y la Ecuación 2.33, los resultados se muestran en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2
Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza Leeb sobre el patrón de 57.0 HRC

Medida	$u_{rep \& \text{unif}}$	u_{cal}	u_{rel}	u_{der}	u_c	$U_{k=2}$
1	0.15	0.69	0.03	0.17	0.73	1.46
2	0.06	0.69	0.03	0.17	0.71	1.43
3	0.23	0.69	0.03	0.17	0.75	1.50
4	0.18	0.69	0.03	0.17	0.73	1.47
5	0.15	0.69	0.03	0.17	0.73	1.46

Fuente: Elaboración propia

4.2 Estimación de la incertidumbre de la prueba de dureza UCI sobre el patrón de 57. HRC

4.2.1 Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad

Utilizando la Ecuación 2.21 se determina la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de cada prueba de dureza de la Tabla 3-9, los resultados se muestra en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3
Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza UCI sobre el patrón de 57.0 HRC

Medida	Prueba 1 HRC(UCI)	Prueba 2 HRC(UCI)	Prueba 3 HRC(UCI)	Prueba 4 HRC(UCI)	Prueba 5 HRC(UCI)
1	56.5	56.6	57.2	56.9	56.6
2	57.5	57.0	57.0	56.3	56.4
3	57.0	56.2	55.7	56.7	57.0
4	56.8	54.7	54.9	56.1	56.8
5	55.8	54.9	56.1	55.3	56.4
\bar{X}	56.72	55.88	56.18	56.26	56.64
$s(x)$	0.630	1.028	0.947	0.623	0.261
N	5	5	5	5	5
$u_{rep \& unif}$	0.28	0.46	0.42	0.28	0.12

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Estimación de la incertidumbre debido a la calibración

Mediante la Ecuación 2.22 y la incertidumbre de calibración proporcionado por el fabricante se obtiene:

$$u_{cal} = \frac{1.33}{2} = 0.67 \text{ HRC}$$

4.2.3 Incertidumbre debido a la resolución

Reemplazando la resolución del equipo en la Ecuación 2.30 se obtiene:

$$u_{rel} = \frac{0.1}{\sqrt{12}} = 0.03 \text{ HRC}$$

4.2.4 Incertidumbre debido a la deriva del instrumento

Como no se tiene calibraciones anteriores del equipo, la deriva del equipo se estima con la exactitud del instrumento proporcionada por el fabricante utilizando la Ecuación 2.28.

$$u_{der} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289 \text{ HRC}$$

4.2.5 Incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre combinada y expandida se obtiene reemplazando todas las fuentes de incertidumbre en la Ecuación 2.32 y Ecuación 2.33, los resultados se muestran en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4
Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza UCI sobre el patrón de 57.0 HRC

Medida	$u_{rep \& \text{unif}}$	u_{cal}	u_{rel}	u_{der}	u_c	$U_{k=2}$
1	0.28	0.67	0.03	0.289	0.78	1.57
2	0.46	0.67	0.03	0.289	0.86	1.73
3	0.42	0.67	0.03	0.289	0.84	1.69
4	0.28	0.67	0.03	0.289	0.78	1.56
5	0.12	0.67	0.03	0.289	0.74	1.48

Fuente: Elaboración propia

4.3 Estimación de la incertidumbre de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 1045

4.3.1 Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad

Utilizando la Ecuación 2.21 se determina la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de cada prueba de dureza de la Tabla 3-5, los resultados se muestra en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5
Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 1045

Medida	Prueba 1 HB(HLD)	Prueba 2 HB(HLD)	Prueba 3 HB(HLD)	Prueba 4 HB(HLD)	Prueba 5 HB(HLD)
1	191	190	190	191	190
2	191	188	192	186	186
3	199	193	195	186	194
4	191	192	198	194	196
5	189	195	187	188	192
\bar{X}	192.20	191.60	192.40	189.00	191.60
$s(x)$	3.899	2.702	4.278	3.464	3.847
N	5	5	5	5	5
$u_{rep \& unif}$	1.74	1.21	1.91	1.55	1.72

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Estimación de la incertidumbre debido a la calibración

Mediante la Ecuación 2.22 y la incertidumbre de calibración proporcionado por el fabricante se obtiene:

$$u_{cal} = \frac{14.10}{2} = 7.05 \text{ HB}$$

4.3.3 Incertidumbre debido a la resolución

Reemplazando la resolución del equipo proporcionada por el fabricante en la ecuación 2.30 se obtiene:

$$u_{rel} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0.29 \text{ HB}$$

4.3.4 Incertidumbre debido a la deriva del instrumento

Como no se tiene calibraciones anteriores del equipo, la deriva del equipo se estima con la exactitud del instrumento proporcionada por el fabricante utilizando la Ecuación 2.28.

$$u_{der} = \frac{3.2}{\sqrt{3}} = 1.85 \text{ HB}$$

4.3.5 Incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre combinada y expandida se obtiene reemplazando todas las fuentes de incertidumbre en la Ecuación 2.32 y Ecuación 2.33, los resultados se muestran en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6
Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 1045

Medida	$u_{rep \& unif}$	u_{cal}	u_{rel}	u_{der}	u_c	$U_{k=2}$
1	1.74	7.05	0.29	1.85	7.50	15.00
2	1.21	7.05	0.29	1.85	7.39	14.79
3	1.91	7.05	0.29	1.85	7.54	15.08
4	1.55	7.05	0.29	1.85	7.46	14.91
5	1.72	7.05	0.29	1.85	7.49	14.99

Fuente: Elaboración propia

4.4 Estimación de la incertidumbre de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 1045

4.4.1 Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad

Utilizando la Ecuación 2.21 se determina la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de cada prueba de dureza de la Tabla 3-6, los resultados se muestra en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7
Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 1045

Medida	Prueba 1 HB(HLD)	Prueba 2 HB(HLD)	Prueba 3 HB(HLD)	Prueba 4 HB(HLD)	Prueba 5 HB(HLD)
1	188	178	190	184	178
2	186	186	189	187	186
3	188	189	176	181	189
4	199	190	180	176	190
5	183	187	186	186	187
\bar{X}	188.80	186.00	184.20	182.80	186.00
$s(x)$	6.058	4.743	6.017	4.438	4.743
N	5	5	5	5	5
$u_{rep \& unif}$	2.71	2.12	2.69	1.98	2.12

Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Estimación de la incertidumbre debido a la calibración

Mediante la Ecuación 2.22 y la incertidumbre de calibración proporcionado por el fabricante se obtiene:

$$u_{cal} = \frac{9.92}{2} = 4.96 \text{ HB}$$

4.4.3 Incertidumbre debido a la resolución

Reemplazando la resolución del equipo proporcionada por el fabricante en la Ecuación 2.30 se obtiene:

$$u_{rel} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0.29 \text{ HB}$$

4.4.4 Incertidumbre debido a la deriva del instrumento

Como no se tiene calibraciones anteriores del equipo, la deriva del equipo se estima con la exactitud del instrumento proporcionada por el fabricante utilizando la ecuación 2.28.

$$u_{der} = \frac{3.2}{\sqrt{3}} = 1.85 \text{ HB}$$

4.4.5 Incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre combinada y expandida se obtiene reemplazando todas las fuentes de incertidumbre en la Ecuación 2.32 y Ecuación 2.33, los resultados se muestran en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8
Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 1045

Medida	$u_{rep \& \text{unif}}$	u_{cal}	u_{rel}	u_{der}	u_c	$U_{k=2}$
1	2.71	7.05	0.29	1.85	7.78	15.56
2	2.12	7.05	0.29	1.85	7.60	15.19
3	2.69	7.05	0.29	1.85	7.77	15.55
4	1.98	7.05	0.29	1.85	7.56	15.12
5	2.12	7.05	0.29	1.85	7.60	15.19

Fuente: Elaboración propia

4.5 Estimación de la incertidumbre de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 1045

4.5.1 Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad

Utilizando la Ecuación 2.21 se determina la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de cada prueba de dureza de la Tabla 3-10, los resultados se muestra en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9
Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 1045

Medida	Prueba 1 HB(UCI)	Prueba 2 HB(UCI)	Prueba 3 HB(UCI)	Prueba 4 HB(UCI)	Prueba 5 HB(UCI)
1	185	198	192	188	184
2	198	178	192	191	197
3	189	186	189	189	191
4	187	191	197	188	193
5	189	197	188	204	203
\bar{X}	189.60	190.00	191.60	192.00	193.60
$s(x)$	4.980	8.276	3.507	6.819	7.057
N	5	5	5	5	5
$u_{rep \& unif}$	2.23	3.70	1.57	3.05	3.16

Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Estimación de la incertidumbre debido a la calibración

Mediante la Ecuación 2.22 y la incertidumbre de calibración proporcionado por el fabricante se obtiene:

$$u_{cal} = \frac{11.20}{2} = 5.60 \text{ HB}$$

4.5.3 Incertidumbre debido a la resolución

Reemplazando la resolución del equipo proporcionada por el fabricante en la Ecuación 2.30 se obtiene:

$$u_{rel} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0.29 \text{ HB}$$

4.5.4 Incertidumbre debido a la deriva del instrumento

Como no se tiene calibraciones anteriores del equipo, la deriva del equipo se estima con la exactitud del instrumento proporcionada por el fabricante utilizando la Ecuación 2.28.

$$u_{der} = \frac{3}{\sqrt{3}} = 1.73 \text{ HB}$$

4.5.5 Incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre combinada y expandida se obtiene reemplazando todas las fuentes de incertidumbre en la Ecuación 2.32 y Ecuación 2.33, los resultados se muestran en la Tabla 4-10.

Tabla 4-10
Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 1045

Medida	$u_{rep \& unif}$	u_{cal}	u_{rel}	u_{der}	u_c	$U_{k=2}$
1	2.23	5.60	0.29	1.62	6.25	12.49
2	3.70	5.60	0.29	1.62	6.91	13.82
3	1.57	5.60	0.29	1.62	6.04	12.09
4	3.05	5.60	0.29	1.62	6.59	13.17
5	3.16	5.60	0.29	1.62	6.64	13.27

Fuente: Elaboración propia

4.6 Estimación de la incertidumbre de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 1045

4.6.1 Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad

Utilizando la Ecuación 2.21 se determina la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de cada prueba de dureza de la Tabla 3-11. los resultados se muestra en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11
Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 1045

Medida	Prueba 1 HB(UCI)	Prueba 2 HB(UCI)	Prueba 3 HB(UCI)	Prueba 4 HB(UCI)	Prueba 5 HB(UCI)
1	186	182	179	181	192
2	192	183	193	188	178

3	182	187	181	168	181
4	181	197	192	189	178
5	188	177	187	178	182
\bar{X}	185.80	185.20	186.40	180.80	182.20
$s(x)$	4.494	7.497	6.309	8.526	5.762
N	5	5	5	5	5
$u_{rep \& unif}$	2.01	3.35	2.82	3.81	2.58

Fuente: Elaboración propia

4.6.2 Estimación de la incertidumbre debido a la calibración

Mediante la Ecuación 2.22 y la incertidumbre de calibración proporcionado por el fabricante se obtiene:

$$u_{cal} = \frac{11.20}{2} = 5.60 \text{ HB}$$

4.6.3 Incertidumbre debido a la resolución

Reemplazando la resolución del equipo proporcionada por el fabricante en la Ecuación 2.30 se obtiene:

$$u_{rel} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0.29 \text{ HB}$$

4.6.4 Incertidumbre debido a la deriva del instrumento

Como no se tiene calibraciones anteriores del equipo, la deriva del equipo se estima con la exactitud del instrumento proporcionada por el fabricante utilizando la Ecuación 2.28.

$$u_{der} = \frac{3.0}{\sqrt{3}} = 1.73 \text{ HB}$$

4.6.5 Incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre combinada y expandida se obtiene reemplazando todas las fuentes de incertidumbre en la Ecuación 2.32 y Ecuación 2.33, los resultados se muestran en la Tabla 4-12.

Tabla 4-12
Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 1045

Medida	$u_{rep \& unif}$	u_{cal}	u_{rel}	u_{der}	u_c	$U_{k=2}$
1	2.01	5.60	0.29	1.73	6.20	12.41
2	3.35	5.60	0.29	1.73	6.76	13.52
3	2.82	5.60	0.29	1.73	6.51	13.02
4	3.81	5.60	0.29	1.73	7.00	14.00
5	2.58	5.60	0.29	1.73	6.41	12.82

Fuente: Elaboración propia

4.7 Estimación de la incertidumbre de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 4140

4.7.1 Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad

Utilizando la Ecuación 2.21 se determina la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de cada prueba de dureza de la Tabla 3-7, los resultados se muestra en la Tabla 4-13.

Tabla 4-13
Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 4140

Medida	Prueba 1 HV(HLD)	Prueba 2 HV(HLD)	Prueba 3 HV(HLD)	Prueba 4 HV(HLD)	Prueba 5 HV(HLD)
1	289	292	292	289	292
2	287	298	295	289	278
3	297	277	296	289	284
4	298	276	279	282	298
5	279	292	281	273	279
\bar{X}	290.00	287.00	288.60	284.40	286.20
$s(x)$	7.810	9.899	8.019	7.057	8.614
N	5	5	5	5	5
$u_{rep \& unif}$	3.49	4.43	3.59	3.16	3.85

Fuente: Elaboración propia

4.7.2 Estimación de la incertidumbre debido a la calibración

Mediante la Ecuación 2.22 y la incertidumbre de calibración proporcionado por el fabricante se obtiene:

$$u_{cal} = \frac{13.5}{2} = 6.75 \text{ HV}$$

4.7.3 Incertidumbre debido a la resolución

Reemplazando la resolución del equipo proporcionada por el fabricante en la Ecuación 2.30 se obtiene:

$$u_{rel} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0.29 \text{ HV}$$

4.7.4 Incertidumbre debido a la deriva del instrumento

Como no se tiene calibraciones anteriores del equipo, la deriva del equipo se estima con la exactitud del instrumento proporcionada por el fabricante utilizando la Ecuación 2.28.

$$u_{der} = \frac{2.1}{\sqrt{3}} = 1.21 \text{ HV}$$

4.7.5 Incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre combinada y expandida se obtiene reemplazando todas las fuentes de incertidumbre en la Ecuación 2.32 y Ecuación 2.33, los resultados se muestran en la Tabla 4-14.

Tabla 4-14
Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta pulida AISI 4140

Medida	$u_{rep \& \text{unif}}$	u_{cal}	u_{rel}	u_{der}	u_c	$U_{k=2}$
1	3.49	6.75	0.29	1.21	7.70	15.40
2	4.43	6.75	0.29	1.21	8.17	16.34
3	3.59	6.75	0.29	1.21	7.74	15.49
4	3.16	6.75	0.29	1.21	7.55	15.11
5	3.85	6.75	0.29	1.21	7.87	15.74

Fuente: Elaboración propia

4.8 Estimación de la incertidumbre de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 4140

4.8.1 Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad

Utilizando la Ecuación 2.21 se determina la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de cada prueba de dureza de la Tabla 3-8, los resultados se muestra en la Tabla 4-15.

Tabla 4-15
Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 4140

Medida	Prueba 1 HV(HLD)	Prueba 2 HV(HLD)	Prueba 3 HV(HLD)	Prueba 4 HV(HLD)	Prueba 5 HV(HLD)
1	296	281	267	278	288
2	287	264	272	273	280
3	274	278	287	289	267
4	282	279	280	293	290
5	272	298	290	299	285
\bar{X}	282.20	280.00	279.20	286.40	282.00
$s(x)$	9.808	12.104	9.731	10.714	9.192
N	5	5	5	5	5
$u_{rep \& unif}$	4.39	5.41	4.35	4.79	4.11

Fuente: Elaboración propia

4.8.2 Estimación de la incertidumbre debido a la calibración

Mediante la Ecuación (2.22) y la incertidumbre de calibración proporcionado por el fabricante se obtiene:

$$u_{cal} = \frac{13.5}{2} = 6.75 HV$$

4.8.3 Incertidumbre debido a la resolución

Reemplazando la resolución del equipo proporcionada por el fabricante en la Ecuación 2.30 se obtiene:

$$u_{rel} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0.29 HV$$

4.8.4 Incertidumbre debido a la deriva del instrumento

Como no se tiene calibraciones anteriores del equipo, la deriva del equipo se estima con la exactitud del instrumento proporcionada por el fabricante utilizando la Ecuación 2.28.

$$u_{der} = \frac{2.1}{\sqrt{3}} = 1.21 \text{ HV}$$

4.8.5 Incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre combinada y expandida se obtiene reemplazando todas las fuentes de incertidumbre en la Ecuación 2.32 y Ecuación 2.33, los resultados se muestran en la Tabla 4-16.

Tabla 4-16
Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza Leeb sobre la probeta sin pulir AISI 4140

Medida	$u_{rep \& unif}$	u_{cal}	u_{rel}	u_{der}	u_c	$U_{k=2}$
1	4.39	6.75	0.29	1.21	8.15	16.29
2	5.41	6.75	0.29	1.21	8.74	17.48
3	4.35	6.75	0.29	1.21	8.13	16.25
4	4.79	6.75	0.29	1.21	8.37	16.74
5	4.11	6.75	0.29	1.21	8.00	16.00

Fuente: Elaboración propia

4.9 Estimación de la incertidumbre de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 4140

4.9.1 Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad

Utilizando la Ecuación 2.21 se determina la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de cada prueba de dureza de la Tabla 3-12, los resultados se muestra en la Tabla 4-17.

Tabla 4-17
Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 4140

Medida	Prueba 1 HV(UCI)5	Prueba 2 HV(UCI)5	Prueba 3 HV(UCI)5	Prueba 4 HV(UCI)5	Prueba 5 HV(UCI)5
1	293	289	278	288	285
2	279	286	288	286	287

3	288	279	279	279	291
4	294	295	282	295	289
5	289	282	293	282	288
\bar{X}	288.60	286.20	284.00	286.00	288.00
$s(x)$	5.941	6.221	6.364	6.124	2.236
N	5	5	5	5	5
$u_{rep \& unif}$	2.66	2.78	2.85	2.74	1.00

Fuente: Elaboración propia

4.9.2 Estimación de la incertidumbre debido a la calibración

Mediante la Ecuación 2.22 y la incertidumbre de calibración proporcionado por el fabricante se obtiene:

$$u_{cal} = \frac{13.2}{2} = 6.60 \text{ HV}$$

4.9.3 Incertidumbre debido a la resolución

Reemplazando la resolución del equipo proporcionada por el fabricante en la Ecuación 2.30 se obtiene:

$$u_{rel} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0.29 \text{ HV}$$

4.9.4 Incertidumbre debido a la deriva del instrumento

Como no se tiene calibraciones anteriores del equipo, la deriva del equipo se estima con la exactitud del instrumento proporcionada por el fabricante utilizando la Ecuación 2.28.

$$u_{der} = \frac{2.4}{\sqrt{3}} = 1.39 \text{ HV}$$

4.9.5 Incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre combinada y expandida se obtiene reemplazando todas las fuentes de incertidumbre en la Ecuación 2.32 y Ecuación 2.33, los resultados se muestran en la Tabla 4-18.

Tabla 4-18
Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza UCI sobre la probeta pulida AISI 4140

Medida	$u_{rep \& unif}$	u_{cal}	u_{rel}	u_{der}	u_c	$U_{k=2}$
1	2.66	6.60	0.29	1.39	7.26	14.51
2	2.78	6.60	0.29	1.39	7.30	14.60
3	2.85	6.60	0.29	1.39	7.33	14.65
4	2.74	6.60	0.29	1.39	7.29	14.57
5	1.00	6.60	0.29	1.39	6.82	13.65

Fuente: Elaboración propia

4.10 Estimación de la incertidumbre de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 4140

4.10.1 Estimación de la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad

Utilizando la ecuación 2.21 se determina la incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de cada prueba de dureza de la Tabla 3-13, los resultados se muestra en la Tabla 4-19.

Tabla 4-19
Incertidumbre por repetibilidad y uniformidad de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 4140

Medida	Prueba 1 HV(UCI)5	Prueba 2 HV(UCI)5	Prueba 3 HV(UCI)5	Prueba 4 HV(UCI)5	Prueba 5 HV(UCI)5
1	291	269	291	267	291
2	277	294	301	287	301
3	288	274	275	278	275
4	289	276	277	291	277
5	279	280	270	277	270
\bar{X}	283.60	278.60	282.80	280.00	282.80
$s(x)$	8.414	9.476	12.814	9.381	12.814
N	5	5	5	5	5
$u_{rep \& unif}$	3.76	4.24	5.73	4.20	5.73

Fuente: Elaboración propia

4.10.2 Estimación de la incertidumbre debido a la calibración

Mediante la Ecuación 2.22 y la incertidumbre de calibración proporcionado por el fabricante se obtiene:

$$u_{cal} = \frac{13.2}{2} = 6.60 \text{ HV}$$

4.10.3 Incertidumbre debido a la resolución

Reemplazando la resolución del equipo proporcionada por el fabricante en la Ecuación 2.30 se obtiene:

$$u_{rel} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0.29 \text{ HV}$$

4.10.4 Incertidumbre debido a la deriva del instrumento

Como no se tiene calibraciones anteriores del equipo, la deriva del equipo se estima con la exactitud del instrumento proporcionada por el fabricante utilizando la Ecuación 2.28.

$$u_{der} = \frac{2.4}{\sqrt{3}} = 1.39 \text{ HV}$$

4.10.5 Incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre combinada y expandida se obtiene reemplazando todas las fuentes de incertidumbre en la Ecuación 2.32 y Ecuación 2.33, los resultados se muestran en la Tabla 4-20.

Tabla 4-20
Incertidumbre combinada y expandida de la prueba de dureza UCI sobre la probeta sin pulir AISI 4140

Medida	$u_{rep \& \text{unif}}$	u_{cal}	u_{rel}	u_{der}	u_c	$U_{k=2}$
1	2.84	6.60	0.29	1.39	7.32	14.64
2	4.24	6.60	0.29	1.39	7.97	15.94
3	5.73	6.60	0.29	1.39	8.86	17.71
4	4.20	6.60	0.29	1.39	7.95	15.90
5	5.73	6.60	0.29	1.39	8.86	17.71

Fuente: Elaboración propia

Las incertidumbres de medida estimadas con un nivel de confianza del 95% de las pruebas de dureza Leeb y UCI en las escalas Rockwell, Brinell y Vickers se muestran en la Tabla 4-21, Tabla 4-22 y Tabla 4-23

Tabla 4-21
Incertidumbre de medida sobre el patrón de dureza

Prueba	Prueba Leeb HRC(HLD)	Prueba UCI HRC(UCI)
1	1.46	1.57
2	1.43	1.73
3	1.50	1.69
4	1.47	1.56
5	1.46	1.48

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-22
Incertidumbre de medida sobre la probeta AISI 1045

Prueba	Prueba Leeb HB(HLD)		Prueba UCI HB(UCI)	
	Pulido	Sin pulir	Pulido	Sin pulir
1	15.00	15.56	12.49	12.41
2	14.79	15.19	13.82	13.52
3	15.08	15.55	12.09	13.02
4	14.91	15.12	13.17	14.00
5	14.99	15.19	13.27	12.82

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-23
Incertidumbre de medida sobre la probeta AISI 4140

Prueba	Prueba Leeb HV(HLD)		Prueba UCI HV(UCI) 5	
	Pulido	Sin pulir	Pulido	Sin pulir
1	15.40	16.29	14.51	14.64
2	16.34	17.48	14.60	15.94
3	15.49	16.25	14.65	17.71
4	15.11	16.74	14.57	15.90
5	15.74	16.00	13.65	17.71

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Análisis de resultados obtenidos en la escala de dureza Rockwell

5.1.1 Comparación de los resultados en la escala Rockwell

En la Tabla 5-1 se muestran los resultados de la prueba de dureza Rockwell utilizando el equipo estático digital equipo HRS-150 y los valores promedios de la prueba de dureza Leeb de la Tabla 4-1 y UCI de la Tabla 4-3 medidos por el equipo NOVOTEST T-UD2 sobre el patrón de dureza de 57.0 HRC.

Tabla 5-1
Resultados obtenidos sobre el patrón de dureza Rockwell

Prueba	Rockwell HRC	Leeb HRC(HLD)	UCI HRC(UCI)
Prueba 1	56.30	56.86	56.72
Prueba 2	56.10	56.96	55.88
Prueba 3	56.10	56.48	56.18
Prueba 4	56.20	56.98	56.26
Prueba 5	56.40	57.34	56.64
\bar{X}	56.22	56.92	56.34
Bloque de referencia	57.00	57.00	57.00
Error	-0.78	-0.08	-0.66
Repetibilidad máx.	0.30	0.86	0.84
Error relativo	-1.37	-0.13	-1.16

Fuente: Elaboración propia

La prueba de dureza Leeb y UCI muestra un error de -0.08 HRC y -0.66 HRC respectivamente, mientras que la dureza medida con el durómetro estático difiere en -0.78 HRC respecto al patrón de dureza. Los resultados de las 3 prueba de dureza en la escala Rockwell C muestran una ligera tendencia del equipo a proporcionar resultados por debajo del valor de referencia, estos resultados pueden ser corregidos agregando el error los resultados de cada prueba de dureza como se observan en las Tabla 5-2 y 5-3.

Adicionalmente se puede observar que la repetibilidad máxima del durómetro estático es de 0.3 HRC casi la tercera parte de la repetibilidad máxima de la prueba de dureza Leeb y UCI.

5.1.2 Carta de control de la prueba de dureza Leeb

Con las incertidumbres calculadas en la Tabla 4-2, los valores promedios de las pruebas de dureza de la Tabla 4-1, el error máximo permisible de 2 HRC según la norma ASTM A956-2017 se crea la Tabla 5-2 y la Figura 5.1.

Tabla 5-2
Datos de la prueba de dureza Leeb para la gráfica de control

Prueba	Leeb HRC(HLD)	Leeb _{corregido} HRC(HLD)	$U_{k=2}$ HRC	Valor ref. HRC	Límite inferior	Límite superior
Prueba 1	56.86	56.94	1.46	57.0	55.0	59.0
Prueba 2	56.96	57.04	1.43	57.0	55.0	59.0
Prueba 3	56.48	56.56	1.50	57.0	55.0	59.0
Prueba 4	56.98	57.06	1.47	57.0	55.0	59.0
Prueba 5	57.34	57.42	1.46	57.0	55.0	59.0

Fuente: Elaboración propia

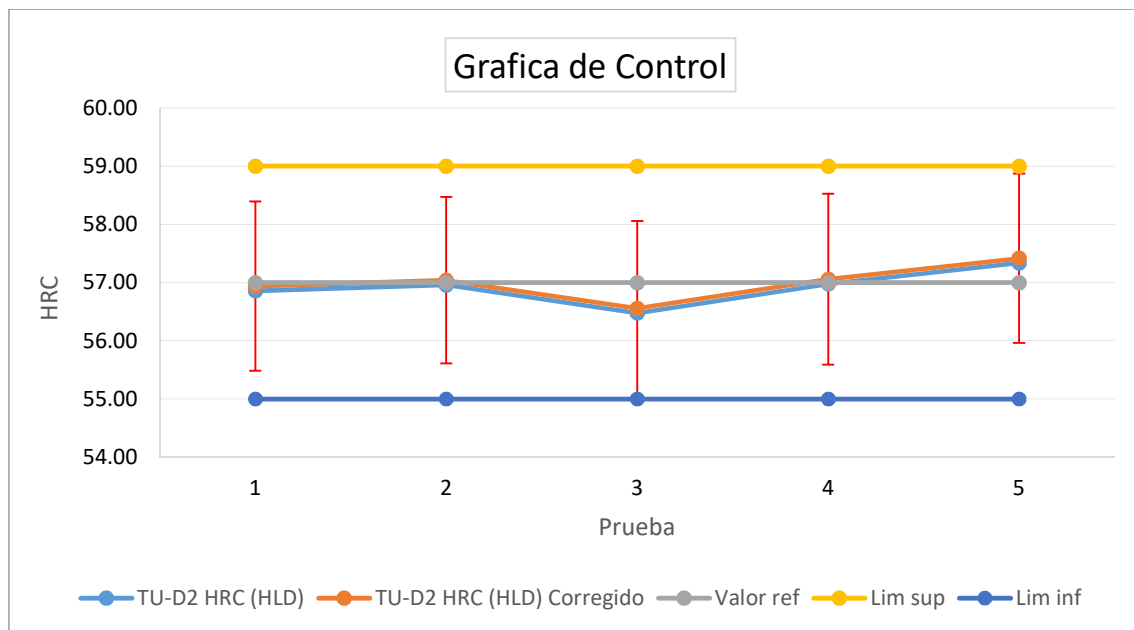


Figura 5.1 Gráfica de control de la prueba de dureza Leeb en la escala Rockwell
Fuente: **Elaboración propia**

Como se puede apreciar en la Figura 5.1 los resultados obtenidos por la prueba de dureza Leeb en la escala Rockwell y sus correcciones se encuentran dentro de los límites de tolerancia permitidos por la norma incluso cuando se ha considerado el rango de incertidumbre.

5.1.3 Carta de control de la prueba de dureza UCI

El error relativo máximo permisible en la prueba de dureza UCI según la norma ASTM A1038-2017 es del 7 % para cargas mayores a 9.8 N y rangos de dureza entre 500 y 800 HV (Anexo D).

Utilizando la Ecuación 2.18 se obtiene el error máximo permisible para la prueba de dureza UCI:

$$E = \bar{x} - x_{ref} = \frac{7\% \cdot 57 \text{ HRC}}{100\%} = 4 \text{ HRC}$$

Con las incertidumbres calculadas en la Tabla 4-4, los valores promedios de las pruebas de dureza de la Tabla 4-3, la corrección del error de 0.66 HRC y el error máximo permisible de 4 HRC se crea la Tabla 5-3 y la Figura 5.2.

Tabla 5-3
Datos de la prueba de dureza UCI para la gráfica de control

Prueba	UCI HRC(UCI)	UCI _{corregido} HRC(UCI)	$U_{k=2}$ HRC	Valor ref. HRC	Límite superior	Límite inferior
Prueba 1	56.72	57.38	1.57	57.0	53.0	61.0
Prueba 2	55.88	56.54	1.73	57.0	53.0	61.0
Prueba 3	56.18	56.84	1.69	57.0	53.0	61.0
Prueba 4	56.26	56.92	1.56	57.0	53.0	61.0
Prueba 5	56.64	57.30	1.48	57.0	53.0	61.0

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5.2 se observa que el promedio de las pruebas de dureza individuales y corregidas realizados por la prueba de dureza UCI en la escala Rockwell se encuentran dentro de los límites de tolerancia permitidos por la norma incluso cuando se considera el rango de incertidumbre.

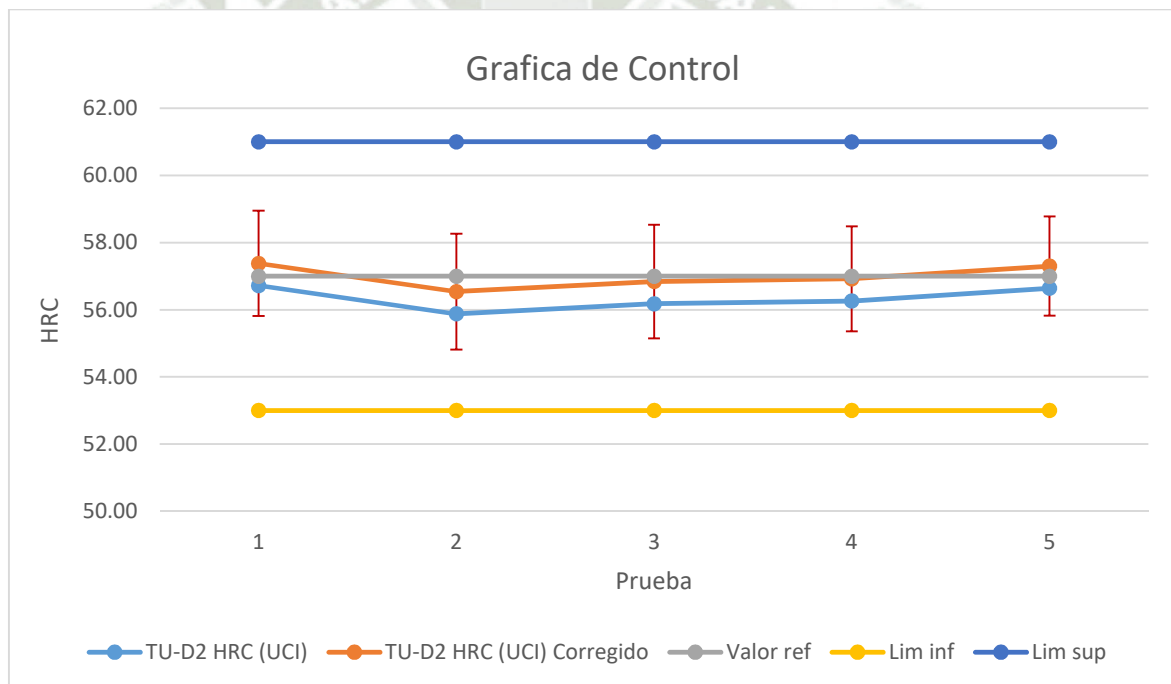


Figura 5.2 Gráfica de control de la prueba de dureza UCI en la escala Rockwell
Fuente: Elaboración propia

5.2 Análisis de resultados obtenidos en la escala de dureza Brinell

En la Tabla 5-4 se muestran los resultados de la prueba de dureza Brinell utilizando el equipo durómetro estático analógico HBRVU y las pruebas obtenidos en la escala Brinell por la pruebas de dureza Leeb y UCI como se detallan en la Tabla 4-5 y Tabla 4-9 sobre la probeta de acero al carbono AISI 1045. El promedio de los valores obtenidos por la prueba de dureza Brinell se considera el valor de referencia para realizar las comparaciones.

Tabla 5-4
Resultados obtenidos sobre la probeta AISI 1045 en la escala Brinell

Prueba Probeta Escala	Brinell Pulida HB	Leeb Pulida HB(HLD)	Leeb Sin pulir HB(HLD)	UCI Pulida HB(UCI)	UCI Sin pulir HB(UCI)
Prueba 1	190.9	192.2	188.8	189.6	185.8
Prueba 2	191.6	191.6	186.0	190.0	185.2
Prueba 3	192.4	192.4	184.2	191.6	186.4
Prueba 4	193.9	189.0	182.8	192.0	180.8
Prueba 5	191.6	191.6	186.0	193.4	182.2
\bar{X}	192.1	191.4	185.6	191.3	184.1
Repetibilidad max.	2.99	3.40	6.00	3.80	5.60
Error	-	-0.72	-6.52	-0.76	-8.00
Error relativo	-	-0.37	-3.40	-0.41	-4.18

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de las pruebas de dureza Leeb y UCI sobre la probeta AISI 1045 cara pulida ($R_a = 0.2 - 0.4 \mu\text{m}$) muestran un error de -0.72 HB y -0.76 HB respectivamente los resultados de cada prueba están dispersos alrededor del valor de referencia. Mientras que el error obtenido sobre la misma probeta en la cara sin pulir ($R_a = 1.6 - 3.2 \mu\text{m}$) es de -6.52 HB y -8.00 HB , el cual ha aumentado considerablemente y los resultados de ambas pruebas de dureza se encuentran claramente por debajo del valor de referencia. El mismo efecto se puede observar sobre la repetibilidad máxima, aumenta cuando se mide la dureza en la cara sin pulir variando desde 3.40 HB y 3.80 HB hasta 6.00 HB y 5.60 HB para las pruebas de dureza Leeb y UCI respectivamente.

El acabado del material representa un error sistemático que ocasiona resultados por debajo del valor de referencia, para corregir este error debe de agregarse el error absoluto a cada prueba de dureza como se observa en la Figura 5.3.

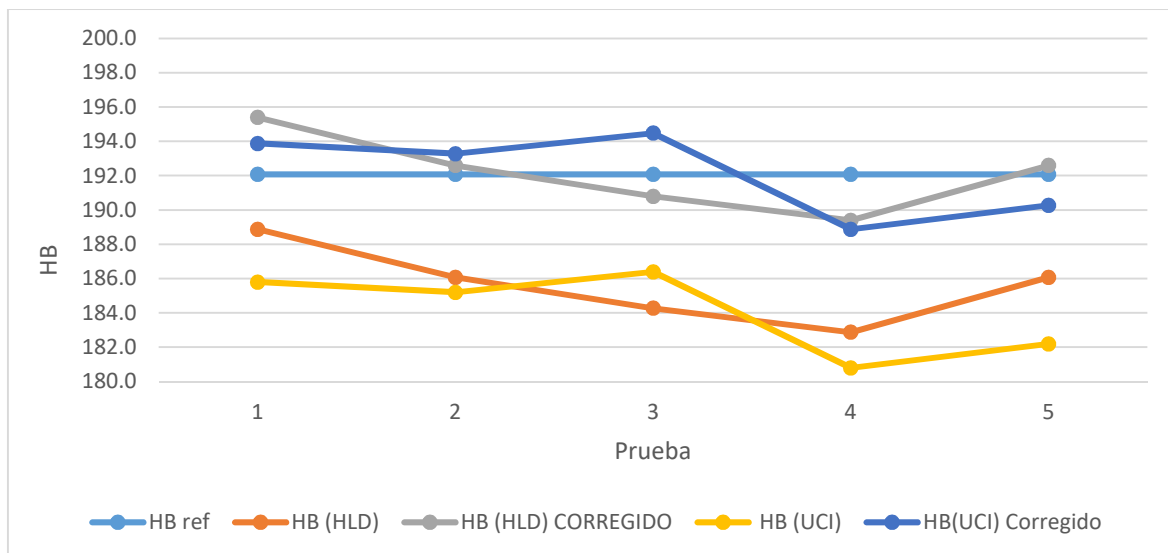


Figura 5.3 Corrección de los valores promedios de la probeta AISI 1045 sin pulir
Fuente: **Elaboración propia**

5.3 Análisis de resultados obtenidos en la escala de dureza Vickers

En la Tabla 5-5 se muestran los resultados de la prueba de dureza Vickers utilizando el durómetro analógico HBRRVU-187.5 y los resultados obtenidos en la escala Vickers de las pruebas de dureza Leeb y UCI mostradas en la Tabla 4-13 y Tabla 4-17 sobre la probeta de acero AISI 4140, el promedio de los resultados obtenidos por la prueba de dureza Vickers se considera el valor de referencia para realizar las comparaciones.

Tabla 5-5
Comparación de resultados obtenidos sobre la probeta AISI 4140

Prueba	Vickers	Leeb	Leeb	UCI	UCI
Probeta	Pulida	Pulida	Sin pulir	Pulida	Sin pulir
Escala	HV	HV(HLD)	HV(HLD)	HV(UCI) 5	HV(UCI) 5
Prueba 1	288.12	290.00	282.20	288.60	284.80
Prueba 2	287.40	287.00	280.00	286.20	278.60
Prueba 3	285.97	288.60	279.20	284.00	282.80
Prueba 4	286.69	284.40	286.40	286.00	282.80
Prueba 5	286.69	286.20	282.00	288.00	282.80
\bar{X}	286.97	287.24	281.96	286.56	282.36
Repetibilidad max.	2.14	5.60	7.20	4.60	6.20
Error	-	0.27	-5.01	-0.41	-4.61
Error relativo	-	0.09	-1.75	-0.14	-1.61

Fuente: **Elaboración propia**

Los resultados obtenidos por pruebas de dureza Leeb y UCI sobre la probeta AISI 4140 en la cara pulida ($R_a = 0.2-0.4 \mu\text{m}$) muestran un error de 0.27 HV y -0.41 HV respectivamente, los resultados de cada prueba están dispersos alrededor del valor de referencia. Mientras que el error obtenido sobre la misma probeta en la cara sin pulir ($R_a = 1.6-3.2 \mu\text{m}$) es de -5.01 HV y -4.60 HV, el cual ha aumentado considerablemente y los resultados por ambas pruebas de dureza se encuentran por debajo del valor de referencia. El mismo efecto se puede observar sobre la repetibilidad máxima, aumenta cuando se trata de superficies sin buen acabado superficial variando desde 5.60 HB y 4.60 HB hasta 7.20 HV y 6.20 HV para las pruebas de dureza Leeb y UCI respectivamente.

El acabado del material representa un error sistemático que ocasiona resultados por debajo del valor de referencia, para corregir este error debe de agregarse el error absoluto a cada prueba de dureza como se observa en la Figura 5.4.

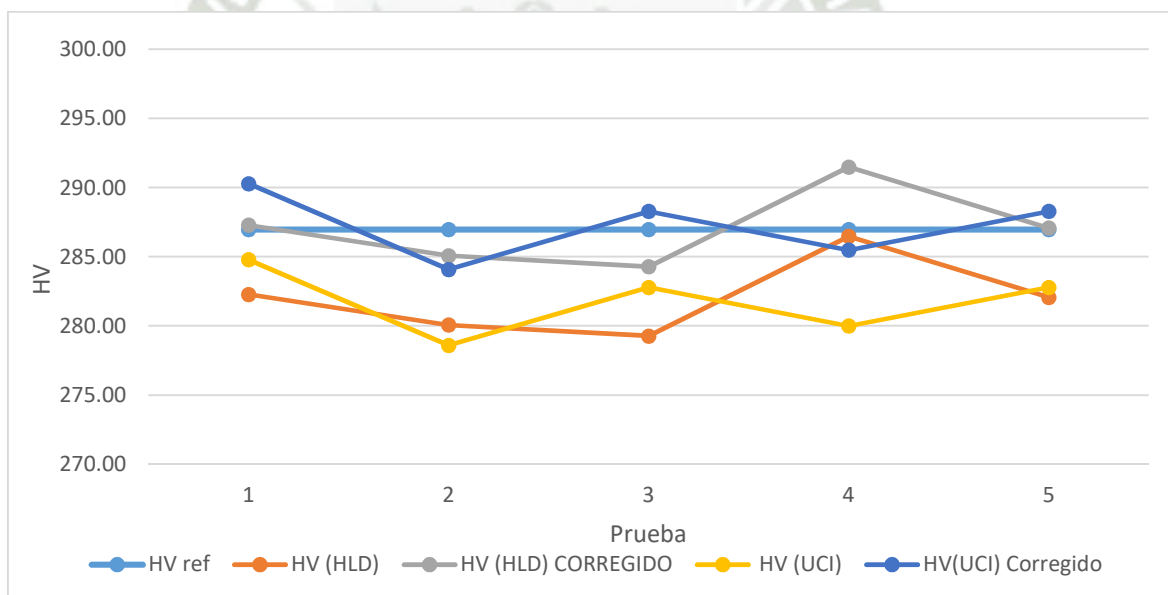


Figura 5.4 Corrección de los valores promedio de la probeta AISI 4140 sin pulir
Fuente: **Elaboración propia**

CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados obtenidos en la presente tesis, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se logró la implementación y estimación de la incertidumbre de un módulo de durómetros portátiles para evaluar la dureza superficial de componentes mecánicos según las normas ASTM A-956 y ASTM A-1038 para el laboratorio de materiales de la EPIMMEM de la UCSM.
- Se determinó la exactitud de las pruebas de dureza Leeb y UCI utilizando el durómetro portátil NOVOTEST T-UD2 en las escalas de dureza Rockwell, Brinell y Vickers. En la escala de dureza Rockwell se obtuvieron resultados más exactos y menos precisos que los resultados obtenidos por el durómetro digital estático de Rockwell HRS-150, en los 3 métodos el error es menor a 1 HRC. En relación a las escalas de dureza Brinell y Vickers, las comparaciones se realizaron respecto a los resultados obtenidos por durómetro analógico universal HBRVU-187.5 sobre las probetas de acero AISI 1045 y AISI 4140, teniendo errores relativos menores al -1 % sobre las caras pulidas en ambas escalas y al tratarse de las caras sin pulir este error relativo aumenta hasta -4.18 %.
- Se estimó la incertidumbre de medida de las pruebas de dureza Leeb y UCI utilizando el durómetro portátil NOVOTEST T-UD2 en las escalas de dureza Rockwell, Brinell y Vickers; el cual estuvo dentro de los límites superiores e inferiores del error permitido por las normas ASTM A956 y ASTM A-1038.
- A partir de la información obtenida y del análisis realizado en la investigación se elaboró un procedimiento para determinar la dureza superficial de componentes mecánicos y una guía para el laboratorio de materiales, los cuales están ubicados en el Anexo A y Anexo B respectivamente.

RECOMENDACIONES

- La probeta de prueba y los componentes mecánicos pueden sufrir un endurecimiento superficial durante el maquinado y generar medidas erróneas, por lo que se recomienda seguir los parámetros de maquinado proporcionados por el fabricante.
- La prueba de dureza UCI tiene una dependencia de la habilidad del operador por lo que se recomienda que el operador del equipo posea experiencia previa respecto al proceso de medición.
- Se recomienda registrar las futuras calibraciones del equipo y así poder estimar de manera correcta la incertidumbre debido a la deriva.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aoyama, H., Kanamari, Ch., Ming, A. & Koike, T. (2013). *Development of microindentation robot for hardness and stiffness measurement with vision based navigation system* [Tesis de doctoral]. University of Electro-Communications.
- ASTM A956. (2017). *Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products*.
https://www.astm.org/a0956_a0956m-17a.html
- ASTM E10. (2015). *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*.
<https://www.astm.org/e0010-14.html>
- ASTM E-18. (2019). *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*.
ASTM INTERNATIONAL. <https://www.astm.org/e0018-19.html>
- ASTM E92. (2017). *Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*. <https://www.astm.org/e0092-17.html>
- Bhargava, A. K. & Sharma, C. P. (2011). *Mechanical Behaviour and Testing of Materials* (1.a ed.). PHI Learning.
- Buehler. (2018). *A Guide to Materials Preparation and Analysis* (4.a ed.).
- Callister, W. & Rethwisch, D. (2010). *Materials Science and Engineering* (8.a ed.). Wiley.
- Escamilla, A. (2015). *Metrología y sus aplicaciones* (1.a ed.). Grupo Editorial Patria.
- EURAME g-16. (2011). *Guidelines on the Estimation of Uncertainty in Hardness Measurements*.
- EUROLAB, L. (2017). *LABORATORIO DE PRUEBAS DE MEDIDA DE DUREZA*.
EUROLAB Laboratory Services. <https://www.eurolab.com.tr/es/sektorel-test-ve-analizler/uygunluk-testleri/sertlik-olcumu-test-laboratuvari>
- Falk, D., Gockel, H. K., Lernet, F. & Schlossorsch. (1986). *Metalotecnia fundamental*.
Reverte.

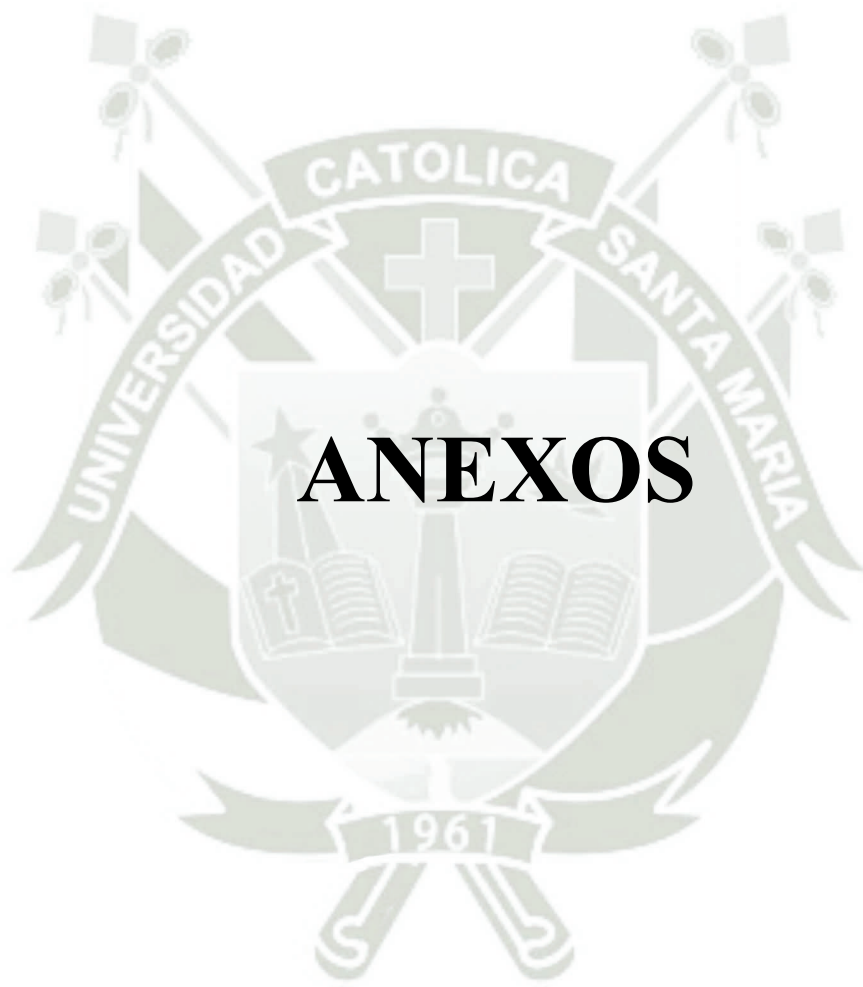
- Frank's, S., Frehner, C. & Akhlaghi, A. (2019). *Portable Hardness Testing Leeb, Portable Rockwell and UCI*.
- Frehner, C., Mennicke, R., Gattiker, F. & Chai, D. (2017). Advancements of ultrasonic contact impedance (UCI) hardness testing based on continuous load monitoring during the indentation process, and practical benefits. *e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT)*,
https://www.ndt.net/events/APCNDT2017/app/content/Paper/272_Frehner.pdf.
- Gogolinskii, K. V., Syasko, V. A., Umanskii, A. S., Nikazov, A. A. & Bobkova, T. I. (2019). Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects. *Journal of Physics: Conference Series*, 1384(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1384/1/012012>
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. McGraw-Hill Education.
- Gutierrez, C. (2006). *Introduccion a La Metodologia Experimental*. Limusa.
- Herrmann, K. (2007). *New developments and applications in hardness metrology*.
- Herrmann, K. (2011). *Hardness Testing: Principles and Applications* (First). ASM International.
- Kalpakjian, S. & Schmid, S. R. (2020). *Manufacturing, Engineering and Technology* (8.a ed.). Prentice Hall College Div.
- Kompatscher, M. (2004). *Equotip-Rebound hardness testing after D. Leeb*.
- Kumar, A. (2021). *Rockwell Hardness Scale for Hardness Test*.
<https://whatispiping.com/rockwell-hardness-scale/>
- Lacey, J. A., Aston, J. E. & Thompson, V. S. (2018). Wear Properties of Ash Minerals in Biomass. *Frontiers in Energy Research*, 6.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00119>
- Mott, R. L. & Untener, J. A. (2018). *Applied Strength of Materials* (6.a ed.). CRC press.

- Pakraatoke, M. (2013). *Development of microindentation robot for hardness and stiffness measurement with vision based navigation system*. The University of Electro-Communications.
- Pallás, R. (2006). *Instrumentos electrónicos básicos* (1.a ed.). Marcombo.
- Rajput, R. K. (2011). *A Textbook of Applied Mechanics* (3.a ed.). LAXMI Publications.
- SAE J864. (1993). *Surface Hardness Testing with Files*.
<https://webstore.ansi.org/standards/sae/sae8641993j864>
- Sang, R. T. & Litvinyuk, I. V. (2014). Benchmarking strong-field ionization with atomic hydrogen. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 47(20), 204003. <https://doi.org/10.1088/0953-4075/47/20/204003>
- Silva, J. (2012). *Metrologia e Controle Dimensional* (2a). Elsevier.
- Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method*. (2017). ASTM A1038. <https://www.astm.org/a1038-17.html>
- Syasko, V. & Nikazov, A. (2021). Research and Development of Metrological Assurance Elements for Leeb Hardness Measurements. *Inventions*, 6(4), 86.
<https://doi.org/10.3390/inventions6040086>
- Tietze, M. (2021, 7 julio). *Mobile Vickers hardness testing with UCI to reduce the workload of test personnel*. Recuperado 24 de agosto de 2022, de <https://blog.foerstergroup.com/en/component-testing/mobile-vickers-hardness-measurement-with-uci>
- TRAVERS. (2021). *How To Use Hardness Tester Files*.
<https://solutions.travers.com/metalworking-machining/measuring-inspection/how-to-use-hardness-tester-files>
- VIM. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales y términos asociados* (3.a ed.).

Zipaquirá, A. & Porras, G. (s. f.). *Expresión de incertidumbre en la calibración de equipos de medición de energía eléctrica.*

https://www.sic.gov.co/recursos_user/documentos/articulos/Expresion.pdf





Anexo A: PROCEDIMIENTO PARA MEDIR LA DUREZA SUPERFICIAL DE
COMPONENTES MECÁNICOS.

PROCEDIMIENTO PARA MEDIR LA
DUREZA SUPERFICIAL DE
COMPONENTES MECÁNICOS CON
EL DURÓMETRO PORTÁTIL
COMBINADO NOVOTEST TU-D2
UTILIZANDO LAS NORMAS ASTM
A-956 Y ASTM A-1038



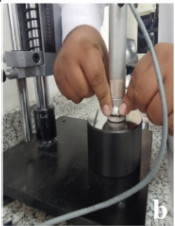
1.1. Procedimiento previo a la prueba de dureza

DESCRIPCION	Cumple		
	SI	NO	N. A.
Pregunte el material del componente mecánico para configurar el tipo de material en la interfaz del equipo. Materiales que se pueden analizar: Acero al carbono, acero inoxidable, aluminio y hierro fundido gris. Sonda UCI solo acero al carbono.			
Revise si hay presencia de óxidos en el componente.			
Revise el acabado superficial del componente mecánico, si este es superior a 2 μm informe al cliente que será necesario mejorar el acabado superficial.			
Informe al cliente que se realizaran 5 mediciones como mínimo para determinar la dureza de un punto específico.			
Asegúrese que el indentador pueda acceder al punto de medición.			
Estime el peso del componente mecánico. Para Sonda Leeb peso mínimo 2 kg y sonda UCI 300 gr.			
Si la zona de interés posee un espesor delgado asegúrese de que sea superior a 10 mm para la sonda Leeb y 3 mm para la Sonda UCI.			
Para analizar superficies curvas cóncavas o convexas asegúrese que el radio de curvatura sea mayor a 30 mm en caso de la Sonda Leeb, para la sonda UCI asegúrese que se puede garantizar el posicionamiento perpendicular.			

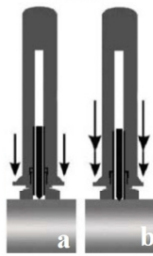
OBSERVACIONES:	FOTO REFERENCIAL:
----------------	-------------------

Operador

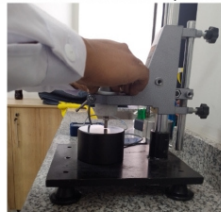
1.2 Procedimiento durante la prueba de dureza

DESCRIPCION	Cumple		
	SI	NO	N. A.
La sonda Leeb o UCI debe de conectarse al equipo cuando este se encuentre apagado, una vez conectada la sonda recién se procede a prender el equipo. Mediante bluetooth se procede a conectar al celular para operar remotamente. Una vez ubicado en la interfaz de la aplicación se procede a seleccionar el tipo de material y la escala de dureza.			
La sonda Leeb está calibrado para la dirección de impacto vertical hacia abajo. Para otras direcciones será necesario indicar la posición desde la interfaz de la aplicación. En caso de la sonda UCI es automático.			
Cargue el dispositivo de impacto tirando del cuerpo de impacto. 			
Luego de cargar el dispositivo de impacto este se pone en contacto con la pieza de prueba, se sujeta firmemente con una mano mientras que la otra mano se ubica en la parte superior para activar el dispositivo de carga. 			
Sujete firmemente sobre la boquilla deslizante utilizando las 2 manos, la posición de la sonda debe de ser perpendicular con respecto a la superficie y la desviación angular máxima de la posición perpendicular debe ser inferior a 5 grados. 			
Empuje la boquilla deslizante hasta que la punta del indentador entre en contacto con la superficie de la probeta y			

seguidamente ejerza con cuidado una carga constante de 5 kgf sobre la probeta de prueba, el descenso de la sonda debe realizarse con una velocidad lenta y constante en un tiempo aproximado de 0.5 segundos. El durómetro mediante un sonido indicara que la medición ha finalizado y se retira la sonda.



Si el componente lo permite utilice el banco de medición para ubicar perpendicularmente hacia la superficie del componente.



La distancia entre dos puntos de indentación no debe ser inferior a dos diámetros de borde a borde. La distancia entre el punto de indentación y el borde de la muestra no debe ser menor de tres diámetros de borde a borde.

Operador _____

1.3 Reporte generado por el equipo NOVOTEST (control interno)



Measurement protocol

2022.12.12 19-21-10

Operator: Jordi Escalante

Company: UCSM

Device: Hardness Tester T-UD2 006.036.0122 / 1258684814

Ultrasonic probe 1049631221

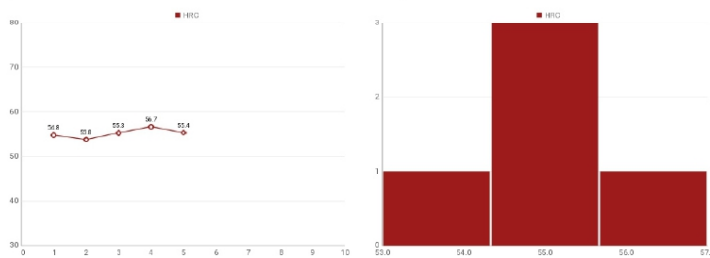
p. m.

12/12/2022 7:30

Measurement series #1



Parameter	Value
Current value	55.4
Max	56.7
Min	53.8
Average	55.2
Number of measurements	5



12/12/2022 7:30 p. m.

Page 2 of 5



Measurement protocol

2022.12.12 19-21-10

Operator: Jordi Escalante

Company: UCSM

Device: Hardness Tester T-UD2 006.036.0122 / 1258684814

Ultrasonic probe 1049631221

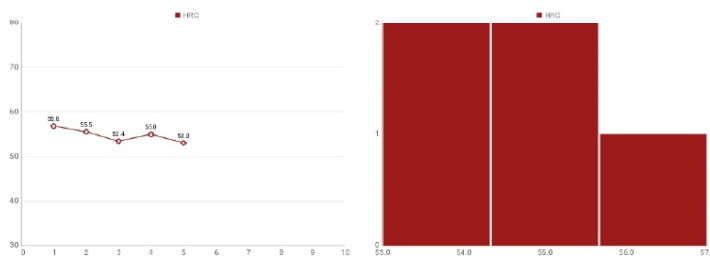
p. m.

12/12/2022 7:30

Measurement series #2



Parameter	Value
Current value	53.0
Max	56.8
Min	53.0
Average	54.8
Number of measurements	5



12/12/2022 7:30 p. m.

Page 3 of 5



Measurement protocol

2022.12.12 18-55-11

Operator: Jordi Escalante

Company: UCSM

Device: Hardness Tester T-UD2 006.036.0122 / 1258684814

Dynamic probe Leeb

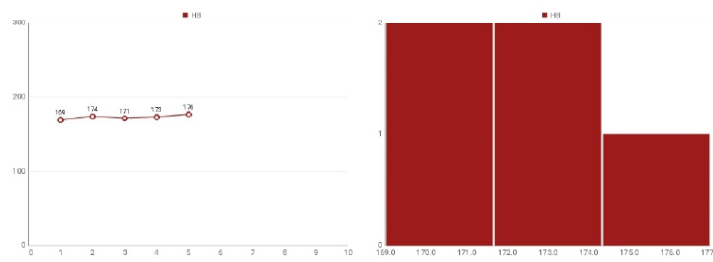
p. m.

12/12/2022 7:01

Measurement series #1



Parameter	Value
Current value	175
Max	176
Min	169
Average	173
Number of measurements	5



12/12/2022 7:01 p. m.

Page 2 of 5



Measurement protocol

2022.12.12 18-55-11

Operator: Jordi Escalante

Company: UCSM

Device: Hardness Tester T-UD2 006.036.0122 / 1258684814

Dynamic probe Leeb

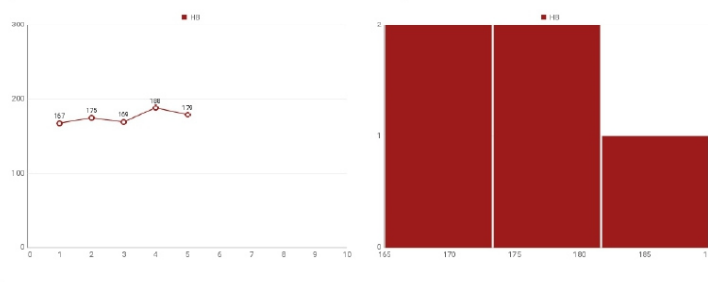
p. m.

12/12/2022 7:01

Measurement series #2



Parameter	Value
Current value	179
Max	188
Min	167
Average	176
Number of measurements	5



12/12/2022 7:01 p. m.

Page 3 of 5

1.4 Reporte de resultados

INFORME DE PRUEBA DE DUREZA

Nº orden de trabajo:	Fecha orden de trabajo:
Nº orden de dureza:	Fecha del informe de dureza:
Nombre del Cliente y dirección:	Nº de muestras:
	Fecha de recepción:
	Fecha de prueba:
Detalles de la maquina	Detalles de prueba
Modelo:	Procedimiento:
Serie:	Tipo de dureza:
Fecha de calibración:	Identador:
Descripción del componente:	Carga aplicada:
	Especificación del material:

Nº	Ubicación	Escala de dureza ()		
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3


Resultados:

Observaciones:

Operador: _____

Aprobado por: _____

Anexo B: GUÍA DE LABORATORIO

	UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA-ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA	Página: 1 de 18	
		Docente:	
		Fecha:	
		Código:	
		Apellidos y Nombres:	Grupo:
LABORATORIO DE MATERIALES		Código:	
PRUEBA DE DUREZA EN MATERIALES METALICOS		Semestre:	

PRACTICA N° 1: PRUEBA DE DUREZA PORTÁTIL

1.1 OBJETIVOS

- Conocer e identificar las pruebas de dureza portátiles utilizados actualmente para determinar la dureza de los materiales metálicos.
- Identificar las ventajas y desventajas de los durómetros portátiles.
- Realizar mediciones adecuadamente sobre las probetas metálicas.

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 Dureza

La dureza se define como la capacidad de un material para resistir una deformación plástica, generalmente causada por indentación o rayado. A diferencia de las deformaciones elásticas, las deformaciones plásticas son permanentes. Esto significa que el material no volverá a su forma original después de que ya no se aplique ninguna carga.

Las tres formas de medirla dureza de dureza son la dureza al rayado, al rebote y a la indentación. Medir cada tipo de dureza requiere un conjunto diferente de herramientas y escalas, sin embargo, existen tablas de conversión para establecer la comparabilidad.

- Dureza al rayado, que describe la deformación plástica o fractura debido a la fricción.
- Dureza de indentación, describe la resistencia a la deformación plástica localizada debido a una carga de compresión constante.

- Dureza de rebote, está relacionada con la elasticidad del material y describe la altura del rebote de un martillo con punta de diamante que se deja caer sobre el material desde una altura específica.

1.2.2 Correlación con el esfuerzo ultimo

Se ha establecido una relación entre el esfuerzo ultimo a la tracción (S_{ult}) y el número de dureza Brinell. (Kalpakjian & Schmid, 2020).

Para aceros la relación está dada por:

$$S_{ult} = 3.5 \cdot HB \quad (1.1)$$

Dónde:

S_{ult} : Esfuerzo ultimo a la tracción [MPa]

HB : Numero de dureza en la escala Brinell [HB]

1.2.3 Sistemas de dureza

Las pruebas de dureza se dividen en 2 rangos:

Macroidentación: también conocido como macrodureza, se caracteriza por el hecho de que el indentador penetra una profundidad apreciable en el material bajo prueba, la indentación abarca todas las fases del material y la dureza medida representa la mayor parte del material. Las pruebas de dureza que generan macroidentaciones son Rockwell, Brinell y Vickers. (Bhargava & Sharma, 2011)

Microidentación: también llamado microdureza, estas pruebas se realizan para determinar la dureza de los granos individuales, fase de los componentes estructurales de las aleaciones, componentes delgados y dureza de los recubrimientos, pero no determinan la dureza representativa del material. La carga aplicada varía en un rango de 5 gmf hasta 1000gmf. Los indentadores Knoop y Vickers son los que se utilizan dos tipos de indentadores para realizar la prueba de microdureza. (Bhargava & Sharma, 2011)

1.2.4 Prueba de dureza Brinell

La prueba de dureza Brinell fue propuesto por el ingeniero sueco Johan August Brinell en 1900, la prueba es conocida como prueba de dureza Brinell y está definida en ASTM E10.

En la prueba de dureza Brinell, la dureza de un metal se determina midiendo el diámetro superficial de la muesca producida por un indentador sobre la superficie del material. Los materiales que poseen mayor dureza producirán muescas poco profundas mientras que los materiales más blandos producirán muescas más profundas. (Groover, 2007)

1.2.5 Prueba de dureza Vickers

La prueba de dureza Vickers se desarrolló en 1924 por Robert L. Smith y George E. Sandland para reemplazar a la prueba de dureza Brinell que posee limitaciones respecto al espesor del material. La prueba de prueba de dureza Vickers también se puede usar como un método de prueba de microdureza, que se usa principalmente para piezas pequeñas, secciones delgadas. (Buehler, 2018)

1.2.6 Prueba de dureza Rockwell

La prueba de dureza Rockwell es uno de los métodos de prueba de dureza más utilizados y precisos que prevalecen en las industrias. Esta prueba es más fácil de realizar en comparación con la prueba de dureza Brinell o Vickers. Según el nombre de los inventores, Sr. Hugh M. Rockwell y Sr. Stanley P. Rockwell, esta prueba de dureza se conoce como prueba de dureza Rockwell. (Kumar, 2021)

La prueba de dureza Rockwell se utiliza ampliamente para aceros al carbono, plomo, latón, zinc, aluminio, carburos cementados, hierro, titanio, aleaciones de cobre y ciertos plásticos. Esta prueba se considera uno de los métodos de prueba de dureza simples y rápidos.

1.2.7 Prueba de dureza Leeb

La prueba de dureza de Leeb o la prueba de dureza de rebote de Leeb es una prueba de dureza dinámica, creada a mediados de la década de 1970 por Leeb y Brandestini en Proceq SA para proporcionar una prueba de dureza portátil para metales. (Frank's et al., 2019)

Los dispositivos Leeb son los dispositivos portátiles de medición de dureza más utilizados. Es utilizado por su flexibilidad, sencillez de uso, rapidez y la repetibilidad de los resultados durante un largo periodo de tiempo. Debido a la alta facilidad de uso y los resultados de consistentes, los dispositivos actualmente se utilizan para supervisar series de producción completas. (Herrmann, 2011)



Figura 1.1 Prueba de dureza Leeb

Fuente: (NOVOTEST, 2017)

1.2.7.1 Especificación del número de dureza Leeb

El número de dureza Leeb se especifica de la siguiente manera:

$$xxxHL(N)$$

Donde:

xxx: Valor de la prueba de dureza Leeb.

HL: identificador del ensayo de dureza Rockwell.

(N): Dispositivo de impacto.

Hay varias escalas Leeb, cada escala posee una aplicación diferente. En la Tabla 1 se indica las diferentes escalas utilizadas en la prueba de dureza Leeb.

Tabla 1
Dispositivos de impacto y aplicaciones del método Leeb

Símbolo de escala	Aplicaciones
D	Dispositivo universal, adecuado para la mayoría de las tareas de prueba, el material del indentador es de carburo de tungsteno.
DC	Similar al tipo D con la diferencia de que tiene una longitud más corta que le permite realizar la prueba de dureza dentro del componente.
S	Utilizado en áreas de producción, donde se realizan pruebas continuas, el indentador dura 10 veces más que el tipo D.
E	Aplicación en metales muy duros hasta 72 HRC, el material del indentador es de diamante sintético.
D+15	Mismas aplicaciones que el tipo D posee el cuerpo de impacto más prologando que le permite realizar las pruebas de dureza en orificios o cavidades.
DL	El extremo de impacto del dispositivo DL es angosto y alargado lo cual le permite acceder a lugares estrechos.
C	Piezas de paredes delgadas o sensibles a las muesca, piezas templadas superficialmente (cementadas) y capas con un espesor máximo de 0,3 mm.
G	Aplicado en piezas fundidas y forjadas de grano muy grueso o heterogéneas, acero y fundición de acero, hierro fundido.

Fuente: (Herrmann, 2011)

1.2.8 Prueba de dureza de impedancia de contacto ultrasonico (UCI)

La prueba de dureza de impedancia de contacto ultrasónico (UCI) es uno de los métodos de prueba de dureza portátiles más utilizados. Fue inventado por Claus Kleesattel en 1968 y está ampliamente establecido en la actualidad. Es popular debido a su alta portabilidad y las mediciones rápidas, simples y confiables. Además, la sonda se puede colocar fácilmente en superficies irregulares, como en cordones de soldadura, lo que brinda una accesibilidad sin igual a superficies donde son difíciles de realizar las pruebas de dureza. (Frehner et al., 2017)

La prueba de dureza UCI es similar a la prueba de Vickers, con la diferencia que no necesita del análisis óptico por microscopio, ya que el valor de la dureza se determina directamente en el momento de la penetración del indentador (Figura 2.9). Este hecho demuestra ser

ventajoso para las pruebas automatizadas, mejorando así la flexibilidad en la práctica y soportando también ciclos de producción extremadamente rápidos. (Tietze, 2021)



Figura 1.2 Prueba de dureza de impedancia de contacto ultrasonico
Fuente: (NOVOTEST, 2017)

1.2.8.1 Especificación del número de dureza UCI

El valor de la dureza UCI se especifica en la escala Vickers:

$$xxxHVyy \text{ (UCI)}$$

Donde:

xxx: Numero de dureza en la escala Vickers.

HV: Símbolo de la prueba de dureza Vickers.

yy: Carga de prueba.

UCI: El número de dureza ha sido determinado por la prueba de dureza UCI.

Las diferentes aplicaciones de la prueba de dureza UCI (Tabla 2) están en función a la carga de prueba.

Tabla 2
Aplicaciones típicas del procedimiento de impedancia de contacto ultrasónico (UCI)
en función de la carga de prueba

Fuerza de Prueba	Aplicaciones
98 N	Pequeñas piezas forjadas, uniones soldadas, zona afectada térmicamente.
50 N	Piezas de máquinas de inducción o piezas de máquinas cementadas, como árboles de levas, turbinas, uniones soldadas, zona afectada térmicamente.
10 N	Utilizada donde se requiere una huella pequeña, para medir la dureza de las capas endurecidas superficiales.

Fuente: (NOVOTEST, 2017)

1.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1.3.1 Materiales y equipos

En la Figura 1.3 se muestran los equipos y materiales utilizados.

- Durómetro portátil NOVOTEST T-UD2.
- Dispositivo de impacto tipo D.
- Sonda de ultrasonido de 50 N.
- Rugotest.
- Indicador de campo magnético residual.
- Bloque patrón de dureza de 57 HRC.
- 2 Probeta de ensayo AISI 1045.
- Probeta de ensayo AISI 4140.
- Probeta de ensayo AISI 1018 laminado en caliente.
- Soporte rígido.

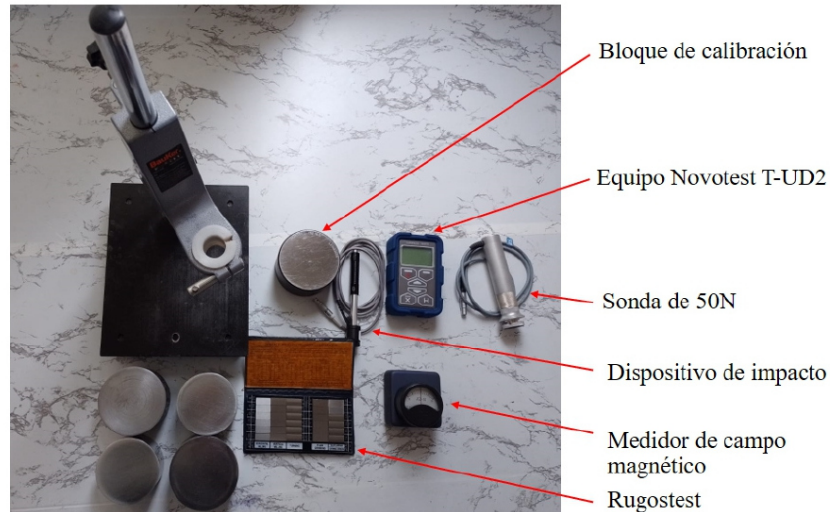


Figura 1.3 Equipos y materiales
Fuente: **Elaboración propia**

1.3.2 Prueba de dureza Leeb

1.3.2.1 Preparación de la probeta de prueba

Las probetas deben prepararse y cumplir las condiciones que pide la norma ASTM-A956 para realizar la prueba de dureza Leeb:

- Durante la preparación de la superficie debe evitarse la alteración de la dureza superficial debido al calentamiento causado por el esmerilado, maquinado, pulido y corte.
- Comprobar que la rugosidad superficial de la probeta sea menor a $2 \mu\text{m}$ utilizando un comparador de rugosidad superficial o un rugosímetro.
- Medir que el campo magnético residual de la probeta y comprobar que sea menor a 4G.
- Verificar que la probeta posea un peso mayor a 5 kg y en caso de utilizar una superficie rígida verificar que el peso debe ser mayor a 2 kg.
- Verificar que la temperatura de la probeta este entre 4 y 38°C .



Figura 1.4 Probetas preparadas para la prueba de dureza Leeb
Fuente: **Elaboración propia**

1.3.2.2 Procedimiento de prueba de dureza Leeb

Para realizar la prueba de dureza Leeb debe de seguirse el siguiente procedimiento:

- El dispositivo de impacto debe de conectarse al equipo cuando este se encuentre apagado, una vez conectado el dispositivo de impacto recién se procede a prender el equipo (Figura 1.5a).
- Una vez prendido el equipo mediante bluetooth se procede a conectar al celular para operar remotamente (Figura 1.5b).



Figura 1.5 Conexión y operación remota del equipo NOVOTEST T-UD2
Fuente: **Elaboración propia**

- Una vez ubicado en la interfaz de la aplicación se procede a seleccionar el tipo de material (Figura 1.6a) y la escala de dureza (Figura 1.6b).

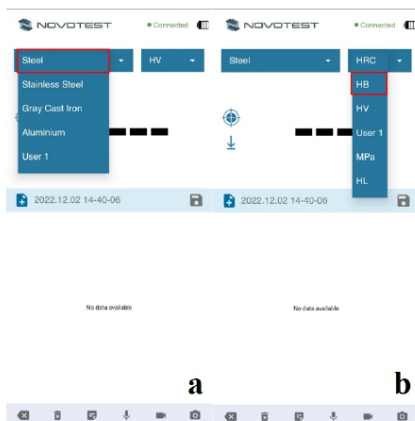


Figura 1.6 Selección del tipo de material (a) y selección de la escala de dureza (b).
Fuente: **Elaboración propia**

- Después de colocar la probeta debidamente preparada sobre el soporte rígido se procede a cargar el dispositivo de impacto (Figura 1.7) tirando del cuerpo de impacto contra un resorte que impulsa el cuerpo de impacto a la velocidad preestablecida.



Figura 1.7 Carga del dispositivo de impacto
Fuente: **Elaboración propia**

- Luego de cargar el dispositivo de impacto este se pone en contacto con la pieza de prueba, se sujeta firmemente con una mano (Figura 1.8a) mientras que la otra mano se ubica en la parte superior para activar el dispositivo de carga (Figura 1.8b).

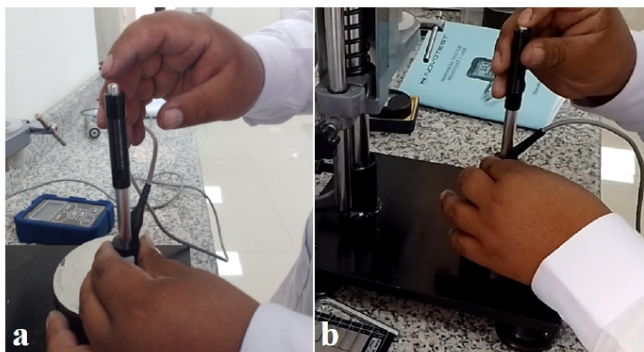


Figura 1.8 Medición de dureza superficial utilizando el dispositivo de impacto tipo D
Fuente: **Elaboración propia**

- Luego de presionar el pulsador y activar el mecanismo de liberación del cuerpo de impacto el valor de la dureza se muestra en la interfaz de la aplicación del durómetro portátil (Figura 1.9).

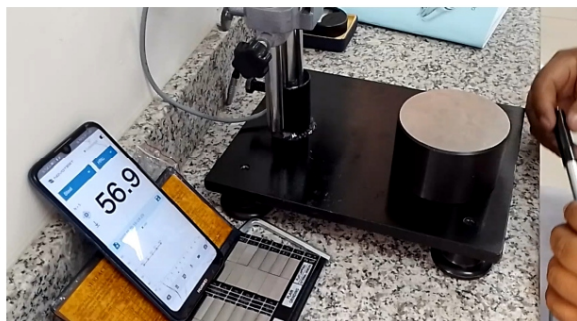


Figura 1.9 Resultado del proceso de medición en la interfaz de la aplicación.
Fuente: **Elaboración propia**

- Realizar los pasos anteriores para todas las probetas.

La primera medición se realiza sobre el patrón de dureza de 57.0 HRC (Figura 1.9), si el resultado de la prueba de dureza no tiene un error de 2 HRC esto significará que el durómetro aun dentro de los límites que exige la norma ASTM A-956.

Este procedimiento se realizará 5 veces en un área aproximada de 1 pulgada cuadrada para que se considera una prueba de dureza. La distancia entre los bordes de 2 puntos de impacto no debe ser inferior a dos veces el diámetro de la indentación y la distancia entre el borde del punto de impacto y el borde de la probeta no debe ser menor de tres veces el diámetro de la indentación.

Los valores medidos se registran en la tabla 3 y 4.

Tabla 3
Valores de dureza medidos con la prueba de dureza Leeb

Medida	AISI 1045 Prueba 1 HB(HLD)	AISI 1045 Prueba 2 HB(HLD)	AISI 4140 Prueba 1 HB(HLD)	AISI 4140 Prueba 2 HB(HLD)
1				
2				
3				
4				
5				
\bar{X}				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4
Valores de dureza medidos con la prueba de dureza Leeb

Medida	AISI 1045 Prueba 1 HB(HLD)	AISI 1045 Prueba 2 HB(HLD)	AISI 1018 Prueba 1 HB(HLD)	AISI 1018 Prueba 2 HB(HLD)
1				
2				
3				
4				
5				
\bar{X}				

Fuente: Elaboración propia

1.4 Procedimiento experimental de la prueba de dureza de impedancia de contacto ultrasónico (UCI)

1.4.1 Preparación de la probeta de prueba

Las probetas deben prepararse y cumplir las siguientes condiciones que pide la normas ASTM-A1038 para realizar la prueba de dureza UCI:

- Durante la preparación de la superficie debe evitarse la alteración de la dureza superficial debido al calentamiento causado por el esmerilado, maquinado, pulido y corte.
- Medir la rugosidad superficial y comprobar que la rugosidad superficial no exceda $2.5 \mu\text{m}$.
- Verificar que la probeta posea un peso mayor a 0.3 kgf y en caso de tener un peso menor a 0.3 kgf se requiere un acoplamiento a una superficie más pesada.
- Comprobar que el espesor sea mayor a 15 mm, si el espesor es menor se debe acoplar la probeta a una superficies gruesa y más pesada mediante alguna película de una pasta viscosa.



Figura 1.10 Probetas preparadas para la prueba de dureza UCI
Fuente: Elaboración propia

1.4.1.1 Procedimiento de la prueba de dureza UCI

Para realizar la prueba de dureza Leeb debe de seguirse el siguiente procedimiento:

- La sonda de 50 N debe de conectarse al equipo cuando este se encuentre apagado, una vez conectada la sonda recién se procede a prender el equipo (Figura 1.11).



Figura 1.11 Probetas preparadas para la prueba de dureza UCI
Fuente: **Elaboración propia**

- Una vez prendido el equipo mediante bluetooth se procede a conectar al celular para operar remotamente, luego en la interfaz de la aplicación se procede a seleccionar el tipo de material (Figura 1.12a) y la escala de dureza (Figura 1.12b).

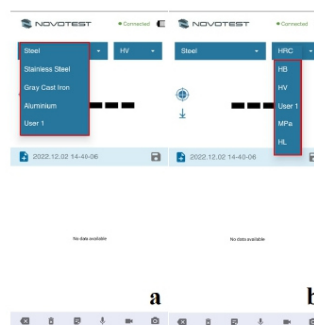


Figura 1.12 Probetas preparadas para la prueba de dureza UCI
Fuente: **Elaboración propia**

- Después de colocar la probeta debidamente preparada sobre el soporte rígido la sonda se sujeta firmemente sobre la boquilla deslizante (Figura 1.13b) utilizando las 2 manos, la posición de la sonda debe de ser perpendicular con respecto a la superficie

y la desviación angular máxima de la posición perpendicular debe ser inferior a 5 grados.

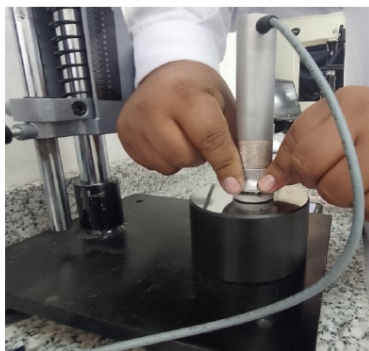


Figura 1.13 Conexión (a) y sujeción (b) de la sonda de 50 N
Fuente: *Elaboración propia*

- Luego se empuja la boquilla deslizante hasta que la punta del indentador entre en contacto con la superficie de la probeta (Figura 1.14a) y seguidamente ejerza con cuidado una carga constante de 5 kgf sobre la probeta de prueba (Figura 1.14a), el descenso de la sonda debe realizarse con una velocidad lenta y constante en un tiempo aproximado de 0.5 segundos. El durómetro mediante un sonido indicara que la medición ha finalizado y se retira la sonda.

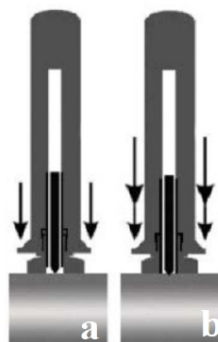


Figura 1.14 Procedimiento de medición prueba de dureza UCI
Fuente: *Elaboración propia*

- Otra forma de realizar la medición en la prueba de dureza UCI es utilizar un banco de medición conectado al soporte rígido que tiene como objetivo mantener la sonda perpendicular a la superficie de la probeta, además permite ubicar de manera más precisa el lugar donde se realizara la indentación (Figura 1.15).

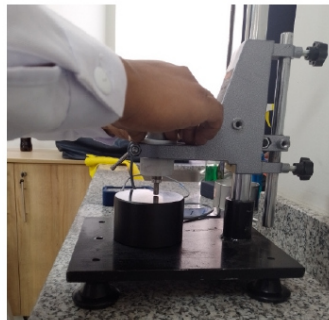


Figura 1.15 Medición de dureza superficial utilizando el dispositivo de impacto tipo D
Fuente: **Elaboración propia**

Este procedimiento se realizará 5 veces en un área aproximada de 1 pulgada cuadrada para que se considera una prueba de dureza. La distancia entre los bordes de 2 puntos de impacto no debe ser inferior a dos veces el diámetro de la indentación y la distancia entre el borde del punto de impacto y el borde de la probeta no debe ser menor de tres veces el diámetro de la indentación.

La primera medición se realiza sobre el patrón de dureza de 57.0 HRC, si el resultado de la prueba de dureza no tiene un error de 2 HRC esto significará que el durómetro aun dentro de los límites que exige la norma ASTM A-1038.

Los valores medidos se registran en la tabla 4 y 5.

Tabla 4
Valores de dureza medidos con la prueba de dureza Leeb

Medida	AISI 1045 Prueba 1 HB(UCI)	AISI 1045 Prueba 2 HB(UCI)	AISI 4140 Prueba 1 HB(UCI)	AISI 4140 Prueba 2 HB(UCI)
1				
2				
3				
4				
5				
\bar{X}				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5
Valores de dureza medidos con la prueba de dureza Leeb

Medida	AISI 1045 Prueba 1 HB(UCI)	AISI 1045 Prueba 2 HB(UCI)	AISI 1018 Prueba 1 HB(UCI)	AISI 1018 Prueba 2 HB(UCI)
1				
2				
3				
4				
5				
\bar{X}				

Fuente: Elaboración propia

1.5 CUESTIONARIO

1. ¿Cuáles con las ventajas y desventajas de la prueba de dureza Leeb?
2. ¿Cuáles con las ventajas y desventajas de la prueba de dureza UCI?
3. ¿Por qué los resultados las 2 probetas de acero AISI 1045 son diferentes?
4. ¿Cuál es la principal diferencia entre la prueba de dureza UCI y la prueba de dureza Vickers respecto a la medida de la diagonal de la huella de indentacion?
5. Cuál es el promedio de las diagonales generadas por la prueba de dureza UCI.
6. En qué casos no recomendaría utilizar la prueba de dureza UCI.
7. Porque la probeta AISI 1045 presentan mayor dureza que las probetas AISI 1018.
8. Si usted no dispone de una balanza ¿Cómo calcularía el peso de la probeta cilíndrica?

Anexo C: ASTM A956

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: A956/A956M – 17a

Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products¹

This standard is issued under the fixed designation A956/A956M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of the Leeb hardness of steel, cast steel, and cast iron (Part A), including the methods for the verification of Leeb hardness testing instruments (Part B), and the calibration of standardized test blocks (Part C).

NOTE 1—The original title of this standard was “Standard Test Method for Equotip Hardness Testing of Steel Products.”¹

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety, health, and environmental practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.4 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

E140 *Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness*

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee A01 on Steel, Stainless Steel and Related Alloys and is the direct responsibility of Subcommittee A01.06 on Steel Forgings and Billets.

Current edition approved Nov. 1, 2017. Published December 2017. Originally approved in 1996. Last previous edition approved in 2017 as A956/A956M – 17.

Leeb and Equotip are registered trademarks used with permission of Proceq SA. DOI: 10.1520/A0956_A0956M-17A.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard’s Document Summary page on the ASTM website.

E177 *Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods*

E691 *Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method*

3. Terminology

3.1 *Definitions:*

3.1.1 *calibration*—determination of the values of the significant operating parameters of the instrument by comparison with values indicated by a reference instrument or by a set of reference standards.

3.1.2 *Leeb hardness number*—a number equal to the ratio of the rebound velocity to the impact velocity of a 0.118 in. [3 mm] or 0.197 in. [5 mm] (based on the type of impact device) diameter spherically shaped tungsten carbide, silicon nitride, or diamond tipped impact body, multiplied by 1000.

$$L = \frac{\text{Rebound Velocity}}{\text{Impact Velocity}} \times 1000$$

The Leeb hardness number is followed by the symbol *HL* with one or more suffix characters representing the type of impact device.

3.1.3 *Leeb hardness test*—a dynamic hardness test method using a calibrated instrument that impacts a spherically shaped tungsten carbide, silicon nitride, or diamond tipped body with a fixed velocity (generated by a spring force) onto a surface of the material under test. The ratio of the rebound velocity to the impact velocity of the impact body is a measure of the hardness of the material under test.

3.1.4 *surface finish*—all references to surface finish in this test method are defined as surface roughness (that is, *Ra* = average roughness value, *AA* = arithmetic average).

3.1.5 *verification*—checking or testing the instrument to ensure conformance with this test method.

4. Summary of Test Method

4.1 During a hardness test, an impact body with a spherically shaped tungsten carbide, silicon nitride, or diamond tip impacts, after being propelled to the specified velocity, the test surface from which it rebounds. The impact and rebound velocities are measured when the impact body is approximately 0.039 in. [1 mm] from the test surface. This is accomplished by means of a permanent magnet mounted in the impact body

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States

A956/A956M – 17a

which, during the test, moves through a coil in the impact device and induces an electric voltage on both the impact and rebound movements. These induced voltages are proportional to the respective impact and rebound velocities. The quotient of these measured voltage values derived from the impact and rebound velocities, multiplied by the factor 1000 produces a number which constitutes the Leeb hardness value.

5. Significance and Use

5.1 Hardness of a material is a poorly defined term that may have many meanings depending on the type of test performed and the expectations of the person involved. The Leeb hardness test is of the dynamic or rebound type, which primarily depends both on the plastic and on the elastic properties of the material being tested. The results obtained are indicative of the strength and dependent on the heat treatment of the material tested.

5.2 The Leeb hardness test is a superficial determination only measuring the condition of the surface contacted. The results generated at that location do not represent the part at any other surface location and yield no information about the material at subsurface locations.

A. GENERAL DESCRIPTION OF INSTRUMENTS AND TEST PROCEDURE FOR LEEB HARDNESS TEST

6. Apparatus

6.1 The instrument used for Leeb hardness testing consists of (1) an impact device that is equipped with a spherically shaped tungsten carbide, silicon nitride, or synthetic diamond tipped impact body, an induction coil velocity measuring assembly, and a support ring, and (2) an electronic digital display hardness indicating device.

6.2 *Impact Devices*—There are eight types of impact devices used in Leeb hardness testing. These are the *D*, *DC*, *D+15*, *DL*, *G*, *C*, *S*, and the *E* impact units. Brief descriptions of the types of devices and their common applications are given in Appendix X1. Table 1 provides the specifications for the Leeb scales according to impact device type.

6.3 See 8.1.1 when using replacement machine components.

7. Test Piece

7.1 *Form*—The Leeb hardness test is acceptable for steel, cast steel, and cast iron with varying shapes and sizes.

7.2 *Thickness and Weight*—The thickness and weight of the test piece shall be considered when selecting the impact device to be employed. The following guidelines are offered as minimum weights and sizes of test pieces for selecting the proper test equipment. Test pieces of weights less than the minimum or pieces of any weight with sections less than the minimum thickness require rigid support and coupling to a thick, heavier non-yielding surface to resist the impact of the device. Failure to provide adequate support and coupling will produce test results lower than the true hardness value.

Impact Device	Minimum Mass without Rigid Support	Minimum Mass with Rigid Support	Minimum Thickness (Uncoupled)	Minimum Thickness (Coupled)
<i>D, DC, D+15, DL, S, E</i>	11.0 lb [5 kg]	4.4 lb [2 kg]	0.984 in. [25 mm]	0.118 in. [3 mm]
<i>G</i>	33.1 lb [15 kg]	11.0 lb [5 kg]	2.756 in. [70 mm]	0.394 in. [10 mm]
<i>C</i>	3.3 lb [1.5 kg]	0.3 lb [0.5 kg]	0.394 in. [10 mm]	0.039 in. [1 mm]

7.3 *Curvature*—Test pieces with curved surfaces may be tested on either the convex or concave surfaces providing that this radius of curvature of the specimens is matched to the size of the support ring and is not less than 1.969 in. [50 mm] for the *G* impact device or 1.181 in. [30 mm] for other impact devices.

7.4 *Surface Finish/Preparation*—The test surface shall be carefully prepared to avoid any alterations in hardness caused by heating during grinding or by work hardening during machining. Any paint, scale, pits, or other surface coatings shall be completely removed. The surfaces to be tested shall be smooth. Failure to provide adequate surface finish will produce questionable test results. Coarse finishes will tend to lower the measured value. It is recommended that the test surface be machined or ground and polished to the following finishes. (The grinding wheel grit size shown for each finish is offered for guidance in achieving the finish noted.)

TABLE 1 Specifications of Standard Leeb Hardness Testing Devices


Property	Symbol	Unit	<i>D/DC</i>	<i>S</i>	<i>E</i>	<i>D+15</i>	<i>DL</i>	<i>C</i>	<i>G</i>
Impact velocity ^A	V _A	ft/s [m/s]	6.73 [2.05] ± 5 %	6.73 [2.05] ± 5 %	6.73 [2.05] ± 5 %	5.58 [1.7] ± 5 %	5.97 [1.82] ± 5 %	4.56 [1.39] ± 5 %	9.78 [2.98] ± 5 %
Impact body, mass	M	oz [g]	0.192 ± 0.002 [5.45 ± 0.05]	0.190 ± 0.002 [5.40 ± 0.05]	0.192 ± 0.002 [5.45 ± 0.05]	0.273 ± 0.002 [7.75 ± 0.05]	0.256 ± 0.002 [7.25 ± 0.05]	0.109 ± 0.002 [3.1 ± 0.05]	0.705 ± 0.002 [20.00 ± 0.05]
Indenter, radius material hardness	R	in. [mm]	0.059 [1.5] TC ^B	0.059 [1.5] Si ₃ N ₄	0.059 [1.5] PCD ^C	0.059 [1.5] TC	0.055 [1.39] TC	0.059 [1.5] TC	0.098 [2.5] TC
Maximum distance of ball indenter from the test piece surface when measuring velocity	H	in. [mm]	0.079 [2.0]	0.079 [2.0]	0.079 [2.0]	0.079 [2.0]	0.079 [2.0]	0.079 [2.0]	0.118 [3.0]

^A Impact direction: vertical down, in the direction of gravity.

^B TC = tungsten carbide.

^C PCD = polycrystalline diamond.

^D The hardness of the impact body E indenter is informational, not required to be verified.

 **A956/A956M – 17a**

Impact Device	Surface Finish—Ra (max)	Grit Size (Approx.)
D, DC, D+15, DL, S, E	78.7 µin. [2 µm]	200
G	275.6 µin. [7 µm]	65
C	15.7 µin. [0.4 µm]	500

7.5 *Magnetic Fields*—Performance of the Leeb hardness test on parts with a residual magnetic field may affect the results. It is recommended that any residual magnetic field be less than 4 G.

7.6 *Vibration*—Vibration of the test specimen may affect the results of the Leeb hardness test. It is recommended that this test be performed with the test piece at rest.

7.7 *Temperature*—The temperature of the test piece may affect the results of the test. In addition, this effect may be different for different materials. Testing to this procedure shall be performed with the temperature of the test piece between 39 °F [4 °C] and 100 °F [38 °C]. At temperatures outside this range, the user shall develop a temperature correction for the specific material being tested.

8. Verification of Apparatus

8.1 *Verification Method*—Prior to each shift, work period, or use, and following a period of extended continuous use (1000 impacts), the instrument shall be verified as specified in Part B. Any instrument not meeting the requirements of Part B shall not be employed for the acceptance testing of product.

8.1.1 *Cautionary note*: When replacement parts are used in a Leeb hardness tester it is important that they be fully compatible with the original equipment, otherwise incorrect hardness readings may be obtained. Calibration using a single standard test block may indicate acceptable results, but additional calibration tests using blocks of differing hardness may yield unacceptable results. If replacement, non-original equipment parts are used, multiple block calibration verification is strongly advised. Specifically, one calibration block of a hardness equal to or lower than the minimum expected hardness of the material being tested, one calibration block of a hardness equal to or greater than the maximum expected hardness of the material being tested, and one calibration block near the middle of the range should be used.

9. Procedure

9.1 To perform a hardness test, the impact device is connected to the user interface device and powered on.

9.1.1 The impact device is readied for impact.

9.1.1.1 *Mechanically Charged Device*—Some impact devices are charged mechanically by pulling the impact body against a spring or other mechanism that propels the impact body at the prescribed velocity. The impact device, while not in contact with the test piece, is held firmly with one hand while the charging mechanism is activated with the other hand. Once the impact body is in the charged position the charging mechanism is allowed to slowly return to its resting position.

9.1.1.2 *Otherwise Charged Device*—Devices that are not charged mechanically may use gravity or other force application method to propel the impact body at the prescribed velocity. Charging of these devices should be conducted according to manufacturer’s instructions.

9.1.2 After placing the readied (loaded) impact device on the test surface, trigger the impact by actuating the release mechanism according to manufacturer’s instructions.

9.1.3 The Leeb hardness value is displayed or otherwise used by a user interface device after the impact.

NOTE 2—The user interface device may take the form of a computer or PLC that does not display the hardness value directly to the user. Such a user interface device may use the hardness value to operate an automatic sorting machine or simply log the value in a database.

9.2 *Alignment*—To prevent errors resulting from misalignment, the base support ring of the impact device shall be held snugly and perpendicular to the surface of the test piece.

9.3 *Impact Direction*—The impact device is calibrated for the down vertical impact direction (perpendicular to a horizontal surface). For other impact directions such as 45° from the horizontal plane or from underneath, the measured hardness values will require adjustment (see 10.2). Some newer models automatically compensate for test direction.

9.4 *Spacing Indentations*—The distance between any two impact points shall not be less than two diameters edge-to-edge. The distance between the impact point and a specimen edge shall not be less than three diameters edge-to-edge. No point shall be impacted more than once.

9.5 *Reading the Leeb Instrument*—Hardness values in Leeb units are read directly on the electronic display of the indicator device. The indicated value is automatically replaced with the next test impact result.

9.6 *Number of Impacts*—Five impacts in an area of approximately 1 in.² [645 mm²] shall constitute a test. If the material being tested is considered to be nonhomogeneous (for example, cast iron) ten impacts in an area shall be made to constitute a test.


10. Calculation of Hardness Result

10.1 The hardness test result shall be the arithmetic average of the five individual impact readings in the measuring area.





10.2 *Compensation for Test Direction*—When using a Leeb instrument without automatic compensation for test direction, the compensation value for direction of test impact is to be subtracted from the average value determined for the measuring area. This compensation value can be determined in accordance with Tables 2-9.

11. Conversion to Other Hardness Scales or Tensile Strength Values





11.1 There is no direct correlation between the Leeb hardness test principle and other hardness methods or a tensile strength test. All such conversions are, at best, approximations and therefore conversions should be avoided except for special cases where a reliable basis for the approximate conversion and the accuracy of the conversion has been obtained by comparison testing. No conversions shall be employed without specific agreement between the party specifying this test method and the party performing the hardness test.

 A956/A956M – 17a





**TABLE 2 Compensation Values for Other Impact Directions:
Device D**

L_D				
300	-6	-12	-20	-29
350	-6	-12	-19	-27
400	-5	-11	-18	-25
450	-5	-10	-17	-24
500	-5	-10	-16	-22
550	-4	-9	-15	-20
600	-4	-8	-14	-19
650	-4	-8	-13	-18
700	-3	-7	-12	-17
750	-3	-6	-11	-16
800	-3	-6	-10	-15
850	-2	-5	-9	-14
900				





**TABLE 4 Compensation Values for Other Impact Directions:
Device E**

L_E				
300	-5	-9	-18	-26
350	-4	-9	-17	-24
400	-4	-9	-16	-22
450	-4	-8	-15	-21
500	-4	-8	-14	-20
550	-4	-8	-13	-18
600	-3	-7	-12	-17
650	-3	-7	-12	-16
700	-3	-6	-11	-15
750	-3	-6	-10	-14
800	-3	-5	-9	-13
850	-2	-5	-8	-12
900				

**TABLE 3 Compensation Values for Other Impact Directions:
Device D + 15**

$L_D + 15$				
300	-7	-14	-26	-38
350	-7	-13	-25	-36
400	-6	-12	-23	-34
450	-6	-12	-22	-32
500	-6	-11	-21	-30
550	-6	-11	-20	-28
600	-5	-10	-19	-27
650	-5	-10	-18	-25
700	-5	-9	-17	-24
750	-4	-9	-16	-22
800	-4	-8	-15	-21
850	-4	-8	-14	-20
900				

**TABLE 5 Compensation Values for Other Impact Directions:
Device C**

L_C				
350			A	A
400	-7	-15		
450	-7	-14		
500	-7	-13		
550	-6	-13		
600	-6	-12		
650	-6	-11		
700	-5	-10		
750	-5	-10		
800	-4	-9		
850	-4	-8		
900	-4	-7		
950	-3	-6		

^A Not permitted.

12. Report

12.1 Report the following information:

12.1.1 The average Leeb hardness number for each test area with the impact device indicated (for example, xxx *HLD* or xxx *HLD*+15).

12.1.2 When hardness values converted from the Leeb number are reported, the instrument used shall be reported in parentheses, for example, *HB* (*HLG*).

13. Precision and Bias³

13.1 The precision of this test method is based on an interlaboratory study of E140, Standard Hardness Conversion

³ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:E28-1044. Contact ASTM Customer Service at service@astm.org.

A956/A956M – 17a

**TABLE 6 Compensation Values for Other Impact Directions:
Device G (Steel)**

L_G				
300	...	...	-12	-18
350	...	...	-11	-17
400	...	...	-11	-16
450	-2	-5	-10	-15
500	...	...	-9	-14
550	...	...	-9	-13
600	...	...	-8	-12
650	...	...	-8	-11
700	...	...	-7	-10
750	...	...	-7	-10

**TABLE 7 Compensation Values for Other Impact Directions:
Device G (Grey Cast Iron)**

L_G				
350	...	...	-11	-17
400	...	...	-11	-16
450	-2	-5	-10	-15
500	...	...	-9	-14
550	...	...	-9	-13
600	...	...	-9	-13

**TABLE 8 Compensation Values for Other Impact Directions:
Device DL**

L_{DL}				
550	-3	-6	-11	-16
600	-3	-5	-9	-14
650	-2	-5	-8	-13
700	-2	-4	-7	-11
750	-2	-3	-6	-10
800	-1	-3	-5	-9
850	-1	-2	-4	-7
900	-1	-2	-3	-6
950	-1	-2	-3	-6

Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness,

**TABLE 9 Compensation Values for Other Impact Directions:
Device S**

L_S				
400	-4	-9	-16	-23
450	-4	-8	-15	-22
500	-4	-8	-14	-21
550	-4	-7	-13	-19
600	-3	-7	-12	-18
650	-3	-7	-12	-16
700	-3	-6	-11	-15
750	-3	-6	-10	-14
800	-3	-5	-9	-12
850	-2	-5	-8	-11
900	-2	-5	-7	-10
950	-2	-5	-7	-10

conducted in 2006. Six laboratories tested five unique blocks at varying hardness levels. Every “test result” represents an individual determination and nine replicate test results were reported by each lab for each level. Practice E691 was followed for the design and analysis of the data; the details are given in ASTM Research Report RR:E28-1044.

13.1.1 *Repeatability (r)*—The difference between repetitive results obtained by the same operator in a given laboratory applying the same test method with the same apparatus under constant operating conditions on identical test material within short intervals of time would, in the long run, in the normal and correct operation of the test method, exceed the following values only in 1 case in 20.

13.1.1.1 Repeatability can be interpreted as maximum difference between two results, obtained under repeatability conditions, that is accepted as plausible due to random causes under normal and correct operation of the test method.

13.1.1.2 Repeatability limits are listed in Table 10.


13.1.2 *Reproducibility (R)*—The difference between two single and independent results obtained by different operators applying the same test method in different laboratories using different apparatus on identical test material would, in the long run, in the normal and correct operation of the test method, exceed the following values only in 1 case in 20.

13.1.2.1 Reproducibility can be interpreted as maximum difference between two results, obtained under reproducibility conditions, that is accepted as plausible due to random causes under normal and correct operation of the test method.

13.1.2.2 Reproducibility limits are listed in Table 10.

13.1.3 The above terms (repeatability limit and reproducibility limit) are used as specified in Practice E177.

13.1.4 Any judgment in accordance with statements 13.1.1 and 13.1.2 would have an approximate 95 % probability of being correct.

 **A956/A956M – 17a**

X2.2.2 Correction of the Impact Energy at Different Impact Directions and Production Tolerances of the Impact Devices

X2.2.2.1 The impact devices are calibrated in order to compensate the dependence of the velocity ratio on the impact energy as well as the differences in the mechanical design of the impact device. To do this, the rebound values are measured, as described above, on two hardness reference blocks having different, known hardness values. Three measurements are made for each of the five impact directions, +90° (vertically downwards), +60°, 0° (horizontal), -60° and -90° (vertically upwards). In addition to the hardness, the time interval Δt between the zero transitions t_{03} and t_{01} is recorded in units having $\frac{1}{64}$ scanning steps (approximately 0.7 μ s). This is a measure for the velocity of the impact body: high velocities correspond to small Δt , lower velocities to large Δt . Owing to the different orientations during the measurement sequence, one obtains complete coverage of the impact energy range occurring when in operation.

X2.2.2.2 The difference Δh between the uncalibrated, measured Leeb hardness and the prespecified reference block hardness against Δt is plotted for all measurement points and

both the resulting relationships are corrected by straight lines. The gradients of the correction lines are stored in the serial EPROM in the impact device together with the reference block hardness and the position (Δt_0 , Δh_0) of the intersection points of both lines.

X2.2.2.3 If the measurement produces an uncalibrated hardness in Leeb according to see Appendix X1, then the corresponding gradient of the correction lines are determined by linear interpolation of the gradient established during the calibration process.

X2.2.2.4 The dependence of the measurement reading on the changed friction is, within certain limits, also taken into consideration (in addition to the dependence on impact direction). Both effects lead to a change in impact energy. Furthermore, small differences, caused by production, in potential energy of the impact body in the tensioned state are compensated. Whereas the information about the required velocity correction is essentially contained in the line gradient, deviations of the probe's mechanical characteristics are essentially reflected in a vertical shift of the curve.

SUMMARY OF CHANGES

Committee A01 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (A956/A956M-17) that may impact the use of this standard. (Approved Nov. 1, 2017.)

(1) Replaced Section 13 with content that conforms to the form and style rules and with data from a documented source.

Committee A01 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (A956-12) that may impact the use of this standard. (Approved Sept. 1, 2017.)

- (1) Designation change to A956/A956M to reflect the rationalized combined units.
- (2) Revised 1.2 as per the Form and Style for ASTM Standards manual.
- (3) In 3.1.2, added imperial units as per the Form and Style for ASTM Standards manual and added a note to explain that specification of impact devices and most manufacturing is done in metric units.
- (4) In 4.1 and X1.4.2 – X1.4.8, added imperial units as per the Form and Style for ASTM Standards manual.
- (5) In 7.2, 7.3, 7.4, 7.7, 9.6, 18.1, 18.4, 18.6, 18.7, and X1.4.1, corrected formatting as per the Form and Style for ASTM Standards manual.
- (6) Replaced 9.1 with two subsections that cover alternate impact device designs. Added 9.1.2 and 9.1.3 to include matter from the old 9.1 that is not covered by the new subsections. Note 2 may need to be renumbered based on other active ballot items for this standard.
- (7) In X1.1.6, corrected spelling of “be.”

- (8) In X1.4.1 and X1.4.6, corrected spelling of “aluminum.”
- (9) In Table X1.1, added imperial units as per the Form and Style for ASTM Standards manual; corrected error where values for induction signal and half width were transposed.
- (10) In 7.2, added columns to define limits for free-standing items and small/thin items that are “coupled” to larger items.
- (11) In 18.5 – 18.7, added “(s)” to the word “surface” to indicate more than one surface may be a calibrated surface.
- (12) 18.6 and 18.7 were reformatted to match ballot for dual units as per the Form and Style for ASTM Standards manual.
- (13) In 19.2, changed “randomly” to “uniformly” since it is not possible to guarantee random distribution.
- (14) In 19.3, added the words “calibrated” and “surface” to specify that only the tested surface or surfaces are considered calibrated parts of the test block.
- (15) Added 19.4 to specifically state that it is permissible to calibrate two sides of the test block.
- (16) Added new Table 1 and renumbered old Tables 1-8.

Anexo D: ASTM A1038

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: A1038 – 17

Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method¹

This standard is issued under the fixed designation A1038; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of comparative hardness values by applying the Ultrasonic Contact Impedance Method (UCI Method).

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as standard. No other units of measurement are included in this standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety, health, and environmental practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.4 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

A370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products

E10 Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials

E18 Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials

E140 Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness

E177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee A01 on Steel, Stainless Steel and Related Alloys and is the direct responsibility of Subcommittee A01.06 on Steel Forgings and Billets.

Current edition approved Nov. 1, 2017. Published December 2017. Originally approved in 2005. Last previous edition approved in 2013 as A1038 – 13^{ε1}. DOI: 10.1520/A1038-17.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

E384 Test Method for Microindentation Hardness of Materials

E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

3. Terminology and Equations

3.1 Definitions:

3.1.1 *calibration*—determination of the specific values of the significant operating parameters of the UCI instrument by comparison with values indicated by a standardized workbench hardness tester or by a set of certified reference test pieces.

3.1.2 *surface finish*—all references to surface finish in this test method are defined as surface roughness (that is, Ra = average roughness value).

3.1.3 *UCI hardness test*—a hardness testing method using a calibrated instrument by pressing a resonating rod with a defined indenter, for example, a Vickers diamond, with a fixed force against the surface of the part to be tested.

3.1.4 *UCI method*—Ultrasonic Contact Impedance, a hardness testing method developed by Dr. Claus Kleesattel in 1961 based on the measurement of the frequency shift of a resonating rod caused by the essentially elastic nature of the finite area of contact between the indenter and the test piece during the penetration.

3.1.5 *verification*—checking or testing the UCI instrument to ensure conformance with this test method.

3.2 Equations:

3.2.1 The *average* \bar{x} of a set of n measurements x_1, x_2, \dots, x_n is calculated as:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

where each of the individual measurements x_1, x_2, \dots, x_n is the result from a single indentation.

3.2.2 The *error* E in the performance of an ultrasonic contact impedance hardness testing instrument at each hardness level, relative to a standardized reference value, is calculated as an absolute percent error determined as:

$$E = \left| 100 \times \left(\frac{\bar{x} - x_{ref}}{x_{ref}} \right) \right| \quad (2)$$

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States

A1038 – 17

where:

\bar{x} = the average (see 3.2.1) of n measurements made on a standard reference block as part of a performance verification, and

x_{ref} = the certified reference hardness reported for the standard reference block.

4. Significance and Use

4.1 The hardness of a material is a defined quantity having many scales and being dependent on the way the test is performed. In order to avoid the creation of a new method involving a new hardness scale, the UCI method converts into common hardness values, for example, HV, HRC, etc.

4.2 The UCI hardness test is a superficial determination, only measuring the hardness condition of the surface contacted. The results generated at a specific location do not represent the part at any other surface location and yield no information about the material at subsurface locations.

4.3 The UCI hardness test may be used on large or small components at various locations. It can be used to make hardness measurements on positions difficult to access, such as tooth flanks or roots of gears.

A. GENERAL DESCRIPTION OF INSTRUMENTS AND TEST PROCEDURE FOR UCI HARDNESS TESTING

5. Apparatus

5.1 Instruments used for UCI hardness testing generally consist of (1) a probe containing a rod with a defined indenter, for example, a Vickers diamond, attached to the contacting end per Test Method E384 (see Fig. 1), (2) vibration generating means, (3) vibration detecting means, (4) electronic means for the numerical evaluation, and (5) a digital display, indicating the measured hardness number.

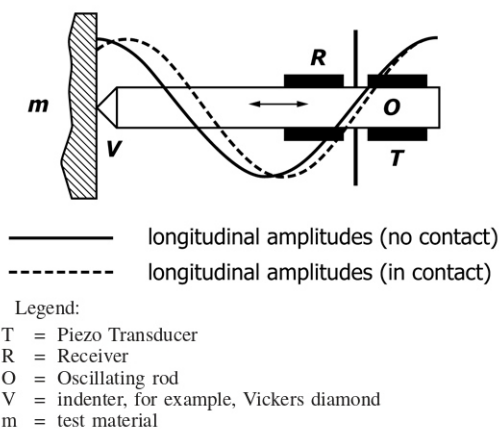


FIG. 1 Schematic Description of the UCI Probe

5.2 UCI Probes—There are different probes available for UCI hardness testing. They typically cover static loads ranging from 1 N to 98 N. See also Appendix XI. They come also in different sizes with longer and shorter sensor rods for special applications. And they are developed in two versions, that is, manually operated or equipped with a servo-motor for automatic testing.

5.3 Summary of Test Method—In conventional workbench hardness testing like Brinell or Vickers testing according to Test Methods E10 and E384, the hardness value is determined optically by the size of the indentation in the material generated by a certain test load, after the indenter has been removed. In the mobile hardness test under applied load according to the UCI method, however, the size of the produced indents are not determined optically. Instead the contact area is derived from the electronically measured shift of an ultrasonic resonance frequency. To carry out the UCI test, a probe containing the rod with the indenter is excited into a longitudinal ultrasonic oscillation of about 70 kHz by piezoelectric ceramics—the so-called zero frequency, which occurs when the indenter is vibrating in air.

5.3.1 A spring inside the probe applies the specified test load, the vibrating tip penetrates into the material creating an elastic contact, which results in a positive frequency shift of the resonating rod. This shift is related to the size of the indent area (contact area of the indenter with the material). The size, in turn, is a measure for the hardness of the test material at a given modulus of elasticity, for example, HV(UCI) according to Eq 3.

5.3.2 Therefore, the frequency shift is relatively small for hard materials, because the indenter penetrates not very deep into the test material leaving only a small indent.

5.3.3 The frequency shift becomes larger if the indenter penetrates deeper into the material, indicating medium hardness, in accordance with the larger test indentations. Analogously, the frequency shift becomes largest when soft materials are tested (see Fig. 2).

5.3.4 The instrument constantly monitors the resonance frequency, calculates the frequency shift when the specified test load has been reached either after the internal switch has triggered the corresponding measurement frequency in the case

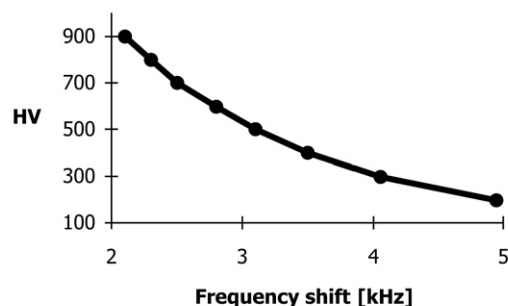


FIG. 2 Hardness Value versus Frequency Shift of the Oscillating Rod

 A1038 – 17

of handheld probes or after a specific dwell time has been elapsed in the case of motor driven probes. The instrument carries out the evaluation and calculations, and displays instantaneously the hardness value, for example, HV(UCI).

$$\begin{array}{ccc} \text{UCI} & & \text{Vickers} \\ \Delta f = f(E_{\text{eff}}A) & \text{and} & HV = \frac{F}{A} \end{array} \quad (3)$$

↑—————↑

5.3.5 The frequency shift is a function of the indentation size of a defined indenter, for example, a Vickers diamond, at a given modulus of elasticity of the measurement system.

5.3.6 Eq 3 describes the basic relation in comparison to the definition of the Vickers hardness value: Δf = Frequency shift, A = indentation area, E_{eff} = effective elastic modulus (contains the elastic constants of both the indenter and the test piece), HV = Vickers hardness value, F = Force applied in the hardness test.

5.4 *The Influence of the Elastic Constants*—As can be seen in Eq 3, the frequency shift not only depends on the size of the contact area but also on the elastic moduli of the materials in contact. To allow for differences in Young’s modulus, the instrument has to be calibrated for different groups of materials. After calibration, the UCI method can be applied to all materials, which have the corresponding Young’s modulus.

5.4.1 As manufactured, the UCI instrument usually has been calibrated on non-alloyed and low-alloyed steel, that is, certified hardness reference blocks according to Test Method E384. Besides this, some instruments may be calibrated quickly, also at the test site, for metals such as high-alloyed steels, aluminum or titanium.

6. Calibration to Other Materials

6.1 A test piece of the particular material is needed. The hardness value should then be determined with a standardized workbench hardness tester like one for Vickers, Brinell or Rockwell according to Test Methods and Definitions A370. It is recommended to take at least five readings and calculate the average hardness value. Now carry out a set of at least five single UCI measurements on your test material according to instructions in 10.6, adjust the displayed average value to the before measured hardness of the material and thus find the calibration value which is necessary for further measurements on this particular material in the desired hardness scale and range.

6.1.1 Some instruments allow storing all calibration data and adjustment parameters for hardness testing of different materials. They can be recalled to the instrument as needed.

7. Comparison with Other Hardness Testing Methods

7.1 As opposed to conventional low load hardness testers, the UCI instruments do not evaluate the indentation size microscopically but electronically according to the UCI method. The UCI method yields comparative hardness measurements when considering the dependency on the elastic modulus of the test piece.

7.2 After removing the test force, an indentation generated by the UCI probe using a Vickers diamond as indenter and mounted in a test stand is practically identical to a Vickers indentation produced by a workbench tester of the same load. The indentation can be measured optically according to the standard Vickers test if care is taken to apply the force according to Test Method E384 and if a Vickers indenter is used in the UCI probe. In this case special arrangements or probe attachments have to be used to provide verification of the actual test force of the UCI probe.

8. Test Piece

8.1 *Surface Preparation*—The applied test force (that is, the selected UCI probe) must not only match the application but also the surface quality and roughness of the material. While smooth, homogeneous surfaces can be tested with low test loads, rougher and coarse-grained surfaces require test loads as high as possible. However, the surface must always be free of any impurities (oil, dust, etc.) and rust.

8.1.1 The surface roughness should not exceed $\approx 30\%$ of the penetration depth ($Ra \leq 0.3 \times h$) with:

$$h[\text{mm}] = 0.062 \times \sqrt{\frac{\text{Force [N]}}{\text{Hardness [HV]}}} \quad (4)$$

8.1.2 Penetration depth of the Vickers diamond pyramid for a certain hardness (in HV) and test load (in N) is shown in Eq 4.

8.1.3 Table 1 provides the recommended minimal surface roughness for certain UCI probes that use a Vickers indenter. If surface preparation is necessary, care must be taken not to alter the surface hardness by overheating or cold working. Any paint, scale or other surface coatings shall be completely removed. Failure to provide adequate surface finish will produce unsteady readings. Coarse finishes will tend to lower the measured value.


8.2 *Minimum Thickness*—Thin coatings or surface layers on bulk material must have a minimum thickness of at least ten times of the indentation depth of the indenter used (see Fig. 3 for a Vickers indenter) corresponding to the Bueckle’s rule: $S_{\text{min}} = 10 \times h$.

8.3 *Minimum Wall Thickness*—Distinct reading variations may especially occur with a specimen thickness of less than about 15 mm if the test material is excited to resonance or sympathetic oscillations (for example, thin blocks, tubes, pipes, etc.). Most disturbing are flexural vibrations excited by the vibrating tip. These should be suppressed by suitable means. Sometimes attaching the test piece to a heavy metal block by means of a viscous paste, grease or oil film suffices to quench the flexural waves. Nevertheless, a minimum wall thickness of 2 to 3 mm is recommended.

8.4 *Influence of the Oscillation*—The UCI method is based on measuring a frequency shift. Parts less than about 300 g can

TABLE 1 Surface Finish for Different Test Loads

Test Load	98 N	50 N	10 N	3 N
Ra	$\leq 15 \mu\text{m}$	$\leq 10 \mu\text{m}$	$\leq 5 \mu\text{m}$	$\leq 2.5 \mu\text{m}$

 A1038 – 17

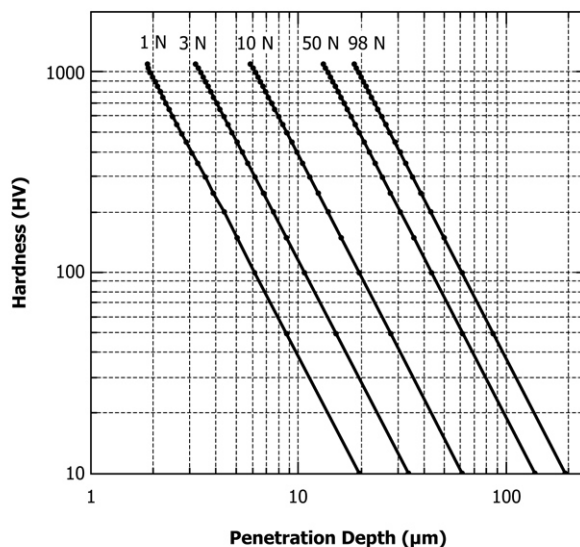


FIG. 3 Vickers Diamond Penetration Depth for Different Test Loads from 1 N to 98 N

go into self-oscillating causing erroneous or erratic readings. Test pieces of weights less than the minimum or pieces of any weight with sections less than the minimum thickness require rigid support and coupling to a thick, heavier non-yielding surface to resist the oscillation of the UCI probe. Failure to provide adequate support and coupling will produce test results lower or higher than the true hardness value.

8.5 *Surface Curvature*—Test pieces with curved surfaces may be tested on either the convex or concave surfaces providing that the radius of curvature of the specimens is matched to the appropriate probe and probe attachment in order to ensure a perpendicular positioning of the probe.

8.6 *Temperature*—The temperature of the test piece may affect the results of the UCI hardness test. However, if the probe is exposed to elevated temperature for only the time of measurement, measurements are possible at temperatures higher than room temperature, without influencing the performance of the UCI instrument.

9. Verification of the Apparatus

9.1 *Verification Method*—Prior to each shift or work period the instrument shall be verified as specified in Part B. Any UCI hardness testing instrument not meeting the requirements of Part B shall not be used for the acceptance testing of products.

10. Procedure

10.1 *Test Procedure*—To perform a hardness test, the probe is connected to the indicating unit and the instrument is turned on. The probe is held firmly (using a probe grip if needed) with its axis in a perpendicular position relative to the test piece surface. Hold the probe with both hands to achieve the best

possible result. Carefully exert steady pressure against the test piece during the loading phase. Make sure that the vertical probe position is maintained as long as the load is effective. Some instruments indicate the end of the measurement by an acoustic signal and display the hardness value instantaneously.

10.2 *Alignment*—To prevent errors from misalignment move the UCI probe with slow and steady speed. The probe should be perpendicular with respect to the surface. The maximum angular deviation from the perpendicular position should be less than 5 degrees. Avoid twisting of the probe housing. There should be no lateral forces on the indenter. Therefore, avoid slip.

10.3 *Test Direction*—Hardness testing according to the UCI method generally can be carried out in any direction, without the necessity of corrections depending on the loading. There may be an effect of the measurement direction on the hardness measurement depending on the manufacturer and the test load of an UCI probe. This is due to the mass of the vibrating rod, which may influence the test load in dependence on the direction of measurement; that is, the mass of the rod will increase the load when measuring top to bottom and vice versa. This should be considered especially for test loads below 10 N. In this case the user has to verify the influence of test orientation on the hardness reading depending on test load and hardness of material.

10.4 *Spacing Indentation*—As per Test Method E384 the center distance between two adjacent indents in relation to the mean length of the diagonals must be (1) at least 3 times the amount for steel, copper and copper alloys, and (2) at least 6 times the amount for light metals, lead, tin and their alloys. If two neighboring indents vary in size then the mean indent

 A1038 – 17

diagonal of the larger indent must be used for calculation of the minimum distance. No point shall be measured more than once.

10.5 *Reading of UCI Instruments*—Hardness values can be read directly off the electronic display of the instrument. On some instruments, they can be displayed either as single figure showing the actual reading, or as average figure showing the average of the hardness readings taken so far. Equivalent hardness numbers on other scales can be obtained by using a hardness conversion table (see also Section 12) or by calibration according to Section 6.

10.6 *Number of Measurements*—Five measurements taken in an area of approximately 650 mm² shall constitute one test. If the material being tested is considered to be inhomogeneous, ten measurements or more shall be made to constitute one test.

NOTE 1—650 mm² is an area approximately equal to 1 in.².

10.7 *Reporting*—The numerical hardness value shall be followed by the symbol for the UCI test, HV(UCI) in the case of a Vickers reading with a suffix number denoting the test force in kgf. Example: 446 HV(UCI) 10 = UCI hardness number of 466 under a force of 10 kgf. If numerical hardness values are presented in other scales by calibration according to Section 6, they should analogously be reported as 45 HR-C(UCI) or 220 HBW(UCI) etc. Reporting of converted values, see Section 12.

11. Precision and Bias^{3,4}

11.1 The precision of this test method is based on an interlaboratory study conducted in 2009. Each of 13 laboratories tested five different materials. Every “test result” represents the average of five individual measurements per Paragraph 10.6 of A1038. Laboratories reported two replicate test results (from a single operator) for each of two different analysis configurations (hand held and test stand). Practice E691 was followed for the design and analysis of the data.

11.1.1 *Repeatability limit (r)*—Two test results obtained within one laboratory shall be judged not equivalent if they differ by more than the “r” value for that material; “r” is the

interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day in the same laboratory.

11.1.1.1 Repeatability limits are listed in Table 2 and Table 3.

11.1.2 *Reproducibility limit (R)*—Two test results shall be judged not equivalent if they differ by more than the “R” value for that material; “R” is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment in different laboratories.

11.1.2.1 Reproducibility limits are listed in Table 2 and Table 3.

11.1.3 The above terms (repeatability limit and reproducibility limit) are used as specified in Practice E177.

11.1.4 Any judgment in accordance with statements 11.1.1 and 11.1.2 would have an approximate 95 % probability of being correct.

11.2 *Bias*—See Table 4.

11.3 The precision statement was determined through statistical examination of 258 results, from 13 laboratories, on five materials. These five materials were identified as follows:

	Certified Brinell Hardness	Certified Brinell Diameter (3000 kg load - 10 mm indenter)
Test Block 1: 0300142	143	4.985 mm
Test Block 2: 0729385	194	4.325 mm
Test Block 3: 0800213	242	3.897 mm
Test Block 4: 0722420	312	3.446 mm
Test Block 5: 0723157	377	3.144 mm

11.4 To judge the equivalency of two test results, it is recommended to choose the test block closest in characteristics to the test material.

12. Hardness Scale Conversions

12.1 *Conversion of Hardness Numbers*—Some instruments allow also an automatic conversion of measured hardness numbers into other hardness scales. Such conversion into other hardness values or also into tensile strength, measured in N/mm², is made according to Hardness Conversion Tables E140. Therefore, reporting of converted values and all limitations specified in Hardness Conversion Tables E140 do apply.

TABLE 2 Test Stand: HV (UCI)

Test Block	Average ^A		Repeatability Standard Deviation	Reproducibility Standard Deviation	Repeatability Limit	Reproducibility Limit
	\bar{x}	$S\bar{x}$	S_r	S_R	r	R
0300142 ^B	745.13		1.68	5.57	4.71	15.61
0729385	192.39	5.45	1.91	7.27	5.33	20.35
0800213	220.61	7.14	1.26	9.71	3.54	27.18
0722420	306.91	9.67	4.03	7.15	11.29	20.01
0723157	377.20	6.55				

^A The average of the laboratories' calculated averages.

^B Test Block 1 data was deleted from consideration when it was realized that it was fabricated from aluminum while blocks 2, 3, 4, and 5 were fabricated from steel. The differing materials require individual calibration.

 A1038 – 17

TABLE 3 Hand Held Probe: HV (UCI)

Test Block	Average ^A		Repeatability Standard Deviation	Reproducibility Standard Deviation	Repeatability Limit	Reproducibility Limit
	\bar{x}	$S\bar{x}$	S_r	S_R	r	R
0300142 ^B	723.608					
0729385	189.915	6.398	1.868	6.532	5.229	18.291
0800213	219.277	8.135	2.105	8.270	5.894	23.156
0722420	305.654	10.357	8.093	11.833	22.660	33.132
0723157	370.285	10.469	7.632	11.778	21.370	32.978

^A The average of the laboratories' calculated averages.

^B Test Block 1 data was deleted from consideration when it was realized that it was fabricated from aluminum while blocks 2, 3, 4, and 5 were fabricated from steel. The differing materials require individual calibration.

TABLE 4 Comparative Vickers Hardness

Test Block	Calculated "True" Hardness Value ^A	ILS #358 Determined Hardness Value ^B (Test Stand)	ILS #358 Determined Hardness Value ^C (Hand Held)	Bias (Test Stand)	Bias (Hand Held)
0300142	143.06	NR	NR	NR	NR
0729385	189.70	197.40	196.14	+4.06	+3.39
0800213	240.32	228.44	227.98	-4.94	-5.13
0722420	321.75	311.20	314.22	-3.28	-2.34
0723157	388.78	382.46	372.28	-1.63	-4.24

^A The average of the three testing laboratories' calculated averages (obtained using an actual Vickers hardness tester – 5 kg test force) from ILS #619. Testing performed in accordance with Test Method E384.

^B The average of five testing laboratories' calculated averages (obtained using UCI (*ultrasonic contact impedance*) hardness testing equipment with the data expressed in Vickers hardness numbers) from ILS #358. All included labs utilized 5 kg test force.

^C The average of five testing laboratories' calculated averages (obtained using UCI (*ultrasonic contact impedance*) hardness testing equipment with the data expressed in Vickers hardness numbers) from ILS #358. All included labs utilized 5 kg test force.

12.1.1 Conversion between hardness numbers is only possible with certain limitations. Hardness values, measured by different methods cannot be correlated by established mathematical relationships. The form and material of the indenter, the size of the indent and the measured number depend on the type of hardness test that is used.

12.1.2 Conversion of one hardness number either into another hardness number or a unit of tensile strength may be inaccurate or inadmissible, depending on the material, its preparation and its surface finish.

12.2 *Conversion to Tensile Strength*—The conversion into the stress unit N/mm² is limited to loads equal to or greater than 98 N.

B. VERIFICATION OF UCI HARDNESS TESTING INSTRUMENTS

13. Scope

13.1 Part B covers the verification procedure for UCI hardness testing instruments by using suitable hardness reference blocks. Direct verification has to be done by the manufacturer.

14. General Requirements

14.1 *Instrument*—Before a UCI instrument is verified, the instrument shall be examined to ensure that: (1) the batteries in the indicating unit are not discharged, and (2) the indenter is clean, that is, free from foreign matter like dust, grit, grease or oil.

15. Hardness Reference Block

15.1 In order to avoid perturbing vibrations in the reference blocks caused by the ultrasonic sensor, they should be sufficiently large. Recommended is to use steel blocks with dimensions not less than 80 mm in diameter and 16 mm in thickness.

15.2 Each block shall be specifically prepared and heat-treated to give a specific hardness and the necessary homogeneity, such as in Test Methods E18, and stability of the surface hardness distribution.

15.3 The test surface shall be polished or fine ground and free of scratches and other discontinuities, which would influence the UCI measurement. The surface finish of the test surface shall not exceed 0.4 µm maximum.

15.4 To ensure that no material is subsequently removed from the test surface of the reference block, an official mark or the thickness to an accuracy of ±0.025 mm at the time of calibration shall be marked on the test surface.

15.5 The hardness reference block shall be calibrated using a standard and certified hardness testing device per Test Method E10, Test Methods E18, or Test Method E384. Make at least five randomly distributed hardness measurements on the test surface of the reference block and take the arithmetic mean of all of the readings as the mean hardness of the block.

15.6 Each block shall be marked with (1) the arithmetic mean of the hardness values found in the standardization test suffixed by the scale designation letter (for example HV, HRC,

 A1038 – 17

TABLE 5 Maximum Permissible Error of Testing Machine

Test Load Range, N	Maximum Error E for Given Hardness Level, %			
	<250 HV	250 HV to <500 HV	500 HV to 800 HV	>800 HV
<9.8 N	6	7	8	9
≥9.8 N	5	5	7	7

HRB, HBW, HBS, etc.), and (2) with the name or mark of the supplier. If edge of block is marked, the lettering shall be upright when the test surface is upward.

16. Verification

16.1 Check the UCI hardness-testing instrument by making at least three measurements uniformly distributed on a standard reference block of the selected hardness scale. A maximum of two measurements may be discarded if the user determines there was an error made during application of the test force during measurement.

16.2 Let x_1, x_2, \dots, x_n be the individual measurement values, and \bar{x} the average of the measurements (see Eq 1). The calculation of the average of the measurements (\bar{x} , see Eq 1) shall be based on a minimum of three measurements.

16.3 Determine the error E in the performance of the ultrasonic contact impedance instrument using Eq 2. The error shall be within the tolerances of Table 5.

16.4 If the calculated value of error E falls outside the specified tolerances, this is an indication that the hardness tests made since the last verification may be suspect.

16.5 Instruments that have not passed verification shall not be used for testing. They should be repaired, if necessary, and be subsequently verified.

17. Keywords

17.1 portable hardness testing; superficial hardness; ultrasonic contact impedance (UCI); vickers diamond indenter

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. GUIDELINES FOR SELECTION AND USE OF UCI INSTRUMENTS

TABLE X1.1

Load	Model	Features	Typical Applications
98 N	standard length (manual)	relatively large indentation; requires minimal surface preparation	small forgings, cast material, weld inspection, HAZ
49 N	standard length (manual)	for general use	induction hardened or carburized machine parts, for example, camshafts, turbine weld inspection, HAZ
	extended length (manual)	30 mm extended length	measurement in grooves, on gear tooth flanks and roots
	short probe (manual)	reduced length (90 mm); electronics in separate housing	turbine blades, inside wall of pipes with Ø >90 mm
9.8 N	standard length (manual)	load is easy to apply and provides control to test on sharp radii	ion-nitrided stamping dies and molds, forms, presses, thin walled parts
	extended length (manual)	30 mm extended length	bearings, tooth flanks
	short probe (manual)	reduced length (90 mm); electronics in separate housing	turbine blades, inside wall of pipes with Ø >90 mm
7.8 N	motor probe style	load is applied by servomotor	finished precision parts, gears, bearing raceways
3 N	motor probe style	load is applied by servomotor; rather small indentations	thin layers, for example, copper or chromium on steel cylinders; copper rotogravure cylinders; coatings, case hardened parts
1 N	motor probe style	load is applied by servomotor; rather small indentations	thin layers and coatings

Anexo E: AISI 1045

H



AISI : 1045 W N°: 1.1191
DIN : CK 45

Tipo de aleación promedio : C 0,45 Si 0,3 Mn 0,7 %
Color de identificación : Rojo - Blanco - Rojo
Estado de suministro : Dureza natural 193 HB máx.

ACERO FINO AL CARBONO DE ALTA CALIDAD
Gran pureza de fabricación y estricto control de calidad.

APLICACIONES: Partes de maquinaria y repuestos sometidos a esfuerzos normales. Árboles de transmisión, ejes, pernos, tuercas, ganchos, pines de sujeción, pasadores, cuñas, chavetas, etc. También para herramientas de mano, portamatrices, etc.

INDICACIONES PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO

Forjar: 1100 - 850 °C
Normalizar: 840 - 870 °C
Recocer: 650 - 700 °C

Enfriamiento lento en el horno

Temple: al agua (*) 820 - 850 °C

Dimensiones menores: al aceite 830 - 860 °C

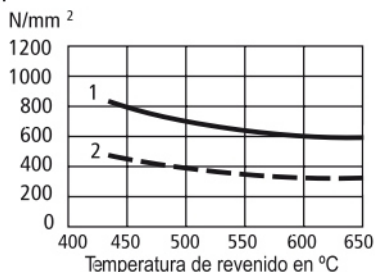
Revenido: Según el uso 100 - 300 °C

Nitrurado: en baño de sal 580 °C

SOLDADURA: Con soldadura especial de alta resistencia.

Según tamaño y complejidad del trabajo, se recomienda un precalentamiento entre 200-300°C. Electrodo BÖHLER UTP 76/ UTP 6020

28



1.- Resistencia a la tracción
2.- Límite de Fluencia

Estado	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS				
	Diámetro mm.	Límite de fluencia N/mm ²	Resistencia a la tracción N/mm ²	Alargamiento (Lo = 5d) mín. %	Contracción mín. %
Natural	-	370	650	15	35
Recocido	16 - 100	340	650 - 750	17	35
	100 - 250	330	580 - 700	18	-

(*) Soldadura y Tratamiento Térmico: Consultar con Departamento Técnico.

www.voestalpine.com/highperformancemetals/peru
www.bohlerperu.com

voestalpine
ONE STEP AHEAD.

20

Anexo F: AISI 4140

VCL



AISI : 4140
DIN : 42 Cr Mo 4
W N°: 1.7223/25

Tipo de aleación promedio : C 0,41 Cr 1,1 Mo 0,2 Si 0,2 Mn 0,7 %
Color de identificación : Verde - Blanco
Estado de suministro : Bonificado 250 - 350 HB Típico. Ver tabla inf.
Largo estándar : 3,5 - 6 metros.

Acero especial de bonificación con aleación de cromo molibdeno.

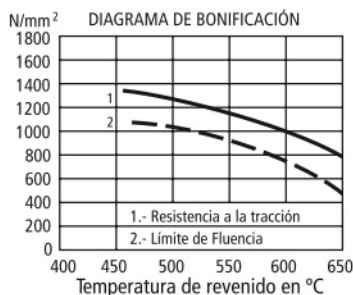
Muy resistente a la tracción y a la torsión, como también a cambios de flexión. Se suministra en estado bonificado, lo que permite, en la mayoría de los casos, su aplicación sin necesidad de tratamiento térmico adicional.

APLICACIONES: Partes de maquinaria y repuestos de dimensiones medianas, con grandes exigencias en las propiedades arriba mencionadas y también ciertos elementos para la construcción de motores, engranajes, pernos, tuercas, pines, émbolos, árboles de transmisión, ejes de bombas, cañones de armas para la cacería.

27

INDICACIONES PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO

Forjado: 1050 - 850 °C
Normalizado: 840 - 880 °C
Recocido: 690 - 720 °C
Enfriamiento lento en el horno
Temple: al aceite 830 - 860 °C
al agua 820 - 850 °C
Dureza obtenible: 52 - 56 HRC
Revenid : 540 - 680 °C
Nitrurar: 580 °C



Resistencia en estado Recocido		CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS EN ESTADO BONIFICADO						
máx. N/mm²	Dureza Brinell máx.	Diámetro mm.		Límite de fluencia N/mm²	Resistencia a la tracción N/mm²	Elongación (Lo = 5d) % mín.	Estricción % mín.	Resiliencia según DVM Joule
		desde	hasta					
770	241	16	16	835	1030 - 1250	10	40	34
		40	40	715	930 - 1130	11	45	41
		100	100	595	830 - 1030	12	50	41
		160	160	530	730 - 900	13	55	41
		160	250	490	690 - 840	14	55	41

Soldadura: Consultar con nuestro Departamento Técnico

20

www.voestalpine.com/highperformancemetals/peru
www.bohlerperu.com

voestalpine
ONE STEP AHEAD.