

**DETERMINACIÓN DE DUREZA USANDO EL MARTILLO SCHMIDT EN RIPIOS
DE PERFORACIÓN**

ALEJANDRA ARIZA GARCÍA

JORGE ALEJANDRO SARMIENTO GALINDO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

**DETERMINACIÓN DE DUREZA USANDO EL MARTILLO SCHMIDT EN RIPIOS
DE PERFORACIÓN**

ALEJANDRA ARIZA GARCÍA

JORGE ALEJANDRO SARMIENTO GALINDO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Petróleos

Director

ZULY HIMELDA CALDERÓN CARRILLO - Ph.D en Ingeniería química

Codirector

NESTOR FERNANDO SAAVEDRA- M.Sc. en Ingeniería de petróleos

JENNY MABEL CARVAJAL - M.Sc. en Ingeniería de hidrocarburos

JHOAO VILLABONA CAMACHO- Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS

ESCUELA INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

BUCARAMANGA

2018

Avalado por el grupo de Estabilidad de pozo en el marco del Acuerdo de Cooperación AC. 18 derivada del Convenio 5222395 entre la Universidad Industrial de Santander y ECOPETROL S.A. – Instituto Colombiano del Petróleo



DEDICATORIA

A Dios, por el gran regalo de vivir y sus infinitas bendiciones a lo largo de todo el camino.

*A mis padres, **Ketty y Arnoldo**, los motores de mi vida y mi apoyo incondicional en cada paso que doy. Todo esto es posible gracias a ustedes. Me siento muy afortunada de ser su hija.*

*A mi hermano **Cristian**, por querer siempre lo mejor para mí y estar presente con sus valiosos consejos.*

A mis familiares, en especial a mis abuelos, gracias por todo el cariño y apoyo.

*A **Jorgillo**, compañero de vida y compañero en este proyecto, por no desistir cuando todo se tornaba gris. Hoy podemos decir: ¡Lo logramos!... Gracias por el amor, la paciencia y dedicación.*

*Y finalmente a **mis amigos y seres queridos**, especialmente a Angie, "José" y Dilan, quienes estuvieron presentes desde el inicio de esta experiencia y fueron incondicionales, de esas amistades para toda la vida. Gracias por todas las risas y momentos vividos.*

Alejandra Ariza García

DEDICATORIA

En primer lugar, le dedico este logro, a mi hermosa madre Ana María, por tu ejemplo, por creer en mí, por brindarme todo tu cariño, porque siempre me hiciste sentir capaz de hacer cualquier cosa recordándome que siempre estarías ahí, apoyándome en todo momento, este logro es por ti y para ti, gracias mamita linda...

También quiero dedicarlo a mi familia, por su ejemplo de unidad, su muestra cariño constante, gracias a ustedes soy lo que soy, y he sabido entender el verdadero significado de la felicidad

A ti, mi bonita, “mi motcillini”, por tu amor tan puro, por tu tolerancia en los momentos más necesarios, por enseñarme tanto, porque contigo he vivido momentos de felicidad perfecta que serán inolvidables para mí, gracias amor, porque además de esto fuiste mi compañera en este proyecto, el cual fue posible sacarlo adelante gracias a tu esfuerzo y dedicación ...

A mis amigos, por todas las experiencias compartidas que aportaron a mi formación personal y profesional...

A Doña Nelly y Daniel, por su valiosa y agradable compañía durante mi estadía en Bucaramanga...

Jorge Alejandro Sarmiento Galindo

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos cordialmente a:

Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozos, por abrirnos las puertas y permitir nuestra formación como investigadores.

Doctora Zuly Calderón Carrillo, directora de este proyecto, por su asesoría y consejos durante su realización.

M.Sc. Jenny Mabel Carvajal, directora del laboratorio de mecánica de rocas del ICP, por su orientación y sus enseñanzas durante la realización de los ensayos experimentales.

M.Sc. Nestor Saavedra, por su compromiso y apoyo con la investigación.

Jhoao Villabona, químico UIS, por confiar en nosotros para la elaboración de este proyecto y por su apoyo durante todo el proceso.

Miguel Palencia, ingeniero mecánico UIS, por compartirnos sus conocimientos y permitirnos hacer parte de la curva de aprendizaje desarrollada en su investigación.

La **Universidad Industrial de Santander** y la **Escuela de Ingeniería de Petróleos**, por contribuir a nuestra formación como profesionales de calidad y personas éticas.

TABLA DE CONTENIDO

<i>INTRODUCCIÓN</i>	17
<i>1. MARCO TEÓRICO</i>	19
1.1 Propiedades de las rocas	19
1.1.1 La elasticidad en las rocas	19
1.1.2 La medición de la dureza en rocas y su importancia ingenieril.....	21
1.1.3 El Esfuerzo Compresivo Uniaxial (<i>Uniaxial Compresive Strenght-UCS</i>) y su importancia ingenieril.....	23
1.2 Determinación de propiedades de roca mediante técnicas de impacto y transmisión de ondas	26
1.2.1 Martillo esclerométrico Schmidt	28
1.2.2 Principio de funcionamiento.....	29
1.2.3 Tipos de martillos Schmidt.....	33
1.3 Procedimientos prueba de dureza con el martillo Schmidt.....	36
1.3.1 Correlaciones con las propiedades mecánicas	39
1.4 Los ripios de perforación en la cualificación de propiedades de rocas en la ingeniería de petróleos	41
<i>2. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE NÚMERO DE REBOTE USANDO EL MARTILLO SCHMIDT EN NÚCLEOS DE CEMENTO</i>	43
2.1 Diseño experimental	44
2.2 Preparación de muestras.....	47
2.3 Métodos de prueba ensayados.....	49
2.4 Área de toma de datos	49
2.5 Metodología para el uso del martillo Schmidt tipo L	50
2.5.1 Recomendaciones previas.....	51
2.5.2 Preparación de la prueba.....	51
2.5.3 Procedimiento de la prueba	52
2.6 Materiales.....	52
2.6.1 Martillo Schmidt.....	52

2.6.2 Soporte para el martillo Schmidt	53
2.7 Análisis de resultados.....	54
2.7.1 Determinación de espesores críticos.....	54
2.7.2 Selección de la metodología para la investigación	56
3. <i>VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE FOWELL & SMITH</i>	59
3.1 Diseño experimental	59
3.2 Preparación de la muestra	60
3.3 Método	61
3.4 Materiales.....	61
3.5 Análisis de resultados.....	62
4. <i>FACTIBILIDAD DE LA MEDICIÓN DE NÚMERO DE REBOTE EN RIPIOS DE CEMENTO</i>	64
4.1 Diseño experimental	64
4.1.1 Diseño experimental para pruebas en núcleos.....	66
4.1.2 Diseño experimental para pruebas en ripios	68
4.2 Preparación de muestras.....	68
4.2.1 Núcleos con diferentes relaciones arena: cemento	68
4.2.2 Ripios de cemento compactados.....	69
4.3 Materiales y equipos	71
4.3.1 Prensa.....	71
4.3.2 Molino de mortero	72
4.4 Análisis de resultados.....	73
4.4.1 Análisis de resultados en núcleos de cemento	73
4.4.2 Análisis de resultados en ripios de cemento	76
4.4.3 Relación entre el número de rebote en núcleos y en ripios de cemento compactados. ..	78
5. <i>CONCLUSIONES</i>	80
6. <i>RECOMENDACIONES</i>	82
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	83
<i>ANEXOS Y APENDICES</i>	87

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Caracterización de la elasticidad en las rocas.</i>	20
<i>Figura 2. Componentes del Martillo Shmidt.</i>	30
<i>Figura 3. Descripción secuencial del funcionamiento del Martillo Schmidt.</i>	31
<i>Figura 4. Correlación entre valores de NR según energía en cada tipo de Martillo.</i>	34
<i>Figura 5. Corrección de las medidas de NR según la dirección de impacto.</i>	35
<i>Figura 6. Diagrama de flujo de medición de número de rebote en núcleos de diferente espesor.</i>	43
<i>Figura 7. Estructura del set pruebas.</i>	47
<i>Figura 8. Espesor de los núcleos preparados</i>	48
<i>Figura 9. Malla de distribución de los puntos de prueba.</i>	50
<i>Figura 10. Martillo Schmidt tipo L y soporte para disparo perpendicular (vista lateral)</i>	53
<i>Figura 11. Martillo Schmidt tipo L y soporte para disparo perpendicular. (vista frontal)</i>	53
<i>Figura 12. Representación de medidas de número de rebote versus espesor de la muestra.</i>	55
<i>Figura 13. Set de pruebas para elaboración de R & R</i>	60
<i>Figura 14. Yunque para elaboración de análisis R&R</i>	61
<i>Figura 15. Diagrama de flujo de medición de número de rebote en ripios de cemento.</i>	65
<i>Figura 16. Estructura del set de pruebas en núcleos.</i>	67
<i>Figura 17. Muestras de ripios de cemento en tamaño de grano</i>	70
<i>Figura 18. Muestra de ripios de cemento compactada mecánicamente.</i>	71
<i>Figura 19. Prensa hidráulica</i>	72
<i>Figura 20. Molino de mortero.</i>	72
<i>Figura 21. Comportamiento del NR en función de la relación arena:cemento.</i>	75
<i>Figura 22. Comportamiento del Número de rebote en ripios compactados.</i>	78
<i>Figura 23. Relación entre NR medido en núcleos y NR medido en ripios compactados.</i>	79

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson para varios minerales.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2. Escala de Mohs.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 3. Principales procedimientos en la técnica Schmidt Hammer Test - SHT.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 4. Correlaciones entre UCS y valor de rebote R.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 5. Correlaciones entre E_i y valor de rebote R.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 6. Variables respuesta de medición.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 7. Factores experimentales por variar en el experimento.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 8. Definición del tipo de diseño experimental.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 9. Características del martillo Schmidt tipo L.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 10. Presentación de datos para análisis de espesor crítico.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 11. Espesor crítico para cada método.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 12. Resumen estadístico de medidas (Análisis de espesor crítico).....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 13. Análisis ANOVA de dos factores.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 14. Conversión de números de rebote a deformación.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 15. Variable respuesta del experimento en núcleos.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 16. Variables factor del experimento en núcleos.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 17. Tipo de diseño experimental para núcleos.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 18. Relaciones arena: cemento preparadas.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 19. Medidas de número de rebote en núcleos.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 20. Resumen estadístico de medidas de NR en núcleos.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 21. Análisis ANOVA para núcleos.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 22. Valores de Número de rebote en muestras de ripios compactadas.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 23. Número de rebote promedio para cada muestra de ripios compactados.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 24. Resumen estadístico de datos tomados en ripios compactados.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 25. Análisis ANOVA en ripios compactados.....</i>	<i>77</i>

LISTA DE ANEXOS

<i>Anexo A. Hojas de cálculo de la Norma ASTM F1469-11 para la realización del R & R en instrumentos de prueba no destructivos.</i>	<i>87</i>
--	-----------

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN DE DUREZA USANDO EL MARTILLO SCHMIDT EN RIPIOS DE PERFORACIÓN*

AUTORES: ALEJANDRA ARIZA GARCÍA
JORGE ALEJANDRO SARMIENTO GALINDO[†]

PALABRAS CLAVES: Dureza, número de rebote, martillo Schmidt, ripios de perforación.

El objetivo de este trabajo de grado es proponer y analizar una metodología que permita determinar dureza en ripios utilizando un martillo Schmidt tipo L. Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en el proyecto, primero se realizó una revisión bibliográfica de las metodologías existentes para la medición de dureza usando el martillo Schmidt, segundo se estructura un set de experimentos en el que mediante un análisis estadístico ANOVA se selecciona el método de Fowell & Smith como el más adecuado para las pruebas de dureza en núcleos sintéticos. Posteriormente, este método es validado mediante un análisis de repetibilidad y reproducibilidad. Y finalmente, se propone una metodología para determinar dureza en ripios de cemento utilizando el método de Fowell and Schmidt.

Los resultados del estudio permitieron observar que, con la metodología planteada, la medida de número de rebote tanto en núcleos como en ripios de cemento presenta una tendencia con un comportamiento similar, concluyendo que la medida en los ripios de cemento puede ser correlacionada a una medida real, mediante una correlación desarrollada con un $r^2=0,89$.

Estos resultados comprueban el potencial de los ripios sintéticos como fuente de información para la caracterización mecánica de la roca simulada y abre la puerta a investigaciones futuras en las que se pueda determinar el número de rebote en ripios de perforación, haciendo uso de la metodología desarrollada, permitiendo caracterizar rocas de yacimiento en un tiempo reducido.

* Trabajo de grado

[†] Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: PhD. Zuly Calderón Carrillo. Codirectores: Químico. Jhoao Alexander Villabona Delgado. M. Sc. Néstor Fernando Saavedra. M. Sc. Jenny Mabel Carvajal.

ABSTRACT

TITLE: SCHMIDT HARDNESS DETERMINATION ON DRILL CUTTINGS

AUTHORS: ALEJANDRA ARIZA GARCÍA
JORGE ALEJANDRO SARMIENTO GALINDO*

KEYWORDS: Hardness, Schmidt hammer rebound, drill cuttings.

The main objective of this work is to propose and analyze a methodology that allows to determine hardness in cuttings using a type L Schmidt hammer. In order to comply with the objectives proposed in the project, a bibliographic review of the existing methodologies for the measurement of hardness using the Schmidt hammer was first carried out. Then, a set of experiments is structured in which by means of ANOVA statistical analysis the Fowell & Smith method is selected as the most suitable for hardness tests in synthetic cores. Subsequently, this method is validated through a repeatability and reproducibility analysis. And finally, a methodology is proposed to determine hardness in cuttings of synthetic cores using the method of Fowell and Schmidt.

The results of the study allowed observing that with the proposed methodology, the measure of the rebound number in both cores and cuttings of synthetic cores presents a trend with a similar behavior, concluding that the measurement in the cuttings can be correlated to a real measure, through a correlation developed with a $r^2 = 0.89$.

These results verify the potential of synthetic cuttings as a source of information for the mechanical characterization of simulated rock and open the door to future research in which the rebound number in drill cuttings can be determined, using the methodology developed, allowing to characterize reservoir rocks in a reduced time.

* Physicochemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Director: PhD. Zuly Calderón Carrillo. Codirectors: Químico. Jhoao Alexander Villabona Delgado. M. Sc. Néstor Fernando Saavedra. M. Sc. Jenny Mabel Carvajal.

INTRODUCCIÓN

Los problemas de estabilidad de pozos están relacionados con la respuesta mecánica que tienen las formaciones al ser sometidas a una variación en la condición de los esfuerzos, cambios que generalmente son provocados durante la perforación, producción o la estimulación de un pozo. Esta respuesta depende de las propiedades mecánicas de las rocas perforadas, las cuales son principalmente estudiadas a partir de registros eléctricos o de pruebas de laboratorio realizadas en núcleos obtenidos de corazonamientos; estos métodos no siempre permiten la caracterización completa del yacimiento, ya sea debido a la baja resolución de muestreo o por altos costos, respectivamente.

El Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) hizo adquisición de un instrumento de laboratorio llamado Martillo Schmidt, el cual no ha comenzado a ser utilizado. Con el fin de aprovechar este recurso, la presente investigación busca implementar una metodología para su uso en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, además de emplearlo como una fuente de información cualitativa y cuantitativa de las propiedades mecánicas de núcleos, al permitir obtener medidas de dureza superficial y asimismo permitir una visión general de la heterogeneidad de la muestra. El martillo Schmidt tiene la ventaja de ser un método rápido y económico de caracterización de parámetros mecánicos, además de ser una prueba no destructiva.

Teniendo en cuenta que este estudio es exploratorio y presenta una primera aproximación del uso del martillo Schmidt en ripios, es importante aclarar que las pruebas realizadas en el desarrollo de esta investigación fueron sobre muestras sintéticas de roca preparadas mezclando agua, arena y cemento, ya que así se simula un medio homogéneo con características similares a las de una roca en condiciones naturales y además estas muestras permiten reducir la incertidumbre que

presentarían las medidas al ser tomadas en rocas naturales debido a su heterogeneidad, características mineralógicas u otras fuentes de variación.

Así pues, analizar el comportamiento del número de rebote en muestras sintéticas obteniendo resultados consistentes abre la puerta para que la metodología desarrollada en el presente proyecto sea extrapolada a rípios de perforación y abordar su uso como fuente potencial de información para la caracterización mecánica de yacimientos.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se realizó en primera instancia, una revisión de las propiedades mecánicas de las rocas y su importancia ingenieril, haciendo un enfoque en la dureza superficial. Seguido a esto, se hizo un reconocimiento del martillo Schmidt, estudiando sus características, principio de funcionamiento, tipos de martillo, las metodologías existentes en la literatura para la realización de la prueba de dureza con el martillo Schmidt y las correlaciones planteadas por diferentes autores, entre la medida de número de rebote y propiedades mecánicas de las rocas.

1.1 Propiedades de las rocas

1.1.1 La elasticidad en las rocas

Para autores como Canoba & Fraga (2010), un requisito previo en cualquier problema de diseño que involucra materiales naturales es la suposición de que cierta simplificación en las propiedades de los materiales es necesaria para ayudar al análisis matemático.

La elasticidad es una propiedad de un material ideal y es posible relacionarla con los materiales que se utilizan en ingeniería, así, por ejemplo, es posible poner de relieve las rocas en mayor o menor grado y en función de cuanto estos materiales se acercan al ideal. Prácticamente esto depende de tres factores principales: homogeneidad, isotropía y continuidad, cada uno de los cuales pueden ser definidos dentro de ciertos límites.

Para definir cualquier material elásticamente se requieren dos de las cinco constantes elásticas disponibles: E_i (módulo de elasticidad), ν (coeficiente de Poisson), K (módulo de compresibilidad), G (módulo de rigidez) y γ (constante de Lamé). En la teoría elástica las más convenientes son G y γ , pero en los problemas de ingeniería donde se necesita la medida de la

relación directa de una roca a una fuerza, se requiere una medida directa, E_i y v son las más comúnmente citadas. A pesar de ello en la mayoría de las rocas cuasi y semi-elásticas, todas las constantes elásticas pueden ser relacionadas con buen grado de precisión.

En este caso, rocas de menor elasticidad, pueden ser las rocas ígneas de grano grueso y sedimentos compactados de grano fino, con baja porosidad y una razonable cohesión, por lo que se las denomina rocas semi-elásticas. Estas tienen una relación tensión / deformación en la cual la pendiente de la curva (equivalente al módulo de elasticidad bajo condiciones de cargas definidas) decrece con el incremento de la tensión, como lo muestra la figura 1.

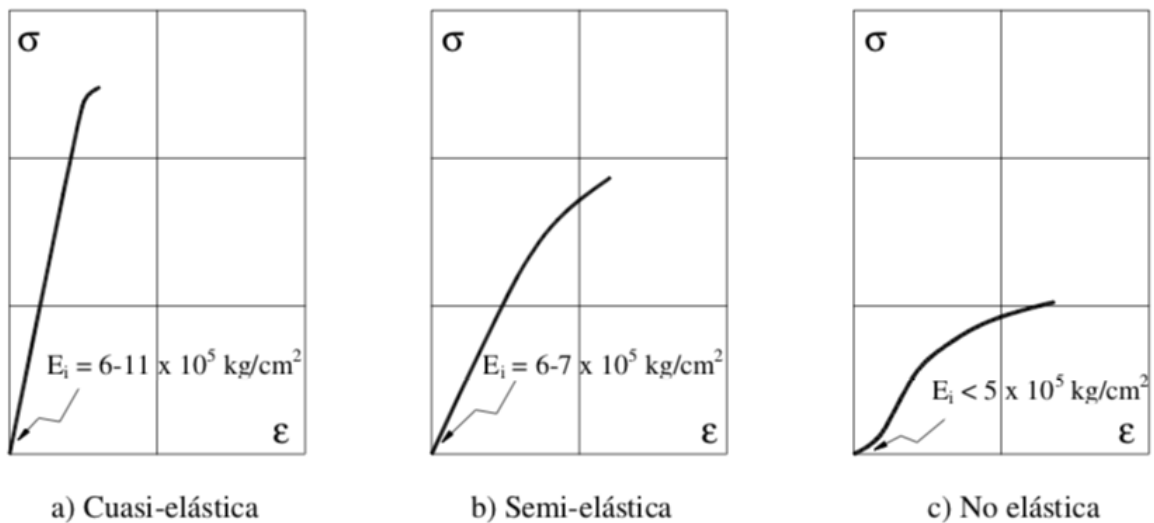


Figura 1. Caracterización de la elasticidad en las rocas.

Fuente: (CANOBA & FRAGA, 2010)

Claramente, las propiedades elásticas de las rocas varían en función de su composición mineralógica, especialmente, el módulo de elasticidad, el cual cambia en grandes términos, incluso para rocas con naturaleza geológica parecida, tal como lo expone una lista de los valores de E_i y v observables en la Tabla 1.

Es por lo tanto posible estimar con experiencia, el módulo de elasticidad de cualquier roca por medio de ensayos físicos y empíricos simples, que conducen a valores de $\pm 20\%$ con relación a su valor real. Para Canoba & Fraga (2010) esto es suficientemente preciso para la mayoría de los cálculos de diseño que incluyan rocas.

Tabla 1. Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson para varios minerales.

Roca	E (Kg/cm²)	V
Granito	(2-6) (10 ⁵)	0,25
Micro-Granito	(3-8) (10 ⁵)	0,25
Sienita	(7-10) (10 ⁵)	0,25
Diorita	(2-6) (10 ⁵)	0,25
Dolerita	(8-11) (10 ⁵)	0,25
Gabro	(7-11) (10 ⁵)	0,25
Basalto	(6-10) (10 ⁵)	0,25
Arenisca	(0,5-8) (10 ⁵)	
Lutita	(1-3,5) (10 ⁵)	
Arcilla consolidada (Argilita)	(2-5) (10 ⁵)	
Caliza	(1-8) (10 ⁵)	
Dolomita	(4-8,4) (10 ⁵)	
Carbón	(1-2) (10 ⁵)	

Fuente: Tomado de (CANOBA & FRAGA, 2010)

1.1.2 La medición de la dureza en rocas y su importancia ingenieril

En 1822, el mineralogista austriaco Friedrich Mohs ideó una balanza basada en la capacidad de un mineral para rayar a otro. Él colocó 10 minerales en orden de lo más suave a lo más duro, dando un valor relativo de dureza de 1 al mineral más suave, y 10 a lo más duro. Cada mineral en la escala raya el que está debajo (el número más bajo) pero no el que está sobre él (el número más alto). Esto se conoce como la escala de dureza de Mohs, y sigue siendo uno de los mejores métodos

prácticos para estimar la dureza de un mineral. Mohs designó diez minerales para su escala del más duro (10) al más suave (1) (enumerados con objetos de dureza equivalente):

Tabla 2. Escala de Mohs

• Escala	• Mineral
• 10	• Diamante
• 9	• Corindón
• 8	• Topacio
• 7	• Cuarzo
• 6	• Ortoclasa
• 5	• Apatita
• 4	• Fluorita
• 3	• Calcita
• 2	• Yeso
• 1	• Talco

Fuente: Adaptado de (Geology - rocks and minerals, s. f.)

En efecto, la dureza se ha catalogado como una medida de la facilidad con la que se puede rayar una superficie lisa de un mineral, o de su resistencia a la abrasión (Andersen, Duncan, & McLin, 2012).

La importancia de la medición de la dureza no sólo radica en la posibilidad de caracterizar un determinado material, sino la posibilidad de seleccionar minerales o elementos que resistan posibles interacciones físicas como erosión o perforación. En este caso, métodos tales como, la determinación de dureza por rebote proporciona un medio para la clasificación rápida de la caracterización de la dureza de la roca para fines de ingeniería, diseño y construcción, mapeo

geotécnico de grandes aberturas subterráneas en roca, o reporte de la descripción física del núcleo rocoso. Para estos casos, el número de dureza de rebote, H_r , puede servir en una variedad de aplicaciones de ingeniería que requieren la caracterización del material de roca. Estas aplicaciones incluyen, según la (ASTM, 2006) la predicción de las tasas de penetración para las perforadoras de túneles o perforadoras de pozos petroleros, la determinación de la calidad de la roca para fines de construcción y la predicción de la erosibilidad hidráulica de la roca.

1.1.3 El Esfuerzo Compresivo Uniaxial (*Uniaxial Compressive Strength*-UCS) y su importancia ingenieril

Las actividades de perforación y producción causan cambios en los esfuerzos ejercidos sobre la roca yacimiento y sobre los estratos de sobrecarga. Estas rocas exhiben litologías variables, y cada tipo reacciona a los esfuerzos de manera diferente. Las compañías petroleras deben, por lo tanto, comprender las interacciones existentes entre la estructura interna de las rocas, las presiones locales, la temperatura y otras condiciones; y la geomecánica es clave para lograr este entendimiento. Partiendo de lo anterior, el Esfuerzo Compresivo Uniaxial se define como una medida de la resistencia de un material a la compresión uniaxial, dicho de otro modo, UCS es el esfuerzo de compresión axial máximo que puede tolerar una muestra cilíndrica recta de material antes de fracturarse (Cook & Frederiksen, 2008). Esta propiedad se conoce también como la resistencia a la compresión no confinada de un material porque el esfuerzo de confinamiento se fija en cero.

Con base en esta información, a pesar de que la principal fuente de datos para encontrar propiedades geofísicas son los datos registrados en campo (registros de pozo / MWD, Sísmica, VSP y varias pruebas de pozo), con estos instrumentos no miden directamente los parámetros que

se requieren para hacer a la roca un análisis mecánico. Por ejemplo, la resistencia de la roca no puede ser medida a partir de registros (Mateus, 2004). No obstante, si se aplica un procedimiento adecuado de interpretación es posible tener una muy buena aproximación de la resistencia de la formación perforada.

En la Ingeniería de Petróleos, la Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS) de las rocas puede determinarse a través de técnicas como la compresión inconfiada y la compresión triaxial. Sin embargo, Mateus (2004) explica que para desarrollar este tipo de pruebas se presentan varios inconvenientes de tipo técnico y operativo, tales como la inexistencia, usualmente de material corazonado para desarrollar las pruebas sobre probetas de geometría adecuada o el alto impacto causado en la perforación pues el realizar una operación de corazonamiento (específicamente, tareas como viajes de tubería lo cual representa un aumento en el tiempo de exposición), sucesos que permiten incrementos en la vulnerabilidad a la inestabilidad de las paredes del pozo así como incrementos propios en los costos generales por detener la operación de perforación.

Entre las posibilidades de medir el UCS, autores como Yagiz (2009) ponen de relieve la prueba de martillo Schmidt, el cual es un método no destructivo que puede usarse tanto en el laboratorio como en el campo para proporcionar una medida rápida y relativamente económica de la dureza de la roca. El estudio de investigación de este autor encontró una relación entre la dureza de Schmidt y el módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión uniaxial y las propiedades de índice de nueve tipos de roca, incluidos el travertino, la piedra caliza, la piedra caliza dolomítica y el esquisto.

Las ecuaciones empíricas desarrolladas indicaron que los valores de rebote de dureza de Schmidt tienen una relación confiable con la resistencia a la compresión uniaxial de la roca ($r = 0.92$). Comparando los resultados con los reportados por otros investigadores, Yagiz (2009) concluyó que ninguna relación individual puede considerarse confiable para todos los tipos de rocas. De hecho, a pesar de que las ecuaciones desarrolladas en este estudio pueden ser útiles en una etapa preliminar de diseño, deben usarse con precaución y solo para los tipos de rocas especificados.

En definitiva, la resistencia a la compresión uniaxial se considera uno de los parámetros más importantes en la caracterización del material de roca en la práctica de la ingeniería geológica y de petróleo. Autores como Çobanoğlu & Çelik (2008) investigaron las correlaciones entre la resistencia a la compresión uniaxial y el índice de carga puntual, la velocidad de la onda P y el número de rebote de la dureza Schmidt junto con los efectos del tamaño del diámetro del núcleo. Se obtuvieron un total de 150 muestras de núcleo en cinco diámetros diferentes (54, 48, 42, 30 y 21 mm) de arenisca, piedra caliza y mortero de cemento. Diez muestras saturadas en cada diámetro con una longitud con relación de diámetro 2: 1; además, se prepararon a partir de cada uno de los tres materiales. En este caso, las mejores correlaciones se encontraron entre la resistencia a la compresión uniaxial y la carga puntual o los valores del martillo Schmidt, es importante aclarar que la relación más cercana se observó para los núcleos de 48 mm de diámetro.

De este modo, en procedimientos ingenieriles tan importantes como la perforación petrolera, si bien los esfuerzos tectónicos locales y regionales desempeñan un rol central en la deformación de las rocas, según autores como Cook & Frederiksen (2008) también deben considerarse otros factores de fondo de pozo, tales como la presión de poro, el peso del lodo y las fluctuaciones de la

presión, la temperatura y la química de fondo de pozo, por sus claras contribuciones a la relación entre los esfuerzos locales y las deformaciones.

En este sentido, los posibles efectos de estos factores pueden ser atemperados además por las propiedades texturales únicas de la litología local, tales como el tamaño y la distribución de los granos y poros que constituyen el esqueleto de la roca, la mineralogía y la composición de los cementos diagenéticos. Dada la diversidad de reacciones que tienen lugar ante la presencia de esfuerzos, es crucial que un operador sepa todo lo posible acerca de las rocas que rodean un pozo y las condiciones a las que dicho pozo será sometido.

De hecho, Mateus (2004) afirma que en las zonas tectónicamente activas como el Piedemonte Llanero Colombiano, los esfuerzos horizontales tienen diferente magnitud presentándose lo que se conoce como anisotropía de esfuerzos. Esta información es importante tenerla en cuenta, ya que la anisotropía es precisamente la que respalda la dirección en la que se debe perforar el pozo y por consiguiente la respuesta de la roca ante la nueva condición de esfuerzos. Dicho de otro modo, de una buena caracterización mecánica de las formaciones a perforar dependerá el grado de inestabilidad que se tenga durante la perforación.

1.2 Determinación de propiedades de roca mediante técnicas de impacto y transmisión de ondas

En lo que concierne a los ensayos indirectos no-destructivos para la identificación de propiedades de rocas como el máximo esfuerzo uniaxial UCS, la dureza o el módulo de Young, se usan con más frecuencia al menos dos técnicas: los ensayos de impacto y los ensayos de transmisión de ondas.

En el primer caso, los ensayos de impacto miden la respuesta que ofrece la superficie del material rocoso a la acción del impacto de una masa metálica caída desde una altura determinada, que tras medir la altura de rebote de la masa se obtiene una idea de la integridad y la compacidad de la roca (Suárez, 2014). En este caso, el rebote de la masa es una medida de la respuesta de la roca.

Por su parte, los ensayos de transmisión de ondas resultan tener un similar principio, debido a que se mide otro tipo de respuesta de la roca. En este caso, las respuestas que se miden pueden ser de refracción, difracción o propagación de ondas; estas ondas pueden estar en posiciones variadas del espectro: desde ondas sonoras, de ultrasonido o electromagnéticas. En ambos grupos de tipos de ensayos, es siempre necesario tener alguna previa preparación del material, de al menos tener una superficie plana y algo pulida y limpia. Sin embargo, según Suarez (2014) dicha condición se cumple por lo general en el caso de rocas ornamentales, debido a que éstas se venden al mercado en forma de placas pulidas. Asimismo, entre los dos grupos de ensayos no destructivos, los ensayos de impacto emplean equipos más económicos comparando con los ensayos de propagación; y la calidad y cantidad de información que de éstos se obtiene son suficientes para dar una respuesta a la calidad del material que se estudia.

En consecuencia, entre las propiedades empíricas de la roca que son necesarias y que pueden determinarse mediante pruebas de impacto en la evaluación ingenieril se encuentra el número de dureza de rebote H_r , el cual se trata de un número adimensional que representa la dureza relativa determinada empíricamente del material rocoso u otra sustancia dura mediante el uso de un martillo de rebote. Según la ASTM (2006) el equipamiento mínimo necesario para esta determinación se basa en tres elementos:

- Martillo de rebote, que consiste en un pistón con resorte, o martillo, que se proyecta contra un yunque de metal en contacto con la superficie de la roca. En este caso, el martillo debe viajar con una velocidad reproducible y la distancia de rebote del pistón desde el émbolo de acero se mide en una escala lineal unida al marco del instrumento y se toma como una medida empírica de dureza de roca.
- Base de acero: una base de acero de una masa mínima de 20 kg para que las muestras estén bien sujetas. Especímenes de núcleo rocoso puede probarse en una cuna de acero con un mecanizado semicilíndrico ranura del mismo radio que el núcleo, o firmemente asentada en un acero V-block.
- Yunque de calibración: el bloque de calibración estándar utilizado para calibrar el martillo de rebote.
- Piedra abrasiva: una textura de grano medio de carburo de silicio o material equivalente.

Poniendo en consideración lo anterior, a continuación, se expone la principal técnica de rebote empleada en la actualidad mediante el Martillo Schmidt.

1.2.1 Martillo esclerométrico Schmidt

Desarrollado en 1948 por el ingeniero suizo Ernest Schmidt, el martillo Schmidt es un instrumento portátil y económico capaz de estimar la resistencia de la roca intacta con claras ventajas sobre las pruebas de laboratorio tradicionales (Schmidt, 1951).

Las pruebas de laboratorio consumen tiempo, son costosas y casi siempre están sujetas a sesgos debido a los efectos de la platina, la pérdida de integridad durante la extracción de muestras y la preparación, y la alteración de la muestra a partir de las condiciones ambientales. Por el contrario,

se puede realizar una gran cantidad de pruebas de martillo Schmidt no destructivas de forma rápida y eficiente en el laboratorio o en el campo. Los rangos significativos de dispersión típicamente se producen cuando se realizan muchas pruebas de martillo.

Estadísticamente, esto proporciona una excelente descripción de la homogeneidad de la masa rocosa y permite la determinación de grados realistas de confianza para incorporar en las evaluaciones de rendimiento del diseño.

1.2.2 Principio de funcionamiento

Se aplican principios de acción y reacción cuando se opera el martillo Schmidt, que se muestra en la figura 2. De esta forma, una cantidad constante de energía de resorte almacenada se imparte a través de una masa de martillo al émbolo, provocando que la masa rebote una distancia proporcional a la energía total absorbida por la superficie de impacto. La distancia de rebote se muestra en el indicador y se define como el "índice de rebote". El grado de rebote varía, dependiendo de las propiedades elásticas de la roca. Los estudios también muestran que una variedad de factores adicionales puede afectar los valores de índice determinados en el laboratorio y en el campo, incluidos los siguientes:

- Contenido de humedad de la superficie de impacto.
- Heterogeneidades en la superficie de la roca.
- Presencia de planos de estratificación, cavidades porosas y otras anomalías locales.
- Orientación del martillo Schmidt con respecto a la superficie al tomar la prueba.
- Tamaño de la superficie de prueba y dimensiones de la muestra.
- Duración y grado de envejecimiento de la superficie de prueba.

Para operar de esta forma, el martillo Schmidt está compuesto por una masa de acero, un vástago, una guía para la masa del martillo, un resorte de compresión y un resorte de impacto.

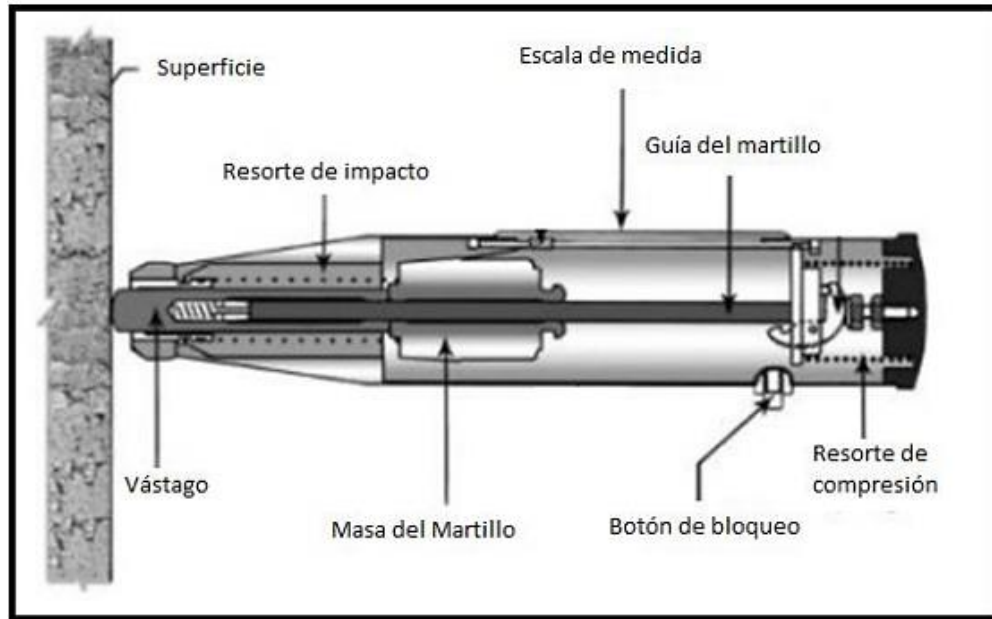


Figura 2. Componentes del Martillo Shmidt.

Fuente: Tomado de Rebound Hammer Testing Laboratory (2014)

En este orden de ideas, para realizar la prueba, el martillo es puesto perpendicular a la superficie de la muestra a impactar, este es presionado contra la superficie hasta que la masa del martillo es liberada, esta masa es guiada internamente hasta impactar con el vástago el cual transfiere la energía de impacto a la superficie, después del impacto la masa rebota indicando un porcentaje de la máxima elongación posible del resorte en una escala graduada entre 10 y 100 (Aydin, 2007). En la siguiente figura es posible observar el estado de los componentes del martillo Schmidt cuando se encuentra cargado, listo para disparar y después del disparo.

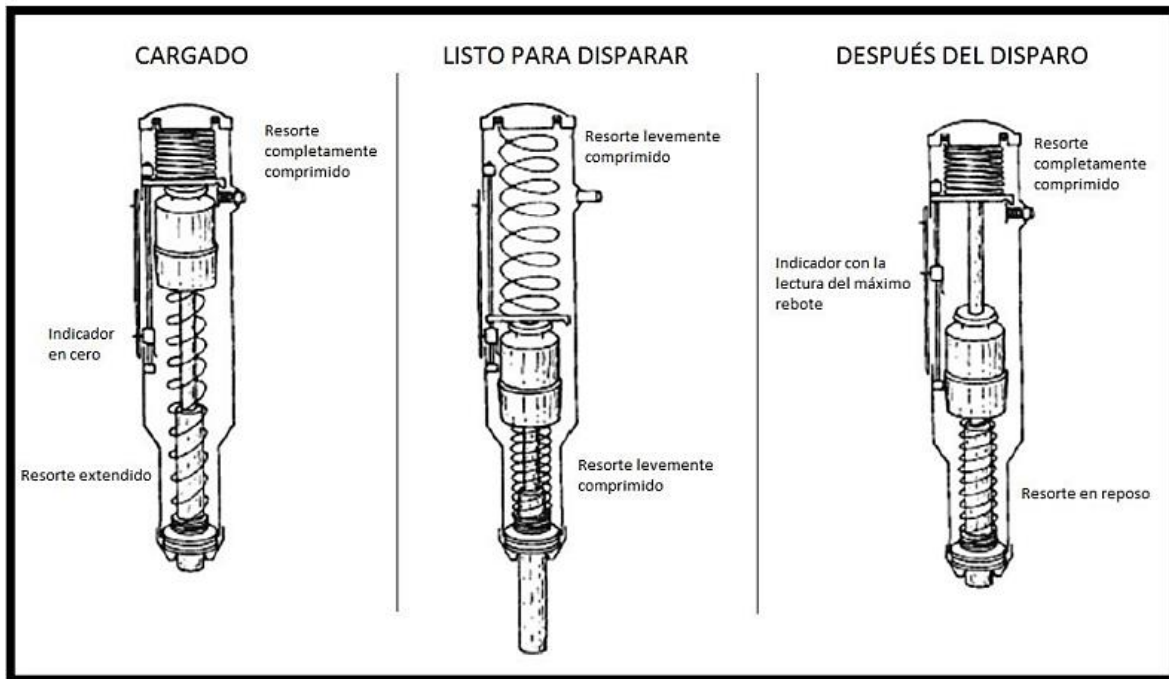


Figura 3. Descripción secuencial del funcionamiento del Martillo Schmidt.

Fuente: Tomado de Rebound Hammer Testing Laboratory (2014)

Después de revisar la literatura que describe la consistencia y confiabilidad de los datos de martillo Schmidt, Poole y Farmer (Poole, 1980) concluyeron que los valores de rebote tienden a aumentar y muestran una variación considerable durante los primeros tres a cuatro impactos individuales en un punto. Asimismo, autores como Haramy & DeMarco, (1985) agregaron que los resultados más consistentes se obtienen al seleccionar los valores pico de al menos cinco impactos discretos en un punto. Por el contrario, Kazi (1980), en un estudio empírico que comparó la abrasión de Los Ángeles y las pruebas de martillo Schmidt, afirmó que se deberían tomar al menos 35 valores de índice de rebote en cada punto los 10 valores más bajos se descartan, y el índice de rebote promedio se calcula a partir de las 25 lecturas restantes.

El ensayo con los martillos tipo Schmidt (SHT: Schmidt Hammer Test) es un método de pruebas no destructivas donde la lectura que se obtiene se denomina número de rebote Schmidt. Ésta representa una medida de la elasticidad a la colisión entre dos cuerpos con la raíz cuadrada de la relación de la altura de rebote (h) entre la altura de caída de la masa (H). A esa variable se la denomina también coeficiente de restitución.

Es importante destacar que los valores de esta variable pueden variar de 10 % a 100 % en el martillo Schmidt, donde las colisiones elásticas perfectas tienen un valor R de 100 % y las colisiones inelásticas totales, un valor de 10 %.

$$R = \left(\frac{h}{H}\right)^{0,5} \quad (\text{Ec. 1})$$

Es importante tener presente que las determinaciones de propiedades de la roca mediante pruebas de impacto son altamente sensibles a factores posicionales, físicos y químicos.

De hecho, a menos que la dirección de impacto del martillo permanezca perpendicular a la superficie de prueba, existen peligros de deslizamiento por fricción de la punta del vástago, eliminación del material por astillado, lo cual aumenta la incertidumbre de la medida. Por esta razón, se recomienda usar un tubo de guía que permita mantener el ángulo entre el martillo y la superficie para asegurar que la desviación no exceda $\pm 5^\circ$.

En esta parte, autores como Sanchez & Tarranza (2015) afirman que las lecturas de rebote son sensibles a las propiedades cercanas a la superficie, lo que arroja dudas sobre la precisión de la prueba al estimar la resistencia a la compresión. De esta manera, los factores que influyen en la dureza de la superficie incluyen la suavidad de la superficie, la edad de la muestra, el contenido de humedad, la carbonatación, la presencia de agregados, la presencia de huecos de aire, la temperatura y la calibración del martillo de rebote. Debido a estos factores, se ha demostrado que

las mediciones del martillo de rebote no son únicas y el resultado de la prueba depende de las características de la muestra probada, que a su vez varía incluso con la manipulación y previa preparación de la prueba.

1.2.3 Tipos de martillos Schmidt

Es necesario diferenciar al menos dos tipos de instrumentos estándares, comerciales y disponibles: el martillo de rebote Schmidt de concreto (Tipo N) y el martillo de rebote Schmidt de rocas (Tipo L). Éstos se diferencian según la energía de impacto disponible. Si se usa el martillo de rebote Schmidt Tipo N se tiene disponible una energía de impacto es de 2,207 Nm y se designa su respuesta con RN.

En efecto, para rocas se prefiere el empleo del martillo de rebote Schmidt Tipo L debido a que no daña la roca durante el ensayo ya que, tiene una energía de impacto de 0,735 N m, tres veces menos energía que el Tipo N, en este caso, se designa la respuesta con RL. Las diferencias entre las lecturas RL y RN para un mismo material rocoso fueron observadas por varios autores, por ejemplo (Kennedy & Dickson, 2006).

Autores como Ayday & Göktan (1992) aseguran que debido a que la disponibilidad del martillo Schmidt Tipo N es mayor a la del martillo Tipo L, se propusieron correlaciones entre los valores RN y que dan valores esperados con un 95 % de probabilidad RL. Para el método de Poole & Farmer (1980) se proponen las siguientes ecuaciones (posición horizontal y vertical del martillo, respectivamente) siendo e el error estándar que se comete al estimar cualquier valor:

$$R_L = 1,180 + 0,717R_N; \quad e = 3,3$$

$$R_L = 1,838 + 0,813R_N; \quad e = 2,9$$

No obstante, se recomienda, además, obtener otras correlaciones para otras inclinaciones de ensayo del martillo, al menos para $\pm 45^\circ$, y el tipo de roca con el que se esté trabajando en el sitio de investigación. Estas correlaciones se grafican en la figura a continuación:

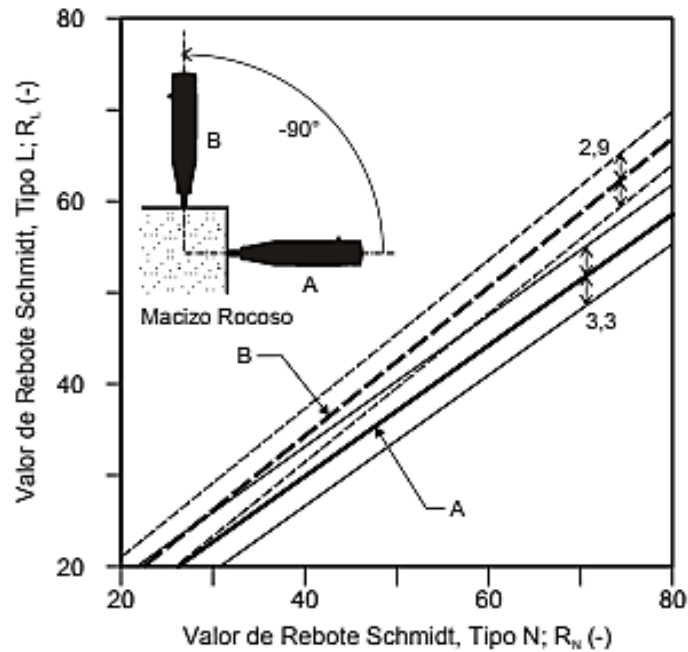


Figura 4. Correlación entre valores de NR según energía en cada tipo de Martillo.

Fuente: Tomado de Suarez (2014)

En este caso, los coeficientes de correlación r son iguales a 0,918 y 0,951, respectivamente; y los coeficientes de determinación R^2 iguales a 0,842 y 0,904, respectivamente.

Similar a las condiciones de normalización anteriores, las normas ISRM (1978) y la norma ASTM (2001) concuerdan que los valores de rebote se deben ajustar usando las curvas de corrección proporcionadas por el fabricante. Las correcciones proporcionadas por los fabricantes son derivadas empíricamente para algún material, generalmente cemento, con un rango relativamente estrecho de propiedades mecánicas y usualmente se limita a dos o cuatro direcciones

de impacto ($\pm 45^\circ$ y $\pm 90^\circ$). A continuación, se pueden observar las figuras de corrección para el martillo tipo L y Tipo N.

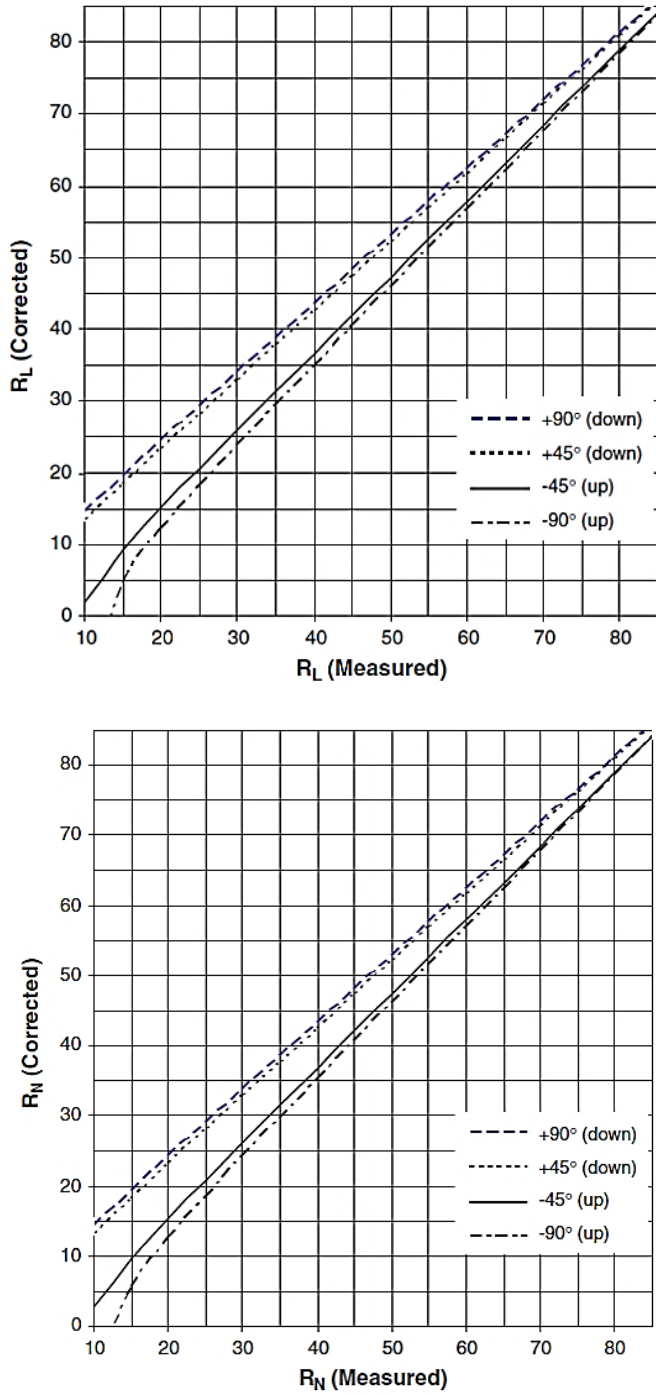


Figura 5. Corrección de las medidas de NR según la dirección de impacto

Fuente: Tomado de Suarez (2014)

1.3 Procedimientos prueba de dureza con el martillo Schmidt

El ensayo con los martillos tipo Schmidt fue heredado de la práctica de auscultación no destructiva de concretos, en su desarrollo ha tenido diversas variantes dependiendo de las necesidades, características y limitaciones evaluadas por cada investigador. En la tabla 3, se exponen algunas de los principales procedimientos de la técnica SHT.

Tabla 3. Principales procedimientos en la técnica Schmidt Hammer Test - SHT.

Autor (es)	Procedimiento
(Goktan & Ayday, 1993)	Registrar 20 valores de impactos simples de rebote separados por al menos un diámetro de la aguja. Desechar valores según el criterio de Chauvenet, y promediar las lecturas restantes.
(ISRM, 1978)	Registrar 20 valores de impactos simples de rebote separados por al menos un diámetro de la aguja, y promediar los 10 más altos valores.
(Young & Fowell, 1978)	Dividir el macizo rocoso en una malla reticular y promediar los impactos simples de cada retícula
Soiltest	Registrar 15 valores de impactos simples de rebote y promediar los 10 más altos. La máxima desviación respecto el promedio tiene que ser menor que 2,5.

(Matthews & Shakesby, 1984)	Realizar 15 lecturas de cualquier muestra. Se calcula el promedio de los valores de rebote y se descartan aquellos cinco valores más desviados del promedio.
(Kazi & Al-Mansour, 1980)	Registrar al menos 35 lecturas de rebote, eliminar las 10 lecturas más bajas y promediar los restantes 25 valores.
(Katz, Reches, & Roegiers, 2000)	Realizar de 32 a 40 impactos individuales y promediar el 50 % de valores más altos.
(Poole & Farmer, 1980)	Seleccionar el valor más alto de una serie de cinco valores continuos en un punto. Promediar los máximos de tres grupos de ensayos realizados en tres puntos separados.
(«Rebound Hammer (Schmidt Hammer) - GBG», s. f.)	Registrar 12 lecturas en el punto de ensayo en un plano cortado a diamante. Descartar el valor más bajo y más alto para obtener un número promedio de rebote.
(Hucka, 1965)	Seleccionar el valor más alto de rebote de 10 impactos continuos en un punto. Promediar los máximos de los grupos de ensayos realizados en tres puntos separados.

U.S. Bureau of Reclamation (1998)	Realizar diez lecturas en varios lugares en cada superficie. Descartar los cinco valores más bajos y promediar los cinco más altos.
ASTM D5873	Registrar los valores de rebote en 10 lugares representativos de la muestra, separados en al menos un diámetro de la aguja. Se hace un ensayo por punto. Descartar las lecturas que difieran en 7 unidades del promedio de las 10 lecturas realizadas.
ASTM C805	Registrar los valores de rebote en 10 lugares representativos de la muestra, separados en al menos 25 mm. Se hace un ensayo por punto. Descartar las lecturas que difieran en 6 unidades del promedio de las 10 lecturas realizadas.
Fowell & Smith (1976)	La desviación máxima debe ser menor que 2,5; por lo tanto, se selecciona la media de los últimos 5 valores de 10 impactos continuos en un punto.

Fuente: Adaptado de Suárez (2014)

Los procedimientos expuestos anteriormente presentan variaciones en el área de la muestra a ensayar, la cantidad de puntos de prueba necesarios para registrar la medida, el número de lecturas tomadas en cada punto y los criterios para descartar las medidas no significativas para la prueba, en este último caso, varios autores coinciden en que la máxima desviación respecto el promedio de medidas tiene que ser menor que 2,5.

1.3.1 Correlaciones con las propiedades mecánicas

Existen algunas correlaciones empíricas propuestas para relacionar el valor de rebote R con la resistencia a compresión uniaxial del material rocoso (UCS) y con el módulo elástico del mismo E_i . La tabla 4, menciona las correlaciones entre el valor de rebote R y UCS partiendo desde diferentes autores y tipos de rocas.

Tabla 4. Correlaciones entre UCS y valor de rebote R.

Autor(es)	Formula	Tipo de roca
Deere & Miller (1966)	$UCS = 10^{1,4 \times 10^{-4}} YR + 3,16$	Todas
Aufmuth (1974)	$UCS = 6,9 \times 10^{1,348 YR + 3,16}$	Todas
Sheorey, Barat, Das, Mukherjee, & Singh (1984)	$UCS = 0,4R - 3,6$	Todas
Haramy & DeMarco (1985)	$UCS = 0,994R - 0,383$	Todas
Ghose (1986)	$UCS = 0,88R + 12,11$	Todas
Singh, Hassani, & Elkington (1983)	$UCS = 2R$	Sedimentarias

O'Rourke (1989)	$UCS = 702R - 11040$	• Arenisca, limolita, caliza, anhidrita
-----------------	----------------------	---

Fuente: Adaptado de Suarez (2014)

Así mismo se exponen algunas de las principales correlaciones entre el módulo de elasticidad y el valor de rebote R (Tabla 5).

Tabla 5. Correlaciones entre E_i y valor de rebote R.

Autor(es)	Formula	Tipo de roca
Deere & Miller (1966)	$E_i = 6,95Y^2R - 1,14X10^6$	Todas
Aufmuth (1974)	$E_i = 6,9X10^{1,061lg YR+1,86}$	Todas
(Sheorey et al., 1984)	$E_i = -9,967 + 3,091 \ln(R)$	Todas
Haramy & DeMarco (1985)	$E_i = e^{cR+d}$	Serpentinita, gabro, lodolita
Ghose (1986)	$E_i = 1,940R - 33,92$	Mármol, caliza, dolomía

Fuente: Adaptado de Suarez (2014)

Cabe resaltar que debido a que los valores de UCS y E_i de un material están fuertemente influenciados por la densidad, distribución y conectividad de sus elementos microestructurales débiles, las mayores y menores lecturas de rebote son igualmente necesarias para reflejar la

naturaleza de la heterogeneidad y la extensión potencial en los valores de propiedades mecánicas. Por lo tanto, no debe descartarse ninguna lectura y se recomienda presentar la media aritmética, la mediana, la moda y el rango de las lecturas, con el fin de expresar completamente las variaciones en la dureza superficial.

1.4 Los ripios de perforación en la cualificación de propiedades de rocas en la ingeniería de petróleos

En la caracterización mecánica de formaciones en el subsuelo la obtención de corazones es quizás una de las tareas más necesarias. Sin embargo, se desarrolla en pocas ocasiones hasta el punto de estar limitada a la zona de reservorios. Esto tiene como justificación según Andersen et al. (2012) que la obtención de corazones de roca en profundidad tiene un gran impacto a nivel técnico como operativo, que se refleja en un incremento substancial del costo de desarrolla de un programa de perforación.

Partiendo de lo anterior, los ripios, como fragmentos rocosos ocasionados por la perforación y que continuamente son llevados a superficie, se producen de manera constante durante toda la perforación sin ningún costo adicional, representando así una fuente de información valiosa a lo largo de toda la sección del pozo.

En esta parte, Mateus (2004) aclara que técnicas como la microindentación puede ser aplicada para solucionar el problema de la obtención de la Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS) de las rocas de formaciones subterráneas, además de posible optimización del sistema de selección de la broca de perforación por medio de la medición directa de la resistencia de la roca sobre los fragmentos producto de la perforación.

Estos valores de resistencia son fuente de información para enriquecer los modelos de selección existentes. Es así como Mateus (2004) expone que la prueba de indentación sobre ripios es suficientemente confiable para determinar las propiedades mecánicas de las formaciones, sin embargo, se poseen algunas desventajas como ensanchamiento del pozo o dificultades para determinar el tiempo de tránsito correcto de los ripios, hechos que pueden ser fuente de problemas para definir la profundidad exacta de la cual provienen los ripios de perforación. El mismo autor aclara que algunas formaciones pueden ser demasiado sensibles a la broca de perforación. Por ejemplo, cuando se usan brocas PDC los ripios pueden sufrir un daño considerable, entonces el material puede tener variaciones altas tanto en mineralogía como estructuralmente alterando completamente la respuesta mecánica de los fragmentos.

2. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE NÚMERO DE REBOTE USANDO EL MARTILLO SCHMIDT EN NÚCLEOS DE CEMENTO

En esta primera etapa de pruebas se buscaba entender el funcionamiento del martillo Schmidt y revisar los factores que influyen en la medida de número de rebote. Para este fin, se tomaron las medidas de número de rebote, haciendo uso de tres metodologías diferentes, en búsqueda de determinar la metodología más apropiada para la presente investigación; además de esto, se probaron muestras de cemento con diferentes espesores con el fin de determinar el espesor crítico para la obtención de medidas confiables.

El procedimiento desarrollado se esquematiza en la figura 6 en forma de diagrama de flujo.

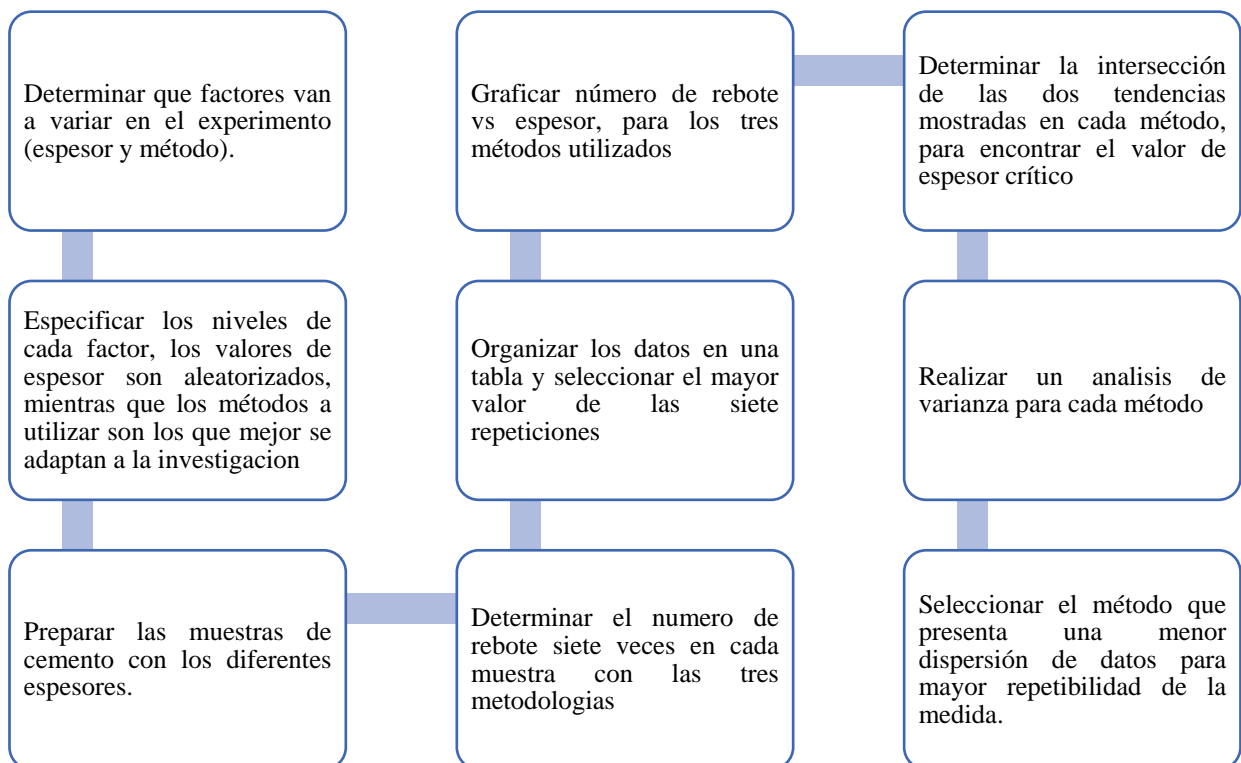


Figura 6. Diagrama de flujo de medición de número de rebote en núcleos de diferente espesor.

2.1 Diseño experimental

El diseño experimental presentado a continuación, fue elaborado con una licencia gratuita de 30 días en el software Statgraphics Centurion XVII, ya que dentro de sus complementos tiene una herramienta auxiliar que funciona como asistente para el diseño de experimentos.

Entonces al ejecutar el asistente, como se observa en la tabla 6, el primer paso es definir las variables respuesta a ser medidas, con sus respectivas unidades, que para este caso únicamente es Numero de Rebote cuya unidad es porcentaje. El estadístico que se va a analizar es la media, pues permite la obtención de resúmenes estadísticos y análisis de varianza- ANOVA. Por otra parte, se tiene que especificar el Objetivo para cada análisis estadístico de las variables de respuesta. En este apartado, aparecen como opciones Maximizar o Minimizar, las cuales dependen de los límites de la variable analizada, en este caso el objetivo es maximizar la medida, ya que la propiedad medida durante la prueba es una magnitud física (Numero de Rebote) cuyos valores más altos son los que más cercanos se encuentran al valor real. Esta afirmación se sustenta en la revisión bibliográfica donde se investigó los métodos para determinar Numero de rebote con el martillo Schmidt y varios autores concluyen que al analizar la medida se debe utilizar los valores más altos.

Además de esto, se debe especificar cuáles son los valores límite al realizar la prueba, tanto el más bajo como el más alto.

Tabla 6. Variables respuesta de medición

Nombre	Unidades	Analizar	Objetivo	Bajo	Alto
Numero de Rebote	%	Media	Maximizar	10	100

El paso siguiente, se encuentra expuesto en la Tabla 7 y consiste en establecer los factores experimentales que van a variar en la investigación. Así pues, se debe especificar su respectiva unidad, el tipo de factor ya sea Categórico o Continuo, si el factor es controlable o no, y los niveles del factor.

Los Factores experimentales en esta etapa serán **Espesor y Método**, el primer factor es seleccionado ya que al variar el espesor de la muestra será posible analizar el comportamiento del número de rebote al variar el tamaño de la muestra, determinando un espesor crítico a partir del cual la medida puede ser considerada como real. Demirdag (2008) en un experimento previo, evidencia que el número de rebote aumenta a medida que aumenta el espesor, hasta que a partir de cierto espesor el valor del número de rebote no presenta cambio alguno, este valor de número de rebote es considerado como el valor real en la muestra. El segundo factor experimental, es seleccionado ya que al estudiar diferentes métodos encontrados en la literatura se puede escoger aquel que permite obtener mejores resultados en la presente investigación.

Cabe aclarar que los niveles del espesor fueron valores numéricos aleatorizados entre 6 cm y 21 cm, a excepción del valor de 10 cm, indispensable incluirlo ya que la mayoría de los métodos lo recomiendan como espesor crítico. En cuanto a las metodologías a emplear, fueron seleccionadas tres metodologías utilizadas en el experimento de Demirdag (2008), el cual fue desarrollado en rocas y para fines de este proyecto se considera necesario evaluar debido a que son alternativas factibles para determinar dureza en ripios de perforación con el martillo Schmidt.

Tabla 7. Factores experimentales por variar en el experimento.

Nombre	Unidades	Tipo	Papel	Niveles	Valor de los niveles
Espesor	cm	Categorico	Controlable	7	6,7,8,10,13,17,20
Método	Adimensional	Categorico	Controlable	3	1,2,3

Al finalizar este paso, lo siguiente es seleccionar el tipo de diseño experimental, como se ve en la tabla 8 se utilizó un diseño de tipo factorial, pues dentro de los que pueden ser ejecutados este es el más completo ya que dentro de su estructura contempla todas las combinaciones posibles entre los factores experimentales. Adicionalmente es necesario especificar el número de veces que se repetirá el proceso luego de realizar la primera prueba, que en este caso es seis para tener un total de siete repeticiones, debido a que en la mayoría de los experimentos realizados en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, se considera este número de repeticiones lo suficientemente robusta para hacer análisis estadísticos.

También se observa en la tabla 8, el número total de ejecuciones calculado por el software, el cual depende de la cantidad de réplicas especificadas en el proceso.

Tabla 8. Definición del tipo de diseño experimental.

Tipo de Diseño	Numero de réplicas	Número total de ejecuciones
Factorial	6	147

Todos estos pasos son realizados para finalmente llegar a la estructura mostrada en la figura 7, donde se presenta en forma de organigrama las pruebas a realizar. La estructura muestra que se realizaran 21 medidas por corrida, que al realizar las 7 repeticiones se considera una cantidad total de 147 ejecuciones, todas con único operador, reduciendo así la dispersión de la medida generada por el cambio de operadores durante la toma de las medidas.

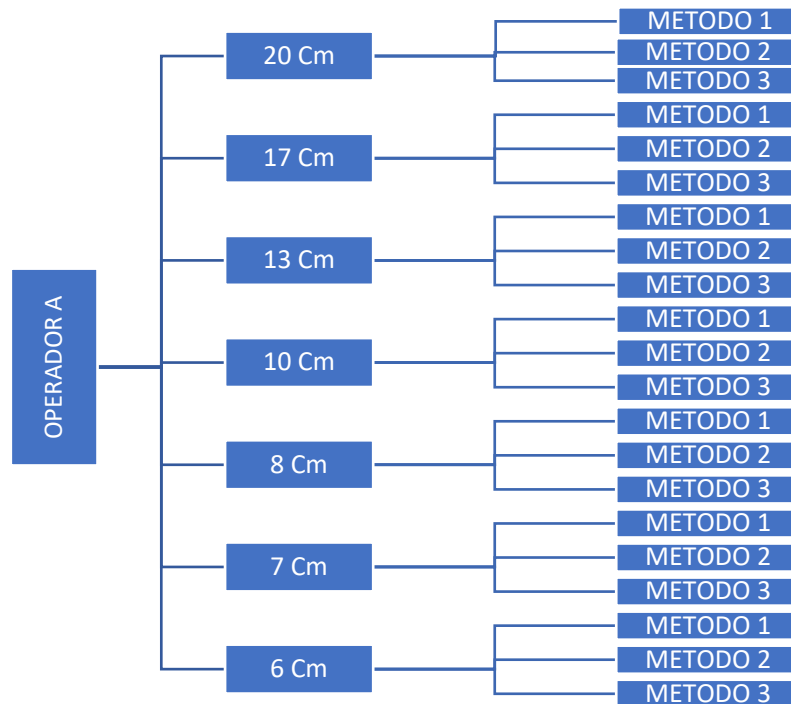


Figura 7. Estructura del set pruebas.

2.2 Preparación de muestras

Teniendo en cuenta que en esta etapa el objetivo es implementar una metodología en laboratorio para la medición de número de rebote en núcleos, es importante aclarar que para mitigar al máximo los posibles errores durante la investigación, se utilizan muestras sintéticas preparadas con arena,

cemento y agua, ya que permiten simular complejos rocosos y son materiales disponibles dentro del presupuesto de la investigación.

Entonces, se llevó a cabo la preparación de muestras cilíndricas de cemento, utilizando cemento tipo G, el cual es comúnmente usado para la cementación de pozos petroleros, mezclado con arena fina tamizada bajo un mesh N° 30; con una relación [arena:cemento] de [1:1].

Para realizar la mezcla y garantizar una mayor homogeneidad, se hizo uso de un taladro con un acople para tal fin. Posteriormente se depositó la mezcla en tubos de PVC de 16 cm de diámetro interno y se dejó fraguar durante 30 días.

Pasado este tiempo, se realizaron cortes longitudinales en los tubos de PVC con la ayuda de un motortool, para dejar la muestra expuesta.

Las siete muestras comparten el mismo diámetro alternando los espesores. El espesor de las muestras se seleccionó aleatoriamente variando desde 6,0 cm hasta 20,0 cm y están especificados en la figura 8.

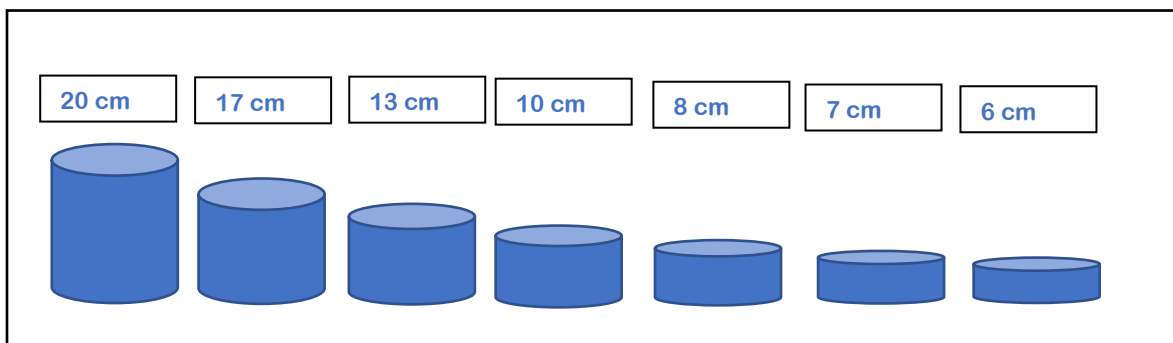


Figura 8. Espesor de los núcleos preparados

2.3 Métodos de prueba ensayados

Método 1: *Hucka (1965)*

Esta metodología propone seleccionar tres puntos de impacto, espaciados al menos el valor del diámetro de la punta del martillo. Sobre cada punto se deben tomar diez lecturas y de estas diez lecturas se selecciona la más alta en cada punto. Las tres lecturas mayores se promedian y se obtiene el valor de dureza Schmidt.

Método 2: *Poole & Farmer (1980)*

Esta metodología propone seleccionar tres puntos de impacto diferentes, espaciados al menos el valor del diámetro de la punta del martillo, sobre cada punto se deben tomar cinco lecturas y de estas cinco lecturas se selecciona la más alta en cada punto, las tres lecturas mayores se promedian y se tiene el valor de dureza Schmidt.

Método 3: *Fowell & Smith (1976)*

Esta metodología propone seleccionar un punto de impacto sobre el cual se toman diez lecturas, de estas diez lecturas se seleccionan las cinco más altas, se promedian y se obtiene el valor de dureza Schmidt.

2.4 Área de toma de datos

Para la toma de medidas de número de rebote se realizó una malla en la cara del núcleo, de manera que cada punto de prueba estuviera separado mínimo por el diámetro de la punta del martillo Schmidt y distribuidos de manera uniforme en toda el área. En la figura 9, se muestra la distribución de los puntos de prueba.

El área marcada con la equis significa ha sido descartada para tomar la lectura, debido a irregularidades en la superficie que pueden afectar la certeza de la medida.

En cada muestra se tomaron siete medidas con cada uno de los tres métodos descritos anteriormente. Se necesitaron 49 puntos de impacto, distribuidos en las dos caras del núcleo. Esto debido a que, para obtener una medida de número de rebote, para el método de Hucka (1965) y para el método de Poole & Farmer (1980), se necesitan tres puntos de impacto, mientras que para el método de Fowel & Smith (1976) se necesita un punto de impacto.



Figura 9. Malla de distribución de los puntos de prueba.

2.5 Metodología para el uso del martillo Schmidt tipo L

Con base en el manual provisto por PCE instruments para el uso del durómetro de especificación PCE-HT 75 y teniendo en cuenta las recomendaciones para preparación de la prueba y de la muestra encontradas en las normas ASTM D 5873-14 y la versión revisada del método sugerido en la ISRM realizada por Aydin (2007), se expone el método utilizado para la toma de datos de número de rebote usando el martillo Schmidt durante la presente investigación.

2.5.1 Recomendaciones previas

Durante toda la prueba, es necesario prestar atención a la forma correcta de sujetar el instrumento, así pues, una mano debe sostener la parte media del instrumento, ésta también juega la función de enderezar en todo el proceso; la otra mano sostiene y presiona la cola del instrumento con el fin de ejercer presión mientras lo endereza.

La fuerza ejercida sobre el instrumento debe ser uniforme y lenta. El martillo Schmidt debe mantenerse en posición vertical con respecto a la superficie de la prueba y no puede balancearse.

2.5.2 Preparación de la prueba

I. Selección de la zona de prueba

- a. La zona de prueba debe escogerse en la cara lateral del concreto. Si no es posible cumplir esto, se debe seleccionar como zona de prueba, la superficie o la base del concreto.
- b. La zona de ensayo se debe seleccionar en dos superficies de prueba simétricas. Si es imposible cumplir con este requisito, se le permite tener sólo una superficie de prueba.
- c. La superficie de la zona de prueba debe estar limpia, lisa y seca. No debe tener juntas, recubrimientos, depósitos lechosos, huecos. El cilindro abrasivo que proporciona el equipo puede ser usado para limpiar impurezas y pulir las asperezas y no debe quedar ningún residuo de polvo o detritos en la superficie.

2.5.3 Procedimiento de la prueba

1. Quitar el seguro del martillo, es cual es un botón que tiene lateralmente.
2. Colocar la punta del martillo en el punto de impacto.
3. Apoyar el soporte para garantizar la perpendicularidad de la prueba.
4. Presionar lenta y constantemente el martillo contra la superficie, hasta que este libere la masa interna e impacte contra el vástago para transmitir la energía a la superficie de prueba.
5. Tomar la lectura del número de rebote en la regla divisoria. En caso de necesitar guardar la medida para su posterior lectura, se oprime el seguro una vez impactada la superficie y la medida quedará fijada.
6. Para tomar otra medida se debe regresar el martillo a la posición inicial, presionando levemente el vástago contra la superficie hasta que este sea liberado completamente.
7. Se procede a tomar la siguiente medida en otro punto de prueba.

2.6 Materiales

Los materiales utilizados para las pruebas de análisis de espesor crítico en los núcleos de cemento fueron: el martillo Schmidt y un soporte guía para garantizar la perpendicularidad del instrumento al tomar la medida.

2.6.1 Martillo Schmidt

El martillo Schmidt que se usó en la investigación es de tipo L y posee como principales especificaciones técnicas las mostradas en la tabla 9.

Tabla 9. Características del martillo Schmidt tipo L

Modelo	PCE-HT 75
Energía cinética nominal	0,735 Nm
Radio de la punta esférica	25 mm \pm 1 mm
Elongación del muelle	75 mm \pm 0,3 mm
Dimensiones	\varnothing 54 x 280 mm
Peso	1 kg

2.6.2 Soporte para el martillo Schmidt

Cuando la dirección de impacto del martillo Schmidt en la muestra no es perpendicular, existen ciertos riesgos, tales como, deslizamiento de la punta del martillo por fricción, eliminación de material de la muestra por deterioro o pérdidas de energía. Por esta razón, para reducir las fuentes de error, se hizo uso de un soporte metálico que cumpliera la función de guía para el martillo al momento de tomar las medidas. En las figuras 10 y 11, se muestran imágenes del soporte utilizado:



Figura 10. Martillo Schmidt tipo L y soporte para disparo perpendicular (vista lateral)



Figura 11. Martillo Schmidt tipo L y soporte para disparo perpendicular. (vista frontal)

2.7 Análisis de resultados

En la tabla 9, se pueden observar las mediciones realizadas en laboratorio con cada uno de los tres métodos ensayados, dentro de las que resaltan en color rojo los valores más altos para cada espesor, siendo estos los datos utilizados para la interpretación del valor de espesor crítico en cada método.

Tabla 10. Presentación de datos para análisis de espesor crítico.

	ESPESOR (cm)	BLOQUE 1	BLOQUE 2	BLOQUE 3	BLOQUE 4	BLOQUE 5	BLOQUE 6	BLOQUE 7
		Medidas de número de rebote (%)						
Método 1 Hucka	20	46,33	45,33	46,67	46,00	46,33	45,00	47,00
	17	47,33	46,67	47,00	47,33	47,00	49,00	50,00
	13	46,00	45,00	46,67	40,67	41,67	44,00	44,33
	10	43,67	44,00	43,33	43,67	44,67	44,67	46,67
	8	43,67	41,33	40,00	42,67	40,33	42,33	40,67
	7	36,00	38,00	36,67	39,67	41,00	43,33	45,00
	6	40,67	39,67	37,67	36,00	41,33	38,33	35,33
Método 2 Poole & Farmer	20	43,67	41,33	41,00	42,67	44,67	44,33	43,00
	17	44,33	42,00	42,00	42,33	44,67	46,00	46,00
	13	42,33	42,33	42,00	42,33	36,33	36,33	38,67
	10	39,67	40,67	41,67	42,00	40,67	41,00	41,33
	8	39,67	37,00	36,67	35,33	38,33	34,00	38,00
	7	30,00	28,67	35,67	32,67	35,00	40,00	37,33
	6	34,33	34,67	33,33	32,67	35,67	34,00	32,33
Método 3 Fowell & Smith	20	44,40	43,60	45,40	45,20	44,80	43,00	46,40
	17	48,40	45,60	44,80	45,80	45,80	45,20	48,80
	13	43,40	42,60	44,80	39,80	38,80	40,60	41,00
	10	42,20	41,80	43,00	43,00	42,40	44,80	45,40
	8	41,60	39,40	39,20	39,00	39,80	40,40	38,00
	7	30,80	37,80	38,80	39,60	40,00	43,20	41,20
	6	38,40	42,40	36,60	40,60	39,20	40,00	36,80

Nota: Los valores resaltados en color rojo representan las medidas más altas tomadas en cada espesor de muestra con cada método.

2.7.1 Determinación de espesores críticos

En la figura 12, se expone gráficamente las medidas obtenidas de las pruebas de laboratorio donde se puede observar el comportamiento del número de rebote con respecto al cambio de

espesor en la muestra y para cada método es posible identificar dos tendencias, una inicial en la que a medida que aumentan los valores de espesor, aumentan los valores de número de rebote y una segunda en la que los valores de número de rebote no presentan cambios significativos. Estas tendencias lineales son generadas en Excel con el objetivo de determinar el valor del espesor crítico que corresponde a la intersección de estas.

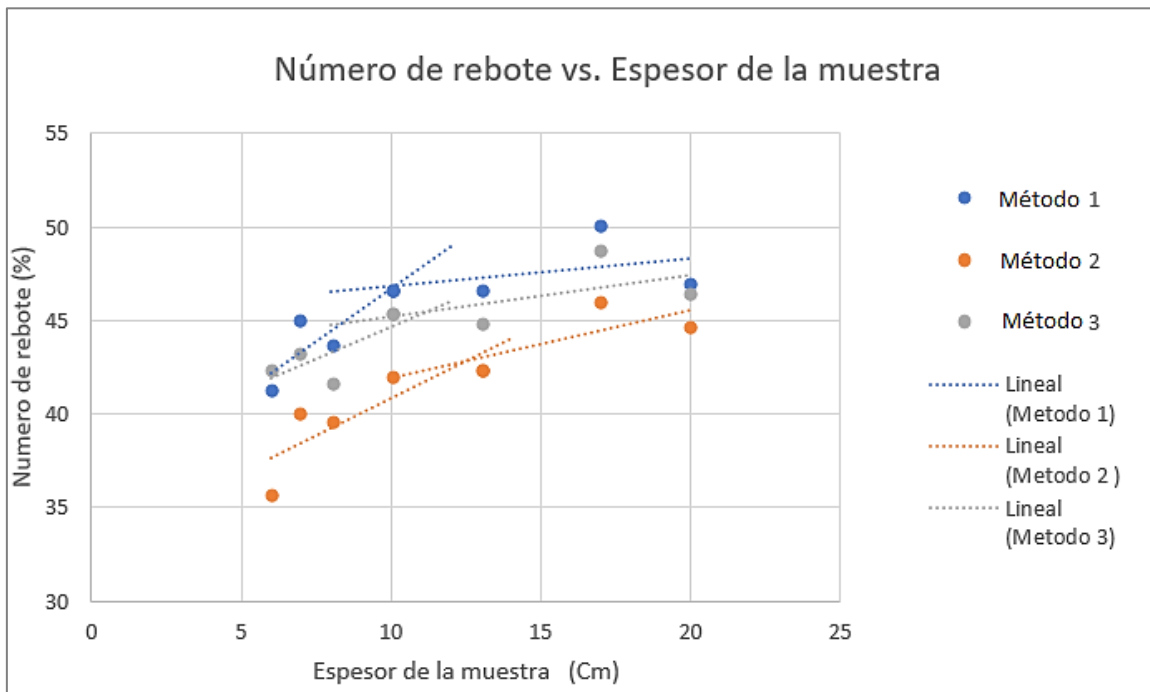


Figura 12. Representación de medidas de número de rebote versus espesor de la muestra.

Ahora, teniendo las ecuaciones de cada una de las tendencias se procede a calcular en que punto está la intersección definiendo así el espesor crítico para cada método.

Tabla 11. Espesor crítico para cada método.

	Tendencia 1	Tendencia 2	Intersección
Método 1	$y = 1,124x + 35,457$	$y = 0,143x + 45,428$	10,173
Método 2	$y = 0,799x + 32,905$	$y = 0,364x + 38,252$	12,325
Método 3	$y = 0,68x + 37,88$	$y = 0,224x + 42,988$	11,204

2.7.2 Selección de la metodología para la investigación

Luego de haber determinado los valores de espesor crítico para los métodos evaluados, se procede a realizar un Análisis de varianza ANOVA, en este caso de dos factores con varias muestras por grupo, con el fin de saber si los factores Espesor y Método tienen una influencia estadísticamente significativa sobre el valor de número de rebote.

Es importante aclarar que este análisis fue realizado con un complemento de Excel, el cual arroja inicialmente los datos mostrados en la tabla 12, que son un resumen estadístico del comportamiento del número de rebote al cambiar el espesor para cada uno de los tres métodos, además, se especifica la sumatoria de las siete medidas recolectadas, el promedio y la varianza; también contiene una última columna en la que se ven estos estadísticos agrupados por método.

Tabla 12. Resumen estadístico de medidas (Análisis de espesor crítico)

	20 Cm	17 Cm	13 Cm	10 Cm	8 Cm	7 Cm	6 Cm	Total
Método 1 Hucka								
Suma	322,667	334,333	308,333	310,667	291,000	279,667	269,000	2115,667
Promedio	46,095	47,762	44,048	44,381	41,571	39,952	38,429	43,177
Varianza	0,508	1,545	4,794	1,275	1,841	11,386	5,175	13,125
Método 2 Poole and Farmer								
Suma	300,667	307,333	280,333	287,000	259,000	239,333	237,000	1910,667

Promedio	42,952	43,905	40,048	41,000	37,000	34,191	33,857	38,993
Varianza	1,979	3,212	8,164	0,593	3,630	16,143	1,365	18,729
Método 3 Fowell and Smith								
Suma	312,800	324,400	291,000	302,600	277,400	271,400	274,000	2053,6
Promedio	44,685	46,343	41,571	43,229	39,629	38,771	39,1434	41,910
Varianza	1,304	2,516	4,486	1,846	1,299	15,366	4,330	11,465

Como primera observación, el método de Fowell and Smith, puede resultar el más apropiado para el desarrollo de la presente investigación, pues como se evidencia en la tabla 12, es el que presenta menor dispersión en los datos, con una varianza equivalente a 11,47.

Continuando con el análisis, es importante recordar que el ANOVA plantea las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula: Todas las medias tienen el mismo valor.
- Hipótesis alternativa: al menos una de las medias difiere de las otras.

Teniendo claro esto, a continuación, se encuentran en la Tabla 13 los resultados arrojados por Excel, que incluyen el valor de la suma de cuadrados, el promedio de los cuadrados, el valor de F, la probabilidad y el valor crítico para F para cada uno de los factores del proceso.

Tabla 13. Análisis ANOVA de dos factores.

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Espesor	451,069	225,535	51,062	5,73666E-17	3,068
Método	1468,970	244,828	55,430	4,99385E-33	2,171
Interacción	53,844	4,487	1,016	0,439	1,830
Dentro del grupo	556,530	4,417			
Total	2530,415				

Siendo estos los resultados, se procede a establecer qué factores son estadísticamente influyentes en la variable dependiente, los cuales son aquellos en los que el valor de la probabilidad es menor al nivel de significancia (0,05 definido para este estudio).

Concluyendo así, que cambiar tanto el espesor como el método utilizado generan una variación considerable en el número de rebote pues el valor de probabilidad no supera 0,05, por lo cual se recomienda trabajar con valores de espesor de muestra superiores al crítico y con solo un método para tener menos incertidumbre en los datos.

Entonces la metodología que se propuso como óptima para implementar en laboratorio de mecánica de rocas es la de Fowell and Smith, pues como se dijo anteriormente es aquella que presenta una menor dispersión en los datos recolectados; además al considerar que el enfoque de esta investigación es la determinación de dureza en ripios de perforación, el método de Fowell & Smith tiene la ventaja de que necesita una menor área de prueba, al requerir solo un punto donde se realizan diez disparos.

3. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE FOWELL & SMITH

En este capítulo se determina la repetibilidad y reproducibilidad (R&R) del método Fowell and Schmidt propuesto en el capítulo anterior como el más apropiado para la presente investigación, esto con el objeto de validar la metodología implementada.

El estudio se realiza bajo la norma ASTM F1469-11, la cual describe paso a paso como realizar este procedimiento en equipos de prueba no destructivos.

3.1 Diseño experimental

El trabajo que se realizará en el laboratorio se limita a lo que sugiere la guía para determinar la validez del método, la cual requiere seleccionar diez puntos en el yunque de calibración, puntos a los que posteriormente dos operarios les determinarán dos medidas de número de rebote con el método de Fowell & Smith (ver Figura 13); estos datos reflejarán la repetibilidad del método y la variabilidad en el sistema de medición es causada por las diferencias entre los operadores. (reproducibilidad).

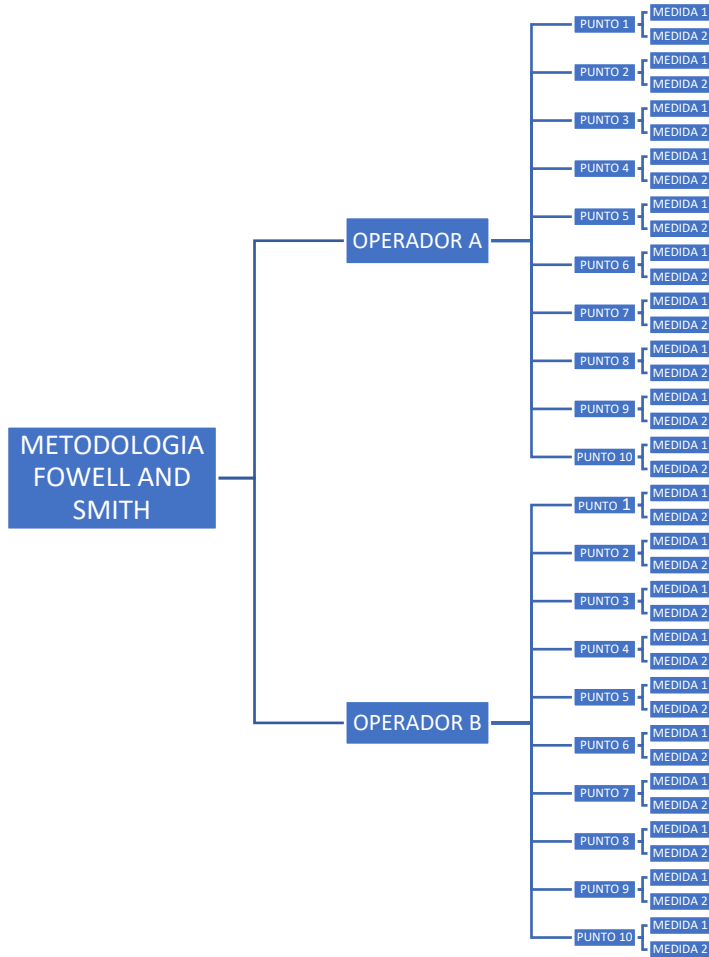


Figura 13. Set de pruebas para elaboración de R & R

3.2 Preparación de la muestra

Este análisis se realizará en un yunque de calibración mostrado en la figura 14, el cual se encuentra disponible en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, el cual tiene una composición 100% acero, lo que asegura reducir la dispersión entre medidas, pues la muestra es homogénea en cualquier punto y garantiza analizar únicamente aquellas variaciones generadas por el método y el operador.

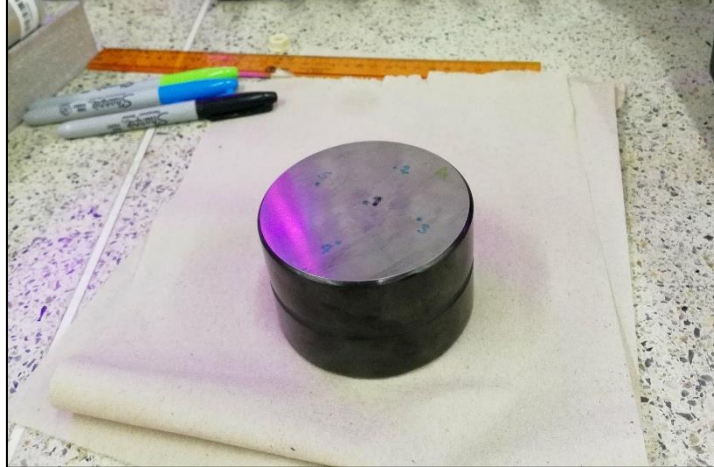


Figura 14. Yunque para elaboración de análisis R&R

3.3 Método

Se determinará el valor de R&R al método de Fowell & Smith, mediante la norma ASTM F1469-11, cuyo propósito es evaluar equipos de prueba que serán utilizados en procesos estadísticos, pruebas de laboratorio y en procesos de manufactura.

Según la norma, si se tiene un resultado menor al 10 %, el método es confiable y tiene una variación permisible para dar datos confiables, si el resultado está entre 10% y 30 %, el método podría ser aceptado según la importancia de aplicación, el costo de la prueba y el costo de reparación, y finalmente, si supera el 30% el método necesita ser mejorado, identificando y eliminando las posibles fuentes de error.

3.4 Materiales

En esta etapa en cuanto a equipos de laboratorio únicamente se utiliza el martillo Schmidt, cuyo principio físico se explicó anteriormente, los cálculos correspondientes para determinar R&R se realizarán en computador en una hoja de cálculo en Excel.

3.5 Análisis de resultados

Luego de tomar la totalidad de las medidas, se procede a realizar los cálculos expuestos en la norma ASTM F1469-11 (Anexo A). Estos cálculos no se realizarán directamente sobre el valor arrojado por el instrumento, pues se sabe que este valor es un porcentaje que representa la máxima elongación lograda en el resorte principal después del impacto, luego los cálculos se realizan sobre una magnitud física que para este caso es la deformación interna que sufre el resorte luego del impacto, dada por la siguiente ecuación:

$$Deformación = \frac{(valor\ medido\ de\ Número\ de\ rebote - posición\ inicial\ del\ resorte)}{posición\ inicial\ del\ resorte}$$

En la tabla 14, se hace el cálculo transformando a deformación las medidas de Número de rebote tomadas en el yunque de calibración, es necesario aclarar que, para el cálculo la posición inicial del resorte es 10.

Tabla 14. Conversión de números de rebote a deformación.

OPERADOR A		OPERADOR B		OPERADOR A		OPERADOR B	
Número de rebote (%)				Deformación (Adimensional)			
test 1	test 2	test 1	test 2	test 1	test 2	test 1	test 2
70,20	71,60	70,00	69,40	6,02	6,16	6,00	5,94
69,60	68,00	67,80	66,40	5,96	5,80	5,78	5,64
68,20	67,60	67,20	65,80	5,82	5,76	5,72	5,58
68,00	68,00	67,40	66,40	5,80	5,80	5,74	5,64
68,00	68,00	68,00	66,00	5,80	5,80	5,80	5,60
68,40	68,60	68,00	67,20	5,84	5,86	5,80	5,72
67,40	68,00	67,20	66,00	5,74	5,80	5,72	5,60
67,20	67,60	66,00	66,00	5,72	5,76	5,60	5,60
67,60	66,80	68,00	66,80	5,76	5,68	5,80	5,68
66,40	66,20	68,20	67,20	5,64	5,62	5,82	5,72



Posterior a convertir las medidas se procede a realizar las operaciones que muestra la norma ASTM F1469-11 en su hoja de cálculos (vea Anexo A), para así tener un resultado final de R&R:

$$\text{R\&R} = 7,00 (\%)$$

Este resultado comprueba que el método Fowell & Schmidt puede ser utilizado en la presente investigación, pues las variaciones generadas durante el desarrollo de esta prueba no ocasionan un error significativo para descartar o editar el método.

4. FACTIBILIDAD DE LA MEDICIÓN DE NÚMERO DE REBOTE EN RИPIOS DE CEMENTO

En este capítulo de la investigación, el objetivo es estudiar la factibilidad de medir el número de rebote usando el martillo Schmidt en ripios de cemento obtenidos a partir de muestras de roca sintéticas con diferentes niveles de dureza.

Para este fin, se estudia el comportamiento de la medida en núcleos de cemento con un espesor igual al crítico, donde se obtiene un valor cercano al real de número de rebote. Posteriormente, estos núcleos se destruyen hasta formar ripios que son triturados a tamaño de grano, se compactan y se determina número de rebote.

Con el valor medido en los ripios y partiendo de un valor real, se estudia la relación existente y la posibilidad de que la medida en ripios sea escalable bajo estas condiciones.

La importancia de trabajar con muestras que presenten diferentes combinaciones de arena: cemento, radica en que es un material con un comportamiento similar al de una roca, al presentar granos y un material cementante. Así pues, al llevar este material a ripios y tomar una medida de número de rebote que pueda llegar a ser escalable a una medida real, se contempla la posibilidad de extrapolar la metodología a ripios de perforación para estudios posteriores de caracterización mecánica de rocas.

4.1 Diseño experimental

Los diseños experimentales presentados a continuación, fueron estructurados con la ayuda de Statgraphics Centurion XVII.

Con el objetivo de analizar si es posible determinar el número de rebote en ripios, se plantea preparar muestras de cemento variando las concentraciones de arena, simulando así complejos rocosos con diferentes niveles de dureza, a los que se les determinará el valor de número de rebote.

Posteriormente, se procede a triturar las muestras a tamaño de grano, compactarlas mecánicamente para luego determinarles número de rebote y analizar si el comportamiento de los valores presenta una tendencia equivalente a la obtenida en núcleos que les permita ser escalables al valor real mediante una correlación.

Para un mayor entendimiento del procedimiento, en la figura 15 se presenta un diagrama de flujo de cada uno de los pasos seguidos para lograr este fin.

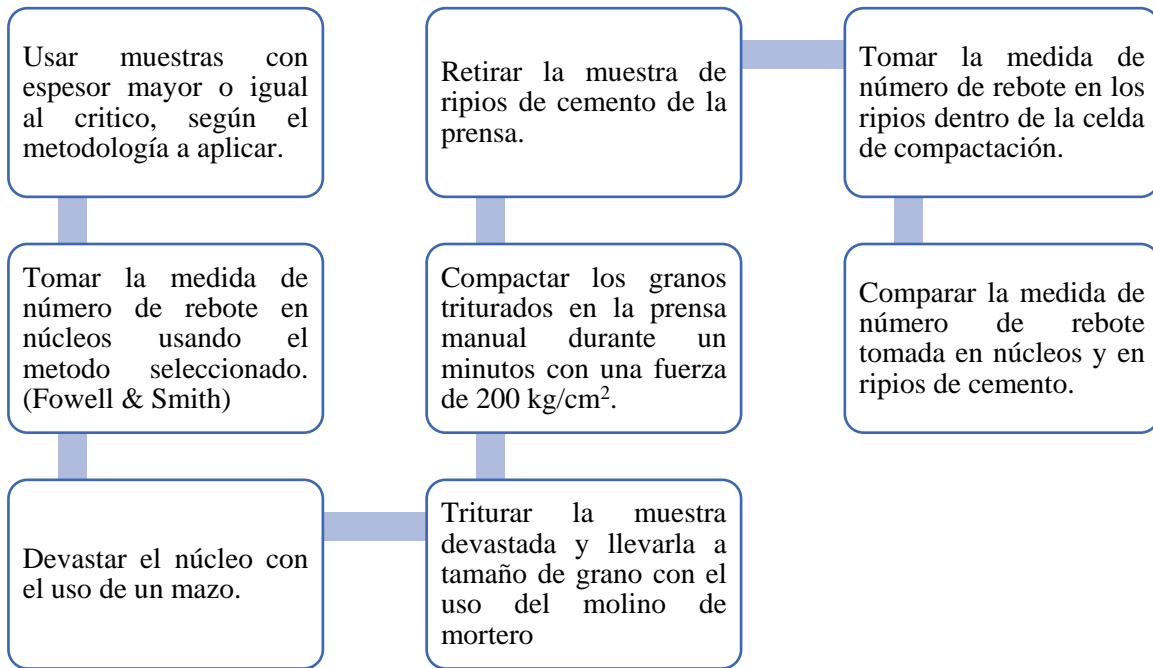


Figura 15. Diagrama de flujo de medición de número de rebote en ripios de cemento.

4.1.1 Diseño experimental para pruebas en núcleos

Lo primero, según el asistente de diseño de experimentos es definir la variable respuesta, que en esta oportunidad es la mostrada en la tabla 15, con sus respectivas unidades, especificando el estadístico a analizar que es la media con el objetivo de maximizar la medida.

Tabla 15. Variable respuesta del experimento en núcleos.

Nombre	Unidades	Analizar	Objetivo	Bajo	Alto
Numero de Rebote	%	Media	Maximizar	10	100

Luego de esto se procede a especificar el factor que va a variar en el proceso, con sus respectivos niveles, que para este caso es la relación arena: cemento, con el objeto de tener diferentes valores de dureza, traducido en diferentes números de rebote para cada concentración.

Tabla 16. Variables factor del experimento en núcleos.

Nombre	Unidades	Tipo	Papel	Niveles
Relación arena:cemento	adimensional	categórico	controlable	[0:1], [0,5:1], [1:1], [1,5:1], [2:1], [2,5:1], [3:1]

Continuando con el proceso de diseño en el software, el siguiente paso es definir el tipo de diseño a estructurar con sus respectivas repeticiones y un cálculo del total de ejecuciones a realizar,

como se muestra en la tabla 17. Nuevamente se escoge el tipo de diseño factorial ya que estudia todas las combinaciones posibles entre los niveles de la variable factor (Relación arena:cemento).

Tabla 17. Tipo de diseño experimental para núcleos.

Tipo de Diseño	Numero de réplicas	Número total de ejecuciones
Factorial	10	70

En la figura 16, se presenta la estructura del set de pruebas, en el que se tomaran 10 medidas de numero de rebote para cada una de las siete combinaciones, teniendo un total de 70 ejecuciones.

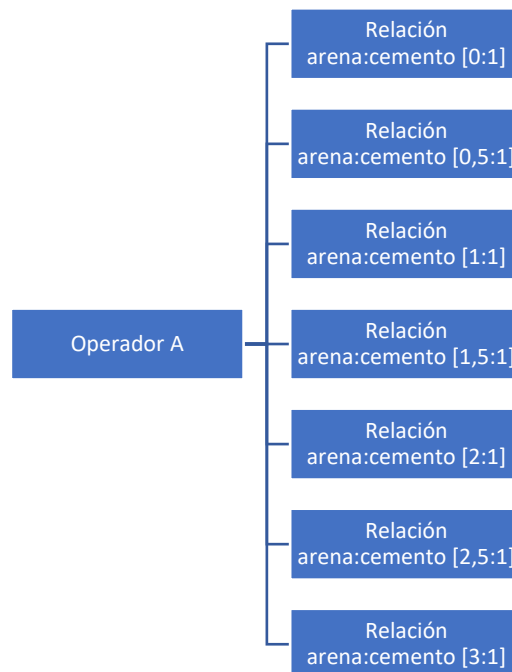


Figura 16. Estructura del set de pruebas en núcleos.

4.1.2 Diseño experimental para pruebas en ripios

El diseño experimental utilizado para realizar pruebas en ripios de perforación es el estructurado anteriormente en la figura 16, para determinar el número de rebote en los siete núcleos, con la diferencia de que se realiza la toma de una única medida por combinación; siendo este un diseño con solo un factor de variación en el que se determinara el número de rebote en ripios compactados, teniendo así un total de siete ejecuciones.

4.2 Preparación de muestras

Para la realización de pruebas de número de rebote en esta etapa, es necesario preparar dos tipos de muestras: núcleos de cemento y ripios de cemento compactados. A continuación, se describe en detalle las características de las muestras y el proceso de preparación. Nuevamente en esta etapa son utilizadas muestras sintéticas que simulan el comportamiento de la roca, pues como se dijo anteriormente considerar rocas naturales alteraría los resultados ya que estas presentan litologías heterogéneas.

4.2.1 Núcleos con diferentes relaciones arena: cemento

Con el fin de determinar el número de rebote real esta etapa requiere el uso de muestras con las dimensiones de espesor crítico especificadas anteriormente, motivo por el cual se utilizan muestras sintéticas preparadas con cemento arena y agua, pues son materiales disponibles, simulan una roca homogénea y son un medio controlado. Teniendo en cuenta esto, se prepararon siete muestras cilíndricas de cemento con diámetro de 16 cm y espesor de 11 cm. Se siguió el mismo procedimiento de preparación descrito en el capítulo tres.

Las muestras presentan diferentes niveles de dureza que se lograron variando la relación arena cemento al momento de su preparación. A menor cantidad de arena presente en la muestra, se presenta un comportamiento más frágil.

Las relaciones arena: cemento de cada muestra son las siguientes:

Tabla 18 Relaciones arena: cemento preparadas

Número de muestra	Relación arena:cemento
1	0: 1
2	0,5:1
3	1:1
4	1,5:1
5	2:1
6	2,5:1
7	3:1

4.2.2 Ripios de cemento compactados

La preparación de las muestras de ripios de cemento se realiza luego de haber realizado las pruebas de número de rebote en los núcleos.

El procedimiento es el siguiente:

1. **Devastación de los núcleos:** Se tomó cada núcleo de cemento y haciendo uso de un mazo se procedió a destruir la muestra hasta dejarla en fragmentos pequeños.
2. **Trituración de material:** El material fragmentado era luego llevado a una prensa que permitía triturar la muestra a un menor tamaño (máximo 3 mm de diámetro).
3. **Pulverización de material a tamaño de grano:** Los detritos de tamaño máximo de 3 mm, son llevados a un equipo llamado Molino de Mortero, de ahí se extrae la muestra

ya en tamaño de grano. En la figura 17, se observa las siete muestras de ripios de cemento en tamaño de grano, para cada combinación arena-cemento.



Figura 17. Muestras de ripios de cemento en tamaño de grano

4. **Compactación de los ripios:** Al tener la muestra en tamaño de grano, se deposita dentro de una celda de 9 cm de diámetro y se procede a compactar en la prensa con una fuerza de 200 kg/cm^2 , se dejó la muestra compactada durante un minuto y luego de esto se liberó la presión. Después, se retiró la muestra de ripios de cemento, ya compactada con un espesor de 3 cm y lista para la toma de la medida de número de rebote. Ver figura 18.

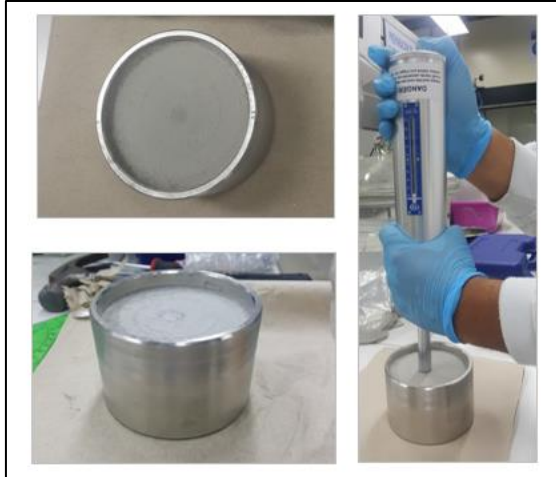


Figura 18. Muestra de ripios de cemento compactada mecánicamente.

4.3 Materiales y equipos

Los equipos utilizados para la obtención y preparación de los ripios de cemento fueron los siguientes:

4.3.1 Prensa

Se utilizó la prensa hidráulica disponible en el laboratorio de Difracción de Rayos X del ICP, la cual ejerce una fuerza máxima de 200 kg/cm^2 (Ver figura 19). Durante el proceso de preparación de los ripios, se usó inicialmente para triturar el material de los núcleos y por último para obtener la muestra de ripios de cemento compactada mecánicamente para la realización de la prueba de número de rebote.



Figura 19. Prensa hidráulica

4.3.2 Molino de mortero

El molino de mortero se utilizó posterior a tener el material de los núcleos triturado a un tamaño máximo de 5 mm de diámetro. Luego de pasar por el molino, se obtenía la muestra en tamaño de grano, lista para ser compactada en la prensa. (Ver figura 20)



Figura 20. Molino de mortero.

4.4 Análisis de resultados

El análisis de datos presentado a continuación está dividido en tres partes:

- Análisis de resultados en núcleos de cemento.
- Análisis de resultados en ripios de cemento.
- Análisis de correlación entre núcleos y ripios de cemento.

4.4.1 Análisis de resultados en núcleos de cemento

4.4.1.1 Presentación de datos

Los datos presentados en la tabla 19, contienen los resultados de las medidas de número de rebote en núcleos de cemento con diferentes relaciones arena:cemento, organizada de manera que las combinaciones se hallan en las filas y las repeticiones en las columnas.

Tabla 19. Medidas de número de rebote en núcleos.

Relación [arena:cemento]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
[0:1]	53,60	49,00	50,20	49,80	49,40	49,00	46,60	44,60	44,80	38,40
[0,5:1]	48,60	44,80	44,80	43,20	39,80	49,80	50,00	46,00	49,60	49,60
[1:1]	49,00	46,40	47,20	46,60	47,20	38,20	37,00	34,20	39,40	35,60
[1,5:1]	47,80	50,00	46,20	45,40	46,60	36,00	32,40	31,60	33,00	33,20
[2:1]	38,40	34,40	34,80	33,80	33,80	40,00	39,80	39,00	37,00	39,80
[2,5:1]	38,60	35,00	35,60	34,20	35,20	39,60	39,00	38,80	36,40	37,80
[3:1]	33,00	30,80	30,60	31,00	30,80	35,60	34,00	35,00	32,00	29,20

4.4.1.2 Análisis ANOVA para los numero de rebote en núcleos

El Análisis de varianza es de un solo factor y fue realizado en Excel mostrando los siguientes resultados, en la tabla 20 se observa un resumen estadístico de la medida al agruparla por combinaciones calculando la sumatoria, el promedio y la varianza de las diez repeticiones.

Tabla 20. Resumen estadístico de medidas de NR en núcleos.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
[0:1]	10	475,4	47,54	17,47
[0,5:1]	10	466,2	46,62	12,05
[1:1]	10	420,8	42,08	32,40
[1,5:1]	10	402,2	40,22	56,79
[2:1]	10	370,8	37,08	6,96
[2,5:1]	10	370,2	37,02	3,84
[3:1]	10	322	32,2	4,47

Mientras que en la tabla 21, se observa el resultado del ANOVA, mostrando que efectivamente al cambiar la relación de arena:cemento, se observa un cambio estadísticamente significativo en el valor del número de rebote, pues la probabilidad no supera el valor de significancia de 0,05.

Tabla 21. Análisis ANOVA para núcleos.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1822,094	303,682	15,867	5,2036E-11	2,246
Dentro de los grupos	1205,744	19,139			
Total	3027,837				

Entonces queda argumentado con datos estadísticos que se logra tener muestras de cemento con diferentes valores de dureza que permiten simular diferentes tipos de rocas, aumentando el rango de aplicabilidad del presente proyecto.

4.4.1.3 Comportamiento del número de rebote en núcleos con diferentes concentraciones arena:cemento

En la figura 21, se presenta la gráfica de los resultados obtenidos de las diez medidas de número de rebote tomadas en los núcleos con diferentes relaciones de arena:cemento. Es posible evidenciar una tendencia en la que a medida que aumenta la concentración de arena, el valor de número de rebote disminuye.

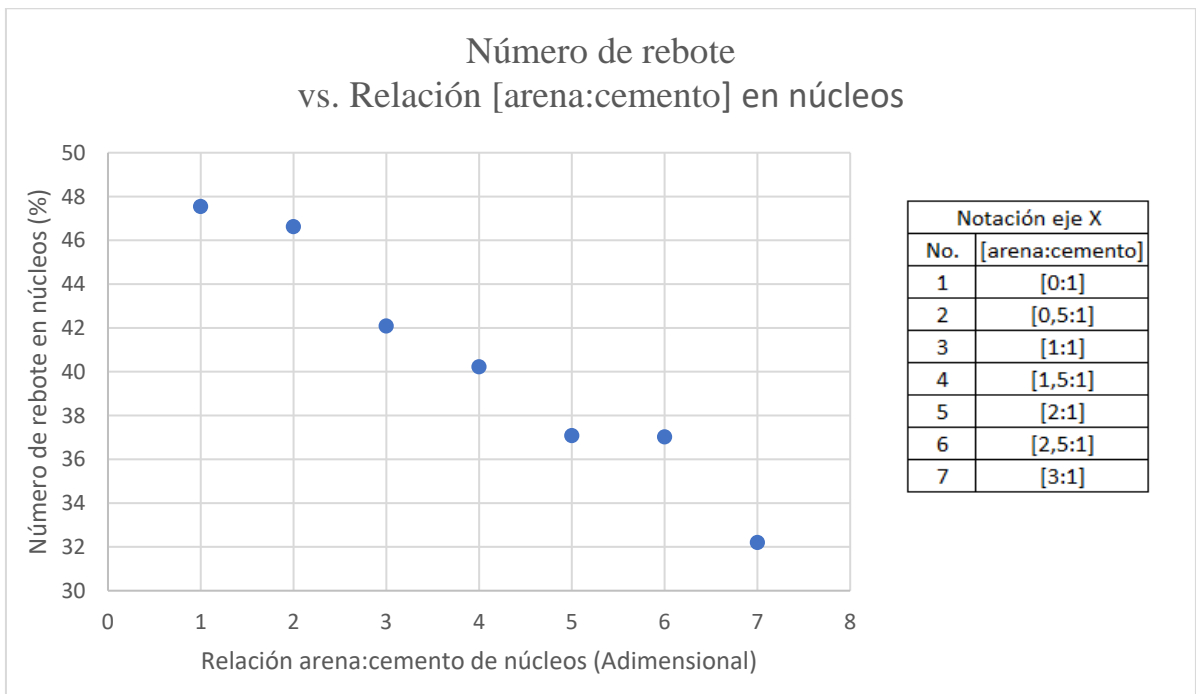


Figura 21. Comportamiento del NR en función de la relación arena:cemento.

4.4.2 Análisis de resultados en ripios de cemento

4.4.2.1 Presentación de datos

Recordando que el método de Fowell and Smith determina el número de rebote promediando las cinco lecturas más altas de diez lecturas tomadas en un mismo punto, se presenta en la tabla 22, los diez valores para cada una de las concentraciones.

Tabla 22. Valores de Número de rebote en muestras de ripios compactadas.

Relación [arena:cemento]	lectura 1	lectura 2	lectura 3	lectura 4	lectura 5	lectura 6	lectura 7	lectura 8	lectura 9	lectura 10
[0:1]	19	26	30	29	33	34	36	37	35	34
[0,5:1]	17	24	29	31	33	33	35	36	34	35
[1:1]	17	24	28	32	32	35	30	33	35	34
[1,5:1]	19	21	21	27	27	28	28	28	29	30
[2:1]	16	22	26	27	28	29	30	30	30	31
[2,5:1]	12	19	21	23	26	27	27	28	30	30
[3:1]	16	19	20	25	25	25	25	24	24	22

Siguientemente, se seleccionan los cinco valores más altos para cada concentración, cuyo promedio será la medida de número de rebote definitiva. Ver Tabla 23.

Tabla 23. Número de rebote promedio para cada muestra de ripios compactados.

Relación [arena:cemento]	1	2	3	4	5	Número de rebote (promedio)
[0:1]	34	34	35	36	37	35,2
[0,5:1]	33	34	35	35	36	34,6
[1:1]	32	33	34	35	35	33,8
[1,5:1]	28	28	28	29	30	28,6
[2:1]	29	30	30	30	31	30
[2,5:1]	27	27	28	30	30	28,4
[3:1]	24	25	25	25	25	24,8

4.4.2.2 Análisis ANOVA de medidas de número de rebote en ripios.

A continuación se hace un análisis de varianza de un factor en Excel, con los números de rebote tomados en los ripios compactados, el que analiza únicamente las cinco medidas más altas en cada punto, pues estas son aquellas verdaderamente significativas en el método de Fowell and Smith; análisis que arroja resumen estadístico de la tabla 24, al agrupar los datos por relación de arena:cemento.

Tabla 24. Resumen estadístico de datos tomados en ripios compactados.

Relación [arena:cemento]	Suma	Promedio	Varianza
[0:1]	176	35,2	1,7
[0,5:1]	173	34,6	1,3
[1:1]	169	33,8	1,7
[1,5:1]	143	28,6	0,8
[2:1]	150	30	0,5
[2,5:1]	142	28,4	2,3
[3:1]	124	24,8	0,2

Continuando, el resultado del ANOVA es mostrado en la tabla 25, que al tener un valor de probabilidad por debajo de 0,05 (significancia), aprueba la hipótesis de que los promedios son diferentes para cada variable factor del experimento, es decir, que al cambiar la relación de arena:cemento de la muestra compactada, se genera una variación estadísticamente significativa en el valor de rebote.

Tabla 25. Análisis ANOVA en ripios compactados.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	450,171	75,029	61,788	7,43066E-15	2,445
Dentro de los grupos	34	1,214			
Total	484,171				

4.4.2.3 Comportamiento del número de rebote en rípios de cemento

Para visualizar el comportamiento del número de rebote en los rípios se hace una gráfica de dispersión, en la que el eje Y es el número de rebote en rípios, mientras que el eje X es el tipo de relación [arena: cemento].

La figura 22, evidencia que las muestras de rípios de cemento compactados mecánicamente conservan la tendencia mostrada en los núcleos estudiados previamente, pues a medida que aumenta la cantidad de arena en la relación, disminuye el número de rebote.

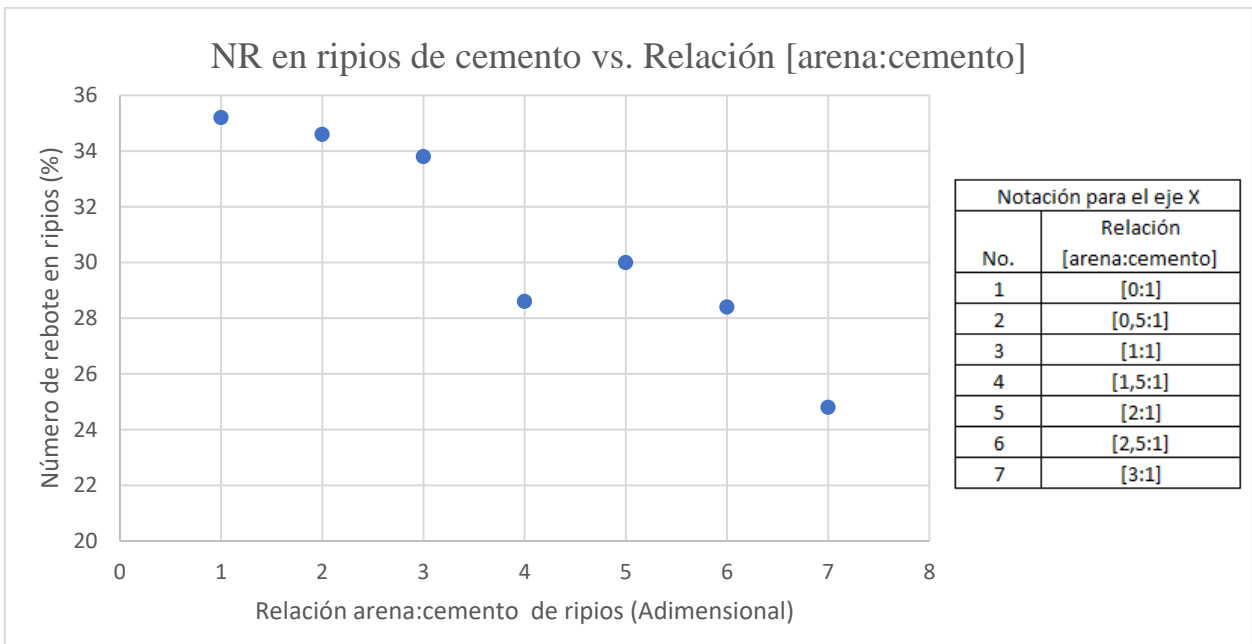


Figura 22. Comportamiento del Número de rebote en rípios compactados.

4.4.3 Relación entre el número de rebote en núcleos y en rípios de cemento compactados.

A pesar de la similitud en las tendencias de las medidas de número de rebote en núcleos y en rípios al variar las relaciones [arena: cemento], es evidente la diferencia de los valores, pero como

lo mostró Demirdag (2008) en su estudio y como fue analizado en capítulo 3, la reducción en la medida de número de rebote es atribuida principalmente a el tamaño de la muestra, además de que al triturar y compactar se genera una afectación en la muestra de ripios de cemento.

Así pues, teniendo en cuenta estas afirmaciones, se desarrolla una correlación entre el número de rebote en núcleos y el número de rebote en ripios compactados, asumiendo los valores tomados en los núcleos como reales, ya que fueron determinados en muestras cuyo espesor era igual al crítico. (Figura 23)

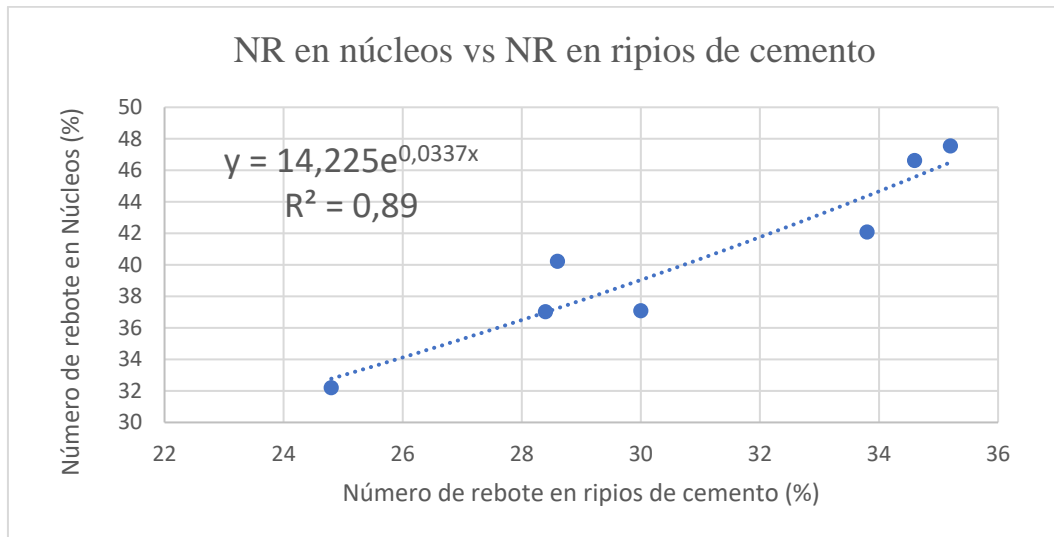


Figura 23. Relación entre NR medido en núcleos y NR medido en ripios compactados.

Como se observa en la figura 23, con el desarrollo de estas pruebas se logra establecer una relación entre los valores de número de rebote medido en núcleos y número de rebote medido en ripios de cemento compactados, mediante la ecuación $y = 14,225 e^{0,0337 x}$, una regresión de tipo exponencial con un coeficiente de determinación de $r^2=0,89$ que indica que existe una relación significativa entre los valores tomados con la metodología de Fowell & Smith. Lo que evidencia que la metodología desarrollada en este capítulo puede ser llevada a ripios de perforación.

5. CONCLUSIONES

Lo expuesto a lo largo de este proyecto de investigación permite arribar a las siguientes conclusiones:

- Se desarrolla una metodología para la medición de número de rebote en ripios de cemento. Estableciendo un procedimiento de preparación de la muestra y tomando las medidas con el método de Fowell & Smith. Obteniendo resultados correlacionables entre la medida obtenida en núcleos y la obtenida en ripios.
- Como resultado de esta investigación se encontró la siguiente correlación entre la medida de número de rebote en núcleos y en ripios de cemento $N_{\text{núcleo}} = 14,225 e^{0,0337 * N_{\text{ripio}}}$, con un coeficiente de determinación de $r^2=0,89$. Estos resultados evidencian que la medida de número de rebote en ripios puede ser escalable a un valor real con un alto nivel de confianza. Además, se muestra que, con el uso de la metodología desarrollada, es viable aprovechar los ripios de perforación como una fuente valiosa de información para la caracterización rápida y económica de la dureza superficial de las rocas, con el uso del martillo Schmidt.
- Se evidencia que el cambio en el espesor de la muestra tiene una influencia estadísticamente significativa sobre el valor de número de rebote, en la que a medida que aumenta el tamaño, aumenta el valor del número de rebote, hasta que a partir de cierto espesor el número de rebote no presenta cambios significativos, espesor que para este proyecto fue llamado ‘espesor crítico’ a partir del cual se obtienen valores consistentes.

- Se determina el espesor crítico de muestras cilíndricas de cemento, para tres métodos que determinan el número de rebote con el martillo Schmidt: el método de Poole and Farmer, el método de Hucka y el método de Fowell and Schmidt, los resultados determinados son de 10,17 cm, 12,32 cm y 11,20 cm, respectivamente.
- Se implementó el método de Fowell and Smith en el laboratorio de mecánica de roca del ICP, pues dentro de los métodos estudiados es el que presenta una menor dispersión al registrar los datos, sumando a esto el hecho de que al necesitar un área de prueba con un solo punto es el más apropiado para la investigación, recordando que está enfocada a determinar el número de rebote en muestras de tamaño de ripios.
- Se validó el método propuesto siguiendo la norma ASTM F1469-11, el cual presenta un valor de R&R de 7,008 %, que según la norma al estar por debajo de 10 % quiere decir que no necesita mejoras para ser utilizado.
- Se utilizó el método de Fowell and Smith para determinar la medida de número de rebote tanto en núcleos como en ripios, evidenciando que al triturar a tamaño de grano una muestra y luego compactarla en una prensa hidráulica manual con una presión de 200 kg/ cm² durante un minuto, se conserva la tendencia del número de rebote observada en los núcleos, en la que a medida que aumenta el NR disminuye la cantidad de arena en la relación de la mezcla.

6. RECOMENDACIONES

- Promover investigaciones futuras de medición de número de rebote, tanto en núcleos como en ripios de perforación contemplando diferentes litologías con la metodología planteada, alimentando una base de datos que se considere lo suficientemente robusta estadísticamente para establecer correlaciones en cualquier tipo de roca.
- Complementar la metodología planteada variando nuevos factores haciendo la correlación desarrollada más consistente, dentro de estos factores están: las dimensiones de la celda de compactación, la presión a la cual se compactan los ripios de cemento, el tiempo de compactación al que es sometido la muestra y la metodología utilizada.
- Realizar un estudio de extensión que evalúe la repetibilidad de la medida de número de rebote tomada en ripios de cemento con el método de Fowell and Smith, preparando una mayor cantidad de muestras de la misma composición.
- Se recomienda proponer otras alternativas para formar muestras consistentes a partir de ripios, por ejemplo, preparación de los ripios haciendo uso de resina analizando si las afectaciones generadas al preparar la muestra afectan considerablemente las propiedades de la roca.

BIBLIOGRAFÍA

ANDERSEN, Mark; DUNCAN, Brent; McLIN, Ryan. Los núcleos en la evaluación de formaciones. Oilfield Review, 2017. p.12.

ASTM. D5873 Rock Hardness by Rebound Hammer, 2006.

ASTM. F1469-11 Standard guide for conducting a repeatability and reproducibility study on test equipment for nondestructive testing, 2011.

AUFMUTH, Raymond. A Systematic Determination of Engineering Criteria for Rock. Army construction engineering research lab champaign ill, army construction engineering research lab champaign ill, 1974.

CANOBA, Carlos; FRAGA, Hector. Propiedades Elásticas de las Rocas, 2010. p.12.

COOK, John; FREDERIKSEN, René. Las rocas importan: Realidades de la geomecánica, 2008.

DEERE, Don U; MILLER, R.P. Engineering classification and index properties for intact rock. Illinois univ at urbana dept of civil engineering, illinois univ at urbana dept of civil engineering, 1966.

FOWELL, Robert; SMITH, I. Factors influencing the cutting performance of a selective tunnelling machine. En: Elsevier, 1976.

GEOLOGY - rocks and minerals. En:
https://flexiblelearning.auckland.ac.nz/rocks_minerals/minerals/hardness.html. Accessed April 22, 2018.

GHOSE, Ajoy. Empirical Strength Indices Of Indian Coals - An Investigation. American Rock Mechanics Association; 1986.

GOKTAN, R.M; AYDAY, C. A Suggested improvement to the schmidt rebound hardness isrm suggested method with particular reference to rock machineability. International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts, 1993. p.30.

HARAMY, Khamis; DEMARCO, M.J. Use Of The Schmidt Hammer For Rock And Coal Testing. American Rock Mechanics Association; 1985.

HUCKA, V. A rapid method of determining the strength of rocks in situ. International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts. 1965. p.127–34.

ISRM. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, 1978.

KATZ, Oded; RECHES, Ze'ev; ROEGIERS, Jean-Claude. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000. p.723–728.

KAZI, A; AL-MANSOUR, Z.R. Empirical relationship between Los Angeles abrasion and Schmidt hammer strength tests with application to aggregates around Jeddah. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1980. p.45–52,

MATEUS, Jefferson. Obtención de la Resistencia Compresiva Uniaxial (UCS) de las rocas a partir de mediciones sobre ripios de perforación (Tesis). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2004.

O'ROURKE, J.E. Rock index properties for geoengineering in underground development. Mining Engineering. Littleton- Colorado, 1989. p. 106–9.

POOLE, R.W; FARMER, I.W. Consistency and repeatability of Schmidt Hammer rebound data during field testing. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1980. p.167–71,

REBOUND HAMMER (SCHMIDT HAMMER) - GBG. En:
<http://www.gbg.co.uk/index.php?page=strrebound>. Accessed April 22, 2018.

REBOUND HAMMER TESTING LABORATORY. Available at:
<http://www.spectro.in/Rebound-Hammer-Test.html>. Accessed April 22, 2018.

SANCHEZ, Kristine; TARRANZA, Nathaniel. Reliability of Rebound Hammer Test in Concrete Compressive Strength Estimation. International Journal of Advances in Agricultural & Environmental Engineering, 2015; p.1,

SHEOREY P.R, et al. Schmidt hammer rebound data for estimation of large scale in situ coal strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1984. p.39–42.

SINGH, R.N; HASSANI, F.P; ELKINGTON P.S. The Application Of Strength And Deformation Index Testing To The Stability Assessment Of Coal Measures Excavations. American Rock Mechanics Association; 1983.

SUÁREZ, Ludger. Assesment of the Mechanical Variability of Rock Slabs by Means of Non-Destructive Tests. Ingenieria y Ciencia, 2014. p.221–46,

VILES, Heather, et al. The use of the Schmidt Hammer and Equotip for rock hardness assessment in geomorphology and heritage science: a comparative analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011; p.320–333.

YAGIZ, Saffet. Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009. p.55–63.

YOUNG, R.P; FOWELL, Robert. Assessing rock discontinuities. En: *Tunnels Tunnelling*. vol 10. 1978. p. 45–8.

ANEXOS Y APENDICES

Anexo A. Hojas de cálculo de la Norma ASTM F1469-11 para la realización del R & R en instrumentos de prueba no destructivos.

F1469 - 11

Sample #	Operator A				Operator B				Operator C			
	1st Trial	2nd Trial	3rd Trial	Range	1st Trial	2nd Trial	3rd Trial	Range	1st Trial	2nd Trial	3rd Trial	Range
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
Totals												

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> $\bar{R}_A = \frac{\text{Range}}{n}$ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> $\Sigma A =$ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> $\bar{X}_A =$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> $\bar{R}_B = \frac{\text{Range}}{n}$ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> $\Sigma B =$ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> $\bar{X}_B =$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> $\bar{R}_C = \frac{\text{Range}}{n}$ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> $\Sigma C =$ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> $\bar{X}_C =$ </div>
--	--	--

<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">\bar{R}_A</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">\bar{R}_B</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">\bar{R}_C</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$\Sigma \bar{R}_{A, B, C}$</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">$\bar{\bar{R}} =$</td><td></td></tr> </table>	\bar{R}_A		\bar{R}_B		\bar{R}_C		$\Sigma \bar{R}_{A, B, C}$		$\bar{\bar{R}} =$		$\bar{\bar{R}} = \bar{R} \times D-4 = UCL-R^*$	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th># Trials</th> <th>D - 4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">3.27</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">2.58</td> </tr> </tbody> </table>	# Trials	D - 4	2	3.27	3	2.58	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">\bar{X}_A</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">\bar{X}_B</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">\bar{X}_C</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Max \bar{X}</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Min \bar{X}</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">\bar{X}_{dif}</td><td></td></tr> </table>	\bar{X}_A		\bar{X}_B		\bar{X}_C		Max \bar{X}		Min \bar{X}		\bar{X}_{dif}	
\bar{R}_A																															
\bar{R}_B																															
\bar{R}_C																															
$\Sigma \bar{R}_{A, B, C}$																															
$\bar{\bar{R}} =$																															
# Trials	D - 4																														
2	3.27																														
3	2.58																														
\bar{X}_A																															
\bar{X}_B																															
\bar{X}_C																															
Max \bar{X}																															
Min \bar{X}																															
\bar{X}_{dif}																															

Reference : The D-4 Constant is obtained from the table of Factors for X-Bar, R charts, page 12, Western Electric Statistical Quality Control Handbook.

Part Name : _____
 Part Number : _____
 Characteristic: _____

Gage Name : _____
 Gage No. : _____
 Specification : _____

Date : _____
 Performed By: _____
 File Name : _____

From Date Sheet: $\bar{R} =$

\bar{X} dif = Tolerance :

Measurement Unit Analysis							
Repeatability - Equipment Variation (E.V.) $E.V. = (\bar{R}) \times (K - 1)$ $= () \times ()$							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Trials#</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>K - 1</td> <td>4.56</td> <td>3.05</td> </tr> </tbody> </table>	Trials#	2	3	K - 1	4.56	3.05
Trials#	2	3					
K - 1	4.56	3.05					
Reproducibility - Appraiser Variation (A.V.) $A.V. = \sqrt{[(\bar{d}_{11}) \times (K - 2)]^2 - [(E.V.)^2 / (n \times r)]}$ $= \sqrt{[() \times ()]^2 - [()^2 / (10 \times ())]}$ $= ()$							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Operator#</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>K • 2 =</td> <td>3.65</td> <td>2.7</td> </tr> </tbody> </table> <p>n = # parts r = # trials</p>	Operator#	2	3	K • 2 =	3.65	2.7
Operator#	2	3					
K • 2 =	3.65	2.7					
Repeatability and Reproducibility (R & R) $R \& R = \sqrt{(E.V.)^2 + (A.V.)^2}$ $= \sqrt{()^2 + ()^2}$ $= ()$							
<p>* Guidelines for acceptance are referenced in "Measurement System Analysis" by A.I.A.G., 1990, page 46. All calculations are based upon predicting 5.15 sigma (99.0% of the area under the normal distribution curve). A.V. - If a negative value is calculated under the square root sign, the appraiser variation (A.V.) defaults to Zero (0).</p>							

%Tolerance Analysis	
$\% E.V. = 100[(E.V.) / (Tol)]$ $= 100[() / ()]$ $= ()$	
$\% A.V. = 100[(A.V.) / (Tol)]$ $= 100[() / ()]$ $= ()$	
$\% R\&R = \sqrt{[(\% E.V.)^2 + (\% A.V.)^2]}$ $= \sqrt{[()^2 + ()^2]}$ $= ()$	
<p>* Guidelines for acceptance are: Under 10% error - gage system O.K. 10% - 30% error - may be acceptable based on importance of application, cost of gage, cost of repairs, etc. Over 30% error - Gage system needs improvement. Make every effort to identify the problems and have them corrected.</p>	