



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**Construcción de la “Máquina de Franklin”, pruebas y
correlación con ensayos de laboratorio en compresión de
rocas**

Trabajo de Graduación previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN MINAS

Nombres de los Autores:

JOSÉ LUIS QUEVEDO FLORES

JOHANNA ANABEL REYES TINOCO

Nombre del Director:

GIL TARQUINO ÁLVAREZ PACHECO

CUENCA, ECUADOR

2019

DEDICATORIA

Dedicatoria José Luis Quevedo Flores:

Esta tesis la dedico especialmente a mi familia, ese núcleo donde siempre pude refugiarme y encontrar una solución para los problemas que se presentan.

Especialmente a Fernando Quevedo Abad y Marina Flores Vázquez, quienes supieron guiarme por el camino correcto en toda mi vida universitaria. Siempre seré agradecido por el sacrificio que hicieron y hacen.

Dedicatoria Johanna Anabel Reyes Tinoco:

Dedico esta tesis principalmente a mis padres Vicente y Rosi, quienes siempre fueron el principal apoyo y pilar fundamental para llegar a estas circunstancias de mi formación profesional, por su esfuerzo, dedicación, y comprensión durante todos estos años.

AGRADECIMIENTO

Yo, José Luis Quevedo Flores quiero agradecer significativamente a mi familia, a mis padres y hermanos quienes fueron el pilar fundamental para seguir avanzando en esta vida universitaria. Agradezco de manera muy grande a todos los profesores, especialmente al Ing. Gil Álvarez, por su dedicación para el presente trabajo de titulación y también al Ing. Patricio Feijoo, quien más que un profesor se convirtió en un amigo, brindando los consejos adecuados. Agradezco a todos los amigos y compañeros quienes brindaron su granito de arena en cada una de las etapas de vida escolar.

Yo, Johanna Anabel Reyes Tinoco agradezco a Dios, de manera especial a mis padres por el apoyo económico, consejos, buen ejemplo e impulso durante todos estos años para alcanzar mis metas. A los profesores de la Universidad del Azuay, que supieron impartir sus conocimientos. Un agradecimiento de manera especial al Ingeniero Gil Álvarez por el tiempo y disponibilidad que presentó durante este proceso, de la misma forma al Ingeniero Patricio Feijoo, por compartir consejos y pautas para el desarrollo del presente trabajo. A los amigos que estuvieron a lo largo de este camino y fueron parte de esta última etapa universitaria.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	2
1.1 Aspectos generales de la Mecánica de Rocas.....	2
1.1.1 Características importantes y determinables de las Rocas para operaciones Mineras	2
1.1.2 Definiciones sobre términos mineros	3
1.2 Propiedades de las rocas.....	5
1.2.1 Densidad	5
1.2.2 Humedad.....	6
1.2.3 Porosidad	6
1.2.4 Grado de saturación	8
1.2.5 Comportamiento hídrico.....	8
1.2.6 Permeabilidad	8
1.3 Resistencia a la Compresión Simple	10
1.3.1 Deformación	11
1.3.2 Elasticidad.....	12

1.4 Resistencia de las Rocas	14
1.5 Ensayo de carga puntual (Ensayo de Franklin)	16
1.5.1 Alcance de la máquina de Franklin.....	16
1.5.2 Resumen del método.....	17
1.5.3 Importancia y uso.....	17
1.5.4 Aparato.....	18
1.5.5 Descripción de diferentes tipos de procesos para las muestras	21
1.5.6 Preparación para las muestras.....	21
1.5.7 Tipo de Fallas.....	23
1.5.8 Descripción del Índice de Carga Puntual.....	24
1.6 Partes constitutivas de la máquina de Franklin	25
1.6.1 Puntas cónicas.....	25
1.6.2 Pistón hidráulico y gata hidráulica.....	26
1.6.3 Lector de carga.....	27
CAPÍTULO II: CONSTRUCCIÓN DE PRENSA E INSTRUMENTACIÓN..	28
2.1 Máquina de Franklin	28
2.2 Especificaciones y límites de carga.....	29
2.3 Descripción de la máquina de Franklin	29
2.3.1 Gata hidráulica horizontal.....	30
2.3.2 Base para el pistón vertical	31
2.3.3 Estructura o marco.....	32
2.3.3.1 Dimensiones del perfil C.....	32
2.3.3.2 Cálculo del esfuerzo de trabajo de los parantes laterales	34
2.3.3.3 Cálculo del factor de seguridad de las vigas	37
2.3.3.4 Cálculo de la verificación de la soldadura	38

2.3.4 Pistón hidráulico	39
2.3.5 Puntas cónicas.....	40
2.3.6 Soporte superior de acero para puntas cónicas	41
2.3.7 Manómetro.....	42
2.3.8 Acoples para el manómetro y válvula.....	42
2.4 Construcción de la máquina y pruebas preliminares	43
CAPÍTULO III: MUESTREO Y PRUEBAS	45
3.1 Descripción de la zona de estudio	45
3.1.1 Ubicación geográfica	45
3.1.2 Clima.....	46
3.1.3 Geología.....	46
3.1.3.1 Geología regional	46
3.1.3.2 Geología local	47
3.2 Descripción del material.....	48
3.3 Proceso de adecuación del material.....	49
3.4 Pruebas de ajuste	49
3.5 Ejecución de pruebas experimentales.....	50
3.6 Tabulación de resultados	51
3.6.1 Pruebas realizadas en la Máquina de Franklin	51
3.6.2 Pruebas realizadas en la Máquina a compresión marca Humboldt	52
3.6.3 Valores ordenados obtenidos de la Máquina de Franklin y de la Máquina a compresión para la realización de curvas	53
3.6.4 Gráficos de los resultados.....	54
3.7 Análisis para extrapolar la ecuación con otros tipos de rocas	56
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 60

ANEXOS 63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diferencia entre macizo rocoso y estructura.	4
Figura 1.2: Ejemplos de curvas tensión- deformación de algunas rocas a compresión cargadas hasta la ruptura.	13
Figura 1.3: Curva esfuerzo - deformación en rocas.	15
Figura 1.4: Ilustración sobre componentes de la máquina de Franklin.....	20
Figura 1.5: Configuraciones de carga y muestras para diferentes tipos de rocas.	22
Figura 1.6: Formas de rotura para ensayos válidos y nulos.	23
Figura 1.7: Punta cónica de la máquina de Franklin.....	26
Figura 2.1: Gata hidráulica horizontal.	31
Figura 2.2: Base para el pistón hidráulico.....	31
Figura 2.3: Dimensiones del perfil C.	32
Figura 2.4: Diagrama de cuerpo libre.	34
Figura 2.5: Vista de los parantes verticales.....	36
Figura 2.6: Diagrama del Momento Flector.....	36
Figura 2.7: Deformación de la viga.....	38
Figura 2.8: Garganta de soldadura de la estructura.....	38
Figura 2.9: Pistón hidráulico.	40
Figura 2.10: Punta cónica del equipo.	40
Figura 2.11: Dimensiones de las puntas cónicas construidas.	41
Figura 2.12: Soporte superior para puntas cónicas.	41
Figura 2.13: Manómetro equipado en la máquina de Franklin.	42
Figura 2.14: Máquina de Franklin construida.	44
Figura 3.1: Ubicación geográfica de la parroquia Javier Loyola.	46
Figura 3.2: Hoja Geológica Azogues Escala 1:100000.	47
Figura 3.3: Geología local Javier Loyola.	48
Figura 3. 4: Correlación con los puntos de las pruebas realizadas en las dos maquinas.	55
Figura 3. 5: Puntos ordenados con la ecuación lineal.	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Métodos para determinar la Resistencia a Compresión Simple.	3
Tabla 1.2: Densidad de ciertos minerales.	6
Tabla 1.3: Porosidad según el tipo de roca.	7
Tabla 1.4: Tipos de rocas con su coeficiente de permeabilidad.....	9
Tabla 1.5: Clasificación en base a la resistencia de la roca.	10
Tabla 1.6: Constantes de las rocas con carga cero.	14
Tabla 1.7: Requisitos geométricos de las muestras para el ensayo.....	23
Tabla 1.8: Clasificación de las rocas según su resistencia a la compresión uniaxial.	25
Tabla 2.1: Comparación entre la gata hidráulica horizontal y la gata hidráulica vertical.	30
Tabla 2.2: Dimensiones del perfil C.	32
Tabla 2.3: Cálculo de Áreas del perfil C.....	33
Tabla 2.4: Propiedades del Acero ASSAB 705.	44
Tabla 3.1: Cantidad de muestras utilizadas en las pruebas.	49
Tabla 3.2: Muestras realizadas en la Máquina de Franklin.....	51
Tabla 3.3: Muestras realizadas en la Máquina a compresión marca Humboldt.....	52
Tabla 3.4: Valores de la resistencia en la Máquina de Franklin y en la Máquina a compresión.	53
Tabla 3.5: Pruebas realizadas en la máquina de Franklin y en la máquina a compresión con mármol del sector Pumayunga.	57

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Datos del acero ASSAB 705.	63
Anexo 2: Especificaciones Acero ASTM A 36.	63
Anexo 3: Punta cónica.	64
Anexo 4: Armado de la estructura.	64
Anexo 5: Acople del manómetro.	64
Anexo 6: Estructura soldada.	64
Anexo 7: Colocación de una probeta en la máquina a compresión.	65
Anexo 8: Máquina construida.	65
Anexo 9: Prueba realizada en la máquina a compresión.....	65
Anexo 10: Probetas ensayadas en la máquina a compresión.	65
Anexo 11: Adecuación de las probetas.	65
Anexo 12: Realización de las pruebas.	65
Anexo 13: Ajuste de probeta en la realización de las pruebas.	66
Anexo 14: Desarrollo de las pruebas en la maquina construida.	66
Anexo 15: Vista de las puntas cónicas luego de las pruebas.	66
Anexo 16: Probetas de roca luego de la realización de pruebas en la máquina construida.	66
Anexo 17: Probetas de mármol de Pumayunga.	66

CONSTRUCCIÓN DE LA “MÁQUINA DE FRANKLIN”, PRUEBAS Y CORRELACIÓN CON ENSAYOS DE LABORATORIO EN COMPRESIÓN DE ROCAS

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo la construcción de la máquina de Franklin, para el Laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Minas y la ejecución de pruebas para determinar la correlación entre la Carga Puntual de rotura y la Resistencia a la Compresión Simple en distintos tipos de materiales rocosos.

Las pruebas se realizaron mediante la obtención de sesenta muestras, provenientes de un mismo afloramiento; treinta muestras se derivan a la primera prueba en la máquina de Franklin y treinta muestras se ensayaron al esfuerzo de Compresión Simple en la máquina marca Humboldt.

Palabras Claves: Resistencia, Tracción, Roca, Correlación.



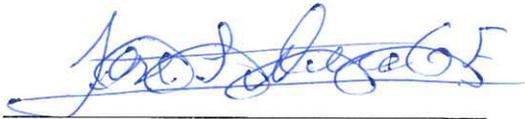
Gil Tarquino Álvarez Pacheco

Director del trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



José Luis Quevedo Flores



Johanna Anabel Reyes Tinoco

Autores

CONSTRUCTION OF THE "FRANKLIN MACHINE", TESTS AND CORRELATION WITH LABORATORY TESTS IN COMPRESSION OF ROCKS

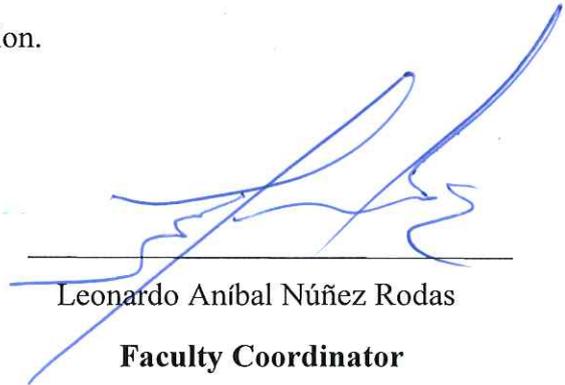
ABSTRACT

This research aimed to build the Franklin machine for the laboratory of the Mining Engineering Faculty, and execute tests to determine the correlation between the punctual load of rupture, and the resistance to simple compression in different types of rocky materials. The tests were performed by obtaining sixty samples from the same outcrop. Thirty samples were derived to the first test on the Franklin machine and thirty samples were tested in simple compression effort on the Humboldt brand machine.

Keywords: Resistance, traction, rocks, correlation.



Gil Tarquino Álvarez Pacheco
Thesis Director



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Faculty Coordinator



José Luis Quevedo Flores



Johanna Anabel Reyes Tinoco

Authors



Ana Isabel Andrade
AZUAY
Dpt. de Ingeniería



Translated by
Ing. Paúl Arpi

Quevedo Flores José Luis

Reyes Tinoco Johanna Anabel

Trabajo de Titulación

Ing. Gil Tarquino Álvarez Pacheco Mgt

Abril, 2019

CONSTRUCCIÓN DE LA “MÁQUINA DE FRANKLIN”, PRUEBAS Y CORRELACIÓN CON ENSAYOS DE LABORATORIO EN COMPRESIÓN DE ROCAS

INTRODUCCIÓN

Para determinar la resistencia a la compresión simple de una roca existen diversos y variados métodos que se pueden realizar en campo y en laboratorio, por este motivo se construyó un equipo que garantice una estimación correcta mediante ensayos “in situ”, en vista de que la mayoría de estas pruebas se tienen que desarrollar en lugares lejanos, en donde se ubican las actividades mineras; lo cual ocasiona pérdidas de tiempo, dinero, y paralización de las labores al enviar a laboratorio.

La máquina de Franklin sirve para desarrollar la prueba de carga que mide el índice de resistencia a la carga puntual I_s (50) o también llamado “Point Load Test” de especímenes de roca. Los especímenes de roca en forma de probetas cúbicas se rompen por la aplicación de una carga puntual a través de un par de puntas cónicas truncadas esféricamente. Esta máquina de prueba es ligera, portátil, desarmable, de fácil traslado y aplicación sencilla para ejecución de pruebas.

Mediante la experimentación de distintos tipos de muestras provenientes de un mismo afloramiento, luego la primera se sometió a la prueba de Carga Puntual y la segunda a Compresión Simple; después de tabular los datos se determinó la función matemática de correlación a través de la cual se pueda determinar la resistencia de la roca. Esto representa una alternativa y solución para realizar el diagnóstico del tipo de roca, en el mismo lugar donde se realizan las actividades mineras, de manera rápida, efectiva y económica.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Aspectos generales de la Mecánica de Rocas

El estudio de la Mecánica de Rocas se basa en la acción de fuerzas que se hallan actuando sobre los macizos rocosos. Algunas condiciones importantes son asociadas con las rocas sometidas a esfuerzos, las cuales propician la formación de fracturamiento causada por los esfuerzos, deformación y la acumulación de energía resultante (Rodríguez, 2012).

Dentro del campo de minería, se requiere conocer sobre la influencia y predicción de las fracturas, los deslizamientos con cambios en el volumen y las formas de las rocas.

El estudio de la mecánica de rocas abarca:

- El análisis de las cargas o las fuerzas que están siendo aplicadas a las rocas.
- El análisis de los efectos internos en términos de los esfuerzos, deformaciones y la energía almacenada (Rodríguez, 2012).

1.1.1 Características importantes y determinables de las Rocas para operaciones Mineras

Se dará a conocer las aplicaciones para efectuar trabajos de ingeniería haciendo uso de la mecánica de rocas, se especificarán las propiedades más importantes:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca: Indica la resistencia de la roca sometida a esfuerzo de compresión uniaxial y determinar si la roca es lo suficientemente resistente o débil con respecto a la aplicación de una carga.
- Deformación antes de la fractura de la roca: Indicará si el deslizamiento natural del material podría estar en el rango esperado y en los niveles de esfuerzos menores que los que son requeridos para causar la falla; en casos extremos estos podrían indicar la posibilidad del esponjamiento del macizo rocoso.

- Rotura de la roca: La naturaleza de la falla del material por ruptura o por deslizamiento tiene una influencia determinante en el factor de seguridad que es usado o calculado para ser utilizado en trabajos de diseño, así como para las precauciones que deben ser tomadas en cuenta durante las operaciones.
- La densidad, homogeneidad e isotropía de la formación: El origen de la formación de las rocas gobierna con mayor magnitud, si el macizo rocoso en la naturaleza es generalmente isotrópico o anisotrópico. Desde el punto de vista de la mecánica es necesario conocer qué tipo de macizo rocoso existe en la zona de trabajo.
- Continuidad de la roca: La cual puede o no puede causar problemas. Las propiedades del macizo rocoso son de gran importancia. Ya sea que la roca sea dividida en bloques de gran tamaño o en fragmentos pequeños, la continuidad será de mayor importancia que las propiedades mismas de la roca (Rodríguez, 2012).

Tabla 1.1: Métodos para determinar la Resistencia a Compresión Simple.

Aplicación en	Método	Obtención de resistencia
Campo	Índices manuales (Ensayo Organoléptico)	Estimación Subjetiva
	Esclerómetro o martillo de Schmidt	Estimación objetiva
Campo y Laboratorio	Compresión Puntual (Franklin)	Correlación
Laboratorio	Ensayo de Tracción Brasileña	Correlación
	Ensayo de compresión uniaxial	Medición directa

Fuente: (Galván, Seron, & Preciado, 2010).

1.1.2 Definiciones sobre términos mineros

Roca: Llamamos roca a un agregado sólido, estructurado por uno o más minerales, en mecánica de rocas se le conoce como roca o roca intacta para referirse a

un elemento de roca (trozo, bloque, probeta) que no presenta discontinuidades a simple vista (Edwards & Atkison, 1986).

Roca Encajante: Se la conoce también como roca de caja, constituye los respaldos o límites del depósito (Edwards & Atkison, 1986).

Estructura: Se define como los distintos caracteres geológicos estructurales y discontinuidades de origen geológico, entre los cuales están los pliegues, diaclasas, fallas y esquistosidad (Ramírez & Alejano, 2010).

Macizo Rocoso: Los macizos rocosos se presentan de diversas formas al medio natural siempre definido por la roca y la estructura, que estos contendrán planos de estratificación, pliegues, juntas, fallas y más caracteres estructurales (Ramírez & Alejano, 2010).

- **Matriz Rocosa (roca matriz o roca intacta):** Considerado como el material rocoso sin discontinuidades, o bloques de roca entre discontinuidades. (Se caracteriza por su densidad, deformabilidad y resistencia; por su localización geográfica; y por su litología, ya sea ésta única o variada) (Edwards & Atkison, 1986).

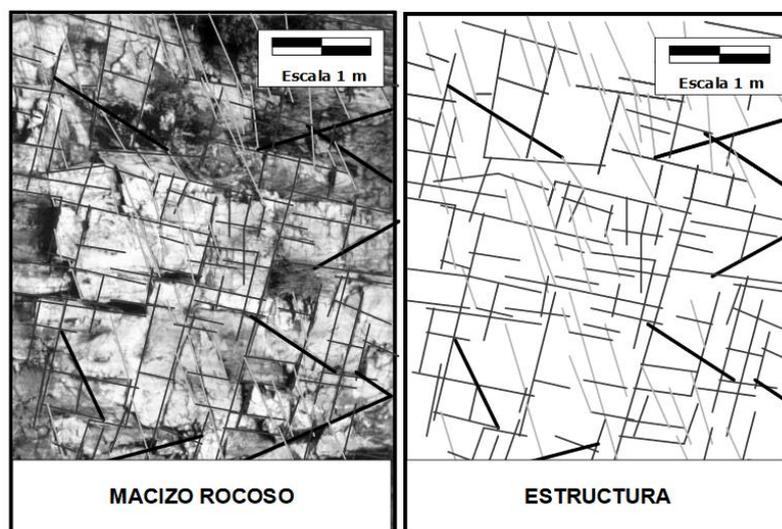


Figura 1.1: Diferencia entre macizo rocoso y estructura.

Fuente: (Ramírez & Alejano, 2010).

Suelo: Se precisa al suelo como un material estructurado por partículas sólidas y poros repletos de agua o aire, producido por la alteración de las rocas y en el cual se produce la mayor actividad humana y biológica (Ramírez & Alejano, 2010).

Mineral: Se define como una sustancia de origen natural producida por las altas temperaturas en las profundidades de la corteza terrestre, los cuales poseen una composición química definida y estructurada (Ramírez & Alejano, 2010).

Muestra: Se puede considerar un pedazo de roca o mineral, con tamaño y peso adecuado para utilizarse como elemento del cual se pueda obtener toda la información necesaria al momento de realizar un estudio propuesto (Rodríguez, 2012).

1.2 Propiedades de las rocas

En la mayoría de las rocas, así como en los suelos, se puede encontrar una serie de factores o propiedades los cuales determinaran la mayor o menor facilidad de deformación de las muestras, entre las cuales se tienen propiedades físicas como: densidad, humedad, porosidad, grado de saturación, comportamiento hídrico y permeabilidad.

1.2.1 Densidad: La densidad es un parámetro físico básico que depende de la composición mineralógica y porosidad, este parámetro se define como la masa por unidad de volumen de un material expresado en kg/m^3 (CentroAmericana, 2011).

La densidad natural o húmeda es la relación entre la masa de una muestra sin cambios y el volumen que la misma ocupa:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Dónde:

ρ = Densidad de la muestra.

m = Masa de la muestra.

v = Volumen de la muestra (Ramírez & Alejano, 2010).

Tabla 1.2: Densidad de ciertos minerales.

Mineral	Densidad (Kg/m ³)
Anfíboles	2980 - 3200
Augita	3200 - 3400
Biotita	2900
Calcita	2710
Dolomita	2870
Magnetita	5170 - 5180
Moscovita	2830
Oligoclasa	2640 - 2670
Olivino	3250 - 3400
Ortosa	2570
Cuarzo	2650

Fuente: (Ramírez & Alejano, 2010).

1.2.2 Humedad: La humedad está definida como la razón en porcentajes entre, la masa de agua contenida en los poros y la masa de agua de las partículas sólidas que conforman la roca.

$$\%w = \frac{Mw}{Ms} * 100$$

Dónde:

% w = Porcentaje de humedad.

Mw = Masa de agua contenida en poros.

Ms = Masa de agua de partículas sólidas (Galván & Restrepo, 2016).

1.2.3 Porosidad: Es descrita como la razón entre el volumen de los espacios vacíos entre la roca y el total volumen aparente de la roca.

$$n = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{muestra}}} * 100$$

Dónde:

n = Porosidad.

V_{poros} = Volumen de poros.

V_{muestra} = Volumen de la muestra.

Un aspecto bastante clave en la porosidad es que esta se relaciona directamente con la deformación de la roca y es inversamente proporcional con la densidad y resistencia, porque la presencia de poros afecta significativamente a las características mecánicas de la roca ocasionando zonas de debilidad en la roca (Galván & Restrepo, 2016).

Tabla 1.3: Porosidad según el tipo de roca.

Tipo de roca	Porosidad (n) (%)
Ígneas	
Basalto	0.22 – 22.06
Diabasa	0.17 – 1.00
Gabro	0.00 – 3.57
Granito	1.02 – 2.87
Metamórficas	
Cuarcita	0.40 – 0.65
Esquisto	10.00 – 30.00
Gneis	0.32 – 1.16
Mármol	0.65 – 0.81
Pizarra	1.84 – 3.61
Sedimentarias	
Arenisca	1.62 – 26.40
Caliza	0.27 – 4.10
Dolomita	0.27 – 4.10
Lutita	20.00 – 50.00

Fuente: (Alvial, 2014).

1.2.4 Grado de saturación: Equivale al porcentaje de poros ocupado por el agua.

$$Sr = \frac{Vh}{Vp} * 100$$

Dónde:

Sr = Grado de saturación.

Vh = Volumen ocupado por el agua.

Vp = Volumen total de poros.

Cabe mencionar que cuando la roca esta seca el valor de Sr = 0 y cuando la roca está completamente saturada el valor será de Sr = 100 (Ramírez & Alejano, 2010).

1.2.5 Comportamiento hídrico

El agua es uno de los agentes de deterioro más importantes dentro de la minería, por lo que la caracterización de sus propiedades hídricas resulta muy básica para evaluar su durabilidad y orientar un uso adecuado. Cuando está presente agua en el interior de una roca, esta va a condicionar fuertemente su degradación física, biológica y química por efecto de disolución, precipitación, hidrólisis, oxidación, presión del hielo, etc. Esto implica una disminución de sus cualidades mecánicas, ya que muchas rocas sufren pérdidas de resistencia, entre los rangos de 30 a 100 % (Alvial, 2014).

Las propiedades físicas que describen el movimiento del agua en las rocas se denominan propiedades hídricas ya sea en fase líquida o en fase gaseosa, siendo las de mayor influencia la permeabilidad y la capilaridad (Alvial, 2014).

1.2.6 Permeabilidad: Esta propiedad se define como la propiedad de un material poroso, mide con qué facilidad los fluidos atraviesan las rocas, esta se produce bajo un gradiente de potencia y puede ser medida de acuerdo con el flujo que pasa sobre ésta.

$$K = \frac{u * Q * L}{\Delta P * A_{prob}} * 100$$

Dónde:

K = Permeabilidad.

u = Viscosidad del fluido.

Q = Caudal del fluido.

L = Longitud del material.

Aprob = Sección transversal del material.

ΔP = Variación de la presión (Benavente, 2010).

Tabla 1.4: Tipos de rocas con su coeficiente de permeabilidad.

Tipo de Roca	Coficiente de Permeabilidad (cm/s)
Ígneas	
Basalto	10^{-4} a 10^{-5}
Diabasa	10^{-5} a 10^{-7}
Gabro	10^{-4} a 10^{-5}
Granito	10^{-3} a 10^{-5}
Metamórficas	
Cuarcita	10^{-5} a 10^{-7}
Esquisto	10^{-4}
Gneis	10^{-3} a 10^{-4}
Mármol	10^{-4} a 10^{-5}
Pizarra	10^{-4} a 10^{-7}
Sedimentarias	
Arenisca	10^{-2} a 10^{-4}
Caliza	10^{-2} a 10^{-4}
Dolomita	$4,6 \times 10^{-9}$ a $1,2 \times 10^{-8}$
Lutita	10^{-3} a 10^{-4}

Fuente: (Galván & Restrepo, 2016).

Cabe recalcar que también existen propiedades mecánicas de las rocas, las cuales son de gran interés tales como la resistencia a la compresión simple y deformabilidad.

1.3 Resistencia a la Compresión Simple

Se considera de gran importancia la resistencia a la compresión simple, conocida también como resistencia a la compresión uniaxial; esta permite mediante la determinación del esfuerzo caracterizar y clasificar la roca matriz. La obtención de la resistencia a la compresión simple se puede dar mediante:

En campo

- Pruebas
- Ensayos sencillos

En Laboratorio

- Ensayos mecánicos

El ensayo de compresión uniaxial es el más utilizado para determinar la resistencia mecánica de las rocas, y se basa en diferentes normas como la ASTM (American Society of Testing Materials), así mismo este ensayo permite estimar aparte de la resistencia a la compresión simple, las constantes elásticas como son el Módulo de Young y el Módulo de Poisson (Benavente, 2010).

Tabla 1.5: Clasificación en base a la resistencia de la roca.

Resistencia a compresión simple (MPa)	Descripción
1 – 5	Muy blanda
5 – 25	Blanda
25 – 50	Moderadamente dura
50 – 100	Dura
100 – 250	Muy dura
> 250	Extremadamente dura

Fuente: (Benavente, 2010).

Existen dos situaciones en las que se produce la ruptura de la roca:

1. **Fragmentación:** Se origina cuando la fisura es homogénea y no posee interacción entre las fisuras.

2. **Fractura:** Se genera por la concentración local de fisuras microscópicas que se mezclan elaborando una fisura macroscópica durante la aplicación de la carga respectiva (Benavente, 2010).

La resistencia a compresión simple se define de acuerdo al ensayo de resistencia a compresión uniaxial, este ensayo consiste en aplicar una fuerza axial F a una probeta prediseñada con anterioridad la cual posee una forma cilíndrica o paralelepípeda de área A , con la fuerza ejercida esta probeta deberá llegar a su ruptura; empleando mediante en este caso la máquina a compresión simple (Galván & Restrepo, 2016).

La resistencia antes mencionada viene dada por la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A}$$

De acuerdo con la Norma UNE 1990, se ha determinado que los requisitos para las probetas son:

Forma cilíndrica con dimensiones:

- Relación altura diámetro de 2.5 a 3.0.
- Diámetro, mayor de 10 veces el tamaño máximo de grano de la roca.
- Diámetro no inferior a 50mm. (Galván & Restrepo, 2016).

Las probetas se confeccionarán con las siguientes consideraciones:

- No debe contener irregularidades y su superficie lateral debe ser lisa.
- El eje de la probeta deberá formar un ángulo recto y las bases de la probeta debe ser planas.
- No se necesita ningún material para recubrimiento de estos y si en el caso se necesitará se debe mencionar con anterioridad. (Galván & Restrepo, 2016).

1.3.1 Deformación

Cuando se realiza en el ensayo a la compresión simple, se obtiene para cada carga P una deformación Δl de acuerdo a la altura H de la probeta o muestra, por lo tanto se obtienen diferentes curvas que relacionan tensiones.

De acuerdo con Mingarro y basado en la ley de Hooke el módulo de deformación viene expresado con la siguiente formula:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Donde:

σ = Esfuerzo

ϵ = Deformación

Cuando se habla del módulo de deformación se tiene que saber que se refiere a la pendiente de la tangente en el punto correspondiente al 50 % de la carga de ruptura (Mingarro, 1996).

1.3.2 Elasticidad

La elasticidad de las rocas es una propiedad de un material ideal, que prácticamente depende de tres factores que son: homogeneidad, isotropía y continuidad.

La isotropía es una medida de las propiedades direccionales de un material como por ejemplo cuando un cuerpo granular posee la misma orientación de granos y un plano de dimensiones equivalente lo intercepta en cualquier dirección por lo que corta al mismo en un número igual o equivalente de granos (Canoba & Fraga, 2004).

La homogeneidad está dada por los constituyentes de la roca que están distribuidos de tal manera que un pequeño fragmento de cualquier parte, tenga las propiedades que posee el todo (Canoba & Fraga, 2004).

La continuidad podrá ser tomada para dar una consideración a la cantidad de diaclasas y fallas en un cuerpo rocoso. Se puede afectar las tensiones en la roca de acuerdo con grado de continuidad que esta posee (Canoba & Fraga, 2004).

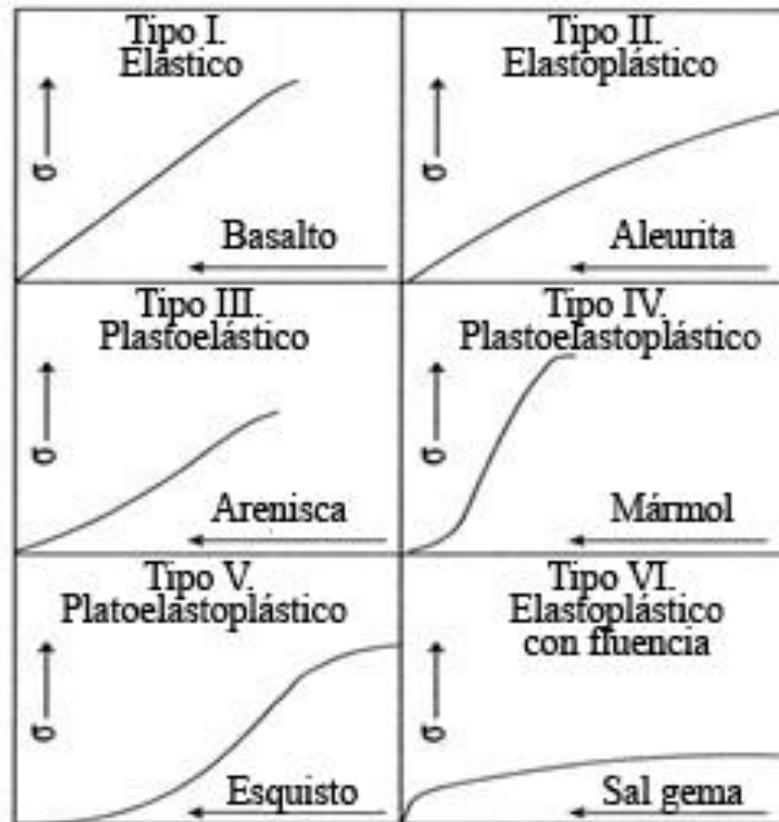


Figura 1.2: Ejemplos de curvas tensión- deformación de algunas rocas a compresión cargadas hasta la ruptura.

Fuente: (Mingarro, 1996).

El comportamiento de las rocas depende de los tres factores: homogeneidad, isotropía y continuidad mismas que se mencionaron anteriormente. A partir de estos factores se puede realizar una estimación de la probable elasticidad de una roca. Ahora bien, en la figura 1.2 se muestra el comportamiento elástico de distintos tipos de rocas de acuerdo con la curva tensión- deformación (Canoba & Fraga, 2004).

- El tipo I Elástico para rocas como el basalto, muestra una curva cuasi-elástica,
- El tipo II Elastoplástico para rocas como la aleurita, muestra una curva semi- elástica.
- El tipo III Plastoelástico para rocas como la arenisca, muestra una curva semi- elástica.
- El tipo IV Plastoelastoplástico para rocas como el mármol, muestra una curva no elástica

- El tipo V Plastoelastoplástico para el esquisto, muestra una curva no elástica.
- El tipo VI Elastoplástico con fluencia para la sal en gema, muestra una curva no elástica.

Tabla 1.6: Constantes de las rocas con carga cero.

Roca	E (*10⁵) (Kg/cm²)	E (GPa)
Granito	2 - 6	20 - 59
Microgranito	3 - 8	29 - 78
Sienita	6 - 8	59 - 78
Diorita	7 - 10	69 - 98
Dolerita	8 - 11	78 - 108
Gabro	7 - 11	69 - 108
Basalto	6 - 10	59 - 98
Arenisca	0.5 - 8	5 - 78
Lutita	1 - 3.5	10 - 34
Arcilla consolidada	2 - 5	20 - 49
Caliza	1 - 8	10 - 78
Dolomita	4 - 8.4	39 - 82
Carbón	1 - 2	10 - 20

Fuente: (Canoba & Fraga, 2004).

1.4 Resistencia de las Rocas

Es necesario conocer una definición de resistencia de un material, siendo esta la carga bajo la cual se rompe y desintegra. Otra definición de resistencia es aquella que aumentando la carga y observando el punto en el que aparece la primera grieta se puede determinar la resistencia a la rotura y a la tracción, pero este criterio no se puede aplicar a un trozo de roca que está rodeado de otros trozos de roca en la corteza terrestre. Por lo tanto, la resistencia en los macizos rocosos es el esfuerzo que la roca puede soportar para ciertas condiciones de deformación. Así mismo, la resistencia determina la

competencia de la roca matriz para mantener unidos sus componentes la cual depende principalmente de la composición mineral y del grado de alteración (Rodríguez, 2012). En minería especialmente está asociada a la mecánica de rocas. Sin embargo, uno de los problemas más grandes e importantes es determinar las propiedades mecánicas de las rocas cuando están sometidas a un esfuerzo compresivo, por lo que se consigue mediante ensayos como los resaltados anteriormente y se producen curvas esfuerzo-deformación como las presentadas en la siguiente figura. El mejor criterio de resistencia resulta de la curva esfuerzo- deformación. (Véase Figura 1.3)

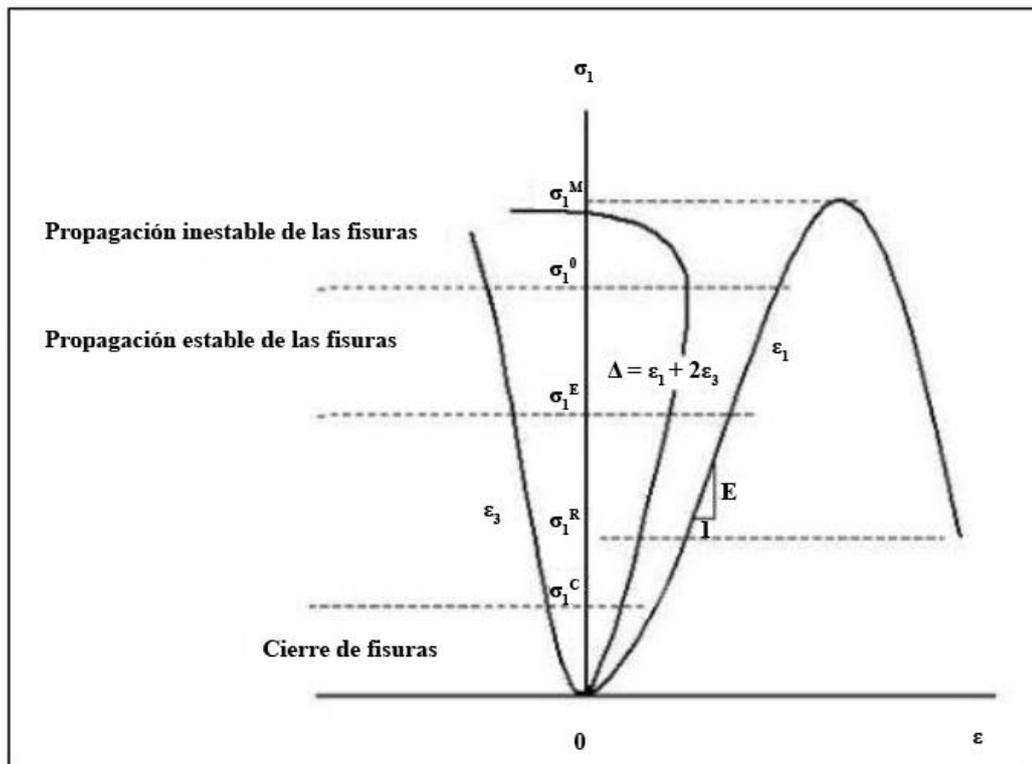


Figura 1.3: Curva esfuerzo - deformación en rocas.
Fuente: (Marín, 2017).

Cuando se aplica una fuerza externa a la roca, ciertas fisuras y poros comienzan a cerrarse, lo cual produce una deformación inelástica y esta curva presenta una concavidad hacia arriba (Marín, 2017).

Así mismo, hay que considerar que en condiciones naturales la resistencia de la roca depende de las propiedades intrínsecas de esta, de la cohesión, ángulo de fricción, y de algunos factores externos entre los que se destaca la magnitud de los esfuerzos, ciclos de carga y descarga o presencia de agua. Ahora bien, la resistencia compresiva

es la característica que se mide con más frecuencia en la matriz rocosa, debido a la facilidad de obtención de testigos y de ensayos de laboratorio. Por el contrario, en los macizos rocosos no se determina de forma directa, por lo que se realiza por medio de criterios empíricos; los parámetros a considerarse son:

- La determinación es compleja debido a aspectos de heterogeneidad y anisotropía en los macizos rocosos.
- En macizos con matriz rocosa dura y resistente, las discontinuidades controlan la resistencia. Sin embargo, en macizos blandos la roca matriz es más importante en la resistencia y en general, la resistencia del macizo siempre presenta valores inferiores a los de la roca matriz.
- Se debe establecer los elementos que van a controlar la resistencia del macizo los cuales podrían ser: familia de discontinuidades, caracterización de campo y valoración de su influencia.
- Las clasificaciones geomecánicas informan de la resistencia global y calidad del macizo, en ellas se utilizan valores de resistencia a la compresión simple, aunque no son los mejores (Rodríguez, 2012).

1.5 Ensayo de carga puntual (Ensayo de Franklin)

De acuerdo con la norma ASTM D5731 actualizada en el año 2016, la cual trata del Método de prueba estándar para la determinación del índice de resistencia a la carga puntual de las rocas y su aplicación en las clasificaciones de resistencia de las rocas; para lo cual se han considerado los siguientes aspectos que se detallaran a continuación:

1.5.1 Alcance de la máquina de Franklin

- El método de ensayo cubre los lineamientos, requisitos y procedimientos para la determinación del índice de punto de carga en la roca. Es decir, una prueba de índice está destinado a ser utilizado para clasificar la resistencia de la roca.

- Las muestras en forma de bloques de roca pueden tener un diámetro de prueba desde 30 a 85 mm y se prueban mediante este método de ensayo.
- Además, el método de prueba se puede realizar en el campo o en el laboratorio. Así mismo, esta prueba se suele utilizar en el campo debido a que la máquina es portátil.
- Este método de prueba se aplica a rocas de resistencia media (resistencia a la compresión de más de 15 MPa (2200 psi).
- Los detalles de las pruebas de carga puntual son necesario desarrollarlos antes, incluso antes del muestreo. Tales detalles dependen del uso previsto de los datos, así como las posibles limitaciones presupuestarias y otros posibles factores, que están fuera del alcance de este método de ensayo.
- Todos los valores observados y calculados deberán ajustarse a las directrices para los dígitos significativos y redondeo de datos.
- Los valores indicados en las unidades SI deben ser considerados como los estándares para esta prueba.

1.5.2 Resumen del método

- Esta prueba de índice se realiza sometiendo una muestra de roca a una carga, cada vez mayor hasta que el fallo se produce por la fractura de la muestra. Así mismo, la carga concentrada se aplica de manera uniaxial, en donde la rotura de las muestras se utiliza para determinar el índice de fuerza carga puntual.
- También el índice de fuerza carga puntual se utiliza para clasificar las rocas. Es un método común que permite conocer la estimación de la resistencia a la compresión uniaxial (ASTM D5731, 2016).

1.5.3 Importancia y uso

- El ensayo de compresión uniaxial permite determinar la resistencia a la compresión de muestras de roca; pero ésta prueba requiere de un determinado tiempo para la preparación. Razón por la cual cuando se requiere de un número extenso de pruebas y/o información para la recolección y reconocimiento de

datos preliminares o pruebas alternativas, la prueba de Carga Puntual se utiliza para reducir el tiempo y el costo de las pruebas de resistencia a la compresión, cuando se utiliza en el campo. De igual manera los datos obtenidos sirven para tomar decisiones oportunas y más detalladas durante las fases de exploración, la selección más eficiente y costo de muestras para las pruebas más precisas y costosas de laboratorio.

- También se utiliza como una prueba de índice para la clasificación de resistencia de los materiales de roca. No obstante, los resultados de las pruebas realizadas no se deben utilizar para el diseño o fines analíticos.
- Este método de ensayo se realiza para determinar el índice de fuerza carga puntual de las muestras de roca y, si es necesario, el índice de anisotropía fortaleza carga puntual.
- Finalmente, las muestras de rocas para realizar la prueba pueden ser diametrales y axiales; en forma de bloques o bultos irregulares que se prueban mediante la aplicación de carga a través de un par truncado de puntas cónicas. Cabe recalcar que las muestras deben ser preparadas y por lo tanto se pueden probar poco después de ser obtenidas. Sin embargo, los resultados pueden ser influenciados por la forma de la muestra; que son tratadas desde el momento que se obtienen hasta el momento que se ponen a prueba (ASTM D5731, 2016).

1.5.4 Aparato

- El probador de carga puntual se compone de un sistema de carga típicamente compuesto por un bastidor de carga, un sistema de medición para indicar la carga P , requerida para romper la muestra. Se debe tener en cuenta que el equipo debe ser resistente a golpes y vibraciones de modo que la precisión en las pruebas no se vea afectada al realizar numerosas pruebas repetidas. Así mismo, se deberá seguir instrucciones de operación, mantenimiento o calibración que serán proporcionadas para la máquina.
- El sistema de carga tiene un bastidor de carga con dos puntas cónicas que permite realizar pruebas de muestras de roca en el rango de tamaño requerido.

Normalmente, este rango es de entre 30 a 85 mm, o el tamaño máximo de apertura del bastidor de carga.

- Considerando que la capacidad de carga deberá ser suficiente para romper las más grandes y más fuertes muestras. También la resistencia de carga punto de roca se encuentra en un orden de magnitud menor que la resistencia a la compresión de la roca.
- El marco de carga debe estar diseñado y construido de manera que no se distorsione de forma permanente durante las aplicaciones repetidas de la carga de prueba máxima. La rigidez del sistema de carga es esencial para evitar el deslizamiento cuando las muestras de geometría irregular se ponen a prueba.
- Las puntas cónicas tienen un ángulo de 60° y el radio de las puntas es de 5 mm. Las puntas deberán ser de material duro tal como carburo de tungsteno o de acero endurecido; con el objeto de que permanezcan en buen estado durante la prueba y si debido al tiempo se desgastan estas podrán ser remplazadas.
- Tiene un sistema de medición de carga, por ejemplo, un medidor de presión hidráulica, que indicará carga de rotura P , requerida para romper la muestra.
- Las mediciones de la carga de rotura P , serán precisas en el sistema de medición de carga a gran escala, con independencia del tamaño y la fuerza de la muestra que se prueba.
- Por lo tanto, la fractura es a menudo repentina y se indicará en el medidor mecánico o electrónico. Para observar la carga de rotura se debe estar atento después de cada prueba.
- La máquina de prueba se plantea que tenga las puntas y el medidor independientes con el objeto de que sean intercambiables cuando estas partes sufran algún daño o desgaste. El sistema de medición puede utilizar un medidor mecánico o electrónico, para que la carga medida tenga la precisión de lectura deseada (ASTM D5731, 2016).

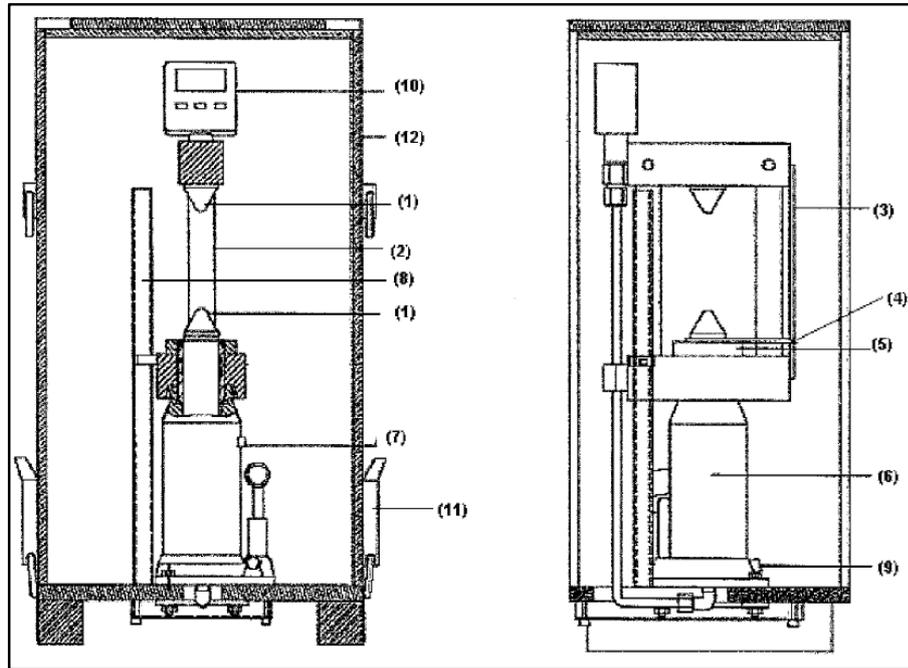


Figura 1.4: Ilustración sobre componentes de la máquina de Franklin.
Fuente: (ASTM D5731, 2016).

Los números referidos anteriormente son:

- (1) Dos puntas cónicas.
- (2) Dos columnas marco de la cruceta fija.
- (3) Escala.
- (4) Puntero escala.
- (5) Un perno.
- (6) El cuerpo de la bomba hidráulica.
- (7) Tapón de llenado de aceite.
- (8) Mango de la bomba
- (9) Válvula de liberación de presión
- (10) Caso trabado por la cubierta superior.
- (11) Lectura de la presión digital.
- (12) Cubierta superior probador de carga puntual.

1.5.5 Descripción de diferentes tipos de procesos para las muestras

- Las muestras de roca se preparan en base al tipo de roca que se plantea utilizar, dirección de prueba; también de la anisotropía de la roca, y la fuerza con que se estima romper.
- Para ejecutar las pruebas se debe hacer por lo menos con veinte ejemplares.
- Los tamaños de las muestras pueden ser más grandes, dependiendo si la roca es anisotrópica o heterogénea.
- Así en rocas anisotrópicas los mejores resultados para muestras de este tipo es cuando el eje central es perpendicular al plano de debilidad.

1.5.6 Preparación para las muestras

- La prueba de carga puntual es una prueba externa de la muestra en la que la dimensión no podrá ser inferior de 30 mm y no superior de 85 mm. Por lo tanto, se escogió que las probetas de ensayo tendrán una dimensión aproximadamente de 50 mm.
- En cuanto al tamaño y forma de las probetas pueden ser cilíndricas, cúbicas, paralelepípedos o muestras irregulares; y estas deben cumplir con las recomendaciones en cuanto a las dimensiones. Las superficies de las muestras deberán estar libres de irregularidades que pueden generar concentraciones de esfuerzos. No se requirió de ningún tratamiento especial de las muestras como el secado.
- El contenido de agua de las muestras puede afectar significativamente el valor de la resistencia de la roca. Por lo tanto, el ensayo debe especificar el contenido de agua en el programa de pruebas de carga puntual.

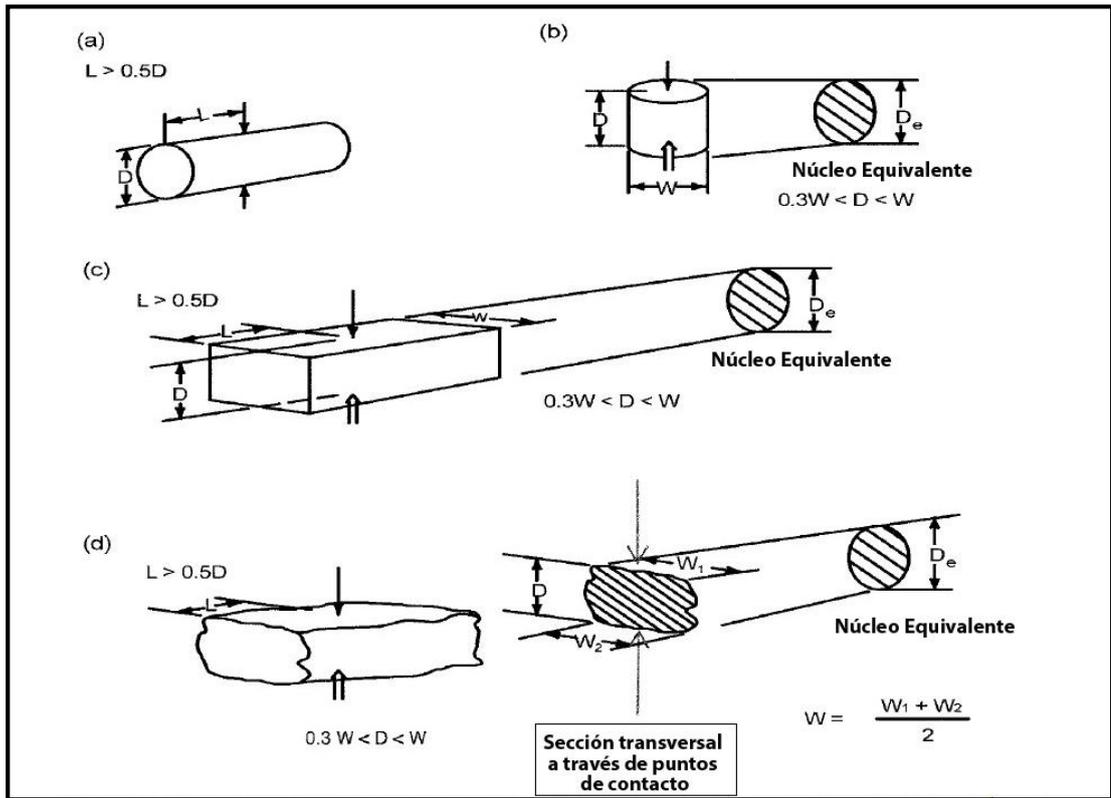


Figura 1.5: Configuraciones de carga y muestras para diferentes tipos de rocas.
Fuente: (ASTM D5731, 2016).

Como se puede observar en la figura 1.5, el “ D_e ” es el diámetro equivalente de las probetas, este representa la dimensión entre las dos superficies de las probetas rectangulares en las cuales se ejerce la carga puntual.

La dimensión “ D ” es la distancia que existirá entre las puntas cónicas, y que llegaría a ser el alto de la probeta utilizada. Como “ W ” que simboliza el ancho promedio de la probeta, y por último la letra “ L ” en la figura, representa la distancia mínima a la que se debe aplicar la Carga Puntual desde el inicio o borde de una cara.

Los puntos de aplicación de la carga deben estar en un rango de $0.7 D$ a $0.5 D$ de cada uno de los bordes de la muestra o roca. Siendo $0,7 D$ cuando se consideran probetas de forma de paralelepípedos y $0.5 D$ en probetas cúbicas.

Tabla 1.7: Requisitos geométricos de las muestras para el ensayo.

Tipo de ensayo	Distancia entre puntas cónicas D	Semilongitud de la probeta L	Ancho de la probeta		
			Menor W1	Mayor W2	Medio W
Cilíndrico Diametral	D	$L > 0.5 * D$	-	-	-
Cilíndrico Axial	$0.3 * W < D < W$	-	-	-	W
Bloque Regular	$0.3 * W < D < W$	$L > 0.5 * D$	-	-	W
Bloque Irregular	$0.3 * W < D < W$	$L > 0.5 * D$	W1	W2	$\frac{1}{2}(W1+W2)$

Fuente: (Galván, Seron, & Preciado, 2010).

1.5.7 Tipo de Fallas

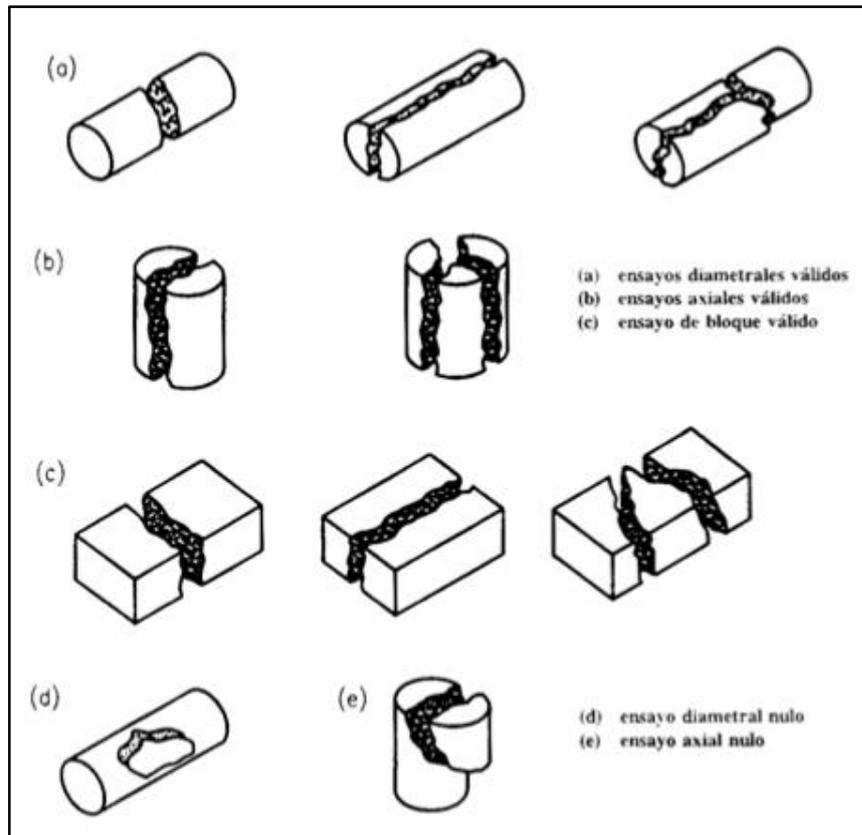


Figura 1.6: Formas de rotura para ensayos válidos y nulos.
 Fuente: (Galván, Seron, & Preciado, 2010).

- a) Tipos aceptados de rotura en probetas cilíndricas.
- b) Tipos de roturas aceptadas en probetas cilíndricas con la carga ejercida en las superficies inferiores y superiores.
- c) Ejemplos de roturas aprobadas en probetas rectangulares.
- d) Ensayos nulos en probetas cilíndricas por el despostillamiento de superficies, ya que las cargas puntuales no estuvieron en zonas concéntricas.

1.5.8 Descripción del Índice de Carga Puntual

Con el manómetro instalado se puede medir la presión requerida y por medio de esta, intrínsecamente, la fuerza correspondiente que va dirigida hacia el pistón y que es necesaria para romper la muestra. Según Ramírez y Alejano, 2010, el índice de carga puntual se calcula con la siguiente expresión:

$$I_s = \frac{P}{De^2}$$

Dónde:

I_s : Índice de carga puntual (Kg/mm²)

P : Fuerza (Kg).

De : Diámetro equivalente de la probeta (mm).

El diámetro equivalente se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$De^2 = \frac{4}{\pi} * W * D$$

Dónde:

W : Ancho medio de la muestra (mm).

D : Distancia entre las puntas de los conos al realizar la rotura (mm).

Cuando se tienen probetas de diferentes dimensiones de 50 mm es recomendable hacer una corrección, tal corrección permite encontrar el valor de $I_{s(50)}$ para rocas de distinto tamaño y es la siguiente (Ramírez & Alejano, 2010):

$$I_{s(50)} = I_s * \left(\frac{D}{50}\right)^{0.45}$$

En este ensayo la orientación de las probetas de acuerdo con la orientación del grano debe ser tomado en cuenta ya que se necesita que las discontinuidades se encuentren siempre en la misma posición, con respecto al eje que une las dos puntas cónicas de la máquina (Ramírez & Alejano, 2010).

Además, la clasificación de las rocas a la comprensión uniaxial, propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas es la siguiente:

Tabla 1.8: Clasificación de las rocas según su resistencia a la comprensión uniaxial.

Resistencia (MPa)	Clasificación
> 250	Extremadamente alta
100 - 250	Muy alta
50 - 100	Alta
25 - 50	Media
5 - 25	Baja
1 - 5	Muy baja
0.25 - 1	Extremadamente baja

Fuente: (Ramírez & Alejano, 2010).

1.6 Partes constitutivas de la máquina de Franklin

1.6.1 Puntas cónicas

De acuerdo con la norma ASTM D 5731 se debe tener cuidado que los ejes de las puntas tengan un desalineamiento menor de 0.2 mm. Es decir que los ejes de las puntas permanezcan alineados.

Las puntas cónicas deben tener asientos rígidos de manera que no existan problemas de deslizamientos cuando las muestras de geometría irregular sean ensayadas. Una de ellas está fija a la viga superior y la otra se desplaza solidaria al pistón hidráulico. Las puntas son conos esféricamente truncados. Las puntas tienen un ángulo de 60° y el radio es de 5 mm (Pompa Ramos & Salazar Boyd, 2014).

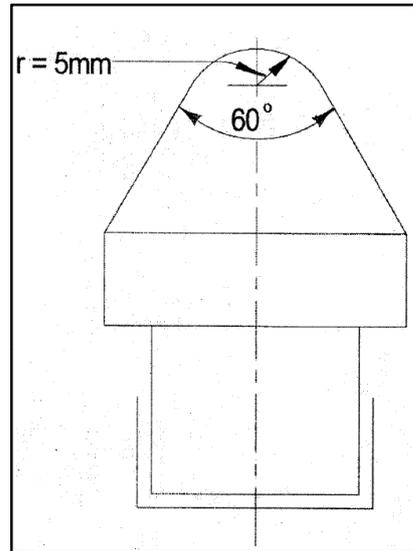


Figura 1.7: Punta cónica de la máquina de Franklin.
Fuente: Norma ASTM D5731.

1.6.2 Pistón hidráulico y gata hidráulica

El pistón hidráulico es accionado mediante una gata hidráulica manual, la cual hace elevar al pistón, el cual posee una de las puntas cónicas y se aplica la carga de compresión sobre la muestra que previamente fue colocada en el lugar (Pompa Ramos & Salazar Boyd, 2014).

La gata hidráulica es la encargada de generar la acción o la fuerza necesaria para que el pistón se levante y ejerza la fuerza de compresión mediante una de las puntas cónicas (Tecnología, 2018).

Estas partes constituyen un solo conjunto, pero en la construcción de la máquina que se especificará con más detalle en el siguiente capítulo, se ha decidido que estas dos partes sean independientes.

1.6.3 Lector de carga

Consiste en un manómetro calibrado para medir la resistencia de las rocas. Un manómetro es un aparato que sirve para medir la presión. Existen, básicamente, dos tipos: los de líquidos y los de gases (EcuRed, 2013).

CAPÍTULO II

CONSTRUCCIÓN DE PRENSA E INSTRUMENTACIÓN

De acuerdo con la información recolectada en el capítulo I y en base a la norma ASTM D5731 que describe la correcta funcionalidad del equipo, se ha escogido construir la Máquina de Franklin, cuyo posterior uso se dará en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería en Minas, la cual se espera que sea de gran utilidad y provecho para la ejecución de pruebas sobre rocas.

Para la construcción del equipo se establecieron los siguientes aspectos que debe cumplir la máquina:

- La construcción de la máquina se realizó de acuerdo con un presupuesto establecido.
- Sencillez y versatilidad en la construcción del equipo.
- Fácil obtención y fabricación de sus partes.
- Resultados de acuerdo con normas internacionales establecidas.
- Que el espacio para la sujeción de las probetas sea suficiente y permita una adecuada colocación de las mismas.
- Ágil lectura de la carga o presión.

2.1 Máquina de Franklin

La máquina de Franklin es una máquina de tipo portátil que está constituida por una prensa hidráulica provista de “conos de carga”, entre sus vértices se colocan las muestras de roca, estas probetas se someten a cargas compresivas, en el que se mide el índice carga puntual o índice de Franklin. El índice de Franklin es muy importante ya que su resultado sirve para la caracterización de la resistencia mecánica y el comportamiento más probable de la roca, estos resultados pueden ser correlacionados experimentalmente a la resistencia compresiva uniaxial (Torres, 2004).

En lo que respecta a la máquina, el aparato está formado por un bastidor con un pistón hidráulico de cuatro toneladas de capacidad accionado mediante una gata horizontal.

El bastidor puede ajustarse para ejecutar ensayos con muestras de 30 mm hasta 85 mm. La carga de compresión se mide mediante un manómetro convencional resistente a golpes, en el cual se visualiza la presión con la que se rompen las muestras. La máquina es portátil y sus piezas son desarmables.

2.2 Especificaciones y límites de carga

La estructura consta de dos parantes que tienen una altura de 600 mm, dos vigas horizontales que tienen un ancho de 250 mm incluidos los perfiles de apoyo. Cabe recalcar, que para el armado de la estructura se realizó en función al pistón hidráulico y que esta debía ser lo suficientemente robusta, de material compacto para evitar deformaciones en la estructura y errores en el momento que se ejecuten las pruebas. El pistón tiene una altura de 380 mm, y dos puntas cónicas con un ángulo de 60 grados.

La capacidad máxima de presión que puede soportar el manómetro es de 700 bar, al ser de tipo convencional no dispone de una pluma testigo; razón por lo que para tomar el dato exacto de presión el momento de la fractura de la muestra es necesario estar atento al manómetro, ya que una vez que se produce la rotura la aguja regresa de inmediato a cero.

2.3 Descripción de la máquina de Franklin

La máquina de Franklin se compone de las siguientes partes:

- Gata hidráulica horizontal.
- Base para el pistón vertical.
- Estructura o marco.
- Puntas cónicas.
- Pistón hidráulico.
- Guía de pistón.
- Manómetro.
- Acoples para el manómetro y válvula.
- Pantallas de seguridad.

2.3.1 Gata hidráulica horizontal

La gata hidráulica horizontal funciona de acuerdo con el principio de Pascal, el cual establece que la presión ejercida en un contenedor cerrado es igual en todos sus puntos. Esta gata utiliza un fluido hidráulico, en la mayoría de los casos es aceite y es el encargado de transmitir la presión ejercida sobre un pistón pequeño a otro pistón de mayor tamaño y multiplicando de esta manera la fuerza.

De acuerdo con las consultas bibliográficas y en base a la investigación de mercado que se realizó para la obtención de la gata hidráulica, se observó que la gata hidráulica horizontal presentaba mayores ventajas para esta aplicación, las cuales se detallan con mayor precisión en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Comparación entre la gata hidráulica horizontal y la gata hidráulica vertical.

Características	Gata hidráulica horizontal	Gata hidráulica vertical
Espacio por su recorrido de palanca	Máximo	Mínimo
Espacio para encaje y manipuleo de probetas	Mayor	Restringido
Área de trabajo	Máximo	Mínimo
Espacio para cambio de componentes y lubricación	Fácil	Complejo
Adaptación de gatas hidráulicas	Accesible	Difícil
Recorrido del pistón	Mayor desplazamiento	Menor desplazamiento

Por lo tanto, se decidió adquirir la gata horizontal, para acoplarla a la estructura. Entre estos aspectos positivos se destaca la facilidad en la manipulación tanto de la máquina como al momento de realizar las pruebas, estética, funcionalidad y precisión que presenta está.

La gata horizontal tiene una capacidad de 4 toneladas, un largo de 360 mm y un ancho de 60 mm.



Figura 2.1: Gata hidráulica horizontal.

2.3.2 Base para el pistón vertical

En la fabricación de la máquina de Franklin se parte inicialmente con el soporte para el pistón vertical, se utiliza para evitar y mantener al instrumento sin movimiento. Este tipo de base es resistente, robusta, impidiendo la deformación de la estructura, el material empleado para su construcción es acero estructural ASTM A 36 unido mediante soldadura.



Figura 2.2: Base para el pistón hidráulico.

2.3.3 Estructura o marco

En lo referente a este punto se ha considerado conveniente realizar los recálculos para validar tanto la construcción de la estructura como la correcta funcionalidad del equipo.

2.3.3.1 Dimensiones del perfil C

Se debe considerar que los parantes laterales al reaccionar a las cargas de compresión ejercidas sobre la probeta están sometidos al esfuerzo de tensión. Razón por la que después de datos preliminares y en función de las piezas que contendrá la máquina, se ha elegido el perfil C de 100x50x6 mm (Pytel & Singer, 1987).

Una vez definido el perfil se procede a calcular los parámetros geométricos, tales como sección, coordenadas del centroide, momento de inercia; parámetros que servirán posteriormente para la determinación de los diferentes esfuerzos sobre los elementos constitutivos de la máquina:

Tabla 2.2: Dimensiones del perfil C.

Nombre perfil	Ancho(mm)	Alto(mm)	Espesor(mm)
Perfil C	100	50	6

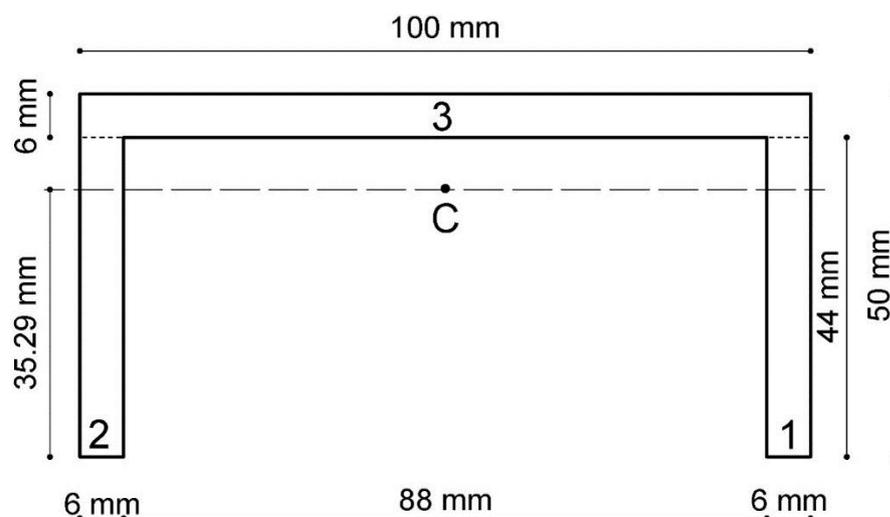


Figura 2.3: Dimensiones del perfil C.

Tabla 2.3: Cálculo de Áreas del perfil C.

Áreas	Dimensiones de los rectángulos	Total
A ₁	44 mm * 6 mm	264 mm ²
A ₂	44 mm * 6 mm	264 mm ²
A ₃	100 mm * 6 mm	600 mm ²
Área Total		1128 mm ²

Cálculo de las coordenadas del centroide

Al realizar este cálculo se toma como referencia el Teorema de Steiner o también llamado Teorema de los ejes paralelos, en el mismo se calcula el centroide con respecto a los ejes “x” y “y”, este cálculo es una propiedad geométrica de la sección transversal de los elementos estructurales.

$$\bullet \quad A_{y1} = A_{y2}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum(A_{y1}) + \sum A_{y3}}{\sum A}$$

$$\bar{y} = \frac{(6 \text{ mm} \times 44 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}) \times 2 + (6 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 47 \text{ mm})}{(2(6 \text{ mm} \times 44 \text{ mm})) + (6 \text{ mm} \times 100 \text{ mm})}$$

$$\bar{y} = 35.29 \text{ mm}$$

$$I_{X_c} = \left(\frac{b h^3}{12} + A d^2 \right) + 2 \left(\frac{b h^3}{12} + A d^2 \right)$$

$$I_{X_c} = \left(\frac{100 \text{ mm} \times (6 \text{ mm})^3}{12} + 100 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times (11.71 \text{ mm})^2 \right) + 2 \left(\frac{6 \text{ mm} \times (44 \text{ mm})^3}{12} + 6 \text{ mm} \times 44 \text{ mm} \times (13.29 \text{ mm})^2 \right)$$

$$I_{X_c} = 84074.46 \text{ mm}^4 + 178441.52 \text{ mm}^4$$

$$I_{X_c} = 262515.98 \text{ mm}^4$$

2.3.3.2 Cálculo del esfuerzo de trabajo de los parantes laterales

Con el objeto de determinar el máximo esfuerzo al cual van a estar sometidos los parantes laterales; se consideró la máxima carga que genera el pistón hidráulico con la gata horizontal al momento de accionar la fuerza necesaria para romper la probeta, la carga que soportan es de 4000 Kgf, pero como son dos parantes los que conforman la estructura dicha carga, se divide para dos y corresponde a 2000 Kgf en cada parante, que corresponde a 19600 N.

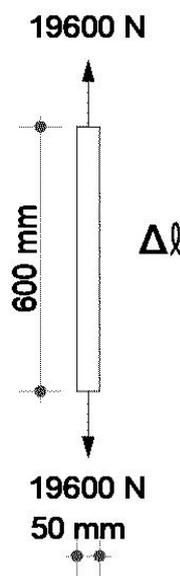


Figura 2.4: Diagrama de cuerpo libre.

Datos:

- $P = 19600 \text{ N}$
- $A = 1128 \text{ mm}^2$

Esfuerzo de trabajo

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

$$\sigma = \frac{19600 \text{ N}}{1128 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 17.37 \text{ MPa}$$

Cálculo del factor de seguridad de los parantes laterales

Dado que el acero estructural empleado en la construcción de la máquina de Franklin es el ASTM A 36, tiene una resistencia a la fluencia de 2500 Kg/mm², correspondiente a 250 MPa como se indica en el Anexo 2.

$$F_s = \frac{\text{Resistencia de Fluencia}}{\text{Esfuerzo de Trabajo}}$$

$$F_s = \frac{250 \text{ MPa}}{17.37 \text{ MPa}}$$

$$F_s = 14.39$$

El factor de seguridad es de 14.39 lo que permite determinar que los parantes laterales de la estructura son lo suficientemente robustos, demostrando con ello que no existirán mayores deformaciones que afecten a la estructura, logrando que los esfuerzos sean transmitidos principalmente a la probeta.

Cálculo de la variación de la longitud del parante vertical

El material empleado en la estructura es acero ASSAB 705, el cual es bonificado al cromo níquel. Por lo tanto, se obtiene un acero muy puro el que se puede utilizar en piezas que están sometidas a grandes esfuerzos y desgaste, como se indica en el anexo 1 se consideró un módulo de elasticidad de 200 GPa, de acuerdo con la Ley de Hooke la variación de longitud se determinó en 0.052 mm.

$$\Delta l = \frac{Pl}{EA}$$

$$\Delta l = \frac{(19600 \text{ N}) \times 600 \text{ mm}}{200 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times 1128 \text{ mm}^2}$$

$$\Delta l = 0.052 \text{ mm}$$

Al observar la variación de longitud de los parantes laterales resulta ser mínima, no llega a influir considerablemente en la estructura, y sobre todo las deformaciones se concentrarán en las probetas.

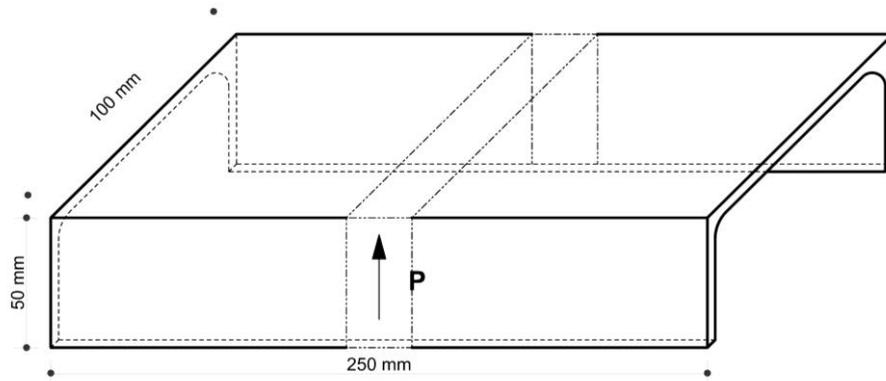


Figura 2.5: Vista de los parantes verticales.

Cálculo del momento flector máximo

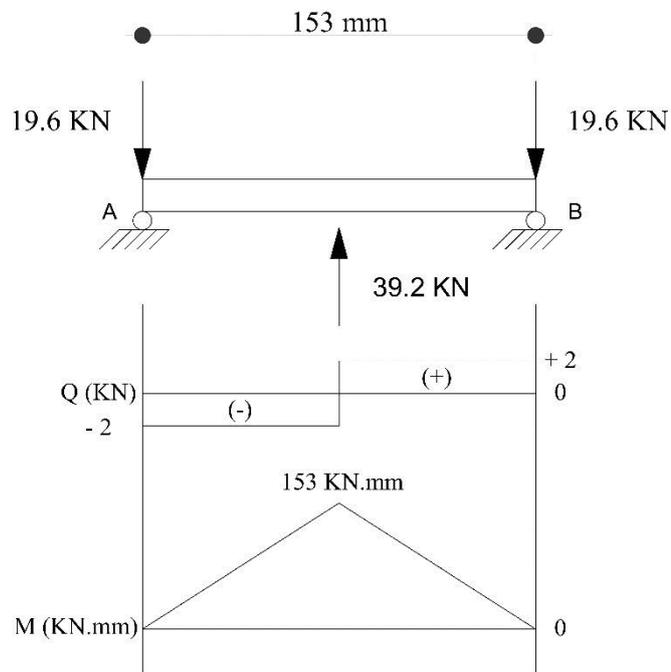


Figura 2.6: Diagrama del Momento Flector.

Datos:

- l = Longitud interior entre parantes verticales = 153 mm

$$M_{f_{\max}} = \frac{Pl}{4}$$

$$M_{f_{\max}} = \frac{(19600 \text{ N}) \times 153 \text{ mm}}{4}$$

$$M_{f_{\max}} = 749700 \text{ Nmm}$$

Cálculo del Esfuerzo de Trabajo

$$\sigma = \frac{M_{f_{max}} \times c}{IX_c}$$

$$\sigma = \frac{749700 \text{ Nmm} \times 35.29 \text{ mm}}{262515.98 \text{ mm}^4}$$

$$\sigma = 100.78 \text{ MPa}$$

2.3.3.3 Cálculo del factor de seguridad de las vigas

Datos:

- Resistencia de Fluencia del Acero ASTM A 36 = 250 MPa

$$F_s = \frac{\text{Resistencia de Fluencia}}{\text{Esfuerzo de Trabajo}}$$

$$F_s = \frac{250 \text{ MPa}}{100.78 \text{ MPa}}$$

$$F_s = 2.48$$

El factor de seguridad de las vigas horizontales calculado es de 2.48, el cual demuestra que estas van a soportar las cargas de acuerdo con la fuerza necesaria que se necesite para fracturar la probeta, cabe recalcar que siendo un valor mayor a 1.5, el cual es un valor base que nos proporciona seguridad, soporte y que no existirá una deformación que afecte en mayor proporción a la estructura.

Deformación de la viga

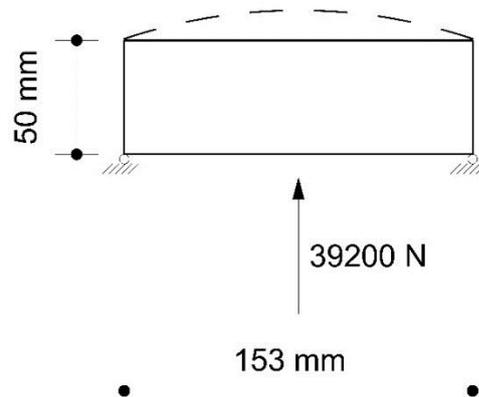


Figura 2.7: Deformación de la viga.

$$\delta_v = \frac{PL^3}{48EI}$$

$$\delta_v = \frac{(39200 \text{ N}) * (153 \text{ mm})^3}{(48) * (200 * 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}) * (262515.98 \text{ mm}^4)}$$

$$\delta_v = 0.055 \text{ mm}$$

Al calcular la deformación de la viga se observó que va a ser mínima, por lo tanto, la estructura no sufrirá mayores cambios.

2.3.3.4 Cálculo de la verificación de la soldadura

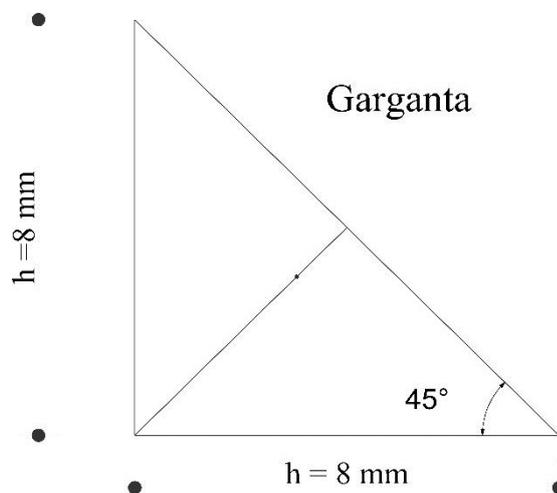


Figura 2.8: Garganta de soldadura de la estructura.

Datos:

- Longitud del perfil soldado = 185 mm

$$\text{garganta} = h \cos^2 \theta$$

$$\text{garganta} = 8 \text{ mm} \cos^2 45^\circ$$

$$\text{garganta} = 4 \text{ mm}$$

Esfuerzo de Trabajo de la soldadura

$$\sigma = \frac{19600 \text{ N}}{185 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}}$$

$$\sigma = 26.5 \text{ MPa}$$

Cálculo del factor de seguridad de la soldadura

En lo referente al factor de seguridad de la soldadura se realizó para determinar qué tan probable era un fallo en la estructura de la máquina. Para verificar el factor de seguridad se realizó mediante la división de la resistencia de fluencia de la soldadura AWS E 7018 de 70000 lb/pulg² lo que corresponde a 440 MPa y el esfuerzo de trabajo, dando un factor de seguridad de 16.60.

$$F_s = \frac{\text{Resistencia de Fluencia}}{\text{Esfuerzo de Trabajo}}$$

$$F_s = \frac{440 \text{ MPa}}{26.5 \text{ MPa}}$$

$$F_s = 16.60$$

2.3.4 Pistón Hidráulico

El pistón hidráulico que genera la carga puntual P debe ser contenida por el marco de acero y le produce estabilidad a todo el equipo. El pistón dispone de un desplazamiento vertical que se acciona por la fuerza de la gata hidráulica.

La prensa posee un pistón el cual tiene un diámetro de 380 mm.



Figura 2.9: Pistón hidráulico.

2.3.5 Puntas cónicas

Las puntas cónicas como se describen en capítulo 1 y regulado por la Norma ASTM D5731, deben tener un ángulo de 60 grados, la punta tiene un radio de 5 mm, el cual está perfectamente diseñado como se observa en el Anexo 3 para desarrollar la prueba de carga puntual que se necesita al momento de la compresión de rocas. La punta se adapta al pistón hidráulico previamente adquirido. El material con el que se construyeron las puntas es Acero ASSAB 705.



Figura 2.10: Punta cónica del equipo.

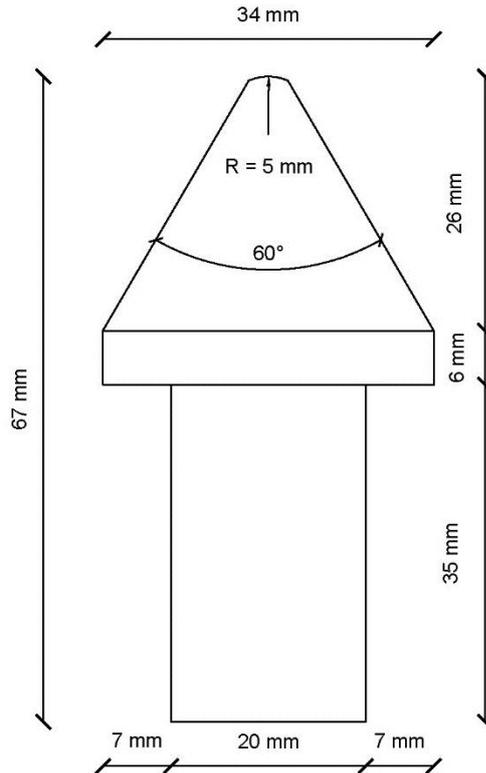


Figura 2.11: Dimensiones de las puntas cónicas construidas.

2.3.6 Soporte superior de acero para puntas cónicas

El soporte utilizado para la punta cónica y que va soldado en la parte superior de la viga superior ayuda como su nombre lo indica a soportar esta punta para que no haya desalineamiento entre puntas, y en consecuencia el fallo de ellas. El material empleado en esta parte es Acero ASSAB 705.



Figura 2.12: Soporte superior para puntas cónicas.

2.3.7 Manómetro

Un manómetro es un instrumento que se utiliza para medir la presión generalmente en circuitos cerrados, este puede medir la presión en diferentes unidades, tales como KPa del sistema internacional (SI), en PSI en el sistema inglés (USCS); pero en el manómetro empleado en la máquina construida la escala está en “bar”. De igual manera hay que tener en cuenta que todos los manómetros se basan en el principio de tener un elemento que se deforma por acción del cambio de presión. Este cambio se manifiesta en una escala o pantalla calibrada directamente en las unidades de presión correspondientes. La aguja mide la presión en el interior del circuito en el momento que se produce la rotura de la muestra (Tecnología , 2018; Pytel & Singer, 1987).



Figura 2.13: Manómetro equipado en la máquina de Franklin.

2.3.8 Acoples para el manómetro y válvula

En la construcción del equipo se emplearon acoples que se visualizan en el Anexo 6, para mantener fijo al manómetro y que sea más fácil la visualización de la presión al momento de realizar las pruebas necesarias. Estos acoples de igual manera se elaboraron de acero ASTM A 36 en forma de una “T”. Dentro de este acople existe una válvula, la cual al momento de realizar las pruebas se abre para dar paso a la presión y luego se cierra al finalizar las pruebas, para impedir el derrame de aceite.

2.3.9 Pantallas de seguridad

Estas pantallas de acrílico se colocaron en la máquina y sirven para dar protección contra los fragmentos de roca que puedan llegar a brincar u ocasionar algún tipo de accidente en el momento de realizar las pruebas.

2.4 Construcción de la máquina y pruebas preliminares

En lo que respecta a la construcción de la máquina se tomaron en cuenta una serie de aspectos, dentro de ellos se consideró la capacidad de la gata hidráulica siendo esta de cuatro toneladas. La estructura debía ser lo suficientemente robusta para que soporte las cargas sin deformarse y presente facilidad, versatilidad en el momento que el equipo requiera desarmarse y transportarse. La construcción de la máquina se realizó pensando en la seguridad al momento de realizar las pruebas.

Se pensó premeditadamente el diseño que tendría la máquina y el material con el cual se construiría cada una de las partes para su posterior armado y ensamblaje.

En primer lugar, la estructura de la máquina consta con dos parantes laterales y dos vigas horizontales, una base reforzada con plancha de 12 mm para darle estabilidad al armazón. Se elaboró con un perfil C de 100x50x6 mm. La estructura tiene un ancho de 250 mm y una altura de 600 mm. Entre otras de las piezas, se consideraron: el manómetro, dos puntas cónicas y acoples para el manómetro, dichas partes fueron elaboradas de acero grado de maquinarias ASSAB 705 y las pantallas de seguridad de acrílico.

Se procedió a cortar las piezas del perfil en C, de acuerdo con las dimensiones antes descritas para su posterior ensamblaje, las piezas se unieron mediante soldadura como se aprecia en el Anexo 5, una vez que se unió toda la estructura de la máquina se acopló la gata hidráulica y se requirió integrar un soporte a la máquina para que no exista un movimiento adicional de la estructura al momento que se haga presión hacia arriba, se colocó un separador en el que la gata hidráulica permaneció completamente rígida. Para ajustar la gata hidráulica se adquirieron una serie de piezas de acople rápido que facilitarían el movimiento.

En lo que respecta a la elaboración de las puntas cónicas, se tenían parámetros ya determinados y de acuerdo con la norma ASTM D5731 que detalla el Ensayo de carga puntual en las rocas, el radio de las puntas cónicas es de 5 mm y el ángulo de 60°. En la parte superior de la estructura se construyó un soporte para una de las puntas cónicas la cual va soldada a la máquina. Como se mencionó anteriormente, el material que se

seleccionó tanto en las puntas como el soporte para estas es acero ASSAB 705, en la tabla 2.4 se detallan con mayor precisión propiedades de este tipo acero.

Tabla 2.4: Propiedades del Acero ASSAB 705.

Propiedades Mecánicas	
Resistencia a la tracción (Rm)	90-110 Kg/mm ²
Alargamiento a 5 min	12%
Esfuerzo de cedencia (Rp0.2)	70 Kg/mm ²
Resistencia al impacto KU	Aprox 30 J (6 Kgm/cm ²)
Dureza con que se entrega	270-330 Brinell

Fuente: Iván Bohman C.A

En las puntas cónicas va un canal para el anillo de seguridad que evita que se caigan las piezas, teniendo en consideración que si desgastan las puntas cónicas debido a su uso, son reemplazables.

En la máquina se colocaron piezas que permitan la protección y seguridad que son las pantallas de acrílico, evitando así que al realizar las pruebas los fragmentos de muestras salten y provoquen accidentes.

De acuerdo con la capacidad de la gata hidráulica se adquirió el manómetro, el mismo tiene en su interior glicerina que sirve para que no se dispare de manera precipitada la aguja y se dañe, en el momento que se rompen las muestras.

Finalmente, en lo que respecta al cuidado de la máquina se debe tomar en cuenta que cuando la gata hidráulica no tenga presión es debido a la falta de aceite, razón por la cual se dispone de una llave de seguridad. Sin embargo, cuando se realizan las pruebas con las muestras la llave tiene que estar abierta de otra manera no circulara presión para la gata hidráulica.



Figura 2.14: Máquina de Franklin construida.

CAPÍTULO III

MUESTREO Y PRUEBAS

Como se ha venido explicando en los capítulos anteriores, se realizó la compresión de rocas en la máquina de Franklin construida, las muestras que se utilizaron para realizar la compresión fueron muestras que estuvieron referenciadas de acuerdo con normas establecidas anteriormente.

Para una mejor corroboración de los datos obtenidos, se utilizó la misma cantidad de muestras hermanas; esto quiere decir que las muestras son de la misma zona de estudio. Estas fueron puestas a compresión también en la máquina a compresión marca Humboldt como en la máquina de Franklin, necesariamente se necesitaban estos datos para realizar una correlación entre estos dos resultados.

Finalmente, se encontró la ecuación necesaria para con ella tener una idea clara de que los resultados obtenidos tanto en la máquina construida como en la máquina a compresión eran similares.

3.1 Descripción de la zona de estudio

3.1.1 Ubicación geográfica

Javier Loyola es una parroquia que pertenece a la provincia del Cañar en el austro Ecuatoriano, esta parroquia se encuentra a 20 minutos de la ciudad de Cuenca.

Partiendo desde la Universidad del Azuay tomamos la vía de primer orden, Autopista Cuenca – Azogues (E-35) hasta el sector de Zumbahuayco, donde llegamos a una vía de segundo orden que conecta dicha carretera con la parroquia Javier Loyola, lugar del cual provienen nuestras muestras.

Color blanco: derrumbe

Los derrumbes están siempre en continuo movimiento, su apariencia característica de terreno ondulado, agrietado y la formación de lagos temporales permite que sean identificadas fácilmente, en especial en fotografías aéreas.

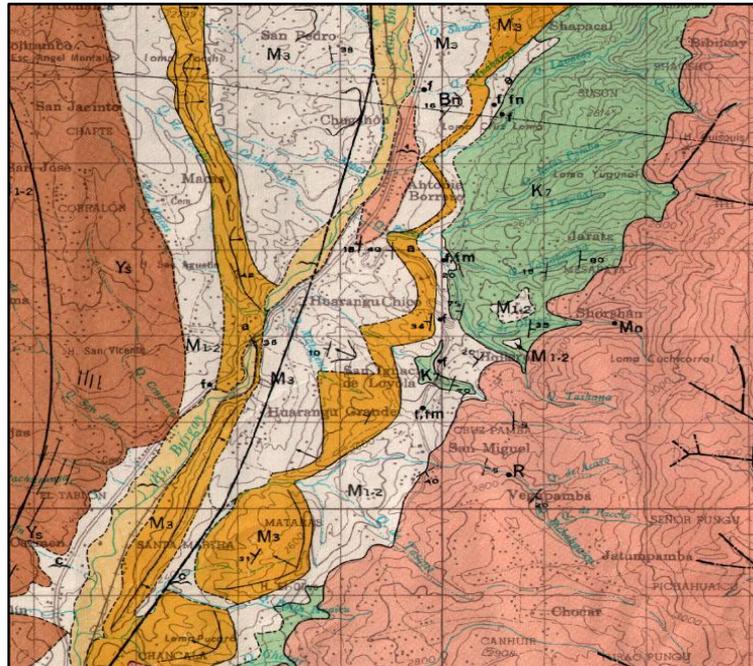


Figura 3.3: Geología local Javier Loyola.
Fuente: Geoinvestigación.

3.2 Descripción del material

El material que se utilizó para realizar las pruebas con la máquina de Franklin pertenece a la parroquia de Javier Loyola sector la Merced, a pocos kilómetros de la zona El Descanso, aproximadamente a 20 Km de la ciudad de Cuenca.

Este material que es una roca metamórfica y que se compone generalmente del mineral de Calcita (CaCO_3), que en algunos casos luego de ser triturada o adecuado a ciertas formas es utilizado como agregado para carreteras, vías férreas, cimientos de edificios y sobre todo para monumentos, esculturas, pavimentos, etc.

Este mármol comúnmente posee un color claro, que en ciertas ocasiones tiene un color blanco que posee muy pocas impurezas y las que poseen impurezas como minerales

arcillosos, óxidos de hierro o material bituminoso puede ser de color gris entre otros. En cuanto al utilizado para realizar las prácticas se utilizó un mármol gris, que contiene pequeñas cantidades de impurezas, siendo un material adecuado para el estudio respectivo.

3.3 Proceso de adecuación del material

Debido a que el material o las rocas provenientes de las canteras son depositados y tienen una forma irregular, se elaboró muestras de 5 cm de ancho por 5 cm de alto y 5 cm de profundidad formando así un cubo.

Se tomaron como dimensiones estas medidas debido al tema del capítulo I en la sección 1.5.6. De acuerdo con Franklin la relación entre el ancho, que él lo llama diámetro y el alto no tiene que pasar más que de 1.4; de esta manera se escogió la relación de 1 que se encuentra dentro de los rangos determinado por Franklin.

Tabla 3.1: Cantidad de muestras utilizadas en las pruebas.

Muestras de rocas	Número de muestras
Mármol (Máquina de Franklin)	30
Mármol (Máquina de Humboldt)	30
Mármol de Pumayunga	8
Total	68

3.4 Pruebas de ajuste

Para determinar la presión a la cual se va a trabajar, se realizó la compresión de un cilindro de aluminio, obviamente con la carga puntual en este cilindro no se realizó ninguna deformación pero vale recalcar que el manómetro introducido en la máquina de Franklin, que alcanza los 700 (bar) o 10000 (psi), con esta compresión antes mencionada alcanzo la máxima carga que se puede observar en el manómetro,

dándonos como resultado en teoría, que el manómetro adquirido funciona con perfecta normalidad para la compresión de rocas.

3.5 Ejecución de pruebas experimentales

En primer lugar, como se mencionó con antelación las pruebas que se realizaron se elaboraron con probetas de roca que pertenecían a la misma roca madre, dichas probetas llevan el nombre de rocas hermanas. Ahora bien, se realizó las pruebas de compresión para treinta muestras en la máquina de Franklin que se encuentra en el laboratorio de Ingeniera en Minas, de la misma manera se realizó el procedimiento con el mismo número de muestras en la prensa de marca Humboldt.

Las treinta muestras fueron introducidas una por una en la máquina de Franklin, insertando cada probeta y cuidando para que la aplicación de la fuerza sea a través de las dos puntas cónicas; y que las puntas estén situadas en la mitad de las caras, para mejores resultados las superficies de las probetas no deben tener irregularidades y cuidando que sean lo más planas posibles.

Se ajusta la presión de la gata hidráulica hasta que las puntas estén en contacto con la superficie de las probetas y se procede a realizar la fuerza necesaria mediante el ajuste manual hasta que la muestra falle y se mide la presión marcada en el dispositivo móvil en este caso el manómetro.

Ahora en la prensa de marca Humboldt, se realizó el mismo procedimiento para determinar la compresión de las treinta muestras. Cabe recalcar que en esta máquina la presión va dirigida a toda la cara y no a un punto en específico como lo que sucede en la máquina Franklin, se realiza este procedimiento y proporciona un dato que da en las unidades de Kgf, dicho dato se anota. Esta máquina llega un valor máximo de 50000 Kgf.

3.6 Tabulación de resultados

3.6.1 Pruebas realizadas en la Máquina de Franklin

Se procedió a realizar las pruebas con treinta probetas del mismo afloramiento en la máquina de Franklin construida, dichas probetas se sometieron a falla como se indica en el Anexo 16 y luego de realizar los ensayos se obtuvo los siguientes datos:

Tabla 3.2: Muestras realizadas en la Máquina de Franklin.

Máquina de Franklin			
Número de muestra	Sección transversal (cm²)	Presión hidráulica para falla	
		(bar)	(MPa)
1	25	450	45
2	25	410	41
3	25	650	65
4	25	500	50
5	25	440	44
6	25	430	43
7	25	390	39
8	25	500	50
9	25	580	58
10	25	460	46
11	25	360	36
12	25	380	38
13	25	460	46
14	25	200	20
15	25	470	47
16	25	270	27
17	25	490	49
18	25	550	55
19	25	360	36
20	25	450	45
21	25	430	43
22	25	570	57
23	25	380	38

24	25	380	38
25	25	430	43
26	25	400	40
27	25	400	40
28	25	400	40
29	25	450	45
30	25	490	49

3.6.2 Pruebas realizadas en la Máquina a compresión marca Humboldt

Se realizó pruebas con treinta probetas del mismo afloramiento en la máquina a compresión como se observa en el Anexo 9, dichas probetas se ensayaron y se obtuvo un esfuerzo de compresión en kilogramos fuerza, luego de realizar las pruebas se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 3.3: Muestras realizadas en la Máquina a compresión marca Humboldt.

Máquina a compresión marca Humboldt			
Número de muestra	Sección transversal (cm²)	Presión hidráulica para falla	
		Carga (Kgf)	Esfuerzo de compresión (MPa)
1	25	20626	80.85
2	25	9636	37.77
3	25	2802	10.98
4	25	7123	27.92
5	25	20146	78.97
6	25	11481	45.01
7	25	3293	12.91
8	25	10092	39.56
9	25	9108	35.7
10	25	13705	53.72
11	25	18940	74.24
12	25	18396	72.11
13	25	12455	48.82
14	25	21737	85.21
15	25	19241	75.42

16	25	18686	73.25
17	25	11239	44.06
18	25	15042	58.96
19	25	15991	62.68
20	25	10537	41.31
21	25	16486	64.63
22	25	12426	48.71
23	25	12399	48.6
24	25	12032	47.17
25	25	7433	29.14
26	25	10289	40.33
27	25	7137	27.98
28	25	8436	33.07
29	25	9108	35.7
30	25	10763	42.19

3.6.3 Valores ordenados obtenidos de la Máquina de Franklin y de la Máquina a compresión para la realización de curvas

Una vez que se realizaron las pruebas de las sesenta muestras, treinta respectivamente en la máquina de Franklin y treinta en la máquina a compresión, se procedió a ordenar los datos de resistencia de menor a mayor para facilitar su representación gráfica.

Tabla 3.4: Valores de la resistencia en la Máquina de Franklin y en la Máquina a compresión.

Máquina de Franklin	Máquina a compresión marca Humboldt
MPa	MPa
20	10.98
27	12.91
36	27.92
36	27.98
38	29.14
38	33.07
38	35.7
39	35.7
40	37.77
40	39.56
40	40.33
41	41.31

43	42.19
43	44.06
43	45.01
44	47.17
45	48.6
45	48.71
45	48.82
46	53.72
46	58.96
47	62.68
49	64.63
49	72.11
50	73.25
50	74.24
55	75.42
57	78.97
58	80.85
65	85.21

3.6.4 Gráficos de los resultados

Después de haber ordenado los datos en la tabla 3.4, mediante el programa Excel se obtuvieron las siguientes gráficas, en el eje horizontal la presión en (MPa) en la máquina de Franklin y en el eje vertical el esfuerzo en (MPa) obtenido en la maquina a compresión. Con esta graficación se procede a encontrar la función matemática que correlaciona los datos de las pruebas realizadas en ambas máquinas con el fin de encontrar el mayor valor de “R” que es el coeficiente de correlación. Se plantearon distintas funciones parabólicas, cuadráticas, pero la que mejor se ajustaba era la función lineal debido a la cercanía de “R²” a 1, garantizándose un menor número de errores y corroborándose también su posterior utilización.

Puntos insertados de los dos procedimientos

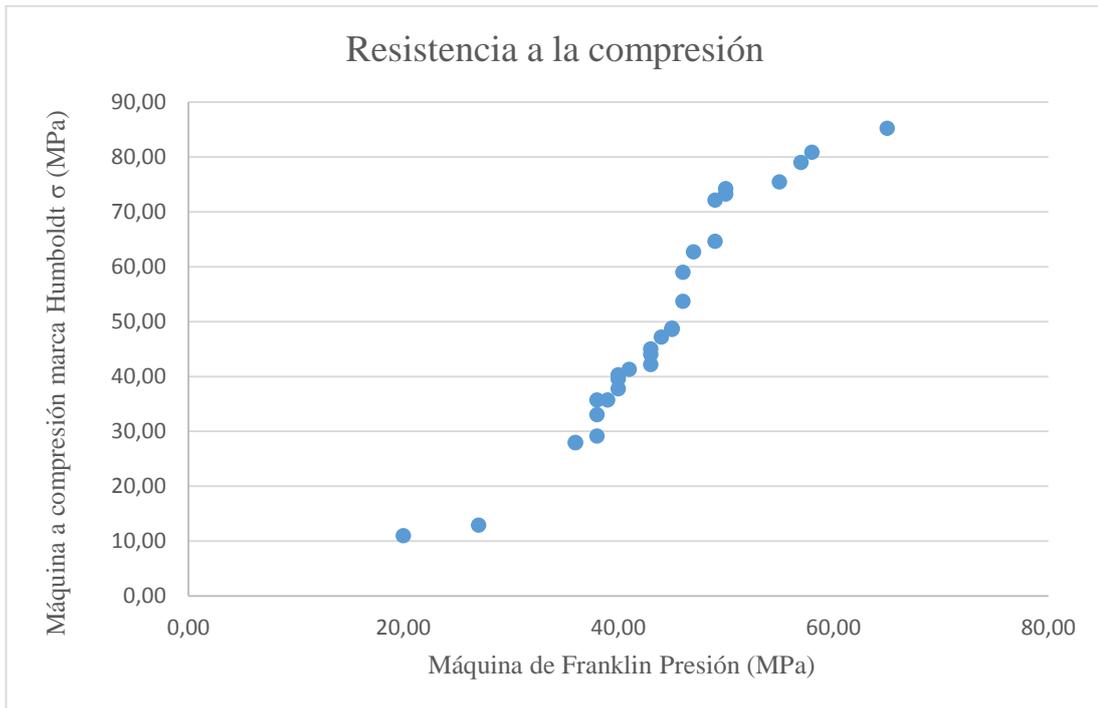


Figura 3. 4: Correlacion con los puntos de las pruebas realizadas en las dos maquinas.

Línea de tendencia de los puntos con la ecuación que mejor se adapta a estos puntos (lineal)

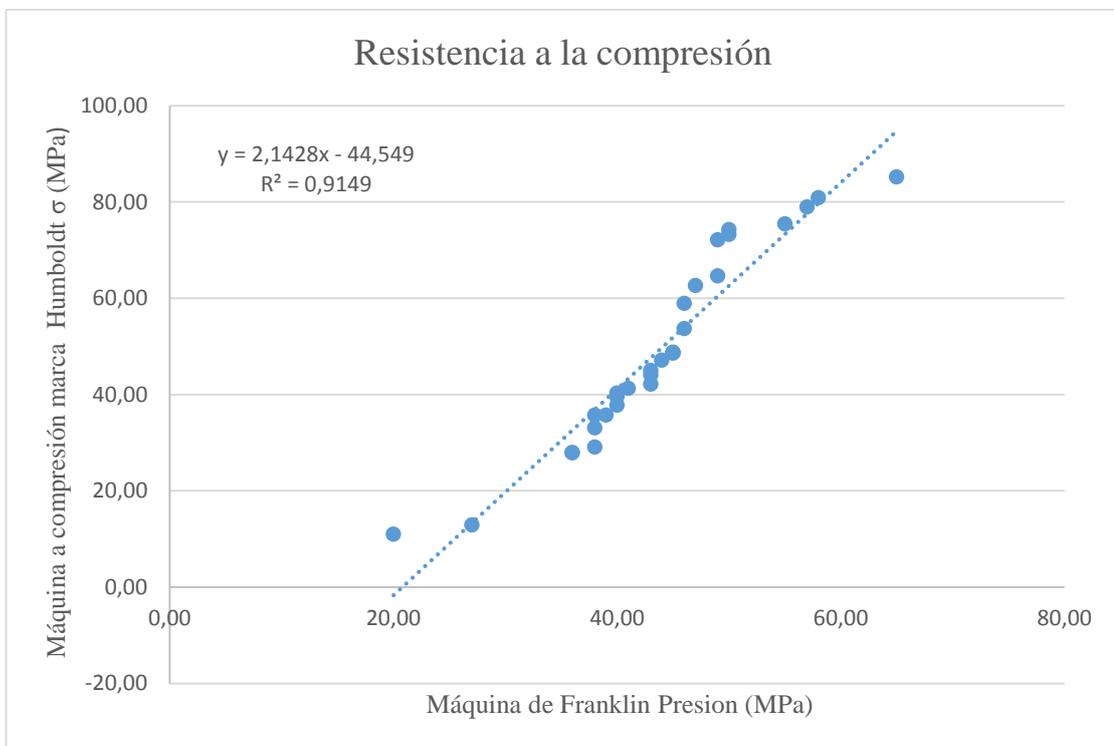


Figura 3. 5: Puntos ordenados con la ecuacion lineal.

Cabe recalcar que la recta hallada se apega perfectamente con los datos obtenidos en la compresión de rocas en ambas máquinas, por lo tanto, es perfecta para los fines de estudio.

Así mismo se puede visualizar un R^2 muy cercano a 1, exactamente 0.9149, en concreto el 91.49%, concluyendo que el modelo lineal encontrado o graficado es adecuado para describir la relación existente entre los dos tipos de resistencia.

A pesar de que la ecuación matemática encontrada es $y = 2.1428(x) - 44.54$, después de haber realizado algunos cálculos, los valores de la ecuación se suben al inmediato superior para facilitar su aplicación. La cual no perjudica en la interpretación de los resultados.

De acuerdo con la ecuación encontrada se tiene:

$$\sigma = 2.15 x - 45 \text{ (MPa)}$$

Dónde:

x = Valor de presión en la máquina de Franklin (MPa).

σ = Resistencia de la roca

3.7 Análisis para extrapolar la ecuación con otros tipos de rocas

Una vez obtenida la ecuación matemática, se procedió a realizar las pruebas de ocho muestras con mármol obtenido de la zona de Pumayunga como se observa en el Anexo 17, cuatro probetas ensayadas en la Máquina de Franklin y cuatro en la Máquina de marca Humboldt. En el que se demuestra que la ecuación matemática solo es aplicable para el tipo de roca utilizada que es Calcita, con las cuales se realizaron las pruebas anteriores, y que para cada tipo de roca es necesario realizar pruebas con un mayor número de muestras y por ende la ecuación también será diferente, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 3.5: Pruebas realizadas en la máquina de Franklin y en la máquina a compresión con mármol del sector Pumayunga.

Muestra	Máquina de Franklin		Máquina a compresión	
	Presión (MPa)	Esfuerzo calculado (MPa)	Carga (KN)	Esfuerzo (MPa)
1	14	-14.9	160.84	64.3
2	21	0.15	90	35.98
3	15	-12.75	149.07	59.59
4	10	-23.5	138.49	55.36

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

De acuerdo con lo planteado en este trabajo de investigación, se alcanzó los objetivos esperados y se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La adaptación del equipo se basó fundamentalmente en las dimensiones de la gata hidráulica para que los instrumentos y además los accesorios estén de acuerdo con las características y necesidades que esta posee.
- La adaptación de la máquina de Franklin se basa en un diseño previo observando que los esfuerzos y las distintas deformaciones, no sobrepasen los esfuerzos permisibles; Empleando materiales constructivos como aceros (ASTM A 36 y el ASSAB 705), que proveen rigidez al equipo.
- Lo primordial de este equipo es realizar un diagnóstico rápido de la resistencia a compresión de las rocas de diferentes sitios y disponer de una máquina que se pueda desarmar y trasladar evitando que las muestras sean trasladadas a laboratorios, en los cuales se consume tiempo y dinero.
- Al finalizar las pruebas experimentales se puede concluir que la máquina de Franklin presenta resultados satisfactorios para determinar la resistencia de la roca a la compresión.
- Los resultados permiten concluir que la ecuación de correlación encontrada sirve especialmente para la roca de tipo calcita proveniente de la parroquia Javier Loyola.
- Según la norma ASTM D5731, se requiere tomar al menos 20 muestras del mismo afloramiento para la realización del ensayo de compresión de rocas, tomando en consideración que el proceso de correlación para encontrar la ecuación es diferente para cada tipo de muestra.

Recomendaciones

- Para las pruebas de rocas de mayor resistencia se recomienda instalar una gata hidráulica de mayor capacidad para así satisfacer los requerimientos de carga.
- Se aconseja que la gata hidráulica sea independiente de la estructura para que promueva mayor versatilidad y espacio en el manejo de las probetas, además que la máquina este a un nivel que permita la fácil maniobrabilidad de los operadores.
- En la preparación de las probetas se recomienda proceder según la norma ASTM D5731, es decir que las muestras deben estar sin irregularidades, superficies lisas, dimensiones adecuadas entre 30 y 85 mm cuando se elaboren muestras de forma paralelepípeda y cúbica.
- Al realizar las pruebas se debe cumplir con las normas de seguridad aplicables en el laboratorio de Ingeniería en Minas y en el caso de hacerlo en otra ubicación contar con gafas y guantes para precautelar la salud de las personas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvial, G. (2014). Caracterización de rocas y análisis de su resistencia a fatiga por hendimiento. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfcig6331c/doc/bmfcig6331c.pdf>
- ASTM D5731. (2016). *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications*. West Conshohocken: ASTM International.
- Benavente. (2010). Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales. Obtenido de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25571/1/2006_Benavente_Utilizacion_rocas_minerales_industriales.pdf
- Canoba, & Fraga. (2004). Propiedades elásticas de las rocas. Obtenido de https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Elasticidad_de_rocas.pdf
- CentroAmericana, U. (2011). Mecánica estructural. Obtenido de <http://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/Densidad%20gravedad%20especifica%20y%20absorcion%20de%20agregados%20finos.pdf>
- EcuRed. (2013). Obtenido de <https://www.ecured.cu/Man%C3%B3metro>
- Edwards, & Atkison. (1986). *One deposit geology*. En Edwards, & Atkison, *One deposit geology* (págs. 1- 9). Londres: Chapman y Hall.
- Galván, M., & Restrepo, I. (20 de Abril de 2016). Correlación de la resistencia a compresión uniaxial con la humedad. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v83n198/v83n198a01.pdf>
- Galván, Seron, & Preciado. (2010). Correlación entre la resistencia a compresión simple y el índice de carga puntual $I_s(50)$ en calizas de la comunidad Valenciana. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Jorge_Preciado_Romero/publication/27

9080438_Correlation_between_the_point_load_index_is50_and_the_resistance_to_unconfined_compression_in_limestone_from_the_comunidad_valenciana_Spain/links/57ccc2ee08ae89cd1e86d0c0/Cor

Galvan-Ceballos, M., & Restrepo, I. (Septiembre de 2016). Correlacion de la resistencia a la compresion uniaxial con la humedad y porosidad eficaz en rocas. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/496/49647009001.pdf>

Marín. (2017). Evaluación de parámetros materiales de fractura en roca intacta. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/62569/1/71636410.2017.pdf>

Mingarro, F. (1996). Degradación y conservación del Patrimonio arquitectónico. Obtenido de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=gdUzPqg2ViYC&oi=fnd&pg=PA249&dq=+deformacion+de+la+rocas+atraves+de+ensayos+de+ruptura&ots=hHfhWt0w72&sig=XUPYaCJP8F2d_BUCpB02AthG8cg#v=onepage&q=deformacion%20de%20la%20rocas%20atraves%20de%20ensayos%20de%20rupt

Pompa Ramos, R., & Salazar Boyd, A. (26 de Septiembre de 2014). Carga Puntual, RQD, Martillo Schmidt, Propiedades Físicas, corte Directo, Compresión triaxial y constantes Elásticas. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/246054786/Ensayo-de-Carga-Puntual>

Pytel, A., & Singer, F. (1987). Resistencia de Materiales. Nueva York: Harper y Row.

Ramírez, & Alejano. (2010). Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Obtenido de http://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf

Rodríguez, R. (Abril de 2012). Mecánica de Rocas. Obtenido de https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=dW5jLmVkdS5wZXxvcmJhc2F8Z3g6MmZiNTU1NmNkMjU3OWFl&fbclid=IwAR2rqi6hmjikydzQZg_ZQ5EDWnhk0FnxAA24wxIxzP5uNfblZCj9rHqS5iSw

Sarmiento Velecela, R. (2010). Cultura y tradición de 4 parroquias del cantón Azogues: Bayas, Javier Loyola, Cojitambo y San Miguel de Porotos. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/1987/1/thg386.pdf>

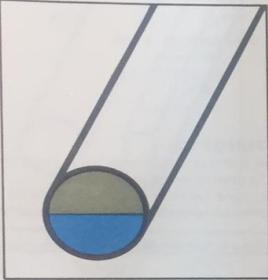
Tecnología . (2018). Tecnología . Obtenido de <https://www.areatecnologia.com/herramientas/manometro.html>

Torres, L. (2004). Obtenido de <https://9a68e618-a-d46f2a55-s-sites.googlegroups.com/a/unc.edu.pe/orbasa/archivos/mecanica-de-rocas/DETERMINACI%C3%93N%20DE%20LAS%20PROPIEDADES%20FISICO%20MECANICAS%20DE%20LAS%20ROCAS%20Y%20MONITOREO%20DE%20LA%20MASA%20ROCOSA-tesis.pdf?attachauth=ANoY7coq>

ANEXOS

Anexo 1: Datos del acero ASSAB 705.

ACEROS ASSAB - SKF GRADO MAQUINARIAS
SKF 356 A = ASSAB 705



EQUIVALENTE Aprox.
 AISI/SAE 4337
 WERKSTOFF 6511-6582
 DIN 36CrNiMo4
 B S EN 24-EN 25
 SIS 2541

ANALISIS APROXIMADOS

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
ASSAB 705	0.36%	0.3%	0.7%	1.4%	1.4%	0.20%
SKF 356 A	0.36%	0.25%	0.7%	1.4%	1.4%	0.20%

PROPIEDADES MECANICAS

Resistencia a la tracción (Rm) 90 - 110 Kgs/mm²
 Alargamiento a5 min 12%
 Esfuerzo de cedencia (Rp0.2) 70 Kgs/mm²
 Resistencia al impacto KU Aprox. 30 J (6 Kgm/cm²)
 Dureza conque se entrega 270 - 330 Brinell

TRATAMIENTO TERMICO

Recocido suave 690 - 720°C
 Relevado detensiones 525 - 650°C
 Temple 830 - 860°C
 Revenido 550 - 675°C
 Enfriamiento en aceite

SKF 356 A = ASSAB 705 Es un acero bonificado al cromo niquel, fabricado bajo el proceso M y R de SKF que consiste en fundición y refinado del acero (melting and refining) con lo cual se consigue un acero muy puro y con poca escoria, debido a su alta resistencia a la fatiga, se puede utilizar en piezas que esten sometidas a grandes esfuerzos, y desgaste

APLICACIONES: Fabricación de pieza de máquina, piñones, ejes, pernos, etc.
IDENTIFICACION: Extremo azul y dorado.

REDONDO			REDONDO			REDONDO		
MM	PULGADA	APROX. KG/M	MM	PULGADA	APROX. KG/M	MM	PULGADA	APROX. KG/M
6	1/4"	0.25	35	1-3/8"	7.55	91.4	3-9/16"	52
8	5/16"	0.39	38	1-1/2"	8.95	95	3-3/4"	56
10	3/8"	0.62	40	1-9/16"	10.5	102	4"	66.1
12	7/16"	0.90	45	1-3/4"	12.5	105	4-1/8"	68
14	9/16"	1.26	50	2"	15.8	115	4-17/32"	81
16	5/8"	1.58	55	2-3/16"	19	127	5"	101
18	11/16"	1.90	60	2-3/8"	22.4	135	5-5/16"	114
20	25/32"	2.50	65	2-9/16"	26	143	5-5/8"	125
22	7/8"	3.10	70	2-3/4"	30	153	6"	147
25	1"	3.98	75	2-15/16"	35	160	6-5/16"	160
28	1-1/8"	5.01	81.4	3-3/16"	41	180	7-3/32"	202
32	1-1/4"	6.31	85	3-11/32"	45	204	8"	259
						250	9-27/32"	300

Anexo 2 : Especificaciones Acero ASTM A 36.

Requerimientos a tensión*		
Láminas, Vigas* y barras	Ksi (Mpa)	*ver orientación del espécimen bajo la prueba a tensión según especificación A6, para la gama formas de brida sobre 426lb/ft (634kg / m), el 80 KSI (550Mpa) resistencia a la tensión máxima no se aplica una elongación mínimo en 2in (50mm) de 19% se aplica.
Esfuerzo último	50-80 (400-550)	*** Punto de fluencia 32 KSI (220 MPa) para las placas de más de 8in (200mm) de espesor. Alargamiento de que no es obligatorio determinarle para placa de piso. Las placas de más de 24 en (600 mm) el requisito de elongación se reduce dos puntos porcentuales. Ver los ajustes de elongación en la sección de ensayo de tracción de la especificación A6
Esfuerzo de fluencia	36 (250)	
Láminas y Barras, **, ***		
Elongación en 8in. (200mm), min, %	20	
Elongación en 2in. (50mm), min, %	23	
Dureza	120-135 HB	HB: Dureza Brinell

Anexo 3: Punta cónica.



Anexo 4: Armado de la estructura.



Anexo 5: Acople del manómetro.



Anexo 6: Estructura soldada.



Anexo 7: Máquina Construida.



Anexo 8: Colocación de una probeta en la máquina a compresión.



Anexo 9: Prueba realizada en la máquina a compresión.



Anexo 10: Probetas ensayadas en la máquina a compresión.



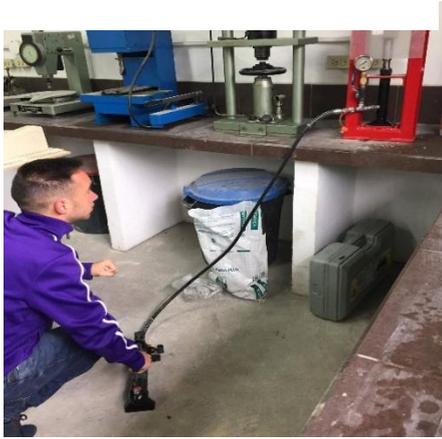
Anexo 11: Realización de las pruebas.



Anexo 12: Adecuación de las probetas.



Anexo 13: Ajuste de probeta en la realización de las pruebas.



Anexo 14: Desarrollo de las pruebas en la maquina construida.



Anexo 15: Vista de las puntas cónicas luego de las pruebas.



Anexo 16: Probetas de roca luego de la realización de pruebas en la máquina construida.



Anexo 17: Probetas de mármol de Pumayunga.

