

## PRUEBA DE DUREZA PARA METALES, POLÍMEROS Y CERÁMICOS

Salma Ospina Torres, 202321153

### RESUMEN

En esta informe se hicieron ensayos de dureza por penetración en materiales metálicos, poliméricos y cerámicos. Se usaron las escalas Rockwell de acuerdo a la norma ASTM E18 [1], Brinell con la norma ASTM E10 [2], Vickers con la norma ASTM C1327 [3] y Shore con la norma ASTM D2240 [4]. El objetivo principal fue comparar las diferentes escalas de dureza con sus respectivas normas. Se realizaron pruebas en acero AISI 4340, aluminio 6063, neopreno y vidrio arquitectónico. Los resultados obtenidos demostraron una relación entre la selección del método y las propiedades de cada material evidenciando la influencia de su estructura. En conclusión, se destaca la importancia de seleccionar el método adecuado para cada tipo de material.

### NOMENCLATURA

$d$	Diámetro medio de la huella
$D$	Diámetro del indentador
$h$	Diferencia en las dos mediciones de profundidad de indentación
$F$	Carga Aplicada
$P$	Carga Aplicada
$HA$	Lectura del durómetro

### INTRODUCCIÓN

En esta práctica de laboratorio se hicieron ensayos de dureza. La dureza es una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada [5]. Es fundamental en la caracterización de los materiales porque permite evaluar su resistencia a la deformación plástica sin necesidad de realizar ensayos complicados.

En este laboratorio se emplearon los métodos de dureza Rockwell, Brinell, Vickers y Shore. En todos los métodos un indentador se presiona contra la superficie del material bajo una carga específica.

La norma ASTM E18 [1] describe el procedimiento para determinar la dureza Rockwell en materiales metálicos. Esta dureza se calcula a partir de la diferencia en la profundidad de indentación entre una fuerza preliminar y una fuerza total aplicada [1]. La norma indica que la dureza Rockwell se calcula usando la ecuación (1).

$$Dureza\ Rockwell = 100 - \frac{h}{0,002} \quad (1)$$

En la prueba Brinell con la norma ASTM E10 [2], utilizada principalmente para materiales metálicos, la dureza se determina

a partir del diámetro de la huella generada por una esfera de acero sometida a una carga específica [2], utilizando la ecuación (2):

$$HBW = \frac{2F_{kgf}}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

donde  $F$  es la carga aplicada,  $D$  es el diámetro del indentador y  $d$  es el diámetro medio de la huella.

Por otro lado, la prueba Vickers con la norma ASTM C1327 [3], se emplea en materiales cerámicos y metálicos, utilizando un indentador de diamante con forma piramidal. La dureza Vickers se obtiene mediante la ecuación (3):

$$HV = 0,0018544 \left( \frac{P}{d^2} \right) \quad (3)$$

donde  $P$  es la carga aplicada en kgf y  $d$  es la longitud promedio de las diagonales de la huella en mm.

Finalmente, la prueba Shore con la norma ASTM D2240 [4] se utiliza para evaluar la dureza de materiales como elastómeros, termoplásticos, caucho vulcanizado, materiales elastoméricos y otros plásticos [4]. En este caso, La norma no proporciona una fórmula directa para calcular la dureza, se obtiene a partir de la lectura directa en el durómetro bajo condiciones predefinidas. La norma incluye fórmulas para calcular la fuerza aplicada por el resorte del durómetro en función de la lectura obtenida, en este caso fue de tipo A:

$$F(N) = 0,55 + 0,075 HA \quad (4)$$

donde  $HA$  es la lectura obtenida.

Este laboratorio permitió la comparación de los diferentes métodos de medición de dureza por penetración. La comparación entre materiales y la relación entre la dureza y la resistencia mecánica de los materiales analizados. Se realizaron pruebas en metales (AISI 4340, Aluminio 6063), polímeros (Neopreno) y cerámicos (vidrio arquitectónico).

Las hipótesis evaluadas en esta práctica son:

1. Los cerámicos tendrán una mayor resistencia a la deformación ya que sus enlaces iónicos fuertes impiden que los átomos se deslicen.
2. La geometría del indentador puede hacer que varíe los valores de la dureza.

3. La dureza de un material está directamente relacionada con su resistencia mecánica y su composición.

#### Objetivos específicos

- Conocer e identificar las diferentes escalas de dureza (normas, medición, reporte y análisis) y la instrumentación utilizada en cada una
- Establecer los criterios para la selección del método, su utilidad y la escala adecuada para determinar la dureza en las distintas familias de materiales.
- Familiarizarse con los órdenes de magnitud en las pruebas de dureza para las distintas familias de materiales.

Este informe presenta los procedimientos, resultados y análisis obtenidos en la práctica. Se destaca la importancia de la selección adecuada del método de dureza para la caracterización de materiales.

### METODOLOGÍA

#### 1. Preparativos

Para garantizar la precisión de los ensayos, se siguieron las especificaciones establecidas en las normas ASTM E18 para Rockwell, ASTM E10 para Brinell, ASTM C1327 para Vickers y ASTM D2240 para Shore.

##### Verificación de equipos:

- **Calibración de los durómetros:** Se comprobó que la fuerza aplicada y los indentadores estuvieran dentro de los valores permitidos. [ASTM E18, E10, C1327, D2240]
- **Condiciones ambientales:** Se verificó que la temperatura del laboratorio estuviera dentro del rango 10 a 35 °C para evitar alteraciones en los resultados. [1, 2, 3, 4]

##### Preparación de las muestras

- **Metales (Rockwell y Brinell):** Se utilizaron piezas de Acero AISI 4340 y Aluminio 6063, asegurando que la superficie de prueba fuera uniforme y perpendicular al indentador [1], [2].
- **Vidrio arquitectónico (Vickers):** Se verificó que la muestra tuviera un espesor mayor a 0.50 mm y una rugosidad menor a 0.1  $\mu\text{m rms}$ . [3]
- **Polímeros (Shore):** Se acondicionaron las muestras de neopreno en el laboratorio 12 horas antes de la prueba para estabilizar la temperatura y humedad. Se garantizó un grosor mínimo de 6 mm. [4]

##### Soporte de las piezas de prueba

- Se verificó la estabilidad de cada muestra para evitar desplazamientos durante la medición. [1]

#### 2. Ejecución de las pruebas

##### Prueba de dureza Rockwell (ASTM E18)

**Equipo utilizado:** Durómetro AFFRI 250 DRMC

**Muestras:** Acero AISI 4340

**Parámetros:**

- **Escalas utilizadas:**
  - **Escala C:** Indentador de diamante 120°, carga de 150 kgf para acero 4340.
- **Resolución de medición:** 0.1 HR
- **Tiempos de carga:**
  - **Fuerza preliminar:** 10 kgf (98 N) durante 2 s.
  - **Aplicación de carga total:** 150 [kgf]
  - **Tiempo de permanencia:** 5 s.
  - **Recuperación elástica:** 2 s antes de la medición final.

##### Procedimiento:

1. Se aplicó la fuerza preliminar de 10 kgf por 2 segundos y se estableció la posición de referencia.
2. Se incrementó la fuerza hasta la carga total correspondiente a la escala.
3. Se mantuvo la carga y se midió la profundidad de la indentación.
4. Se realizaron cinco mediciones en diferentes posiciones.
5. Se registró los valores de dureza Rockwell calculada automáticamente por el equipo.

##### Prueba de dureza Brinell (ASTM E10)

**Equipo utilizado:** Durómetro AFFRI 250 DRMC

**Muestra:** Aluminio 6063

**Parámetros:**

- **Carga aplicada:** 62,5 kgf
- **Indentador:** Esfera de 2,5 mm de diámetro
- **Tiempo de aplicación de carga:** 10 s
- **Resolución de medición:** 0,0001 mm en el diámetro de la huella.

##### Procedimiento:

1. Se colocó la muestra en el yunque y se alineó el indentador perpendicularmente.
2. Se aplicó la carga de 62,5 kgf durante 10 s.
3. Se midió el diámetro de la huella con el programa de la máquina.
4. Se realizaron cinco mediciones en diferentes posiciones.
5. La máquina usando la ecuación (2) calculó la dureza con el diámetro de la huella.

##### Prueba de dureza Vickers (ASTM C1327)

**Equipo utilizado:** Microdurómetro BUEHLER MICROMET 5104

**Muestra:** Vidrio arquitectónico

**Parámetros:**

- **Carga aplicada:** 0,3 kgf
- **Indentador:** Pirámide de diamante con ángulo de 136°
- **Tiempo de aplicación de carga:** 15 s
- **Resolución de medición:** 0,01  $\mu\text{m}$  en las diagonales

##### Procedimiento:

1. Se aplicó la carga de 0,3 kgf suavemente con velocidad de 0.015 a 0.070 mm/s [3].

- Se midieron las diagonales de la indentación y se promedió su valor.
- Se realizaron cinco mediciones en diferentes posiciones.
- La máquina calculó los valores de dureza Vickers usando la ecuación (4).

### Prueba de dureza Shore (ASTM D2240)

**Equipo utilizado:** Durómetro ZWICK 3131

**Muestras:** Neopreno

**Parámetros:**

- Escala A:** Para neopreno
- Tiempo de medición:**  $1 \pm 0.1$  s después del contacto [4].
- Carga:** 10 N
- Resolución de medición:** 0,1 [HA]

**Procedimiento:**

- Se colocó la muestra en una superficie plana y rígida.
- Se aplicó el indentador con una acción descendente controlada.
- Se realizaron cinco mediciones en diferentes posiciones.
- Se registró la dureza Shore como el promedio de las mediciones.

### 3. Procesamiento de datos e incertidumbre:

Se calcularon las incertidumbres considerando la repetibilidad de las mediciones, la resolución de los instrumentos y el error asociado.

Para la resolución de los instrumentos se hizo uso de la ecuación de error sistemático:

$$E_{sist} = Digital \rightarrow Resolución \quad (5)$$

Para el error asociado se hizo uso de las ecuaciones de precisión y el error total:

$$E_{aleat} = intervalo.confianza, norm(\alpha; \sigma; N) \quad (6)$$

$$E_{total} = \sqrt{E_{sist}^2 + E_{sist}^2} \quad (7)$$

## RESULTADOS

A continuación, se encuentran los resultados de las cinco mediciones realizadas para cada prueba de dureza y su respectiva desviación estándar y error asociado.

**Tabla 1. Resultados de prueba de dureza Rockwell.**

Prueba de dureza Rockwell			
Temperatura [°C]	20,5	Humedad [%]	60,5
Material	Acero 4340	Tiempo de aplicación [s]	5
Escala	C	Indentador	Cono diamante 120°
Indentación	Dureza [HRC]	Observaciones	
1	29,1 ± 0,1	Las mediciones se hacían a cortas distancias. Las mediciones variaron con el cambio de posición. Se dejaba una recuperación elástica. Uso de cono diamante.	
2	27,5 ± 0,1		
3	30,3 ± 0,1		
4	27,4 ± 0,1		
5	30,6 ± 0,1		
Promedio	28,9800 ± 1,3236		
Desviación estándar	1,5057		
Error asociado	1,3236		

**Tabla 2. Resultados de prueba de dureza Brinell.**

Prueba de dureza Brinell			
Temperatura [°C]	20,5	Humedad [%]	60,5
Material	Aluminio 6063	Tiempo de aplicación [s]	10
Carga [kgf]	62,5	Indentador	HB 2,5/62,5
Indentación	Dímetro huella [mm]	Dureza [HBW]	Observaciones
1	0,9419 ± 0,0001	86,4 ± 0,1	Solo se hizo una medición presencial, mediante un programa se incrementaba la escala en un microscopio y se media el diámetro. Los datos son muy similares a excepción del que se tomó presencial.
2	0,9386 ± 0,0001	87,0 ± 0,1	
3	0,9749 ± 0,0001	80,4 ± 0,1	
4	0,9413 ± 0,0001	86,5 ± 0,1	
5	1,0023 ± 0,0001	75,9 ± 0,1	
Promedio	0,9598 ± 0,0245	83,2400 ± 4,3107	
Desviación estándar	0,0280	4,9166	
Error asociado	0,0245	4,3107	

**Tabla 3. Resultados de prueba de dureza Vickers.**

Prueba de dureza Vickers				
Temperatura [°C]	20,5	Humedad [%]	60,5	
Material	Vidrio Arquitectónico	Tiempo de aplicación [s]	15	
Carga [kgf]	0,3	Indentador	Diamante 136°	
Indentación	Diagonal, d1 [μm]	Diagonal, d2 [μm]	Dureza [HV0,3]	Observaciones
1	32,37 ± 0,01	32,80 ± 0,01	523,9 ± 0,1	Por medio de un microscopio se veía la huella donde se medían las diagonales. Tenía forma de rombo. Los valores no de la dureza no se desviaban casi.
2	32,39 ± 0,01	32,17 ± 0,01	535,5 ± 0,1	
3	33,11 ± 0,01	32,76 ± 0,01	512,9 ± 0,1	
4	32,54 ± 0,01	32,89 ± 0,01	519,9 ± 0,1	
5	32,97 ± 0,01	32,66 ± 0,01	516,7 ± 0,1	
Promedio	32,676 ± 0,300	32,656 ± 0,249	521,780 ± 7,604	
Desviación estándar	0,342	0,284	8,674	
Error asociado	0,300	0,249	7,604	

**Tabla 4. Resultados de prueba de dureza Shore.**

Prueba de dureza Shore			
Temperatura [°C]	20,5	Humedad [%]	60,5
Material	Neopreno		
Carga [N]	10	Escala	A
Indentación	Dureza [HA]	Tiempo [s]	Observaciones
1	81,4 ± 0,1	1 ± 0,1	El indentador se encontraba a 90° del material. La máquina aplicaba una carga y enseguida arrojaba un valor de dureza. La punta estaba cortada por ser un material blando.
2	81,3 ± 0,1	1 ± 0,1	
3	80,8 ± 0,1	1 ± 0,1	
4	81,7 ± 0,1	1 ± 0,1	
5	81,1 ± 0,1	1 ± 0,1	
Promedio	81,260 ± 0,299		
Desviación estándar	0,336		
Error asociado	0,299		

A continuación, se encuentran los dibujos de las huellas de las indentaciones realizadas con su respectiva escala.

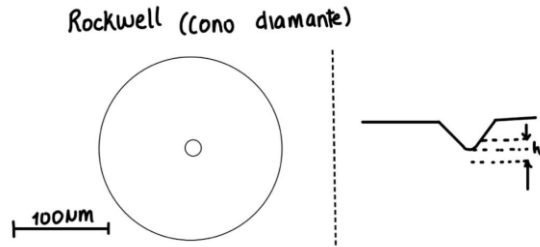


Figura 1. Ilustración de huella de dureza Rockwell 29HRC.

Shore

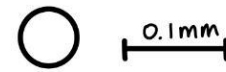


Figura 4. Ilustración de huella de dureza Shore A/81/1.

Este es el reporte de la dureza en escalas diferentes:

Tabla 5. Reporte de conversión de durezas.

Material	Vidrio Arquitectónico		Acero 4340		Neopreno	
	Dureza Inicial [HV 0,3]	Dureza Equivalente [HRC]	Dureza Inicial [HRC]	Dureza Equivalente [HV]	Dureza Inicial Shore	Dureza equivalente [HRC]
1	523,9	50,7	29,1	294,8	81,4	57,3
2	535,5	51,5	27,5	283	81,3	57,2
3	512,9	50	30,3	306,8	80,8	56,5
4	519,9	50,5	27,4	304	81,7	57,8
5	516,7	50,2	30,6	281,8	81,1	57
Promedio	521,78	50,58	28,98	294,08	81,26	57,16
Desviación Estándar	8,67	0,58	1,51	11,56	0,34	0,47

Figura 2. Ilustración de huella de dureza Brinell 83,2 HB 2,5/62,5.

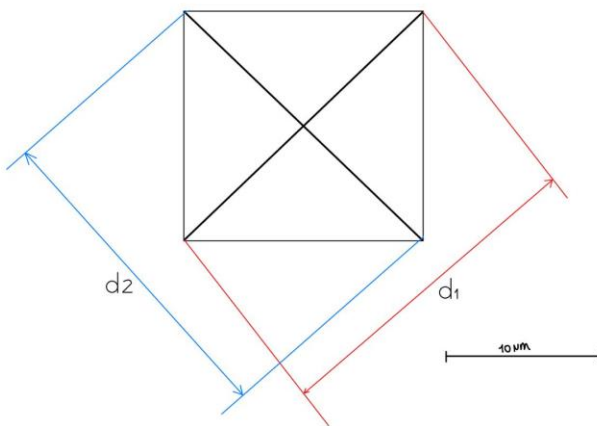


Figura 3. Ilustración de huella de dureza Vickers 521,8 HV 0,3/15.

## ANÁLISIS

Cada material tuvo un método muy diferente para medir su dureza. Se va a analizar la razón de estos distintos métodos y cómo se relaciona con sus propiedades.

De acuerdo con los resultados, al observar la tabla 5 podemos ver que la dureza del cerámico es mucho mayor que la del acero al convertirlo en su misma escala. Esto se debe a la estructura interna de los materiales ya que la dureza depende de factores como su plasticidad o rigidez elástica [6]. El acero 4043 tiene aproximadamente un 0,40% de contenido de carbono además de Níquel, cromo, silicio, azufre entre otros, [7] estos son elementos que se meten en los intersticios del material y forman carburos duros. Esto hace que las dislocaciones no se puedan mover tan fácilmente entonces aumentan su dureza y su resistencia mecánica por lo que método para medir su dureza por lo que necesita un cono de diamante para que el indentador no se deforme y ser capaz de medir su dureza. Sin embargo, el cerámico tiene una dureza equivalente incluso mucho mayor, esto se debe a que los materiales cerámicos son muy rígidos debido a que sus enlaces iónicos fuertes de diferentes cargas causa que haya una mayor distancia entre planos por lo que su vector de Burgers aumenta al igual que su esfuerzo de Peierls-Navarro, esto causa que sea más difícil mover las dislocaciones generando un módulo de elasticidad mucho más elevado [5] por ello también usan un indentador de diamante ya que si se usa, por ejemplo, una esfera esta se formaría mientras que el cerámico no. Por esta razón, el método de Vickers es adecuado ya que además

tiene una forma de pirámide por lo que se concentran esfuerzos y es más fácil penetrar el material con una carga relativamente baja, permitiendo medir huellas diminutas sin causar fractura del material que presenta una alta resistencia a la deformación. En cambio, el Acero 6063 es mucho más dúctil con un módulo de Young mucho más bajo de alrededor 70-80 MPa [9] caracterizado por su estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC) [5], lo que le proporciona alta ductilidad debido a la gran cantidad de planos de deslizamiento disponibles. El ensayo de dureza Brinell es el más adecuado para este material ya que con sus propiedades se sabe que la esfera no se deformará y se puede evidenciar la dureza en una escala mayor.

El neopreno es caucho sintético que es un elastómero con estructura amorfa [10], compuesto por largas cadenas poliméricas unidas por lo que le confiere alta elasticidad y baja dureza.

A diferencia de los materiales cristalinos, no presenta un arreglo atómico ordenado, lo que permite grandes deformaciones elásticas bajo carga [5]. Debido a esto, la prueba de dureza Shore A es la más adecuada, ya que utiliza un indentador con baja carga, midiendo la profundidad de penetración sin causar deformaciones permanentes.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos, se identificaron las diferentes escalas de dureza y su instrumentación, estas son Rockwell, Brinell, Vickers y Shore con sus respectivas normas.

La selección del método de dureza para cada material depende de sus propiedades mecánicas y estructurales:

El acero (AISI 4340) requieren Rockwell C debido a su estructura endurecida y alta resistencia.

Las aleaciones de aluminio (6063) requieren Brinell, ya que permite obtener una huella representativa en materiales más blandos.

Los cerámicos requieren Vickers, debido a su extrema dureza y fragilidad.

Los elastómeros requieren Shore A, ya que permite medir su resistencia a la penetración sin comprometer su integridad.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASTM International, ASTM E18-05 Standard Test Method for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials.
- [2] ASTM International, ASTM E10-07 Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials
- [3] ASTM International, ASTM C1327-03 Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics.
- [4] ASTM International, ASTM D2240-05 Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness.
- [5] W. D. Callister, Jr. and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering An Introduction. 10th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- [6] E. Morgan, “Todo lo que necesita saber sobre la Dureza de los materiales,” *rapiddirect*, [https://www.rapiddirect.com/es/blog/hardness-of-materials/#:~:text=La%20dureza%20de%20los%20materiales%20depende%20de%20varios%20factores%2C%20como,%2C%20resistencia%2C%20viscoelasticidad%20y%20viscosidad.\(accessed Feb. 27, 2025\).](https://www.rapiddirect.com/es/blog/hardness-of-materials/#:~:text=La%20dureza%20de%20los%20materiales%20depende%20de%20varios%20factores%2C%20como,%2C%20resistencia%2C%20viscoelasticidad%20y%20viscosidad.(accessed Feb. 27, 2025).)
- [7] G. Luz, “SAE 4340 propiedades (Mecánicas, Químicas Y Clasificación) 2022,” *Materiales (ES)*, [https://www.materiales.gelsonluz.com/2020/12/sae-4340-propiedades-mecanicas-quimicas.html \(accessed Feb. 27, 2025\).](https://www.materiales.gelsonluz.com/2020/12/sae-4340-propiedades-mecanicas-quimicas.html (accessed Feb. 27, 2025).)
- [8] Agenciaccanna, “Aluminio 6063: Características Y Aplicaciones,” *Coppermetal*, [https://www.coppermetal.com.br/es/blog/aluminio-6063-caracteristicas-y-aplicaciones/ \(accessed Feb. 27, 2025\).](https://www.coppermetal.com.br/es/blog/aluminio-6063-caracteristicas-y-aplicaciones/ (accessed Feb. 27, 2025).)
- [9] “Aluminio 6063,” *Alloys International Inc*, [https://alloysintl.com/es/inventory/aluminum-alloys-supplier/aluminum-6063/ \(accessed Feb. 27, 2025\).](https://alloysintl.com/es/inventory/aluminum-alloys-supplier/aluminum-6063/ (accessed Feb. 27, 2025).)
- [10] B. Agency, “Elastómeros: Qué son y sus características,” *Erycop Palao*, [https://erycop.com/que-es-un-elastomero/ \(accessed Feb. 27, 2025\).](https://erycop.com/que-es-un-elastomero/ (accessed Feb. 27, 2025).)