

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Implementación del ensayo de Índice de resistencia de
carga puntual en rocas en especímenes irregulares y
núcleos extraídos.
Proyecto de investigación**

Jorge Daniel Carpio Rubio

Ingeniería Civil

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Civil

Quito, 09 de mayo de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERIAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Índice de resistencia de carga puntual en rocas especímenes irregulares y núcleos extraídos.

Jorge Daniel Carpio Rubio

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Ing. Gustavo Tapia, MDI

Firma del profesor

Quito, 09 de mayo de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Jorge Daniel Carpio Rubio.

Código: 00112641

Cédula de Identidad: 171800772-5

Lugar y fecha: Quito, 09 mayo de 2019

RESUMEN

La Universidad San Francisco de Quito, en conjunto con su laboratorio de materiales, tiene como enfoque principal, la aplicación del aprendizaje teórico que reciben sus alumnos, en ensayos normados. Con el fin de la comprensión más a detalle de las propiedades de los materiales y su comportamiento. Este proyecto de titulación tiene como propósito la implementación de un ensayo de categorización de la resistencia de rocas, a través de un índice de su resistencia. De esta manera, la Universidad podrá ofrecer este servicio externamente, además de permitir que los estudiantes se involucren en muchos más tipos de ensayos e investigaciones que realice la universidad. Este ensayo fue realizado con éxito en las instalaciones del laboratorio, siguiendo al pie de la letra las normas establecidas, y obteniendo resultados esperados. Estos resultados permiten categorizar el tipo de agregado rocoso procedente de una mina ubicada en el cantón Pedro Moncayo de la Provincia de Pichincha.

Palabras clave: ASTM, ensayo, índice, resistencia, carga puntual, núcleos, bloques, irregular, corrección, factor.

ABSTRACT

San Francisco de Quito University, in conjunction with its materials laboratory, has as its focus, the application of theoretical learning to students, in normed essays. For the purpose of more detailed understanding of the properties of the materials and their behavior. The purpose of this titling project is to implement a categorization of the strength of rocks, through an index of their resistance. So, the University could offer this service externally, in addition to allowing students to get involved in many more types of tests and research carried out at the university. The test was carried out successfully in the laboratory facilities, following the steps of the letter the established rules and obtaining expected results. These results allow to classify the type of rock aggregate of a mine located at Pedro Moncayo, Pichincha.

Keywords: ASTM, test, index, strength, load point, core, blocks, irregular, correction, factor.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	4
Abstract	5
Índice de tablas	8
Índice de figuras	9
Introducción	11
Desarrollo del Tema	12
1. Rocas	12
1.1. Morfología	13
1.2. Clasificación	13
1.3. Características y propiedades ingenieriles de las rocas	15
1.3.1. Peso específico	16
1.3.2. Porosidad	16
1.3.3. Absorción	16
1.3.4. Índice de calidad de la roca	17
1.3.5. Permeabilidad	17
1.3.6. Elasticidad en rocas	17
1.3.7. Resistencia de las rocas	18
1.3.8. Resistencia a compresión en rocas	19
1.3.9. Distribución de esfuerzos y Rotura frágil	20
2. Ensayo	25

2.1. ASTM.....	25
2.2. Clasificación del ensayo.....	26
2.3. Finalidad y limitaciones del ensayo.....	26
2.4. Aparato	28
2.5. Obtención de muestras	32
2.5.1. Selección de canteras.....	33
2.5.2. Herramientas y aparatos	34
2.5.3. Procedimiento de extracción de núcleos de roca	36
2.5.4. Preparación de muestras	38
2.5.5. Procedimiento de ensayo	42
2.5.6. Obtención de resultados	49
Resultados.....	54
Conclusiones	70
Referencias.....	75
ANEXO A: Tablas de resultados.....	77
ANEXO B: Ilustraciones y gráficos adicionales.....	81
ANEXO C: Guía para el uso del programa de Excel	82
ANEXO D: Documentos de calibración.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Grado de permeabilidad relativa.....	17
Tabla 2: Estadísticos descriptivos: Núcleo Is ₍₅₀₎	56
Tabla 3: Estadísticos descriptivos: Irregular Is ₍₅₀₎	60
Tabla 4: Análisis de Varianza	65
Tabla 5: Comparaciones en parejas de Tukey	67
Tabla 6: Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias.....	68
Tabla 7: Resumen de estadísticos de bondad.....	69
Tabla 8: Contenido de agua en muestras	77
Tabla 9: Datos de especímenes núcleo	77
Tabla 10: Resistencia corregida por muestra núcleo	78
Tabla 11: Datos de especímenes irregulares	78
Tabla 12: Resistencia corregida por muestra irregular	79
Tabla 13: Clasificación de la Muestra	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Roca ígnea.	14
Ilustración 2: Roca sedimentaria.....	14
Ilustración 3: Rocas metamórficas.....	15
Ilustración 4: Esquema de prensa hidráulica manual.....	29
Ilustración 5: Prensa Hidráulica Matest A125N - C094N	29
Ilustración 6: Esquema de platos cónicos truncados.....	31
Ilustración 7: Geometrías y formas para muestras.....	32
Ilustración 8: Requerimiento de forma para (a) y (b) núcleos, (c) bloques y (d) bultos irregulares.	33
Ilustración 9: Perforadora Husqvarna DSM 240 y broca.....	35
Ilustración 10: Perforaciones sobre roca de canto rodado Mina "Muyurco"	38
Ilustración 11: Preparación de muestras tipo núcleo.	39
Ilustración 12: Especímenes cilíndricos.....	40
Ilustración 13: Membretado y marcado del unto de aplicación de cargas en núcleos.....	41
Ilustración 14: localización del punto de carga en bloques y bultos irregulares	41
Ilustración 15: Tipos de falla en ensayo diametral.	43
Ilustración 16: Tipos de falla en ensayo axial núcleo.....	44
Ilustración 17: Tipos de falla en ensayo de bloque e irregulares.	45
Ilustración 18: Aplicación de carga en rocas anisotrópicas.	47
Ilustración 19: Variación de la resistencia a compresión según el contenido de humedad.	48
Ilustración 20: Efecto del Contenido de humedad y el porcentaje de Porosidad en la Resistencia a Compresión Uniaxial.	49
Ilustración 21: Nomograma de clasificación de resistencia.....	50
Ilustración 22: Método gráfico determinación de I_s (50). (.....	52

Ilustración 23: Grafica de factor de corrección F. (fuente: Norma ASTM D 5731-16)	53
Ilustración 24: Dimensiones espécimen de núcleo	54
Ilustración 25: Fallas en muestras de núcleo	55
Ilustración 26: Prueba de normalidad Anderson Darling	57
Ilustración 27: Gráfica de distribución de probabilidades Ensayo de Núcleo	57
Ilustración 28: Gráfica de caja de $I_s_{(50)}$ [MPa] Ensayo de Núcleo.....	59
Ilustración 29: Fallas en muestras irregulares.....	60
Ilustración 30: Prueba de normalidad Anderson Darling	62
Ilustración 31: Gráfica de distribución de probabilidades Ensayo Irregulares	62
Ilustración 32: Gráfica de caja de $I_s_{(50)}$ [MPa] Ensayo en Irregulares	63
Ilustración 33: Distribución normal de probabilidad en ensayos de núcleo e irregulares.	64
Ilustración 34: Grafica de intervalos IC = 95%	66
Ilustración 35: Grafico de caja y bigotes simultánea.	67
Ilustración 36: Intervalo de confianza de la diferencia de medias.....	68
Ilustración 37: Anatomía de Distribución normal de Probabilidades.....	81
Ilustración 38: Anatomía de Diagrama de cajas y bigotes.....	81

INTRODUCCIÓN

El uso de las rocas en la actualidad tiene un impacto y una relevancia importante, puesto que son materia prima en la construcción de obras civiles alrededor de todo el mundo. No solo en la actualidad, ya que desde hace cientos de años, la humanidad ha aprovechado este recurso de la mejor manera posible. Ya que hoy en día, la gente conoce más a detalle las características propias de este elemento presente a lo largo de nuestro planeta, podemos conocer la importancia que puede tener sobre una estructura, si el comportamiento mecánico interno de las rocas es bueno o malo. Este es el motivo principal para determinar y clasificar la calidad que presenta el material. Al realizar el ensayo ASTM D5731-16, permitidos categorizar las muestras obtenidas en el sitio específico seleccionado, para determinar el índice de resistencia a compresión presentes en las rocas. Al conocer las propiedades mecánicas, se podrá direccionar el agregado a los trabajos que requieran un mejor comportamiento mecánico; así como los lugares que no requieren un comportamiento mecánico de muy alta calidad. El categorizar el material, permitirá un aprovechamiento y un trabajo mucho más perfecto y profesional por parte de los ingenieros civiles. Este mejoramiento, ayudara notablemente al mercado ecuatoriano. El objetivo de categorizar cada una de las minas y canteras que laboran en suelo ecuatoriano, es brindar al consumidor un valor agregados que destaque por sobre otros competidores, elevando la calidad de la construcción. Pero para poder lograr este cambio, será necesario comprender y analizar a fondo la implementación de este ensayo, su procedimiento, sus resultados y sus objetivos. Para entender todo esto, es necesario comprender los conceptos básicos presentados en las siguientes secciones.

DESARROLLO DEL TEMA

1. Rocas

Se conoce que la estrecha relación entre la humanidad y la roca se encuentra presente desde la prehistoria, donde la roca fue una herramienta clave para el desarrollo del hombre. Desde el principio de la utilización de la piedra, se ha visto que se la ha utilizado en múltiples propósitos como en la fabricación de herramientas y armas, en monumentos funerarios, militares, eclesiásticos y en obras como coliseos, acueductos, vías de comunicación entre otros (Harker, 1960). Esto gracias a las propiedades que caracterizan la roca como la durabilidad o incluso propiedades ornamentales. Pero en la actualidad la roca perdió protagonismo en arquitectura fundamentalmente a causa del hierro el acero y el hormigón.

Para poder entender el por qué la roca ha estado presente durante tanto tiempo a través de los años de desarrollo del ser humano, es importante entender su definición, su origen, su clasificación y características.

La roca está definida como un agregado masivo de una composición casi en su totalidad de minerales¹. Ya sean uno o varios minerales, podemos decir que las rocas pueden ser monominerálicas o poliminerálicas (Derr & Zussman, 1993). La petrología es la rama que se encarga del estudio de las rocas, pero es la petrografía la que da la descripción y clasificación de la roca, pero la mecánica de rocas, técnicamente las estudia. Las rocas son encontradas en la corteza de la tierra y en la parte superior del manto terrestre.

¹ Los minerales son compuestos inorgánicos de origen natural con propiedades físicas y composición bien definidas.

1.1. Morfología

Las rocas pueden ser compuestas por uno o varios minerales como se mencionó anteriormente, sin embargo, los principales minerales que se encuentran presentes en la estructura de una roca son los silicatos, algunos óxidos, haluros, sulfatos, ciclosilicatos, varios fosfatos y minerales REE (tierras raras) (Blyth & Freitas, 1989). Al ser compuestas por minerales, poseen características muy bien marcadas de las que se hablará más adelante.

1.2. Clasificación

Las rocas se pueden clasificar en grupos distintos por ser agregados de minerales. Estos grupos pueden ser según su procedencia, unión entre minerales, propiedades químicas y otros criterios de clasificación, pero siendo tres los grupos más importantes los cuales se mencionarán. El primer grupo corresponde a la unión entre minerales sea fuerte o débil entre sí; ya que deben sus fuerzas de cohesión a varios factores, por ejemplo, cementos naturales, compactación por compresión, soldamiento y, yuxtaposición de granos (Baily, 1972). La calidad de la cohesión entre los granos minerales permite la siguiente clasificación:

Coherentes: Compuestas por elementos tenazmente unidos entre sí.

Incoherentes: Rocas sueltas, formadas de elementos libres e independientes como las arenas.

Semicoherentes: Con características intermedias como algunas tobas.

Pseudocoherentes: Que se comportan como coherentes si se encuentran secas y como incoherentes si han absorbido y retenido una cantidad considerable de agua.

En cuanto a la segunda clasificación, esta viene dictaminada por parte de un punto de vista genético-mineralógico. Con a cuál se clasifican como: endógenas o ígneas, exógenas o sedimentarias y metamórficas.

Las rocas ígneas son clasificadas ya que son producidas o generadas a partir de magma presente en el interior de la corteza terrestre. Estas son formadas en presencia de temperatura y presión sumamente altas. A su vez se pueden presentar subcategorías como rocas plutónicas² o intrusivas, volcánicas³ o efusivas y filonianas⁴.



Ilustración 1: Roca ígnea (fuente: <http://mineralandchile.blogspot.com>).

Las rocas sedimentarias son formadas sobre la superficie de la tierra correspondiente a los resultados del proceso de erosión de la roca, transporte de sedimentos generados por erosión, deposito del sedimento transportado y la litificación o endurecimiento del sedimento.



Ilustración 2: Roca sedimentaria (fuente: <http://mineralandchile.blogspot.com>).

² Formadas en el interior de la tierra por enfriamiento gradual del magma.

³ Originadas en un magma subcortical profundo bajo la corteza terrestre, que han ascendido a la superficie a través de erupciones volcánicas.

⁴ De tipo intermedio en relación a su emplazamiento respecto a las efusivas e intrusivas.

Y las rocas metamórficas que son derivadas de del proceso de transformación de dos tipos precedentes a través de procesos térmicos, químicos y mecánicos producidos dentro de la corteza terrestre.



Ilustración 3: Rocas metamórficas (fuente: <http://mineralandchile.blogspot.com>).

La tercera clasificación corresponde a la clasificación química que hace referencia al porcentaje de SiO_2 que se encuentra presente en la roca. Esta clasificación es muy útil en rocas de origen volcánico ya que los minerales se presentan en porcentajes variados y escasos. Con este criterio de las clasifica de la siguiente manera:

- Rocas ácidas: más del 66% de SiO_2 .
- Rocas intermedias: con un porcentaje de SiO_2 entre 66 y 52%.
- Rocas básicas: con un porcentaje de SiO_2 entre 52 y 45%.
- Rocas ultra básicas: menos del 45% de SiO_2 .

1.3. Características y propiedades ingenieriles de las rocas

Las principales características de las rocas dependerán si está compuesta de uno o de varios minerales y cuales son estos. Entre las principales características presentes son la dureza de sus minerales, el tamaño de sus componentes, la forma en que están trabados los componentes y los minerales, a cantidad y el tamaño de los poros y la cantidad y forma de fisuras y

discontinuidades (Baily, 1972). Sin embargo, ya que el fin del presente trabajo, se enfocará más en cuanto a las propiedades ingenieriles de las rocas.

Estas propiedades ingenieriles son básicamente propiedades mecánicas que poseen las rocas, propiedades que son analizadas y tomadas en cuenta dentro del campo de la ingeniería tal como la ingeniería civil. Dichas propiedades se las conocerá más a profundidad en las secciones siguientes.

1.3.1. Peso específico

El peso específico representa la relación entre el peso de la roca por unidad de volumen. Este es comúnmente expresado en kg/cm^3 . Pero el peso específico puede verse afectado por la porosidad de la roca y el contenido de agua presente en la roca. Este peso específico conocido como aparente es el que importa al ingeniero.

1.3.2. Porosidad

Esta es una propiedad la cual hace referencia al contenido de espacios vacíos entre los elementos solidos de una roca. Se la expresa principalmente en porcentaje como la relación de volumen de vacíos (V_p) y el volumen (V_a).

1.3.3. Absorción

Esta es una propiedad que tienen las rocas de absorber agua por medio de capilaridad⁵ cuando se ponen en contacto con agua directamente o con el terreno húmedo. También es expresada en porcentaje.

⁵ Propiedad de los fluidos que depende de su tensión superficial, la cual, a su vez, depende de la cohesión del fluido, y que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar.

1.3.4. Índice de calidad de la roca

Este es un índice que refleja el grado de discontinuidad y de alteración de la roca. Esto se puede deber a fracturamientos o fisuraciones. se lo estima a través de un cálculo de la capacidad de carga de la roca, obteniendo núcleos de rocas procedentes de macizos rocosos.

1.3.5. Permeabilidad

Es la capacidad que tienen las rocas de dejarse atravesar por un fluido bajo un gradiente hidráulico. Esta propiedad está regida por la ley de D'arcy. Esta propiedad guarda estrecha relación con la porosidad de una roca y el tamaño nominal de los granos, ya que, a mayores espacios, el fluido tiene una mayor capacidad o facilidad de atravesar la roca. Según el tipo de roca, tenemos la siguiente clasificación de permeabilidad.

Tabla 1: Grado de permeabilidad relativa

Tipo de roca	Grado de permeabilidad
Grava	Alta
Arena	Media
Arena fina o limo	Baja
Arcilla	Impermeable

1.3.6. Elasticidad en rocas

El módulo de Young también conocido como módulo de elasticidad, expresa la resistencia que opone una roca de sección transversal y de longitud dadas, a experimentar un alargamiento. Este alargamiento se produce cuando se somete la sección a una fuerza de alargamiento (Dapena, 1996). Es importante mencionar que las propiedades elásticas de las rocas son variables según la dirección de aplicación ya que de esto depende el valor del módulo de elasticidad. Cuando la carga se coloca de forma perpendicular respecto a los planos de

estratificación de la roca, se producen las deformaciones máximas. Y cuando más alta es la resistencia a la compresión de la roca, más alto es su módulo de elasticidad.

1.3.7. Resistencia de las rocas

La resistencia es la capacidad de soportar cargas aplicados a la roca por unidad de área. Existen 4 clases de esfuerzos, esfuerzos a compresión, cortante, tensión y rara vez de torsión. Pero el esfuerzo principal de estudio para rocas es el de compresión y en la cual se enfocará este trabajo. Este es comúnmente medido por cargas de fractura o ruptura por aplastamiento de muestras de formas prismáticas cubicas o cilíndricas, este esfuerzo representa la cantidad de carga por unidad de área que puede aguantar la roca antes de fallar. Esta resistencia es influida por algunos factores, entre los cuales se puede mencionar la textura de la roca. La textura está determinada principalmente por el grosor de los granos ya que un grano fino es más resistente que el grueso cuando existe una alta cohesión. Sin embargo, en rocas sedimentarias, la resistencia dependerá del material que compacte o actúe como cementante, ya que un cuarzo que cementa el material presenta mucha más resistencia que una arcilla que actúe como cementante, que posee una resistencia muy baja. La resistencia a la compresión también dependerá de la inclinación de las cargas aplicadas respecto a los planos de estratificación. Como se mencionó anteriormente, cuando las cargas se presentan de forma perpendicular a los planos, ocurren las máximas deformaciones, por ende, los esfuerzos son máximos también. Además de estos factores, la distribución tanto externa como interna de los esfuerzos juega un papel muy importante.

1.3.8. Resistencia a compresión en rocas

Como vimos anteriormente, las fallas a compresión se producen bajo esfuerzos que producen fisuras. Tiene que haber una alta densidad de fisuras. Se puede decir que existen dos situaciones extremas donde se produce la rotura a compresión de la roca, la primera es conocida como fragmentación y la segunda como fractura. La fragmentación ocurre cuando inicia la aparición de fisuras de forma homogénea y sin interacción entre las fisuras. Generalmente ocurre en rocas muy porosas, donde las concentraciones de tensiones existen en toda la roca. La fractura por otro lado es la situación más común debido a la anisotropía de las rocas, y es generada por la concentración local de fisuras microscópicas que se unen formando una fisura macroscópica durante la aplicación de la carga. Comúnmente la aplicación de la carga axial puntual produce dos conos de rotura en los extremos de la probeta que se encuentran en contacto con las cuñas. Lo que experimentalmente ha permitido demostrar que el proceso de rotura y la generación de micro fisuras comienza para esfuerzos previos al pico, rondando entre el 50 % y el 95 % de la resistencia a compresión., en comparación a lo que comúnmente se asume al decir que la fractura de la roca a compresión ocurre al alcanzarse la carga pico (Guéguen & Palciauskas, 1994). Es importante mencionar que, bajo un estado de compresión axial, las micro fisuras preexistentes con dimensiones y orientaciones adecuadas con respecto a la tensión principal máxima se cierran cuando fuerza de compresión aplicada alcanza un nivel particular conocido como la tensión de cierre de grieta. Cuando las tensiones de tracción inducidas por la compresión exceden la resistencia a la tracción local en las puntas de las fallas preexistentes, las grietas se generan y se propagan desde esas puntas y las grietas de propagación, conocidas como grietas en las alas, se alinean en paralelo a la tensión principal máxima (Basu, Mishra, & Roychowdhury, 2013).

Tal como se mencionó anteriormente, los resultados del ensayo a compresión dependen también de forma y volumen de la muestra, de la preparación y tallado. Esto quiere decir que

dependerá si la muestra es núcleo, bloque o bulto irregular. Esto es por la distribución de esfuerzo internos, ya que estos esfuerzos se direccionan en todos los sentidos internamente, pero cuando existen puntos de concentración de esfuerzos, como cambios abruptos en la superficie de la roca, los esfuerzos tienden a concentrarse aquí, y esto puede terminar siendo perjudicial para la muestra ya que la falla sucederá mucho más rápido y quizá la carga pico no sea tan alta (Bell, 2000).

Otro factor del cual dependerán los resultados del ensayo es la dirección de la aplicación de la carga, principalmente si la muestra corresponde a una roca anisotrópica. La velocidad de aplicación de la carga también juega un papel importante, por esto la norma recomienda una aplicación constante durante la aplicación de la carga hasta la rotura. La relación altura/diámetro puede llegar a influir en el ensayo ya que, si la altura es igual que el diámetro de la probeta, puede que no se formen los dos conos de rotura y, por lo tanto, se obtengan resistencias mayores al no existir micro fisuras iniciales. (Dapena, 1996). Por este motivo la norma limita las relaciones de dimensiones como se verá más adelante.

1.3.9. Distribución de esfuerzos y Rotura frágil

Para esta sección, explicaremos dos temas importantes para comprender porque existe una falla en la muestra, la distribución de esfuerzos internos y la rotura. Es importante aclarar que tanto la rotura como la distribución de esfuerzos está ligada completamente a la geometría interna de la roca, así como de la presencia de fisuras internas de las que hablaremos más adelante. Para entender la distribución de esfuerzos, es importante definir un esfuerzo como tal. este es definido como una magnitud física con unidades de fuerza sobre área. Esto genera internamente una acumulación de esfuerzos internos sobre una sección transversal plana de la muestra. Podemos definirlos como un conjunto de fuerzas y momentos estáticamente

equivalentes a la distribución de tensiones internas sobre el área de esa sección. Tendremos dos tipos de esfuerzos presentes en nuestra muestra, el esfuerzo normal que se encuentra perpendicular al plano de aplicación de la carga y el esfuerzo cortante que es tangencial al plano considerado (Zubizarreta & Ros, 2014). Estos esfuerzos se distribuyen internamente por la muestra y cuando llegan al punto máximo y la roca no puede soportar los esfuerzos internos, debido a la pérdida o desaparición de las fuerzas que cohesionan los componentes que constituyen el sólido, existe la rotura.

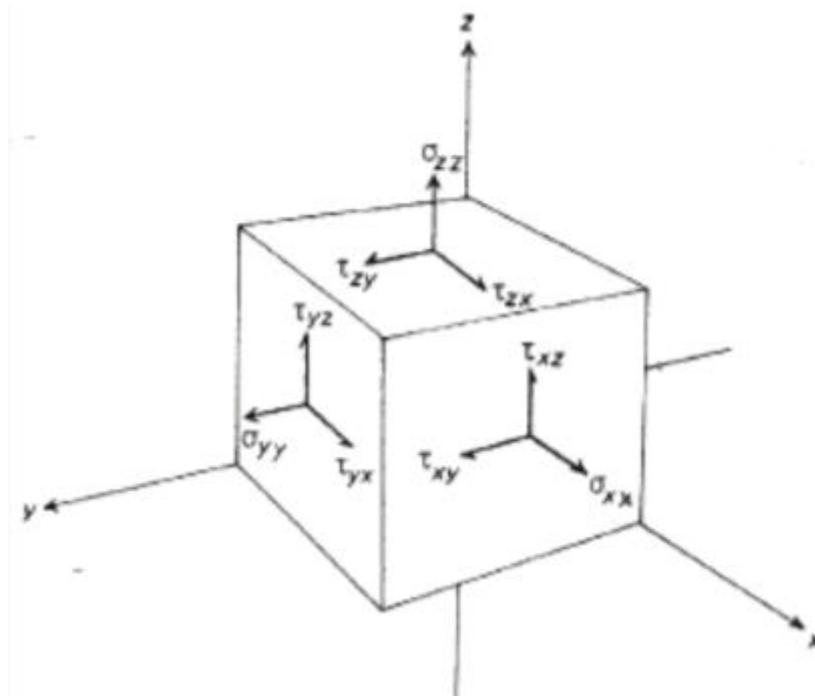


Ilustración 4: Componentes del estado de esfuerzos. (fuente: Libro Introducción a la Mecánica de Sólidos)

Para entender como ocurre esto, y porque la distribución de esfuerzos internos afecta a la muestra a tal punto que existe rotura, debemos retomar lo visto en secciones anteriores sobre fisuramiento interno. Al hablar de rotura, Zubarieta y Ros explican que la rotura es el conjunto de procesos que conducen a la pérdida irreversible de continuidad, lo que genera nuevas superficies. Esta pérdida de continuidad esta totalmente controlada por los diferentes niveles

de fisuración que contenga el sólido, desde niveles bajos como las micro fisuras, hasta los niveles altos donde encontramos macro fisuras. Dado que conocemos la presencia de fisuramiento desde su estado inicial o estado virgen, tenemos presente las alteraciones de estructura interna que existen antes de los ensayos. La combinación de micro y macro fisuras generan una rotura global, que se combinan con consideraciones de estructura geométrica original, zonas de entalla o concentradores de esfuerzo, que como se vio en secciones anteriores, es por donde inician los procesos de crecimiento de discontinuidades microscópicas y macroscópicas (Zubizarreta & Ros, 2014).

Ahondando un poco mas en tema de rotura, específicamente rotura frágil que es la que se encuentra presente en rocas, la interrogante que surge es el conocer por que, al existir tensiones relativamente bajas, existe la perdida de cohesión del material rocoso generando su falla. Por tal motivo se da el origen de la mecánica de fractura. Siguiendo sus principios, se determinarán 5 aspectos importantes que se deben considerar para entender la fractura o rotura frágil.

Balance energético

Al referirnos al balance energético, Zubizarreta y Ros, establecen el proceso de crecimiento de la grieta. Para que una grieta aumente de tamaño es necesario que esta consuma energía en la rotura, tendrá que consumir energía de rotura superficial dada en la creación de nuevas superficies, como la disipada en procesos que ocurren en el fondo de la grieta y que son irreversibles. En balance energético aparece una resistencia al avance que se designa como R , el cual representa la energía específica que es absorbida por el aumento de la longitud de la grieta. Gracias a esta resistencia, se puede encontrar una relación entre la tensión aplicada y el tamaño de la grieta. Se presenta esta relación en la ilustración 5, donde se puede ver que luego de llegar al punto de tensión máxima interna, las grietas empiezan a aumentar conforme la tensión interna desaparece y se pierde la cohesión.

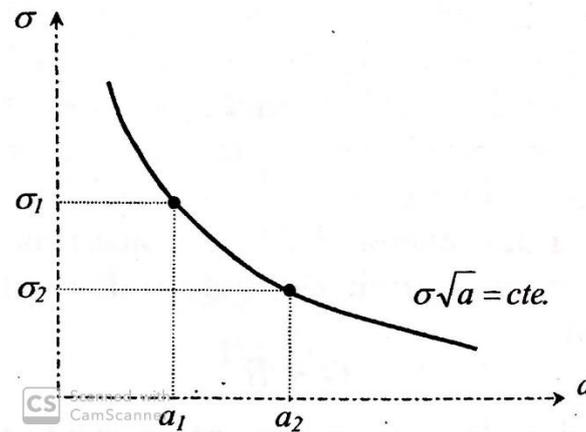


Ilustración 5: Curva Tamaño de grieta vs Tensión (fuente: Libro Introducción a la Mecánica de Sólidos)

Además, es importante recalcar que además del tamaño de la grieta generado por la tensión interna, la resistencia del avance dependerá de la temperatura, la velocidad de la carga y el espesor del sólido. Al disminuir la temperatura, se ha observado que la resistencia al avance disminuye simultáneamente. A diferencia de la temperatura, la velocidad, cuanto mayor es, la resistencia se reduce. Sucede lo mismo cuando existe un espesor mucho mayor, la resistencia al avance decae de la misma manera.

Factor de intensidad de tensiones

Dado la complejidad de este parámetro, no se ahondará mucho puesto que no es la finalidad del proyecto de titulación. Sin embargo, se explicará en que consiste el factor de intensidad. Este factor es una función analítica de variable compleja, enfocada en resolver el problema elástico plano⁶ que surgen con la presencia de grietas (Zubizarreta & Ros, 2014).

⁶ El problema elástico plano hace referencia a las deformaciones y grietas que aparecen en el plano del sólido de estudio.

Plasticidad en el fondo de grieta

El tercer aspecto, hace referencia a la aparición de tensiones infinitas obtenidas en el fondo de la grieta, las cuales pueden carecer de un sentido físico. Estas tensiones son consecuencia de la geometría singular que dispone la grieta donde aparecen. Se debe realizar este estudio ya que permite dar el enfoque de un sólido como material continuo. Al perder esta tensión en el fondo de la grieta, nace un desprendimiento físico el cual elimina toda continuidad del material. Generalmente estas tensiones son soportadas hasta el límite de la cohesión interna de la roca, como lo especifican Zubizarreta y Ros. Antes de la pérdida de cohesión en el fondo de la roca, se descubrió que, en el límite de la máxima tensión y el inicio del desprendimiento, existe una zona de plastificación. Por tal motivo se habla de plasticidad en el fondo de la grieta, siendo el paso previo a la pérdida de cohesión como se mencionó anteriormente.

Comportamiento elasto-plástico

Este aspecto explica el apareamiento de tensiones elásticas en el fondo plástico de la grieta. Dado que los modelos de corrección de plasticidad solo pueden darse bajo condiciones donde la plasticidad está en una zona muy pequeña, el comportamiento elasto-plástico sugiere acotar los límites de corrección por plasticidad en el fondo. Donde se deberá incluir considerar el comportamiento elástico del sólido frágil, para llegar a una conclusión más precisa.

Crecimiento de grietas sub críticas

Y finalmente el último aspecto hace referencia al crecimiento de las micro fisuras. Conociendo que las micro fisuras o grietas subcríticas (Zubizarreta & Ros, 2014), son estables para la geometría del sólido y bajo las cargas aplicadas, estas pueden crecer conforme las condiciones

del proceso de carga van cambiando. Como se había discutido en secciones anteriores, el aumento de grietas es la responsable de que exista falla, pero aquí es donde se explica las fases del crecimiento de la fisura. El proceso inicia cuando empieza a ocurrir una variación cíclica de la carga aplicada a la muestra, esta variación da paso a la segunda fase donde la roca entra en fatiga por la constante variación y aumento en la carga. Esta fatiga produce la rotura y expansión de las grietas subcríticas. El crecimiento de las micro fisuras, en conjunto con la presencia de agua, los aumentos de velocidad en la aplicación de la carga permiten la proliferación y distribución de esfuerzos a través de los puntos débiles de la roca donde, como se mencionó ya, se llega a la máxima tensión y se pierde la cohesión generando pérdida de continuidad y produciendo la falla o rotura de esta.

2. Ensayo

2.1. ASTM

La Sociedad Americana para el ensayo y materiales ASTM por sus siglas en inglés (American Society for Testing and Materials), es una organización que se encarga del desarrollo y publicación de normativas técnicas de una amplia gama de productos, materiales, sistemas y servicios. Esta organización mundialmente conocida y muy importante gracias a sus contribuciones, constantemente publica y renueva normas certificadas en muchas áreas distintas de trabajo, una de las cuales pertenece a la rama de ingenierías (ASTM, ASTM international, 2019). En su afán de validar y certificar materiales y ensayos, la ASTM permite ensayar y calificar la calidad de rocas mediante un índice de resistencia que determinara la calidad de esta, este ensayo es el que se realiza en el presente trabajo.

2.2. Clasificación del ensayo

El ensayo ASTM D5731-16, “Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications” es el encargado de realizar el índice de calidad de la roca (RQD⁷). Este ensayo se encuentra en la cuarta sección de volúmenes publicados por esta organización, esta sección abarca todos los temas de la construcción. Dentro de esta sección, encontramos todo lo referente a suelo y rocas, desarrolladas en 2 volúmenes. Constantemente cada cierta cantidad de años, ASTM se encarga de formar comités especiales, para la revisión, corrección, mejora y aval de los diferentes ensayos, por lo que siempre se encuentran en constante mejora para la obtención de mejores datos (ASTM, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications, 2016).

2.3. Finalidad y limitaciones del ensayo

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de este ensayo es la determinación de la calidad de la roca. La determinación de este índice de resistencia, se lo hace mediante un ensayo de carga uniaxial simple, ya que es un material que trabaja muy bien a compresión como se pudo apreciar anteriormente. Con este índice, se pretende dar una clasificación a la resistencia del material. Es importante mencionar el alcance que este ensayo tiene, ya que habrá limitantes para poder realizarlo de la manera correcta. Una de estas limitantes son las muestras del ensayo; las pruebas se pueden realizar en muestras de roca en forma de cilindros de roca o núcleos, bloques y formas irregulares. Rigiriéndose siempre a tamaños de muestra mínimos y máximos a considerar. Además, el ensayo considera la posibilidad de ensayar rocas isotrópicas y

⁷ Rock Quality Designation

anisotrópicas⁸. Las posibles restricciones y limitaciones deberán ser consultadas en la sección los apéndices donde se encontrará como referencia la norma.

Para poder entender la clasificación de la resistencia, es importante aclarar la diferencia existente con un ensayo de compresión, como por ejemplo el ASTM D3410M-16, un ensayo de compresión de materiales compuestos, entre los más complejos y completos que hay. Mientras que, con el ensayo utilizado en el presente trabajo, intenta determinar los atributos peculiares de una muestra. Sin embargo, el ensayo D5731-16, lleva correlación con el ensayo de compresión, así como con otros ensayos de compresión como uniaxiales biaxiales o triaxiales. Si pensamos en un ensayo uniaxial de compresión simple, el $I_s (50)$, obtenido del ensayo de índice de resistencia, es un parámetro o valor aplicado y a valorarse ya que son muy aproximados, al valor real del ensayo uniaxial en función del diámetro. Además, el ensayo del cálculo del índice de resistencia tiene una ventaja clave, y es que las muestras de roca pueden ser irregulares sin necesidad de una preparación previa, adicionando el hecho que la maquina o prensa es portátil, lo que permite que este ensayo sea mucho más fácil y practico de realizar. Esta facilidad comparada con un ensayo a compresión común cuya obtención en ensayos de laboratorio requiere muestras cuidadosamente preparadas y de un tiempo considerable para conocer su resultado, representando un mayor costo. Pero inclusive la ISRM (International Society of Rock Mechanics) indica que existe una relación lineal directa entre la resistencia a compresión simple y el índice de carga puntual $I_s (50)$, pero esta relación directa varía entre 20 y 25 (Santamarta & Hernández , 2015).

⁸ Isotropía y anisotropía indican la presencia de un mismo comportamiento en cualquier sentido, o un comportamiento distinto según el sentido respectivamente

2.4. Aparato

Para el ensayo, se utiliza una prensa hidráulica básica manual disponible en el laboratorio de suelos de la USFQ; esta consiste en un sistema de carga que consta de un marco de carga, platos en forma de cuñas, un sistema de medición que indica la carga, P y una regla de medición de la distancia de separación existente entre la cuña superior e inferior. Este equipo es resistente a vibraciones y golpes, esto es importante porque las mediciones no deben verse afectadas de ninguna manera. Adicionalmente, cada equipo y modelo, debe cumplir una calibración y mantenimiento establecidos por el fabricante, de tal manera que se asegura el correcto funcionamiento del equipo (ASTM, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications, 2016). La figura 6, representa un esquema referencial de la prensa hidráulica recomendada por la ASTM en la sección 6 de la norma. Las partes principales de la prensa son:

- Cuñas de soporte de la muestra (1)
- Bastidor de 2 columnas fijo (2)
- Escala (3)
- Puntero de escala (4)
- Tornillo (5)
- Pistón hidráulico (6)
- Tapón de aceite de la bomba hidráulica (7)
- Mango para pistón hidráulico (8)
- Válvula de liberación de presión (9)
- Lector digital de presión (10)
- Ganchos de la caja protectora (11)
- Caja protectora (12)

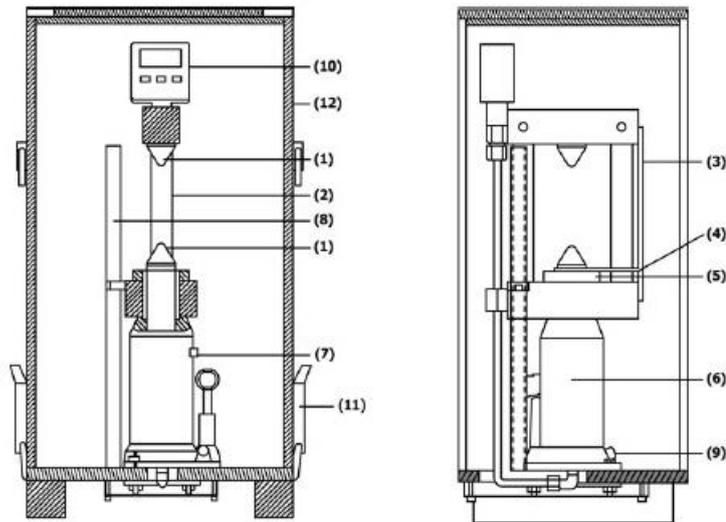


Ilustración 6: Esquema de prensa hidráulica manual (fuente: Norma ASTM D5731-16)

El laboratorio de materiales de la universidad San Francisco actualmente cuenta con una prensa hidráulica marca Matest, modelo A125N - C094N, como se muestra en la figura 7, debidamente calibrada con la que se realizaron todos los ensayos para el presente trabajo.



Ilustración 7: Prensa Hidráulica Matest A125N - C094N (fuente: Sitio oficial Matest <http://www.matest.com/es/producto/c094n-portable-digital-press>)

Dentro de la prensa, un sistema muy importante es el sistema de carga, este debe cumplir ciertas limitaciones para poder realizar los ensayos. Una de sus limitaciones debe ser la distancia libre entre placas donde va la muestra. Esta distancia debe permitir los especímenes de roca, sean núcleos, bloques o irregulares; dentro del rango de tamaño especificado por norma. Típicamente este rango oscila entre 30 a 100 milímetros, por lo que la distancia libre entre los platos debe superar este rango. Otra consideración muy importante es la capacidad de carga que debe tener la prensa. Este valor dependerá del modelo y la marca de cada prensa, pero es sugerible que la capacidad de la prensa se encuentre entre 50 a 65 kN, un rango muy aceptable para muestras de roca de buena calidad. Al asegurar de esta gran capacidad de carga, es primordial asegurarse que el bastidor de carga sea diseñado y construido de tal manera que soporte las constantes pruebas sin sufrir deformaciones, y que los platos siempre se mantengan fijos en cada posición sin desplazar las cuñas para que no exista excentricidad en las aplicaciones de carga durante los ensayos. Esto es importante, ya que se debe asegurar rigidez cuando se realizan pruebas en bultos irregulares de roca. Actualmente, el aparato disponible en el laboratorio de materiales cuenta con las debidas calibraciones, se podrá encontrar entre los anexos, los documentos de la última calibración realizada, los parámetros que se manejaron, y el rango de tolerancia. Estos documentos son principalmente de la calibración de la celda de carga. De la misma manera, la tolerancia de la verticalidad de las cuñas en el plato superior como inferior fueron calibrados correctamente, ya que la prensa llegó al laboratorio con una verticalidad que superaba su tolerancia permitida.

Otro componente básico son los dos platos cónicos para la compresión uniaxial a la que se someterán las muestras. La figura 8 muestran un esquema de los platos. Estos conos truncados tienen un ángulo interno de 60° con un chaflán en la punta de 5 mm de radio. Ambas cuñas son

generalmente fabricadas en acero endurecido o carburo de tungsteno⁹, elementos que permiten que las placas no sufran danos durante los ensayos, un material muy resistente (ASTM, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications, 2016).

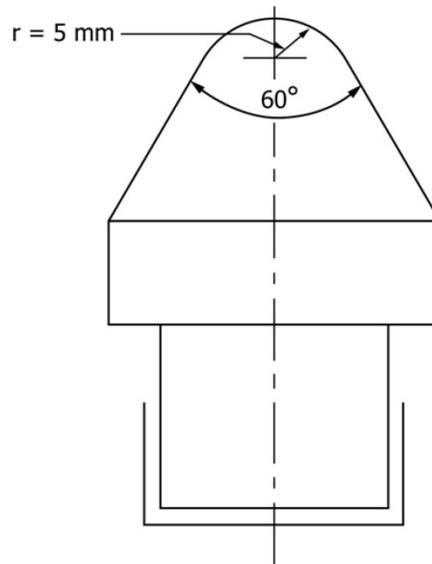


Ilustración 8: Esquema de platos cónicos truncados (fuente: Norma ASTM D 5731-16)

Finalmente, el sistema de medición debe cumplir ciertos parámetros para que las lecturas sean precisas. Generalmente son simples, pueden ser celdas de carga o medidores de presión hidráulica. Indican la carga aplicada constantemente a la muestra y el máximo de carga a la cual la muestra falla. Es muy importante que este lector tenga tolerancia en la decisión, que generalmente se encuentra en un 5% o menos, de la medida de carga. Dado que la falla es súbita o repentina, el sistema de medición debe contener un indicador del pico de carga, almacenado después de cada ensayo.

⁹ También conocido como carburo de wolframio, es un compuesto formado por carbono y wolframio muy resistente.

2.5. Obtención de muestras

Como se vio en la sección anterior, la norma permite trabajar con tres geometrías o formas de muestra, núcleos o cilindros (a), bloques (b) y bultos irregulares de roca (c). Cada grupo o tipo de forma puede ser seleccionado tanto para rocas isotrópicas como anisotrópicas, sin importar el plano de falla más débil. Es importante resaltar que existe una variabilidad en los resultados de las pruebas, por tal, la norma proporciona parámetros para la toma de muestras.

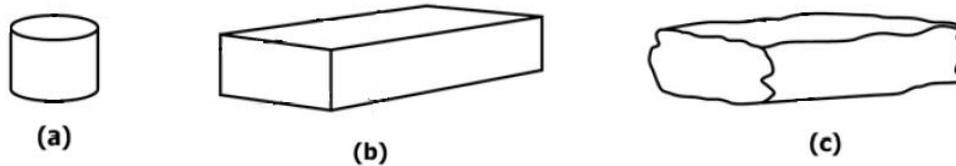


Ilustración 9: Geometrías y formas para muestras. (fuente: Norma ASTM D 5731-16)

El primer parámetro por considerar es la cantidad de muestras según el tipo de muestra que se utilice. Cuando se testea núcleos de roca o bloques, la norma pide un mínimo de 10 especímenes por cada muestra de roca que se vaya a analizar. Mientras que, para bultos irregulares de roca, la norma exige un mínimo de 20 especímenes de roca. Cuando se trabaja con una roca anisotrópica, la norma sugiere que existe la posibilidad de que se requieran más especímenes que los requeridos anteriormente.

El segundo parámetro por considerar son las dimensiones de cada tipo, se deben respetar las medidas máximas y mínimas para cada muestra, ya que de estas medidas dependerán los cálculos para la correspondiente clasificación de las rocas en estudio. ASTM en la norma, presenta la figura 3, en la que determinan claramente las dimensiones de cada tipo de muestra que se requieren para el ensayo, esta grafica resumen, se presenta a continuación en la ilustración 10.

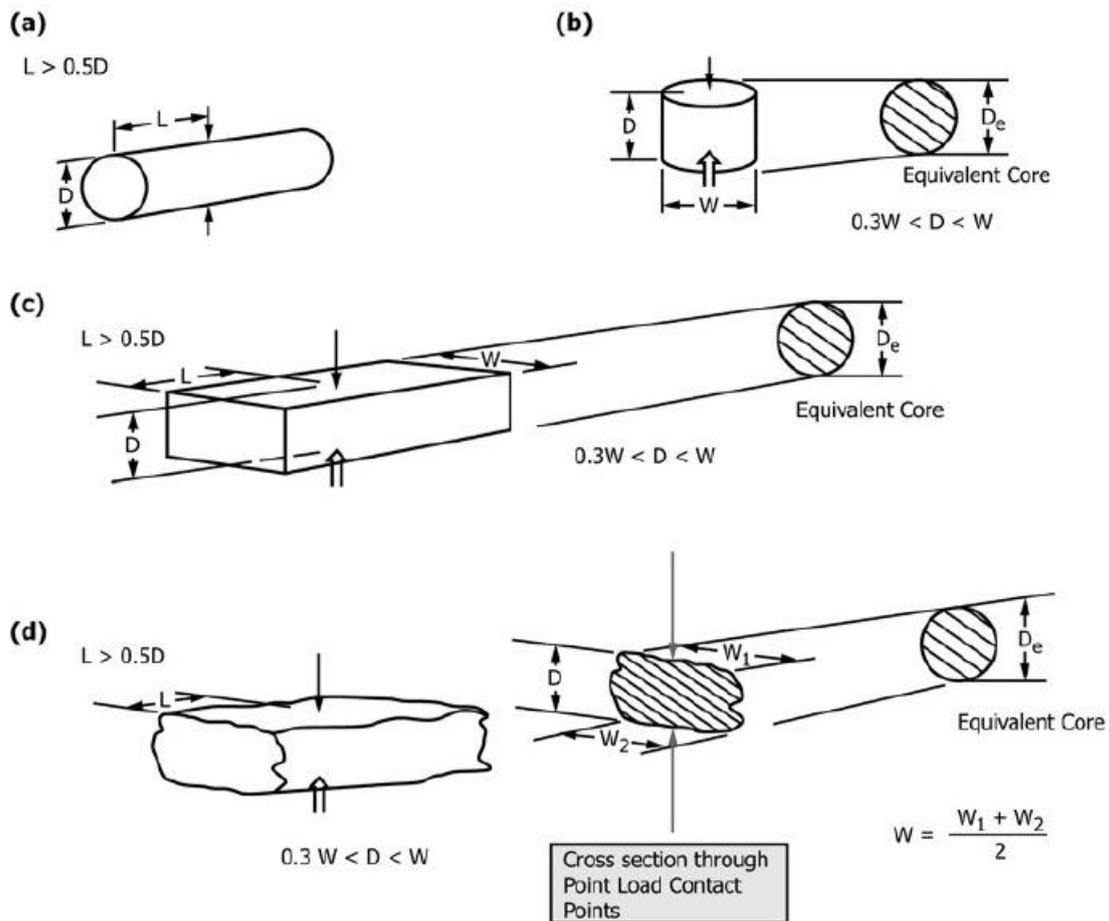


Ilustración 10: Requerimiento de forma para (a) y (b) núcleos, (c) bloques y (d) bultos irregulares. (fuente: Norma ASTM D 5731-16)

Donde L representa la distancia medida desde el punto de contacto de las placas cónicas, hasta la cara libre más cercana de la pieza, y D_e representa el equivalente al diámetro de un núcleo, para bloques y bultos irregulares. Es importante tomar en cuenta las limitaciones tanto en las dimensiones de ancho W para bloques e irregulares y las distancias entre las cuñas de apoyo, puesto que son requisitos para el ensayo.

2.5.1. Selección de canteras

El alcance de este trabajo se limitó a la obtención de muestras de una cantera activa y con todos los permisos requerido. Se definió la cantera en función de la ubicación, facilidades

de acceso, acuerdos, y amplia colaboración con equipo y personal. Mediante un oficio oficial, la Universidad San Francisco de Quito, solicitó se autorice acceder a las minas pertenecientes al Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Pichincha. Dentro de las varias opciones que se tuvo para escoger el lugar de la toma de muestras, se decidió escoger la mina “Muyurco”, ubicada en el Cantón Pedro Moncayo, muy cerca de Cayambe. La razón de esta selección fue principalmente por las facilidades de movilización y ayuda por parte del GAD provincial; y de la presencia de rocas extraídas de río, rocas de canto rodado que tienen un muy buen compartimento y una alta resistencia a la compresión.

2.5.2. Herramientas y aparatos

Para poder realizar la toma de muestras, es necesario contar con el equipo apropiado para poder extraer muestras. Si la toma de especímenes es de bloques o de formas irregulares, el equipo necesario es el mínimo. Para rocas irregulares, el procedimiento es más simple, las muestras son tomadas en la cantera, una vez las rocas han pasado por las trituradoras. Al encontrarse trituradas, es importante seleccionar el tamaño correcto y comprobar las limitaciones dimensionales expuestas en la ilustración 10. Se sugiere usar un calibrador o también conocido como pie de rey, para la toma de dimensiones L, D, y W, seleccionando así las mejores muestras para el ensayo sin olvidar el tamaño de muestra discutido en la sección 2.5 del presente documento. El procedimiento para la toma de especímenes de tipo bloque, es esencialmente el mismo que para bultos irregulares, con la salvedad de que las dimensiones tomadas de las rocas trituradas deberán ser mayores, ya que estas muestras requieren un trabajo de preparación de muestras para dar la forma de bloque requerida. Este trabajo de preparación se lo realiza en el laboratorio; utilizando equipo especial como una cortadora de disco para rocas y hormigones, se puede realizar los cortes necesarios al espécimen, y generar la forma en

bloque necesaria. Posteriormente se comprueban las limitaciones dimensionales y se obtiene la muestra necesaria para el ensayo.

Para la obtención de núcleos, se requiere equipo más especializado y su complejidad aumenta considerablemente. Para la extracción de estos especímenes, la herramienta principal es una perforadora de hormigones y rocas con broca de diamante, específicamente la usada para este trabajo fue de marca Husqvarna. Esta perforadora modelo DMS 240, como se observa en la ilustración 11, en conjunto con una broca de diamante de 2 pulgadas de diámetro (5.08 cm), se consideran la herramienta principal para la extracción.



Ilustración 11: Perforadora Husqvarna DSM 240 y broca. (fuente: Sitio web oficial del fabricante <https://www.husqvarnacp.com/latam/buscar/?searchText=DMS%20240>)

Al realizar perforaciones in-situ, directamente desde el macizo rocoso, se trabaja en campo, sin los servicios básicos necesarios como agua y electricidad, es necesario equipo adicional para obtener las perforaciones. Este equipo adicional consta de un generador eléctrico de combustible, y un tanquero de agua. El generador debe ser capaz de entregar la energía que necesita la perforadora para su funcionamiento (110V), mientras que es necesario el tanquero

o tanques de agua, ya que el equipo de extracción trabaja con agua como líquido de lubricación en cada perforación, para preservar la integridad de la broca como del equipo en sí, y no tener esfuerzos innecesarios (Husqvarna, 2019). Además de estos equipos, se requieren herramientas menores de mano como juegos de llaves, taladros neumáticos, y pernos autoperforantes para la fijación del equipo de extracción en el macizo rocoso.

2.5.3. Procedimiento de extracción de núcleos de roca

Como se vio en la sección anterior, la extracción de cilindro de roca requiere un procedimiento especial, el que se discutirá en esta sección. Pese a que no representa un grado de dificultad muy grande, este procedimiento requiere de un mínimo de dos personas para completar la extracción. Los pasos para una extracción son:

- 1) Seleccionar una superficie lo más regular posible, sea vertical u horizontalmente.
La regularidad permite que el cilindro se perfore de manera correcta, sin presentar desviaciones que puedan afectar los resultados del ensayo.
- 2) Analizar el lugar de perforación en busca de tomas de agua y luz cercanas para la extracción, caso contrario equiparse de tanque de agua y generador de luz.
- 3) Una vez el punto de extracción se encuentra listo y se tiene los equipos necesarios, anclar la perforadora a la superficie con la ayuda de pernos autoperforantes de ½ pulgada, un mínimo de dos pernos para brindar la fijación necesaria a la extractora.
- 4) Una vez la perforadora se encuentra fija, nivelarla con la ayuda del nivel “ojo de pollo” para realizar una perforación perfectamente recta, y empezar con las perforaciones a baja velocidad, controlando el avance de la broca.
- 5) Perforar hasta el límite de la broca (40 cm aprox.), retirar la perforadora y extraer el núcleo.
- 6) De ser necesario, antes de iniciar la perforación, se puede poner un perno pequeño en el eje del cilindro que será extraído, de manera que cuando se haga la perforación,

se pueda retirar el cilindro con la ayuda del perno a manera de palanca. Tomar en cuenta la profundidad de perforación con el perno y la broca que se tiene disponible.

- 7) Una vez extraído el cilindro, etiquetar y repetir el procedimiento según el número de cilindros que se requieran. Estas muestras deberán pasar a preparación de muestras, que se analizará en la siguiente sección.
- 8) Se debe considerar que se puede realizar una extracción directamente desde el macizo rocoso, o de una roca de gran tamaño.





Ilustración 12: Perforaciones sobre roca de canto rodado Mina "Muyurco"

2.5.4. Preparación de muestras

Para la preparación de las muestras consiste principalmente en los trabajos de clasificación, membretado y marcado. Sin embargo, para muestras de núcleos y bloques, se debe preparar los especímenes mediante cortes como se mencionó en la sección 2.5.2. Para la preparación de muestras bloque, se deberá trabajar con una cortadora de disco de diamante, para dar forma con las dimensiones adecuadas y aprobadas por norma. Para la preparación de muestras núcleo, se utiliza de igual manera la cortadora de disco. Al tener los cilindros primarios obtenidos después de la perforación, estos deben pasar por el proceso de corte, para darles la dimensión D final aprobada por la norma (ver ilustración 8 como referencia), y obtener el número de cilindros necesarios. La ilustración 13 muestra el proceso de preparación con la cortadora de disco, que se realizó en el laboratorio de materiales.

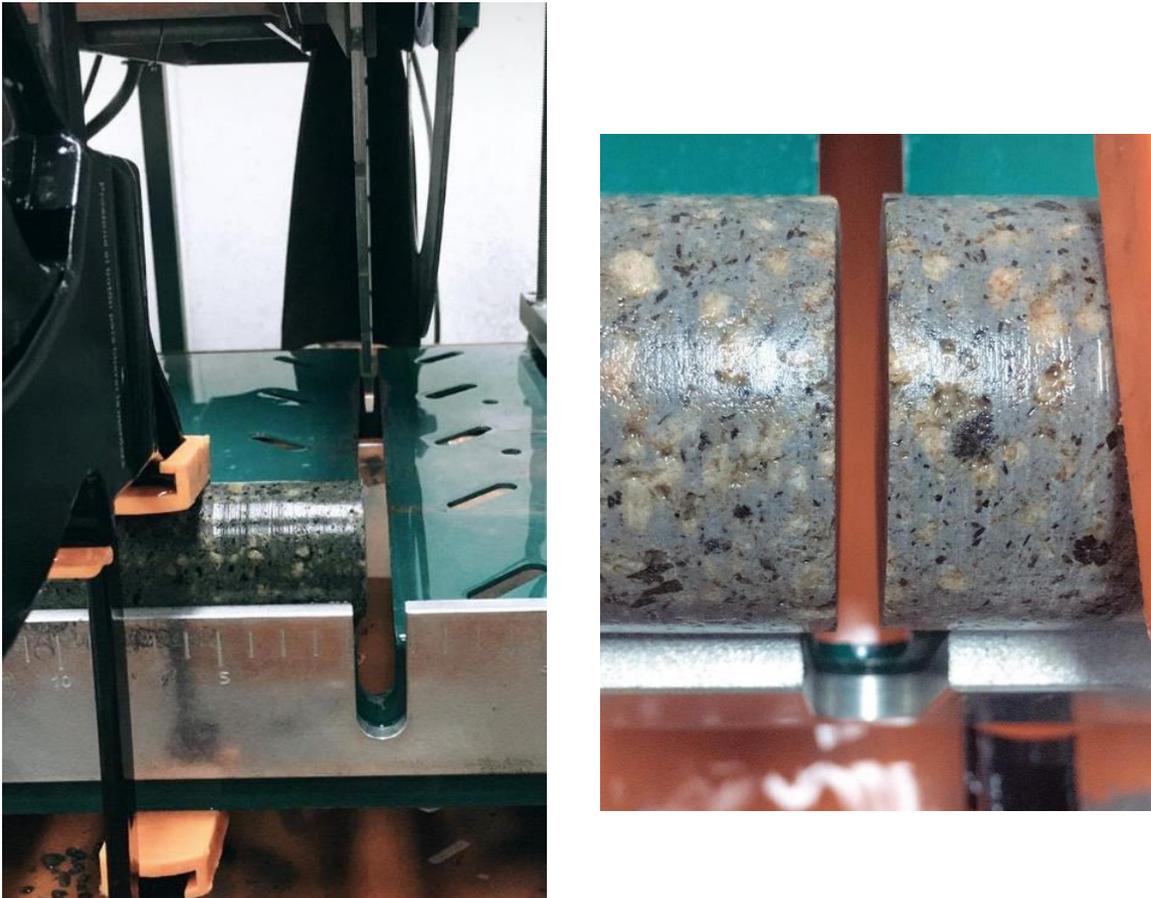


Ilustración 13: Preparación de muestras tipo núcleo.

Se busca obtener núcleos que cumplan las limitaciones dimensionales, no necesariamente deben tener la misma distancia D todos los núcleos, pues no es un impedimento que tengas distancias diferentes, simplemente deben mantenerse dentro de los parámetros correctos. Obteniendo ya las muestras, se debe proseguir con el marcado y membretado respectivo.



Ilustración 14: Especímenes cilíndricos

Para el membretado y marcado del punto donde se cargará la muestra, es importante considerar las siguientes recomendaciones:

- En el membrete, se recomienda que incluya o contenga el número de muestra, el tipo de espécimen, la cantera (de existir muestras de más canteras) y la fecha.
- Para núcleos, se recomienda trazar múltiples líneas en ambas caras donde se apoyarán los platos cónicos de carga, estas líneas deberán mostrar el centro del núcleo (ver ilustración 15 como referencia).
- Para bloques y formas irregulares, también se recomienda mostrar los puntos donde se apoyarán las cuñas de carga. Esto se puede realizar trazando líneas perpendiculares entre sí a lo largo y ancho de la muestra, teniendo en cuenta que el punto de intersección entre estas líneas debe ser el punto donde se desee aplicar la carga. La ilustración 14 sirve como referencia.



Ilustración 15: Membretado y marcado del unto de aplicación de cargas en núcleos

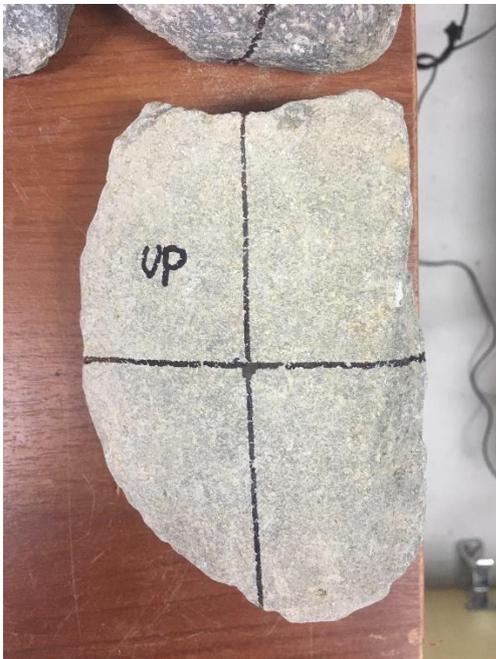


Ilustración 16: localización del punto de carga en bloques y bultos irregulares

Membretados y localizados los puntos de aplicación de carga en cada muestra, se puede proseguir con la rotura de las muestras para encontrar su resistencia a la compresión.

2.5.5. Procedimiento de ensayo

Se definirán 5 procedimientos diferentes para la toma de datos de este ensayo ASTM, el primer procedimiento será el ensayo diametral, seguido por el ensayo axial en núcleo, el ensayo axial en bloque y bultos irregulares, el ensayo en muestras anisotrópicas, y finalmente el contenido de agua presente en las muestras.

Ensayo diametral

El ensayo diametral consiste en un ensayo de compresión paralelo al área circular del cilindro.

Es un ensayo relativamente simple, puesto que no requiere un cálculo de diámetro equivalente.

Para realizar este ensayo, se siguen los siguientes pasos:

1. Obtener el núcleo de roca con una relación de longitud/radio mayor a 1. Ver la ilustración 10.
2. Insertar el espécimen en la prensa, ubicando las cuñas a L de la cara transversal del núcleo. Verificar que L es mayor a $0.5D$.
3. Tomar la distancia D , una vez colocado el núcleo y cerrados los platos sobre la muestra de manera que las cuñas sostienen el cilindro.
4. Aplicar la carga a través de la gata hidráulica, aplicarla de manera constante y continua hasta que se produzca la falla.
5. Verificar que la muestra haya producido una falla aprobada, caso contrario descartar el ensayo. Ver ilustración 17 de fallas, donde (a) son fallas aprobadas y (b) son fallas descartadas.
6. Registrar los datos de carga pico aplicada y continuar con el resto de las muestras.

7. Realizado el ensayo para todas las muestras y encontrar el esfuerzo soportada por cada cilindro con la ayuda de la sección 2.5.6.

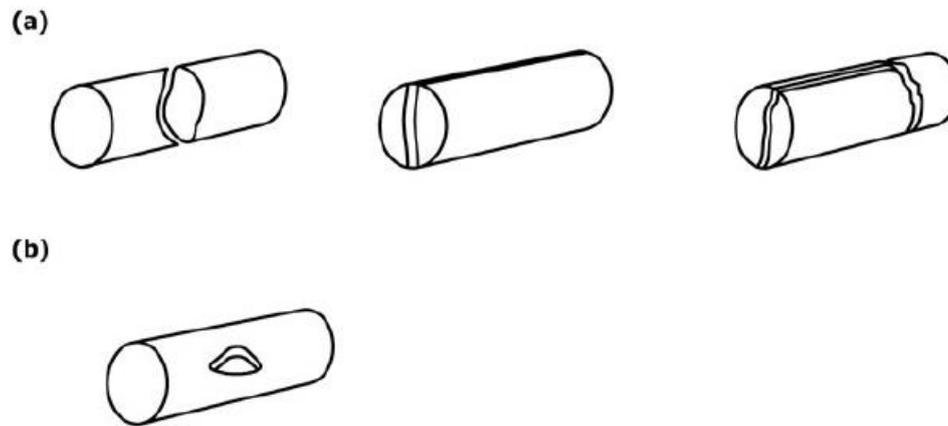


Ilustración 17: Tipos de falla en ensayo diametral. (fuente: Norma ASTM D 5731-16)

Ensayo axial núcleo

Para el ensayo axial de núcleo, la aplicación de la carga será perpendicular al plano del área circular del cilindro. Este ensayo sigue una metodología parecida al ensayo diametral, con algunos pasos adicionales.

1. Obtener el núcleo de roca con una relación de longitud/radio entre $1/3$ y 1 . Ver la ilustración 8.
2. Insertar el espécimen en la prensa, ubicando las cuñas en el eje vertical del cilindro de roca. El núcleo indica el centro en las caras a través del procedimiento de preparación de muestras visto en la sección anterior.
3. Tomar la distancia D , una vez colocado el núcleo y cerrados los platos sobre la muestra de manera que las cuñas sostienen el cilindro. Registrar de igual manera la distancia perpendicular a la dirección de aplicación de carga W . realizar esta medición en tres lugares diferentes del cilindro.

4. Aplicar la carga a través de la gata hidráulica, aplicarla de manera constante y continua hasta que se produzca la falla.
5. Verificar que la muestra haya producido una falla aprobada, caso contrario descartar el ensayo. Ver ilustración 18 de fallas, donde (a) son fallas aprobadas y (b) son fallas descartadas.
6. Registrar los datos de carga pico aplicada y continuar con el resto de las muestras.
7. Realizado el ensayo para todas las muestras y encontrar el esfuerzo soportada por cada cilindro con la ayuda de la sección 2.5.6.

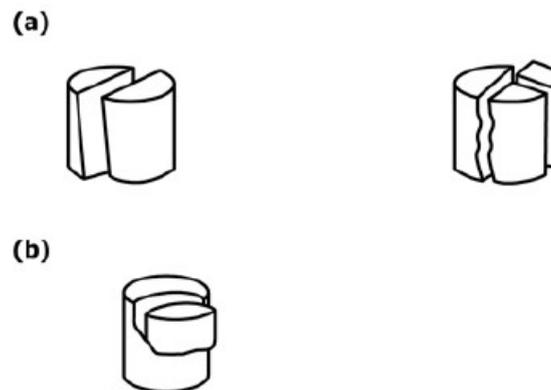


Ilustración 18: Tipos de falla en ensayo axial núcleo. (fuente: Norma ASTM D 5731-16)

Ensayo axial en bloque y bultos irregulares

Tanto para bloques y muestras irregulares, el procedimiento de ensayo es el mismo, salvo las consideraciones diametrales. El nivel de dificultad sigue siendo relativamente bajo. Se harán notar las diferencias entre bloques y rocas irregulares de ser necesario.

1. Obtener la muestra de roca respetando las relaciones de longitud, diámetro y ancho para ambos tipos de muestra. La muestra deberá tener una distancia D de entre 30 a 85 mm,

y una relación D/W de entre $1/3$ a 1 preferible más cercana a 1 . Ver la ilustración 8 para referencias.

2. Insertar el espécimen en la prensa, ubicando las cuñas como se indica en la ilustración 10. Se deberá encontrar el punto de aplicación de carga como se indicó a través del procedimiento de preparación de muestras visto en la sección anterior.
3. Tomar la distancia D , una vez colocado el espécimen y cerrados los platos sobre la muestra de manera que las cuñas sostienen la muestra. Registrar de igual manera la distancia perpendicular a la dirección de aplicación de carga W . De ser una muestra irregular la que se ensaya, se deberá controlar dos distancias W , tanto en la cara superior como en la inferior de la muestra.
4. Aplicar la carga a través de la gata hidráulica, aplicarla de manera constante y continua hasta que se produzca la falla.
5. Verificar que la muestra haya producido una falla aprobada, caso contrario descartar el ensayo. Ver ilustración 19 de fallas, donde (a) son fallas aprobadas.
6. Registrar los datos de carga pico aplicada y continuar con el resto de las muestras.
7. Realizado el ensayo para todas las muestras y encontrar el esfuerzo soportada por cada cilindro con la ayuda de la sección 2.5.6.

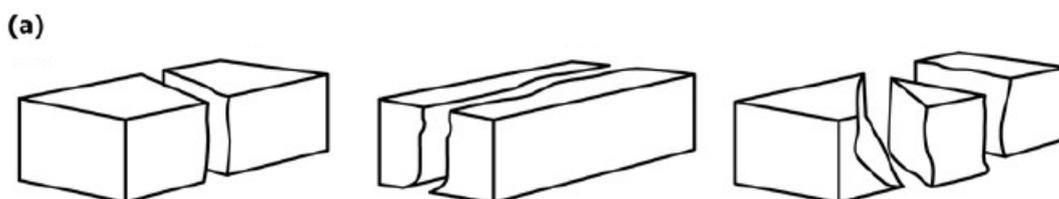


Ilustración 19: Tipos de falla en ensayo de bloque e irregulares. (fuente: Norma ASTM D 5731-16)

Ensayo en muestras anisotrópicos

Cuando las muestras de roca son anisotrópicas, el procedimiento es el mismo realizado en los ensayos anteriores, con la observación principal de que la norma aumenta el número mínimo de muestras que se deben tomar para realizar el ensayo. Tal como se mencionó al inicio de esta sección, el número de muestras por ensayos de núcleo y bloque requeridos es de un mínimo de 10 y 20 especímenes respectivamente, por lo que para el ensayo de muestras anisotrópicas debería aumentar en al menos 1.5 veces más. Pero de ser necesario determinar de manera más precisa el número exacto de muestras necesarias, la norma pide que se utilice el ensayo ASTM E122 “Standard Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With Specified Precision, the Average for a Characteristic of a Lot or Process” con el que se podrá realizar esta estimación.

Ya que la roca anisotrópica presenta una variación de características entre sus planos: fuerte y débil, se debe realizar el ensayo escogido tanto en el plano fuerte como en el débil de la roca. Esto quiere decir que se deben realizar los ensayos tanto en sentido paralelo como normal a los planos de isotropía, para el caso de bloques y formas irregulares. Para núcleos, los mejores resultados de las pruebas se obtienen cuando el eje central es perpendicular a los planos de debilidad. Cuando sea posible, el núcleo debe ser perforado en esta dirección. Se debe considerar que el ángulo entre el eje del núcleo y la normal en la dirección de menor resistencia no debe exceder de 30° . La ilustración 18 muestra la aplicación de la carga axial. Se debe resaltar que, si las muestras son núcleos extraídos a través del plano más débil, es obligatorio realizar un ensayo diametral en primero lugar. Las fallas aprobadas y rechazadas corresponden a las fallas de cada uno de los ensayos discutidos anteriormente.

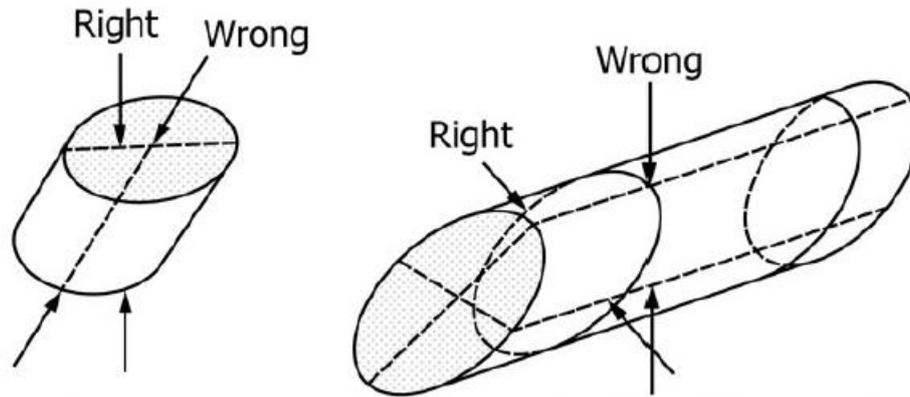


Ilustración 20: Aplicación de carga en rocas anisotrópicas. (fuente: Norma ASTM D 5731-16)

Contenido de agua

Adicional a los ensayos de compresión, se deberá reportar el contenido de agua presente en las muestras, en el reporte final. Para el contenido de agua, se deberá referenciar a la norma D2216, determinando el contenido de agua en cada espécimen de roca. Es importante realizar este reporte ya que se ha podido determinar que el contenido interno de agua puede llegar a afectar el comportamiento mecánico de compresión uniaxial de nuestras muestras (Galván & Restrepo, 2016). Tal como explican en su artículo científico, en base a los resultados obtenidos del contenido de agua, se puede relacionar con una variabilidad de la resistencia a compresión de las muestras basándose en dos condiciones de contenido de humedad. Para demostrar esta variabilidad, Galván y Restrepo realizaron ensayos de compresión uniaxial en muestras libres de humedad en la cual la masa de agua se desprecia; y con muestras que se encontraban saturadas y la masa de agua es máxima, ocupando todos los poros.

Gracias a los resultados obtenidos por medio de varios ensayos, se ha visto y comprobado una variación de la resistencia a compresión de rocas según el contenido de humedad en el cual se puede demostrar que a mayor contenido de humedad menor será la resistencia de este. En la figura 21 se puede observar el resultado de varios núcleos ensayados a compresión con diferentes contenidos de humedad, donde se puede ver claramente esta tendencia.

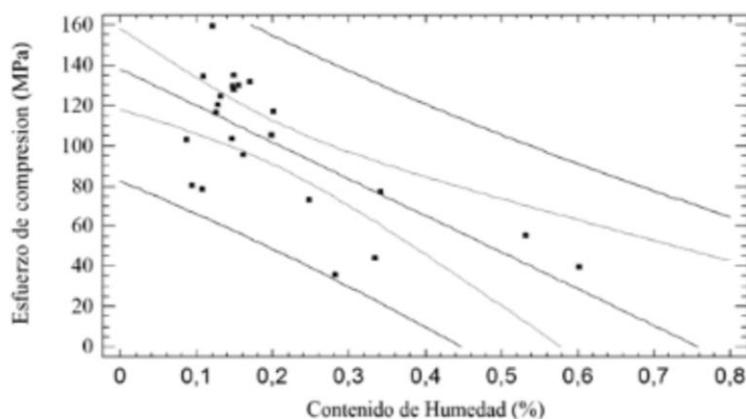


Ilustración 21: Variación de la resistencia a compresión según el contenido de humedad. (Fuente: artículo científico de Galván y Restrepo)

En base a las estadísticas de la regresión lineal hecha por los científicos de la Universidad del Valle en Cali, se obtiene un coeficiente de correlación de -0.71 indicando que el 50% de la variabilidad de resistencias se da debido a la variación del contenido de humedad de las muestras. Esto se da debido a la condensación capilar del vapor de agua cerca de las puntas de las grietas de pequeña apertura puede influir en la tasa de crecimiento de las grietas en la roca. Además, la variabilidad de la resistencia a compresión respecto al contenido de humedad, el porcentaje de porosidad se involucra. Al permitir un mayor ingreso de agua dado un alto porcentaje de porosidad de la muestra, podemos ver la tendencia que estos tres parámetros forman en cuanto a la resistencia de compresión. Tal y como se muestra en la figura 20, a un

menor porcentaje de porosidad, la resistencia aumenta en función al porcentaje de agua presente. La grafica en tres dimensiones permite visualizar esto.

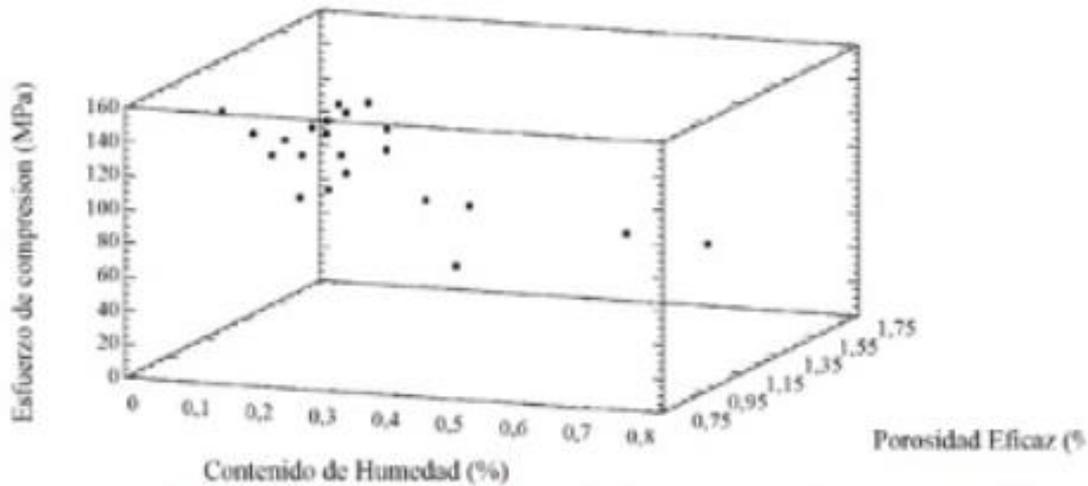


Ilustración 22: Efecto del Contenido de humedad y el porcentaje de Porosidad en la Resistencia a Compresión Uniaxial.

(fuente: Artículo científico de Galván y Restrepo)

Dado que estos parámetros no solo afectan a pruebas de compresión uniaxiales simples biaxiales entre otras; sino que afectan a todo tipo de ensayos como los torsionales (Nara, Kaneko, Yoneda, Hiroyoshi, & Morimoto, 2012) tal y como lo demuestra el comité japonés de mecánica de rocas, es muy importante tomar en cuenta el contenido de agua de las rocas, puesto que será necesario estimar de manera más precisa el índice de resistencia encontrado en las muestras.

2.5.6. Obtención de resultados

Para la obtención de los resultados reales, es importante conocer que se debe realizar una corrección al valor correspondiente al índice de resistencia I_s . Esta corrección se la realiza ya que “ I_s ” varía en función de D en ensayos diametrales, y D_e ; por lo que se realiza la corrección de tamaño de la muestra, cuando los especímenes no son los mismos. Esto

realizamos para obtener un valor de fuerza de carga puntual único. Este único valor permite dar una clasificación de resistencia de la roca a través de un nomograma mostrado en la ilustración 23. Este nomograma permite realizar el computo del índice de resistencia según su área y su carga, sin embargo, se puede computar la resistencia utilizando la ecuación establecida en la norma que se verá más adelante.

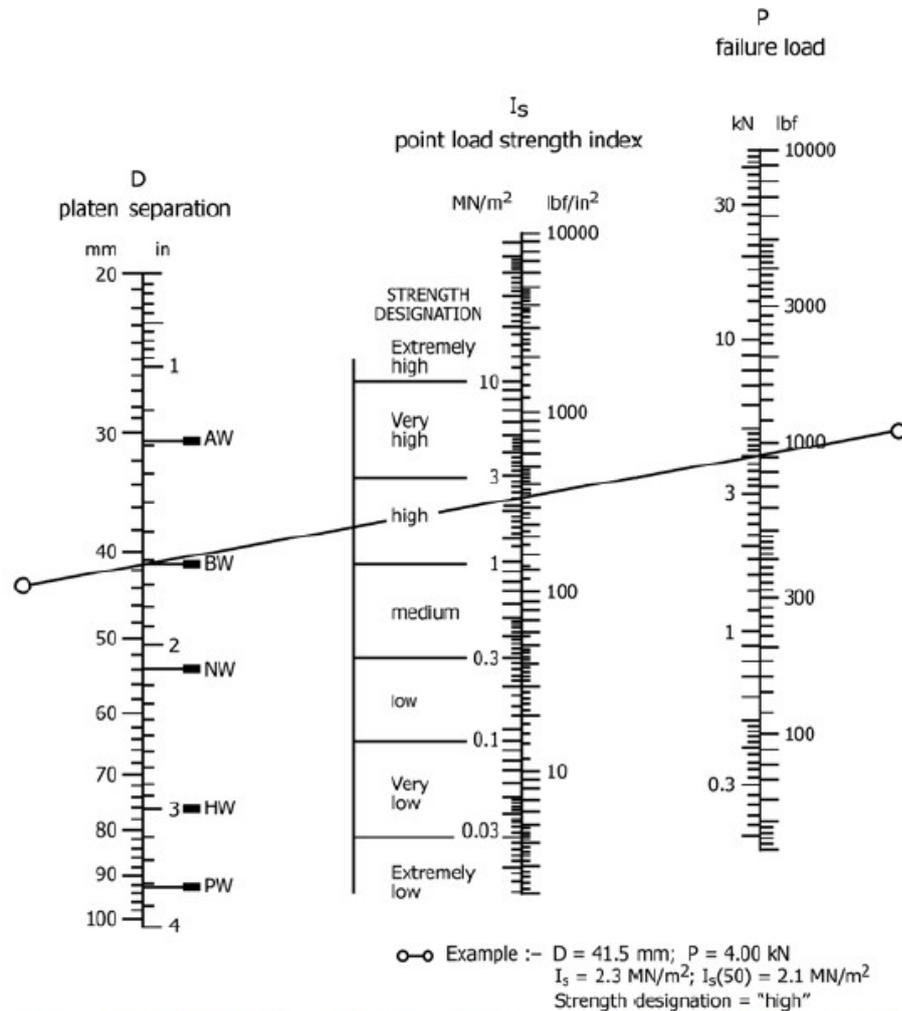


Ilustración 23: Nomograma de clasificación de resistencia. (fuente: Norma ASTM D 5731-16)

Para la obtención de los resultados, se deberá encontrar I_s , que representa el índice de resistencia no corregido, este dependerá de "D" y "De", para ensayos diametrales y ensayos

axiales de núcleo, bloque e irregulares respectivamente. Para la obtención de este índice, se utiliza la ecuación (2-1).

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}, [MPa] \quad (2-1)$$

Donde:

P = Carga pico de falla [N]

De = Diámetro equivalente [mm] dado por las ecuaciones:

$$D_e^2 = D^2 [mm^2] (\text{ensayo axial en nucleos}) \quad (2-2)$$

$$D_e^2 = \frac{4A}{\pi} [mm^2] (\text{ensayo axial en bloque e irregulares}) \quad (2-3)$$

$$A = WD [mm^2] (\text{minima seccion transversal en en plano de contacto}) \quad (2-4)$$

Para el índice de resistencia corregido $I_{s(D)}$, es definido como el índice I_s de resistencia de un espécimen, si hubiese sido medido en un ensayo diametral $D=50$, por lo que lleva la simbología $I_{s(50)}$. Sin embargo, cuando se recomienda una clasificación de roca precisa, el método más confiable para obtener $I_{s(50)}$, es realizar pruebas diametrales con un $D = 50$ [mm], o muy cerca, de esta manera la corrección de tamaño es innecesaria.

Dado que la mayoría de las pruebas de resistencia de carga puntual se realizan de hecho utilizando otros tamaños o formas de muestras, se debe aplicar la corrección de tamaño. El método más confiable de corrección de tamaño es probar la muestra en un rango de valores D o D_e y trazar gráficamente la relación entre P y D_e . Se puede utilizar un gráfico log-log, cuya relación es una línea recta como se observa en la ilustración 24. Es importante considerar que

los puntos que se desvían sustancialmente de la línea recta pueden ser ignorados mas no deben eliminarse.

El valor de $I_{S(50)}$ correspondiente a un D_e^2 , se puede obtener por interpolación y el uso del índice de intensidad de carga puntual corregida por tamaño se calcula como se muestra en la siguiente ilustración, donde $I_{S(50)}$ fue calculado con la ayuda de la ecuación (2-1).

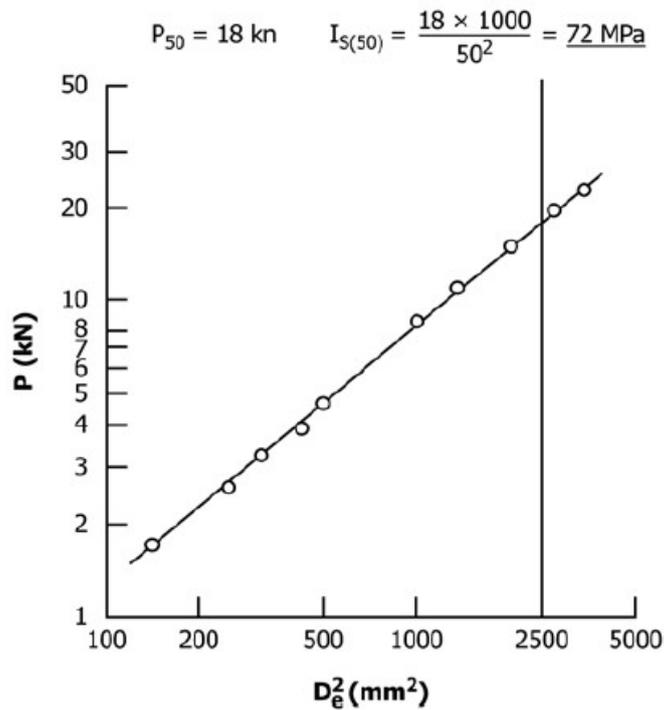


Ilustración 24: Método gráfico determinación de $I_{S(50)}$. (fuente: Norma ASTM D 5731-16)

Sin embargo, cuando el método anterior no es práctico, se puede encontrar $I_{S(50)}$ por medio de la ecuación (2-5). La ecuación utiliza el factor de corrección de tamaño F , obtenido por medio de la ecuación (2-6).

$$I_{S(50)} = F \times I_S \text{ [MPa]} \quad (2-5)$$

$$F = \left(\frac{D_2}{50}\right)^{0.45} \text{ , [MPa]} \quad (2-6)$$

La ilustración 21 muestra gráficamente el factor de corrección F.

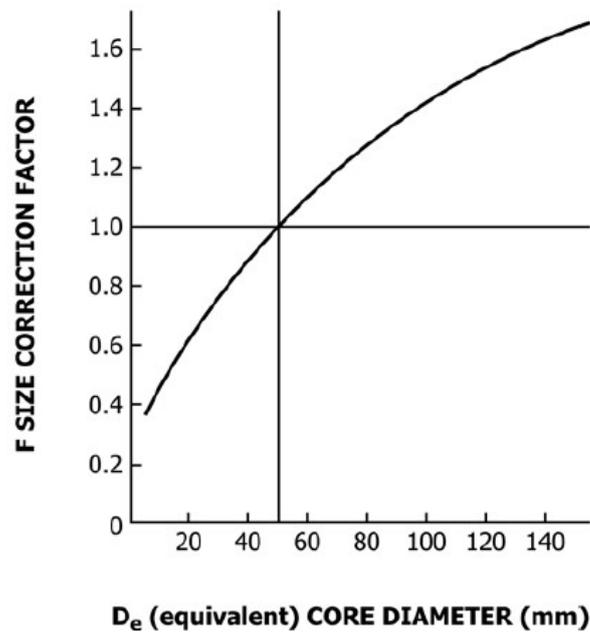


Ilustración 25: Grafica de factor de corrección F. (fuente: Norma ASTM D 5731-16)

Una vez se obtienen todos los valores del índice de resistencia corregidos, se deberá encontrar la media del valor calculado. Esta media es la utilizada para la clasificación de la roca utilizada para los ensayos. Esta media, es calculada a través del promedio de todos los valores I_s ($_{50}$), eliminando los dos valores más grandes y los dos valores más pequeños, cuando se tienen 10 muestras o más. Si se dispone de menos de 10 muestras por ensayo, solo se eliminará el valor más alto y bajo, obteniendo la media de los restantes.

Para las muestras anisotrópicas, el índice de anisotropía de fuerza de carga puntual I_a ($_{50}$), se define como la relación entre los valores medios de I_s ($_{50}$) medidos de forma perpendicular y paralela a los planos de debilidad, es decir, la relación de los índices de fuerza de carga de punto mayor a menor. Si alguna muestra en un tipo de roca da un valor de 20% por debajo del promedio, debe examinarse para detectar defectos y se debe tomar una decisión sobre la validez de los resultados.

RESULTADOS

Esta sección abarcada los resultados obtenidos en los ensayos de núcleo y bultos irregulares realizados a las muestras obtenidas de la mina de Muyurco. Las tablas procedentes del programa de Excel utilizado para los cálculos, se encontrarán en la sección de anexos.

Ensayo axial en núcleos de roca

Se obtuvo un total de 12 núcleos de roca con una distancia D promedio de 40 mm, cumpliendo los parámetros y limitaciones dimensionales como se vio en la siguiente figura:

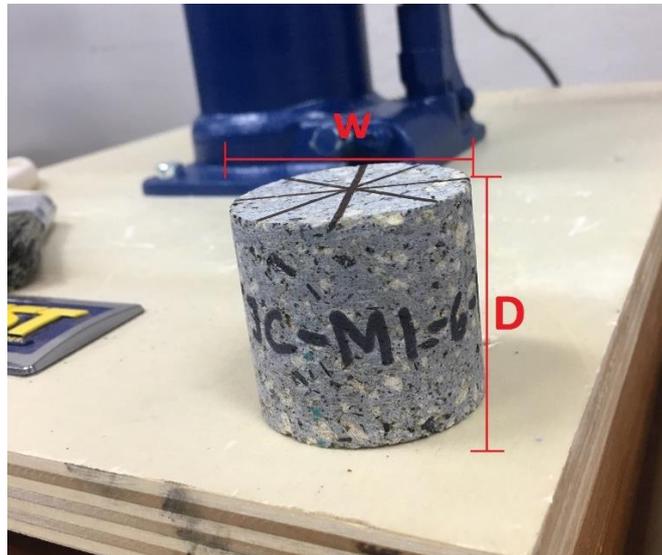


Ilustración 26: Dimensiones espécimen de núcleo

Es importante mencionar que se siguieron los parámetros de cálculo y presentación de resultados establecidos en la norma, por lo que se eliminaron los 4 valores más extremos de los datos obtenidos, con lo cual se tendrán 8 datos únicamente para el ensayo en núcleos. Con la ayuda del software estadístico Minitab, se pudieron realizar las pruebas estadísticas descriptivas, las gráficas de distribución y las pruebas de hipótesis para analizar los resultados. En la tabla 10, en la sección de Anexos A, contiene las resistencias corregidas para el ensayo

axial en núcleo, es importante mencionar que el primer análisis realizado fue la aprobación o rechazo de las muestras luego de su rotura. Tal como se observó en la ilustración 16 de la sección 2.5.5., las fallas obtenidas para las 25 muestras fueron tipo a, como se puede apreciar en la ilustración 27, donde observamos claramente el correcto comportamiento de la falla. De esta manera no se tuvo que realizar ensayo con más especímenes aprobando los 12 previamente preparados.



Ilustración 27: Fallas en muestras de núcleo

Luego de comprobar todas las muestras por su tipo de falla, usando el software Minitab, obtuvimos los estadísticos descriptivos para las muestras del ensayo. Para las 8 muestras obtenidas, se calcula la media, error estándar de la media, desviación estándar, y los cuartiles. La tabla 2, resume estos resultados estadísticos obtenidos:

Tabla 2: Estadísticos descriptivos: Núcleo Is₍₅₀₎

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Is ₍₅₀₎ N [MPa]	8	4.863	0.180	0.510	3.974	4.570	4.789	5.331	5.512

Con la ayuda de los datos obtenidos en la tabla anterior: media y desviación estándar, podemos graficar los datos en una distribución de probabilidades, previo a un análisis de normalidad de datos. Podemos comprobar la normalidad de los datos aplicando la prueba de Anderson-Darling. Esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica, en base a los de la muestra con la distribución esperada, asumiendo una hipótesis nula si los datos fueran normales. Así, si la diferencia observada es convenientemente pequeña, se aprueba la hipótesis nula de normalidad de la población, o caso contrario se rechaza y no existe normalidad en los datos. Con la ayuda de Minitab, se lo puede comprobar a través del valor p obtenido para los datos. Este debe ser mayor a $p_0 = 0.05$. la ilustración 28, demuestra gráficamente esta prueba de normalidad, donde se ve que la dispersión de los datos obtenidos tiene a la diagonal de comprobación de normalidad. Además, se comprueba con el valor p donde:

$$\rho = 0.513$$

$$\rho_0 = 0.05$$

$$\rho > \rho_0$$

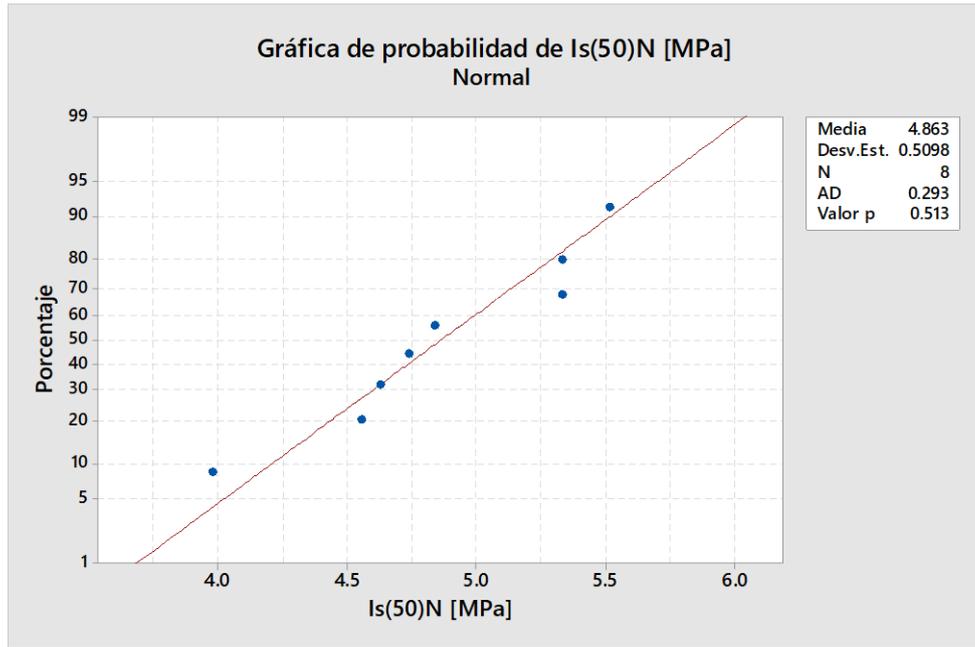


Ilustración 28: Prueba de normalidad Anderson Darling

Demostrando que existe normalidad en los datos, podemos graficar la distribución de probabilidades.

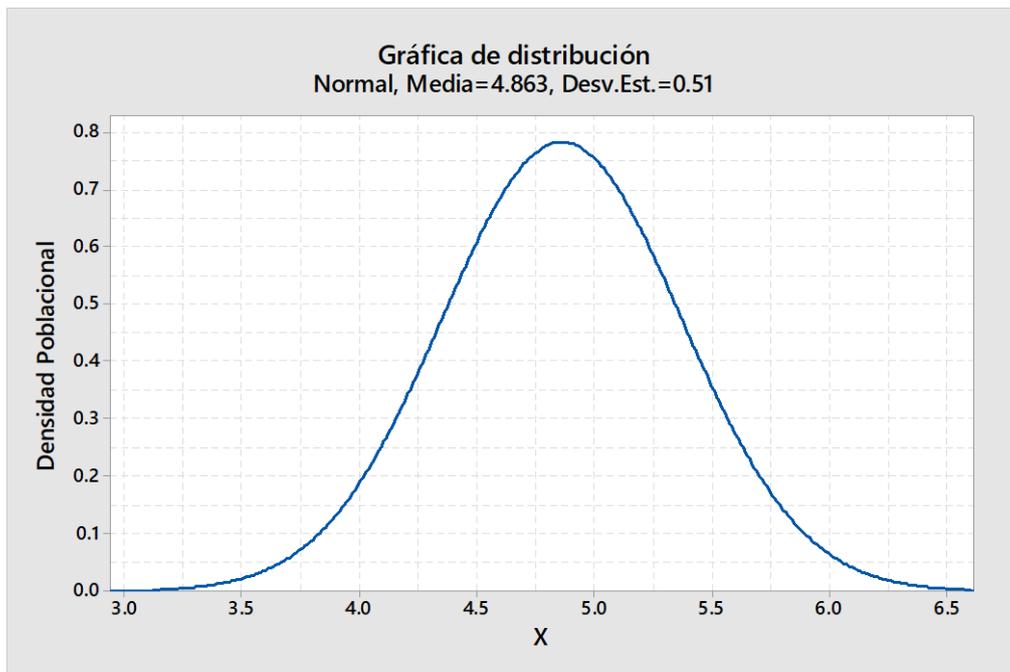


Ilustración 29: Gráfica de distribución de probabilidades Ensayo de Núcleo

Se puede ver claramente que se forma la Campana de Gauss, típica representación de una distribución normal simétrica. Con esta grafica se puede ver como los valores obtenidos en el ensayo, tiende a un valor central. Además, dadas las características de la distribución normal, conocemos las probabilidades para que un valor sea la media más o menos una desviación estándar, más o menos dos desviaciones y más o menos 3 desviaciones estándar. Por lo que respectivamente las probabilidades serán: 68.3%, 95.5% y 99.7% respectivamente. (Montgomery & Runger, 2011) Esto quiere decir que existe una probabilidad de un 68.3 por ciento de que los resultados de los ensayos en más muestras tengan un rango de resistencia de entre 4.353 y 5.373 MPa. La anatomía de una campana gaussiana se puede encontrar en el apéndice B.

Con los cuartiles y la mediana obtenidos en la tabla 2 de estadísticos descriptivos, también podemos realizar un diagrama de cajas y bigotes, una manera muy conveniente para mostrar visualmente como se están distribuye los grupos de datos. En la sección B de anexos, se puede encontrar un gráfico de la anatomía de los diagramas de caja y bigotes. Para nuestros datos, se puede observar que no existen valores atípicos. Se puede visualizar en la ilustración 29, que existe una mayor cantidad de datos numéricos mayores a la mediana, que en nuestro caso es 4.789 [MPa].

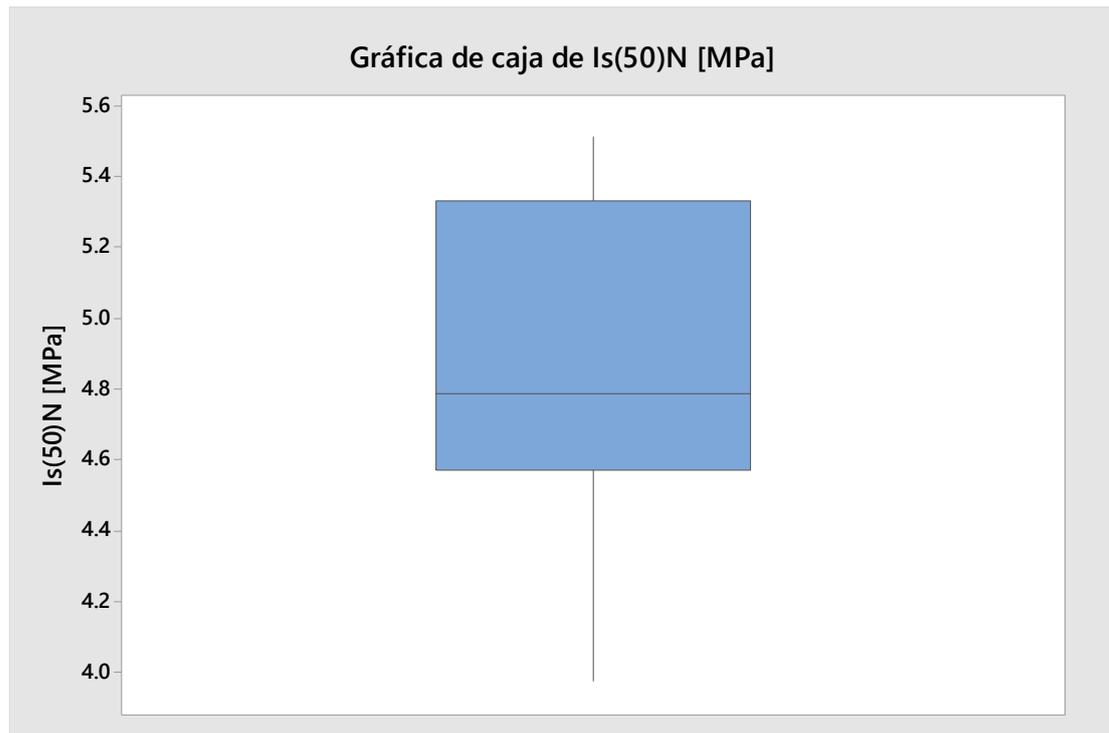


Ilustración 30: Gráfica de caja de $I_s(50)$ [MPa] Ensayo de Núcleo

Ensayo axial en bultos irregulares

Para el ensayo de geometría irregular, se obtuvo un total de 25 muestras de roca, cumpliendo los parámetros y limitaciones dimensionales como se vio en la figura 8. Es importante mencionar que se siguieron los parámetros de cálculo y presentación de resultados establecidos en la norma, por lo que se eliminaron los 4 valores más extremos de los datos obtenidos, lo que resulta en un total de 21 datos para este ensayo. De la misma manera que con los datos obtenidos para el ensayo axial en núcleo, y la ayuda del software estadístico Minitab, se pudieron realizar las pruebas estadísticas descriptivas, las gráficas de distribución y las pruebas de hipótesis para analizar los resultados. En la tabla 12, en la sección de Anexos A, se muestran las resistencias corregidas para el ensayo axial en irregulares, es importante mencionar que el primer análisis realizado fue la aprobación o rechazo de las muestras luego de su rotura. Tal como se observó en la ilustración 19 de la sección 2.5.5., las fallas obtenidas para las veinte y

una muestras fueron tipo a, como se puede apreciar en la ilustración 31, donde observamos claramente el correcto comportamiento de la falla. De esta manera no se tuvo que realizar ensayo con más especímenes aprobando los 25 previamente preparados.

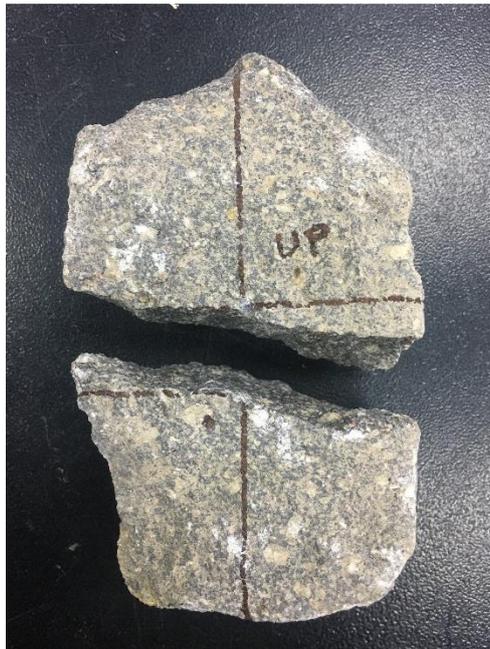


Ilustración 31: Fallas en muestras irregulares

Luego de comprobar el tipo de falla, usando el software Minitab, obtuvimos los estadísticos descriptivos para las muestras del ensayo. Para las 21 muestras obtenidas, se calcula la media, error estándar de la media, desviación estándar, y los cuartiles. La tabla 3, resume estos resultados estadísticos obtenidos:

Tabla 3: Estadísticos descriptivos: Irregular Is (50)

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Is ₍₅₀₎ [MPa]	21	3.517	0.284	1.300	1.682	2.622	3.390	4.164	6.982

Nuevamente, comprobaremos la normalidad de los datos aplicando la prueba de Anderson-Darling. Con la ayuda de Minitab, se comprueba a través del valor p obtenido para los datos. Este debe ser mayor a $p_0 = 0.05$. la ilustración 32, demuestra gráficamente esta prueba de normalidad, donde se ve que la dispersión de los datos obtenidos tiene a la diagonal de comprobación de normalidad. Además, se comprueba con el valor p donde:

$$\rho = 0.262$$

$$\rho_0 = 0.05$$

$$\rho > \rho_0$$

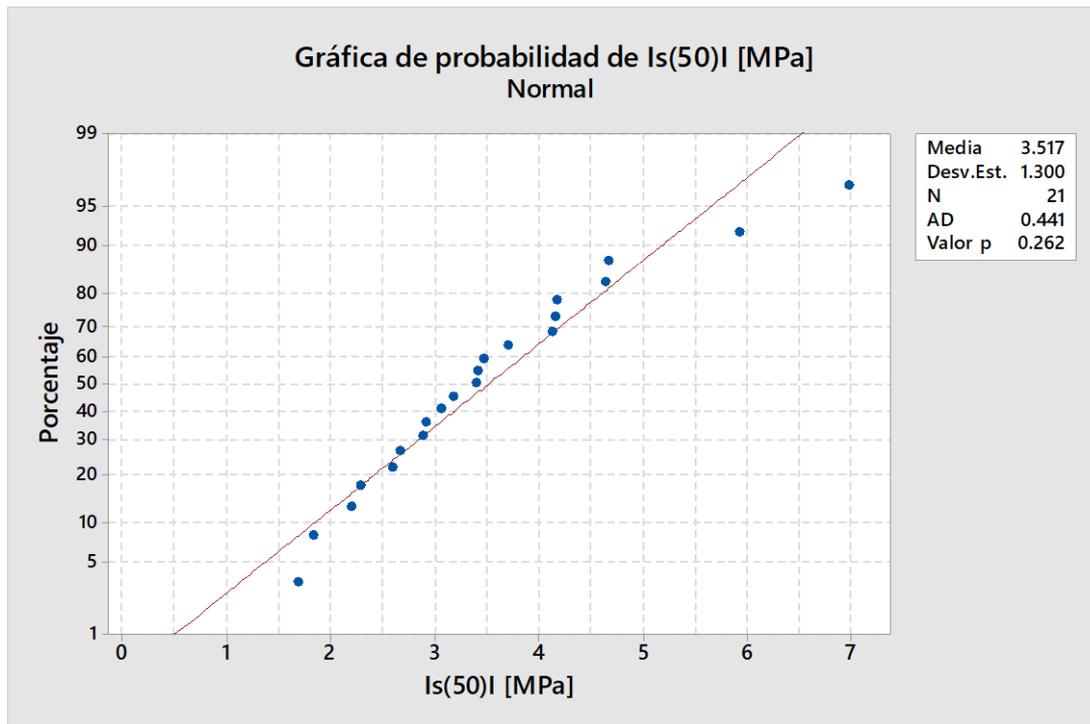


Ilustración 32: Prueba de normalidad Anderson Darling

Demostrando que existe normalidad en los datos, podemos graficar la distribución de probabilidades.

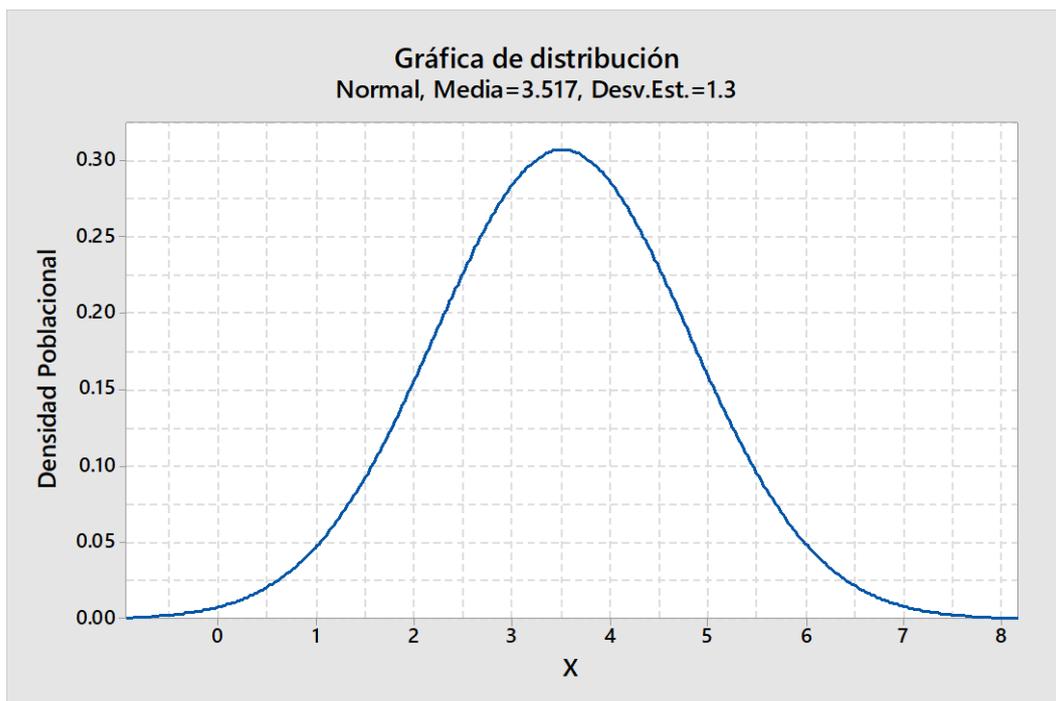


Ilustración 33: Gráfica de distribución de probabilidades Ensayo Irregulares

Para los datos del ensayo en formas irregulares, se puede ver nuevamente la Campana de Gauss formada. Esto quiere decir que existe una probabilidad de un 68.3 por ciento de que los resultados de los ensayos en más muestras tengan un rango de resistencia de entre 2.217 y 4.817 MPa.

Se realiza el gráfico de cajas y bigotes con los datos correspondientes a cuartiles y la mediana obtenidos en la tabla 3 de estadísticos descriptivos, Para nuestros datos, se puede observar que existe un valor atípico; este valor es de 9.982 [MPa] visualizado en la ilustración 34. A diferencia del gráfico de cajas para ensayos de núcleos, en los ensayos de formas irregulares, la distribución de los cuartiles guarda más simetría respecto a la mediana, 3.390 [MPa] para este caso, y los cuartiles superior e inferior. Tal como se obtuvo en los datos descriptivos de la tabla 3.

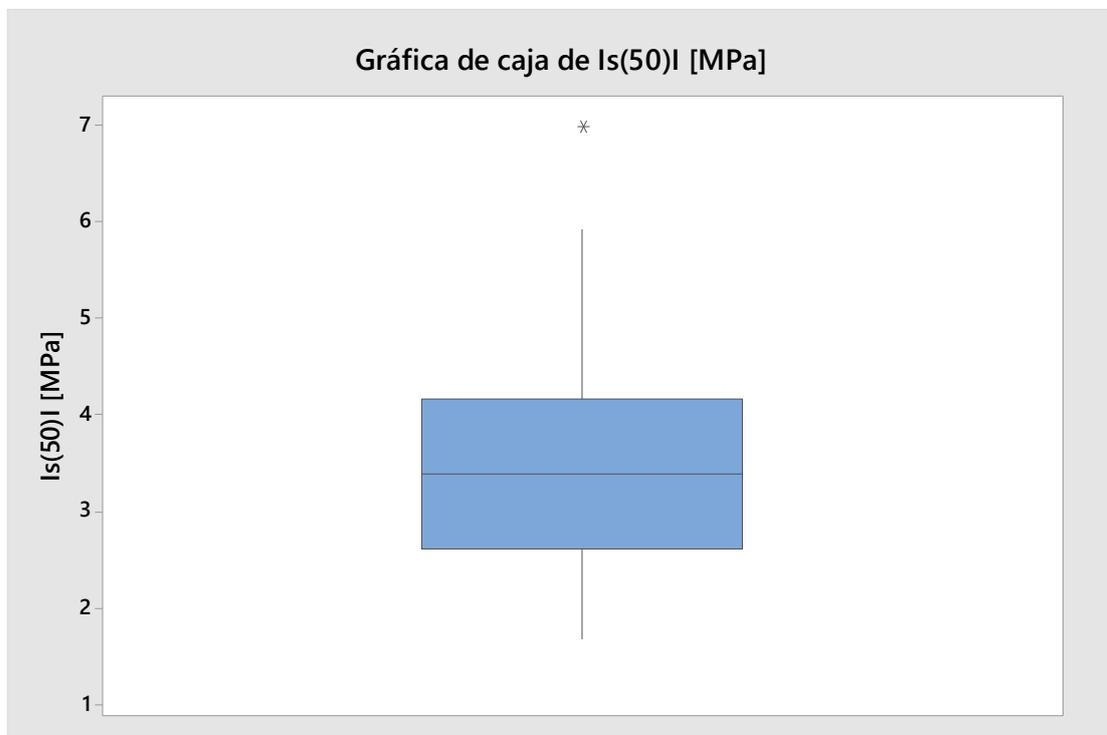


Ilustración 34: Gráfica de caja de $I_{s(50)}$ [MPa] Ensayo en Irregulares

Ensayo axial en núcleos vs Ensayo axial en bultos irregulares

Si se comparan las distribuciones de probabilidad de ambos ensayos, obtenemos la grafica de la ilustracion 35, donde la inea azul continua representa la distribucion para los datos del ensayo en muestras tipo nucleo; mientras que la linea roja entre cortada, rereenta la distribucion para los datos del ensayo en muestras tipo irregulares. claramente podemos observar la dispersion para ambas pruebas. Se puede apreciar como para el ensayo de formas irregulares, la dispercion que alcanza es mucho mayor, tal como revelan los datos, mientras que la dispersion para el ensayo en nucleos de roca es mucho menor, por debajo de la mitad. Se observa claramente que la resistencia tambien varia, obteniendo una mayor resistencia media con muestras de nucleo.

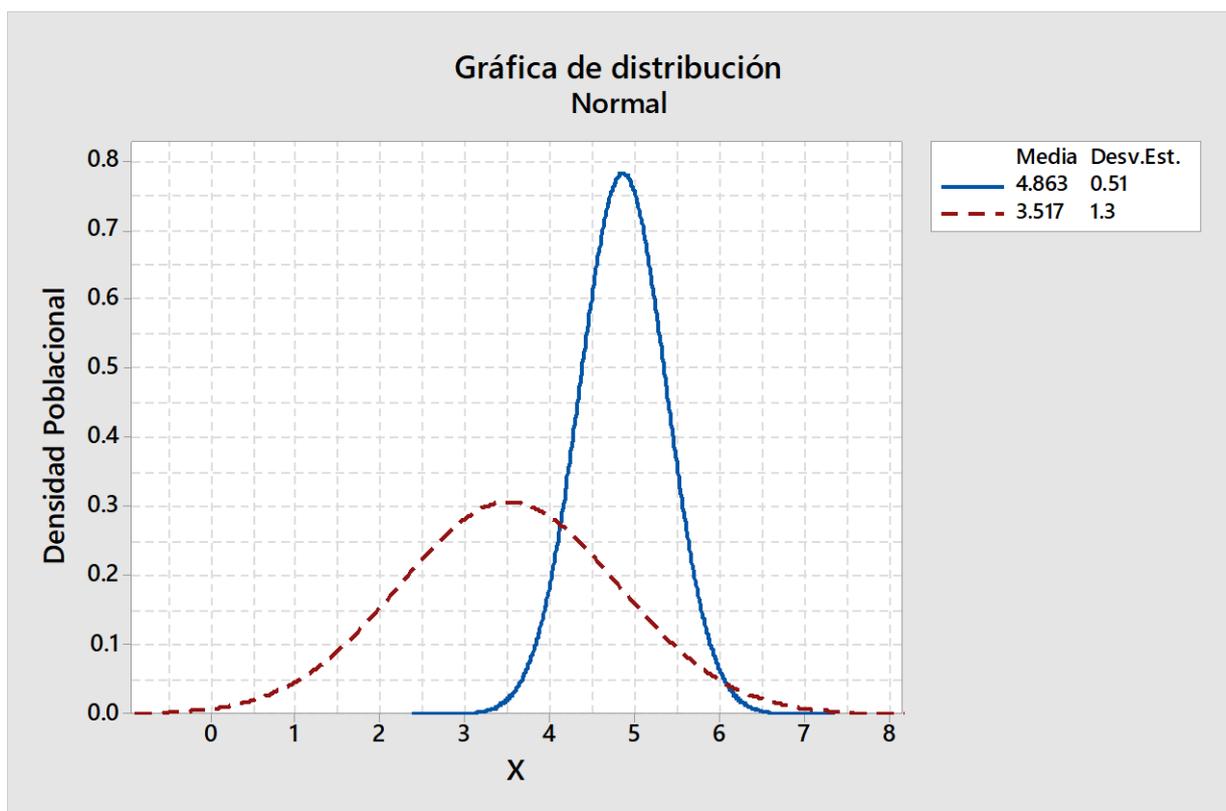


Ilustración 35: Distribución normal de probabilidad en ensayos de núcleo e irregulares.

Se puede realizar un análisis de la varianza conocido como ANOVA, con el fin de determinar las diferencias que presentan los dos tratamientos (ensayo axial de núcleo y de irregulares), a través del planteamiento de la hipótesis que las medias no difieren entre sí (Montgomery & Runger, 2011). Se puede plantear si los resultados obtenidos utilizando núcleos de roca son mejores que utilizando formas irregulares. Para este ensayo se utilizará un nivel de significancia de 0.05, este nivel indica un riesgo del 5% de concluir que efectivamente, existe una diferencia en las medias de ambos tratamientos. Utilizando Minitab, obtenemos los valores resumidos en la tabla 4. Para este análisis, se deben definir los parámetros y las hipótesis necesarias:

- Hipótesis nula: Todas las medias son iguales
- Hipótesis alterna: No todas las medias son iguales
- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Escritas en forma matemática:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$$

$$\alpha = 0.05$$

Definiendo el Factor como el ensayo axial, con dos niveles cuyos valores corresponden a los ensayos axiales en núcleos y bultos irregulares:

Tabla 4: Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Axial	1	10.49	10.486	7.94	0.009
Error	27	35.64	1.320		
Total	28	46.13			

Como primer paso, podemos comparar el valor p obtenido, la comparación es similar a lo realizado anteriormente. Sin embargo, aquí si el valor p es menor o igual a alfa, las diferencias de las medias son estadísticamente significativas, mientras que, si p es mayor sucede lo contrario. De tal modo que obtenemos:

$$\rho = 0.009$$

$$\alpha = 0.05$$

$$\rho \leq \alpha$$

$$0.009 \leq 0.05$$

De tal manera que se rechaza la hipótesis nula.

Como segundo paso, se examinan las medias de los grupos, así se puede presentar la gráfica de intervalo para mostrar la media de cada grupo dentro de un intervalo de confianza del 95% o un nivel de significancia del 5%.

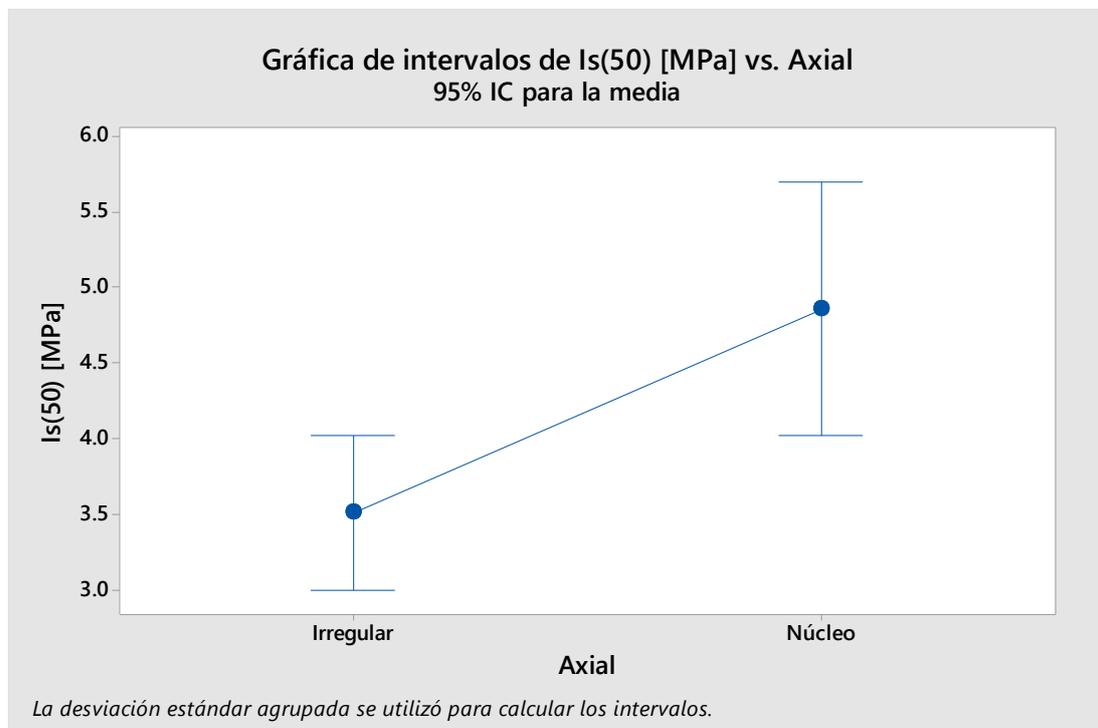


Ilustración 36: Grafica de intervalos IC = 95%

Pudiendo hacer lo mismo con una gráfica de cajas y bigotes simultánea.

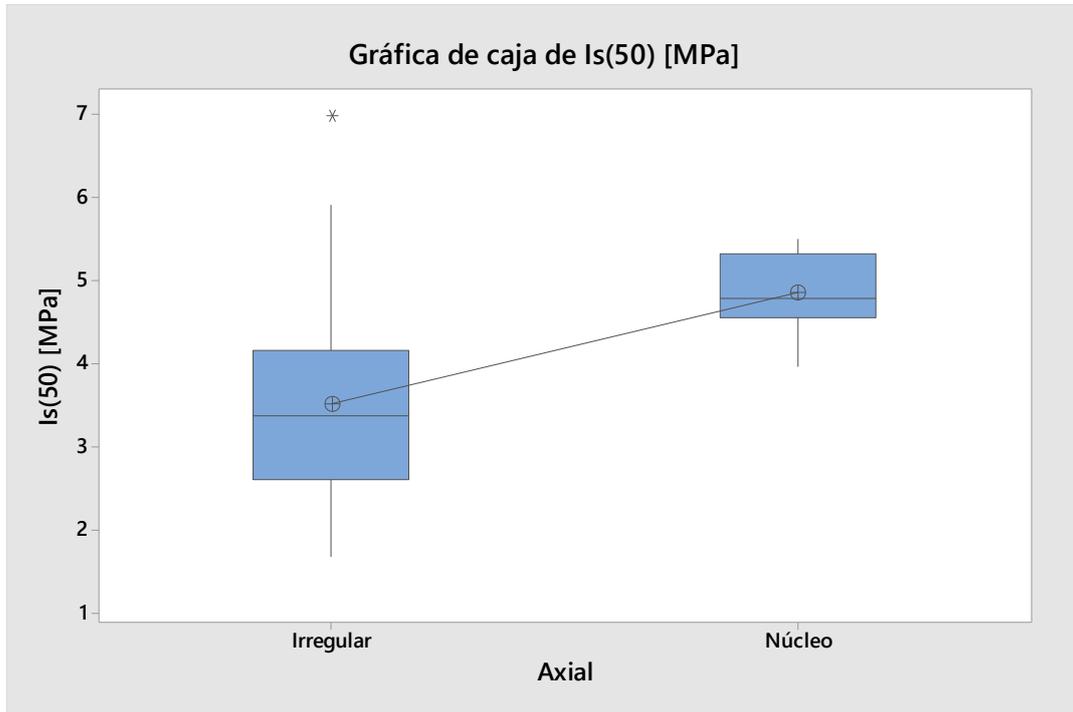


Ilustración 37: Grafico de caja y bigotes simultánea.

El tercer paso es comparar estas medias. Al conocer que la hipótesis nula fue rechazada, se puede utilizar el método de comparación en parejas de Tukey. Este método crea intervalos de confianza para cada diferencia de parejas entre las medias de cada nivel, controlando la tasa del error. Así obtenemos la siguiente tabla resumen. Donde las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Y la tabla 6 donde se encuentra el intervalo de confianza creado para la diferencia de las medias.

Tabla 5: Comparaciones en parejas de Tukey

Axial	N	Media	Agrupación
Núcleo	8	4.863	A
Irregular	21	3.517	B

Tabla 6: Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
Núcleo – Irregular	1.345	0.477	(0.366, 2.325)	2.82	0.009

Visto gráficamente en la ilustración 38, se puede observar que el intervalo de confianza no contiene el cero (0), lo que significa que la diferencia de las medias es estadísticamente significativa.

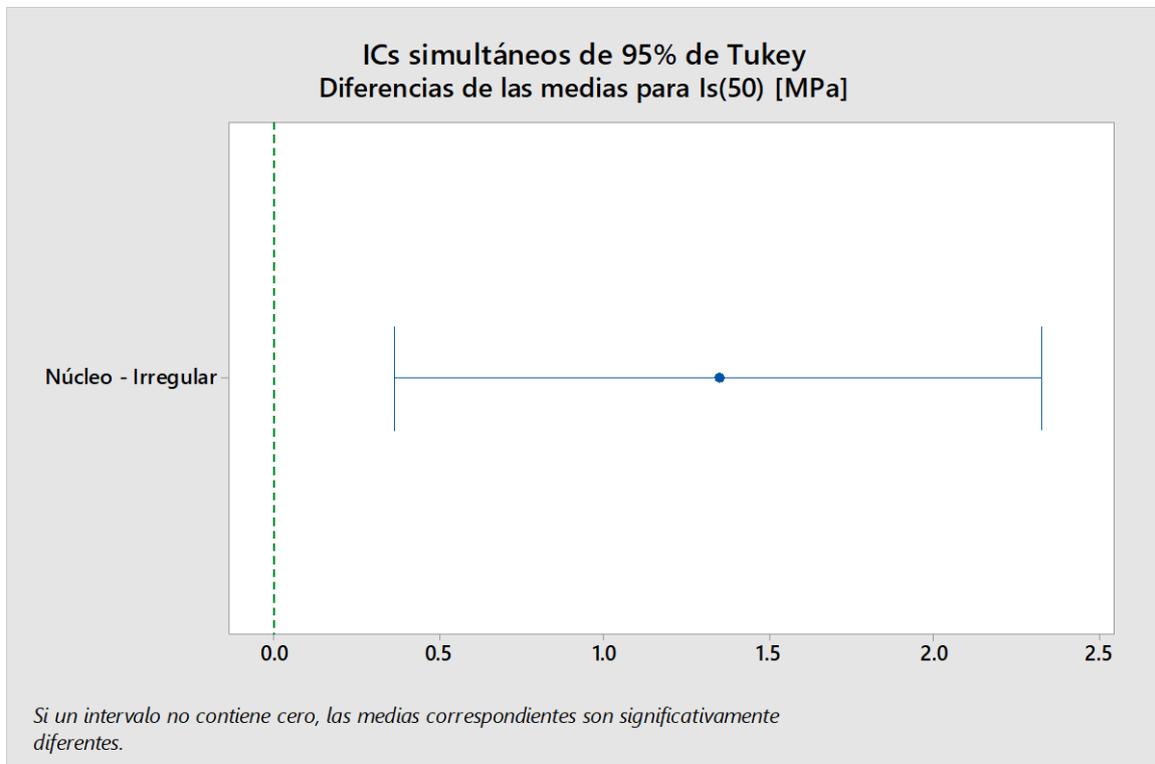


Ilustración 38: Intervalo de confianza de la diferencia de medias

Y finalmente se puede determinar que tanto se ajusta el modelo a nuestros datos. Esto se realiza analizando los estadísticos de bondad. Estos estadísticos son:

- S: representa la distancia que separa a los valores de los datos, de los valores ajustados.
- R-cuad: es el porcentaje de variación en la respuesta explicada en el modelo.

- R-cuad (pred): determina que tan buen predice la respuesta el modelo para nuevas futuras observaciones, a más grande es mejor el pronóstico.

Así obtenemos la tabla 7, resumiendo los estadísticos de bondad:

Tabla 7: Resumen de estadísticos de bondad.

S	R-cuad.	R-cuad. (pred)
1.14892	22.73%	14.01%

Donde S indica que la desviación estándar entre los puntos de datos y los valores ajustados es de aproximadamente 1.15 unidades.

CONCLUSIONES

Una vez examinadas las muestras luego de los respectivos ensayos realizados, se puede tener resultados reales para la clasificación de la mina y del material rocoso que se extrae. Es importante recalcar que el argumento de conclusión sobre los resultados obtenidos, se lo realiza en base al material bibliográfico consultado además de los resultados estadísticos.

- La resistencia de una roca está ligada a múltiples factores que alteran sus propiedades físicas y mecánicas. Sabemos que tanto factores como internos o externos pueden influir en su capacidad. Como factores internos podemos hablar de: estructura mineral de la roca (origen), orientación de los planos o estratos del macizo rocoso, microfisuras internas, dureza y porosidad. Dentro de factores externos, un agente que puede implicar en la resistencia de la roca es el contenido de agua, así como la geometría externa de la roca.
- Según su origen, las rocas presentan ciertas características de las cuales se discutieron en el desarrollo del presente trabajo. Cada tipo de roca según su origen presenta una composición mineralógica diferente. Dada una unión de uno o varios minerales que conforman la estructura interna de la roca, esta puede tener uniones débiles o fuertes, afectando directamente la resistencia de la roca. Estos enlaces entre minerales dependen de las fuerzas de cohesión que tengan entre sí. Al existir una mayor cohesión entre granos, existe una unión más tenaz entre sí, lo que genera un mejor comportamiento y resistencia a los esfuerzos internos aplicados sobre las rocas. Al ser más débiles, ocurre lo contrario. Se ha visto que rocas sedimentarias por su proceso de formación, son más débiles que rocas fundidas a altas temperaturas y presiones como una roca de origen volcánicos.

- En cuanto a los planos de orientación de las rocas, juegan un papel importante para la elaboración de este ensayo. Esto sucede en rocas anisotrópicas, que poseen dos planos de orientación. Uno más fuerte que el otro. El ensayo dependerá mucho del plano al que se le aplica la carga axial, dando resultados diferentes en cuanto a la resistencia. Por tal motivo, la norma es clara al especificar que este ensayo se deberá realizar en ambos planos de falla (normal y paralelo a la falla) para rocas anisotrópicas, y el promedio de resistencia de ambos planos será el encargado de clasificar la roca.
- Las micro fisuras y porosidad son también un factor importante. Como se mencionó en el desarrollo del trabajo, las micro fisuras permiten un camino por donde los esfuerzos pueden pasar más rápidamente siendo un punto de debilidad, al existir una mayor cantidad de micro fisuras, la resistencia de la roca cae. Lo mismo sucede con la porosidad; al existir vacíos dentro de las muestras, no existe tantos enlaces minerales entre granos, por lo que se ve afectada su resistencia. Un ejemplo muy sencillo donde podemos ver este fenómeno es comparar una roca de río con piedra pómez. Estos factores afectarán los resultados del ensayo, y disminuirán la calidad de la roca.
- Así como la porosidad permite un camino por el cual las micro fisuras avanzan, este se asocia con el contenido de agua presente en las muestras. De preferencia, las muestras deben contener el mínimo porcentaje de agua dentro, ya que como se pudo analizar en la sección correspondiente, la presencia de agua disminuye la resistencia a compresión hasta en un 50% de la resistencia real. Por lo que es altamente recomendable posterior a la obtención de muestras y como paso adicional a la preparación de muestras, previo al marcado y etiquetado se recomienda eliminar cualquier porcentaje de contenido de agua presentes en las muestras a través de un procedimiento de secado en el horno por un mínimo de 18 horas, preferencialmente 24h.

- Como se vio en la sección 1.3.9, y aledañas, la aparición y aumento de las sub-grietas, marcan el inicio y el camino para la distribución de esfuerzos internos en las muestras, al ir aumentando la carga y tornándose cíclica y constante en aumento, las micro fisuras entran en un estado plástico previo a la fractura de cada grieta lo que conlleva a la pérdida de continuidad del sólido por falta de cohesión interna. Se recalca que los puntos de concentración de esfuerzos como cambios abruptos de la geometría, son las zonas más propensas a comenzar a darse el fisuramiento, por lo que a mayor regularidad mayor es la resistencia.
- Estos resultados de geometría fueron visibles en los dos ensayos realizados para la mina seleccionada. Se puede notar claramente en los resultados que, pese a ser muestras obtenidas con el mismo origen, lugar y características, las muestras de núcleos presentan una mayor resistencia axial frente a las muestras irregulares. La diferencia es de aproximadamente 1,3 mega pascales. El mega pascal de diferencia puede ser motivo de que la categoría de la muestra cambie de una a otra. Tal como se puede observar en la tabla 13, se puede apreciar claramente como las muestras de núcleos mantienen la misma categoría de clasificación para cada muestra; ocurre todo lo contrario con muestras irregulares donde la categoría entre muestras varía de “Alto” a “Muy alto”. Esto fue comprobado con el análisis estadístico que se realizó en los resultados. Si se analiza a detalle las gráficas de distribución normal, se puede ver como los especímenes de roca irregular presentan una desviación estándar de poco más el doble que la desviación estándar de los datos de especímenes de núcleo. Esto permite comprobar lo mencionado anteriormente.
- Adicionalmente, con el análisis ANOVA, se vuelve a verificar lo expuesto anteriormente, dadas las muestras de una población, existe evidencia estadística que corrobora la hipótesis alternativa en la que las medias de ambas muestras no son iguales.

Esto permite ver la tendencia de los datos, en los que se ve claramente que la resistencia en núcleos será mayor a la resistencia obtenida en rocas irregulares.

- La ASTM, a través de su norma para este ensayo, proporciona todo lo necesario para la correcta clasificación, incluyendo tres métodos de análisis de resultados, pero que llevan al mismo fin. El método utilizado en este trabajo es el más recomendable ya que es un método matemático el cual se lo puede realizar con la ayuda de un software de cálculo.
- Para realizar los ensayos de la norma, es altamente recomendable encontrarse capacitado con la manipulación de la maquinaria requerida, la cual se encuentra especificada en este trabajo. Es importante seguir las recomendaciones de seguridad tanto de la maquina como del laboratorio de materiales, para evitar cualquier problema.
- La correcta obtención de muestras, así como una correcta preparación previa es de mucha importancia. De una correcta calidad de muestras y preparación se obtendrán resultados de igual calidad, pero si se comete errores o se omiten pasos, los resultados obtenidos no guardaran concordancia con la realidad. Sucede de igual manera con el programa entregado con este ensayo, es importante reconocer que, para el uso de este, se deberá tener conocimiento de su funcionamiento. El ingresar datos erróneos, se traducirá en los resultados erróneos que arrojará en programa. Es por esto muy importante estudiar el manual de uso del programa, que se encuentra en la sección de anexos.
- Este trabajo servirá como guía para la aplicación del ensayo para los alumnos de la USFQ en sus clases de carrera. Además, se ha implementado una hoja de cálculo semi automática en Excel, que permite obtener los resultados de este método de manera muy simplificada. La finalidad de la hoja de cálculo respectiva es de brindar de manera más

rápida y sencilla in informe sobre este ensayo. El respectivo manual se encuentra en la sección C de anexos.

Referencias

- ASTM. (2016). *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications*.
- ASTM. (2019, abril 09). *ASTM international* . Retrieved from <https://www.astm.org/BOOKSTORE/BOS/index.html>
- Baily, B. (1972). *Introducción a la petrología*. Madrid: Paraninfo.
- Basu, a., Mishra, D., & Roychowdhury, K. (2013). *Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian*.,. Berlin: Springer-Verlag.
- Bell, F. (2000). *Engineering properties of soils and rocks*. Oxford: Blckwell Science.
- Blyth, F., & Freitas, M. (1989). *A geology for Engineers*. London: Elsevier.
- Dapena, E. (1996). Características mecánicas de materiales de construcción. En: *Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico*. Madrid: Complutence.
- Derr , H., & Zussman. (1993). *An Introduction to the Rock Forming Minerals*. London: Lonman Group Limited.
- Galván , M., & Restrepo, I. (2016). *Resistance correlation with compression uniaxial effective humidity and porous rocks*. Cali: DYNA.
- Guéguen, Y., & Palciauskas, V. (1994). *Introduction to the physics of rock*. Princeton: University Press.
- Harker, A. (1960). *Petrology for Students*. Press, 230.

Husqvarna. (2019, abril 11). *Husqvarna Official site*. Retrieved from

<https://www.husqvarnacp.com/latam/buscar/?searchText=DMS%20240>

Montgomery, D., & Runger, G. (2011). *Applied Statistics and Probability for Engineers*.

Arizona: John Wiley & Sons.

Nara, Y., Kaneko, K., Yoneda, T., Hiroyoshi, N., & Morimoto, K. (2012). Effects of relative humidity and temperature on subcritical crack growth in rock. *International Journal of the Japanese Committee for Rocks Mechanics*, 1-4.

Santamarta, J., & Hernández, L. (2015). *Ingeniería Geológica entre terrenos volcánicos*.

Madrid : Alba Fuentes Porto.

Zubizarreta, V., & Ros, A. (2014). *Introducción a la Mecánica de Sólidos*. Madrid: Dextra.

ANEXO A: Tablas de resultados

Tabla 8: Contenido de agua en muestras

CONTENIDO DE AGUA EN MUESTRA			
Mcws	1160.500	[g]	Masa contenedor y muestra
Mcs	1144.500	[g]	Masa contenedor y muestra seca
Mc	733.000	[g]	Masa contenedor
Mw	16.000	[g]	Masa de agua
Ms	411.500	[g]	Masa de partículas sólidas
w	3.888	%	Contenido de Agua

Tabla 9: Datos de especímenes núcleo

Datos de Muestras					
Cálculo del índice de resistencia a carga puntual no corregido (Is)					
Muestra	D [mm]	W [mm]	P [N]	De [mm]	Is [MPa]
T JC - M1-1	45.400	41.200	6780.000	41.200	3.994
T JC - M1-2	45.350	39.400	6770.000	39.400	4.361
T JC - M1-3	45.400	41.100	9834.000	41.100	5.822
T JC - M1-4	45.350	39.650	10234.000	39.650	6.510
T JC - M1-5	45.350	39.750	8106.000	39.750	5.130
T JC - M1-6	45.250	41.850	7540.000	41.850	4.305
T JC - M1-7	45.300	40.050	9770.000	40.050	6.091
T JC - M1-8	45.350	41.500	8874.000	41.500	5.153
T JC - M1-9	45.150	40.600	10858.000	40.600	6.587
T JC - M1-10	45.400	41.100	8396.000	41.100	4.970
T JC - M1-11	45.350	41.350	9012.000	41.350	5.271
T JC - M1-12	45.400	40.150	9486.000	40.150	5.885

Tabla 10: Resistencia corregida por muestra núcleo

Cálculo del índice de resistencia a carga puntual corregido (Is(50))				
Muestra	De [mm]	F	Is [MPa]	Is(50) [MPa]
T JC - M1-1	41.200	0.917	3.994	3.661
T JC - M1-2	39.400	0.898	4.361	3.918
T JC - M1-3	41.100	0.916	5.822	5.330
T JC - M1-4	39.650	0.901	6.510	5.865
T JC - M1-5	39.750	0.902	5.130	4.627
T JC - M1-6	41.850	0.923	4.305	3.974
T JC - M1-7	40.050	0.905	6.091	5.512
T JC - M1-8	41.500	0.920	5.153	4.738
T JC - M1-9	40.600	0.911	6.587	5.998
T JC - M1-10	41.100	0.916	4.970	4.551
T JC - M1-11	41.350	0.918	5.271	4.839
T JC - M1-12	40.150	0.906	5.885	5.331

Tabla 11: Datos de especímenes irregulares

Datos de Muestras								
Cálculo del índice de resistencia a carga puntual no corregido (Is)								
Muestra	D [mm]	W1 [mm]	W2 [mm]	W [mm]	P [N]	A [mm]	De [mm]	Is [MPa]
T JC - M1-1	40.500	75.700	58.350	67.025	13412.000	2714.513	58.790	3.881
T JC - M1-2	41.300	59.500	46.850	53.175	4490.000	2196.128	52.879	1.606
T JC - M1-3	42.550	84.400	85.900	85.150	23798.000	3623.133	67.920	5.159
T JC - M1-4	44.050	65.950	83.600	74.775	10754.000	3293.839	64.760	2.564
T JC - M1-5	52.150	57.150	51.300	54.225	5156.000	2827.834	60.004	1.432
T JC - M1-6	30.100	76.100	86.550	81.325	13732.000	2447.883	55.828	4.406
T JC - M1-7	47.200	89.650	81.600	85.625	39898.000	4041.500	71.734	7.754
T JC - M1-8	51.600	67.800	79.750	73.775	13278.000	3806.790	69.620	2.739
T JC - M1-9	41.350	72.850	75.750	74.300	24696.000	3072.305	62.544	6.313
T JC - M1-10	48.800	77.600	51.600	64.600	14990.000	3152.480	63.355	3.735
T JC - M1-11	54.650	87.500	74.600	81.050	13666.000	4429.383	75.098	2.423
T JC - M1-12	47.150	70.650	53.450	62.050	7788.000	2925.658	61.033	2.091
T JC - M1-13	47.750	54.850	56.350	55.600	6928.000	2654.900	58.141	2.050
T JC - M1-14	44.700	54.200	54.700	54.450	12164.000	2433.915	55.668	3.925
T JC - M1-15	47.950	62.950	57.350	60.150	11490.000	2884.193	60.599	3.129
T JC - M1-16	41.800	53.400	52.550	52.975	25797.000	2214.355	53.098	9.150
T JC - M1-17	52.800	51.250	50.300	50.775	14849.000	2680.920	58.425	4.350
T JC - M1-18	48.850	67.350	54.750	61.050	9192.000	2982.293	61.621	2.421
T JC - M1-19	46.400	79.850	53.300	66.575	13149.000	3089.080	62.715	3.343
T JC - M1-20	54.650	68.500	55.150	61.825	6403.000	3378.736	65.589	1.488
T JC - M1-21	53.850	72.350	56.550	64.450	13178.000	3470.633	66.475	2.982
T JC - M1-22	45.100	69.300	62.750	66.025	8924.000	2977.728	61.574	2.354
T JC - M1-23	50.800	55.350	59.400	57.375	11755.000	2914.650	60.918	3.168
T JC - M1-24	49.150	62.950	54.750	58.850	6154.000	2892.478	60.686	1.671
T JC - M1-25	40.300	62.100	50.100	56.100	8513.000	2260.830	53.652	2.957

Tabla 12: Resistencia corregida por muestra irregular

Cálculo del índice de resistencia a carga puntual corregido (Is(50))				
Muestra	De [mm]	F	Is [MPa]	Is(50) [MPa]
T JC - M1-1	58.790	1.076	3.881	4.174
T JC - M1-2	52.879	1.026	1.606	1.647
T JC - M1-3	67.920	1.148	5.159	5.921
T JC - M1-4	64.760	1.123	2.564	2.881
T JC - M1-5	60.004	1.086	1.432	1.555
T JC - M1-6	55.828	1.051	4.406	4.630
T JC - M1-7	71.734	1.176	7.754	9.121
T JC - M1-8	69.620	1.161	2.739	3.179
T JC - M1-9	62.544	1.106	6.313	6.982
T JC - M1-10	63.355	1.112	3.735	4.154
T JC - M1-11	75.098	1.201	2.423	2.910
T JC - M1-12	61.033	1.094	2.091	2.287
T JC - M1-13	58.141	1.070	2.050	2.193
T JC - M1-14	55.668	1.050	3.925	4.120
T JC - M1-15	60.599	1.090	3.129	3.412
T JC - M1-16	53.098	1.027	9.150	9.401
T JC - M1-17	58.425	1.073	4.350	4.666
T JC - M1-18	61.621	1.099	2.421	2.659
T JC - M1-19	62.715	1.107	3.343	3.702
T JC - M1-20	65.589	1.130	1.488	1.682
T JC - M1-21	66.475	1.137	2.982	3.390
T JC - M1-22	61.574	1.098	2.354	2.585
T JC - M1-23	60.918	1.093	3.168	3.462
T JC - M1-24	60.686	1.091	1.671	1.823
T JC - M1-25	53.652	1.032	2.957	3.053

Tabla 13: Clasificación de la Muestra

Muestra	Tipo de ensayo	Designacion Resistencia
T JC - M1-1	Nucleo	Muy Alto
T JC - M1-2	Nucleo	Muy Alto
T JC - M1-3	Nucleo	Muy Alto
T JC - M1-4	Nucleo	Muy Alto
T JC - M1-5	Nucleo	Muy Alto
T JC - M1-6	Nucleo	Muy Alto
T JC - M1-7	Nucleo	Muy Alto
T JC - M1-8	Nucleo	Muy Alto
T JC - M1-9	Nucleo	Muy Alto
T JC - M1-10	Nucleo	Muy Alto
T JC - M1-11	Nucleo	Muy Alto
T JC - M1-12	Nucleo	Muy Alto
T JC - M1-1	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-2	Irregulares	Alto
T JC - M1-3	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-4	Irregulares	Alto
T JC - M1-5	Irregulares	Alto
T JC - M1-6	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-7	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-8	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-9	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-10	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-11	Irregulares	Alto
T JC - M1-12	Irregulares	Alto
T JC - M1-13	Irregulares	Alto
T JC - M1-14	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-15	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-16	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-17	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-18	Irregulares	Alto
T JC - M1-19	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-20	Irregulares	Alto
T JC - M1-21	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-22	Irregulares	Alto
T JC - M1-23	Irregulares	Muy Alto
T JC - M1-24	Irregulares	Alto
T JC - M1-25	Irregulares	Muy Alto

ANEXO B: Ilustraciones y gráficos adicionales

Ilustración 39: Anatomía de Distribución normal de Probabilidades. Fuente: Applied Statistics and Probability for Engineers, Capítulo 4: Variables Aleatorias Discretas y Distribuciones de Probabilidad.

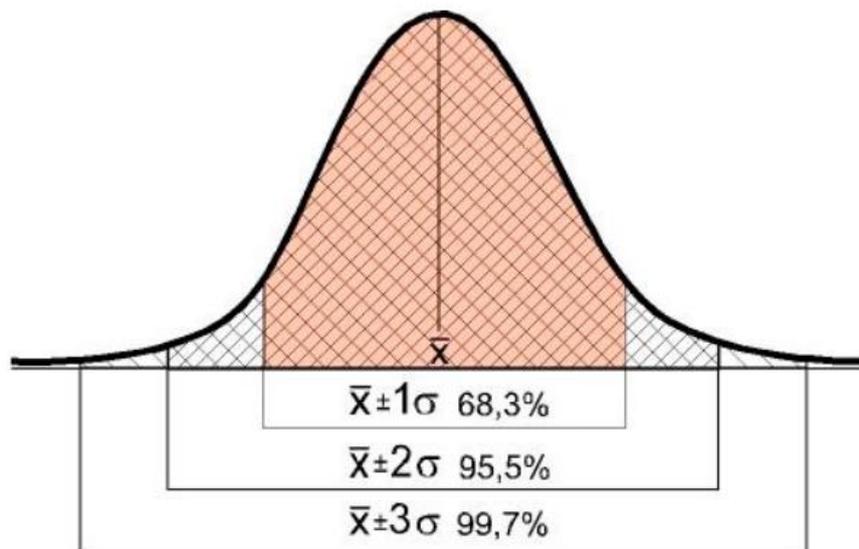
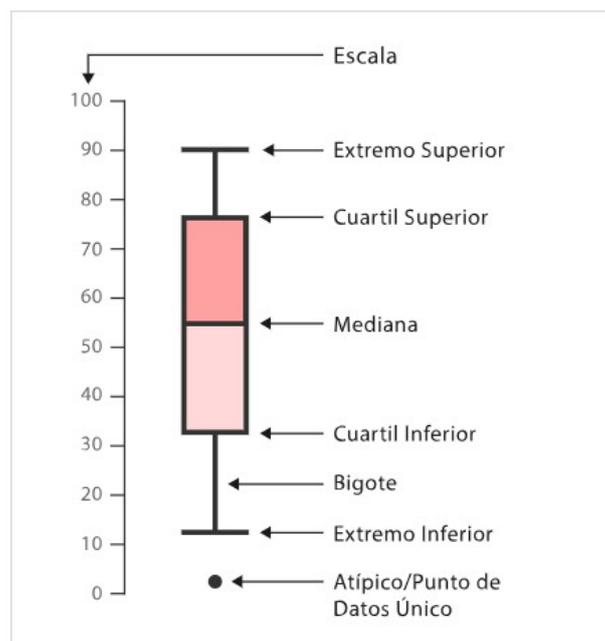


Ilustración 40: Anatomía de Diagrama de cajas y bigotes. Fuente: Applied Statistics and Probability for Engineers, Capítulo 6: Estadística Descriptiva.



ANEXO C: Guía para el uso del programa de Excel

El uso del programa en Excel para la obtención de resultados del ensayo es simple. Se deberán seguir al pie de la letra los pasos mencionados.

1. Los datos serán ingresados en la hoja “Matriz de Datos”.
2. En la columna “Muestra”, agregar el nombre o membrete del espécimen.
3. Se agregará automáticamente una fila adicional a la tabla con las fórmulas y cálculos necesarios.
4. Seleccionar el tipo de ensayo de la lista de desplegable, automáticamente aparecerá “NA” en las celdas donde no se deba agregar datos.
5. Ingresar los datos requeridos en las columnas “D[mm]”, “Wi[mm]”, “L[mm]” y “P[N]”.
6. Los cálculos de Área, Resistencia Is, Factor de Corrección, Resistencia Is (50) y Clasificación, son calculados automáticamente.

Muestra	Tipo	D [mm]	W1 [mm]	W2 [mm]	W3 [mm]	W [mm]	L [mm]	P [N]	A [mm]	De [mm]	Is [MPa]	F	Is(50) [MPa]	Resistencia
TJC - M1-1N	Nucleo	41.200	45.400	45.400	45.400	45.400	NA	6780.000	NA	41.200	3.994	0.917	3.661	Muy Alto
TJC - M1-2N	Nucleo	39.400	45.350	45.350	45.350	45.350	NA	6770.000	NA	39.400	4.361	0.898	3.918	Muy Alto
TJC - M1-3N	Nucleo	41.100	45.400	45.400	45.400	45.400	NA	9834.000	NA	41.100	5.822	0.916	5.330	Muy Alto
TJC - M1-4N	Nucleo	39.650	45.350	45.350	45.350	45.350	NA	10234.000	NA	39.650	6.510	0.901	5.865	Muy Alto
TJC - M1-5N	Nucleo	39.750	45.350	45.350	45.350	45.350	NA	8106.000	NA	39.750	5.130	0.902	4.627	Muy Alto
TJC - M1-6N	Nucleo	41.850	45.250	45.250	45.250	45.250	NA	7540.000	NA	41.850	4.305	0.923	3.974	Muy Alto
TJC - M1-7N	Nucleo	40.050	45.300	45.300	45.300	45.300	NA	9770.000	NA	40.050	6.091	0.905	5.512	Muy Alto
TJC - M1-8N	Nucleo	41.500	45.350	45.350	45.350	45.350	NA	8874.000	NA	41.500	5.153	0.920	4.738	Muy Alto
TJC - M1-9N	Nucleo	40.600	45.150	45.150	45.150	45.150	NA	10858.000	NA	40.600	6.587	0.911	5.998	Muy Alto

- a. Valores en color azul, son datos ingresados manualmente; valores en negro, son datos calculados por Excel.

7. Agregar el número de ensayos que sea requerido.
8. Para calcular el promedio: dirigirse a la tabla de cálculo de promedio en la hoja “Matriz de Datos” en el programa.
9. Seleccionar el tipo de ensayo en el desplegable ubicado en la celda V19.
10. Oprimir el botón “Filtrar Datos” para obtener los datos requeridos.

Filtrar Datos	
CALCULO DE PROMEDIO	
Tipo	Is(50) [MPa]
Irregulares	
Tipo	Is(50) [MP]
Irregulares	4.174
Irregulares	1.647
Irregulares	5.921
Irregulares	2.881
Irregulares	1.555
Irregulares	4.630
Irregulares	9.121
Irregulares	3.179
Irregulares	6.982
Irregulares	4.154
Irregulares	2.910
Irregulares	2.287
Irregulares	2.193
Irregulares	4.120
Irregulares	3.412
Irregulares	9.401
Irregulares	4.666
Irregulares	2.659
Irregulares	3.702
Irregulares	1.682
Irregulares	3.390
Irregulares	2.585
Irregulares	3.462
Irregulares	1.823
Irregulares	3.053

11. Automáticamente se mostrarán los valores máximos y mínimos.
12. Para calcular el promedio, oprimir el botón “Prom”. La celda AA26, muestra el valor del promedio de los datos eliminando los máximos y mínimos.

16. Agregar los especímenes que se deseen presentar en el informe.
17. Para los promedios, traer el valor obtenido del paso 12.
18. Llenar las observaciones necesarias.

Nucleo	Resistencia promedio	4.863	Muy Alto
Irregulares	Resistencia promedio	3.517	Muy Alto

Convención y Símbolos		Observaciones
D [mm]:	Diámetro en milímetros	
W [mm]:	Ancho en milímetros	
P [kN]:	Carga axial en Kilo Newtons	
De [mm]:	Diámetro efectivo en milímetros	
Is [MPa]:	Índice de resistencia no corregido en Mega Pascales	
Is(50) [MPa]:	Índice de resistencia corregido en Mega Pascales	

19. Imprimir el reporte, el informe está configurado para una impresión en hoja A4

ANEXO D: Documentos de calibración

A continuación, se presentan los detalles de la última calibración realizada a la prensa hidráulica de la compañía Matest modelo A125N que se encuentra en el laboratorio de materiales de la Universidad San Francisco de Quito.

 METREXLAB CIA. LTDA. EQUIPOS TÉCNICOS Y SERVICIO ESPECIALIZADO			
CERTIFICADO TÉCNICO DE AJUSTES DE CALIBRACIÓN			
Informe No: USFQ-0618-A125H-2701 Fecha de emisión: 05 de septiembre del 2018			
CLIENTE:	UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO		
DIRECCIÓN:	Av. Diego de Robles y Vía Interoceánica		
FECHA DE CALIBRACIÓN:	27 de junio del 2018		
CONDICIONES AMBIENTALES:	23 °C +/- 2 °C	46 % +/- 5 % HR	
IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO BAJO PRUEBA			
	MÁQUINA DE ENSAYO DE CARGA PUNTUAL		INDICADOR DIGITAL
MARCA:	MATEST	MARCA:	MATEST
MODELO:	A125N	SERIE:	A125N/AG/0043
CAPACIDAD:	50 kN	RESOLUCIÓN:	0,001 kN
IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO DE CALIBRACIÓN			
	INDICADOR DIGITAL		
MARCA:	POISE		
MODELO:	CL-6X		
SERIE:	P09102101		
RESOLUCIÓN:	0,000 1 kN / 0,01 kN		
	CELDA DE CARGA 1		CELDA DE CARGA 2
MARCA:	REP TRANSDUCERS	MARCA:	REP TRANSDUCERS
MODELO:	TCE-TM 50kN	MODELO:	CLF 3MN
SERIE:	138669	SERIE:	911472
CAPACIDAD:	50 kN	CAPACIDAD:	3 000 kN
CERTIFICADO:	CNM-CC-720-276/2016	CERTIFICADO:	CNM-CC-720-301/2016
REFERENCIAS Y NORMAS UTILIZADAS			
DOCUMENTOS: Norma ASTM E74-04: Standard Practice of Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines.			
CRITERIO DE ACEPTACIÓN: Error máximo aceptable $\pm 1\%$ de la carga aplicada (ASTM E4-03).			
VIGENCIA: Se recomienda realizar una nueva verificación y/o ajustes de calibración en 12 meses y no más de 18 meses, cuando el equipo es movido a otro sitio y/o se tenga duda de su precisión (ASTM E4-03).			
DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD			
De acuerdo a los resultados obtenidos y tolerancias estimadas el equipo se encuentra trabajando:			
CORRECTAMENTE:	<input checked="" type="checkbox"/>	EN TOLERANCIAS:	<input checked="" type="checkbox"/>
USO CONDICIONADO:	<input type="checkbox"/>		
OBSERVACIONES: Se realiza revisión técnica, se realizan ajustes y verificación de la calibración. Se utiliza la celda de carga # 1 de 50 kN. Las condiciones ambientales corresponden al sitio donde se encuentra instalada el equipo el laboratorio de ensayo de suelos en la USFQ.			
PROCEDIMIENTO UTILIZADO: P-MVC-PRENSA-010-REV.05			
REALIZADO POR: Ing. Andrés Méndez B. ASISTENCIA TÉCNICA			FIRMA: 
Av. Eloy Alfaro N44-349 y Río Coca [Diagonal Tv.] Telf.: [593-2] 3340991 Telefax: [593-2] 3341010 Cel.: 9993 462 186 E-mail: servicio-tecnico@metrexlab.net / sertec@metrexlab.com Quito - Ecuador			
			USFQ-0618-A125H-2701 Página 1 de 3

HOJA DE DATOS DE VERIFICACIÓN Y CALIBRACIÓN

MARCA:	MATTEST	MARCA:	MATTEST
MODELO:	A125N	SERIE:	A125N/A100043
CAPACIDAD:	50 KN	RESOLUCIÓN:	0,001 KN

LECTURAS OBTENIDAS EN LA VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN

FUERZA APLICADA	LECTURAS CELDA DIGITAL PATRON			ERROR MÁXIMO ABSOLUTO	INCERTIDUMBRE U (k=2)	ERROR EMP %
	TEST 1	TEST 2	TEST 3			
1	1,078	1,082	1,081	0,007	0,0030	-0,48
5	5,362	5,362	5,362	0,002	0,0013	0,31
10	10,724	10,724	10,724	0,002	0,0013	1,42
15	16,086	16,086	16,086	0,002	0,0013	1,42
20	21,448	21,448	21,448	0,002	0,0013	1,42
25	26,810	26,810	26,810	0,002	0,0013	1,42
30	32,172	32,172	32,172	0,002	0,0013	1,42
35	37,534	37,534	37,534	0,002	0,0013	1,42
40	42,896	42,896	42,896	0,002	0,0013	1,42
45	48,258	48,258	48,258	0,002	0,0013	1,42
50	53,620	53,620	53,620	0,002	0,0013	1,42

EMP=Error Máximo Permitido

USPQ-0618-A125N-2701 Página 2 de 3

Av. Eloy Alfaro N44-349 y
Telf.: [593-2] 3340991
Telefax: [593-2] 3341010
Cel: 09979442186
E-mail: servicio-tecnico@metrexlabs.net / sertec@metrexlabs.com
Quito - Ecuador

EVIDENCIA FOTOGRÁFICA



Av. Eloy Alfaro N44-349 y Río Coca (Diagonal Tv.)
Telf.: [593-2] 3340991
Telefax: [593-2] 3341010
Cel: 09979442186
E-mail: servicio-tecnico@metrexlabs.net / sertec@metrexlabs.com
Quito - Ecuador

USPQ-0618-A125N-2701 Página 3 de 3