

"Año de la lucha contra la corrupción e impunidad"

**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE HUANCAMELICA**

(Creada por Ley N° 25265)

ESCUELA DE POSGRADO



FACULTAD DE EDUCACIÓN

UNIDAD DE POSGRADO

TESIS

**ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE MÉTODOS NO
DESTRUCTIVOS PARA LA ESTABILIDAD DE PILARES EN
MINAS DE ROCA FOSFORICA**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA GEOTÉCNICA Y
GEOMECÁNICA APLICADA EN MINERÍA**

PRESENTADO POR:

Bach: GUSTAVO SIERRA ALBARRACIN

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO
EN: INGENIERÍA GEOTÉCNICA Y GEOMECÁNICA
APLICADA EN MINERÍA**

HUANCAMELICA – PERÚ

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA

(Creado por Ley N° 25265)

ESCUELA DE POSGRADO

(APROBADO CON RESOLUCIÓN N° 736-2005-ANR)



"Año de la lucha contra la corrupción e impunidad"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Ante el Jurado conformado por los docentes: **Dr. DE LA CRUZ CRUZADO Pedro Felix, MSc,**
PAREJAS RODRIGUEZ Freddy y MSc. GUZMAN IBAÑEZ CESAR SALVADOR

Asesor: Dr. ENRIQUEZ DONAIRES Amadeo

De conformidad al Reglamento único de grados y títulos de la Universidad Nacional de Huancavelica, aprobado mediante Resolución N° 330-2019-CU-UNH, ratificado con resolución N° 378-2019-CU-UNH.

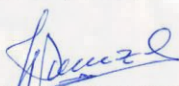
El Candidato al **GRADO DE MAESTRO EN INGENIERIA GEOTECNICA Y GEOMECANICA APLICADA EN MINERIA**

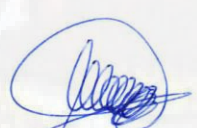
Don, **Gustavo, SIERRA ALBARRACIN** procedió a sustentar su trabajo de Investigación titulado **"ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA"**

Luego, de haber absuelto las preguntas que le fueron formulados por los Miembros del Jurado, se dio por concluido al ACTO de sustentación, realizándose la deliberación y calificación, resultando:

Con el calificativo: Aprobado ☒ Por: Unanimidad
Desaprobado ☐

Y para constancia se extiende la presente ACTA, en la ciudad de Huancavelica, a los trece días del mes de agosto del año 2019.

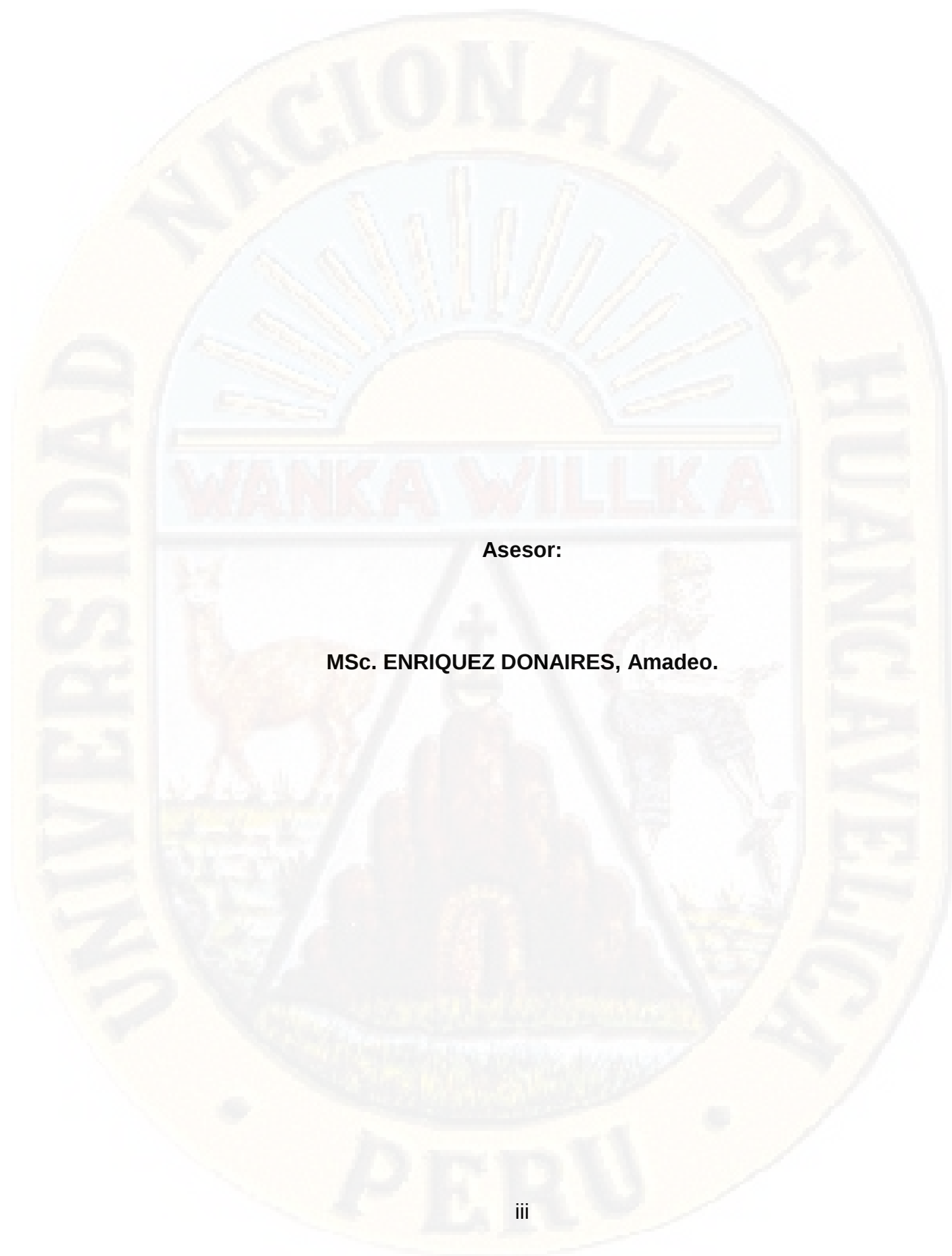

.....
Dr. DE LA CRUZ CRUZADO Pedro Felix
Presidente del Jurado.


.....
MSc. PAREJAS RODRIGUEZ Freddy

Secretario del Jurado


.....
MSc. GUZMAN IBAÑEZ CESAR SALVADOR

Vocal del Jurado



Asesor:

MSc. ENRIQUEZ DONAIRES, Amadeo.

DEDICATORIA:

Dedico este proyecto de tesis a mi esposa Yildriana Yajaira Florez Cano, a mis hijos Yostyn y Sofia, por su cariño, amor, por ser luz y fuerza que impulsa mi vida y mis ganas de seguir superándome cada día.

Gustavo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por regalarme la vida, la salud y la oportunidad de alcanzar este escalafón en mi vida profesional.

Agradezco a mi esposa Yildriana Yajaira Florez por ser mi motor de vida, en todas las etapas difíciles que afronte en el desarrollo de esta maestría.

Agradezco a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por haber apoyado en su momento económicamente, la ejecución de los ensayos teórico – prácticos que dieron los cimientos para el desarrollo de esta tesis de maestría.

Agradezco al Doctor Clovis Gonzatti, por su amistad y asesoría en esta tesis de grado.

Agradezco a todo el personal de la Cámara Minera del Perú, por haber colocado en mi camino el estudio de esta maestría, por su asesoría y acompañamiento de cada día fueron moldeando mi perfil como profesional en el campo de la geotecnia, la geomecánica y minería.

Agradezco a la Universidad Nacional de Huancavelica, por permitirme alcanzar el grado de magister en Ingeniería Geotécnica y Geomecánica aplicada a minería, de una forma integral y con crecimiento profesional de gran envergadura.

Gustavo Sierra Albarracin

RESUMEN

Esta tesis de grado tiene como objeto aplicar los métodos no destructivos, sísmica de refracción y ondas de ultrasonido a bajos niveles de deformación, en pilares de roca fosfórica en pro de la obtención de la resistencia del macizo rocoso y análisis de estabilidad de dichos pilares. Para el desarrollo de este proyecto se siguió una metodología clara y precisa, la cual se enmarca en los siguientes pasos:

- Descripción de la explotación por cámaras y pilares.
- Análisis de discontinuidades de pilar.
- Muestreo y análisis de laboratorio del pilar de roca fosfórica.
- Aplicación de refracción sísmica sobre la cara del pilar.
- Análisis y resultados.

Se obtuvieron diferentes resultados, como lo fue una resistencia del macizo rocoso de roca fosfórica de 3,62 MPa y un factor de seguridad del pilar en análisis de 1,77, además se logró aplicar la teoría del doctor Clovis Gonzatti a macizos rocosos de roca fosfórica.

Palabras clave: Ultrasonido, muestra, refracción sísmica, ondas, cámaras y pilares.

ABSTRACT

This thesis aims to apply non-destructive methods, refraction seismic and ultrasound waves at low levels of deformation, in pillars of phosphoric rock in order to obtain the strength of the rock mass and analysis of stability of these pillars. For the development of this project a clear and precise methodology was followed, which is framed in the following steps:

- Description of the operation by room and pillars.
- Analysis of pillar discontinuities.
- Sampling and laboratory analysis of the phosphate rock pillar.
- Application of seismic refraction on the face of the pillar.
- Analysis and results.

Different results were obtained, as it was a resistance of rock mass of phosphoric rock of 3.62 MPa and a factor of safety of the pillar in analysis of 1.77, in addition it was possible to apply the theory of Dr. Clovis Gonzatti to rock mass phosphoric.

Key words: Ultrasound, sample, seismic refraction, waves, room and pillars.

INDICE

	Pag.
RESUMEN.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	XVI
CAPITULO I: EL PROBLEMA.....	17
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA.....	19
1.2.1 PROBLEMA GENERAL.....	19
1.2.2 PROBLEMAS ESPECIFICOS.....	20
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	20
1.4 JUSTIFICACION	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CAPITULO II: MARCO TEORICO.....	23
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION	24
2.2 BASES TEORICAS.....	26
2.3 FORMUACION DE HIPOTESIS.....	33
2.3.1 Hipótesis general.....	33
2.3.2 Hipótesis específicas.....	33
2.4 DEFINICION DE TERMINOS	34
2.5 IDENTIFICACION DE VARIABLES	36
2.5.1 Variable independiente	37
2.5.2 Variable dependiente	37
2.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	38
CAPITULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION.....	40
3.1 TIPO DE INVESTIGACION	41
3.2 NIVEL DE INVESTIGACION	41
3.2.1 Descriptivo.....	41

3.2.2	<i>Analítico</i>	41
3.3	METODO DE INVESTIGACION	42
3.4	DISEÑO DE LA INVESTIGACION	43
3.4.1	<i>Unidad Experimental</i>	43
3.5	POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO.....	43
3.5.1	<i>Población</i>	43
3.5.2	<i>Muestra</i>	43
3.5.3	<i>Muestreo</i>	43
3.6	TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS	44
3.6.1	<i>Técnicas de recolección de datos</i>	44
3.6.2	<i>Instrumentos de recolección de datos</i>	44
3.7	TECNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS	44
3.7.1	<i>Codificación</i>	45
3.7.2	<i>Tabulación</i>	45
3.7.3	<i>Consistencia</i>	45
3.8	DESCRIPCION DE LA PRUEBA DE HIPOTESIS	45
	CAPITULO IV: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	48
4.1	PRESENTACION E INTERPRETACION DE DATOS.....	49
4.1.1	<i>Localización del proyecto</i>	49
4.1.2	<i>Vías de acceso</i>	51
4.1.3	<i>Rasgos fisiográficos</i>	51
4.1.4	<i>Geología</i>	52
4.1.5	<i>Caracterización geomecánica del macizo rocoso</i>	59
4.1.6	<i>Clasificación geomecánica del MRMR (Mining Rock Mass Rating)</i>	73
4.1.7	<i>Aplicación de métodos no destructivos, en el análisis de estabilidad de pilares en minas de roca fosfórica</i>	80
4.1.8	<i>Influencia del tamaño de las muestras con relación a los resultados de compresión simple</i> 94	
4.1.9	<i>Influencia de la tensión axial en velocidades de propagación de ondas p de ultrasonido</i> ..	95
4.1.10	<i>Influencia del nivel de saturación del macizo rocoso frente a la velocidad de propagación de ondas p, de ultrasonido</i>	107
4.1.11	<i>Velocidades de propagación de ondas p insitú, por refracción sísmica</i>	115

4.1.12	<i>Estimación de la resistencia del macizo de roca fosfórica</i>	121
4.1.13	<i>Análisis de estabilidad del pilar de roca fosfórica</i>	124
4.1.14	<i>ANALISIS DE ESTABILIDAD DE LOS PILARES DE ROCA FOSFORICA</i>	127
4.2	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	128
4.3	PROCESO DE PRUEBAS DE HIPOTESIS	129
CONCLUSIONES		131
RECOMENDACIONES		133
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		134
ANEXOS		
MATRIZ DE CONSISTENCIA		
INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS		
BASES DE DATOS		
ARTICULO CIENTÍFICO		

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.	Diagrama de flujo aplicación de métodos no destructivos	42
Ilustración 2.	Localización y vías de acceso mina Carolina	50
Ilustración 3.	Afloramiento del yacimiento de roca Fosfórica.	58
Ilustración 4.	Diagrama de polos del pilar en análisis	60
Ilustración 5.	Diagrama de contornos del pilar en análisis	61
Ilustración 6.	Diagrama de planos mayores	62
Ilustración 7.	Espaciado de las discontinuidades	63
Ilustración 8.	Continuidad de discontinuidades en el rumbo	63
Ilustración 9.	Continuidad en el buzamiento de las discontinuidades	64
Ilustración 10.	Abertura de las discontinuidades analizadas del pilar	64
Ilustración 11.	Resultado de rugosidad con el peine de Barton	65
Ilustración 12.	Representación en barras de la rugosidad de discontinuidades	65
Ilustración 13.	Análisis de propiedades físicas en laboratorio	66
Ilustración 14.	Resistencia a la compresión simple, probetas cubicas y cilíndricas	68
Ilustración 15.	Resultados esfuerzo vs deformación probetas cubicas falladas	70
Ilustración 16.	Resultados esfuerzo vs deformación probetas cilíndricas falladas	71
Ilustración 17.	Determinación de los módulos de elasticidad para probetas de roca fosfórica	72
Ilustración 18.	Interface del programa Cats Ultrasonics 1.83	82
Ilustración 19.	Configuración cara a cara	84
Ilustración 20.	Realización de medición de velocidad de onda ultrasónica a través de un espécimen de roca	84
Ilustración 21.	Unión de los transductores con la muestra	88

Ilustración 22.	Velocidades de onda ultrasónica P en diferentes direcciones de medición, en probetas cubicas	90
Ilustración 23.	Velocidades de ondas de ultrasonido tipo P , en probetas cilíndricas en sentido de la altura	90
Ilustración 24.	Influencia del tamaño de las muestras con respecto a la resistencia uniaxial	95
Ilustración 25.	Toma de velocidades de ondas P de ultrasonido con carga axial variable	98
Ilustración 26.	Variación de las ondas P de ultrasonido en dirección paralela a la estratificación	100
Ilustración 27.	Carcasa para medición de ondas P de ultrasonido perpendicular a la estratificación	102
Ilustración 28.	Colocación de las carcasa para determinar las velocidad de propagación de ondas P, perpendicular a la estratificación con carga axial variable	102
Ilustración 29.	Variaciones de las ondas P de ultrasonido con respecto a su carga axial en dirección perpendicular a la estratificación	105
Ilustración 30.	Curva característica de roca fosfórica relacionando el esfuerzo axial y la variación de velocidades de ondas P, en sentido perpendicular a la estratificación	106
Ilustración 31.	Saturación de las probetas cubicas de roca fosfórica	109
Ilustración 32.	Factor de corrección por humedad que presenta el macizo rocoso de roca fosfórica	114
Ilustración 33.	Visualización de señales sísmicas e interpretación del tiempo de llegada de la onda P al geófono	116
Ilustración 34.	Configuración del equipo para mediciones de refracción sísmica	117
Ilustración 35.	Esquemas que se levantó para refracción sísmica en cada uno de los pilares en análisis	118

Ilustración 36.	Preparación y fijación de geófonos alrededor del pilar	119
Ilustración 37.	Velocidades de ondas P, producto del ensayo de refracción sísmica	121
Ilustración 38.	Áreas totales y efectivas de los pilares en análisis	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Operacionalización de variables	39
Tabla 2.	Coordenadas polígono contrato en virtud de aporte 696R.....	51
Tabla 3.	Resumen de las propiedades físicas de roca fosfórica	67
Tabla 4.	Resultados de compresión simple de probetas cubicas de volumen variable	68
Tabla 5.	Resultados de compresión simple de probetas cilíndricas con volumen constante	69
Tabla 6.	Resultados de módulos de deformación para probetas cubicas	72
Tabla 7.	Resultados de módulos de deformación para probetas cilíndricas .	73
Tabla 8.	Calculo del RQD, para cada pilar en estudio	74
Tabla 9.	Clasificación geomecánica del MRMR 1989.....	75
Tabla 10.	Ajuste del valor final por orientación de discontinuidades	76
Tabla 11.	Tipos de macizos rocosos y su descripción	76
Tabla 12.	Parámetros de sostenimiento, cohesión y ángulo de fracción del macizo rocoso	76
Tabla 13.	Parámetros para determinar el valor de condición de discontinuidades	77
Tabla 14.	Parámetros para determinar el ajuste de orientación de discontinuidades con respecto a la obra minera.....	77
Tabla 15.	Consideraciones del sostenimiento para el macizo de roca fosfórica según el MRMR.....	79

Tabla 16.	Valores promedio de probetas cubicas para ensayo de ultrasonido	86
Tabla 17.	Valores promedio de probetas cilíndricas para ensayo de ultrasonido	86
Tabla 18.	Resultados de velocidades de ondas ultrasónicas P, en probetas cubicas	89
Fuente: Resultados del proyecto		89
Tabla 19.	Resultados de velocidades de ondas ultrasónicas P, en probetas cilíndricas	89
Tabla 20.	Propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación de probetas cubicas en sentido de la altura.....	91
Fuente: Resultados del proyecto		92
Tabla 21.	Propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación de probetas cubicas en sentido del Ancho	92
Tabla 22.	Propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación de probetas cubicas en sentido de la profundidad.....	93
Tabla 23.	Propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación de probetas cilíndricas en sentido de la altura.....	93
Tabla 24.	Resultados de variación de velocidades de propagación de ondas P de ultrasonido en dirección paralelas a la estratificación.....	98
Tabla 25.	Resultados de variaciones de las ondas de ultrasonido perpendicular a la estratificación con carga axial variable	103
Tabla 26.	Valores para el factor de corrección por esfuerzo axial F1.....	107
Tabla 27.	Velocidades ponderadas paralelas a la estratificación con carga axial ± 0	111
Tabla 28.	Velocidades ponderadas de onda P, para probetas cubicas secas	111
Tabla 29.	Velocidades ponderadas y variación de ondas P	112

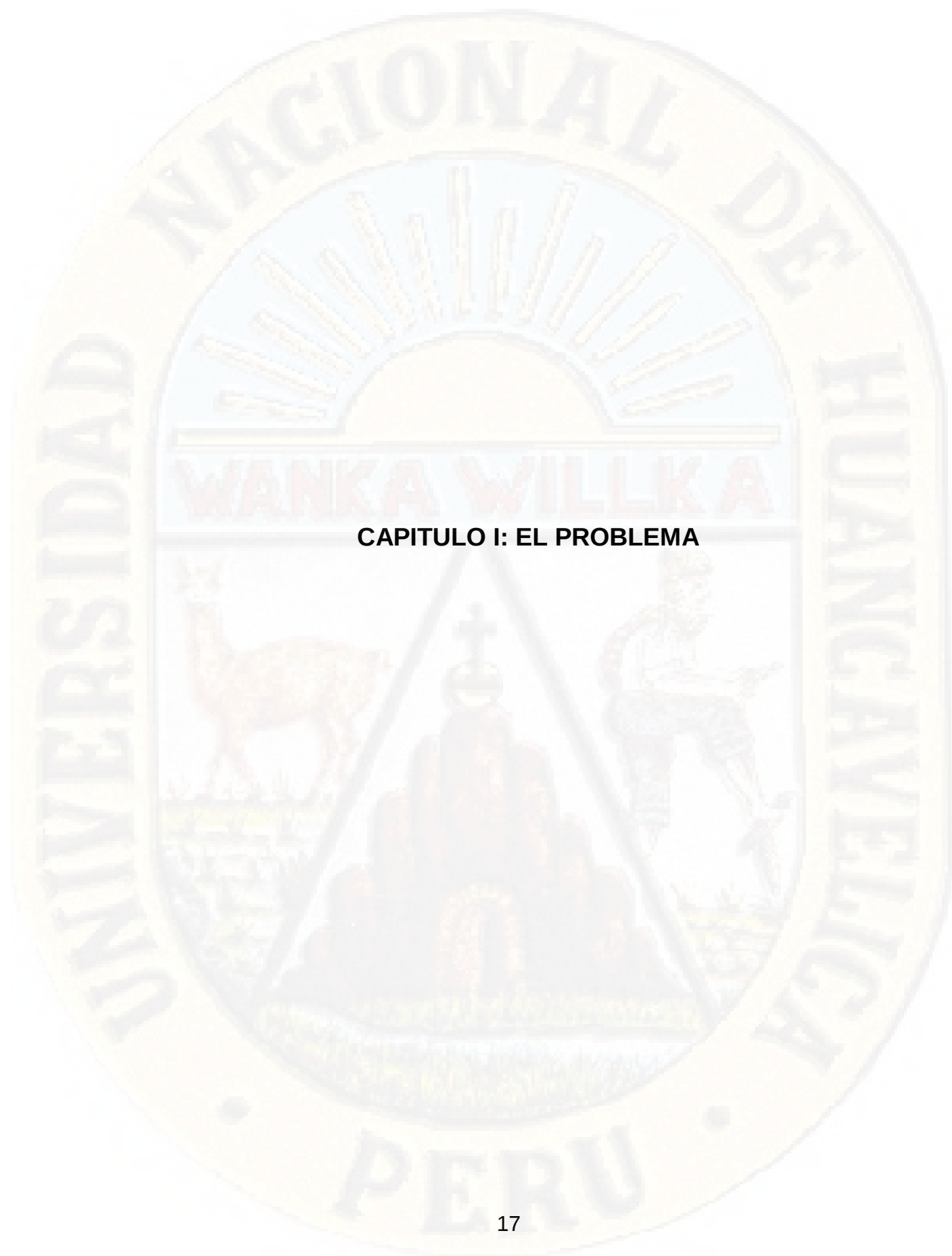
Tabla 30.	Velocidades ponderadas y variación de ondas P, para probetas cubicas Semi saturadas.....	112
Tabla 31.	Factores de corrección por humedad para diferentes estados de la roca	114
Tabla 32.	Velocidades de ondas P, por medio de refracción sísmica para el pilar	120
Tabla 33.	Resultados de resistencia de los pilares de roca fosfórica según la teoría de Obert Duvall.....	125
Tabla 34.	Resultados del esfuerzo promedio sobre el pilar y la razón de explotación	127
Tabla 35.	Factores de seguridad determinados para cada pilar.....	128

INTRODUCCIÓN

Este proyecto se realizó con el fin de lograr una alternativa más eficiente y económicamente rentable en el análisis de estabilidad de pilares en minería, ya que, aunque involucra una secuencia de laboratorio bastante extensiva es única para la caracterización de la roca e involucra aspectos estructurales bastantes importantes propios del sitio de análisis.

Aunque ya se tenían precedentes de la aplicación de métodos no destructivos en rocas, los cuales sirvieron de fundamento para esta investigación, este campo ha sido poco estudiado y damos un avance significativo en el dimensionamiento de explotaciones mineras bajo esta base teórica y práctica.

Para el desarrollo de esta investigación, se contó con el asesoramiento del MSc. Amadeo ENRIQUEZ DONAIRES, y se siguió una metodología que involucra una serie de pasos teórico – prácticos, que relacionan las condiciones reales del macizo rocoso y las características de una probeta en laboratorio, disminuyendo el nivel de incertidumbre que se genera al dimensional y analizar una explotación minera por cámaras y pilares.



CAPITULO I: EL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La explotación por el método de cámaras y pilares, en los últimos años ha tomado gran importancia principalmente por su bajo costo de explotación, pero a igual no se le ha prestado gran importancia y estudio en lo referente a la estabilidad de su elemento de sostenimiento natural (pilares). Debido a las grandes áreas excavadas en su ejecución, se producen diferentes configuraciones de resistencias en sus pilares, lo que da origen a varias zonas resistentes alrededor del pilar, las cuales como ya se saben por estudios anteriores, como los hechos por JAEGER & COOK 1976, ZORZI 1991, BAUSHINGER (1876), BUNTING (1911), ZERN (1926), HOLLAND & GADDY (1956), SALAMON (1967), OBERT & DUVALL (1967), BIENIAWSKI (1968a), entre otros, teniendo sus máximos valores en el interior de la geometría de su conformación.

Teniendo en cuenta la influencia de las presiones generadas en los pilares, se tiene la certeza que en estos se generan dos zonas importantes: una zona degradada del pilar y una intacta, por lo cual es importante la determinación de la resistencia de dichas zonas para un posterior análisis de estabilidad, logrando un paso importante en la mecánica de rocas. Por otro lado, la auscultación Geomecánica apropiada para el análisis de la estabilidad de pilares en minería, como es el caso de rocas fosfóricas, genera un costo elevado, por lo cual se generan nuevas visiones hacia diferentes métodos de análisis de estabilidad como lo son los métodos no destructivos. Es de destacar que en la actualidad la caída de rocas en este método de explotación por cámaras y pilares, es uno de los grandes problemas en minas subterráneas que vienen ocasionando grandes pérdidas humanas y materiales. El cobro de varias vidas humanas en los grandes yacimientos subterráneos como lo son países productores de minerales: Canadá, Australia, China y Sudáfrica por el mal estudio y caracterización de

macizos rocosos, generaron como consecuencia la caída de rocas y bloques y tuvieron tal lamentable consecuencia y son elemento de gran importancia.

La empresa Fosfatos Boyacá cuenta con una mina de roca fosfórica, compuesta por diferentes labores, entre las cuales se tiene: Tres niveles inferiores activos y dos niveles superiores abandonados y un nivel patio, un inclinado principal de transporte con inclinación que varía de 18° a 20° y aproximadamente 42 cámaras que paralelas al buzamiento del banco de roca fosfórica distribuidas entre los niveles anteriormente mencionados. En cuanto a infraestructura la mina cuenta con un malacate diesel, una tolva de aproximadamente 70 m^3 de capacidad, dos vagonetas de aproximadamente 3 Ton de capacidad cada una, un compresor diesel. Para desarrollo de este proyecto se seleccionó un Pilar limitado por las cámaras S41, S42, los niveles 3 y 4 inferior (ver Anexo plano topográfico).

La dimensión actual de operación de minado está en expansión, por lo cual se genera esta nueva alternativa para involucrar métodos de menor costo y resultados confiables como lo son los métodos no destructivos.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

¿Cómo analizar la estabilidad de pilares en minas subterráneas de roca fosfórica con métodos no destructivos, bajo estándares de seguridad y rentabilidad en la operación minera?

1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cómo es la influencia del esfuerzo axial, en la aplicación de ondas de ultrasonido a bajos niveles de deformación?
- ¿Cómo afecta el efecto a escala, en la aplicación de métodos no destructivos en pilares de roca fosfórica?
- ¿Cómo afecta la humedad del macizo rocoso en la aplicación de métodos no destructivos?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la estabilidad de pilares en minas de roca fosfórica con aplicación de métodos no destructivos.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el esfuerzo a compresión uniaxial con probetas cubicas y cilíndricas en diferentes direcciones.
- Analizar las velocidades de propagación de ondas P y refracción sísmica alrededor de los pilares.
- Analizar la influencia del agua en velocidades de ondas de ultrasonido.
- Determinar y analizar la resistencia de los pilares aplicando diferentes teorías de análisis de resistencia.
- Analizar la aplicación de los métodos no destructivos en la estabilidad de pilares de roca fosfórica.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El método de cámaras y pilares exige buenos rendimientos tanto en arranque, transporte y sostenimiento si lo requiere, por tal motivo es

primordial el estudio del comportamiento de sus pilares como elemento de sostenimiento, para el buen desarrollo de todas las labores que involucre este método de explotación bajo tierra, primando la seguridad del personal.

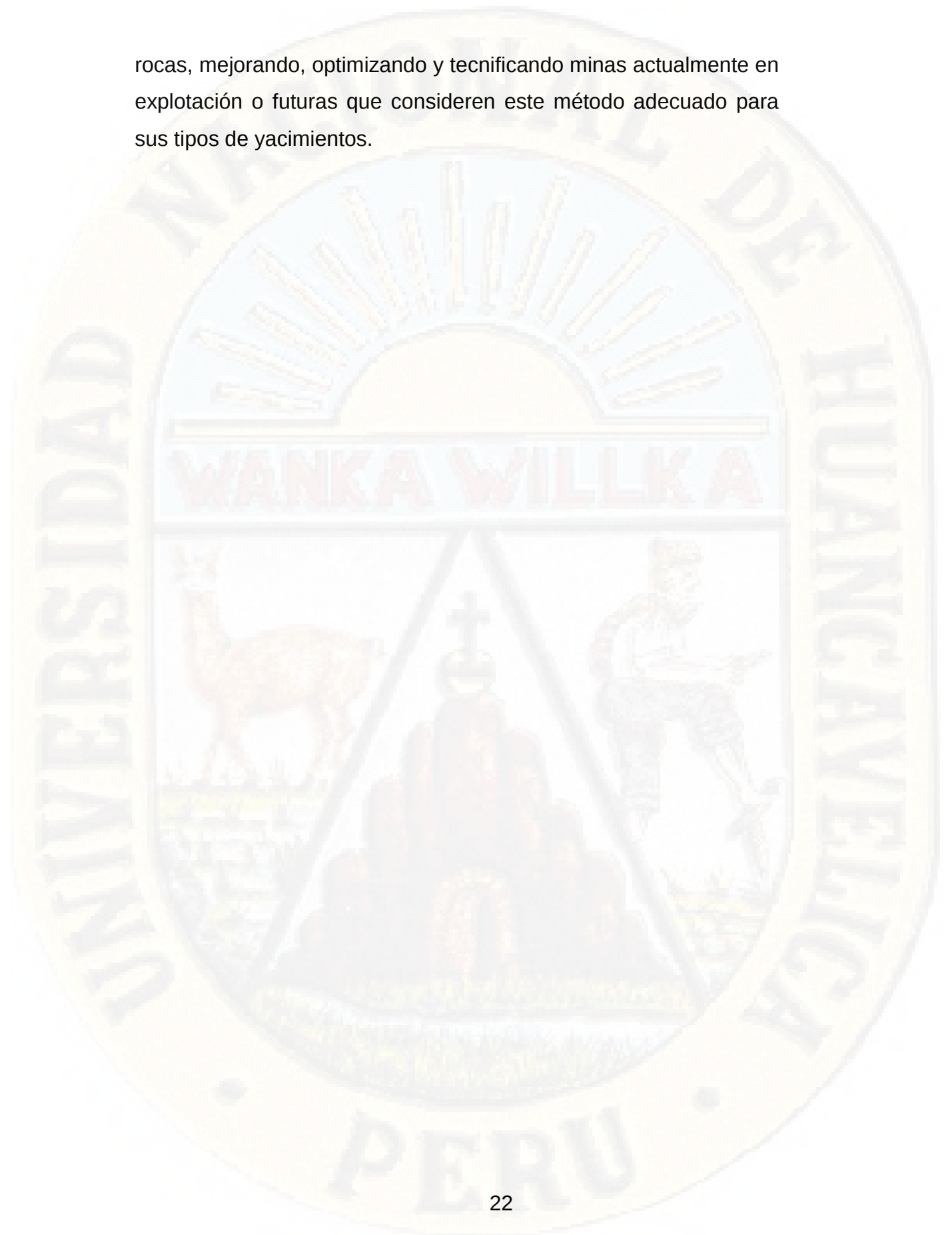
El método de explotación Cámaras y Pilares¹ en particular presenta un alto riesgo en sus operaciones ya que en ésta se van dejando pilares de roca que trabajan como columnas y permiten estabilizar el material rocoso que se encuentra por encima de las galerías que han sido excavadas. Así mismo, por ser naturales estas contienen un porcentaje de mineral que es económicamente rentable para

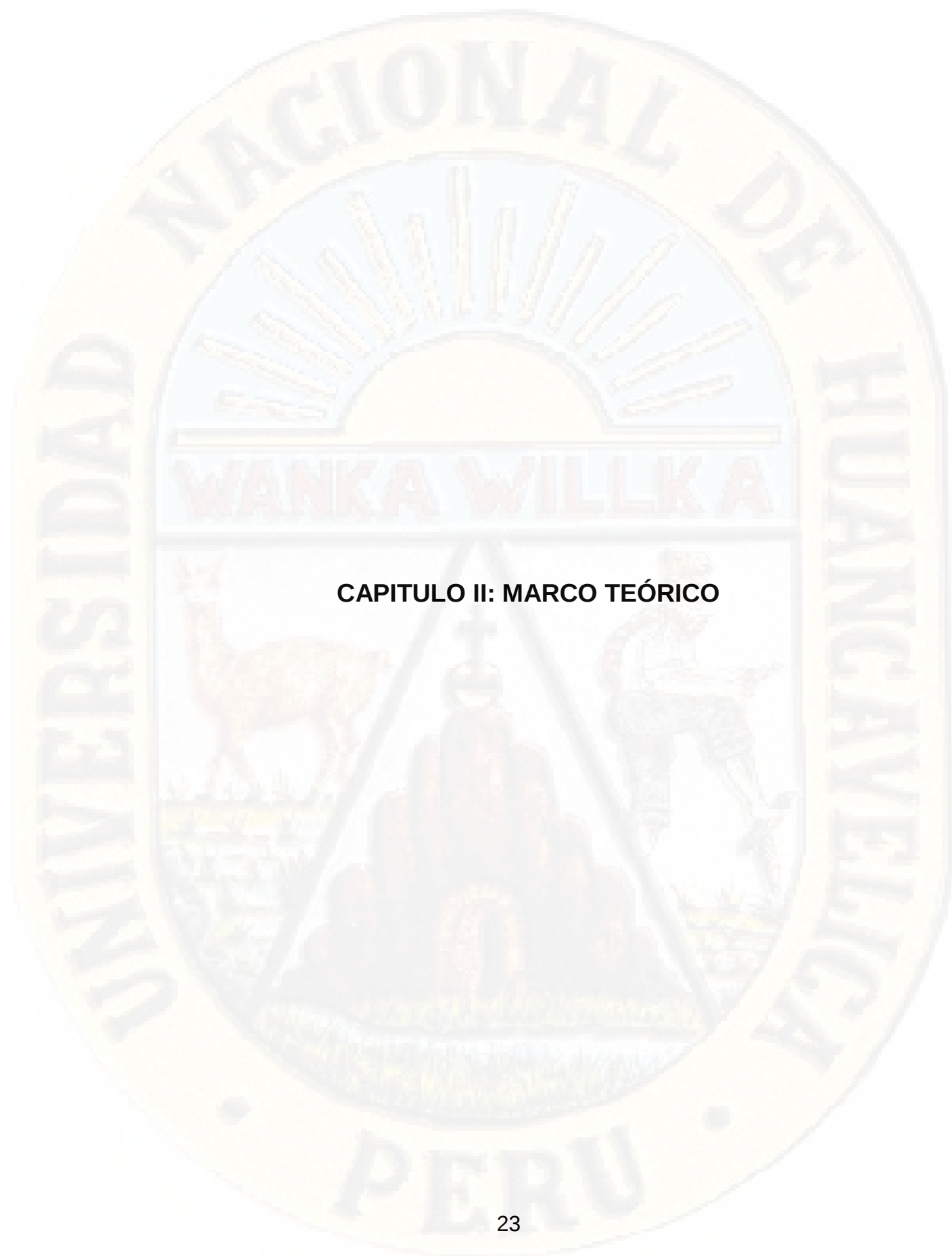
la empresa, lo que trae como consecuencia una reducción de su geometría para extraer la mayor cantidad de mineral, disminuyendo a su vez la estabilidad y seguridad en la mina. Para garantizar el equilibrio dentro de las galerías, estos dos factores se deben desarrollar simultánea y minuciosamente. Debido a lo antes expuesto es necesaria la realización de un estudio amplio que incluya: obtención de las variables geomecánicas presentes en el macizo rocoso, variables geométricas, a fin de aplicar modelos teóricos y fórmulas empíricas que sirvan para establecer un conjunto de dimensiones, que serán analizadas para finalmente seleccionar aquella geometría que cumpla con el factor de seguridad establecido.

Es de gran importancia y trascendencia la aplicación de métodos no destructivos para la determinación del nivel de resistencia y espesores degradados en pilares en nuestra minería, debido a que se daría un paso importante en el desarrollo geomecánico de pilares mineros, aportando bases fundamentales en lo que se refiere a la aplicación de la mecánica de

¹ Reveron H., 2013

rocas, mejorando, optimizando y tecnificando minas actualmente en explotación o futuras que consideren este método adecuado para sus tipos de yacimientos.





CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

La primera clasificación de que se tiene conocimiento surgió en la década de 1940 y fue propuesta por Terzaghi en 1946. En las décadas siguientes surgieron perfeccionamientos a esa clasificación, así como nuevas clasificaciones.

Wickham et al. (1972) citado por Bieniawski (1989) fueron los primeros en ponderar la influencia de los diferentes parámetros que integran la mayoría de las clasificaciones actuales, traduciendo la calidad del macizo a través del índice RSR – Rock Structure Rating.

Bieniawski (1973) designada por RMR – Rock Mass Rating y la de Barton et al. (1974), conocida como Sistema Q. Esas dos clasificaciones, posiblemente sean las más utilizadas actualmente en todo el mundo. Conjuntamente con las demás, se constituyen en importantes herramientas para el diseño de diferentes sistemas de soporte de excavaciones subterráneas en general (túneles, galerías, cavernas).

Laubsher (1977) y Ghose y Raju (1981), entre otros. La clasificación de Laubsher, a pesar de haber sido desarrollada específicamente para minas no carbonosas, tiene importancia porque introdujo el concepto de resistencia a la compresión del macizo, calculado a partir de un índice de calidad del macizo que corrige la resistencia a la compresión uniaxial de laboratorio para las condiciones de la roca in-situ.

US Bureau of Reclamation Engineering², (1977), genera el factor de seguridad para pilares mineros que depende de la cantidad y calidad de la

² Brady & Brown, (2004)

información utilizada para estimar las cargas y la resistencia de la roca. Este factor es la relación resistencia/esfuerzo, el cual deberá ser siempre mayor que la unidad para tener pilares estables, es decir, la resistencia de los pilares deberá ser siempre mayor que el esfuerzo actuante:

- Si la información es gruesa utilizar un factor de seguridad entre 2-3
- Si existen ensayos de laboratorio del macizo rocoso utilizar un factor de seguridad en el rango 1.5-2
- Sin embargo, cuando la información es pobre no existe factor de seguridad que garantice el diseño, se calcula con la siguiente fórmula.

$$fs = \frac{\text{Resistencia del pilar}}{\text{Esfuerzo actuante del pilar}} = \frac{S_p}{\sigma_p}$$

En el inicio de la década de 1980, Hoek y Brown (1980a, 1980b) propusieron un criterio de ruptura basado en ensayos de laboratorio y en dos parámetros que representan las características estructurales de la roca o del macizo rocoso, m y s. Fueron implementados refinamientos en ese criterio de ruptura a lo largo de las últimas décadas. La versión en uso actualmente incorpora tanto el índice GSI – Geological Strength Index, además de sugerir valores para m y s aplicables para las camadas de carbón.

Wilson (1983) fue uno de los primeros investigadores en el área de minería de carbón en sugerir que los resultados de resistencia obtenidos en laboratorio tengan en cuenta aspectos estructurales del macizo rocoso carbonoso, antes de ser utilizados en el diseño de los pilares de minas subterráneas.

Criterios de ruptura semejantes para estimar la resistencia de macizos rocosos fracturados fueron propuesto por Ramamurthy (1986), Kalamaras y Bieniawski (1993) y Sheorey et al. (1997). Para esos autores, la resistencia a

la compresión uniaxial del macizo debe ser estimada a partir de la resistencia de laboratorio corregida por un factor escala basado en el índice RMR de la clasificación geomecánica de Bieniawski.

En 2005, el magister Mario Camilo Torres, presenta su tesis titulada “utilización de los métodos no destructivos –MND- para la determinación de propiedades físico mecánicas en rocas sedimentarias, donde se involucran parámetros de velocidad de ondas de ultrasonido a bajos niveles de deformación.

En 2008, el doctor Javier Martínez presenta desarrolla su tesis doctoral titulada influencia de la alteración sobre las propiedades mecánicas de calizas, dolomías y mármoles. Evolución mediante estimadores no destructivos (Ultrasonido), donde se evidencia una fuerte aplicación de ultrasonidos en rocas.

Gonzatti et al. (2009) propusieron un método de evaluación de la resistencia de macizos con base en resultados de ensayos geofísicos para corregir la resistencia de laboratorio. La resistencia a la compresión y la velocidad de onda, determinadas en laboratorio sobre muestras de pequeñas dimensiones, contempla las características de la roca “casi intacta”.

2.2 BASES TEÓRICAS

De entre las técnicas empíricas utilizadas para estimar la resistencia de macizos, las clasificaciones geomecánicas están entre las más conocidas. La primera clasificación de que se tiene conocimiento surgió en la década de 1940 y fue propuesta por Terzaghi en 1946. En las décadas siguientes surgieron perfeccionamientos a esa clasificación, así como nuevas clasificaciones.

Wickham et al. (1972) citado por Bieniawski (1989) fueron los primeros en ponderar la influencia de los diferentes parámetros que integran la mayoría de las clasificaciones actuales, traduciendo la calidad del macizo a través del índice RSR – Rock Structure Rating. Ese concepto, así como los parámetros estructurales, se diseminaron en las clasificaciones que fueron propuestas en los años siguientes, como la de Bieniawski (1973) designada por RMR – Rock Mass Rating y la de Barton et al. (1974), conocida como Sistema Q. Esas dos clasificaciones, posiblemente sean las más utilizadas actualmente en todo el mundo. Conjuntamente con las demás, se constituyen en importantes herramientas para el diseño de diferentes sistemas de soporte de excavaciones subterráneas en general (túneles, galerías, cavernas). Para macizos de roca carbonosa, la aplicación de clasificaciones geomecánicas para estimar la resistencia de pilares es aún más reciente.

Análogamente, los problemas de minería pasaron también a ser tratados con el uso de métodos empíricos, como los propuestos por Laubsher (1977) y Ghose y Raju (1981), entre otros. La clasificación de Laubsher, a pesar de haber sido desarrollada específicamente para minas no carbonosas, tiene importancia porque introdujo el concepto de resistencia a la compresión del macizo, calculado a partir de un índice de calidad del macizo que corrige la resistencia a la compresión uniaxial de laboratorio para las condiciones de la roca in-situ. Ese parámetro atiende a una necesidad del proyectista de minas subterráneas de carbón, en la medida que brinda uno de los principales elementos necesarios en el diseño de los pilares de sustentación de la cobertura, o sea, la resistencia característica del macizo.

En el inicio de la década de 1980, Hoek y Brown (1980a, 1980b) propusieron un criterio de ruptura basado en ensayos de laboratorio y en dos parámetros que representan las características estructurales de la roca o del macizo

rocoso, m y s. Fueron implementados refinamientos en ese criterio de ruptura a lo largo de las últimas décadas. La versión en uso actualmente incorpora tanto el índice GSI – Geological Strength Index, además de sugerir valores para m y s aplicables para las camadas de carbón. Se trata de uno de los criterios de ruptura que mejor han explicado el comportamiento de los materiales rocosos. Los procedimientos de cálculo y funciones matemáticas utilizadas en este trabajo son los propuesto por Hoek et al., 2002.

Wilson (1983) fue uno de los primeros investigadores en el área de minería de carbón en sugerir que los resultados de resistencia obtenidos en laboratorio tengan en cuenta aspectos estructurales del macizo rocoso carbonoso, antes de ser utilizados en el diseño de los pilares de minas subterráneas. Aunque su propuesta no sea exactamente un criterio de ruptura o una clasificación geomecánica propiamente dicha, para él, los valores de laboratorio deberían sufrir una corrección para la condición in-situ, de acuerdo con la siguiente función:

$$\sigma_{cm} = \frac{\sigma_c}{F}$$

Dónde: σ_{cm} = resistencia in-situ de la camada carbonosa (MPa); σ_c = resistencia del carbón determinada en laboratorio (MPa); F = factor de reducción de la resistencia de laboratorio para la condición in-situ, variando entre 1 y 7, en función de las características estructurales del macizo.

La gran limitación del factor de corrección F es la subjetividad envuelta en la definición de los diferentes tipos rocosos/clases estructurales. Aun así, ese abordaje no deja de ser atractivo, por ser una solución bastante práctica cuando están disponibles solamente informaciones a partir de estudios de laboratorio.

En la misma dirección de cuantificación de la influencia de las discontinuidades en la resistencia del macizo rocoso, Palmstrom (1982, 1985) sugirió la utilización de la frecuencia de juntas por unidad de volumen (JV) como el parámetro más representativo para expresar el grado de fracturamiento de un macizo. A mediados de la década de 1990, el mismo Palmstrom (1995), basado en estudios de laboratorio y una pequeña cantidad de ensayos in-situ sobre rocas duras, propuso el índice R_{Mi} – Rock Mass index, el cual representa la resistencia a la compresión uniaxial in-situ (σ_{cm}). Ese parámetro es expresado por la siguiente función general:

$$R_{Mi} = \sigma_c * J_p$$

Dónde: R_{Mi} = índice que representa la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso, σ_{cm} (MPa); σ_c = resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta determinada sobre cuerpos de prueba con diámetro de 50mm (MPa); J_P = coeficiente de reducción de la resistencia de laboratorio, definido a partir de la ponderación de las características estructurales del macizo, como el tamaño de los bloques individualizados por las fracturas y las características de esas fracturas.

J_P es calculado de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$J_p = 0,2 * \sqrt{J_c} * V_b^D$$

$$J_c = J_l * \frac{J_r}{J_a}$$

$$D = 0,37 * J_c^{-0,2}$$

Dónde: V_b = volumen de los bloques formados por la intersección de las familias de fracturas presentes en el macizo (m³); J_C = factor que expresa las

condiciones de las fracturas de acuerdo con la ecuación encima; jL = factor persistencia de las fracturas; jR = factor rugosidad de las fracturas; jA = factor grado de alteración de las superficies de las fracturas.

Criterios de ruptura semejantes para estimar la resistencia de macizos rocosos fracturados fueron propuesto por Ramamurthy (1986), Kalamaras y Bieniawski (1993) y Sheorey et al. (1997). Para esos autores, la resistencia a la compresión uniaxial del macizo debe ser estimada a partir de la resistencia de laboratorio corregida por un factor escala basado en el índice RMR de la clasificación geomecánica de Bieniawski. El criterio utilizado para el cálculo de la resistencia in-situ difiere muy poco de autor para autor, a no ser por el valor de RMR que varía en función de la versión de la clasificación de Bieniawski utilizada para su computo.

La relación propuesta por Ramamurthy (1986) para estimar la resistencia a la compresión uniaxial in-situ es la siguiente:

$$\sigma_{cm} = \sigma_c * \exp\left(\frac{RMR-100}{18.75}\right)$$

Dónde: σ_c = resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta (MPa); RMR basado en la clasificación de Bieniawski (1974).

El criterio denominado de "Bieniawski genérico", basado en Bieniawski (1974) y sugerido por Kalamaras y Bieniawski (1993), define la resistencia de macizos carbonosos a través de la siguiente expresión:

$$\sigma_{cm} = \sigma_c * \exp\left(\frac{RMR-100}{24}\right)$$

Dónde: σ_c = resistencia a la compresión uniaxial de laboratorio en MPa determinada sobre cuerpos de prueba con diámetro de 25mm y relación altura/diámetro = 2; RMR basado en la clasificación de Bieniawski (1989).

El criterio propuesto por Sheorey (1997) es definido como:

$$\sigma_{cm} = \sigma_c * \exp\left(\frac{RMR-100}{20}\right)$$

Dónde: σ_c = resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta (MPa);
RMR basado en la clasificación de Bieniawski (1976).

Tal vez las más grandes limitaciones de los criterios de Ramamurthy y Sheorey para estimar la resistencia de las camadas de carbón sea la utilización de la clasificación de Bieniawski en su concepción original para túneles, la cual no contempla las particularidades de macizos carbonosos y su importancia en la resistencia del pilar. El criterio de Sheorey, específicamente, no es el más recomendado cuando la orientación de las discontinuidades constituye un factor importante en la estabilidad del macizo.

De entre las tantas clasificaciones geomecánicas propuestas a lo largo de las últimas décadas con diferentes finalidades, se destacan la clasificación propuesta inicialmente por Kalamaras (1993) y refinada por Kalamaras y Bieniawski (1993, 1995). El criterio de ruptura sugerido para el cálculo de σ_{cm} es el siguiente:

$$\sigma_{cm} = 0.5 * \frac{RMR_{manto} - 15}{85} * \sigma_c$$

Dónde: σ_c = resistencia a la compresión uniaxial de laboratorio de la roca intacta; RMR_{manto} = índice de clasificación de la camada de carbón.

Posiblemente sea una de las primeras clasificaciones en incorporar aspectos típicos de las camadas de carbón y su influencia en la resistencia in-situ. En la práctica, esa propuesta conceptual fue una adaptación del sistema RMR

de Bieniawski (1973) para camadas de carbón, asociado a un criterio de ruptura.

Gonzatti et al. (2009) propusieron un método de evaluación de la resistencia de macizos con base en resultados de ensayos geofísicos para corregir la resistencia de laboratorio. La resistencia a la compresión y la velocidad de onda, determinadas en laboratorio sobre muestras de pequeñas dimensiones, contempla las características de la roca “casi intacta”. Ahora, la velocidad de ondas sísmicas es medida in-situ sobre un volumen de macizo que se conoce convencionalmente como “volumen elemental representativo”. En esa condición, incorpora tanto las características presentes en muestras utilizadas en laboratorio, como tiende a incluir aquellas estructuras de grandes dimensiones que influyen sensible y negativamente en la resistencia del macizo rocoso (fracturas, fallas, intrusiones de diabásio, etc.).

La función general de cálculo de σ_{cm} es la siguiente:

$$\sigma_{cm} = \frac{\left(\frac{V_{sismica} * F_1 * F_2}{V_{POUL}} \right)^{0,5} - 0,3}{3} * \sigma_c$$

dónde: σ_c = resistencia a la compresión uniaxial en la dirección perpendicular a los planos de estratificación del carbón, determinada sobre cuerpos de prueba cúbicos con lado menor o igual a 10cm; $V_{sismica}$ = velocidad de propagación de ondas sísmicas compresionales (ondas P), medida en la dirección paralela a los planos de estratificación del carbón; V_{POUL} = velocidad de propagación de ondas ultrasónicas compresionales (ondas P), medida en la dirección paralela a los planos de estratificación del carbón; F_1 = factor de corrección de la velocidad de ondas sísmicas debido al efecto de la tensión in-situ; F_2 = factor de corrección de la velocidad de ondas sísmicas en función de las condiciones de humedad de la roca.

2.3 FORMACIÓN DE HIPÓTESIS

2.3.1 Hipótesis general

Los métodos no destructivos influyen directamente en el dimensionamiento, estabilidad y efecto a escala, de pilares mineros de roca fosfórica.

2.3.2 Hipótesis específicas

- a) El conocimiento de la información topográfica, geológica, estructural y geotécnica de la zona de estudio, son la base fundamental para el inicio de la investigación.
- b) La descripción de las propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso, influyen directamente con el dimensionamiento de pilares mineros.
- c) El conocer las velocidades de ondas P, insitú y refracción sísmica alrededor de los pilares, está directamente relacionado con el efecto anisótropo de la roca.
- d) El conocer la influencia del agua en velocidades de ondas de ultrasonido, influyen en la resistencia de los pilares mineros.
- e) La comparación de la resistencia de pilares aplicando diferentes teorías de análisis de resistencia, influyen en la certidumbre del proyecto.
- f) El cálculo de la estabilidad de pilares, se relacionan con las condiciones actuales del laboreo minero.

- g) Las obtenciones de propiedades dinámicas de resistencia a bajos niveles de deformación se relacionan con la caracterización del tipo de roca.

2.4 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Compresión Uniaxial: puede ser simplemente la fuerza resultante que actúa sobre una determinada sección transversal al eje baricéntrico de una probeta de roca.

In situ: es una expresión latina que significa «en el sitio» o «en el lugar», y que suele utilizarse para designar un fenómeno observado en el lugar, o una manipulación realizada en el lugar.

Ultrasonido: vibración mecánica de frecuencia superior a la de las que puede percibir el oído. "las frecuencias que superan las 20000 vibraciones por segundo son los ultrasonidos"

Macizo rocoso: Conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. Presenta carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo, consecuencia de la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad, que condicionan su comportamiento geomecánico e hidráulico.

Matriz Rocosa: 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.

Ondas Sísmicas: son un tipo de onda elástica fuerte en la propagación de perturbaciones temporales del campo de tensiones que generan pequeños movimientos en las placas tectónicas.

Estratificación: es la propiedad que tienen las rocas sedimentarias de disponerse en capas o estratos, uno sobre otros en una secuencia vertical.

Métodos no destructivos: tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales.

Pilar: Es un elemento de soporte o sostén de una mina subterránea, de orientación vertical o casi vertical, destinado a recibir cargas (de compresión generalmente).

Estabilidad: que mantiene el equilibrio, no cambia o permanece en el mismo lugar durante mucho tiempo). El término procede del latín *stabilis*.

Ondas P: es una onda mecánica en la que el movimiento de oscilación de las partículas del medio es paralelo a la dirección de propagación de la onda. Las ondas longitudinales reciben también el nombre de ondas de presión u ondas de compresión.

Ondas S: Una onda transversal es una onda en la que cierta magnitud vectorial presenta oscilaciones en alguna dirección perpendicular a la dirección de propagación.

Carga Axial: Fuerza que actúa a lo largo del eje longitudinal de un miembro estructural aplicada al centroide de la sección transversal del mismo produciendo un esfuerzo uniforme. También llamada fuerza axial.

Módulo de Young: El módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.

Saturación: La fracción de agua de un espacio poral dado. Se expresa en volumen/volumen, porcentaje o unidades de saturación.

Transductor: Dispositivo que tiene la misión de recibir energía de una naturaleza eléctrica, mecánica, acústica, etc., y suministrar otra energía de diferente naturaleza, pero de características dependientes de la que recibió.

Factor de seguridad: es el cociente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real a que se verá sometido.

Esfuerzo: tasa de cambio de la cantidad de movimiento, empleada contra una resistencia.

Pulso: es una perturbación de corta duración generada en el estado natural de un punto de un medio material que se transmite por dicho medio.

Cámara de explotación minera: término que se usa para definir el área excavada en minería con secciones medianas a grandes en minería subterránea.

2.5 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Las variables en la investigación, representan un concepto de vital importancia dentro de un proyecto. Las variables, son los conceptos que forman enunciados de un tipo particular denominado hipótesis.

2.5.1 Variable independiente

Fenómeno a la que se le va a evaluar su capacidad para influir, incidir o afectar a otras variables. Su nombre lo explica de mejor modo en el hecho que de no depende de algo para estar allí; dicho de otro modo, es aquella característica o propiedad que se supone ser la causa del fenómeno estudiado.

2.5.2 Variable dependiente

Cambios sufridos por los sujetos como consecuencia de la manipulación de la variable independiente por parte del investigador. En este caso el nombre lo dice de manera explícita, va a depender de algo que la hace variar; propiedad o característica que se trata de cambiar mediante la manipulación de la variable independiente. (Las variables dependientes son las que se pueden medir). Las variables pueden ser clasificadas como cuantitativas o cualitativas:

- ✓ Los datos cuantitativos o medidos, representan una cantidad o un número.
- ✓ Los datos cualitativos proporcionan etiquetas o nombres, observaciones.

Los datos cuantitativos se pueden dividir en:

- Variable discreta: Todos los valores que consiste sólo en puntos aislados.
- Variables continuas: Todos los valores que consisten en intervalos.

Teniendo en cuenta los párrafos anteriormente descritos, el presente trabajo de investigación en su objetivo general y específicos, considera para la aplicación de los métodos no destructivos en la estabilidad de pilares de rocas fosfórica, las siguientes variables:

a. Variables independientes

- Método de explotación
- Velocidad de ondas sísmicas
- Velocidad de ondas de ultrasonido a bajos niveles de deformación
- Resistencia de la roca a compresión uniaxial
- Velocidad de ondas sísmicas

b. Variable dependiente

- Ancho del pilar
- Altura del pilar
- Resistencia del pilar
- Densidad de fracturación del macizo rocoso (RQD)
- Saturación del macizo rocoso
- Resistencia del macizo rocoso
- Esfuerzo sobre los pilares
- Factor de seguridad de los pilares
- Factor de corrección de la velocidad de ondas sísmicas debido al efecto de la tensión in-situ
- Factor de corrección de la velocidad de ondas sísmicas en función de las condiciones de humedad de la roca.

2.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

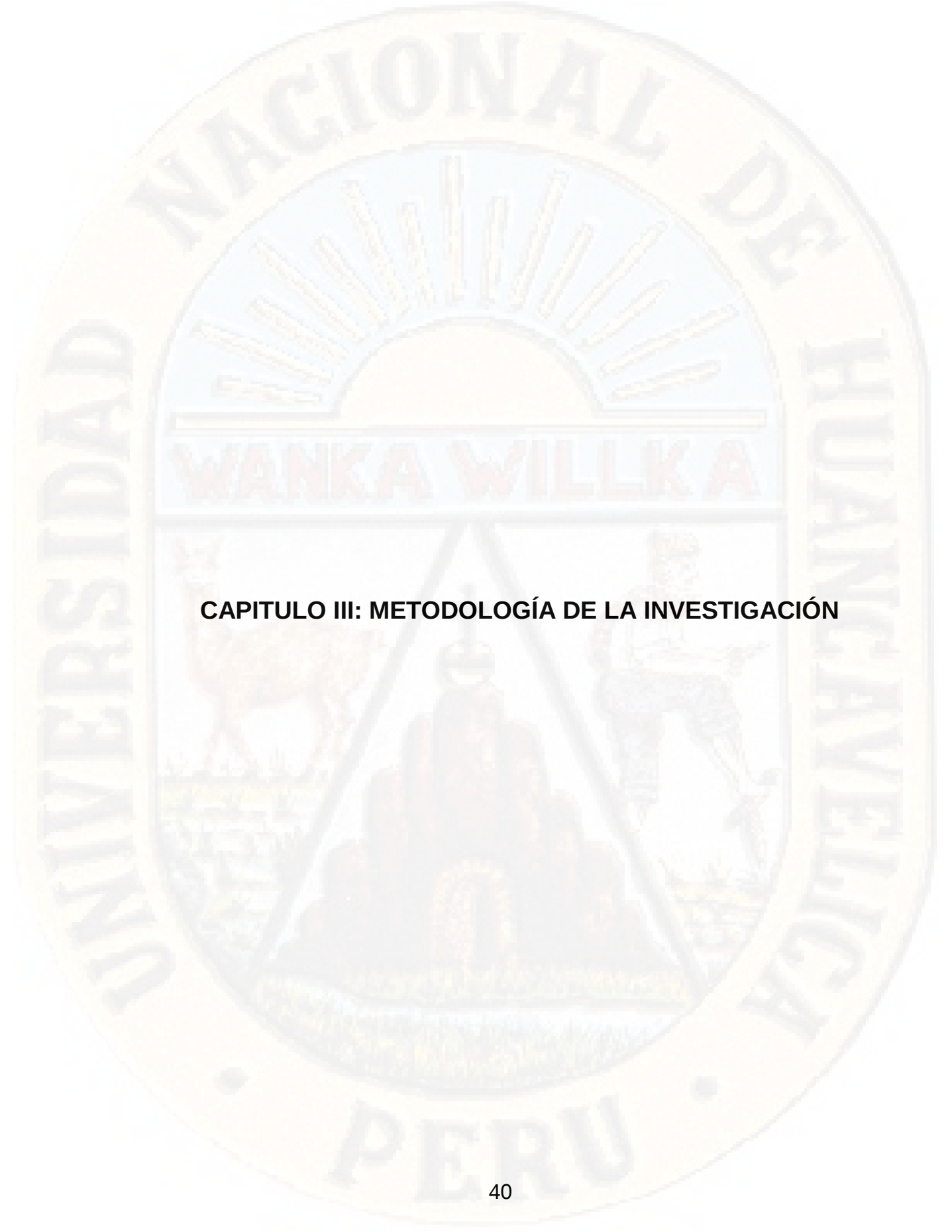
El término variable se define como las características o atributos que admiten diferentes valores. Existen muchas formas de clasificación de las variables, no obstante, en esta sección se clasificarán de acuerdo con el sujeto de estudio y al uso de las mismas.

La operación de variables es un proceso que se inicia con la definición de las variables en función de factores estrictamente medibles a los que se les llama indicadores. El proceso obliga a realizar una definición conceptual de las variables para romper el concepto difuso que ella engloba y así darle sentido concreto dentro de la investigación, luego en función de ello se procede a realizar la definición operacional de la misma para identificar los

indicadores que permitirán realizar su medición de forma empírica y cuantitativa, al igual que cualitativamente llegado el caso.

Tabla 1. Operacionalización de variables

VARIABLES	INDICADORES
➤ Método de explotación ➤ Velocidad de ondas sísmicas ➤ Velocidad de ondas de ultrasonido a bajos niveles de deformación ➤ Resistencia de la roca a compresión uniaxial ➤ Velocidad de ondas sísmicas	Análisis de las ondas longitudinales, in situ y en laboratorio de ultrasonido y refracción sísmica. Atenuación de las ondas, en medio fracturados. Correlación y efecto a escala por medio de ondas longitudinales Comportamiento de ondas longitudinales respecto a cargas axiales
➤ Ancho del pilar ➤ Altura del pilar ➤ Resistencia del pilar ➤ Densidad de fracturación del macizo rocoso (RQD) ➤ Saturación del macizo rocoso ➤ Resistencia del macizo rocoso ➤ Esfuerzo sobre los pilares ➤ Factor de seguridad de los pilares ➤ Factor de corrección de la velocidad de ondas sísmicas debido al efecto de la tensión in-situ ➤ Factor de corrección de la velocidad de ondas sísmicas en función de las condiciones de humedad de la roca.	Análisis de la geometría de los pilares bajo su estado de esfuerzos actuales. Redimensionamiento de los pilares. Determinación de la estabilidad de los pilares. Resistencia de los pilares mineros Saturación de las rocas Fracturamiento de las rocas

The logo of the Universidad Nacional de Huancavelica, Peru, is a circular emblem. It features a central shield with a sun rising over a mountain range, flanked by a llama on the left and a figure on the right. The text "WANKA WILLKA" is written across the middle of the shield. The outer ring of the logo contains the text "UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCavelica" and "PERU".

CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Según, Hernández, Fernández, & Baptista, (2003), Hay estudios exploratorios, descriptivos, correlacionales, y explicativos.

La presente investigación es analítica y descriptiva pues se recolectarán datos de campo que posteriormente serán analizados considerando que la investigación descriptiva busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice (Hernández, Fernández, & Baptista, Tipos de investigación, 2003).

Al culminar la aplicación de los métodos no destructivos en la estabilidad de pilares en minas de roca fosfórica, se espera obtener una relación confiable, que sea aplicada para el dimensionamiento de cámaras y pilares, en minas subterráneas.

3.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

En los niveles de investigación pueden ser consideradas los siguientes:

3.2.1 Descriptivo

Describe las características del macizo rocoso bajo algunos criterios expuestos a través de los tiempos, su finalidad es describir y/o estimar parámetros, se describen frecuencias y/o promedios, y procedimientos de tendencia central, se estiman parámetros con intervalos de confianza.

3.2.2 Analítico

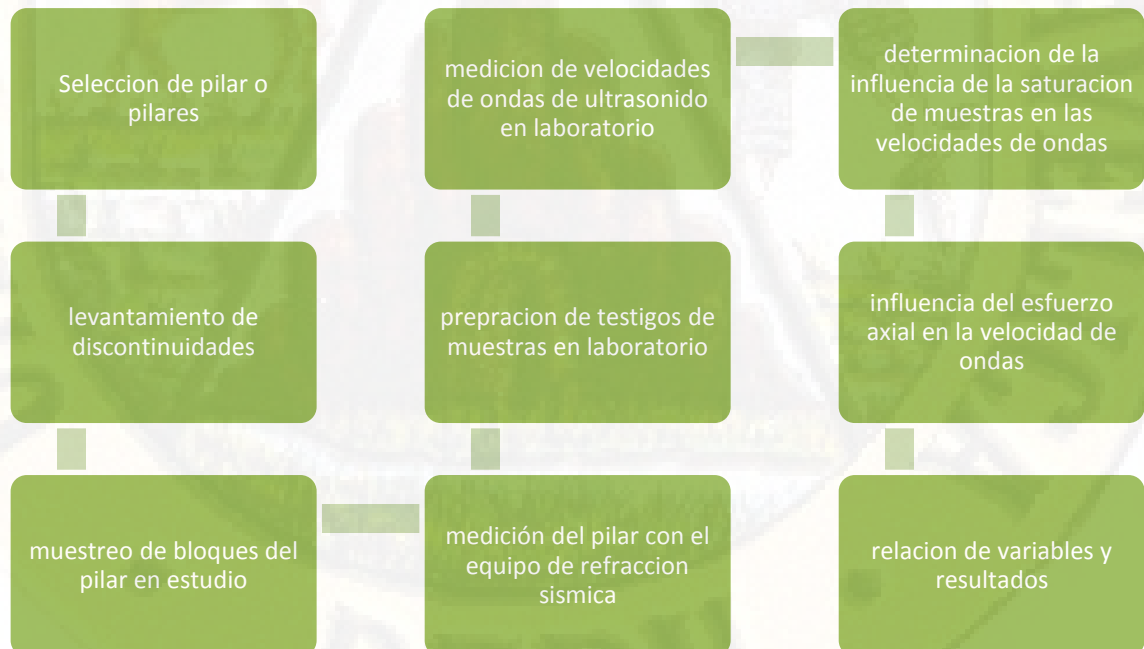
En el post-proceso de recojo de datos se hace el proceso de cálculo y análisis de datos para posteriormente realizar los diseños correspondientes.

3.3 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

En el presente trabajo de investigación se utilizó el método de investigación experimental. El método de investigación experimental, será el elegido en el presente trabajo de investigación, debido a que se ajusta al tema, para su desarrollo requiere un diagrama de flujo donde se expresa desde el inicio hasta el fin de la investigación, para concluir nuestras hipótesis.

El diseño experimental es la secuencia completa de pasos que se toman de antemano para asegurar la obtención de datos apropiados, tales que permitan un análisis objetivo que conduzca a ecuaciones válidas con respecto al problema establecido. El aplicar diseños experimentales en trabajos de investigación hace posible detectar numéricamente, diferencias o semejanzas reales. Las inferencias se hacen sobre bases medibles de probabilidad.

Ilustración 1. Diagrama de flujo aplicación de métodos no destructivos



3.4 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.4.1 Unidad Experimental

Es la unidad de material a la cual se aplica un tratamiento. La investigación experimental está integrada por un conjunto de actividades metódicas y técnicas que realizan para recabar la información y datos necesarios sobre el tema a investigar y el problema a resolver. La investigación experimental se presenta mediante la manipulación de una variable no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular. El experimento es una situación provocada para introducir determinadas variables de estudio, que han de ser manipuladas para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas.

3.5 POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

3.5.1 Población

La población es la totalidad explotaciones mineras subterráneas de roca fosfórica que aplican el método de cámaras y pilares en su explotación, presentes en la vereda Pilar y Ceibita, del municipio de Sogamoso – Boyacá.

3.5.2 Muestra

La muestra es no probabilística e intencionada, la que está conformada por el pilar número 1 entre los niveles 3 y 4 del banco de roca fosfórica, en la mina Carolina, del municipio de Sogamoso.

3.5.3 Muestreo

El muestreo aplicado en la presente investigación corresponde al muestreo probabilístico que permite basarse en el principio de equiprobabilidad, es decir que toda la matriz rocosa de los pilares de roca fosfórica tienen la misma posibilidad de ser elegidos como muestras, estos métodos nos

aseguran la representatividad de las muestras, además debido a que se seleccionó por uniformidad y facilidad para las mediciones el Pilar 1 – niveles 3 y 4, se requiere realizar un muestreo aleatorio en dicho pilar.

3.6 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.6.1 Técnicas de recolección de datos

Las técnicas aplicadas para este trabajo de investigación son los datos de campo (In-situ), correspondientes a los obtenidos de la misma explotación de roca fosfórica, a través de inspecciones visuales, conceptos técnicos, perfiles estratigráficos, muestras de laboratorio. Adicionalmente se obtienen datos de oficina originados por el proceso de análisis de muestras en laboratorio (ensayo de ultrasonido en rocas y sísmica de refracción)

3.6.2 Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos utilizados se muestran a continuación:

- Brújula, flexómetro, estación total, equipo de refracción sísmica, equipo de ultrasonido, martillo geológico.
- Software de Microsoft Office, donde se utilizaron los programas Word, Excel y PowerPoint, para la elaboración del informe y el procesamiento de los datos, AutoCAD (para la digitalización de planos), RocLab (aplicación del criterio de Hooke – Brown), Cats Ultrasonics (para procesamiento de las ondas de ultrasonido).
- Acceso a Internet, para la búsqueda de información referencial.
- Recursos de oficina, como lápices, lapiceros y papel para el registro de la información durante el muestreo y el proceso de observación directa. Además, un computador para la elaboración del informe.

3.7 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Se hará uso de técnicas de codificación, tabulación consiste en la elaboración de tablas y cuadros de consistencia para luego en función a

estos cuadros elaborados se puede realizar el análisis respectivo con el apoyo de un ordenador específico es el software Excel y otros.

3.7.1 Codificación

Codificar los datos significa asignarles un valor numérico que los represente. Es decir, a las categorías de cada ítem y variable se les asignan valores numéricos que tienen un significado en cada variable. Para el caso de esta investigación cada muestra de roca fosfórica esta codificada con una letra y un número que facilita la identificación de la misma.

3.7.2 Tabulación

Es la construcción de tablas e ilustraciones requerida por el estudio en donde cada variable tiene su título respectivo, con los cuales se ha elaborado una base de datos en el ordenador.

3.7.3 Consistencia

En la consolidación del presente trabajo de investigación se requiere tablas e ilustraciones que facilitará su interpretación, para evitar redundancia o incongruencias de los datos, se definieron variables, dimensiones.

3.8 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS

Entre las características geomecánicas del macizo rocoso de roca fosfórica se encuentra el análisis de discontinuidades, donde se identificaron dos familias de discontinuidades sobre el pilar cuyo buzamiento y dirección de buzamiento son: Plano de estratificación – 21/325 y Familia 1 – 88/49. También se analizó las propiedades físicas de la matriz rocosa logrando establecer que su o específico promedio en estado natural de la roca fosfórica es de 25 KN/m³, con una saturación bastante alta del 96.06 %, lo cual es muy importante para análisis de estabilidad de pilares por medio de

métodos no destructivos y una humedad baja del 12.43%, lo cual es una roca seca.

Es importante destacar que se elaboraron en laboratorio probetas de rocas cilíndricas con una esbeltez de 2 y cubicas que se asemejan a la forma de los pilares en la explotación minera con un efecto a escala, dichas muestras presentan resultados de esfuerzo a compresión uniaxial en promedio de 18 Mpa.

Aplicando la clasificación del MRMR de Bieniawski, se obtuvo en la clasificación del MRMR, una puntuación de 60, el macizo roco en de clase III, roca regular, la cual puede sostenerse por sí misma 1 semana para un claro de 5 m libres, con una cohesión que se encuentra entre 200 a 300 KPa y un ángulo de fricción que oscila entre 25 a 35°. Cabe resaltar que, al realizar el análisis de las probetas para el ensayo de ultrasonido, los pilares de la mina de roca fosfórica carolina, en su conjunto se diferencian dos tipos de roca fosfórica de color gris y café amarillento respectivamente, por lo cual se optó que la resistencia del macizo rocoso puede ser la misma en cada uno de ellos y así el muestro se unifico para un solo resultado en conjunto, dado como resultado una velocidad de 2279,71 m/s, en sentido de piso a techo de la estructura.

Desacuerdo con el esfuerzo uniaxial, en la medida en que se aumenta el volumen del espécimen de roca, aumenta la posibilidad que haya influencia de características geo estructurales con lo cual el esfuerzo a la compresión uniaxial decrece proporcionalmente, con lo cual nos damos cuenta que la resistencia de los pilares de roca fosfórica va a tener un valor mucho menor que la resistencia de las probetas de esbeltez 2, sometidas a compresión simple. Es de aclarar que a medida que se aplica compresión uniaxial a las muestras en sentido de la toma de velocidades de ultrasonido estas

aumentan proporcionalmente a la carga aplicada. Debido a que la roca puede presentar diferentes estados de humedad dependiendo de las condiciones que presente la explotación por cámaras y pilares en la mina de roca fosfórica carolina, se presentan diferentes factores de corrección por humedad.

El esfuerzo vertical, teniendo en cuenta la secuencia estratigráfica se calculó con un peso específico promedio de 23 KN/m^3 , con una cobertura determinada de 78 m, generando un resultado de 1.794 MPa.

Con la relación modificada que propuesto Clovis Gonzatti en el año 2007, se obtuvo una resistencia del macizo rocoso de roca fosfórica de 3.62 MPa, la cual está dentro de los parámetros para el diseño de pilares en minería subterránea, para los yacimientos de roca fosfórica. el factor de seguridad determinado fue de 1.77, el pilar posee una buena estabilidad para la explotación minera, con lo cual se pudiera sugerir el redimensionamiento del método de cámaras y pilares, donde se aumente el ancho de las cámaras, con el fin de obtener una mayor razón de explotación.



CAPITULO IV: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 PRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS

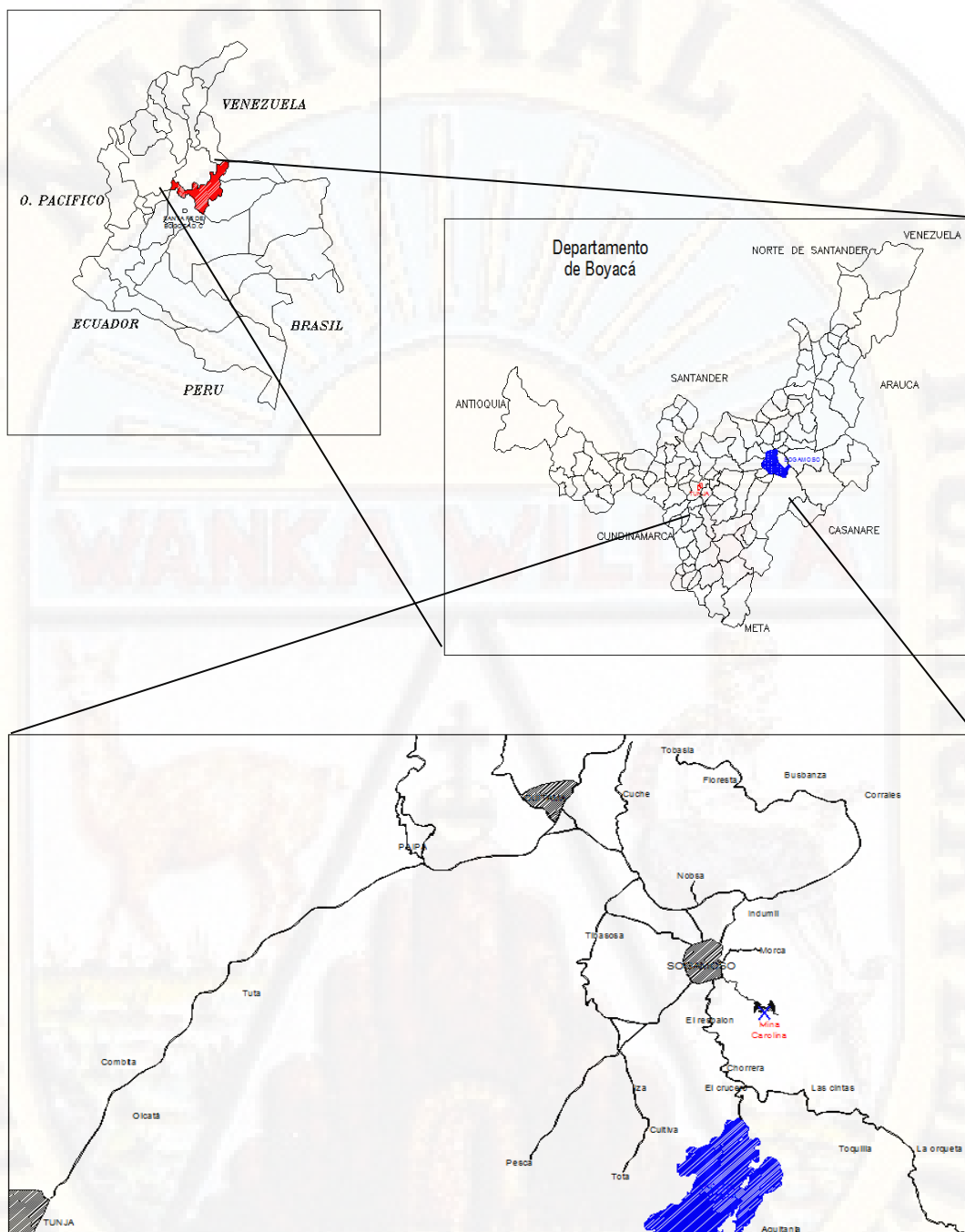
4.1.1 Localización del proyecto

Este proyecto se ejecutó en la mina de Roca fosfórica llamada Carolina, la cual se localiza en la vereda Pilar y Ceibita, al sureste del Municipio de Sogamoso -Boyacá – Colombia (ver Ilustración 2).

Topográficamente, la zona corresponde a la plancha 192-1-A-2-a del Instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y se encuentra definida a través del Contrato en virtud de aporte 696R³, con Registro Nacional Minero del 17 de Junio de 2002, con una duración de 10 años. El título minero tiene un área contratada de 30 hectáreas y 813.7766 metros cuadrados, limitada por las coordenadas mostradas en el Tabla 2.

³FOSFATOS BOYACÁ. Informe de amojonamiento contrato 696R, roca fosfórica. p. 5.

Ilustración 2. Localización y vías de acceso mina Carolina



Fuente: Autor del proyecto

Tabla 2. Coordenadas polígono contrato en virtud de aporte 696R

PUNTO INICIAL	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE
PA	1119695,000	1130535,0000
1	1119369,2120	1130369,2120
2	1119306,4370	1130543,5630
3	1119212,8710	1130637,1290
4	1119145,9670	1130570,2260
5	1118884,5830	1130308,9350
6	1118743,1620	1130450,3560
7	1118505,0000	1130212,5000
8	1118859,3100	1129859,3100

Fuente: Informe de amojonamiento contrato 696R

4.1.2 Vías de acceso

La mina de roca fosfórica bajo en contrato en virtud de aporte No. 696R, cuenta con una única vía recibada de acceso, la cual conduce de Sogamoso hacia la vereda Pilar y Ceibita.

4.1.3 Rasgos fisiográficos

Hidrología. Las corrientes hídricas principales son las Quebradas El Hatillo y Honda, las cuales corren dirección sureste y noreste. El Río Monquirá es la cuenca más importante del municipio, todas las corrientes que lo conforman nacen en la loma Piedrehierro y el alto el Toldo por encima de los 3400 m.s.n.m., tiene un recorrido relativamente corto de sur a norte, presenta afluentes principales las quebradas La Honda, El Hatillo y La Chorrera⁴.

Clima y vegetación. En la zona se encuentran alturas que oscilan entre 2600 y 3600 m.s.n.m con una temperatura promedio de 9°C, correspondiente a una zona ecológica de Bosque Seco Montano Bajo⁵. La

⁴ IBÍD. , p 6.

⁵ FOSFATOS BOYACÁ. Informe de amojonamiento contrato 696-R roca fosfórica. p. 6.

vegetación típica está constituida por cedrillos, cuchara, ayuelo, chilcos, hiedras, mortiño y además de encuestras bosques de eucaliptos y pinos.

Suelos. El área está comprendida en un plano estructural con una cubierta de poco espesor rico en materia orgánica, los suelos están formados a partir de Lutitas y areniscas, con baja a media fertilidad, característicos de clima frío húmedo, de regular a bien drenados moderadamente profundos y saturados de erosión ligera a moderada, presentan fenómenos deslizamientos poco evolucionados⁶.

4.1.4 Geología

Geología general

La estratigrafía de la región de Sogamoso consiste en rocas sedimentarias de composición variada de la secuencia Cretácico Terciario⁷, comprendida entre los períodos Coniaciano y Eoceno cubierta en algunos sitios por sedimentos cuaternarios. Las formaciones que se presentan a continuación, son las que se encuentran en el sitio de estudio y van ordenadas cronológicamente de la más antigua a la más reciente.

- a. Formación Conejo (kscn).
- b. Formación Ermitaño (kse).
- c. Formación Guaduas (Ktg).

⁶ IBÍD. p. 7.

⁷TATIS LUQUE, Alfredo y BAILON GONZALEZ, William. Trabajo de grado, Elección y diseño del método de explotación del manto de roca fosfórica, concesión 796-15 ubicada en la vereda pilar y Ceibita del municipio de Sogamoso departamento de Boyacá. P 20 a 25.

- d. Formación Socha Inferior (tpsi).
- e. Formación Socha Superior (tpss).
- f. Formación Picacho (tpe).

Geología local

La roca Fosfórica de la Cuenca de Boyacá, se encuentra con facies calcáreas, arcillas y Cherts que caracterizan al Grupo Guadalupe de la edad Cretáceo. La capa de interés económico se encuentra en la Formación Ermitaño, que hace parte del Sinclinal El Pilar (ver Plano geológico Local).

Las características principales, es la vista que presenta el flanco oriental del sinclinal fallado de Pilar, el cual termina en el Alto del Montón. Los bordes de la Quebrada del El Hatillo dan pendientes fuertes hasta verticales, lo mismo que los extremos de los flancos del sinclinal de Pilar.

Debido a la actividad tectónica, se presentan geoformas que están dominadas por topografía abrupta predominante en el área de estudio, denotándose pendientes que oscilan desde el 50% hasta el 65% y en las veredas primera y segunda chorrera pendientes entre el 8% y 12% en el sector de San Martín. Estas pendientes favorecen la dinámica fluvial que ha erosionado los niveles blandos y afectado los niveles duros dando origen a profundos cañones como el de la quebrada chorrera.

En algunos sectores hay huellas de deslizamientos como en el eje erosionado del anticlinal Chorrera y rastros recientes de movimientos en masa (reptación), en especial en los sitios con pobre cobertura vegetal, debido al desmantelamiento de esta por talas y quemas indiscriminadas.

Estratigrafía

Formación Ermitaños (Kse)

Cartografiada por Renzoni (1981) y por Reyes (1984) ⁸. La secuencia completa de esta formación se encuentra en la micro cuenca de la quebrada el Tirque, en el sector de las lajas, además en el área de estudio afloran los tres miembros encontrados en la secuencia estratigráfica en la quebrada el Hatillo y Dichavita.

Miembro inferior: Está compuesto generalmente de chert, liditas, limolitas silíceas y areniscas de grano fino laminadas de color negro a gris intercaladas con arcillolitas de pocos centímetros de espesor y pequeñas capas de roca fosfórica de color gris, bastante fosilíferas.

Miembro medio: Es un nivel blando compuesto básicamente por arcillolitas (shales), blandos, fisibles, con algunas intercalaciones de lidita y areniscas, en la parte superior se encuentran dos pequeños bancos de caliza lumaquéllica, muy característica en todos los sitios donde se encuentre este miembro.

Miembro Superior. Está constituido por shales calcáreo, siendo característico un banco de caliza lumaquéllica de ostreas hacia la zona media. La parte extrema superior está compuesta de areniscas cuarzosas duras en bancos que forman escarpes característicos. La arenisca de techo es de grano mediano a grueso, glauconita y contiene gran variedad de fósiles marinos.

⁸ VIVAS BARRERA, Héctor Mauricio. Trabajo de grado, evaluación geológica y cálculo de reservas de roca fosfórica en el sector Pilar y Ceibita, mina “la Carolina”, municipio de Sogamoso (Boyacá). p 18 a 23.

Geología estructural

El sector de estudio presenta numerosos pliegues y fallas que forman estructuras complejas⁹ y denotan los grandes esfuerzos comprensivos a que ha estado sometida esta región de la cordillera oriental, las cuales han dejado indicios claros para su identificación como espejos de falla, cambios bruscos en la topografía y cambios de drenaje, entre otros.

Tectónicamente la zona está dominada por fallas de tipo inverso y direccional. Situación que afecta notoriamente al comportamiento de la roca fosfórica.

La tendencia dominante de las estructuras presenta una dirección NE. En donde los rumbos varían de N 30-75E con buzamientos muy cambiantes, En el área se presentan replegamientos en rocas poco competentes como son liditas, chert y arcillolitas; las principales estructuras son:

Sinclinal del Pilar

Su eje presenta una dirección NE-SW, sus Flancos se consideran simétricos, y los bancos de roca fosfórica se encuentran en ambos flancos, la Mina La Carolina hace parte de su flanco oriental.

Anticlinal la chorrera o el volador

En el área de estudio se encuentran el flanco occidental invertido en la vereda Segunda Chorrera y el Sector San Martín cuyo eje se orienta en dirección N 45-E. En el flanco oriental se encuentran la mina Santamaría.

⁹ FOSFATOS BOYACÁ. Informe de amojonamiento contrato 696-R roca fosfórica. Pág. 9.

El evento principal del sector lo constituye la falla el Hatillo, la cual se localiza al NE del sinclinal la cual corre a lo largo de la quebrada del mismo nombre con dirección N 50° E y la Falla de Monguí que es de tipo inverso y de influencia regional. Se considera de tipo direccional afectando el flanco Este del sinclinal del pilar, es una falla satélite de la falla de Gámeza que afecta las rocas competentes de la formación Ermitaño.

Fallas

Existen dos fallas importantes en la zona; una de ellas es paralela a la quebrada el Hatillo y delimita el Sinclinal con dirección SW-NE y otra longitudinal, corriendo a lo largo de la Quebrada Dichavita con dirección NS aproximadamente.

Tectónica Regional

El área tectónicamente es afectada por varios eventos compresionales; los cuales arrojaron como resultado de la formación de amplias estructuras anticlinales y sinclinales encontrándose el eje sinclinal fallado de pilar con una dirección preferencial de N 25° E y buzamientos de 20W en el flanco oriental y 40° E en el flanco occidental.

Tectónica Local

El área local es tectónicamente estable, hace parte del flanco oriental del sinclinal fallado de pilar, con un rumbo de N 50° E y un buzamiento de 20° NW. En superficie se observa un pequeño pliegue de areniscas, pero no se representa en las capas de roca fosfórica.

Geología del yacimiento

El yacimiento de roca fosfórica está contenido en la formación Ermitaño, por medio de la deposición de organismos marinos, el cual se presenta de forma

tabular con rumbo N 50° E, un buzamiento aproximado de 23°NW y un espesor de 5 m en promedio.

El manto se muestra poco diaclasado, con apariencia consistente y con respaldo tanto de techo liditas y de piso areniscas. La roca fosfórica es de color pardo claro a gris, alguno amarillento o rojizo por la presencia de óxidos y mineral arcilloso, estructura maciza, dureza desde blanda hasta dura y textura media a fina. Se identificó dos clases de fosforitas que difieren en color gris y pardo claro, en porosidad y resistencia a la compresión, las cuales forman en su conjunto el banco de mineral de roca fosfórica.

El manto se muestra poco diaclasado, con apariencia consistente y con respaldo tanto de techo liditas y de piso areniscas. La roca fosfórica es de color pardo claro a gris, alguno amarillento o rojizo por la presencia de óxidos y mineral arcilloso, estructura maciza, dureza desde blanda hasta dura y textura media a fina. Se identificó dos clases de fosforitas que difieren en color gris y pardo claro, en porosidad y resistencia a la compresión, las cuales forman en su conjunto el banco de mineral de roca fosfórica.

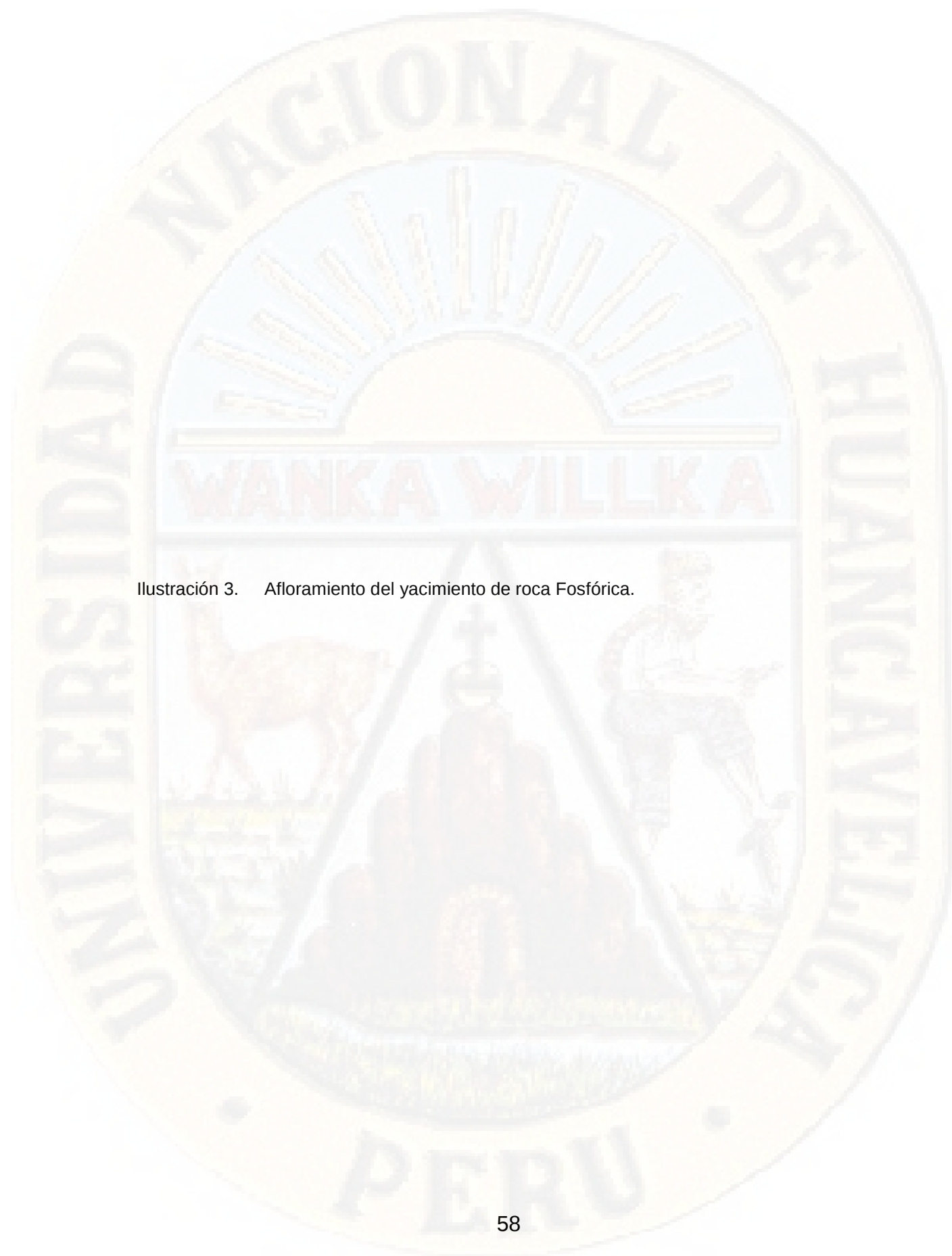


Ilustración 3. Afloramiento del yacimiento de roca Fosfórica.



Fuente: Resultados del proyecto

Las características físicas y mecánicas del banco de roca fosfórica, asociado con su poco diaclasamiento son óptimas para la extracción por medio del método de explotación por cámaras y pilares. La zona se encuentra limitada por dos fallas las cuales no presentan mucha afectación sobre la estabilidad del banco de roca fosfórica en la zona de la vereda de Pilar y Ceibita.

Caracterización geomecánica del macizo rocoso

Análisis de discontinuidades

El objetivo del análisis de discontinuidades es determinar el nivel de fracturamiento del pilar y su influencia en la estabilidad del mismo.

Se realizó un levantamiento de 50 discontinuidades, correspondientes al pilar 1 localizado entre el nivel 3 y 4 inferior de la mina de roca fosfórica (ver instrumento de recolección de datos). Dicho levantamiento consta de características propias para cada discontinuidad como lo son: Tipo, espaciado, continuidad en el rumbo, continuidad en el buzamiento, abertura y rugosidad (ver Anexo plano geotécnico). El relleno no fue tomado en cuenta, debido a que no se presenta en ninguna discontinuidad. El análisis de discontinuidades se hace por medio del programa Dips, cuyos resultados se presentan a continuación.

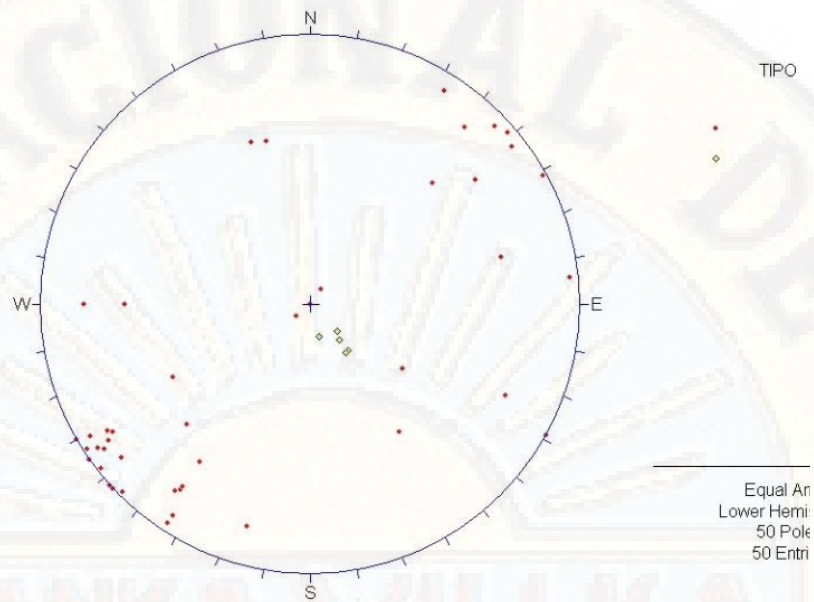
Diagrama de Polos

Según los datos del levantamiento de discontinuidades se analizaron 45 diaclasas y 5 estratificaciones cuya distribución de polos se observa en la Ilustración 4.

Diagrama de contornos

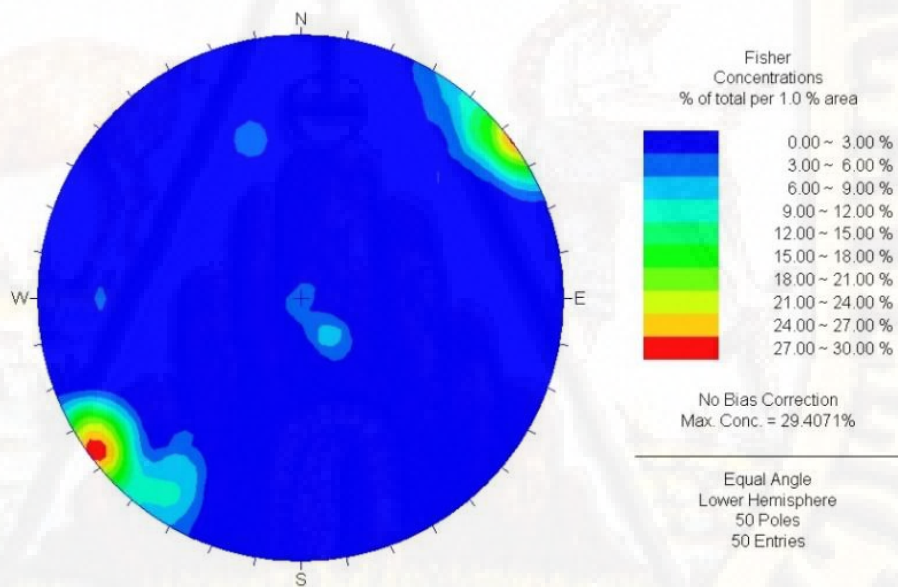
Según el análisis con el programa Dips, se tiene una concentración máxima de polos del 29.4071%, lográndose observar principalmente dos sectores de gran influencia, uno de planos que siguen la estratificación y otro de planos aproximadamente verticales, como se puede observar en la Ilustración 5.

Ilustración 4. Diagrama de polos del pilar en análisis



Fuente: Resultados del proyecto, análisis de datos programa Dips

Ilustración 5. Diagrama de contornos del pilar en análisis

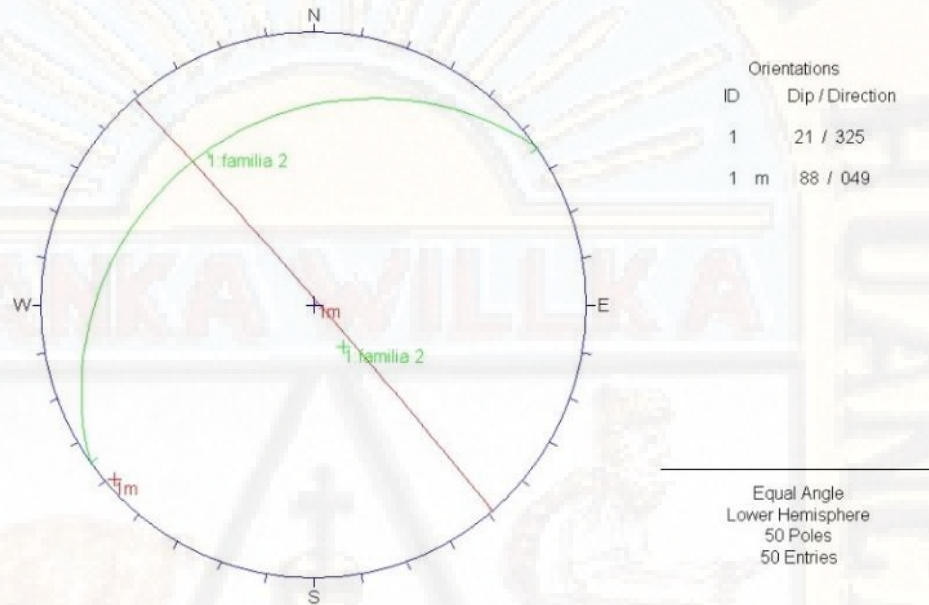


Fuente: Resultados del proyecto, análisis de datos programa Dips

Diagrama de planos mayores

Se identificaron dos familias de discontinuidades sobre el pilar cuyo buzamiento y dirección de buzamiento son: Plano de estratificación – 21/325 y Familia 1 – 88/49. Los datos se pueden observar en la Ilustración 6.

Ilustración 6. Diagrama de planos mayores



Fuente: Resultados del proyecto, análisis de datos programa Dips

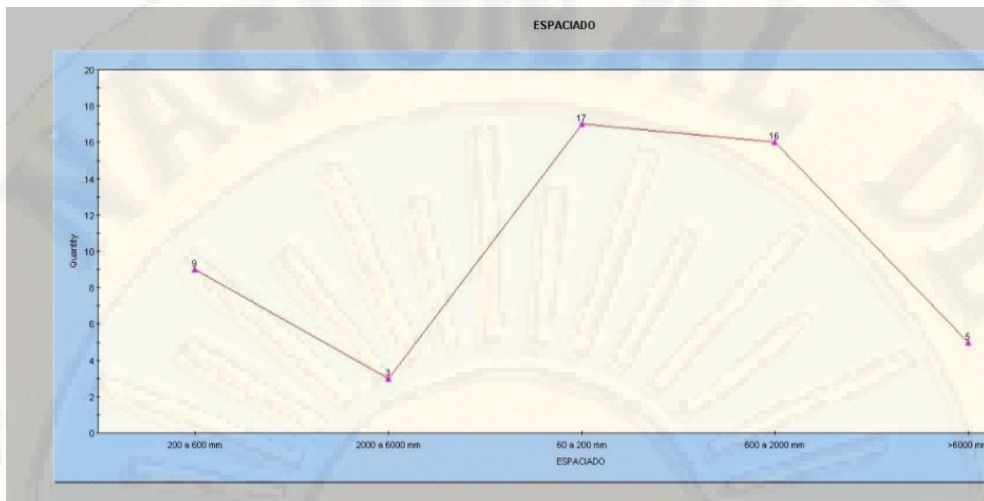
Espaciado

El espaciado más importante de las discontinuidades se encuentra distribuido entre los rangos de 60 a 200 mm, con un total de 17 discontinuidades analizadas (Ver Ilustración 7).

Continuidad en el Rumbo

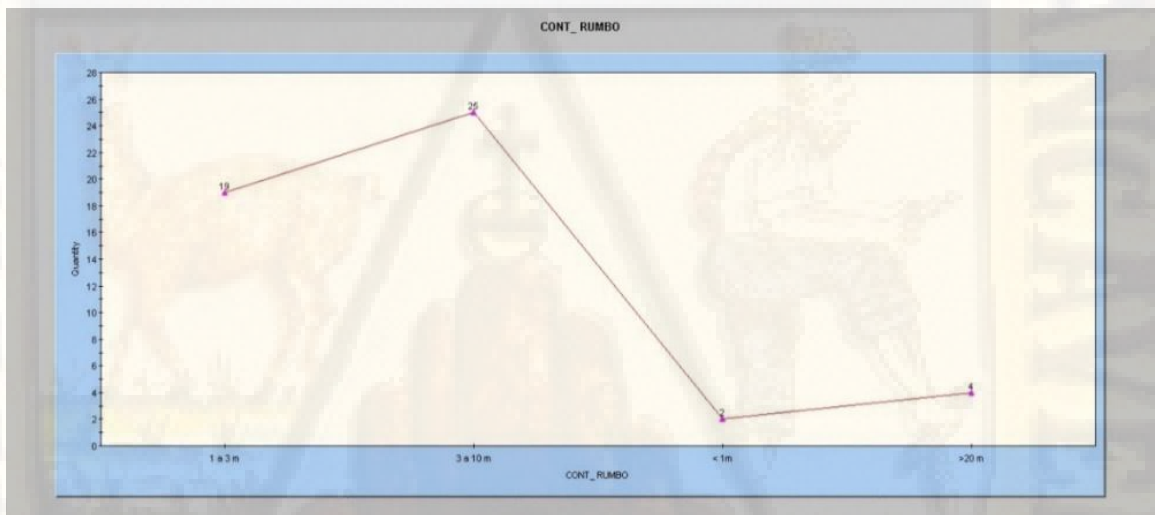
Se observa que del total de discontinuidades 25 tiene una continuidad de 3 a 10 m, (ver Ilustración 8).

Ilustración 7. Espaciado de las discontinuidades



Fuente: Resultados del proyecto, análisis de datos programa Dips

Ilustración 8. Continuidad de discontinuidades en el rumbo

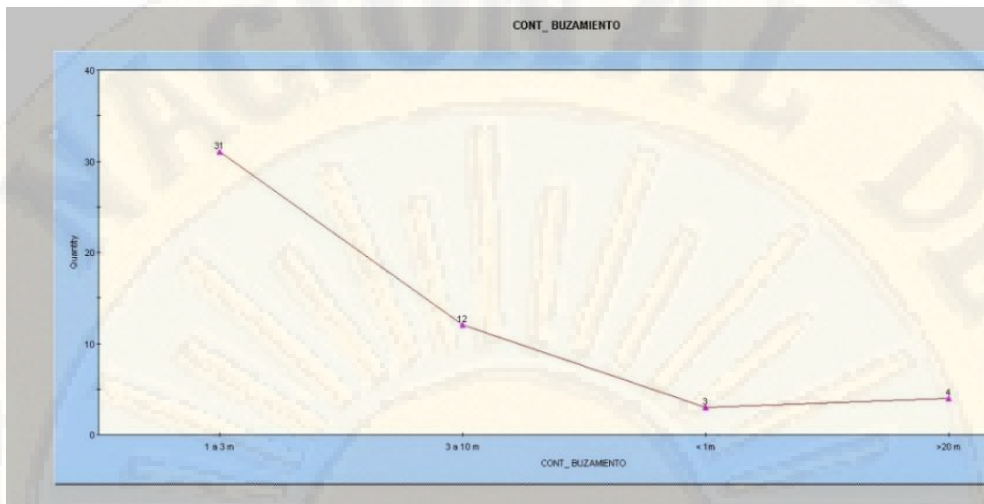


Fuente: Resultados del proyecto, análisis de datos programa Dips

Continuidad en el buzamiento

Se observa como relevante una continuidad de 1 a 3 m correspondiente a 31 discontinuidades.

Ilustración 9. Continuidad en el buzamiento de las discontinuidades

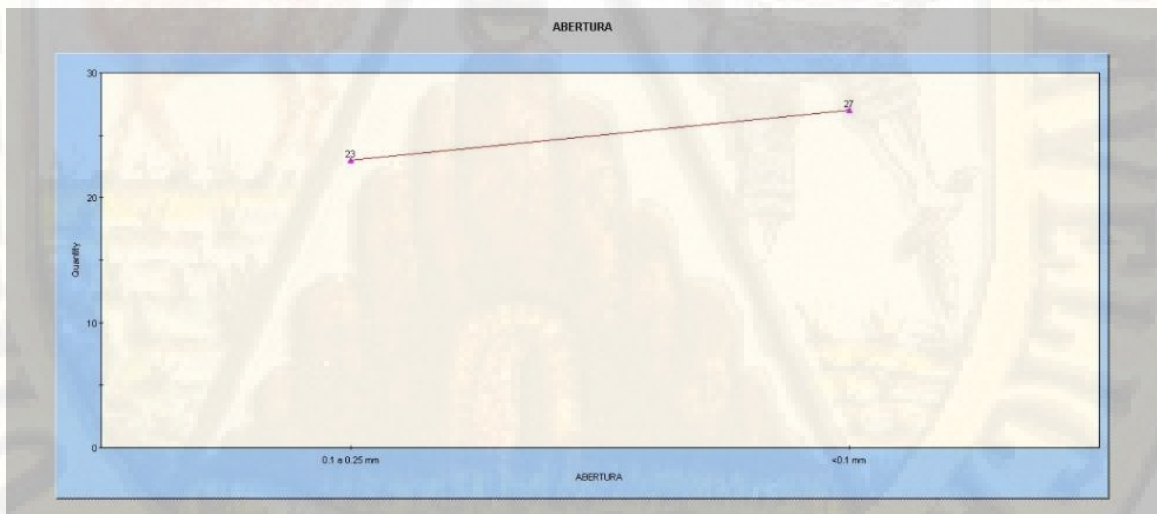


Fuente: Resultados del proyecto, análisis de datos programa Dips

Abertura

La abertura más predominante es menor a 0.1 mm, con un total de 27 discontinuidades, (ver Ilustración 10)

Ilustración 10. Abertura de las discontinuidades analizadas del pilar



Fuente: Resultados del proyecto, análisis de datos programa Dips

Rugosidad

Esta característica se evaluó por medio del rugosímetro de Peine de Barton (ver Ilustración 11), con lo cual se obtuvo en su mayoría juntas onduladas

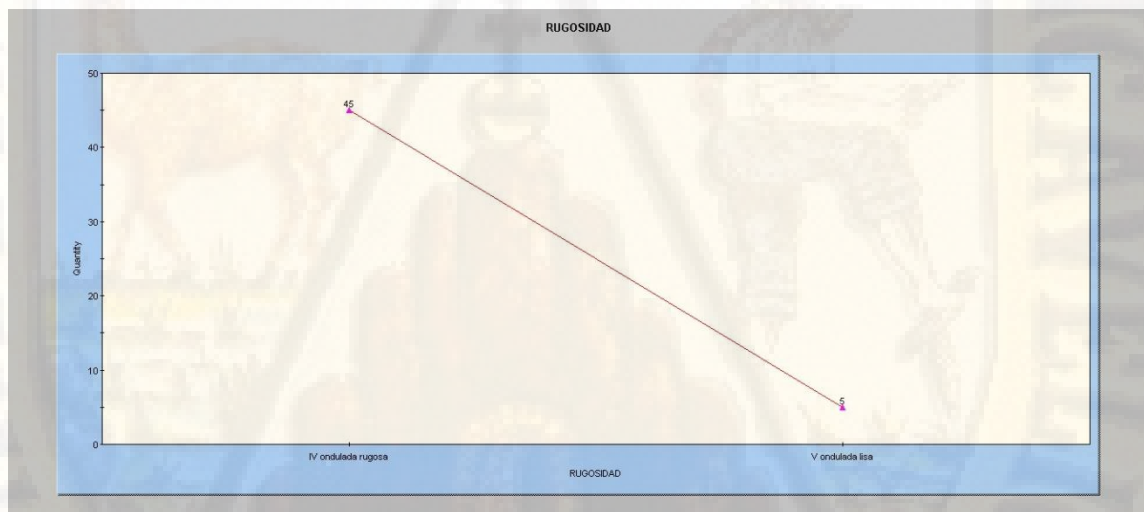
rugosas y fue comprobada con el análisis en el programa Dips (ver Ilustración 12), el cual dio por resultado rugosidad IV ondulada rugosa con 45 discontinuidades.

Ilustración 11. Resultado de rugosidad con el peine de Barton



Fuente: Resultados del proyecto

Ilustración 12. Representación en barras de la rugosidad de discontinuidades



Fuente: Resultados del proyecto, análisis de datos programa Dips

Propiedades físicas de la matriz rocosa

Las propiedades físicas de roca fosfórica (ver Tabla 3, bases de datos), fueron determinadas por medio de la recolección de 30 muestras las cuales corresponden al pilar en análisis (ver Ilustración 13).

Ilustración 13. Análisis de propiedades físicas en laboratorio



Fuente: Resultados del proyecto

Tabla 3. Resumen de las propiedades físicas de roca fosfórica

No. Muestra	P (g/cm ³)	pd (g/cm ³)	Psat (g/cm ³)	w %	S %	n %	e	γ (KN/m ³)	γd (KN/m ³)	γsat (KN/m ³)
1 a 10	2,52	2,23	2,53	12,99	96,67	29,91	0,41	24,67	21,84	24,78
11 a 20	2,59	2,31	2,60	12,47	96,12	29,75	0,41	25,41	22,61	25,53
21 a 30	2,55	2,28	2,56	11,83	95,39	28,25	0,38	25,01	22,36	25,13
Promedio	2,55	2,27	2,56	12,43	96,06	29,30	0,40	25,03	22,27	25,15

Fuente: Resultados del proyecto

El peso específico promedio en estado natural de la roca fosfórica es de 25 KN/m³. La saturación de la roca es bastante alta del 96.06 %, lo cual es muy importante para análisis de estabilidad de pilares por medio de métodos no destructivos. La roca presenta una humedad baja del 12.43%, lo cual es una roca seca.

Propiedades mecánicas de la matriz rocosa

Resistencia a la compresión uniaxial

Los ensayos realizados de compresión uniaxial (ver Ilustración 14), se realizaron con probetas cilíndricas de volumen único y probetas cubicas de volumen variable. Es de destacar que se formaron probetas cubicas para observar cómo podrían llegar a fallar los pilares de roca fosfórica en campo, además para determinar las diferentes velocidades de ondas de ultrasonido perpendiculares y paralelas a los planos de estratificación. Se fallaron 10 muestras cubicas y 15 muestras cilíndricas, distribuido el muestreo alrededor de todo el pilar en análisis, con lo cual se obtuvieron los resultados presentados en el Tabla 4 y 4 (ver bases de datos).

Ilustración 14. Resistencia a la compresión simple, probetas cubicas y cilíndricas



Fuente: Autor del proyecto

Tabla 4. Resultados de compresión simple de probetas cubicas de volumen variable

No. DE MUESTRA	FORMA DE MUESTRA	ALTUR A (cm)	ANCH O (cm)	PROFUNDIDA D (cm)	AREA (cm ²)	VOLUME N (cm ³)	σ_c (MPa)
P1 -M2	cubica	8,647	9,51	8,905	84,69	732,28	17,26
P1 -M5	cubica	10,81	11,234	11,162	125,39	1355,51	7,99
P1 -M4	cubica	13,584	13,178	13,325	175,60	2385,31	11,66
P1 -M3	cubica	13,976	13,913	14,272	198,57	2775,16	15,04
P2 -M3	cubica	12,285	12,585	12,377	155,76	1913,57	12,96
P1 -M1	cubica	7,239	7,44	7,372	54,85	397,04	19,14
P3 -M1	cubica	7,244	6,992	7,345	51,36	372,02	6,09
P2 -M1	cubica	7,243	6,802	6,999	47,61	344,82	25,06
P2 -M2	cubica	6,916	7,521	7,183	54,02	373,63	32,25
P3 -M2	cubica	6,565	7,169	6,262	44,89	294,72	17,44

Fuente: Resultados del proyecto

Se observa que la resistencia a la compresión simple de las probetas cubicas es muy variable, lo cual puede ser explicado a que cada probeta fallada está compuesta de diferentes medidas en sus aristas y por ende diferente volumen. Analizando los resultados de las probetas cubicas, a mayor volumen menor resistencia a la compresión simple de las probetas.

En la Ilustración 15 y 14, se presentan las curvas de cada una de las probetas cubicas y cilíndricas falladas, con base a su esfuerzo y deformación unitaria, las cuales fueron variables para las probetas cubicas, debido a los diferentes tamaños de probetas que se manejaron.

Tabla 5. Resultados de compresión simple de probetas cilíndricas con volumen constante

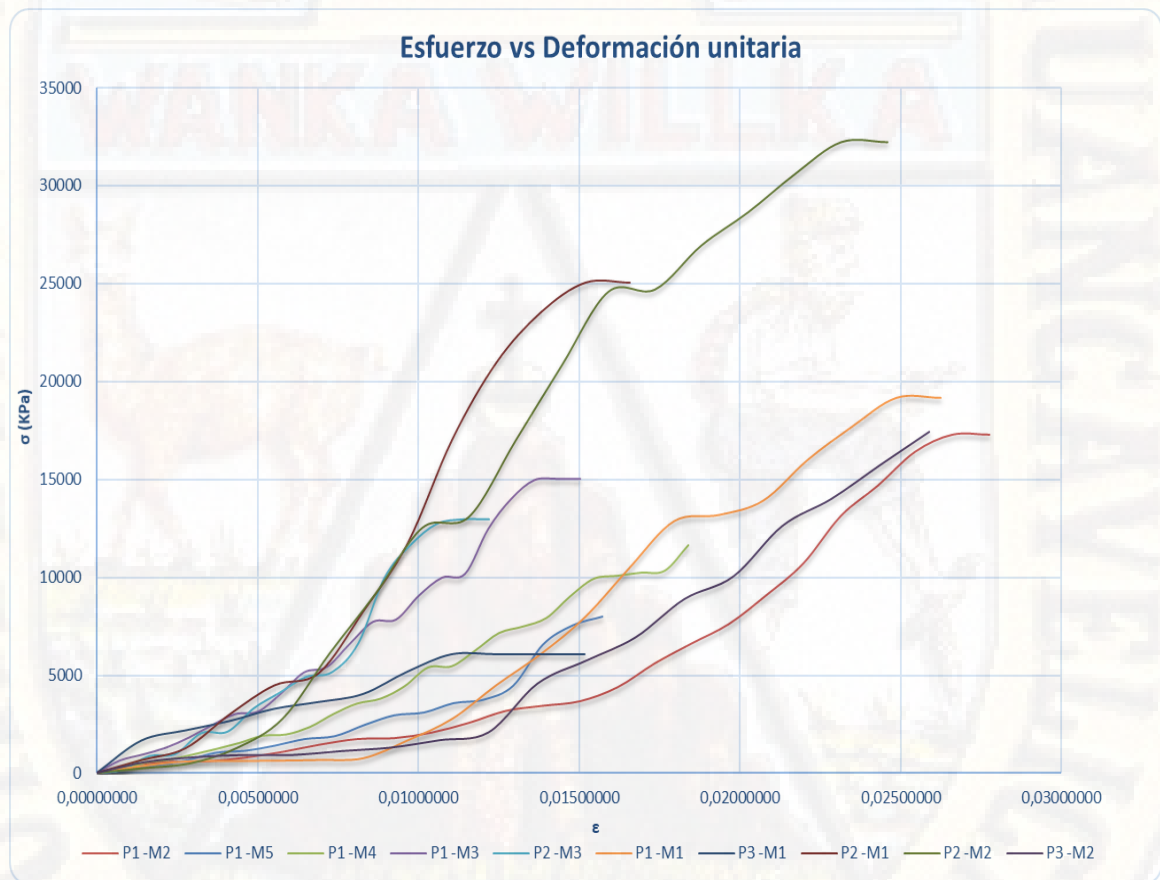
No. DE MUESTRA	FORMA DE MUESTRA	ALTURA (cm)	DIAMETRO (cm)	AREA (cm ²)	VOLUMEN (cm ³)	σ_c (MPa)
P1 -M6	Cilíndrica	9,61	4,88	18,72	179,82	14,64
P1 -M7	Cilíndrica	10,06	4,87	18,62	187,33	22,77
P2 -M4	Cilíndrica	9,60	4,88	18,70	179,48	14,28
P2 -M5	Cilíndrica	9,99	4,82	18,22	181,98	24,26
P2 -M6	Cilíndrica	9,96	4,84	18,41	183,27	12,88
P2 -M7	Cilíndrica	9,99	4,88	18,67	186,45	19,82
P2 -M8	Cilíndrica	9,95	4,80	18,13	180,39	16,00
P2 -M9	Cilíndrica	9,77	4,84	18,36	179,38	12,20
P3 -M3	Cilíndrica	10,10	4,92	19,02	192,04	11,25
P3 -M4	Cilíndrica	10,00	4,88	18,67	186,75	27,79
P3 -M6	Cilíndrica	9,765	4,877	18,68	182,42	18,09
P3 -M7	Cilíndrica	9,904	4,881	18,71	185,32	18,87
P3 -M8	Cilíndrica	9,978	4,863	18,57	185,33	23,52
P3 -M9	Cilíndrica	9,991	4,826	18,29	182,76	15,64
Esfuerzo promedio (σ_{prom})						18,00

Fuente: Resultados del proyecto

De los resultados de compresión uniaxial de las 15 probetas cilíndricas, se puede analizar que su resistencia es relativamente homogénea, con variaciones muy pequeñas entre unas y otras, con un promedio de resistencia de 18 MPa.

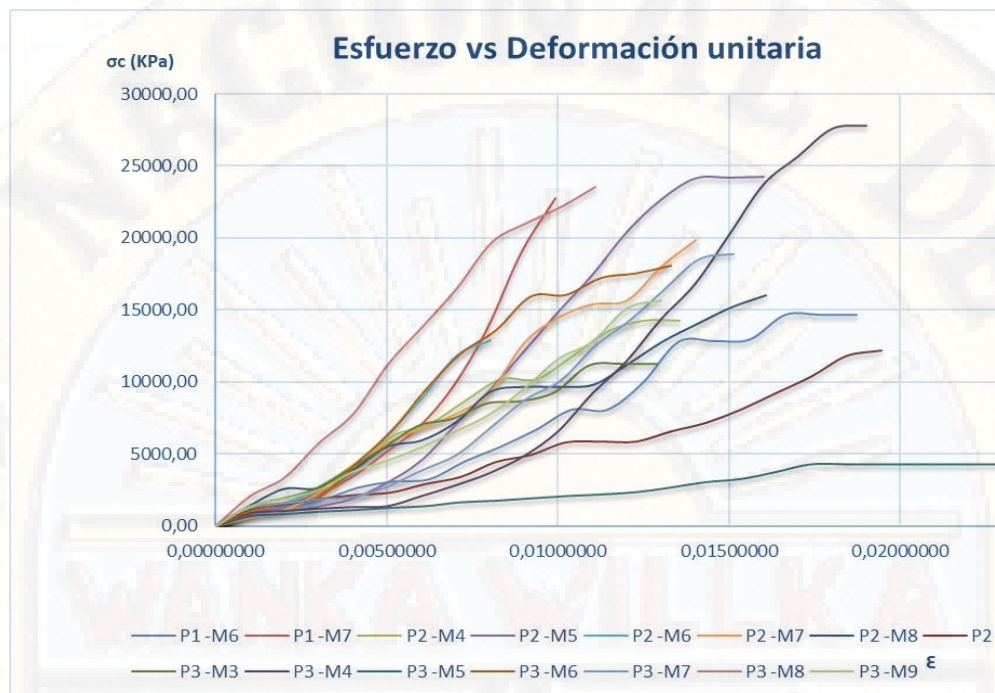
Es importante establecer que esta resistencia anteriormente citada es muy parecida y comparable con la resistencia axial de cubos de 10 cm de arista aproximadamente.

Ilustración 15. Resultados esfuerzo vs deformación probetas cubicas falladas



Fuente: Resultados del proyecto

Ilustración 16. Resultados esfuerzo vs deformación probetas cilíndricas falladas



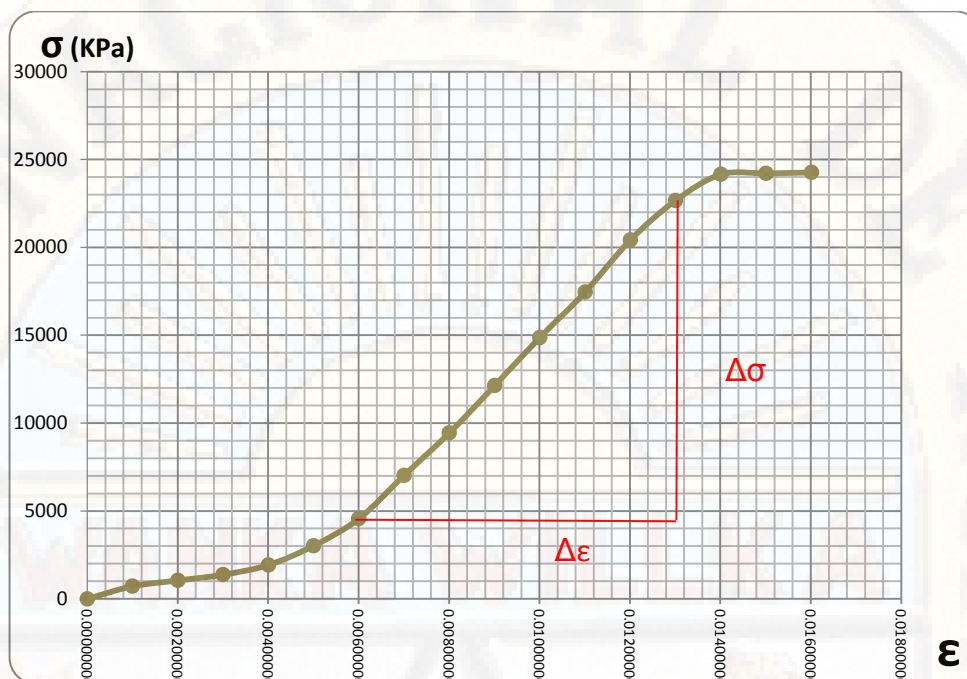
Fuente: Resultados del proyecto

Módulo de deformación. Los módulos de deformación fueron determinados por medio de las curvas esfuerzo vs deformación, obtenidas del ensayo de compresión simple (ver Ilustración 17), a probetas cilíndricas que guardan la relación de 2:1 en dimensiones y probetas cubicas con dimensiones aproximadamente iguales. El método que se empleó para determinar estos módulos fue el de pendiente en la parte recta de cada curva, (ver Tabla 6 y 6).

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (3)$$

Cabe destacar que los módulos de deformación fueron calculados sobre la parte recta de la curva o la aproximación de la misma, para obtener resultados confiables y verídicos.

Ilustración 17. Determinación de los módulos de elasticidad para probetas de roca fosfórica



Fuente: Resultados del proyecto

Tabla 6. Resultados de módulos de deformación para probetas cubicas

Muestra No.	ϵ_1	ϵ_2	σ_1 (KPa)	σ_2 (KPa)	E (KPa)	E (MPa)
P1 -M2	0,0219729	0,0161906	10698,27	4369,05	1094575,7	1094,58
P1 -M5	0,0138760	0,0129510	6563,32	4457,95	2275900,04	2275,90
P1 -M4	0,0139870	0,0066254	7932,94	2346,28	758891,973	758,89
P1 -M3	0,0107327	0,0050086	9986,59	3132,45	1197416,97	1197,42
P2 -M3	0,0097680	0,0073260	11658,62	5155,22	2663144,56	2663,14
P1 -M1	0,0179583	0,0110513	12853,78	2753,08	1462379,45	1462,38
P3 -M1	0,0082827	0,0013805	4050,14	1655,11	346992,693	346,99
P2 -M1	0,0124258	0,0069032	20984,22	5104,27	2875462,24	2875,46
P2 -M2	0,0101215	0,0057837	12531,62	2776,58	2248862,43	2248,86
P3 -M2	0,0228484	0,0152323	14011,32	5747,09	1085093,08	1085,09
Promedio					1600871,91	1600,87

Fuente: Resultados del proyecto

Tabla 7. Resultados de módulos de deformación para probetas cilíndricas

Muestra No.	ϵ_1	ϵ_2	σ_1 (KPa)	σ_2 (KPa)	E (KPa)	E (MPa)
P1 -M6	0,0104102	0,0062461	8066,62	3258,70	1154621,6	1154,62
P1 -M7	0,0089454	0,0059636	19012,26	6928,20	4052592,9	4052,59
P2 -M4	0,0083333	0,0020833	10216,02	1658,10	1369268	1369,27
P2 -M5	0,0130130	0,0060060	22671,86	4556,33	2585345,3	2585,35
P2 -M6	0,0070302	0,0040173	11789,62	4074,75	2560563,5	2560,56
P2 -M7	0,0080088	0,0020022	9268,45	1125,07	1355736,3	1355,74
P2 -M8	0,0080386	0,0030145	9323,75	2648,17	1328708,9	1328,71
P2 -M9	0,0184237	0,0112590	11818,90	5882,22	828590,95	828,59
P3 -M3	0,0059424	0,0029712	6992,86	2628,90	1468765,9	1468,77
P3 -M4	0,0159984	0,0099990	23723,92	6587,00	2856438,5	2856,44
P3 -M6	0,0092166	0,0030722	15952,21	2087,71	2256448,2	2256,45
P3 -M7	0,0141357	0,0070679	18491,35	4970,22	1913046,9	1913,05
P3 -M8	0,0080775	0,0020194	19667,10	3366,92	2690616	2690,62
P3 -M9	0,0080072	0,0040036	7762,90	3772,11	996798,35	996,80
Promedio					1958395,8	1958,40

Fuente: Resultados del proyecto

Como se puede observar en los anteriores resultados el módulo de deformación promedio para roca fosfórica en muestras cubicas es de 1600 MPa y para muestras cilíndricas es de 1960 MPa, lo cual es un parámetro importante del material para su clasificación y estudio.

4.1.5 Clasificación geomecánica del MRMR (Mining Rock Mass Rating)

Para este proyecto se optó por aplicar la clasificación del MRMR, la cual se aplica con todos sus valores a minería y proporciona elementos importantes en cuanto algunas propiedades y consideraciones en la explotación por cámaras y pilares. Esta clasificación es una modificación hecha por Bieniawski en 1989, a su clasificación geomecánica original del RMR¹⁰ (Rock

¹⁰ HOEK, Evert. Practical Rock Engineering, Canada, Pag. 47 a 50.

Mass Rating) propuesta por el mismo autor en 1976, para obras civiles, basado en modificaciones y ajustes hechos por Laubscher (1977, 1984), Laubscher y Taylor (1976) y Laubscher y Page (1990) para minería.

Densidad de fracturación del macizo rocoso (RQD)

Con el fin de establecer el RQD, el cual es un indicador del nivel de fracturamiento del macizo rocoso, se utilizó la propuesta de determinación del RQD en función de la frecuencia de discontinuidades, ésta se define como el grado de fracturación del macizo rocoso de roca fosfórica por medio del RQD¹¹ (Rock Quality Designation), a partir de la frecuencia de discontinuidades λ , medida en dirección lineal aplicando las relaciones 1 y 2, cuyos resultados se presentan en el Tabla 8.

$$\lambda = \frac{\text{No de discontinuidades}}{\text{Longitud medida}} \quad (1)$$

$$RQD = 100 * e^{-0.1\lambda} * (0.1\lambda + 1) \quad (2)$$

Donde

RQD: Índice de calidad de la roca

λ : Frecuencia de discontinuidades

Tabla 8. Cálculo del RQD, para cada pilar en estudio

Tipo de roca	No. de Pilar	No. de Fracturas	Longitud medida	λ (Fracturas/m)	RQD
Roca fosfórica	1	7	5m	1.4	99.10
Roca fosfórica	1	6	5m	1.2	99.33
Roca fosfórica	1	8	5m	1.6	98.84
Promedio					99.09

Fuente: Resultados del proyecto

¹¹ M. FERRER y L. GONZÁLEZ DE VALLEJO (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME, Madrid, 107 p.

Analizando los resultados obtenidos se observa que el macizo de roca fosfórica tiene muy poco fracturamiento con lo cual lo hace que sea un macizo estable para la explotación por cámaras y pilares.

La clasificación geomecánica para el macizo rocoso de roca fosfórica, con corrección por obra minera y descripción del macizo rocoso, se presenta en la Tabla 9 al 14.

Tabla 9. Clasificación geomecánica del MRMR 1989.

A. PARAMETROS DE CLASIFICACION Y SUS VALORES									
Parámetro			Rango de valores						
1	Resistencia de la roca intacta	carga puntual	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Para este bajo valor - se prefiere la compresión uniaxial		
		Esfuerzo a la Compresión uniaxial	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	<1 MPa
	Valor		15	12	7	4	2	1	0
2	Rock Quality Designation RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%		
	Valor		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de discontinuidades		>2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	<60 mm		
	Valor		20	15	10	8	5		
4	Condición de discontinuidades (ver E)		superficies muy rugosas Sin continuidad Sin separación Paredes de roca no meteorizadas	Superficie ligeramente rugosa Separación <1mm Paredes ligeramente meteorizadas	Superficie ligeramente rugosa Separación <1mm Paredes muy meteorizadas	Superficie lisa o relleno de espesor <5mm Separación de 1 - 5 m fisuras continuas	Relleno Blando de espesor <5mm o separación >5mm continua		
	Valor		30	25	20	10	0		
5	Condiciones de agua	Infiltración por 10 m, de longitud de túnel (l/min)	Ninguna	<10	10 - 25	25 - 125	>125		
		(Presión de agua en la	0	<0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	>0.5		

	junta)/(o principal mayor)					
	Condiciones generales	completamente seco	húmedo	Solo húmedo (agua de intersticios)	Goteo	Serios problemas de agua
	Valor	15	10	7	4	0

Tabla 10. Ajuste del valor final por orientación de discontinuidades

B. VALOR DE AJUSTE POR ARIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES (Ver F)						
Orientaciones de rumbo y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
Valor	Túneles y minas	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	

Tabla 11. Tipos de macizos rocosos y su descripción

C. CLASES DE MACIZOS ROCOSOS DETERMINADOS A PARTIR DEL VALOR TOTAL					
Valor	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	<21
Clase número	I	II	III	IV	V
Descripción	Roca muy buena	Roca buena	Roca regular	Roca mala	Roca muy mala

Tabla 12. Parámetros de sostenimiento, cohesión y ángulo de fracción del macizo rocoso

D. SIGNIFICADO DE LAS CLASES DE ROCAS					
Clase número	I	II	III	IV	V
Promedio tiempo de sostenimiento	20 años para un claro de 15 m	1 año para un claro de 10 m	1 semana para un claro de 5 m	10 horas para un claro de 2.5 m	30 minutos para un claro de 1 m
Cohesión del macizo rocoso (KPa)	>400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	<100

Angulo de fricción del macizo rocoso (°)	>45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	<15
--	-----	---------	---------	---------	-----

Tabla 13. Parámetros para determinar el valor de condición de discontinuidades

E. PARAMETROS PARA CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES					
Longitud de discontinuidad (Persistencia)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Valor	6	4	2	1	0
Separación (abertura)	Ninguna	< 0.1 mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Valor	6	5	4	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	lisa	Resbalosa
Valor	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno suave < 5 mm	Relleno suave > 5 mm
Valor	6	4	2	2	0
Meteorización	no meteorizada	ligeramente meteorizada	Moderadamente meteorizada	Muy meteorizada	Descompuesta
Valor	6	5	3	1	0

Tabla 14. Parámetros para determinar el ajuste de orientación de discontinuidades con respecto a la obra minera

F. EFECTO DE DISCONTINUIDADES, ORIENTACIÓN DE RUMBO Y BUZAMIENTO EN TUNELES			
Rumbo perpendicular al eje del túnel		Rumbo paralelo al eje del túnel	
Avance con el buzamiento - buzamiento de 45° - 90°	Avance con el buzamiento - buzamiento de 20° - 45°	Buzamiento 45° - 90°	Buzamiento 20° - 45°
Muy favorable	Favorable	Muy desfavorable	Malo

Avance en contra del buzamiento - buzamiento de 45° - 90°	Avance en contra del buzamiento - buzamiento de 20° - 45°	Buzamiento de 0° - 20°, independiente del rumbo
Malo	Desfavorable	Malo

Fuente: Practical Rock Engineering

Los puntajes de la clasificación geomecánica MRMR, se presentan a continuación:

Resistencia de la roca intacta	2
Rock Quality Designation (RQD)	20
Espaciado de discontinuidades	8
Condición de discontinuidades	25
Condiciones de agua	<u>10</u>
Puntuación parcial	65
Ajuste por orientación de discontinuidades	<u>-5</u>
Puntaje Mining Rock Mass Rating (MRMR)	60

Debido a que se obtuvo en la clasificación del MRMR, una puntuación de 60, el macizo roco en de clase III, roca regular, la cual puede sostenerse por sí misma 1 semana para un claro de 5 m libres, con una cohesión que se encuentra entre 200 a 300 KPa y un ángulo de fricción que oscila entre 25 a 35°.

Para tener una mayor comprensión del macizo de roca fosfórica en cuanto a sostenimiento se refiere, las recomendaciones para este aspecto que esta clase de macizo rocoso sugiere, propuesta por Bieniawski en 1989, se pueden observar en la Tabla 15.

Tabla 15. Consideraciones del sostenimiento para el macizo de roca fosfórica según el MRMR

PARAMETROS PARA LA EXCAVACIÓN Y SOSTENIMIENTO DE 10 m DE LUZ DE TUNELES EN ROCAS DE ACUERDO CON EL SISTEMA MRMR (BIENIAWSKI DESPUES DE 1989)				
Clase de macizo rocoso	Excavación	Pernos de anclaje, (20 mm de diámetro, totalmente inyectados)	Hormigón	arcos acero
I. Roca muy buena RMR: 81 - 100	Todo el frente. 3 m de avance	Generalmente no requiere sostenimiento, excepto pernados esporádicos		
II. Roca buena RMR: 61 - 80	Todo el frente. De 1 a 1.5 m de avance. Completar sostenimiento a partir de 20 m del frente	Localizar pernos de techo de 3 m de longitud, espaciados 2.5 m con malla de alambre ocasional	50 mm en el techo donde requiera	Ninguno
III. Roca regular RMR: 41 - 60	Excavación superior y avance de banco de 1.5 - 3 m en techado superior. Iniciar sostenimiento después de la voladura. Completar sostenimiento a 10 m del frente.	Pernado sistemático de 4m de longitud, espaciado 1.5 a 2m en el techo y paredes con malla de alambre en el techo.	50 a 100 mm en el techo y 30 mm en los lados.	Ninguno
IV. Roca mala RMR: 21 - 40	Excavación superior y avance de banco de 1.0 - 1.5 m en techado superior. Instalar sostenimiento al mismo tiempo de excavación, a partir de 10 m del frente.	Pernado sistemático de 4 - 5 m de longitud, espaciado 1 - 1.5 m en el techo y paredes con malla de alambre.	100 - 150 mm en techo y 100 mm en los lados.	Luz entre arcos a medio espacio 1.5 m donde se requiera.
V. Roca muy mala RMR: <20	Múltiples desplazamientos, avance de 0.5 - 1.5 m en excavación superior. Instalar sostenimiento al mismo tiempo que la excavación. Hormigón proyectado tan pronto como sea posible después de la voladura.	Pernado sistemático de 5 - 6 m de longitud, espaciamiento de 1 - 1.5 m en techo y paredes con malla de alambre. Perno invertido.	150 - 200 mm en techo y 150 mm en los lados y 50 mm en el frente.	Arcos de acero de medio peso con espaciamiento de 0.75 m y avance con tablestacas si requiere. Invertir cierre.

Fuente: Practical Rock Engineering

4.1.6 Aplicación de métodos no destructivos, en el análisis de estabilidad de pilares en minas de roca fosfórica

La determinación de parámetros de resistencia y deformabilidad de macizos rocosos tales como el módulo de deformación, la resistencia a la compresión y parámetros de resistencia al corte, es una labor fundamental para el diseño y evaluación de estabilidad de excavaciones subterráneas. Para tal fin se han elaborado propuestas empíricas a partir de correlaciones con clasificaciones geomecánicas, se han diseñado pruebas In-Situ como el ensayo de placa de carga, y se han desarrollado criterios de resistencia que han permitido la obtención de estos parámetros. Clovis Gonzatti en el año 2007, en su trabajo de tesis doctoral desarrollo una propuesta para la obtención de la resistencia a la compresión simple de pilares en carbón, con la utilización de técnicas no destructivas basadas en la propagación de ondas en medios elásticos. Dicha propuesta involucra parámetros importantes como la velocidad de propagación de ondas P, a escala de laboratorio y de campo, además de propiedades físico - mecánicas de la roca como: humedad, grado de saturación, resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta, entre otras.

Para el presente proyecto se tomó como base la propuesta de Clovis Gonzatti (con quien se estableció contacto y se recibieron algunas asesorías), con el fin de validarla en la determinación de la resistencia a la compresión de macizos rocosos, para el caso de la explotación de roca fosfórica en la mina Carolina, en el pilar 1, localizado entre los niveles 3 y 4 inferior.

Para la estimación de la resistencia de los pilares de roca fosfórica se siguió con la siguiente metodología:

- Análisis de velocidades de propagación de ondas ultrasónicas y propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación.
- Determinación de la influencia del tamaño de la muestra en la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa.
- Obtención de la influencia de la tensión axial en velocidades de propagación de ondas P, de ultrasonido.
- Evaluación de la influencia del nivel de saturación del macizo de roca fosfórica frente a la velocidad de propagación de ondas P, de ultrasonido.
- Determinación de la velocidad de propagación de ondas P in-situ, con la utilización de ensayos de refracción sísmica.
- Determinación de la resistencia del macizo de roca fosfórica, a partir de la propuesta de Clovis Gonzatti.

Velocidades de propagación de ondas ultrasónicas y propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación

La propagación de ondas ultrasónicas en medios sólidos, como especímenes de roca, es una técnica reconocida por la asociación internacional de mecánica de rocas, con el fin de caracterizar este tipo de materiales. De acuerdo a Torres (2005), el término ultrasonido describe a las ondas mecánicas que se transmiten a través de gases, líquidos y sólidos, a frecuencias por encima del límite superior del oído humano, cerca de 16 kHz. Debido a que las características de estas ondas están relacionadas con las propiedades mecánicas de cualquier medio a través del cual ellas pasan, el ultrasonido es una alternativa importante para la caracterización de rocas.

Equipo de ultrasonido. Las velocidades de propagación de ondas ultrasónicas en roca fosfórica, fueron determinadas mediante el equipo GCTS Testing Systems CATS Ultrasonics 1.83 (ver Ilustración 18). El equipo de ultrasonido consta de una unidad generadora de pulsos, capaz de emitir señales de ondas P y S, con frecuencias entre 500 Hz hasta 10 MHz,

lo que lo hace adecuado para la realización de medidas en rocas. Adicionalmente el equipo cuenta con dos *platens*, uno transmisor del pulso y otro receptor del pulso; y de un sistema moderno de adquisición de datos y análisis de señales, con interface para conectar a un PC.

Dentro de la etapa de aprendizaje en el manejo del equipo de ultrasonido, se realizaron pruebas con el fin de establecer los parámetros de entrada para la generación de las señales, los cuales una vez definidos se dejaron constantes para todas las mediciones. Los parámetros se presentan a continuación:

Sampling rate	625 KHz
External manual gain	1V
Input automatic gain	2 db
Energy output	50%
Damping	0µsec
Delay	0 µsec

Ilustración 18. Interface del programa Cats Ultrasonics 1.83





Fuente: Resultados del proyecto

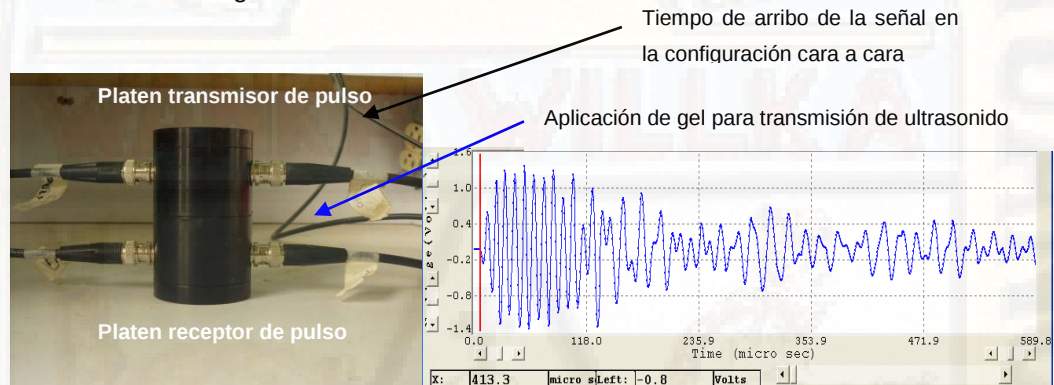
El objeto del ensayo de ultrasonido para este proyecto es la determinación de la velocidad de las Ondas P a través del espécimen de roca. Para lograr lo anterior el equipo permite la calibración del tiempo de arribo de la señal entre la placa transmisora y receptora del pulso (face to face arrival time), y la visualización de la señal original. Para el proyecto se establecieron los tiempos de arribo de las ondas P igual a 6.2 μ segundos para la configuración cara a cara (ver Ilustración 19). Dentro de las observaciones relevantes durante el proceso de ajuste del equipo se resalta la utilización de un gel de propagación de ultrasonido, el cual fue aplicado sobre la superficie de los platens, con el fin de generar una interface entre los sensores y, entre los sensores y el espécimen de roca (ver Ilustración 20).

Para la interpretación del tiempo de llegada de la onda P, el sistema de adquisición de datos, cuenta con cinco métodos diferentes para esta interpretación (ver listado a continuación), sin embargo también se pueden

hacer ajustes manuales de acuerdo al criterio de la persona encargada de hacer las mediciones.

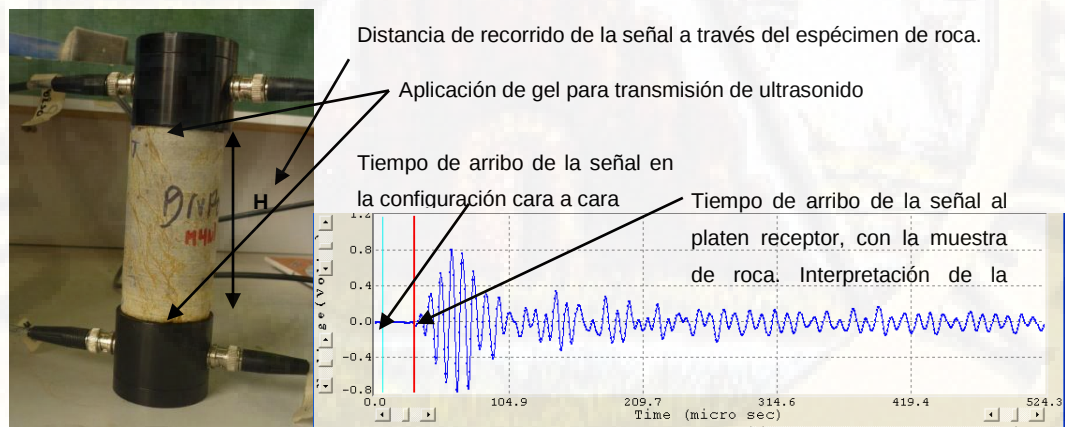
- Absolute Threshold.
- Relative Threshold.
- Relative of first Peak.
- First Peak time.
- Tang. of first Peak.

Ilustración 19. Configuración cara a cara



Fuente: Autor del proyecto

Ilustración 20. Realización de medición de velocidad de onda ultrasónica a través de un espécimen de roca



Fuente: Autor del proyecto

Determinación de las propiedades dinámicas elásticas de la roca a bajos niveles de deformación

El cálculo de las propiedades dinámicas elásticas de la roca, pueden ser determinadas a partir de su densidad, de la velocidad de propagación de Onda P y S a través del medio, usando las siguientes expresiones que son derivadas de la teoría de la elasticidad para sólidos homogéneos e isotrópicos:

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (4)$$

$$E = \frac{\rho V_s^2 (8V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (5)$$

$$K = \frac{\rho (8V_p^2 - 4V_s^2)}{3} \quad (6)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (7)$$

V_p: Velocidad de compresión onda P (m/s).

V_s: Velocidad de corte onda S (m/s).

ρ: Densidad (kg/m³).

ν: Relación de Poisson.

E: Modulo de Young (Pa).

K: Modulo de Bulk (Pa).

G: Modulo de Rigidez (Pa).

Resultados de medición de velocidad ultrasónica

Debido a que el equipo de ultrasonido, proporciona las propiedades dinámicas de cada probeta en análisis con los datos de velocidades de ondas P y S, se obtuvieron las dos velocidades en cada muestra. Cabe

destacar que para la estimación de la resistencia del macizo rocoso, solo se van a analizar las ondas de compresión P (ver Tabla 16 y 16).

Tabla 16. Valores promedio de probetas cubicas para ensayo de ultrasonido

No	Código	No DE MUESTRA	MASA (gr)	ANCHO (mm)	ALTURA (mm)	PROFUNDIDAD (mm)	Densidad (gr/cm ³)	Volumen (m ³)
1	1	1	925.4	74.40	72.39	73.72	2.3	0.00040
2	1	2	1720	95.10	86.47	89.05	2.3	0.00073
3	1	3	7040	139.13	139.76	142.72	2.5	0.00278
4	1	4	5825	131.78	135.84	133.25	2.4	0.00239
5	1	5	3135	112.34	108.10	111.62	2.3	0.00136
6	2	1	759.3	68.02	72.43	69.99	2.2	0.00034
7	2	2	835	75.21	69.16	71.83	2.2	0.00037
8	2	3	4205	125.85	122.85	123.77	2.2	0.00191
9	3	1	817.7	69.92	72.44	73.45	2.2	0.00037
10	3	2	616.7	71.69	65.65	62.62	2.1	0.00029

Fuente: Resultados del proyecto

Tabla 17. Valores promedio de probetas cilíndricas para ensayo de ultrasonido

No	Código	No DE MUESTRA	MASA (gr)	Diámetro (mm)	ALTURA (mm)	Área (mm ²)	Volumen (m ³)	Densidad (gr/cm ³)
1	1	6	413.6	48.82	96.06	1871.66	0.00018	2.300
2	1	7	418.7	48.69	100.61	1861.70	0.000187	2.235
3	2	4	408	48.79	96.00	1869.61	0.000179	2.273
4	2	5	408.6	48.16	99.90	1821.64	0.000182	2.245
5	2	6	413.2	48.41	99.57	1840.60	0.000183	2.255
6	2	7	427.5	48.75	99.89	1866.29	0.000186	2.293
7	2	8	405.1	48.04	99.52	1812.83	0.00018	2.245
8	2	9	411.3	48.35	97.70	1835.79	0.000179	2.293
9	3	3	428	49.21	100.97	1902.20	0.000192	2.228
10	3	4	422.2	48.76	100.01	1867.06	0.000187	2.261
11	3	5	372.6	48.80	97.73	1870.63	0.000183	2.038

12	3	6	418.3	48.77	97.65	1868.08	0.000182	2.293
13	3	7	405.5	48.81	99.04	1871.40	0.000185	2.188
14	3	8	422.2	48.63	99.78	1857.12	0.000185	2.279
15	3	9	418.1	48.26	99.91	1829.21	0.000183	2.288

Fuente: Resultados del proyecto

Para un mejor análisis y siguiendo la metodología propuesta por Clovis Gonzatti, se cortaron un total de 10 muestras cubicas que difieren en dimensiones de 7cm a 12 cm aproximadamente, las cuales fueron codificadas según el pilar donde fueron tomadas. También se cortaron 15 probetas cilíndricas con relación de esbeltez de 2:1 (vertical: horizontal), las cuales también se codificaron según su procedencia.

Analizando los pilares de la mina de roca fosfórica carolina, en su conjunto se diferencian dos tipos de roca fosfórica de color gris y café amarillento respectivamente, por lo cual se optó que la resistencia del macizo rocoso puede ser la misma en cada uno de ellos y así el muestro se unifico para un solo resultado en conjunto.

Como fue mencionado anteriormente es importante tener en cuenta, que para una correcta transmisión del pulso de ultrasonido, se utilizó un gel de transmisión de ultrasonido entre el contacto de cada transductor y la muestra, cómo se puede observar en la Ilustración 21. Las velocidades de ondas de ultrasonido, fueron obtenidas en las tres dimensiones (altura, ancho y profundidad) de cada una de las muestras cubicas, y en sentido de la altura para las muestras cilíndricas cuyos resultados se pueden ver en el Tabla 18 y 19 (ver bases de datos).

Ilustración 21. Unión de los transductores con la muestra



Fuente: Resultados del proyecto

Tabla 18. Resultados de velocidades de ondas ultrasónicas P, en probetas cubicas

No.	CODIGO DE MUESTRA	SENTIDO DE MEDIDA ONDA P		
		ALTURA (m/s)	ANCHO (m/s)	PROFUNDIDAD (m/s)
1	P1 -M2	2137,00	2972,00	2920,00
2	P1 -M5	1959,00	2502,00	1285,00
3	P1 -M4	2204,00	3295,00	1215,00
4	P1 -M3	3630,00	3387,00	3336,00
5	P2 -M3	1219,00	2906,00	1201,00
6	P1 -M1	3217,00	3087,00	3040,00
7	P3 -M1	2103,00	2292,00	2542,00
8	P2 -M1	2653,00	2230,00	2564,00
9	P2 -M2	2689,00	2602,00	2355,00
10	P3 -M2	2152,00	2626,00	2783,00
Promedio		2396,30	2789,90	2324,10

Fuente: Resultados del proyecto

Tabla 19. Resultados de velocidades de ondas ultrasónicas P, en probetas cilíndricas

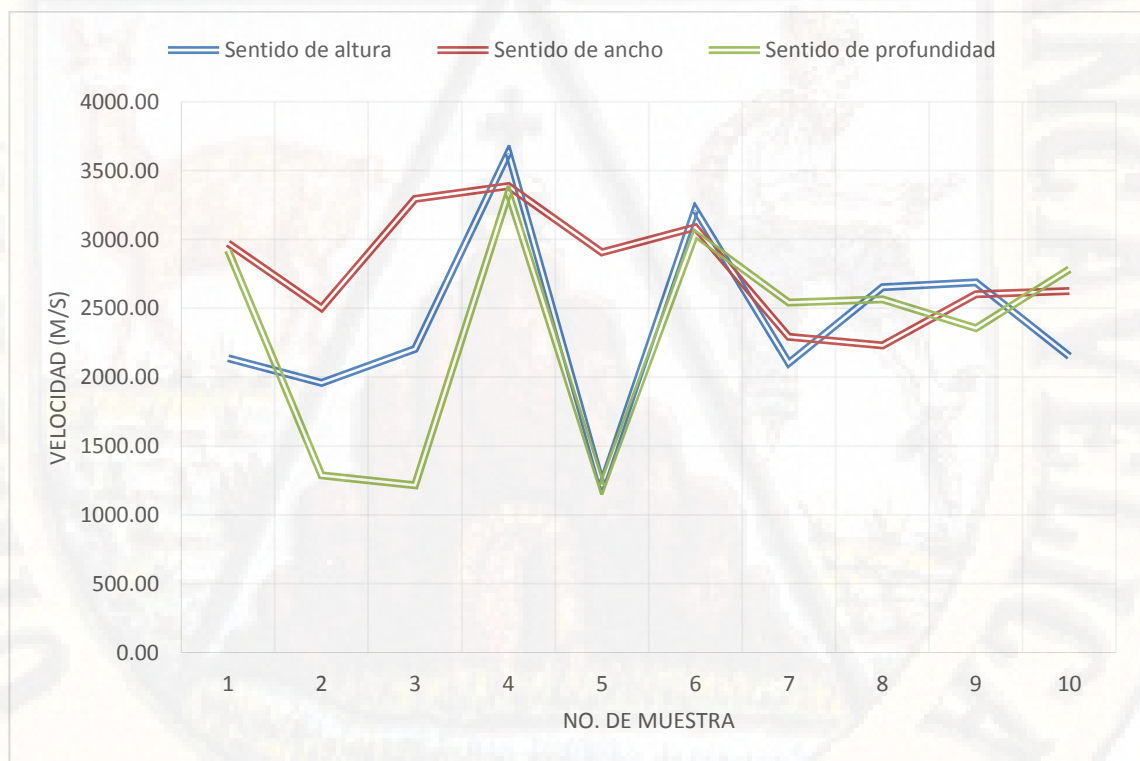
No.	CODIGO DE MUESTRA	ONDA P, SENTIDO DE ALTURA (m/s)
1	P1 -M6	2066,00
2	P1 -M7	2509,00
3	P2 -M4	1184,00
4	P2 -M5	2307,00
5	P2 -M6	2141,00
6	P2 -M7	2225,00
7	P2 -M8	2298,00
8	P2 -M9	2353,00
9	P3 -M3	2518,00
10	P3 -M4	2598,00
11	P3 -M6	2342,00
12	P3 -M7	2363,00

13	P3 -M8	2304,00
14	P3 -M9	2708,00
Promedio		2279,71

Fuente: Resultados del proyecto

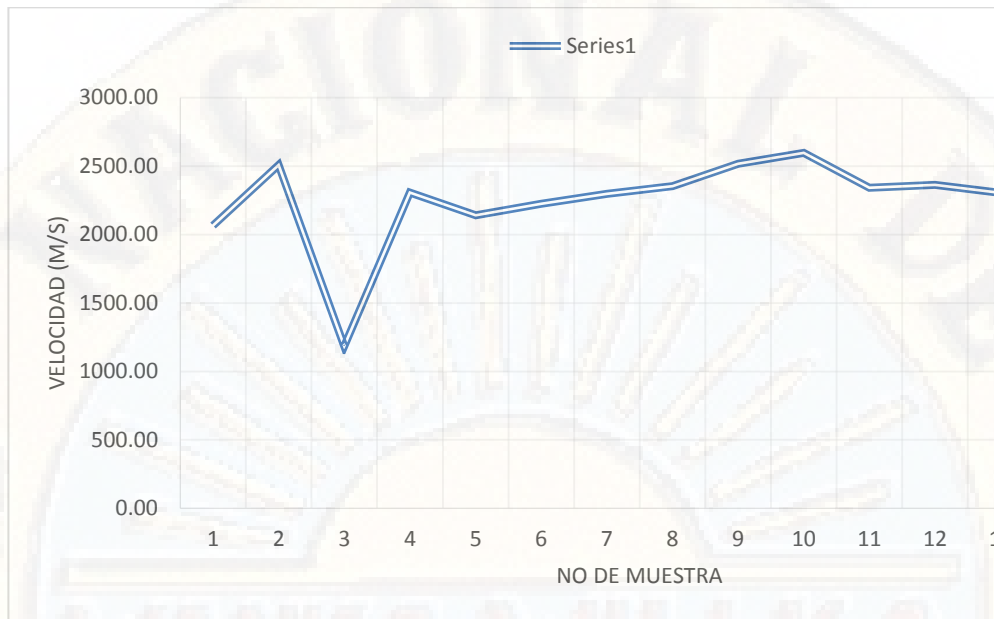
Analizando los datos de velocidades de ondas de ultrasonido en probetas cubicas se observa una diferencia notable en sentido de la altura (perpendicular a la estratificación) y en sentido del ancho y profundidad (paralelo a la estratificación), y en probetas cilíndricas se observa unos resultados homogéneos en sentido de la altura (ver Ilustración 22 y Ilustración 23).

Ilustración 22. Velocidades de onda ultrasónica P en diferentes direcciones de medición, en probetas cubicas



Fuente: Resultados del proyecto

Ilustración 23. Velocidades de ondas de ultrasonido tipo P , en probetas cilíndricas en sentido de la altura



Fuente: Resultados del proyecto

Observando la Ilustración 22 y 14, se observa que hay una variación importante en las velocidades de propagación de ondas P, lo cual puede ser explicado debido, a que en sentido de la altura las ondas de ultrasonido son atenuadas por los diferentes planos estructurales y micro estructurales, por los cuales tiene que atravesar la onda.

Las propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación que el equipo de ultrasonido nos presenta mediante la interface con el PC, varían debido a la dirección de toma de ultrasonido (ver Tabla 20, 21, 22Y 23).

Tabla 20. Propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación de probetas cubicas en sentido de la altura

No.	CODIGO DE MUESTRA	Relación de Poisson (ν)	Módulo de Young "Ed" (KPa)	Módulo de Bulk (KPa)	Módulo de Rigidez "G" (KPa)
1	P1 -M2	0,47	2043522,00	9827498,00	697284,00
2	P1 -M5	0,46	1900967,00	7919140,00	651020,00

3	P1 -M4	0,39	5823614,00	9050597,00	2090677,00
4	P1 -M3	0,49	2371409,00	32308596,00	796969,00
5	P2 -M3	0,07	3234384,00	1256178,00	1510167,00
6	P1 -M1	0,46	5372201,00	21491724,00	1841890,00
7	P3 -M1	0,44	2853497,00	8456629,00	988216,00
8	P2 -M1	0,49	983723,00	15279409,00	330270,00
9	P2 -M2	0,45	4560324,00	14212793,00	1576305,00
10	P3 -M2	0,47	1709125,00	9076641,00	581882,00
Valor máximo		0,49	5823614,00	32308596,00	2090677,00
Valor mínimo		0,07	983723,00	1256178,00	330270,00

Fuente: Resultados del proyecto

Tabla 21. Propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación de probetas cubicas en sentido del Ancho

No.	CODIGO DE MUESTRA	Relación de Poisson (v)	Módulo de Young "Ed" (KPa)	Módulo de Bulk (KPa)	Módulo de Rigidez "G" (KPa)
1	P1 -M2	0,38	11120367,00	15441221,00	4029203,00
2	P1 -M5	0,45	3754521,00	12703104,00	1294002,00
3	P1 -M4	0,47	4091674,00	24609196,00	1389562,00
4	P1 -M3	0,47	5125065,00	26720132,00	1745556,00
5	P2 -M3	0,45	5015281,00	16289904,00	1730974,00
6	P1 -M1	0,34	14110715,00	15047752,00	5250648,00
7	P3 -M1	0,39	5865231,00	8789992,00	2111634,00
8	P2 -M1	0,48	1173601,00	10579177,00	396082,00
9	P2 -M2	0,17	14187703,00	7215820,00	6051221,00
10	P3 -M2	0,49	1256312,00	14100576,00	422958,00
Valor máximo		0,49	14187703,00	26720132,00	6051221,00
Valor minimo		0,17	1173601,00	7215820,00	396082,00

Fuente: Resultados del proyecto

Tabla 22. Propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación de probetas cubicas en sentido de la profundidad

No.	CODIGO DE MUESTRA	Relación de Poisson (ν)	Módulo de Young "Ed" (KPa)	Módulo de Bulk (KPa)	Módulo de Rigidez "G" (KPa)
1	P1 -M2	0,48	2150172,00	19119704,00	725793,00
2	P1 -M5	0,30	2812534,00	2365463,00	1080220,00
3	P1 -M4	0,36	2191213,00	2520943,00	808487,00
4	P1 -M3	0,49	1863978,00	27347152,00	626067,00
5	P2 -M3	0,24	2696270,00	1723328,00	1087874,00
6	P1 -M1	0,39	10576803,00	16311163,00	3799339,00
7	P3 -M1	0,48	1674803,00	13520391,00	566059,00
8	P2 -M1	0,48	1937523,00	13803718,00	656073,00
9	P2 -M2	0,48	1585574,00	11801526,00	536534,00
10	P3 -M2	0,47	2662010,00	15265156,00	904869,00
Valor máximo		0,49	10576803,00	27347152,00	3799339,00
Valor mínimo		0,24	1585574,00	1723328,00	536534,00

Fuente: Resultados del proyecto

Tabla 23. Propiedades dinámicas a bajos niveles de deformación de probetas cilíndricas en sentido de la altura

No.	CODIGO DE MUESTRA	Relación de Poisson (ν)	Módulo de Young "Ed" (KPa)	Módulo de Bulk (KPa)	Módulo de Rigidez "G" (KPa)
1	P1 -M6	0,42	4017931,00	7923569,00	1419276,00
2	P1 -M7	0,44	4544516,00	11960926,00	1581608,00
3	P2 -M4	0,35	2010004,00	2191999,00	746009,00
4	P2 -M5	0,38	6435026,00	8839880,00	2333773,00
5	P2 -M6	0,43	3725434,00	8598183,00	1304619,00
6	P2 -M7	0,43	3827565,00	9567913,00	1335204,00
7	P2 -M8	0,44	3797911,00	10101627,00	1321161,00
8	P2 -M9	0,39	6147799,00	9756316,00	2203548,00

9	P3 -M3	0,45	3594294,00	12480007,00	1237705,00
10	P3 -M4	0,44	4802314,00	13029880,00	1669124,00
11	P3 -M6	0,44	3903773,00	10766713,00	1355881,00
12	P3 -M7	0,43	4269327,00	10224495,00	1492347,00
13	P3 -M8	0,40	5580984,00	9442492,00	1991087,00
14	P3 -M9	0,46	3728066,00	15067742,00	1277818,00
Promedio		0,42	4313210,29	9996553,00	1519225,71

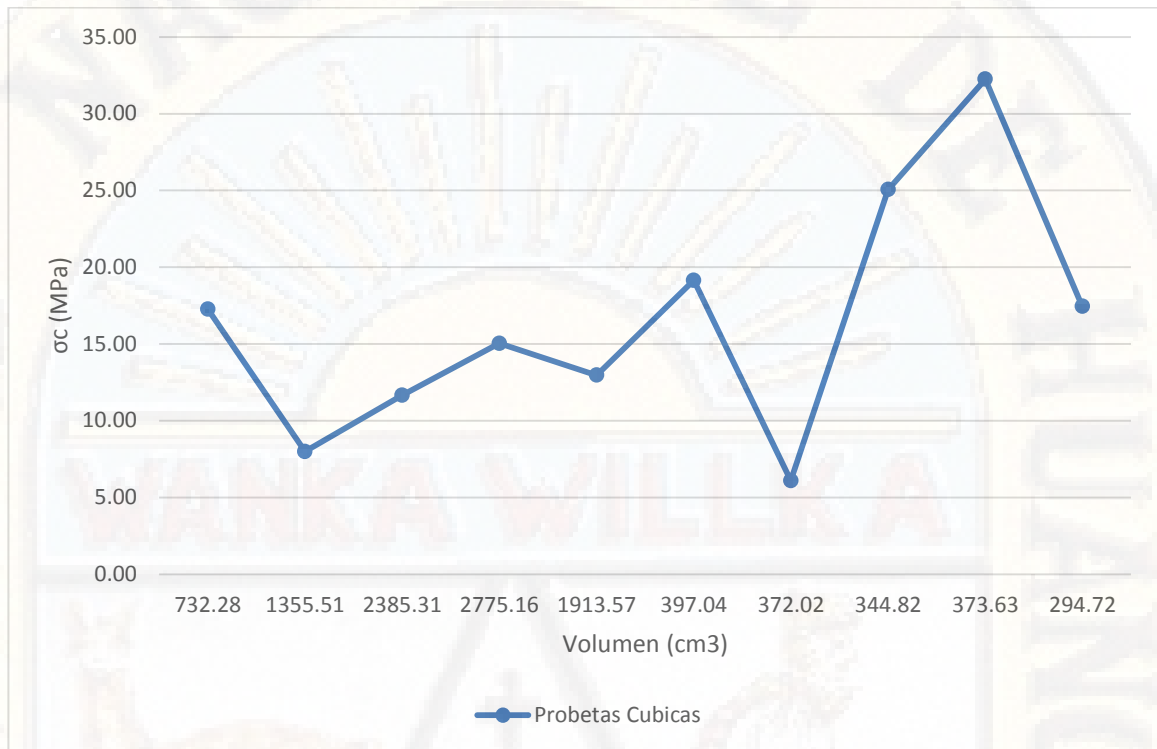
Fuente: Resultados del proyecto

Comparando los resultados de módulos de deformación dinámicos E_d y módulos de deformación E calculados por compresión simple, los primeros mencionados son mayores que los segundos, los cuales tienen relación, pero difieren en sus valores. El módulo de Poisson para probetas cúbicas están muy diferenciados en sus valores por lo cual se optó por promediar los obtenidos con probetas cilíndricas dando un resultado de 0.42.

4.1.7 Influencia del tamaño de las muestras con relación a los resultados de compresión simple

Debido a que este proyecto es enfocado en la estimación de la resistencia de pilares de laboreo minero, es necesaria la determinación de un factor de escala que nos determine la resistencia del macizo rocoso por medio de la resistencia a la compresión simple de probetas en laboratorio. Esto se realiza para no sub dimensionar o sobre dimensionar las explotaciones mineras garantizando un factor de seguridad óptimo en el dimensionamiento del método. Por tal motivo es importante observar la variación de la resistencia a la compresión uniaxial máxima de cada una de las probetas frente al tamaño de la muestra, como se puede ver en la Ilustración 24.

Ilustración 24. Influencia del tamaño de las muestras con respecto a la resistencia uniaxial



Fuente: Resultados del proyecto

Analizando la gráfica anterior, en la medida en que se aumenta el volumen del espécimen, aumenta la posibilidad que haya influencia de características geo estructurales con lo cual el esfuerzo a la compresión uniaxial decrece proporcionalmente, con lo cual nos damos cuenta que la resistencia de los pilares de roca fosfórica va a tener un valor mucho menor que la resistencia de las probetas de esbeltez 2, sometidas a compresión simple.

4.1.8 Influencia de la tensión axial en velocidades de propagación de ondas p de ultrasonido

Los resultados de las mediciones de velocidad de onda ultrasónica presentados previamente, corresponden a una condición de esfuerzo nulo, es decir que mientras se realizó la medición de velocidad de onda solamente

está actuando el peso propio del espécimen. Sin embargo, cuando se realiza una excavación minera subterránea el estado de esfuerzos natural es modificado por efecto de la excavación, en el caso de pilares en sus paredes la roca está sometida a una condición de esfuerzo a compresión simple, pero en su interior la condición de esfuerzos es triaxial. Por lo anterior, sería apropiado evaluar la variación de la velocidad de propagación de onda durante un proceso de carga a compresión simple y a compresión triaxial, con el fin de establecer la influencia del cambio en el estado de esfuerzos en este parámetro, para el presente proyecto se limitó la investigación a la influencia de tensiones en condición de compresión uniaxial.

Para estudiar la influencia de la tensión en las velocidades de ondas de ultrasonido tanto en dirección paralela como perpendicular a la estratificación, fue necesaria la toma de velocidades de propagación de ondas P de ultrasonido a diferentes niveles de carga de compresión simple, y en diferentes direcciones de la probeta cúbica. Para la determinación de la variación de la velocidad de la onda P, en ambas direcciones fue necesaria la obtención de las velocidades en sentido paralelo a la estratificación en estado de humedad natural y posteriormente la variación a diferentes niveles de carga al que fue sometida cada probeta. Las relaciones que fueron utilizadas para el cálculo de variación se presentan en las ecuaciones 10 y 11¹².

$$\text{Variación } V_{\text{perp}} = \left(\frac{V_{\text{tensión variable}} - V_{\text{perp}}}{V_{\text{perp}}} \right) * 100 \quad (10)$$

¹² CLOVIS GONZATTI. Propuesta para la estimación de la resistencia a la compresión uniaxial de cámaras de carbón con la utilización de geofísica. Universidad de Sao Paulo, 2007. P 137.

$$\text{Variación } V_{\text{par}} = \left(\frac{V_{\text{tensión variable}} - V_{\text{par}}}{V_{\text{par}}} \right) * 100 \quad (11)$$

Donde

Variación V_{perp} : Variación de velocidad de propagación de onda ultrasónica medida en dirección perpendicular a los planos de estratificación (%).

Variación V_{par} : Variación de velocidad de propagación de onda ultrasónica medida en dirección paralela a los planos de estratificación (%).

V_{perp} : Velocidad de propagación de onda ultrasónica medida en dirección perpendicular a los planos de estratificación de roca fosfórica sin la aplicación de esfuerzo (m/s).

V_{par} : Velocidad de propagación de onda ultrasónica medida en dirección paralela a los planos de estratificación de roca fosfórica sin la aplicación de esfuerzo (m/s).

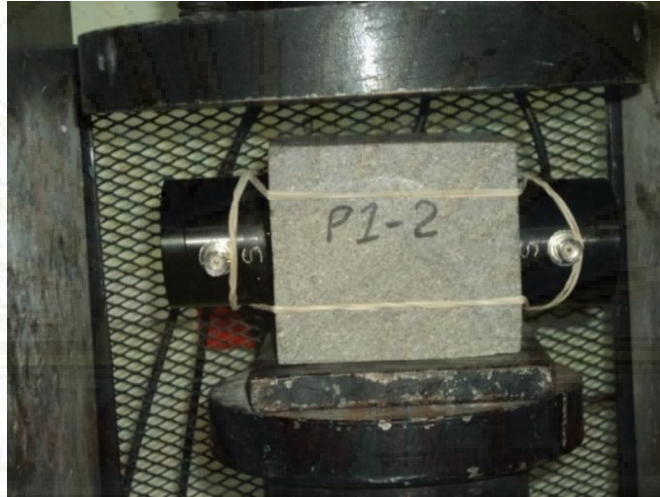
$V_{\text{tensión variable}}$: Velocidad de propagación de onda ultrasónica medida a diferentes tensiones del ensayo de compresión simple (m/s).

Variación de las velocidades de ondas P de ultrasonido, en dirección paralela a la estratificación

Para la determinación de la variación de las velocidades de ondas P de ultrasonido paralelas a la estratificación, fue necesario la medición de ondas P, en una dirección cuando las probetas fueron sometidas a diferentes cargas en dirección perpendicular a la estratificación, con lo cual se relacionaron los resultados obtenidos sin carga en la misma dirección de medida. El procedimiento que se siguió para la toma de las velocidades de ondas P de ultrasonido con carga axial variable consistió en colocar en

pausa el equipo de compresión simple superior a 8 KN y posterior toma de velocidad como se puede apreciar en la Ilustración 25.

Ilustración 25. Toma de velocidades de ondas P de ultrasonido con carga axial variable



Fuente: Autor del proyecto.

Los resultados de las velocidades de ondas de ultrasonido en dirección paralela a los planos de estratificación con carga variable sobre las probetas se pueden apreciar en el Tabla 24. Podemos observar que a medida que aumentamos la compresión uniaxial en cada cubo de roca fosfórica las velocidades de ondas P de ultrasonido tienden a atenuarse y decrecer su velocidad, como se aprecia en la Ilustración 26. Analizando los resultados de variación de las velocidades de onda P, en probetas cubicas con el pilar insitú, se llega a la conclusión que a medida que se aplica mayor carga sobre las probetas las velocidades paralelas a la estratificación tienden a decrecer, lo cual se puede decir que dichas, mediciones en los pilares son afectadas por la carga que se está dando en el pilar.

Tabla 24. Resultados de variación de velocidades de propagación de ondas P de ultrasonido en dirección paralelas a la estratificación

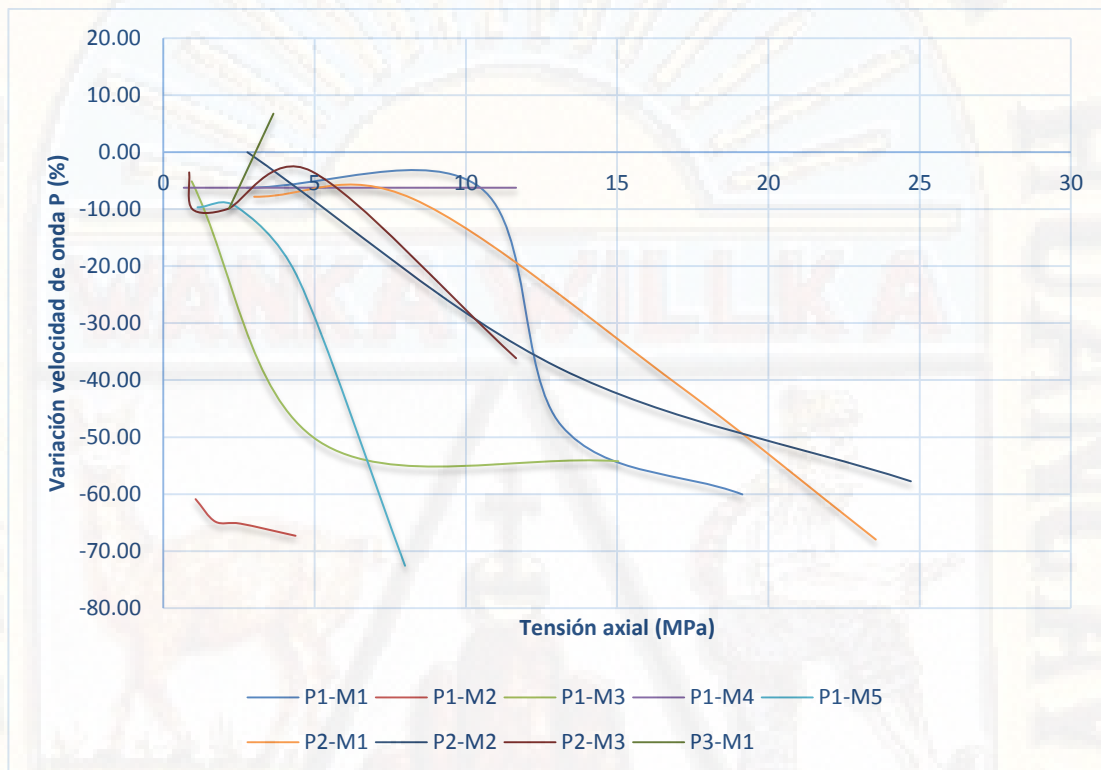
No	No. DE	SENTIDO	VELOCIDAD DE	ESFUERZO	VELOCIDAD DE	VARIACIÓN DE
----	--------	---------	--------------	----------	--------------	--------------

	MUESTRA	DE MEDIDA	ONDA P CON TENSIÓN AXIAL = 0 (m/s)	(MPa)	ONDA P CON TENSIÓN AXIAL VARIABLE (m/s)	VELOCIDAD DE ONDA P (%)
1	P1-M1	Ancho	3087	2,75	2895	-6,22
2	P1-M1	Ancho	3087	10,48	2895	-6,22
3	P1-M1	Ancho	3087	13,16	1606	-47,98
4	P1-M1	Ancho	3087	19,14	1234	-60,03
5	P1-M2	Ancho	2972	1,07	1164	-60,83
6	P1-M2	Ancho	2972	1,72	1046	-64,80
7	P1-M2	Ancho	2973	2,55	1036	-65,15
8	P1-M2	Ancho	2974	4,37	973	-67,28
9	P1-M3	Ancho	3387	0,94	3213	-5,14
10	P1-M3	Ancho	3387	5,14	1670	-50,69
11	P1-M3	Ancho	3387	15,04	1551	-54,21
12	P1-M4	Ancho	3245	0,67	3043	-6,22
13	P1-M4	Ancho	3245	1,52	3043	-6,22
14	P1-M4	Ancho	3245	3,01	3043	-6,22
15	P1-M4	Ancho	3245	5,4	3043	-6,22
16	P1-M4	Ancho	3245	7,93	3043	-6,22
17	P1-M4	Ancho	3245	11,66	3043	-6,22
18	P1-M5	Ancho	2502	1,13	2260	-9,67
19	P1-M5	Ancho	2502	2,45	2260	-9,67
20	P1-M5	Ancho	2502	4,46	1947	-22,18
21	P1-M5	Ancho	2502	7,99	687	-72,54
22	P2-M1	Profundidad	2564	3	2364	-7,80
23	P2-M1	Profundidad	2564	8,26	2354	-8,19
24	P2-M1	Profundidad	2564	17,04	1515	-40,91
25	P2-M1	Profundidad	2564	23,55	822	-67,94
26	P2-M2	Ancho	2602	2,78	2602	0,00
27	P2-M2	Ancho	2602	13,09	1617	-37,86
28	P2-M2	Ancho	2602	24,71	1100	-57,72
29	P2-M3	Ancho	2906	0,85	2803	-3,54
30	P2-M3	Ancho	2906	0,96	2616	-9,98
31	P2-M3	Ancho	2906	2,11	2616	-9,98
32	P2-M3	Ancho	2906	4,9	2809	-3,34
33	P2-M3	Ancho	2906	11,66	1856	-36,13

34	P3-M1	profundidad	2542	2,18	2292	-9,83
35	P3-M1	profundidad	2542	3,64	2714	6,77

Fuente: Resultados del proyecto

Ilustración 26. Variación de las ondas P de ultrasonido en dirección paralela a la estratificación



Fuente: Resultados del proyecto

Los anteriores resultados, fueron determinados para realizar una comparación directa entre la variación de las ondas P de ultrasonido paralelas y perpendiculares a los planos de estratificación de las muestras cubicas, con lo cual se analiza la anisotropía que presenta la roca.

Variación de las velocidades de ondas P de ultrasonido, en dirección perpendicular a la estratificación

El estudio de la variación de la velocidad de onda P ultrasónica con el nivel de esfuerzo a compresión uniaxial, se llevó a cabo con la realización de seis ensayos de compresión simple con aplicación de la carga en el sentido perpendicular de los planos de estratificación (sentido de techo a base del espécimen), para lo cual fue necesario diseñar y fabricar dos carcasas de acero de alta resistencia (ver Ilustración 27), que sirvieron como elemento de protección para cada uno de los transductores mientras se efectuaba la medición de velocidad de onda P con el incremento de la carga a compresión. La configuración del montaje para la ejecución de las mediciones se puede observar en la Ilustración 28.

Por medio de la ecuación 10 anteriormente presentada se calcularon las variaciones de las velocidades de onda P de ultrasonido (ver Tabla 25); debido a la utilización de las carcasas de acero fue necesario calibrar el equipo en la configuración cara a cara, de donde se obtuvo un tiempo de viaje de onda P y S entre transductores y carcasas igual a $12.2 \mu s$. La variación de la velocidad de onda P ultrasónica es presentada en la Ilustración 29, donde se observa que ésta tiene un comportamiento incremental, es decir que para esta condición la velocidad de onda P aumenta con el incremento de la magnitud del esfuerzo a compresión hasta cierto punto a partir del cual la variación permanece casi constante antes de que el espécimen alcanza la falla.

Ilustración 27. Carcasa para medición de ondas P de ultrasonido perpendicular a la estratificación



Fuente: Resultados del proyecto

Ilustración 28. Colocación de las carcasa para determinar las velocidad de propagación de ondas P, perpendicular a la estratificación con carga axial variable



Fuente: Resultados del proyecto

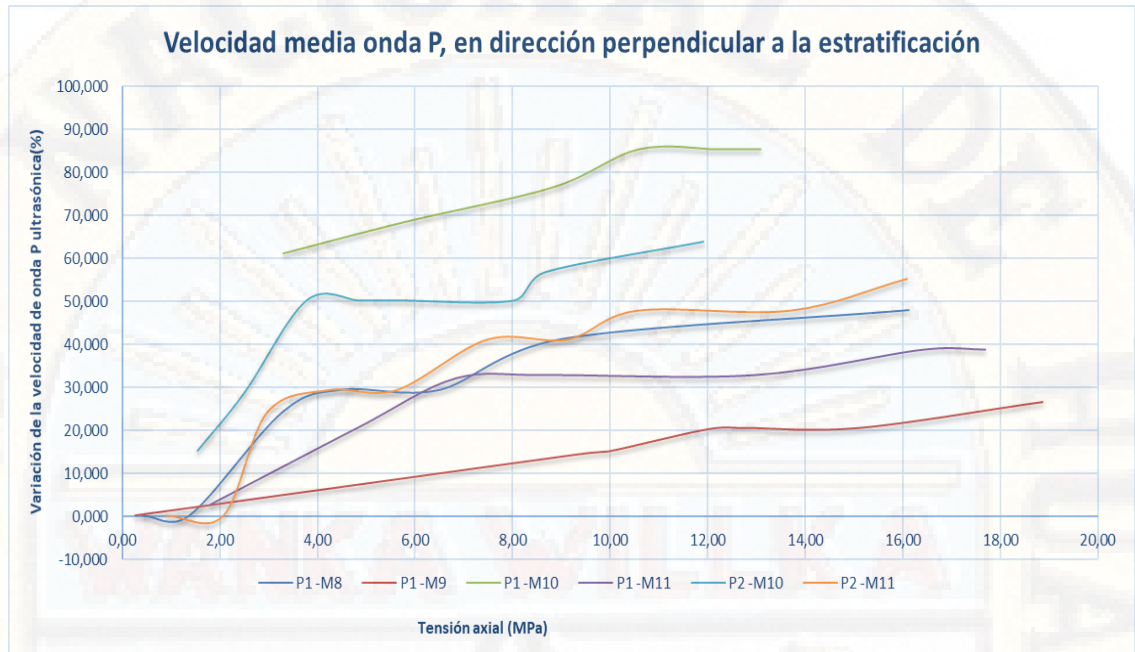
Tabla 25. Resultados de variaciones de las ondas de ultrasonido perpendicular a la estratificación con carga axial variable

No.	No. DE MUESTRA	ESFUERZO (MPa)	VELOCIDAD ULTRASONICA Onda P CON CARGA VARIABLE (m/s)	VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE ONDA P (%)
1	P1-M8	0,42	2060,00	0,195
2	P1-M8	1,38	2060,00	0,195
3	P1-M8	3,29	2554,00	24,222
4	P1-M8	4,51	2661,00	29,426
5	P1-M8	6,53	2661,00	29,426
6	P1-M8	9,02	2903,00	41,196
7	P1-M8	12,79	3041,00	47,909
8	P1-M8	16,13	3361,00	63,473
9	P1-M9	0,27	2686,00	0,261
10	P1-M9	9,41	3069,00	14,558
11	P1-M9	9,99	3086,00	15,192
12	P1-M9	12,01	3223,00	20,306
13	P1-M9	12,81	3230,00	20,567
14	P1-M9	15,10	3230,00	20,567
15	P1-M9	18,87	3392,00	26,614
16	P1-M10	3,30	2707,00	61,131
17	P1-M10	5,80	2830,00	68,452
18	P1-M10	8,83	2965,00	76,488
19	P1-M10	10,59	3113,00	85,298
20	P1-M10	12,18	3113,00	85,298
21	P1-M10	12,66	3113,00	85,298
22	P1-M10	13,09	3113,00	85,298
23	P1-M11	1,81	2350,00	2,710
24	P1-M11	4,83	2759,00	20,586
25	P1-M11	6,85	3022,00	32,080

26	P1-M11	8,71	3038,00	32,780
27	P1-M11	12,96	3038,00	32,780
28	P1-M11	16,41	3173,00	38,680
29	P1-M11	17,69	3173,00	38,680
30	P2-M10	1,54	2003,00	15,380
31	P2-M10	2,50	2236,00	28,802
32	P2-M10	3,77	2609,00	50,288
33	P2-M10	4,84	2609,00	50,288
34	P2-M10	5,21	2609,00	50,288
35	P2-M10	5,74	2609,00	50,288
36	P2-M10	8,03	2609,00	50,288
37	P2-M10	8,67	2723,00	56,855
38	P2-M10	11,91	2846,00	63,940
39	P2-M11	0,90	2072,00	0,193
40	P2-M11	2,07	2072,00	0,193
41	P2-M11	2,97	2570,00	24,275
42	P2-M11	4,25	2677,00	29,449
43	P2-M11	5,63	2677,00	29,449
44	P2-M11	7,49	2920,00	41,199
45	P2-M11	9,14	2920,00	41,199
46	P2-M11	10,57	3059,00	47,921
47	P2-M11	13,70	3059,00	47,921
48	P2-M11	16,09	3212,00	55,319

Fuente: Resultados del proyecto

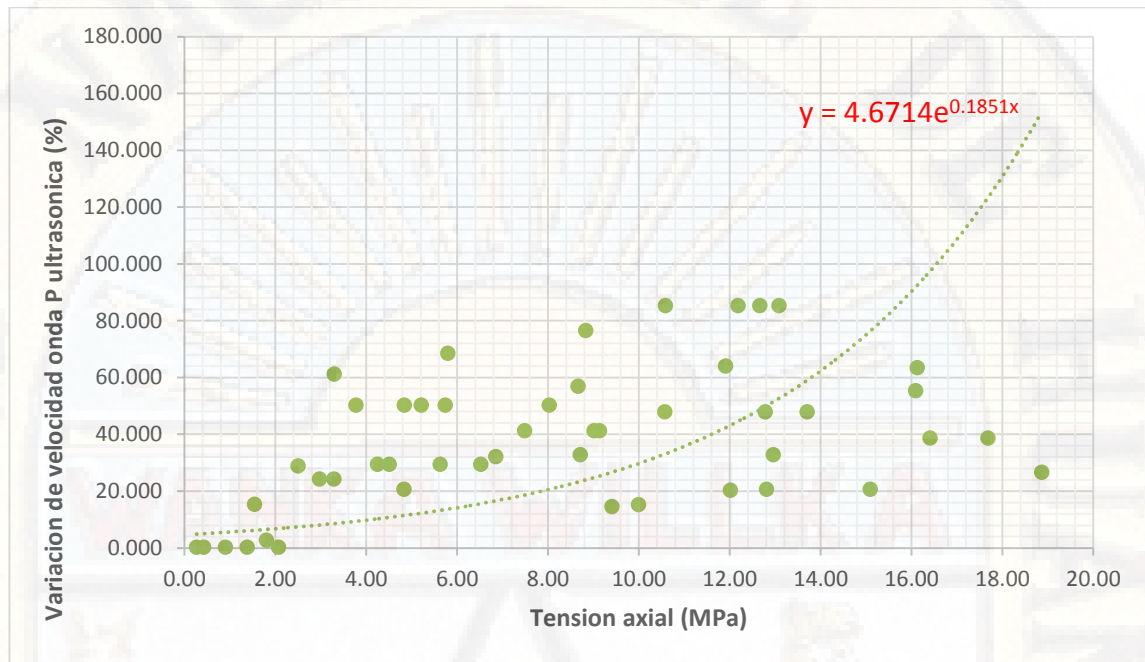
Ilustración 29. Variaciones de las ondas P de ultrasonido con respecto a su carga axial en dirección perpendicular a la estratificación



Fuente: Resultados del proyecto

De acuerdo a los resultados del Tabla 25 y la Ilustración 29, la velocidad de la onda P se incrementa con el nivel de la carga a compresión aplicada. Con el fin de consolidar estos resultados se realizó una gráfica de la variación de la velocidad de onda P ultrasónica en sentido perpendicular a los planos de estratificación con el esfuerzo a compresión, y se realizó una regresión exponencial (ver Ilustración 30), para determinar una curva característica del material (Gonzatti, 2007); la ecuación obtenida de la regresión está en función del esfuerzo a compresión y permitirá calcular un factor de corrección propuesto por Gonzatti, de acuerdo al esfuerzo a compresión que actúa sobre el pilar. Para mayor detalle de los resultados obtenidos (ver bases de datos).

Ilustración 30. Curva característica de roca fosfórica relacionando el esfuerzo axial y la variación de velocidades de ondas P, en sentido perpendicular a la estratificación



Fuente: Resultados del proyecto

Como las velocidades de propagación de ondas P en campo son producto de la refracción sísmica, es importante determinar un factor de corrección por medio de la carga a la que se ve afectado el macizo rocoso (Clovis Gonzatti, 2007). Por tal motivo el factor de corrección F1 debido a la tensión está dado por la ecuación 12. La ecuación en función de la variable x, está dada por la curva característica del material.

$$F1 = 1 - \frac{y(x = \sigma_v)}{100} \quad (12)$$

σ_v : Esfuerzo vertical al que se ve sometido el pilar (MPa).

F1: Factor de corrección por tensión axial en el pilar.

Al aplicar la ecuación 12 para diferentes magnitudes de esfuerzo vertical sobre el pilar, se obtienen diferentes valores de factor de corrección F1; una

vez estimado el esfuerzo que actúa sobre el pilar se toma el factor de corrección F1 apropiado para éste (ver Tabla 26).

Tabla 26. Valores para el factor de corrección por esfuerzo axial F1

ESFUERZO VERTICAL INSITU (MPa)	F1 ROCA FOSFORICA
1	0,94
2	0,93
3	0,92
4	0,90
5	0,88
6	0,86
7	0,83
8	0,79
9	0,75
10	0,70
11	0,64
12	0,57
13	0,48
14	0,38
15	0,25

Fuente: Resultados del proyecto

4.1.9 Influencia del nivel de saturación del macizo rocoso frente a la velocidad de propagación de ondas p, de ultrasonido

Debido a que las rocas en su estructura pueden estar compuestas de cierta cantidad de agua, es impórtate el análisis de la influencia del agua presente en cada muestra por medio de la saturación, lo cual puede hacer que las velocidades de onda P, sean mayores o menores según su grado de saturación (Clovis Gonzatti, 2007). Esto puede ser explicado debido a que el agua es un conductor de pulsos vibratorios y las ondas de ultrasonido se inducen por pulsos que alteran por medio de vibraciones a la muestra en

análisis. En si lo que se busca es un factor que relaciones el nivel de saturamiento de los pilares con las velocidades de ondas de ultrasonido y refracción sísmica.

Para determinar este factor de corrección por humedad de la roca F2, se saturaron durante 24 horas las 10 probetas cubicas de roca fosfórica garantizando la saturación total de cada muestra, pasadas 12 y 24 horas se midieron las velocidades de ondas de ultrasonido tipo P y su masa (ver Ilustración 31). Posteriormente se colocaron en el horno por un tiempo de 24 horas para garantizar el secado total de cada bloque y así adquirir los resultados de ondas P de ultrasonido de los bloques en su condición seca.

Teniendo en cuenta que las velocidades de ondas sísmicas en campo, efectuadas en cada uno de los pilares son en sentido paralelo a la estratificación, se debe mantener esta misma relación para la corrección de las mismas por lo cual para el factor de corrección F2, se determinó una velocidad ponderada paralela a la estratificación por medio de la relación 13^{13} , tanto en un estado de humedad natural de las muestras, en un estado seco y un estado saturado.

¹³GONZATTI. Op. Cit., p. 81.

Ilustración 31. Saturación de las probetas cubicas de roca fosfórica



Fuente: Resultados del proyecto

$$V_{\text{pond. par}} = (V_{\text{ancho}} * V_{\text{profundidad}})^{0.5} \quad (13)$$

Donde

$V_{\text{pond. Par}}$: Velocidad ponderada en dirección paralela a los planos de estratificación (m/s).

V_{ancho} : Velocidad en sentido del ancho de la probeta cubica (m/s).

V profundidad: Velocidad en sentido de la profundidad de la probeta cubica (m/s).

Los resultados del Tabla 30, fueron determinados de las velocidades de propagación de ondas P, en su estado natural, por lo cual en la determinación de las saturaciones solo se pudieron determinar dos datos los cuales fueron suficientes para extraer la regresión exponencial de los datos.

Debido a que se quiere es determinar factores de corrección por humedad, es necesario determinar la variación de cada una de las velocidades ponderadas con base a los datos de velocidades de ondas P, en un medio seco. Para este fin se procedió a la utilización de la relación 14¹⁴, la cual involucra la velocidad ponderada de cada una de las probetas cubicas en su estado Semi saturado, saturado y seco.

Los resultados de velocidades ponderadas y variaciones se presentan en el Tabla 27, 28, 29 Y 30. Para mejor análisis de las velocidades ponderadas paralelas a la estratificación (ver bases de datos).

$$\text{Var. V pond. par} = \left(\frac{V \text{ pond. variable} - V \text{ pond. seca}}{V \text{ pond. seca}} \right) * 100 \quad (14)$$

Donde

Var. V pond. Par: Variación de la velocidad ponderada en dirección paralela a los planos de estratificación (%).

V pond variable Velocidad Ponderada variable en dirección paralela a los planos de estratificación saturada o Semi saturada (m/s)

¹⁴ GONZATTI. Op. Cit., p. 86.

V pond. Seca velocidad ponderada en condición seca en dirección paralela a los planos de estratificación (m/s).

Tabla 27. Velocidades ponderadas paralelas a la estratificación con carga axial ± 0

No.	CODIGO DE MUESTRA	VELOCIDAD PONDERADA (Ancho*profundidad) ^{0.5} (m/s)
1	P1 -M2	2520,152
2	P1 -M5	2213,915
3	P1 -M4	2694,843
4	P1 -M3	3506,396
5	P2 -M3	1882,130
6	P1 -M1	3151,330
7	P3 -M1	2195,467
8	P2 -M1	2432,322
9	P2 -M2	2645,142
10	P3 -M2	2377,215
Promedio		2561,891

Fuente: Resultados del proyecto

Tabla 28. Velocidades ponderadas de onda P, para probetas cubicas secas

No.	CODIGO DE MUESTRA	SATURACION (%)	VELOCIDAD PONDERADA (Ancho*profundidad) ^{0.5} (m/s)
1	P1 -M2	0	2941,42
2	P1 -M5	0	1403,48
3	P1 -M4	0	3234,83
4	P1 -M3	0	2257,35
5	P2 -M3	0	2689,36
6	P1 -M1	0	2887,43
7	P3 -M1	0	2420,65
8	P2 -M1	0	2596,80
9	P2 -M2	0	2862,24

10	P3 -M2	0	2976,50
----	--------	---	---------

Fuente: Resultados del proyecto

Tabla 29. Velocidades ponderadas y variación de ondas P

No.	CODIGO DE MUESTRA	SATURACION (%)	VELOCIDAD PONDERADA (Ancho*profundidad) ^{0.5} (m/s)	VARIACION VELOCIDAD PONDERADA PARALELA (%)
1	P1 -M2	100,000	3371,17	14,61
2	P1 -M5	100,000	1827,66	30,22
3	P1 -M4	100,000	4152,56	28,37
4	P1 -M3	100,000	3383,17	49,87
5	P2 -M3	100,000	2889,62	7,45
6	P1 -M1	100,000	3289,97	13,94
7	P3 -M1	100,000	2529,77	4,51
8	P2 -M1	100,000	2640,76	1,69
9	P2 -M2	100,000	3408,36	19,08
10	P3 -M2	100,000	3007,00	1,02

Fuente: Resultados del proyecto

Debido a que los resultados de velocidades de ondas de ultrasonido perpendiculares a la estratificación de la roca fosfórica, seca y saturada, no son suficientes se presentan a continuación dos datos con saturaciones entre 18% y 21%, lo cual nos presentan datos para realizar la gráfica de variación debido a la saturación de la roca.

Tabla 30. Velocidades ponderadas y variación de ondas P, para probetas cubicas Semi saturadas

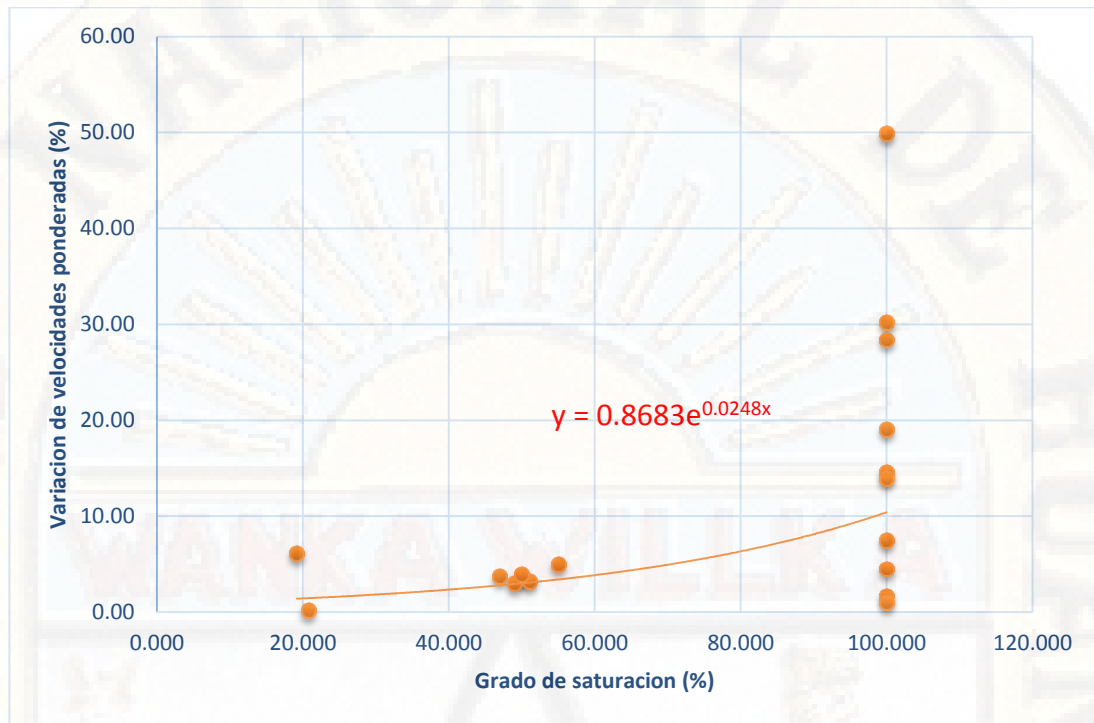
No.	CODIGO DE MUESTR	SATURACION (%)	VELOCIDAD PONDERADA (Ancho*profundidad) ^{0.5}	VARIACION VELOCIDAD PONDERADA
-----	------------------	----------------	--	-------------------------------

	A		(m/s)	PARALELA (%)
1	P1 -M2	20,747	2945,89	0,152
2	P1 -M1	19,142	3063,41	6,095

Fuente: Resultados del proyecto

Observando los cuadros anteriormente mencionados se puede analizar que las ondas P de velocidad de ultrasonido aumentan su variación cuando la probeta se encuentra saturada, por lo cual dichos datos y resultados son presentados en la Ilustración 32. A mayor saturación de las probetas se tiende al aumento de la velocidad de propagación de ondas P ultrasónicas. Como lo plantea Clovis Gonzatti en su tesis doctoral 2007, el factor de correlación por humedad esta dado debido a la variación que presenta las velocidades de ondas P, con mayor o menor saturación.

Ilustración 32. Factor de corrección por humedad que presenta el macizo rocoso de roca fosfórica



Fuente: Resultados del proyecto

Debido a que la roca puede presentar diferentes estados de humedad dependiendo de las condiciones que presente la explotación por cámaras y pilares en la mina de roca fosfórica carolina, se presentan diferentes factores de corrección por humedad (ver Tabla 31), extraídos de la regresión exponencial de tendencia que tienen los datos de la Ilustración 32.

Tabla 31. Factores de corrección por humedad para diferentes estados de la roca

CONDICION DE HUMEDAD	FACTOR DE CORRECCIÓN POR CONDICIONES DE HUMEDAD (F2)
ROCA SECA O EN HUMEDAD NATURAL (No se observa agua en las paredes del pilar)	1

ROCA HUMEDA (Paredes del pilar mojadas)	0.95
ROCA SATURADA (Agua escurriendo en las paredes del pilar)	0.9

Fuente: Resultados del proyecto

4.1.10 Velocidades de propagación de ondas p insitú, por refracción sísmica

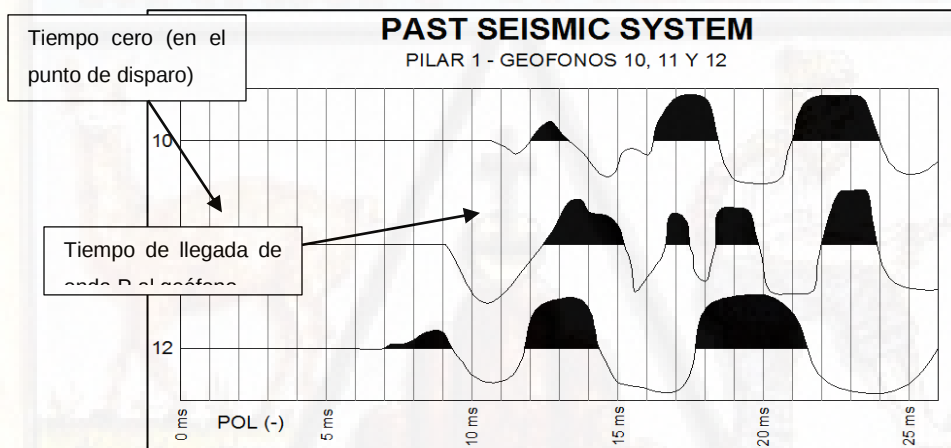
La determinación de la velocidad de propagación de Onda P in situ se realizó con la utilización de un equipo sísmico tipo P.A.S.I. – LCM-3, este equipo cuenta con tres canales de medición, permite hacer pruebas de refracción sísmica, Down-hole y Cross - hole; y maneja una frecuencia de 80 kHz. Para el presente proyecto se realizaron mediciones sísmicas en el contorno de los pilares seleccionados, tomando como referencia el procedimiento hecho por Gonzatti (2007) en su proyecto de doctorado.

Descripción de los ensayos sísmicos

Los ensayos sísmicos en ingeniería son una técnica que se basa en la propagación de ondas mecánicas a través del terreno, para lo cual se genera una perturbación que puede darse con el golpe de un martillo sobre una platina colocada en el punto de disparo, o con la utilización de una carga explosiva controlada en el punto de disparo. La perturbación genera una energía que se propaga a través del terreno como un frente de onda, para la medición de ésta energía se utilizan geófonos que son sensores de medición

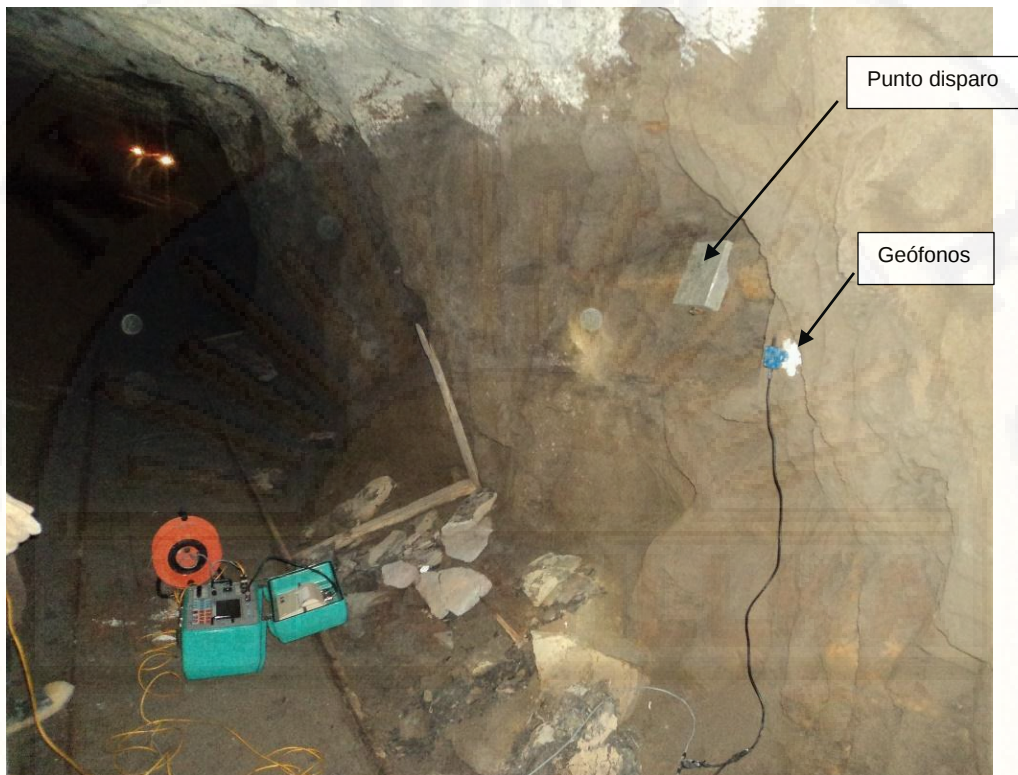
del desplazamiento, velocidad o aceleración de las partículas del terreno en el punto de medición por efecto del paso del frente de onda. Cada geófono tiene la posibilidad de captar un rayo o señal sísmica del frente de onda, el cual es transmitido a través de un cable central al sismógrafo donde se pueden visualizar las señales medidas por cada geófono e interpretar el tiempo de viaje de la Onda P desde el punto de disparo hasta el geófono (ver Tabla 31 Ilustración 33). El equipo utilizado para el proyecto al contar con tres canales permite solamente hacer mediciones con tres geófonos para cada disparo realizado (Ver Ilustración 34).

Ilustración 33. Visualización de señales sísmicas e interpretación del tiempo de llegada de la onda P al geófono



Fuente: Resultados del proyecto

Ilustración 34. Configuración del equipo para mediciones de refracción sísmica



Fuente: Resultados del proyecto

Una de las aplicaciones del ensayo sísmico es determinar la velocidad de propagación de onda P a través del medio, la cual se puede determinar a partir de la distancia de recorrido del rayo o señal y el tiempo de viaje de la onda P desde el punto de disparo hasta el geófono.

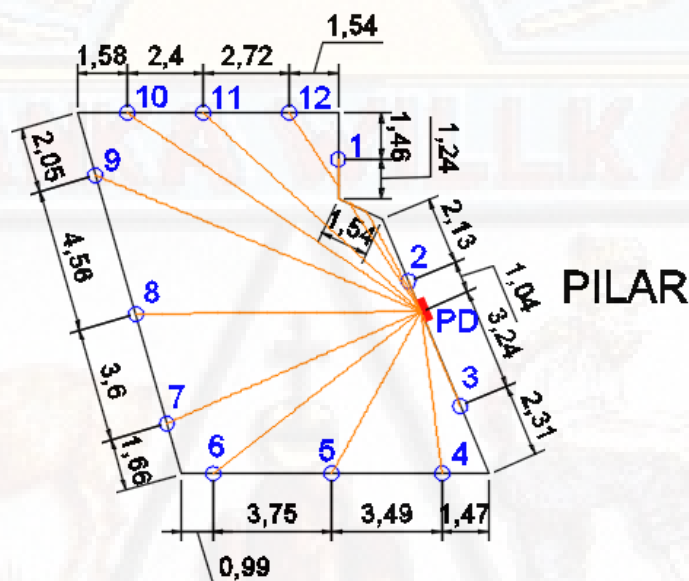
Configuración del ensayo y resultados

El motivo de la realización del ensayo de refracción sísmica es el de determinar las velocidades de propagación de ondas sísmicas de ondas P, las cuales son base fundamental para el desarrollo de la teoría de resistencia de macizos rocosos propuesta por Gonzatti en el año 2007. Es importante anotar que el método que se utilizó para la medición de las ondas P, fue de radiación alrededor del pilar (ver Ilustración 35), el cual fue seleccionado

debido a tomar la mayor cantidad de características de variabilidad del macizo rocoso de acuerdo a la dirección en la que se hace la medición.

El equipo que se utilizó para este ensayo de refracción sísmica es un equipo de 3 canales.

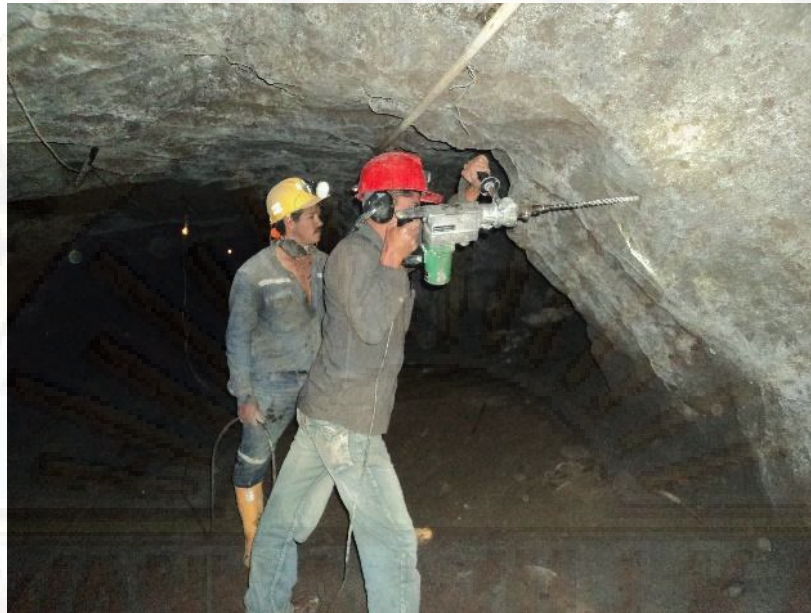
Ilustración 35. Esquemas que se levantó para refracción sísmica en cada uno de los pilares en análisis



Fuente: Resultados del proyecto

En el ensayo de refracción sísmica se realizaron 12 perforaciones en el pilar, por medio de un taladro eléctrico de 15 mm de diámetro con una profundidad de 15 cm aproximadamente. El objeto de dichas perforaciones fue el de poder hincar los geófonos a las paredes de los pilares por medio de la adherencia al mismo mediante la aplicación de cemento blanco, con baja adición de agua (ver Ilustración 36).

Ilustración 36. Preparación y fijación de geófonos alrededor del pilar



Fuente: Autor del proyecto

Los resultados obtenidos para el pilar con el ensayo de refracción sísmica se pueden observar en el Tabla 32, 32 y 33. Allí se puede apreciar las distancias que recorrió cada una de las ondas sísmicas, así como el tiempo que demoró cada una de ellas.

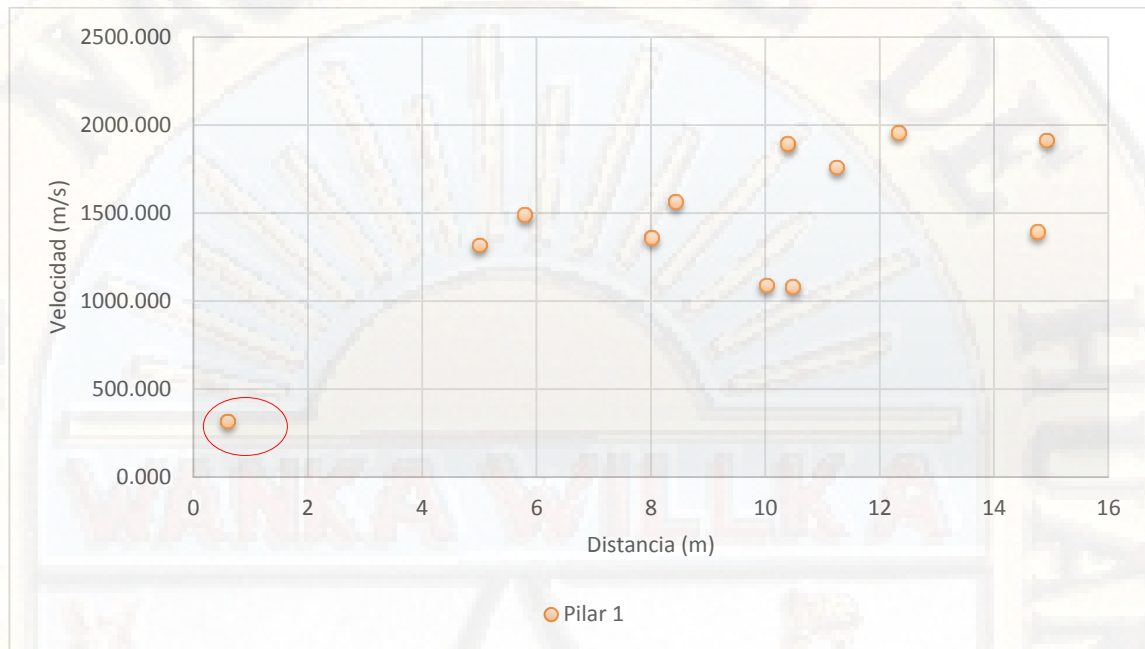
Tabla 32. Velocidades de ondas P, por medio de refracción sísmica para el pilar

PUNTO DE RECEPCIÓN	LONGITUD (m)	TIEMPO (ms)	VELOCIDAD DE ONDA P (m/s)
1	5,0002	3,8	1315,842
2	0,5998	1,9	315,684
3	5,7998	3,9	1487,128
4	10,482	9,7	1080,619
5	8,4313	5,4	1561,352
6	10,3995	5,5	1890,818
7	11,2563	6,4	1758,797
8	12,3254	6,3	1956,413
9	14,9193	7,8	1912,731
10	14,7604	10,6	1392,491
11	10,0204	9,2	1089,174
12	8,0135	5,9	1358,220
Velocidad promedio			1527,599

Fuente: Resultados del proyecto

Es importante establecer que las velocidades de ondas P, por refracción sísmica con distancias menores de 2 m y velocidades inferiores a 1000 ms, no fueron tomadas en cuenta para el valor final como se puede apreciar en la Ilustración 37, debido a que dichos datos difieren en gran parte del resto de los resultados. Los datos no están muy dispersos entre sí como lo muestra la gráfica, por lo cual el promedio de los mismo es consecuente y real para el cálculo de la estimación de la resistencia del macizo rocoso.

Ilustración 37. Velocidades de ondas P, producto del ensayo de refracción sísmica



Fuente: Resultados del proyecto

Como complemento al análisis de las velocidades de ondas P, de refracción sísmica se puede apreciar las bases de datos.

4.1.11 Estimación de la resistencia del macizo de roca fosfórica

Según la teoría Propuesta por el Doctor Clovis Gonzatti (2007), tiene en cuenta diferentes parámetros entre los cuales se tienen: la resistencia a la compresión simple de probetas de roca, factor de correlación debido a la carga axial, factor de correlación debido a la humedad de la roca, velocidad sísmica, velocidad ponderada medida con ultrasonido. Es importante establecer que la ecuación propuesta por Clovis inicialmente fue modificada por sugerencia directa de él, la cual se varió a la constante de 0.3 a 0.1.

Para la estimación de la resistencia del macizo rocoso con ayuda del pilar en estudio, fue necesario un corte transversal al nivel 3 y 4 inferior, con su

estructura estratigráfica en el cual se logró determinar la cobertura de la explotación y el peso específico promedio de los estratos supra yacentes, con lo cual se calculó el esfuerzo vertical que afecta al macizo rocoso en análisis.

El esfuerzo vertical, teniendo en cuenta la secuencia estratigráfica se calculó con un peso específico promedio de 23 KN/m^3 , con una cobertura determinada de 78 m, por medio de la relación 15, cuyo resultado se observa a continuación:

$$\sigma_v = \gamma * h \quad (15)$$

Donde

σ_v : Esfuerzo vertical (KPa)

γ : Peso específico (KN/m^3)

h: Cobertura (m)

Entonces:

$$\sigma_v = 23 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} * 78\text{m} = 1794 \text{ KPa} = \mathbf{1,794 \text{ MPa}}$$

Relacionando los factores F1, F2 velocidades de ondas P de ultrasonido y velocidades de ondas P de refracción sísmicas con la resistencia a la compresión uniaxial se tiene obtuvo la relación 16, propuesta por Clovis Gonzatti en el año 2007, modificada para el macizo de roca fosfórica.

$$S_1 = \frac{\left(\frac{V_{\text{sismica}} * F1 * F2}{V_{\text{pond.par}}} \right)^{0,5} - 0,1}{3} * \sigma_c \quad (16)$$

Donde

S_1 : Resistencia del macizo de roca fosfórica (MPa).

V sísmica: Velocidades de ondas P de refracción sísmica medidas en dirección paralela a los planos de estratificación del banco de roca fosfórica, obtenidas en distancias mayores de 2m, en (m/s).

V pond. par: Velocidades ponderada de propagación de ondas de ultrasonido en dirección paralela a los planos de estratificación del banco de roca fosfórica, medida en probetas cubicas de 5cm a 12cm, sobre condiciones de tensión ± 0 . Probetas con humedad naturas o seca cuya saturación es ± 0 , (m/s).

F1: Factor de correlación de ondas sísmicas debido al efecto de la tensión vertical insitú. F1 corrige las velocidades de ondas sísmicas para una condición de tensión de ± 0 .

F2: Factor de correlación de velocidades de ondas sísmicas debido a la presencia de agua insitú. F2 corrige la velocidad de onda sísmica para una condición seca o de humedad natura con saturación ± 0 .

σ_c : Resistencia a la compresión uniaxial determinada en laboratorio sobre cuerpos de prueba cilíndricos con relación de esbeltez de 2 en condiciones de humedad natural (MPa).

Los datos que se tomaron para el cálculo de la resistencia de los pilares de roca fosfórica, se presentan a continuación:

V sísmica	1527 m/s
V pond. par	2561 m/s
F1	0.93
F2	1
σ_c	18 MPa

La estimación de la resistencia del macizo de roca fosfórica mediante la aplicación de métodos no destructivos da por resultado:

$$S_1 = \frac{\left(\frac{1527 \frac{m}{s} * 0.83 * 1}{2561 \frac{m}{s}} \right)^{0,5} - 0,1}{3} * 18 \text{ MPa} = \mathbf{3.62 \text{ MPa}}$$

La ecuación anterior se presenta el parámetro $\left(\frac{V_{sismica} * F1 * F2}{V_{pond.par}} \right)$ el cual tiende a dar valores irreales cuando es menor a 0.4.

4.1.12 Análisis de estabilidad del pilar de roca fosfórica

Para la estimación de la resistencia y análisis de estabilidad del pilar en la mina de roca fosfórica, se aplicó la teoría del área tributaria y la teoría de Obert Duvall y Wang. Los datos que se tuvieron en cuenta para este análisis fue un ancho aproximado del pilar (W_p) de 10 m, con una altura promedio (h_p) de 4 m.

Estimación de la resistencia de los pilares de roca fosfórica, por medio de la teoría de OBERT DUVAL Y WANG

La experimentación de estos investigadores (1976)¹⁵, en ensayos de laboratorio con rocas duras y con la teoría de la elasticidad conduce a la expresión (29).

¹⁵JOJOA MUÑOZ, Jaime William. Capitulo III. Excavaciones subterráneas múltiples – diseño geomecánico de explotaciones por cámaras y pilares. Pag. 26- 27.

$$\sigma_p = \sigma_1 \left[0.778 + 0.222 \left(\frac{w_p}{h} \right) \right] \quad (29)$$

Donde

σ_p : Resistencia del pilar (MPa)

σ_1 : Resistencia a la compresión uniaxial determinada a partir de ensayos de laboratorio sobre probetas cubicas. Una versión modificada de esta ecuación sugiere la adopción de la resistencia estimada para condición insitu.

w_p : Ancho del pilar (m)

h : Altura del pilar (m)

La resistencia del pilar aplicando la teoría de Obert Duvall, y teniendo como base la resistencia del macizo rocoso de roca fosfórica determinada por métodos no destructivos de 3.62 MPa, se presenta en la Tabla 33.

Tabla 33. Resultados de resistencia de los pilares de roca fosfórica según la teoría de Obert Duvall

Pilar No	Ancho promedio del pilar (m)	Altura promedio del Pilar (m)	Resistencia del pilar σ_p (MPa)
1	15.29	4	6.37

Fuente: Resultados del proyecto

Calculo del esfuerzo sobre los pilares por medio de la teoría del área tributaria

Los métodos más exactos para el análisis de estabilidad de cámaras y pilares son aquellos basados en el aparato matemático de la teoría de medios continuos. Sin embargo, la teoría del área tributaria nos permite adelantar una primera proximidad a la solución del problema, basándose en las nociones elementales del equilibrio estático. Gracias a esta, se puede

calcular un nivel promedio de esfuerzos en la estructura el cual puede ser comparado con la resistencia promedio de esta¹⁶.

Teniendo en cuenta que los pilares en análisis pertenecientes a la mina carolina, no tienen una forma muy definida, con un ancho y profundidad constantes, se determinó hacer el cálculo del área tributaria tomando el área excavada y el área total directamente desde el plano de obras mineras. Para el cálculo de la razón de explotación que tienen actualmente la zona donde se ubican los pilares y la resistencia del pilar se procedió a la aplicación de las relaciones¹⁷ 30 y 31, que se presentan a continuación:

$$Ra = \frac{At - Ap}{At} \quad (30)$$

$$Sp = Pzz * \left(\frac{1}{1 - Ra} \right) \quad (31)$$

Donde

Sp	Esfuerzo promedio del pilar (MPa)
Pzz	Componente vertical del esfuerzo inicial ($\gamma \cdot h$) (MPa)
Ra	Razón de explotación
At	Área total de la excavación (área del pilar + área espacio libre)
(m ²)	
Ap	Área del pilar (m ²)

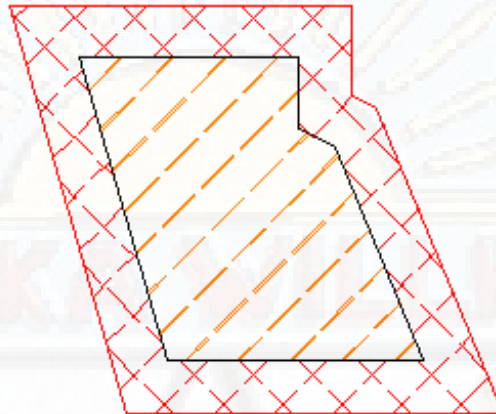
Para el cálculo de la razón de explotación y el esfuerzo sobre el pilar por medio del área tributaria se procedió en primer lugar en determinar el área

¹⁶Jaime William. Capítulo III. Excavaciones subterráneas múltiples – diseño geomecánico de explotaciones por cámaras y pilares. Pag. 20- 22.

¹⁷ IBIT, Pag. 24.

total y el área del pilar (ver Ilustración 38), en el programa autocad debido a que los pilares no tienen una forma geométrica muy definida y por medio de la aplicación de las relaciones 30 y 31, se determinaron los resultados presentados en el Tabla 34.

Ilustración 38. Áreas totales y efectivas de los pilares en análisis



Fuente: Resultados del proyecto

Tabla 34. Resultados del esfuerzo promedio sobre el pilar y la razón de explotación

No de Pilar	Área del pilar (m ²)	Área Total (m ²)	Esfuerzo vertical (Pzz) (MPa)	Razón de explotación (Ra)	Esfuerzo sobre el pilar (Sp) (MPa)
1	100.39	203.28	1.794	0.5	3.588

Fuente: Resultados del proyecto

4.1.13 ANALISIS DE ESTABILIDAD DE LOS PILARES DE ROCA FOSFORICA

Teniendo en cuenta que los pilares difieren en dimensiones se procedió al cálculo de cada uno de los factores de seguridad de cada uno de ellos por medio de la relación 32, con lo cual se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 35. La relación que se utilizó para la determinación del factor de seguridad cuyos resultados se muestran a continuación fue al siguiente:

$$FS = \frac{\sigma_p}{S_p} \quad (32)$$

σ_p : Resistencia del pilar (MPa)

S_p : Esfuerzo sobre el pilar (MPa)

FS: Factor de seguridad

Tabla 35. Factores de seguridad determinados para cada pilar

No de pilar	Resistencia del pilar (MPa)	Esfuerzo sobre el pilar (MPa)	Factor de seguridad (FS)
1	6.37	3.588	1.77

Fuente: Resultados del proyecto

Analizando el factor de seguridad anteriormente determinado, el pilar posee una buena estabilidad para la explotación minera, con lo cual se pudiera sugerir el redimensionamiento del método de cámaras y pilares, donde se aumente el ancho de las cámaras, con el fin de obtener una mayor razón de explotación.

4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los métodos no destructivos (sísmica de refracción y ultrasonido en rocas), es una alternativa económicamente viable para la determinación de la resistencia, que involucra parámetros estructurales del macizo rocoso.

Al relacionar la sísmica de refracción con las ondas de ultrasonido en rocas, se logra una comunicación directa entre los parámetros de laboratorio y los elementos propios del macizo rocoso de roca fosfórica, dando un porcentaje de fiabilidad bastante alto en el cálculo de explotaciones mineras.

La velocidad promedio de refracción sísmica obtenida en el pilar fue de 1527 m/s, lo cual nos hace ver de manera general el nivel de diaclasamiento que tiene el pilar de roca fosfórica.

Se logró determinar un factor de seguridad del pilar de 1.77 lo cual nos indica que la estabilidad del pilar es buena.

Se constata que la teoría de Clovis Gonzatti es ampliamente aplicada a diferentes macizos rocosos, con variabilidad estructural y diferencias de aplicación de esfuerzos.

Se logra determinar la resistencia del macizo rocoso de roca fosfórica de 3.62 MPa, cuyo valor es mucho menor que una probeta a compresión uniaxial, lo cual nos hace ver la gran influencia de los parámetros de dimensión y estructuras presentes en la matriz rocosa.

4.3 PROCESO DE PRUEBAS DE HIPOTESIS

Como se puede observar con los resultados finales obtenidos de la resistencia de los pilares de roca fosfórica mediante la aplicación de métodos no destructivos, genera una nueva alternativa para el dimensionamiento de pilares en minas subterráneas, siguiendo una metodología práctica y con resultados confiables. Se logró determinar que los pilares están sobredimensionados, por lo cual se pueden ajustar a las características de diseño y geomecánicas del macizo rocoso, aumentando la razón de explotación del método por cámaras y pilares con buenos resultados en su diseño. Respecto a los resultados obtenidos con los métodos no destructivos (sísmica de refracción y ensayos de ultrasonido en rocas) se deben considerar los siguientes aspectos:

- ✓ Grado de saturación de las rocas in situ y en laboratorio.
- ✓ Densidad de la roca del pilar.

- ✓ Dimensiones del pilar y secuencia de la toma de lecturas de velocidades de ondas sísmicas y ultrasónicas (Alto, ancho y profundidad).
- ✓ Variación de la carga uniaxial en probetas en laboratorio y en campo.
- ✓ El efecto a escala de los esfuerzos aplicados en los pilares.

Junto a todo esto se deben tener en cuenta las recomendaciones para la aplicación de métodos no destructivos en cualquier tipo de roca.

CONCLUSIONES

Se observa la gran influencia del efecto a escala con respecto a la resistencia a la compresión uniaxial de la roca fosfórica la cual en laboratorio es igual a 18 MPa y la obtenida mediante la aplicación de métodos no destructivos la resistencia del macizo rocoso igual a 3,92 MPa.

El estudio de la velocidad de propagación de onda en diferentes direcciones durante un proceso de aplicación de carga a compresión, evidencia que la roca experimenta un cambio en sus propiedades, lo cual llama a desarrollar técnicas de caracterización de rocas y macizos rocosos, los cuales no solo se concentren en determinar propiedades de resistencia y deformabilidad si no que se enfoquen en comprender y representar el proceso de deterioro de estos materiales durante la excavación de obras subterráneas.

Con los resultados anteriormente presentados se puede concluir que la influencia del agua en las rocas aumenta significativamente las velocidades de onda por lo cual fue necesario determinar el factor de corrección de 1 para este tipo de roca.

Con los métodos no destructivos (ultrasonido y refracción sísmica), se brinda mayor soporte a los cálculos de resistencia de macizos rocosos con relación a los métodos empíricos que no siempre son aplicables a nuestro contexto, generando resultados confiables tanto en mantos de Carbón como de bancos de roca fosfórica, sin embargo, es importante continuar validando

este tipo de propuestas adoptándolas a las condiciones geológicas de nuestro país y el mundo.

Con los resultados obtenidos en el proyecto se verifica el gran potencial de los métodos no destructivos utilizados, debido a que se pudieron establecer relaciones como: factor de corrección de la velocidad de ondas sísmicas debido al efecto de la tensión, factor de corrección de la velocidad de ondas sísmicas en función de las condiciones de humedad.

RECOMENDACIONES

Se recomienda configurar probetas cubicas de variabilidad de aristas, para las mediciones de ondas de ultrasonido a bajos niveles de deformación tanto en la altura, ancho y profundidad de la probeta.

Se recomienda realizar mediciones de ondas de ultrasonido en probetas secas, semi-saturadas y saturadas, en las tres dimensiones para lograr determinar un factor F2 más exacto, en el desarrollo de la ecuación específica para el macizo rocoso.

Se recomienda realizar la mayor cantidad de mediciones de ondas de ultrasonido con respecto a la carga aplicada en la probeta, para así determinar una curva característica de gran confiabilidad para el cálculo del factor F1.

Se recomienda utilizar cemento blanco u otro aditivo, para la fijación de los transductores a las paredes de los pilares y así aumentar la comunicación entre la fuente de disparo y el receptor.

Se recomienda realizar un buen levantamiento de diaclasas del macizo rocoso, ya que este será el elemento inicial para la propagación de la velocidad de ondas de refracción sísmica.

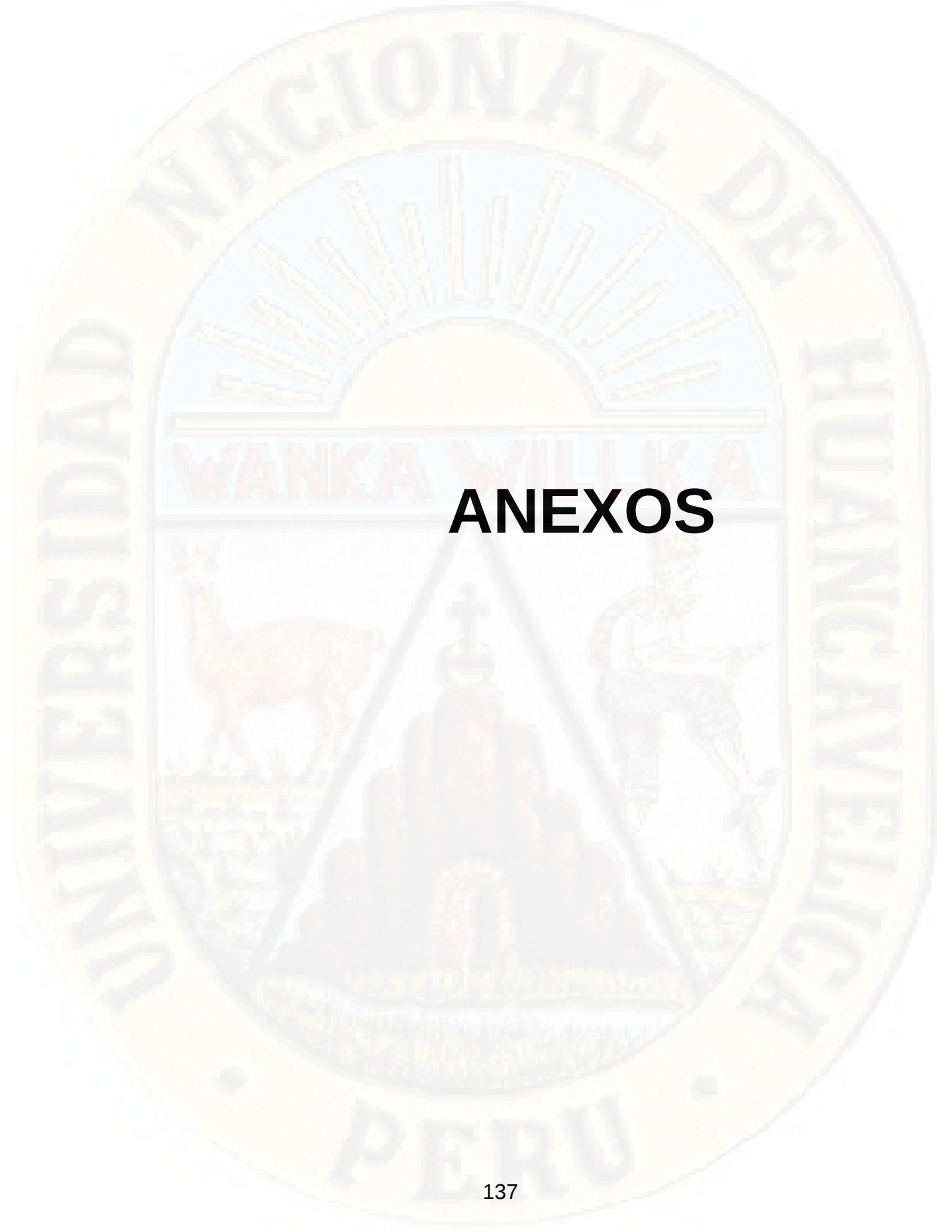
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. FOSFATOS BOYACA. Informe de amojonamiento contrato 696R roca fosfórica. 52 p.
2. GONZALES DE VALLEJO, Luis. Ingeniería geológica. Editorial Prentice Hall. Madrid. 2002. 744 p.
3. GONZATTI, Clovis. Propuesta para la determinación de resistencias a la compresión uniaxial insitú de cámaras en carbón utilizando métodos geofísicos. Sao Paulo Brasil: Universidad de Sao Paulo, 2007. 274 p.
4. HOEK, Evert Y BROWN. Excavaciones subterráneas en roca. México: Editorial McGraw Hill, 1985.
5. HOEK, Evert, CARRANZA TORRES, C, CORKUM, B. Criterio de falla de Hoek – Bown. Edision 2002. In North American Rock Mechanics Symposium, 5th, Proceedings. Toronto, Canadá. 267 – 273 p.
6. JOJOA MUÑOZ, Jaime William. Módulo 3 Excavaciones subterráneas múltiples, diseño geomecánico de explotaciones por cámaras y pilares. Sogamoso Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2010, 95 p.
7. KALAMARAS, G. S. (1993). The in situ strength of coal. Pennsylvania State University, Department of Mineral Engineering, PA, USA. Dissertação de Mestrado, 161p.

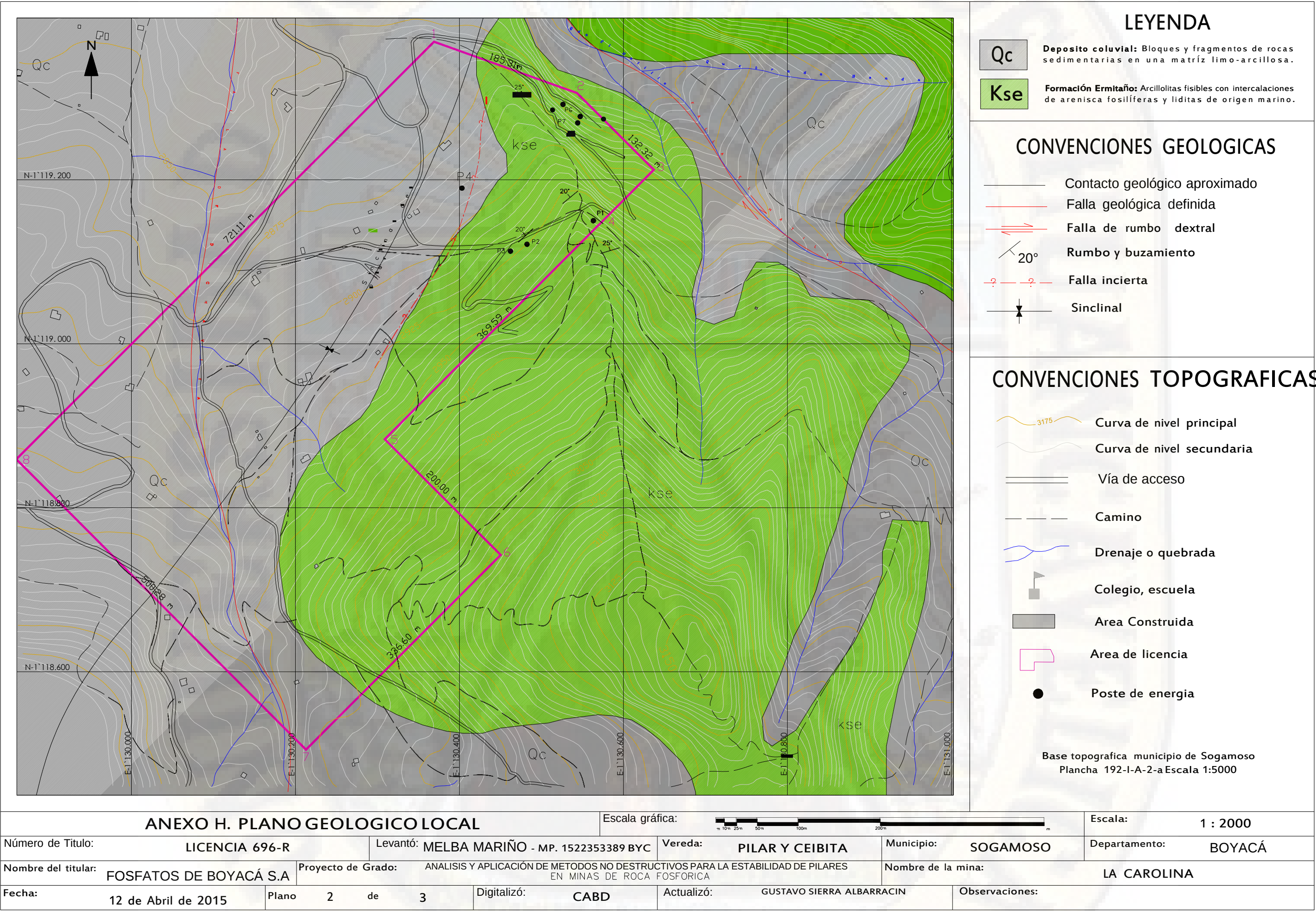
8. KALAMARAS, G. S. & BIENIAWSKI. Z. T. (1993). A rock mass concept for coal seams. In.: International Conference on Ground Control in Mining, 12st. Proceedings. Morgantown, WV, USA, p. 274-283.
9. KALAMARAS, G. S. & BIENIAWSKI. Z. T. (1995). A rock mass concept for coal seams incorporating the effect of time. In.: International Congress on Rock Mechanics, 8th. Proceedings. Tokyo, Japão, v. 1, p. 295-302.
10. M. FERRER y L. GONZÁLEZ DE VALLEJO. Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME, Madrid. 1999. 132 p.
11. MARINEZ MARTINEZ, Javier. Tesis doctoral: Influencia de la alteración sobre las propiedades mecánicas de calizas, dolomías y mármoles. Evaluación mediante estimadores no destructivos (ultrasonidos). Universidad de Alicante. 2008. 295 p.
12. RAMIREZ OYANGUREN, P, DE LA CUADRA IRIZAR, L, LAIN HUERTA, R, GRIBALDO OBESO, E. Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica. Instituto geológico minero de España. 354 p.
13. SALAMON, M. D. G.; GALVIN, J. M.; HOCKING, G.; ANDERSON, I. (1996). Coal pillar strength from back-calculation. The University of New South Wales, Department of Mining Engineering. October, Progress Report no 1/96, 62 p.
14. TATIS LUQUE, Alfredo y BAILON GONZALEZ, William. Trabajo de grado, Elección y diseño del método de explotación del manto de roca fosfórica, concesión 796-15 ubicada en la vereda pilar y Ceibita del

municipio de Sogamoso departamento de Boyacá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2007. 69 p.

15. TORRES SUAREZ, Mario Camilo. Aplicación de métodos no destructivos para la determinación de propiedades mecánicas de macizos rocosos de origen sedimentario. Bogotá Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2005. 320 p.
16. VIVAS BARRERA, Héctor Mauricio. Trabajo de grado, evaluación geológica y cálculo de reservas de roca fosfórica en el sector Pilar y Ceibita, mina “la Carolina”, municipio de Sogamoso (Boyacá). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2006. 109 p.



ANEXOS



MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: “ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA”.

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INSTRUMENTO	MÉTODO Y DISEÑO	POBLACIÓN Y MUESTRA
Problema General: ¿Cómo analizar la estabilidad de pilares en minas subterráneas de roca fosfórica con métodos no destructivos, bajo estándares de seguridad y rentabilidad en la operación minera? Problemas Específico: ➤ ¿Cómo es la influencia del esfuerzo axial, en la aplicación de ondas de ultrasonido a bajos niveles de deformación? ➤ ¿Cómo afecta el efecto a escala, en la aplicación de métodos no destructivos en pilares de roca fosfórica? ➤ ¿Cómo afecta la humedad del macizo rocoso en la aplicación de métodos no destructivos?	Objetivo General Analizar la estabilidad de pilares en minas de roca fosfórica con aplicación de métodos no destructivos. Objetivo Específicos: ➤ Analizar la información topográfica, geológica, estructural y geotécnica de la zona de estudio. ➤ Determinar las propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso. ➤ Estudiar las velocidades de propagación de ondas P y refracción sísmica alrededor de los pilares. ➤ Determinar la influencia del agua en velocidades de ondas de ultrasonido. ➤ Determinar y analizar la resistencia de los pilares aplicando diferentes teorías de análisis de resistencia. ➤ Determinar la resistencia y estabilidad de los pilares analizados bajo las	Hipótesis General: Los métodos no destructivos influyen directamente en el dimensionamiento, estabilidad y efecto a escala, de pilares mineros de roca fosfórica. Hipótesis Específicas: ➤ El conocimiento de la información topográfica, geológica, estructural y geotécnica de la zona de estudio, son la base fundamental para el inicio de la investigación. ➤ La descripción de las propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso, influyen directamente con el dimensionamiento de pilares mineros. ➤ El conocer las velocidades de ondas P, insitu y refracción sísmica alrededor de los pilares, está directamente relacionado con el efecto anisótropo de la roca. ➤ El conocer la influencia del agua en velocidades	Variable Independiente ➤ Método de explotación ➤ Velocidad de ondas sísmicas ➤ Velocidad de ondas de ultrasonido a bajos niveles de deformación ➤ Resistencia de la roca a compresión uniaxial ➤ Velocidad de ondas sísmicas Variable dependiente: ➤ Ancho del pilar ➤ Altura del pilar ➤ Resistencia del pilar ➤ Densidad de fracturación del macizo rocoso (RQD) ➤ Saturación del macizo rocoso ➤ Resistencia del macizo rocoso	➤ Brújula, flexómetro, estación total, equipo de refracción sísmica, equipo de ultrasonido, martillo geológico. ➤ Software de Microsoft Office, donde se utilizaron los programas Word, Excel y PowerPoint, para la elaboración del informe y el procesamiento de los datos, AutoCAD (para la digitalización de planos), RocLab aplicación del criterio de Hooke – Brown), Cats	En el presente trabajo de investigación se utilizó el método de investigación experimental. El método de investigación experimental, será el elegido en el presente trabajo de investigación, debido a que se ajusta al tema, para su desarrollo requiere un diagrama de flujo donde se expresa desde el inicio hasta el fin de la investigación, para concluir nuestras hipótesis.	Población La población es la totalidad explotaciones mineras subterráneas de roca fosfórica que aplican el método de cámaras y pilares en su explotación, presentes en la vereda Pilar y Ceibita, del municipio de Sogamoso – Boyacá. Muestra La muestra es no probabilística e intencionada, la que está conformada por el pilar número 1 entre los niveles 3 y 4 del banco de roca fosfórica, en la mina Carolina, del municipio de Sogamoso.

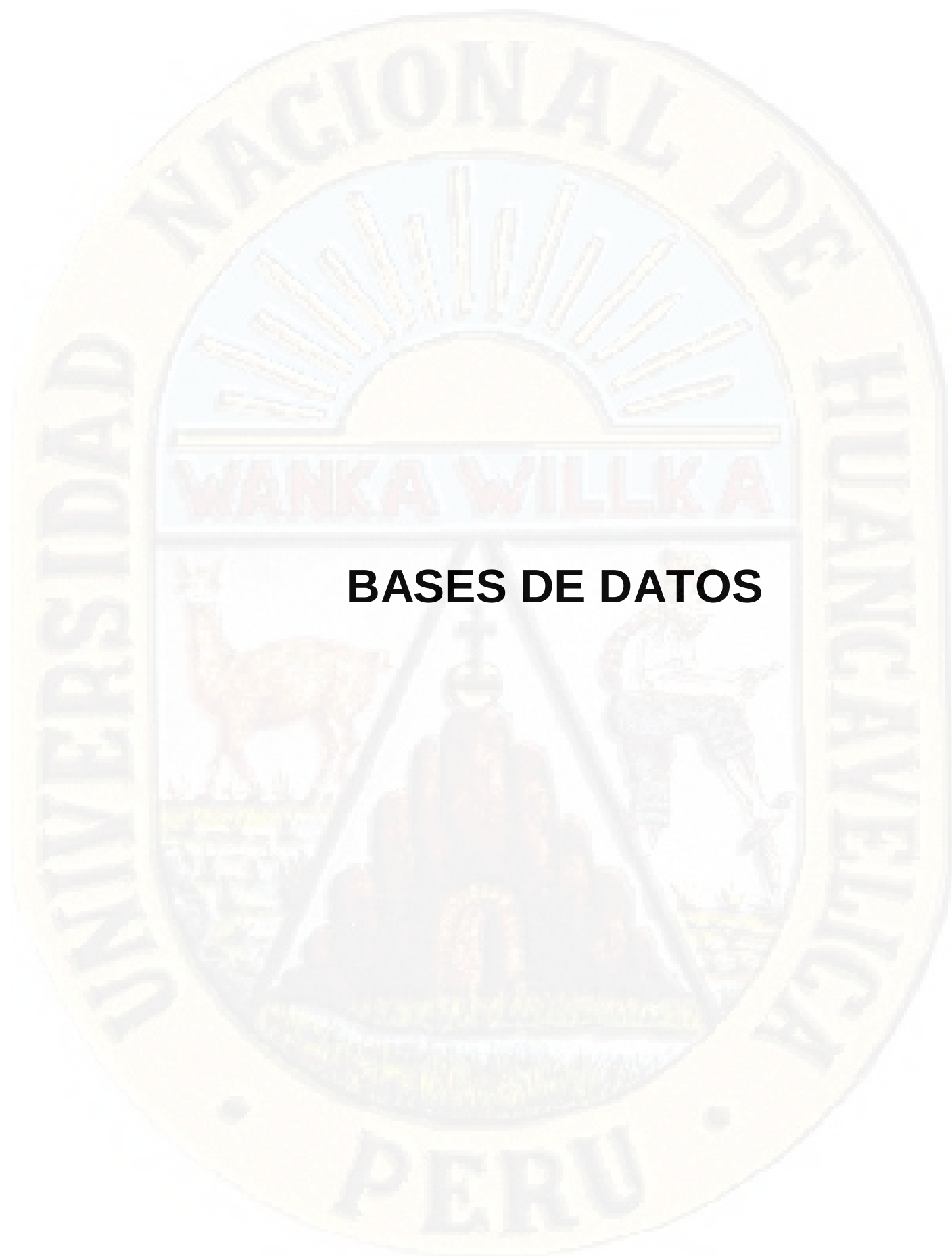
	condiciones actuales del laboreo minero. ➤ Análisis de propiedades dinámicas de resistencia a bajos niveles de deformación.	de ondas de ultrasonido, influyen en la resistencia de los pilares mineros. ➤ La comparación de la resistencia de pilares aplicando diferentes teorías de análisis de resistencia, influyen en la certidumbre del proyecto. ➤ El cálculo de la estabilidad de pilares, se relacionan con las condiciones actuales del laboreo minero. ➤ Las obtenciones de propiedades dinámicas de resistencia a bajos niveles de deformación se relacionan con la caracterización del tipo de roca.	➤ Esfuerzo sobre los pilares ➤ Factor de seguridad de los pilares ➤ Factor de corrección de la velocidad de ondas sísmicas debido al efecto de la tensión in-situ ➤ Factor de corrección de la velocidad de ondas sísmicas en función de las condiciones de humedad de la roca.	Ultrasonics (para procesamiento de las ondas de ultranido). ➤ Acceso a Internet, para la búsqueda de información referencial. ➤ Recursos de oficina, como lápices, lapiceros y papel para el registro de la información durante el muestreo y el proceso de observación directa. Además, un computador para la elaboración del informe.	Muestreo El muestreo aplicado en la presente investigación corresponde al muestreo probabilístico que permite basarse en el principio de equiprobabilidad, es decir que todas las matrices rocosas de los pilares de roca fosfórica tienen la misma posibilidad de ser elegidos como muestras, estos métodos nos aseguran la representatividad de las muestras, además debido a que se seleccionó por uniformidad y facilidad para las mediciones el Pilar 1 – niveles 3 y 4, se requiere realizar un muestreo aleatorio en dicho pilar.
--	--	--	--	---	---



INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

CARACTERIZACIÓN DE DISCONTINUIDADES MACIZO ROCOSO DE ROCA FOSFORICA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
LUGAR					ESPACIADO (mm)			CONTINUIDAD (m)		ABERTURA (mm)			RUGOSIDAD			RELLENO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
TIPO DE PLANO					RUMBO			BUZAMIENTO			DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO			ESPACIADO (mm)			CONTINUIDAD (m)			ABERTURA (mm)			RUGOSIDAD			RELLENO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
D	N	55	W	8	S	W	8	215																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											

E Estratificación	D Diaclasa	Es Esquistocidad	F Falla	Ar arena	A Arcilla	Limo	Q Cuarzo	C Calcita	O Oxidos
Fuente: Autor del proyecto									



BASES DE DATOS

PROPIEDADES FISICAS DE LAS ROCAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
MAESTRIA EN INGENIERIA GEOTECNICA Y GEOMECANICA APLICADA A MINERIA
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ROCAS

REALIZO:	GUSTAVO SIERRA ALBARRACIN		
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA		
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA		
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA:	20 DE ABRIL DE 2015
		No. DE PILAR:	1

Muestra No.	Forma	pw(g/cm ³)	M(g)	Ms(g)	Msat(g)	V(cm ³)	p(g/cm ³)	pd(g/cm ³)	psat(g/cm ³)	w %	S %	n %	e	γ (KN/m ³)	γd (KN/m ³)	γsat (KN/m ³)
1	IRREGULAR	1	94.20	83.60	95.10	38.00	2.48	2.20	2.50	12.68	92.17	30.26	0.40	24.32	21.58	24.55
2	IRREGULAR	1	153.90	134.90	155.10	65.00	2.37	2.08	2.39	14.08	94.06	31.08	0.42	23.23	20.36	23.41
3	IRREGULAR	1	82.30	72.60	82.90	35.00	2.35	2.07	2.37	13.36	94.17	29.43	0.39	23.07	20.35	23.24
4	IRREGULAR	1	74.50	65.90	73.80	30.00	2.48	2.20	2.46	13.05	108.86	26.33	0.39	24.36	21.55	24.13
5	IRREGULAR	1	88.90	78.60	89.00	35.00	2.54	2.25	2.54	13.10	99.04	29.71	0.42	24.92	22.03	24.95
6	IRREGULAR	1	83.50	73.20	84.00	35.00	2.39	2.09	2.40	14.07	95.37	30.86	0.43	23.40	20.52	23.54
7	IRREGULAR	1	128.20	114.30	129.00	51.00	2.51	2.24	2.53	12.16	94.56	28.82	0.38	24.66	21.99	24.81
8	IRREGULAR	1	99.00	88.10	99.20	35.00	2.83	2.52	2.83	12.37	98.20	31.71	0.46	27.75	24.69	27.80
9	IRREGULAR	1	107.70	94.50	108.40	40.00	2.69	2.36	2.71	13.97	94.96	34.75	0.51	26.41	23.18	26.59
10	IRREGULAR	1	163.20	147.00	164.00	65.00	2.51	2.26	2.52	11.02	95.29	26.15	0.34	24.63	22.19	24.75

PROMEDIO:	2.52	2.23	2.53	12.99	96.67	29.91	0.41	24.67	21.84	24.78
-----------	------	------	------	-------	-------	-------	------	-------	-------	-------

pw = Densidad del agua
 M = Peso natural de la muestra
 Ms = Peso seco de la muestra
 Msat = Peso saturado de la muestra
 V = Voloumen de la muestra
 ρ = Densidad total de la muestra
 pd = Densidad seca de la muestra
 psat = Densidad saturada de la muestra

W % Porcentaje de humedad
 S % Porcentaje de saturacion
 n % Porosidad
 e Relacion de vacios
 γ (KN/m³) Densidad total
 γd (KN/m³) Densidad seca
 γsat (KN/m³) Densidad saturada

Fuente: Autor del proyecto

PROPIEDADES FISICAS DE LAS ROCAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAYELICA
MAESTRIA EN INGENIERIA GEOTECNICA Y GEOMECANICA APLICADA A MINERIA
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ROCAS

REALIZO:	GUSTAVO SIERRA ALBARRACIN		
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA		
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA		
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA:	20 DE ABRIL DE 2015
		No. DE PILAR:	1

Muestra No.	Forma	$\rho_w(\text{g/cm}^3)$	M(g)	Ms(g)	Msat(g)	V(cm^3)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	$\rho_{\text{sat}}(\text{g/cm}^3)$	w %	S %	n %	e	γ (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	γ_{sat} (KN/m ³)
1	IRREGULAR	1	128.00	112.00	0.00	50.00	2.56	2.24	0.00	14.29	-14.29	-224.00	0.10	25.11	21.97	0.00
2	IRREGULAR	1	128.80	117.40	0.00	45.00	2.86	2.61	0.00	9.71	-9.71	-260.89	0.07	28.08	25.59	0.00
3	IRREGULAR	1	74.60	65.20	0.00	30.00	2.49	2.17	0.00	14.42	-14.42	-217.33	0.10	24.39	21.32	0.00
4	IRREGULAR	1	117.80	103.60	0.00	50.00	2.36	2.07	0.00	13.71	-13.71	-207.20	0.09	23.11	20.33	0.00
5	IRREGULAR	1	76.20	67.70	0.00	30.00	2.54	2.26	0.00	12.56	-12.56	-225.67	0.09	24.92	22.14	0.00
6	IRREGULAR	1	68.80	61.80	0.00	25.00	2.75	2.47	0.00	11.33	-11.33	-247.20	0.08	27.00	24.25	0.00
7	IRREGULAR	1	86.00	78.20	0.00	32.00	2.69	2.44	0.00	9.97	-9.97	-244.38	0.07	26.36	23.97	0.00
8	IRREGULAR	1	76.40	67.50	0.00	30.00	2.55	2.25	0.00	13.19	-13.19	-225.00	0.09	24.98	22.07	0.00
9	IRREGULAR	1	114.10	101.00	0.00	45.00	2.54	2.24	0.00	12.97	-12.97	-224.44	0.09	24.87	22.02	0.00
10	IRREGULAR	1	82.50	73.30	0.00	32.00	2.58	2.29	0.00	12.55	-12.55	-229.06	0.09	25.29	22.47	0.00

PROMEDIO:	2.59	2.31	0.00	12.47	-12.47	-230.52	0.09	25.41	22.61	0.00
-----------	------	------	------	-------	--------	---------	------	-------	-------	------

ρ_w = Densidad del agua
M = Peso natural de la muestra
Ms = Peso seco de la muestra
Msat = Peso saturado de la muestra
V = Voloumen de la muestra
 ρ = Densidad total de la muestra
 ρ_d = Densidad seca de la muestra
 ρ_{sat} = Densidad saturada de la muestra

W % Porcentaje de humedad
S % Porcentaje de saturacion
n % Porosidad
e Relacion de vacios
 γ (KN/m³) Densidad total
 γ_d (KN/m³) Densidad seca
 γ_{sat} (KN/m³) Densidad saturada

Fuente: Autor del proyecto

PROPIEDADES FISICAS DE LAS ROCAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
MAESTRIA EN INGENIERIA GEOTECNICA Y GEOMECANICA APLICADA A MINERIA
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ROCAS

REALIZO:	GUSTAVO SIERRA ALBARRACIN		
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA		
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA		
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA :	20 DE ABRIL DE 2015
		No. DE PILAR:	1

Muestra No.	Forma	$\rho_w(\text{g/cm}^3)$	M(g)	Ms(g)	Msat(g)	V(cm^3)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	$\rho_{sat}(\text{g/cm}^3)$	w %	S %	n %	e	γ (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	γ_{sat} (KN/m ³)
1	IRREGULAR	1	127.00	114.20	0.00	48.00	2.65	2.38	0.00	11.21	-11.21	-237.92	0.08	25.96	23.34	0.00
2	IRREGULAR	1	100.60	88.00	0.00	40.00	2.52	2.20	0.00	14.32	-14.32	-220.00	0.10	24.67	21.58	0.00
3	IRREGULAR	1	137.50	123.30	0.00	55.00	2.50	2.24	0.00	11.52	-11.52	-224.18	0.08	24.53	21.99	0.00
4	IRREGULAR	1	57.30	53.20	0.00	25.00	2.29	2.13	0.00	7.71	-7.71	-212.80	0.05	22.48	20.88	0.00
5	IRREGULAR	1	104.20	93.10	0.00	42.00	2.48	2.22	0.00	11.92	-11.92	-221.67	0.08	24.34	21.75	0.00
6	IRREGULAR	1	86.40	76.50	0.00	34.00	2.54	2.25	0.00	12.94	-12.94	-225.00	0.09	24.93	22.07	0.00
7	IRREGULAR	1	88.70	81.20	0.00	33.00	2.69	2.46	0.00	9.24	-9.24	-246.06	0.07	26.37	24.14	0.00
8	IRREGULAR	1	86.80	76.20	0.00	32.00	2.71	2.38	0.00	13.91	-13.91	-238.13	0.10	26.61	23.36	0.00
9	IRREGULAR	1	74.90	66.70	0.00	30.00	2.50	2.22	0.00	12.29	-12.29	-222.33	0.08	24.49	21.81	0.00
10	IRREGULAR	1	117.90	104.10	0.00	45.00	2.62	2.31	0.00	13.26	-13.26	-231.33	0.09	25.70	22.69	0.00

PROMEDIO:	2.55	2.28	0.00	11.83	-11.83	-227.94	0.08	25.01	22.36	0.00
-----------	------	------	------	-------	--------	---------	------	-------	-------	------

ρ_w = Densidad del agua
M = Peso natural de la muestra
Ms = Peso seco de la muestra
Msat = Peso saturado de la muestra
V = Voloumen de la muestra
 ρ = Densidad total de la muestra
 ρ_d = Densidad seca de la muestra
 ρ_{sat} = Densidad saturada de la muestra

W % Porcentaje de humedad
S % Porcentaje de saturacion
n % Porosidad
e Relacion de vacios
 γ (KN/m³) Densidad total
 γ_d (KN/m³) Densidad seca
 γ_{sat} (KN/m³) Densidad saturada

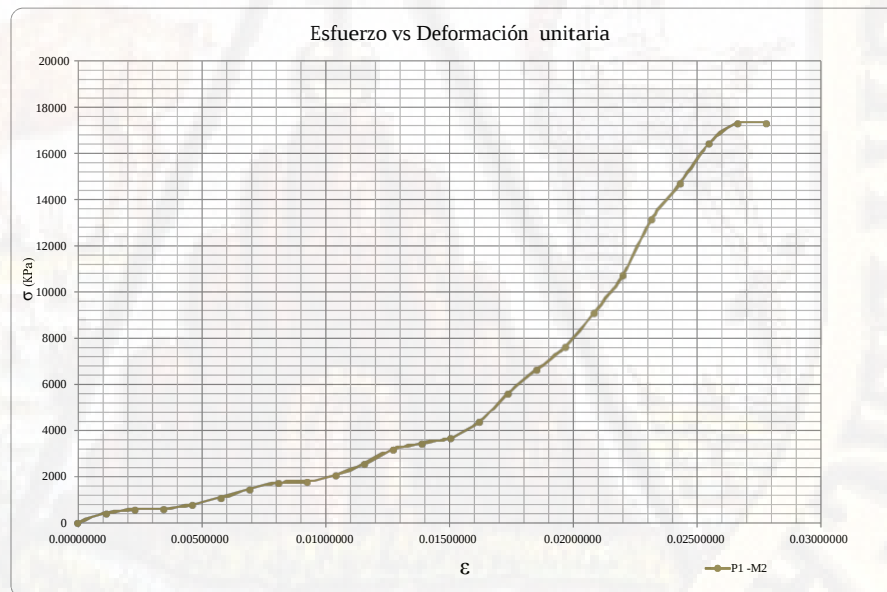
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M2
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	8.647
ANCHO (cm)	9.51
PROFUNDIDAD (cm)	8.905
PESO MUESTRA (gr)	1720.2
AREA (cm²)	84.687
VOLUMEN (cm³)	732.285
γ (gr/cm³)	2.349

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0.01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ε)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	3.4	0.00115647	401.48	0.40
20	4.8	0.00231294	566.80	0.57
30	5.0	0.00346941	590.41	0.59
40	6.6	0.00462588	779.34	0.78
50	9.1	0.00578235	1074.55	1.07
60	12.2	0.00693882	1440.61	1.44
70	14.6	0.00809529	1724.00	1.72
80	15.0	0.00925176	1771.24	1.77
90	17.4	0.01040823	2054.64	2.05
100	21.6	0.01156470	2550.58	2.55
110	26.8	0.01272117	3164.61	3.16
120	29.0	0.01387765	3424.39	3.42
130	31.0	0.01503412	3660.56	3.66
140	37.0	0.01619059	4369.05	4.37
150	47.3	0.01734706	5585.30	5.59
160	56.0	0.01850353	6612.62	6.61
170	64.4	0.01966000	7604.51	7.60
180	76.8	0.02081647	9068.74	9.07
190	90.6	0.02197294	10698.27	10.70
200	111	0.02312941	13107.16	13.11
210	124.2	0.02428588	14665.85	14.67
220	138.8	0.02544235	16389.85	16.39
230	146.2	0.02659882	17263.66	17.26
240	146.2	0.02775529	17263.66	17.26



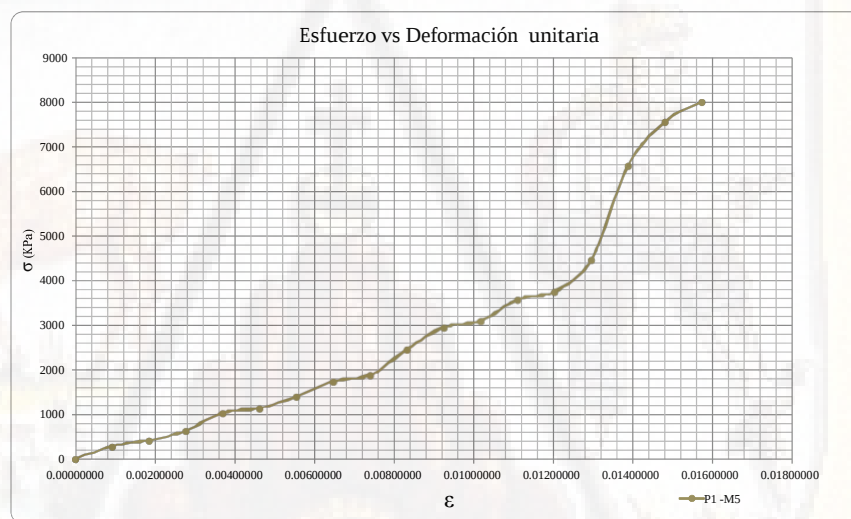
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M5
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	10.81
ANCHO (cm)	11.234
PROFUNDIDAD (cm)	11.162
PESO MUESTRA (gr)	3120
AREA (cm ²)	125.394
VOLUMEN (cm ³)	1355.508
γ (gr/cm ³)	2.302

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ε)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	3.5	0.00092507	279.12	0.28
20	5.2	0.00185014	414.69	0.41
30	7.9	0.00277521	630.01	0.63
40	12.9	0.00370028	1028.76	1.03
50	14.2	0.00462535	1132.43	1.13
60	17.5	0.00555042	1395.60	1.40
70	21.7	0.00647549	1730.55	1.73
80	23.5	0.00740056	1874.09	1.87
90	30.7	0.00832562	2448.28	2.45
100	36.9	0.00925069	2942.73	2.94
110	38.7	0.01017576	3086.27	3.09
120	44.7	0.01110083	3564.77	3.56
130	46.9	0.01202590	3740.21	3.74
140	55.9	0.01295097	4457.95	4.46
150	82.3	0.01387604	6563.32	6.56
160	94.6	0.01480111	7544.23	7.54
170	100.2	0.01572618	7990.82	7.99



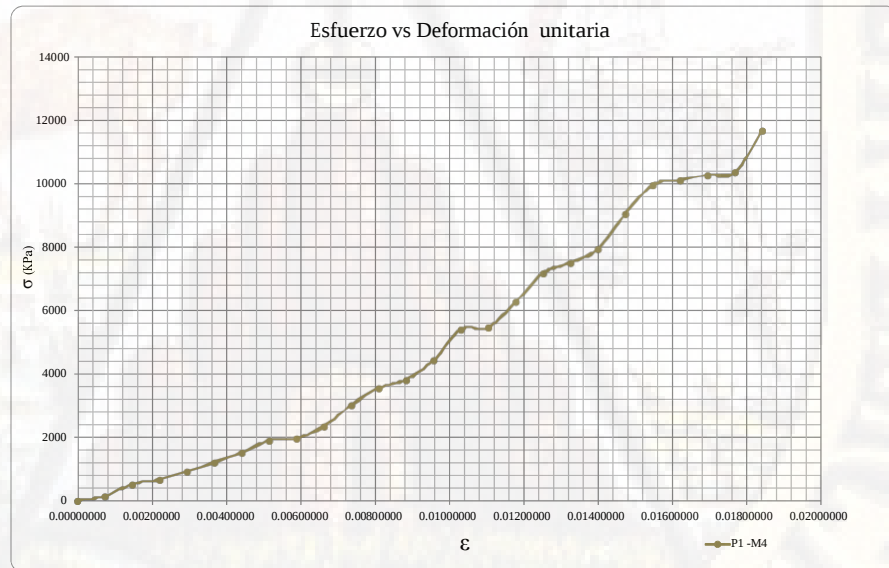
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M4
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	13.584
ANCHO (cm)	13.178
PROFUNDIDAD (cm)	13.325
PESO MUESTRA (gr)	5770
AREA (cm ²)	175.597
VOLUMEN (cm ³)	2385.308
γ (gr/cm ³)	2.419

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	2.5	0.00073616	142.37	0.14
20	9.1	0.00147232	518.23	0.52
30	11.7	0.00220848	666.30	0.67
40	16.2	0.00294464	922.57	0.92
50	21.2	0.00368080	1207.31	1.21
60	26.7	0.00441696	1520.53	1.52
70	33.3	0.00515312	1896.39	1.90
80	34.5	0.00588928	1964.73	1.96
90	41.2	0.00662544	2346.28	2.35
100	52.9	0.00736160	3012.58	3.01
110	62.3	0.00809776	3547.90	3.55
120	66.8	0.00883392	3804.17	3.80
130	77.8	0.00957008	4430.60	4.43
140	94.8	0.01030624	5398.73	5.40
150	95.9	0.01104240	5461.37	5.46
160	110.2	0.01177856	6275.74	6.28
170	125.8	0.01251472	7164.14	7.16
180	131.6	0.01325088	7494.44	7.49
190	139.3	0.01398704	7932.94	7.93
200	158.7	0.01472320	9037.75	9.04
210	174.6	0.01545936	9943.23	9.94
220	177.3	0.01619552	10096.99	10.10
230	180.1	0.01693168	10256.45	10.26
240	181.8	0.01766784	10353.26	10.35
250	204.8	0.01840400	11663.08	11.66



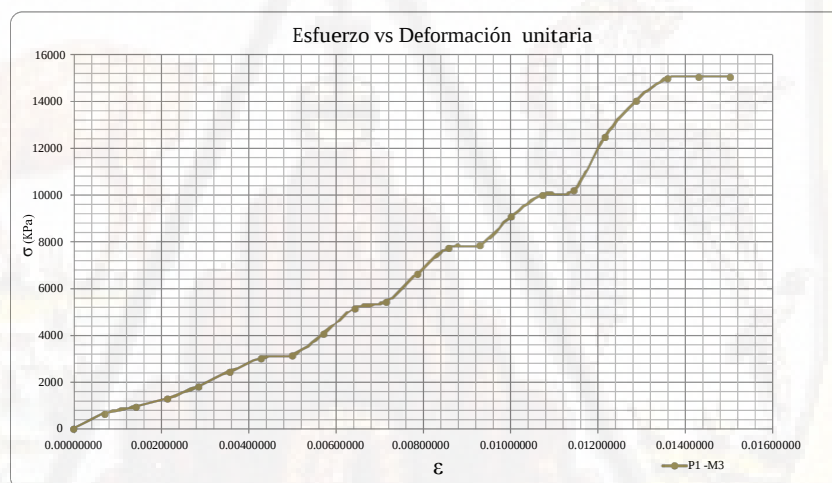
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M3
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	13.976
ANCHO (cm)	13.913
PROFUNDIDAD (cm)	14.272
PESO MUESTRA (gr)	6875
AREA (cm²)	198.566
VOLUMEN (cm³)	2775.163
γ (gr/cm³)	2.477

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0.01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ε)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	12.5	0.00071551	629.51	0.63
20	18.6	0.00143102	936.71	0.94
30	25.5	0.00214654	1284.21	1.28
40	35.8	0.00286205	1802.92	1.80
50	48.3	0.00357756	2432.44	2.43
60	59.6	0.00429307	3001.52	3.00
70	62.2	0.00500859	3132.45	3.13
80	80.5	0.00572410	4054.06	4.05
90	102.0	0.00643961	5136.82	5.14
100	107.6	0.00715512	5418.84	5.42
110	131.3	0.00787064	6612.40	6.61
120	153.4	0.00858615	7725.38	7.73
130	155.7	0.00930166	7841.21	7.84
140	180.2	0.01001717	9075.05	9.08
150	198.3	0.01073268	9986.59	9.99
160	202.2	0.01144820	10182.99	10.18
170	247.6	0.01216371	12469.38	12.47
180	278.2	0.01287922	14010.43	14.01
190	297.3	0.01359473	14972.33	14.97
200	298.6	0.01431025	15037.80	15.04
210	298.6	0.01502576	15037.80	15.04



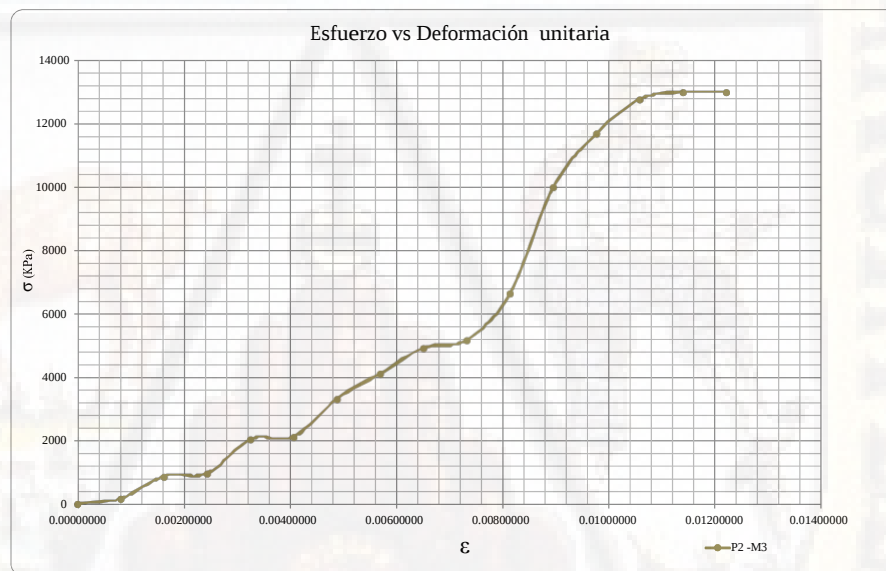
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M3
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	12.285
ANCHO (cm)	12.585
PROFUNDIDAD (cm)	12.377
PESO MUESTRA (gr)	4180
AREA (cm ²)	155.765
VOLUMEN (cm ³)	1913.567
γ (gr/cm ³)	2.184

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	2.5	0.00081400	160.50	0.16
20	13.3	0.00162800	853.85	0.85
30	14.9	0.00244200	956.57	0.96
40	31.7	0.00325600	2035.12	2.04
50	32.8	0.00407000	2105.74	2.11
60	51.4	0.00488400	3295.85	3.30
70	63.9	0.00569801	4102.35	4.10
80	76.4	0.00651201	4904.84	4.90
90	80.3	0.00732601	5155.22	5.16
100	103.2	0.00814001	6625.38	6.63
110	155.3	0.00895401	9970.18	9.97
120	181.6	0.00976801	11658.62	11.66
130	198.3	0.01058201	12730.75	12.73
140	201.9	0.01139601	12961.87	12.96
150	201.9	0.01221001	12961.87	12.96



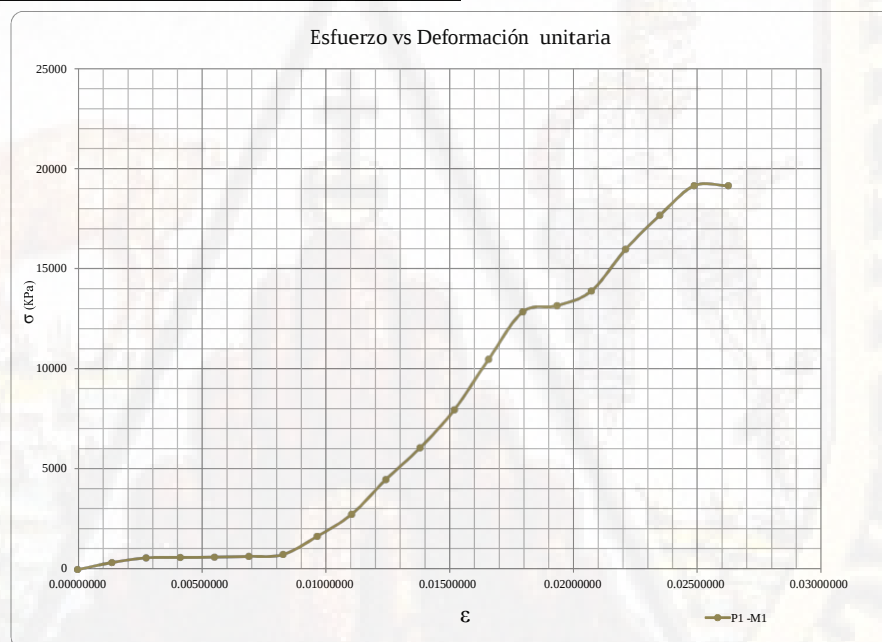
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M1
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	7.239
ANCHO (cm)	7.44
PROFUNDIDAD (cm)	7.372
PESO MUESTRA (gr)	913.8
AREA (cm ²)	54.848
VOLUMEN (cm ³)	397.042
γ (gr/cm ³)	2.302

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	1.9	0.00138141	346.41	0.35
20	3.2	0.00276281	583.43	0.58
30	3.3	0.00414422	601.67	0.60
40	3.4	0.00552563	619.90	0.62
50	3.6	0.00690703	656.36	0.66
60	4.1	0.00828844	747.52	0.75
70	9.1	0.00966984	1659.14	1.66
80	15.1	0.01105125	2753.08	2.75
90	24.6	0.01243266	4485.15	4.49
100	33.3	0.01381406	6071.36	6.07
110	43.7	0.01519547	7967.52	7.97
120	57.5	0.01657688	10483.58	10.48
130	70.5	0.01795828	12853.78	12.85
140	72.2	0.01933969	13163.73	13.16
150	76.2	0.02072109	13893.02	13.89
160	87.6	0.02210250	15971.51	15.97
170	96.9	0.02348391	17667.11	17.67
180	105	0.02486531	19143.93	19.14
190	105	0.02624672	19143.93	19.14



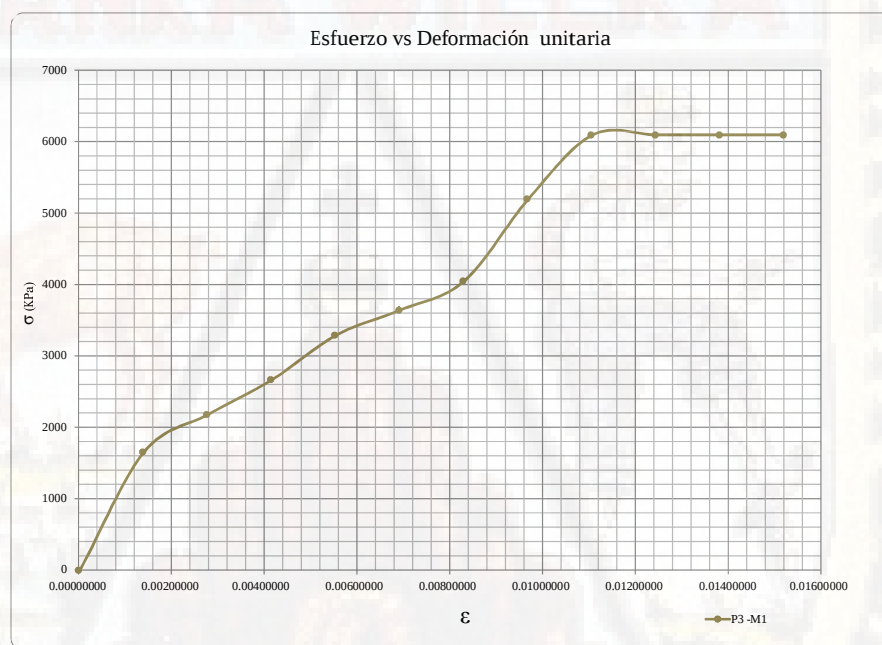
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAÍS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M1
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	7.244
ANCHO (cm)	6.992
PROFUNDIDAD (cm)	7.345
PESO MUESTRA (gr)	799.9
AREA (cm ²)	51.356
VOLUMEN (cm ³)	372.025
γ (gr/cm ³)	2.150

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	8.5	0.00138045	1655.11	1.66
20	11.2	0.00276091	2180.85	2.18
30	13.7	0.00414136	2667.64	2.67
40	16.9	0.00552181	3290.74	3.29
50	18.7	0.00690226	3641.23	3.64
60	20.8	0.00828272	4050.14	4.05
70	26.7	0.00966317	5198.98	5.20
80	31.3	0.01104362	6094.68	6.09
90	31.3	0.01242408	6094.68	6.09
100	31.3	0.01380453	6094.68	6.09
110	31.3	0.01518498	6094.68	6.09



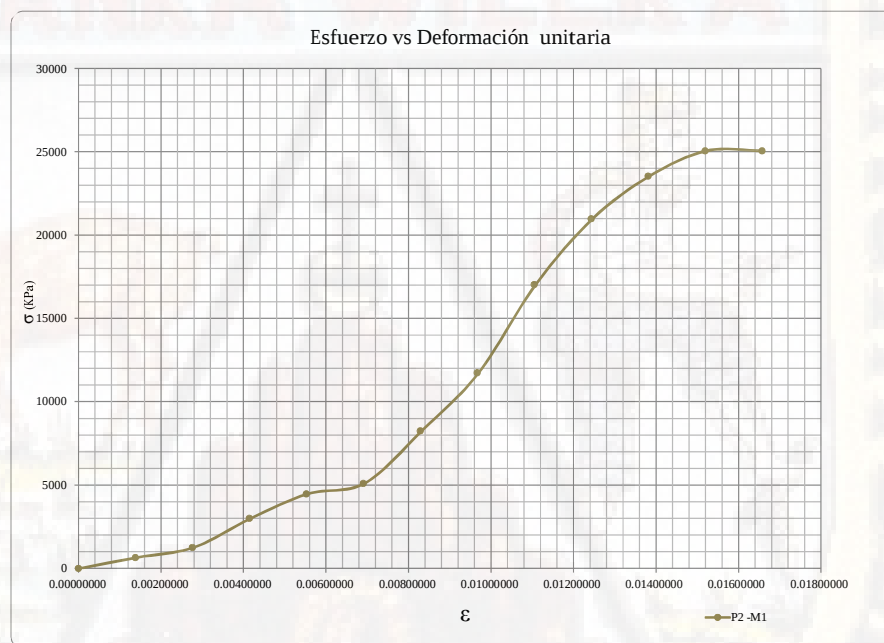
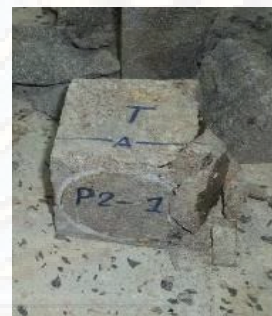
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M1
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	7.243
ANCHO (cm)	6.802
PROFUNDIDAD (cm)	6.999
PESO MUESTRA (gr)	742.3
AREA (cm ²)	47.607
VOLUMEN (cm ³)	344.819
γ (gr/cm ³)	2.153

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0.01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ε)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	3.1	0.00138064	651.16	0.65
20	6.0	0.00276129	1260.31	1.26
30	14.3	0.00414193	3003.75	3.00
40	21.3	0.00552257	4474.11	4.47
50	24.3	0.00690322	5104.27	5.10
60	39.3	0.00828386	8255.05	8.26
70	55.9	0.00966450	11741.92	11.74
80	81.1	0.01104515	17035.24	17.04
90	99.9	0.01242579	20984.22	20.98
100	112.1	0.01380643	23546.86	23.55
110	119.3	0.01518708	25059.24	25.06
120	119.3	0.01656772	25059.24	25.06



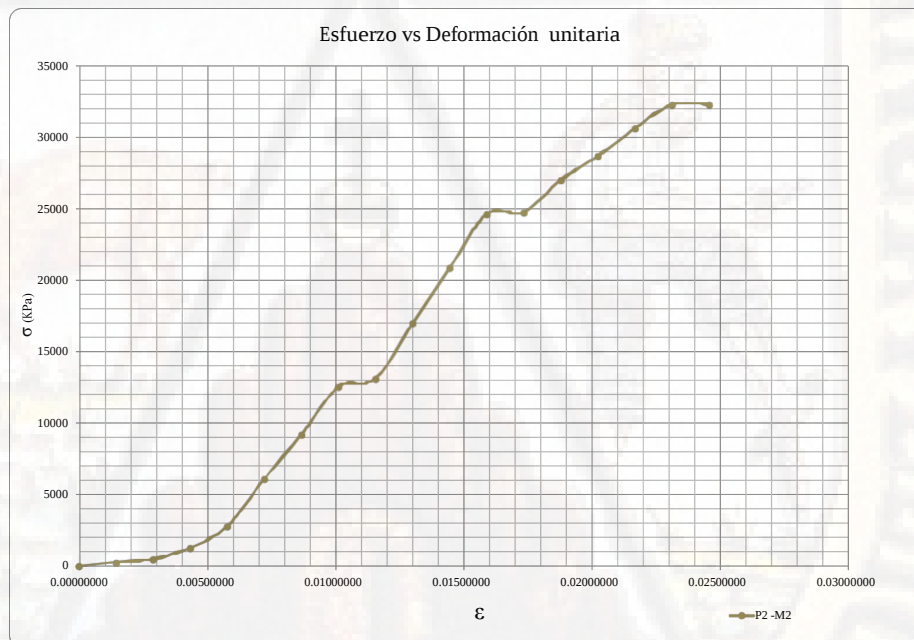
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M2
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	6.916
ANCHO (cm)	7.521
PROFUNDIDAD (cm)	7.183
PESO MUESTRA (gr)	817.4
AREA (cm ²)	54.023
VOLUMEN (cm ³)	373.625
γ (gr/cm ³)	2.188

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	1.3	0.00144592	240.64	0.24
20	2.6	0.00289184	481.27	0.48
30	6.8	0.00433777	1258.72	1.26
40	15.0	0.00578369	2776.58	2.78
50	32.9	0.00722961	6089.96	6.09
60	49.6	0.00867553	9181.22	9.18
70	67.7	0.01012146	12531.62	12.53
80	70.7	0.01156738	13086.94	13.09
90	91.7	0.01301330	16974.14	16.97
100	112.6	0.01445922	20842.84	20.84
110	132.9	0.01590515	24600.48	24.60
120	133.5	0.01735107	24711.54	24.71
130	145.7	0.01879699	26969.82	26.97
140	154.8	0.02024291	28654.28	28.65
150	165.3	0.02168884	30597.88	30.60
160	174.2	0.02313476	32245.32	32.25
170	174.2	0.02458068	32245.32	32.25



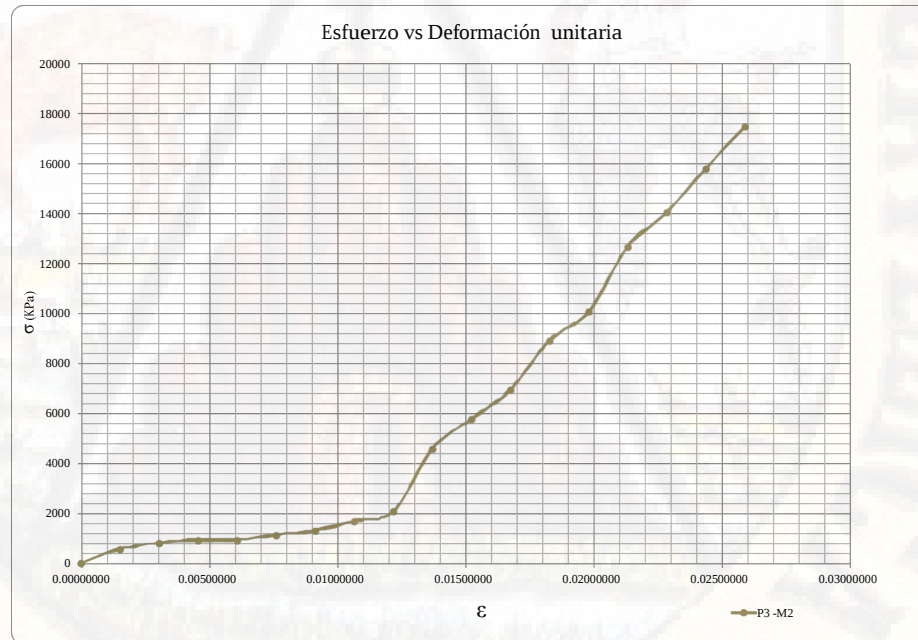
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M2
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	6.565
ANCHO (cm)	7.169
PROFUNDIDAD (cm)	6.262
PESO MUESTRA (gr)	604
AREA (cm ²)	44.892
VOLUMEN (cm ³)	294.718
γ (gr/cm ³)	2.049

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0.01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	2.5	0.00152323	556.89	0.56
20	3.6	0.00304646	801.92	0.80
30	4.1	0.00456969	913.30	0.91
40	4.1	0.00609292	913.30	0.91
50	5.0	0.00761615	1113.78	1.11
60	5.8	0.00913938	1291.98	1.29
70	7.5	0.01066260	1670.67	1.67
80	9.3	0.01218583	2071.63	2.07
90	20.5	0.01370906	4566.49	4.57
100	25.8	0.01523229	5747.09	5.75
110	31.1	0.01675552	6927.69	6.93
120	39.9	0.01827875	8887.94	8.89
130	45.1	0.01980198	10046.27	10.05
140	56.7	0.02132521	12630.23	12.63
150	62.9	0.02284844	14011.32	14.01
160	70.7	0.02437167	15748.81	15.75
170	78.3	0.02589490	17441.75	17.44



Fuente: Autor del proyecto

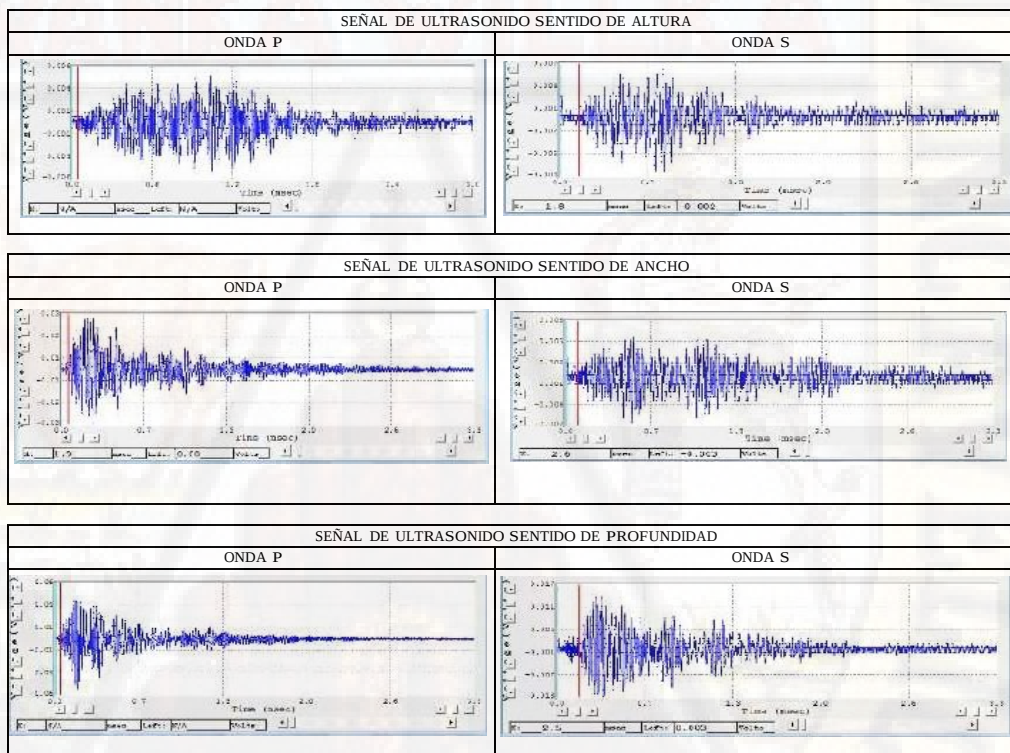
ENSAYO DE ULTRASONIDO

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA: 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M2
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	8.647
ANCHO (cm)	9.51
PROFUNDIDAD (cm)	8.905
PESO MUESTRA (gr)	1720.2
AREA (cm²)	84.687
VOLUMEN (cm³)	732.285
γ (gr/cm³)	2.349



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2137.00	544.00	0.47	2043522.00	9827498.00	697284.00
Ancho	2972.00	1308.00	0.38	11120367.00	15441221.00	4029203.00
Profundidad	2920.00	555.00	0.48	2150172.00	19119704.00	725793.00



Fuente: Autor del proyecto

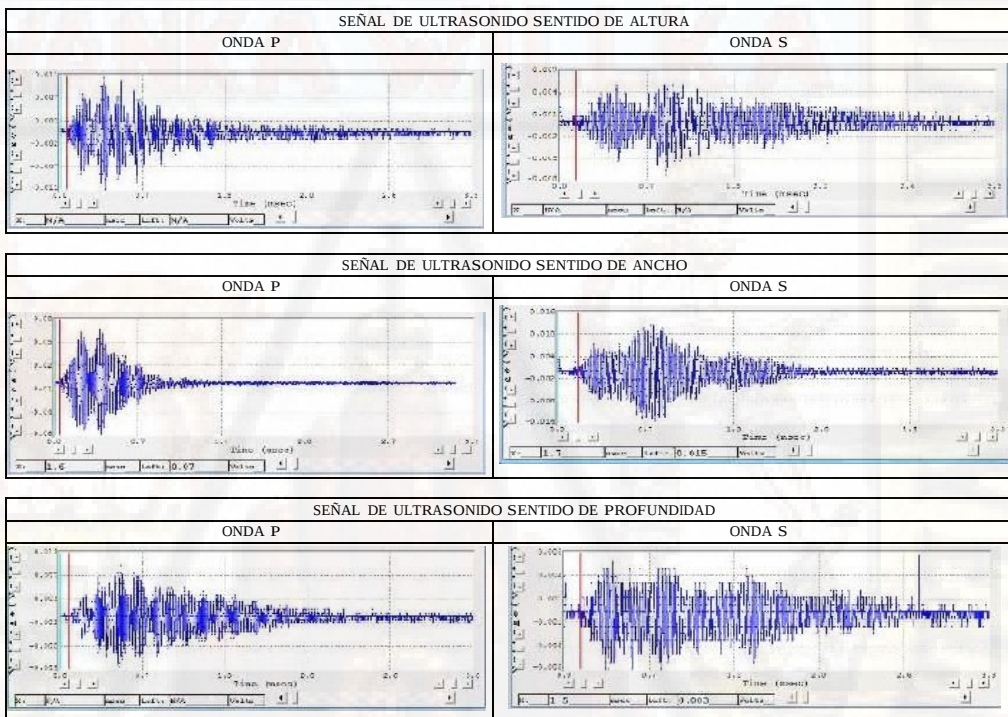
ENSAYO DE ULTRASONIDO

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M5
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	10.81
ANCHO (cm)	11.234
PROFUNDIDAD (cm)	11.162
PESO MUESTRA (gr)	3120
AREA (cm²)	125.394
VOLUMEN (cm³)	1355.508
γ (gr/cm³)	2.302



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	1959.00	533.00	0.46	1900967.00	7919140.00	651020.00
Ancho	2502.00	749.00	0.45	3754521.00	12703104.00	1294002.00
Profundidad	1285.00	685.00	0.30	2812534.00	2365463.00	1080220.00



Fuente: Autor del proyecto

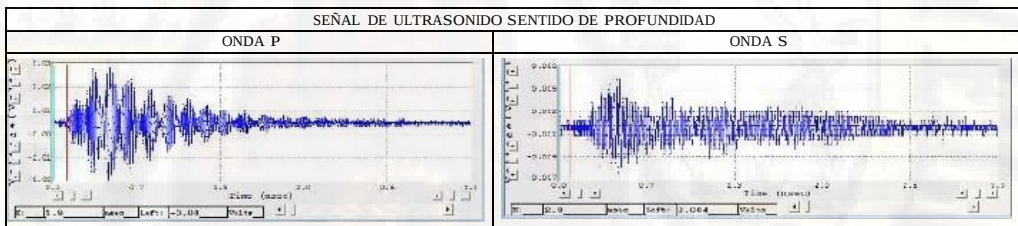
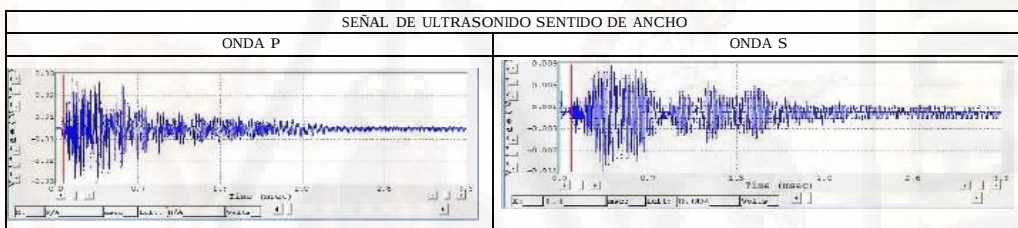
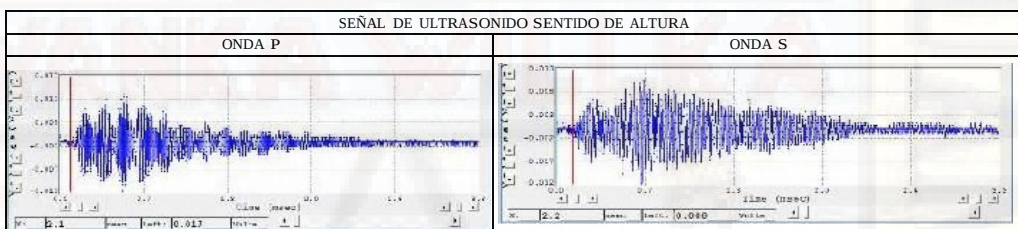
ENSAYO DE ULTRASONIDO

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M4
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	13.584
ANCHO (cm)	13.178
PROFUNDIDAD (cm)	13.325
PESO MUESTRA (gr)	5770
AREA (cm²)	175.597
VOLUMEN (cm³)	2385.308
γ (gr/cm³)	2.419



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2204.00	926.00	0.39	5823614.00	9050597.00	2090677.00
Ancho	3295.00	755.00	0.47	4091674.00	24609196.00	1389562.00
Profundidad	1215.00	576.00	0.36	2191213.00	2520943.00	808487.00



Fuente: Autor del proyecto

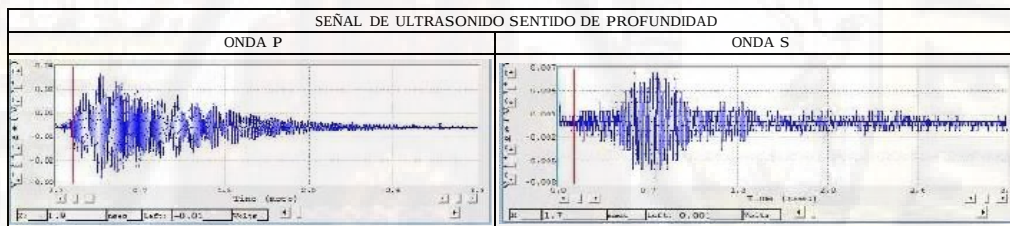
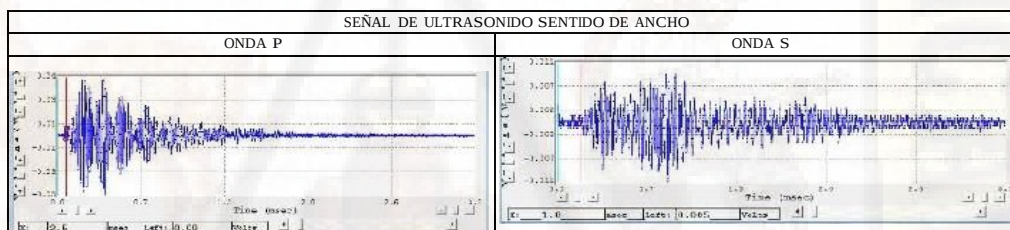
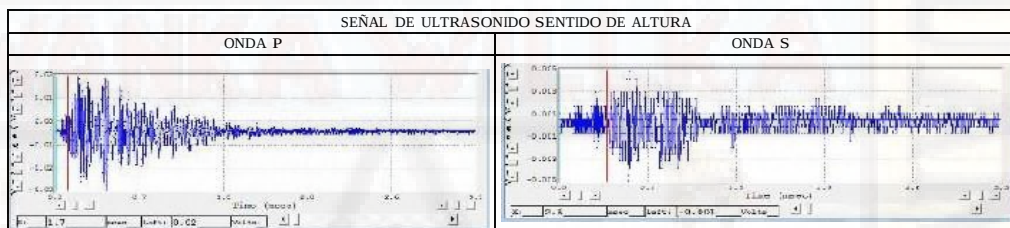
ENSAYO DE ULTRASONIDO

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M3
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	13.976
ANCHO (cm)	13.913
PROFUNDIDAD (cm)	14.272
PESO MUESTRA (gr)	6875
AREA (cm²)	198.566
VOLUMEN (cm³)	2775.163
γ (gr/cm³)	2.477



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	3630.00	561.00	0.49	2371409.00	32308596.00	796969.00
Ancho	3387.00	830.00	0.47	5125065.00	26720132.00	1745556.00
Profundidad	3336.00	497.00	0.49	1863978.00	27347152.00	626067.00



Fuente: Autor del proyecto

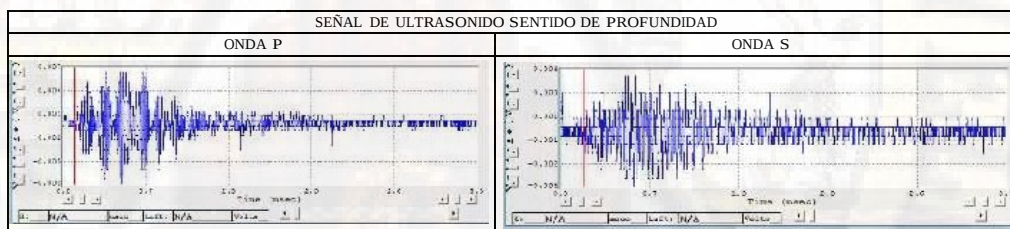
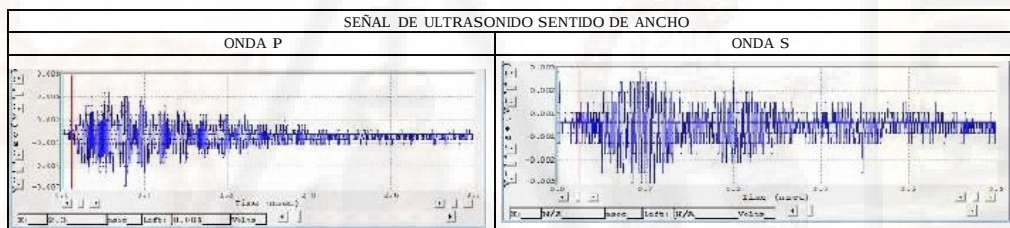
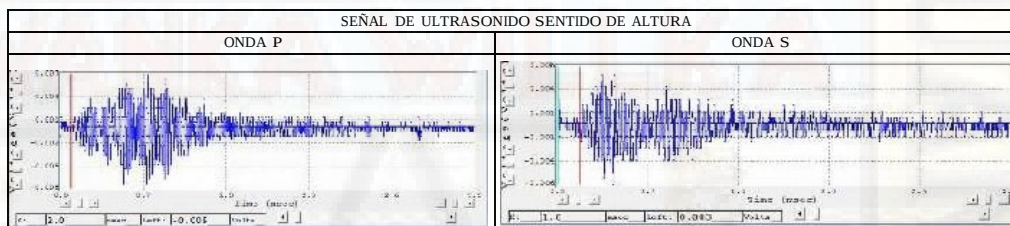
ENSAYO DE ULTRASONIDO

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M3
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	12.285
ANCHO (cm)	12.585
PROFUNDIDAD (cm)	12.377
PESO MUESTRA (gr)	4180
AREA (cm²)	155.765
VOLUMEN (cm³)	1913.567
γ (gr/cm³)	2.184



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	1219.00	828.00	0.07	3234384.00	1256178.00	1510167.00
Ancho	2906.00	887.00	0.45	5015281.00	16289904.00	1730974.00
Profundidad	1201.00	703.00	0.24	2696270.00	1723328.00	1087874.00



Fuente: Autor del proyecto

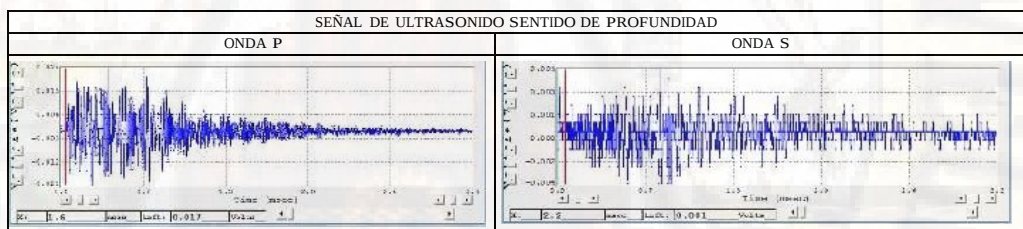
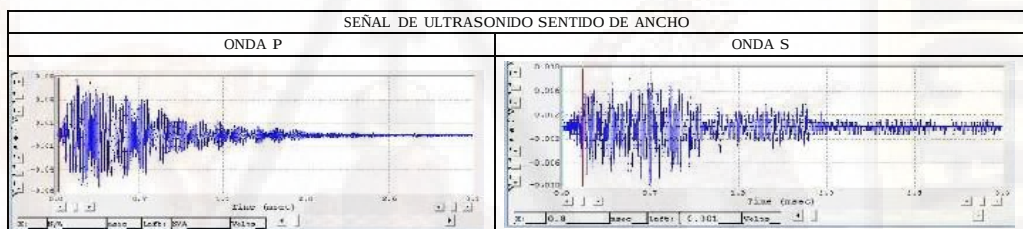
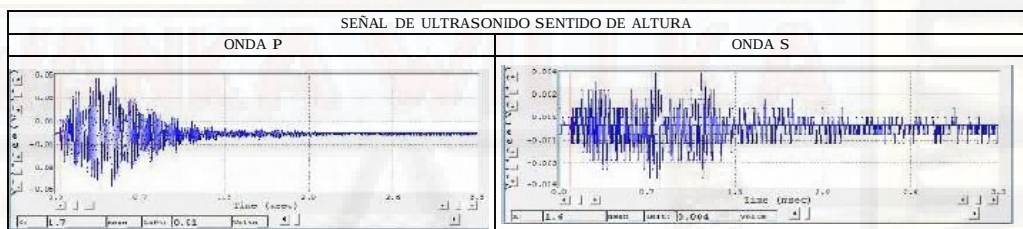
ENSAYO DE ULTRASONIDO

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M1
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	7.239
ANCHO (cm)	7.44
PROFUNDIDAD (cm)	7.372
PESO MUESTRA (gr)	913.8
AREA (cm²)	54.848
VOLUMEN (cm³)	397.042
γ (gr/cm³)	2.302



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	3217.00	892.00	0.46	5372201.00	21491724.00	1841890.00
Ancho	3087.00	1507.00	0.34	14110715.00	15047752.00	5250648.00
Profundidad	3040.00	1282.00	0.39	10576803.00	16311163.00	3799339.00



Fuente: Autor del proyecto

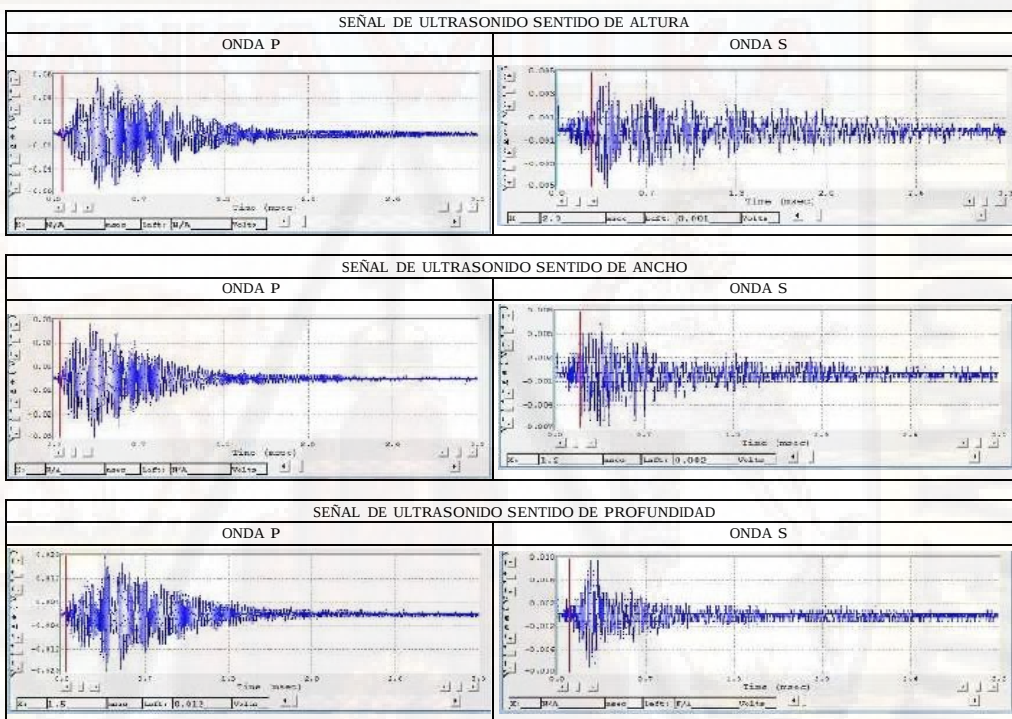
ENSAYO DE ULTRASONIDO

PROYECTO :	APLICACION DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M1
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	7.244
ANCHO (cm)	6.992
PROFUNDIDAD (cm)	7.345
PESO MUESTRA (gr)	799.9
AREA (cm²)	51.356
VOLUMEN (cm³)	372.025
γ (gr/cm³)	2.150



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2103.00	669.00	0.44	2853497.00	8456629.00	988216.00
Ancho	2292.00	977.00	0.39	5865231.00	8789992.00	2111634.00
Profundidad	2542.00	506.00	0.48	1674803.00	13520391.00	566059.00



Fuente: Autor del proyecto

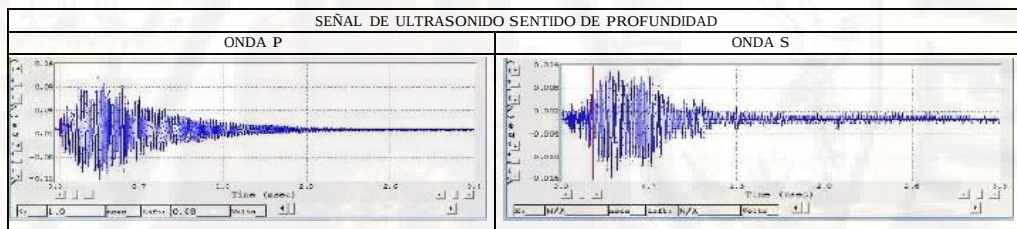
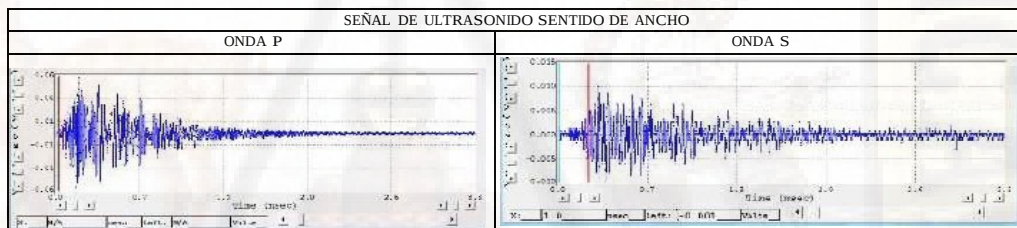
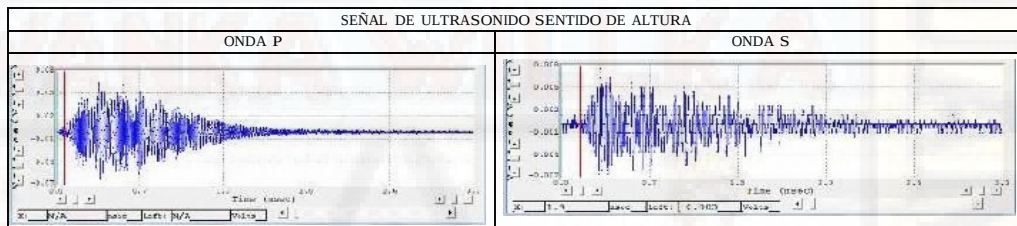
ENSAYO DE ULTRASONIDO

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA: 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M1
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	7.243
ANCHO (cm)	6.802
PROFUNDIDAD (cm)	6.999
PESO MUESTRA (gr)	742.3
AREA (cm²)	47.607
VOLUMEN (cm³)	344.819
γ (gr/cm³)	2.153



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2653.00	385.00	0.49	983723.00	15279409.00	330270.00
Ancho	2230.00	421.00	0.48	1173601.00	10579177.00	396082.00
Profundidad	2564.00	542.00	0.48	1937523.00	13803718.00	656073.00



Fuente: Autor del proyecto

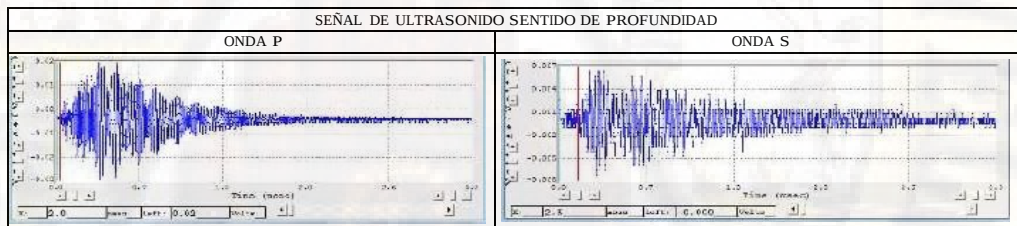
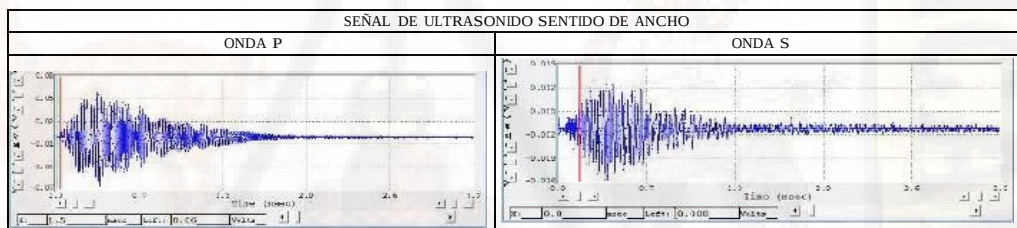
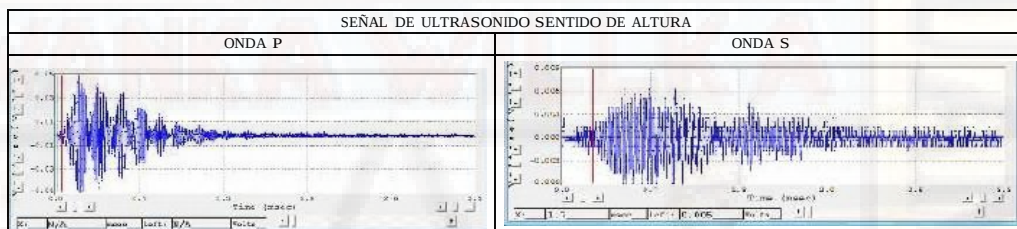
ENSAYO DE ULTRASONIDO

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA: 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M2
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	6.916
ANCHO (cm)	7.521
PROFUNDIDAD (cm)	7.183
PESO MUESTRA (gr)	817.4
AREA (cm²)	54.023
VOLUMEN (cm³)	373.625
γ (gr/cm³)	2.188



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2689.00	836.00	0.45	4560324.00	14212793.00	1576305.00
Ancho	2602.00	1637.00	0.17	14187703.00	7215820.00	6051221.00
Profundidad	2355.00	488.00	0.48	1585574.00	11801526.00	536534.00



Fuente: Autor del proyecto

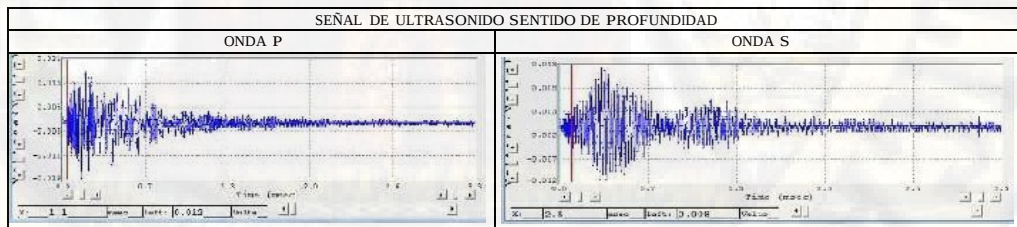
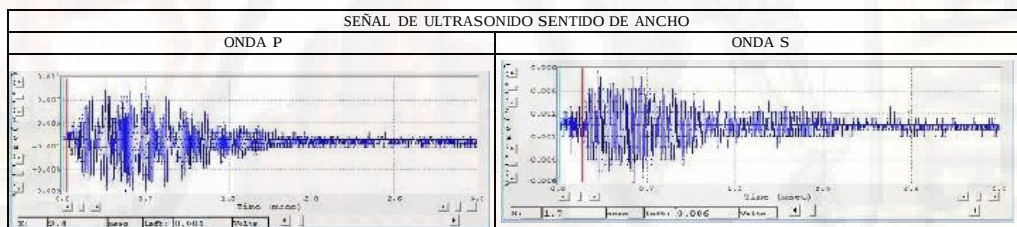
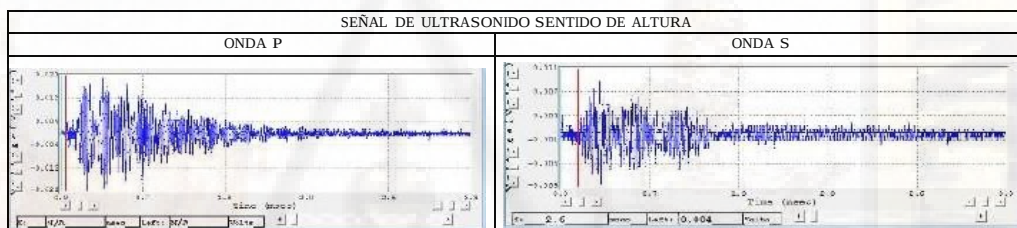
ENSAYO DE ULTRASONIDO

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA: 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M2
FORMA DE MUESTRA	cubica
ALTURA (cm)	6.565
ANCHO (cm)	7.169
PROFUNDIDAD (cm)	6.262
PESO MUESTRA (gr)	604
AREA (cm²)	44.892
VOLUMEN (cm³)	294.718
γ (gr/cm³)	2.049



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2152.00	523.00	0.47	1709125.00	9076641.00	581882.00
Ancho	2626.00	446.00	0.49	1256312.00	14100576.00	422958.00
Profundidad	2783.00	652.00	0.47	2662010.00	15265156.00	904869.00



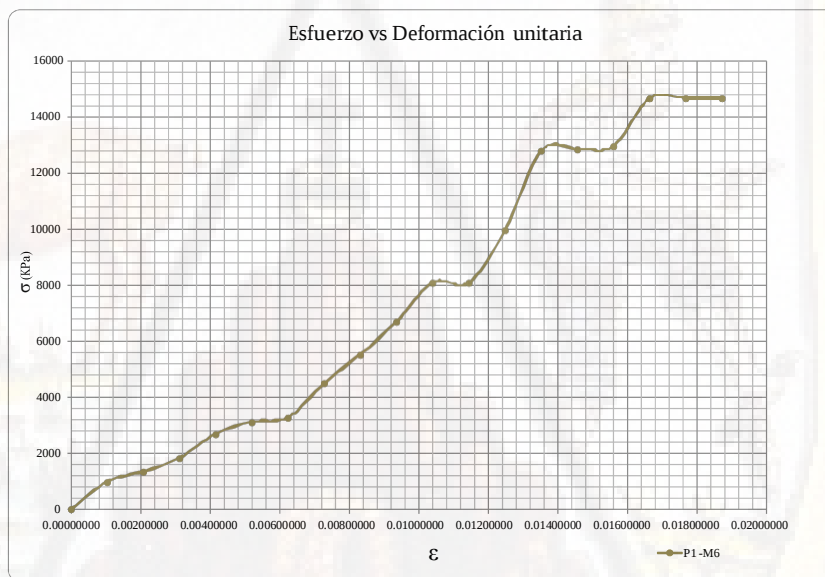
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M6
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.606
DIAMETRO (cm)	4.882
PESO MUESTRA (gr)	413.6
AREA (cm ²)	18.719
VOLUMEN (cm ³)	179.816
γ (gr/cm ³)	2.300

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0.01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	1.8	0.00104102	961.58	0.96
20	2.5	0.00208203	1335.53	1.34
30	3.4	0.00312305	1816.32	1.82
40	5.0	0.00416406	2671.07	2.67
50	5.8	0.00520508	3098.44	3.10
60	6.1	0.00624610	3258.70	3.26
70	8.4	0.00728711	4487.39	4.49
80	10.3	0.00832813	5502.40	5.50
90	12.5	0.00936914	6677.66	6.68
100	15.1	0.01041016	8066.62	8.07
110	15.1	0.01145118	8066.62	8.07
120	18.6	0.01249219	9936.36	9.94
130	23.9	0.01353321	12767.69	12.77
140	24.0	0.01457422	12821.12	12.82
150	24.2	0.01561524	12927.96	12.93
160	27.4	0.01665626	14637.44	14.64
170	27.4	0.01769727	14637.44	14.64
180	27.4	0.01873829	14637.44	14.64



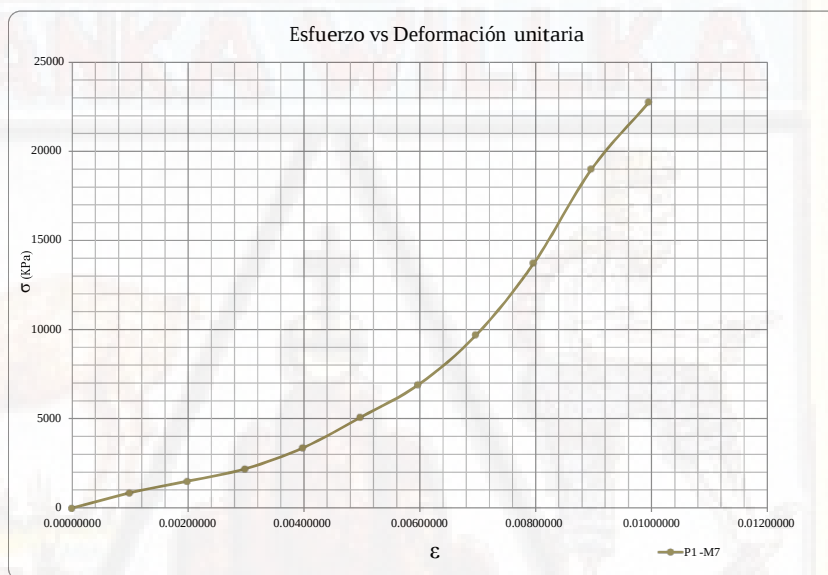
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M7
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	10.061
DIAMETRO (cm)	4.869
PESO MUESTRA (gr)	418.7
AREA (cm ²)	18.620
VOLUMEN (cm ³)	187.331
γ (gr/cm ³)	2.235

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	1.6	0.00099394	859.31	0.86
20	2.8	0.00198787	1503.79	1.50
30	4.1	0.00298181	2201.99	2.20
40	6.3	0.00397575	3383.54	3.38
50	9.5	0.00496968	5102.16	5.10
60	12.9	0.00596362	6928.20	6.93
70	18.1	0.00695756	9720.96	9.72
80	25.6	0.00795150	13748.98	13.75
90	35.4	0.00894543	19012.26	19.01
100	42.4	0.00993937	22771.75	22.77



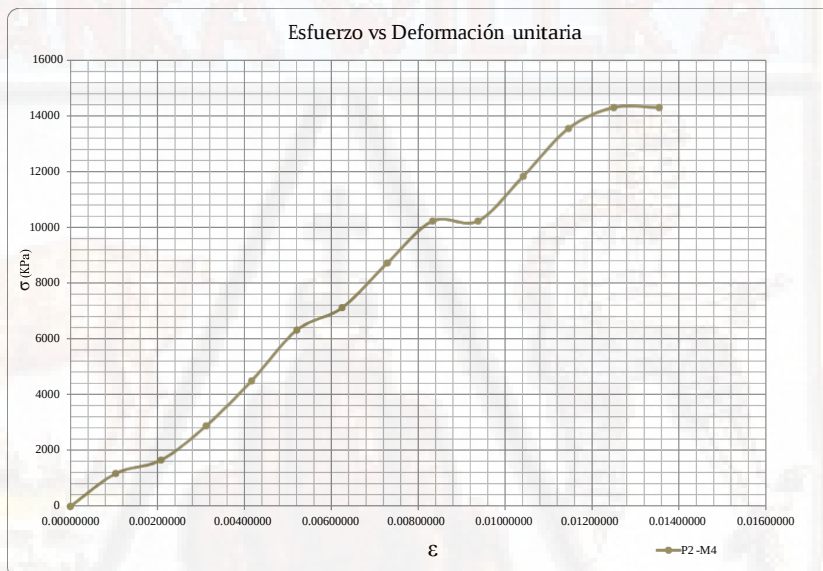
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M4
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.6
DIAMETRO (cm)	4.879
PESO MUESTRA (gr)	408
AREA (cm ²)	18.696
VOLUMEN (cm ³)	179.483
γ (gr/cm ³)	2.273

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	2.2	0.00104167	1176.71	1.18
20	3.1	0.00208333	1658.10	1.66
30	5.4	0.00312500	2888.30	2.89
40	8.4	0.00416667	4492.91	4.49
50	11.8	0.00520833	6311.47	6.31
60	13.3	0.00625000	7113.77	7.11
70	16.3	0.00729167	8718.39	8.72
80	19.1	0.00833333	10216.02	10.22
90	19.1	0.00937500	10216.02	10.22
100	22.1	0.01041667	11820.63	11.82
110	25.3	0.01145833	13532.22	13.53
120	26.7	0.01250000	14281.04	14.28
130	26.7	0.01354167	14281.04	14.28



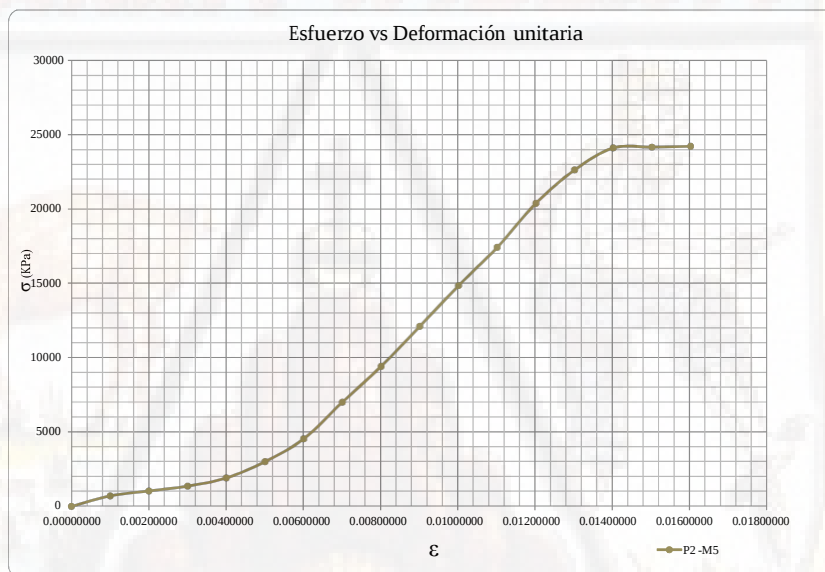
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M5
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.99
DIAMETRO (cm)	4.816
PESO MUESTRA (gr)	408.6
AREA (cm ²)	18.216
VOLUMEN (cm ³)	181.982
γ (gr/cm ³)	2.245

DESPLAZAMIENTO VERTICAL δ (0.01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	1.3	0.00100100	713.64	0.71
20	1.9	0.00200200	1043.02	1.04
30	2.5	0.00300300	1372.39	1.37
40	3.5	0.00400400	1921.34	1.92
50	5.5	0.00500501	3019.26	3.02
60	8.3	0.00600601	4556.33	4.56
70	12.8	0.00700701	7026.63	7.03
80	17.2	0.00800801	9442.04	9.44
90	22.1	0.00900901	12131.92	12.13
100	27.1	0.01001001	14876.69	14.88
110	31.8	0.01101101	17456.79	17.46
120	37.2	0.01201201	20421.15	20.42
130	41.3	0.01301301	22671.86	22.67
140	44.0	0.01401401	24154.04	24.15
150	44.1	0.01501502	24208.94	24.21
160	44.2	0.01601602	24263.83	24.26



Fuente: Autor del proyecto

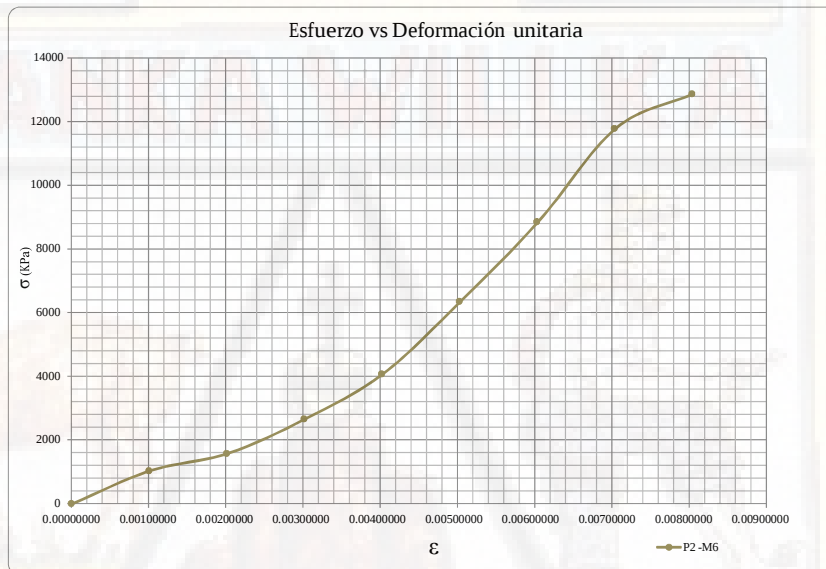
ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M6
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.957
DIAMETRO (cm)	4.841
PESO MUESTRA (gr)	413.2
AREA (cm ²)	18.406
VOLUMEN (cm ³)	183.269
γ (gr/cm ³)	2.255



DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	1.9	0.00100432	1032.27	1.03
20	2.9	0.00200864	1575.57	1.58
30	4.9	0.00301296	2662.17	2.66
40	7.5	0.00401727	4074.75	4.07
50	11.7	0.00502159	6356.61	6.36
60	16.3	0.00602591	8855.80	8.86
70	21.7	0.00703023	11789.62	11.79
80	23.7	0.00803455	12876.22	12.88



Fuente: Autor del proyecto

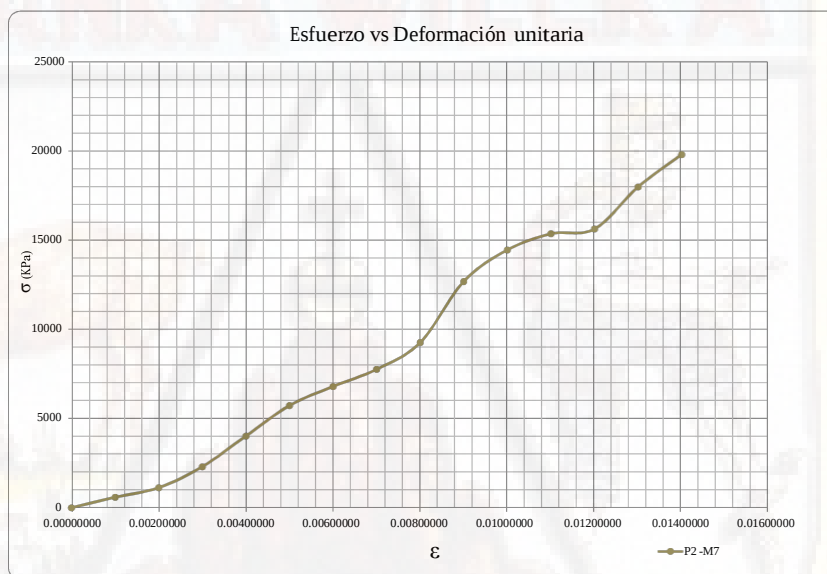
ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M7
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.989
DIAMETRO (cm)	4.875
PESO MUESTRA (gr)	427.5
AREA (cm ²)	18.665
VOLUMEN (cm ³)	186.449
γ (gr/cm ³)	2.293



DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0.01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	1.1	0.00100110	589.32	0.59
20	2.1	0.00200220	1125.07	1.13
30	4.3	0.00300330	2303.72	2.30
40	7.5	0.00400440	4018.11	4.02
50	10.7	0.00500551	5732.51	5.73
60	12.7	0.00600661	6804.00	6.80
70	14.5	0.00700771	7768.35	7.77
80	17.3	0.00800881	9268.45	9.27
90	23.7	0.00900991	12697.24	12.70
100	27.0	0.01001101	14465.21	14.47
110	28.7	0.01101211	15375.98	15.38
120	29.2	0.01201321	15643.85	15.64
130	33.6	0.01301432	18001.15	18.00
140	37	0.01401542	19822.69	19.82



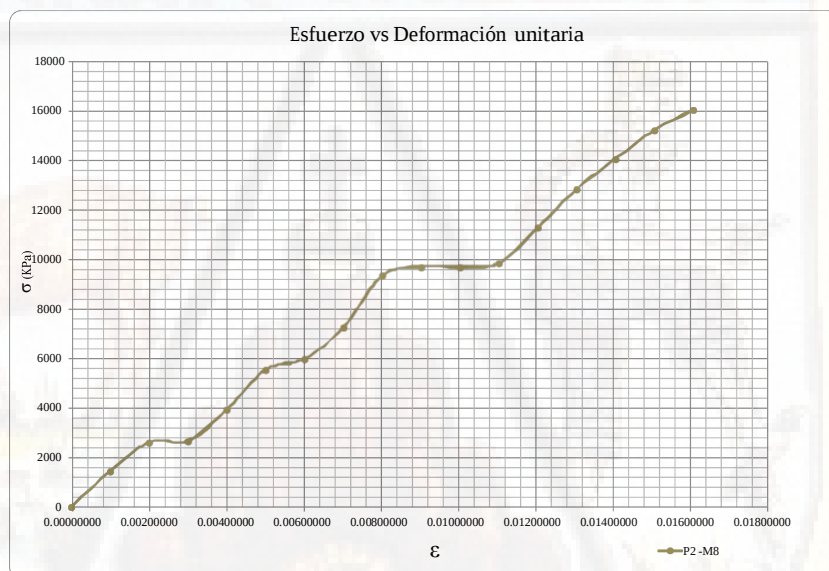
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M8
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.952
DIAMETRO (cm)	4.804
PESO MUESTRA (gr)	405.1
AREA (cm ²)	18.126
VOLUMEN (cm ³)	180.387
γ (gr/cm ³)	2.246

DESPLAZAMIENTO VERTICAL δ (0.01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	2.6	0.00100482	1434.42	1.43
20	4.7	0.00200965	2593.00	2.59
30	4.8	0.00301447	2648.17	2.65
40	7.1	0.00401929	3917.08	3.92
50	10.0	0.00502412	5517.01	5.52
60	10.8	0.00602894	5958.38	5.96
70	13.1	0.00703376	7227.29	7.23
80	16.9	0.00803859	9323.75	9.32
90	17.5	0.00904341	9654.78	9.65
100	17.5	0.01004823	9654.78	9.65
110	17.8	0.01105305	9820.29	9.82
120	20.4	0.01205788	11254.71	11.25
130	23.2	0.01306270	12799.47	12.80
140	25.4	0.01406752	14013.22	14.01
150	27.5	0.01507235	15171.79	15.17
160	29	0.01607717	15999.34	16.00



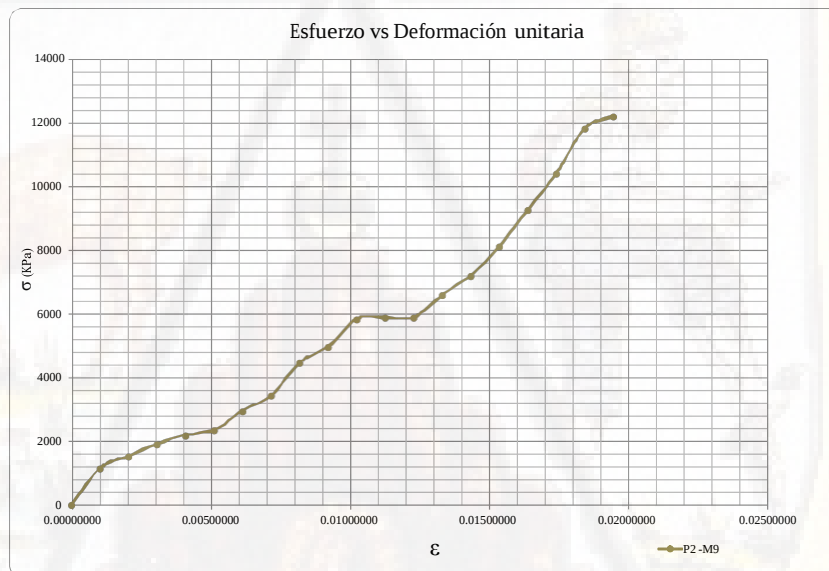
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M9
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.77
DIAMETRO (cm)	4.835
PESO MUESTRA (gr)	411.3
AREA (cm ²)	18.360
VOLUMEN (cm ³)	179.381
γ (gr/cm ³)	2.293

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	2.1	0.00102354	1143.76	1.14
20	2.8	0.00204708	1525.02	1.53
30	3.5	0.00307062	1906.27	1.91
40	4.0	0.00409417	2178.60	2.18
50	4.3	0.00511771	2341.99	2.34
60	5.4	0.00614125	2941.11	2.94
70	6.3	0.00716479	3431.29	3.43
80	8.2	0.00818833	4466.13	4.47
90	9.1	0.00921187	4956.31	4.96
100	10.7	0.01023541	5827.75	5.83
110	10.8	0.01125896	5882.22	5.88
120	10.8	0.01228250	5882.22	5.88
130	12.1	0.01330604	6590.26	6.59
140	13.2	0.01432958	7189.37	7.19
150	14.9	0.01535312	8115.28	8.12
160	17	0.01637666	9259.04	9.26
170	19.1	0.01740020	10402.81	10.40
180	21.7	0.01842375	11818.90	11.82
190	22.4	0.01944729	12200.15	12.20



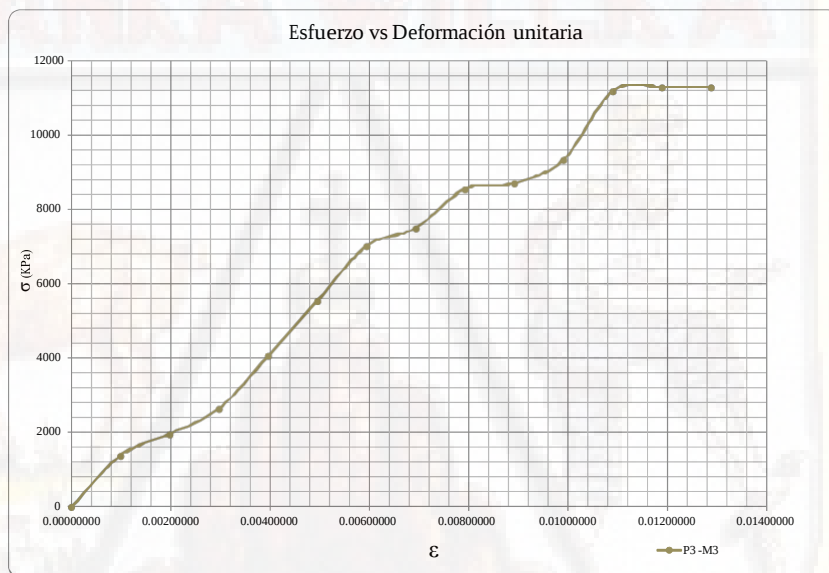
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M3
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	10.097
DIAMETRO (cm)	4.921
PESO MUESTRA (gr)	428
AREA (cm ²)	19.019
VOLUMEN (cm ³)	192.039
γ (gr/cm ³)	2.229

DESPLAZAMIENTO VERTICAL δ (0.01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	2.6	0.00099039	1367.03	1.37
20	3.7	0.00198079	1945.38	1.95
30	5.0	0.00297118	2628.90	2.63
40	7.7	0.00396157	4048.50	4.05
50	10.5	0.00495197	5520.68	5.52
60	13.3	0.00594236	6992.86	6.99
70	14.2	0.00693275	7466.06	7.47
80	16.2	0.00792315	8517.62	8.52
90	16.5	0.00891354	8675.36	8.68
100	17.7	0.00990393	9306.29	9.31
110	21.2	0.01089433	11146.52	11.15
120	21.4	0.01188472	11251.67	11.25
130	21.4	0.01287511	11251.67	11.25



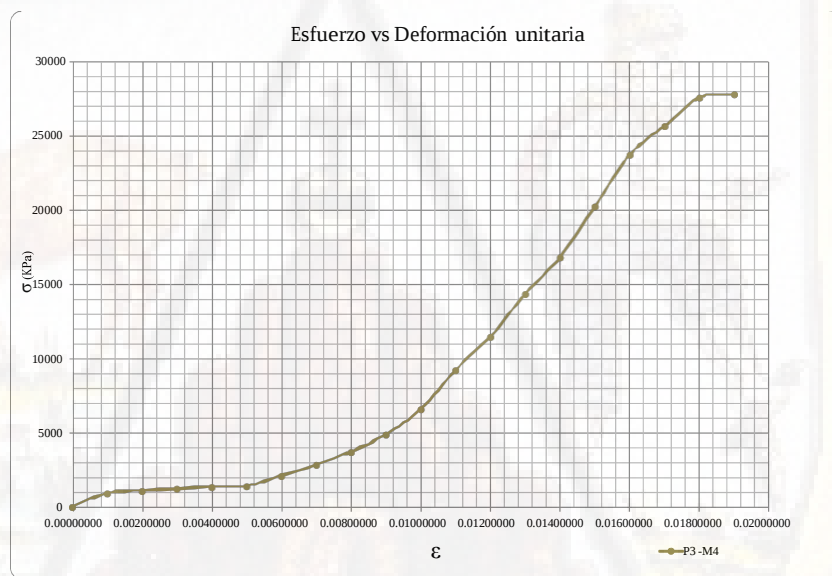
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M4
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	10.001
DIAMETRO (cm)	4.876
PESO MUESTRA (gr)	422.2
AREA (cm ²)	18.673
VOLUMEN (cm ³)	186.750
γ (gr/cm ³)	2.261

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	1.7	0.00099990	910.40	0.91
20	2.0	0.00199980	1071.06	1.07
30	2.3	0.00299970	1231.72	1.23
40	2.5	0.00399960	1338.82	1.34
50	2.6	0.00499950	1392.37	1.39
60	3.9	0.00599940	2088.56	2.09
70	5.3	0.00699930	2838.30	2.84
80	6.9	0.00799920	3695.15	3.70
90	9.1	0.00899910	4873.31	4.87
100	12.3	0.00999900	6587.00	6.59
110	17.2	0.01099890	9211.09	9.21
120	21.4	0.01199880	11460.31	11.46
130	26.8	0.01299870	14352.17	14.35
140	31.4	0.01399860	16815.60	16.82
150	37.8	0.01499850	20242.98	20.24
160	44.3	0.01599840	23723.92	23.72
170	47.9	0.01699830	25651.82	25.65
180	51.5	0.01799820	27579.73	27.58
190	51.9	0.01899810	27793.94	27.79



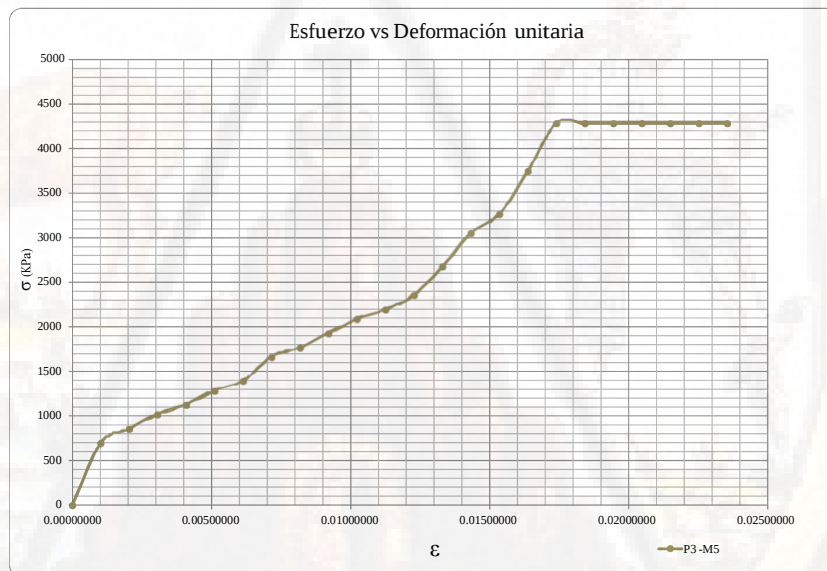
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M5
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.773
DIAMETRO (cm)	4.88
PESO MUESTRA (gr)	372.6
AREA (cm ²)	18.704
VOLUMEN (cm ³)	182.792
γ (gr/cm ³)	2.038

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	1.3	0.00102323	695.05	0.70
20	1.6	0.00204645	855.44	0.86
30	1.9	0.00306968	1015.84	1.02
40	2.1	0.00409291	1122.77	1.12
50	2.4	0.00511614	1283.16	1.28
60	2.6	0.00613936	1390.09	1.39
70	3.1	0.00716259	1657.42	1.66
80	3.3	0.00818582	1764.35	1.76
90	3.6	0.00920905	1924.74	1.92
100	3.9	0.01023227	2085.14	2.09
110	4.1	0.01125550	2192.07	2.19
120	4.4	0.01227873	2352.46	2.35
130	5.0	0.01330195	2673.26	2.67
140	5.7	0.01432518	3047.51	3.05
150	6.1	0.01534841	3261.37	3.26
160	7.0	0.01637164	3742.56	3.74
170	8.0	0.01739486	4277.21	4.28
180	8.0	0.01841809	4277.21	4.28
190	8.0	0.01944132	4277.21	4.28
200	8.0	0.02046455	4277.21	4.28
210	8.0	0.02148777	4277.21	4.28
220	8.0	0.02251100	4277.21	4.28
230	8.0	0.02353423	4277.21	4.28



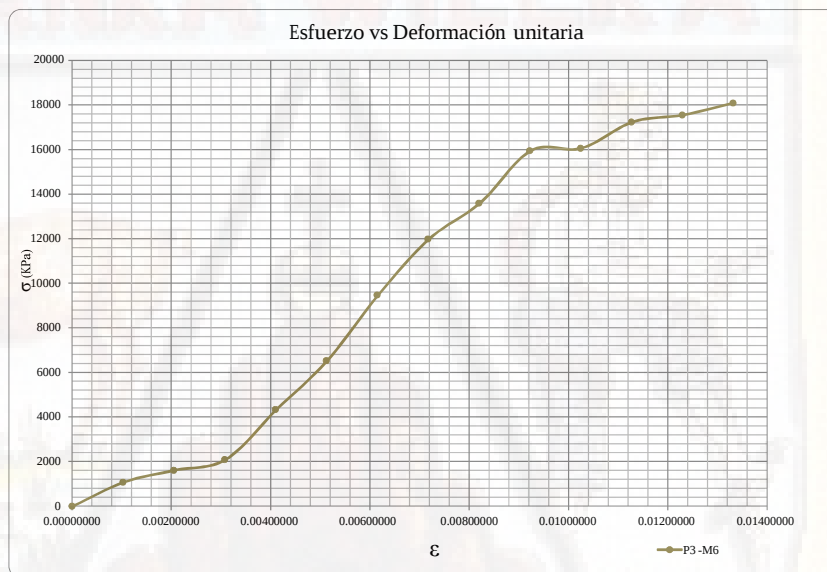
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M6
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.765
DIAMETRO (cm)	4.877
PESO MUESTRA (gr)	418.3
AREA (cm ²)	18.681
VOLUMEN (cm ³)	182.418
γ (gr/cm ³)	2.293

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	2.0	0.00102407	1070.62	1.07
20	3.0	0.00204813	1605.93	1.61
30	3.9	0.00307220	2087.71	2.09
40	8.1	0.00409626	4336.00	4.34
50	12.2	0.00512033	6530.77	6.53
60	17.7	0.00614439	9474.97	9.47
70	22.4	0.00716846	11990.92	11.99
80	25.4	0.00819252	13596.85	13.60
90	29.8	0.00921659	15952.21	15.95
100	30.0	0.01024066	16059.27	16.06
110	32.2	0.01126472	17236.95	17.24
120	32.8	0.01228879	17558.14	17.56
130	33.8	0.01331285	18093.45	18.09



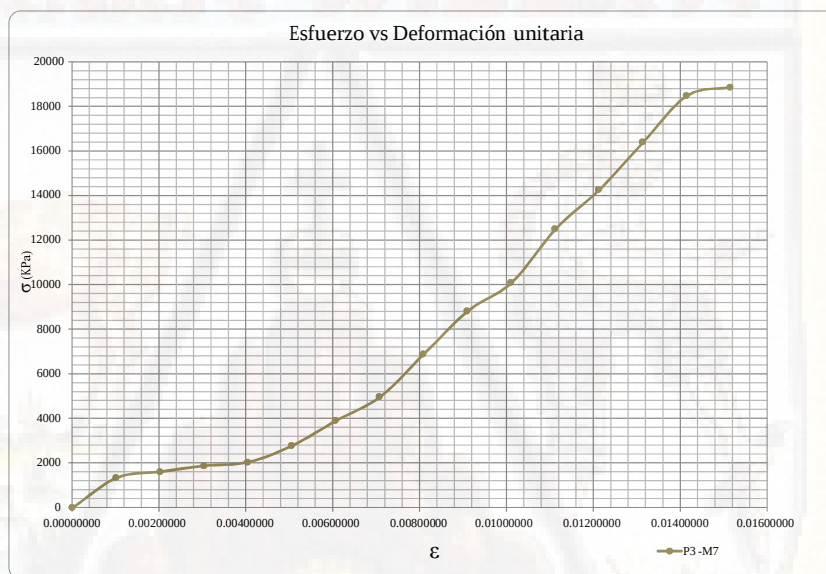
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M7
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.904
DIAMETRO (cm)	4.881
PESO MUESTRA (gr)	405.5
AREA (cm ²)	18.711
VOLUMEN (cm ³)	185.318
γ (gr/cm ³)	2.188

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ε)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	2.5	0.00100969	1336.08	1.34
20	3.0	0.00201939	1603.30	1.60
30	3.5	0.00302908	1870.51	1.87
40	3.8	0.00403877	2030.84	2.03
50	5.2	0.00504847	2779.05	2.78
60	7.3	0.00605816	3901.35	3.90
70	9.3	0.00706785	4970.22	4.97
80	12.9	0.00807754	6894.17	6.89
90	16.5	0.00908724	8818.13	8.82
100	18.9	0.01009693	10100.77	10.10
110	23.4	0.01110662	12505.71	12.51
120	26.7	0.01211632	14269.34	14.27
130	30.7	0.01312601	16407.06	16.41
140	34.6	0.01413570	18491.35	18.49
150	35.3	0.01514540	18865.45	18.87



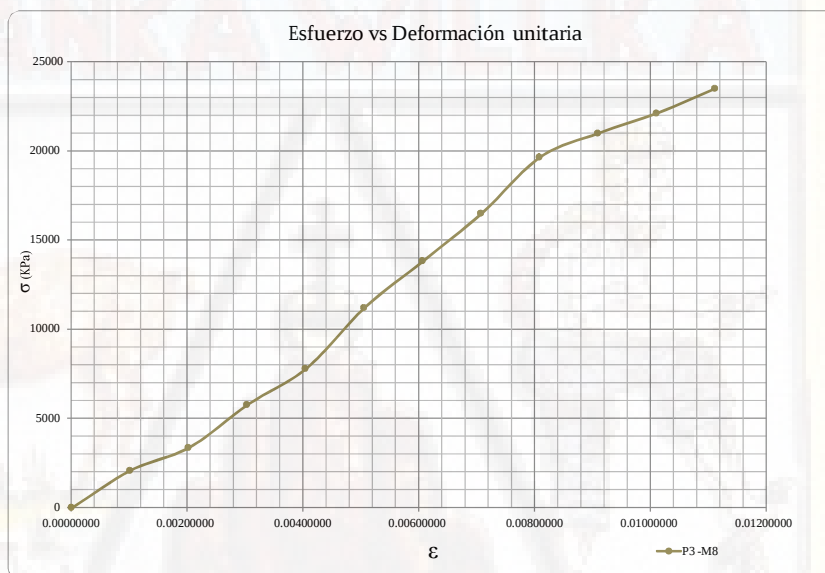
Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M8
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.978
DIAMETRO (cm)	4.863
PESO MUESTRA (gr)	422.2
AREA (cm ²)	18.574
VOLUMEN (cm ³)	185.328
γ (gr/cm ³)	2.278

DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.0000000	0.00	0.00
10	3.9	0.00100969	2084.29	2.08
20	6.3	0.00201939	3366.92	3.37
30	10.8	0.00302908	5771.87	5.77
40	14.6	0.00403877	7802.71	7.80
50	21.0	0.00504847	11223.07	11.22
60	25.9	0.00605816	13841.79	13.84
70	30.9	0.00706785	16513.95	16.51
80	36.8	0.00807754	19667.10	19.67
90	39.3	0.00908724	21003.18	21.00
100	41.4	0.01009693	22125.49	22.13
110	44.0	0.01110662	23515.01	23.52



Fuente: Autor del proyecto

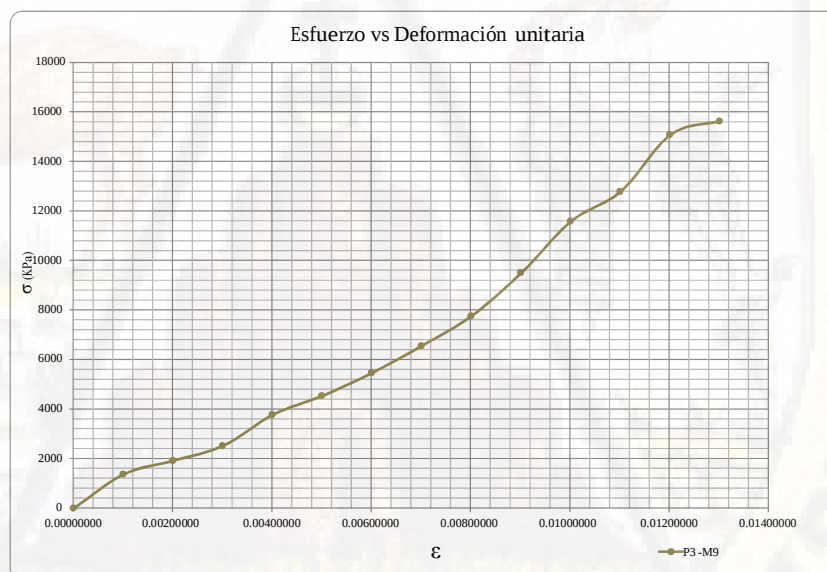
ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE PARA ROCAS - (ASTM D 2166-91)

PROYECTO :	ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN LA MINA DE ROCA FOSFORICA "CAROLINA", MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 23 DE JUNIO DE 2011

No. DE MUESTRA	P3 -M9
FORMA DE MUESTRA	Cilíndrica
ALTURA (cm)	9.991
DIAMETRO (cm)	4.826
PESO MUESTRA (gr)	418.1
AREA (cm ²)	18.292
VOLUMEN (cm ³)	182.757
γ (gr/cm ³)	2.288



DESPLAZAMIENTO VERTICAL Δ (0.01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00
10	2.5	0.00100090	1366.71	1.37
20	3.5	0.00200180	1913.39	1.91
30	4.6	0.00300270	2514.74	2.51
40	6.9	0.00400360	3772.11	3.77
50	8.3	0.00500450	4537.47	4.54
60	10.0	0.00600540	5466.83	5.47
70	12.0	0.00700631	6560.19	6.56
80	14.2	0.00800721	7762.90	7.76
90	17.4	0.00900811	9512.28	9.51
100	21.2	0.01000901	11589.68	11.59
110	23.4	0.01100991	12792.38	12.79
120	27.6	0.01201081	15088.45	15.09
130	28.6	0.01301171	15635.13	15.64



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

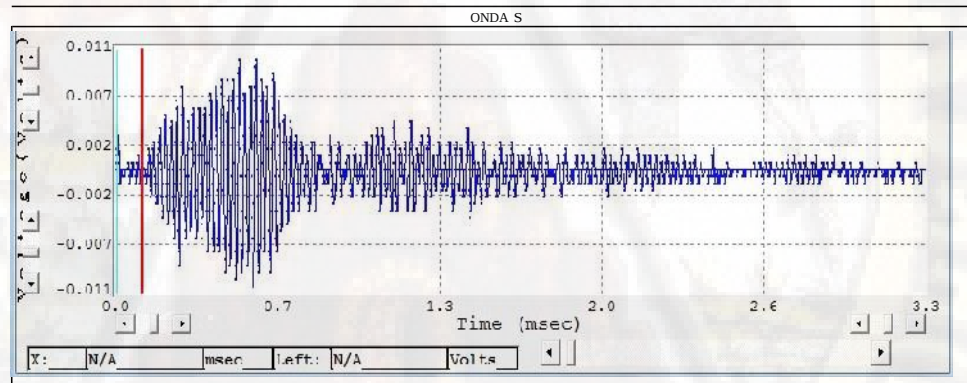
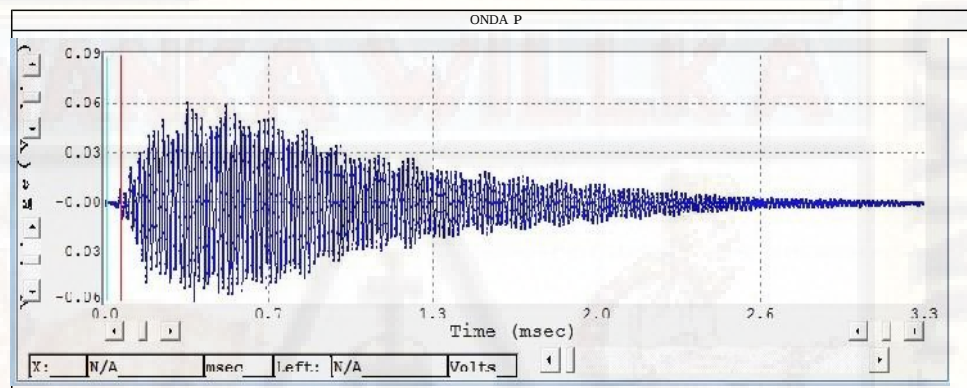
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M6
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.606
DIAMETRO (cm)	4.882
PESO MUESTRA (gr)	413.6
AREA (cm²)	18.719
VOLUMEN (cm³)	179.816
γ (gr/cm³)	2.300



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2066.00	786.00	0.42	4017931.00	7923569.00	1419276.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

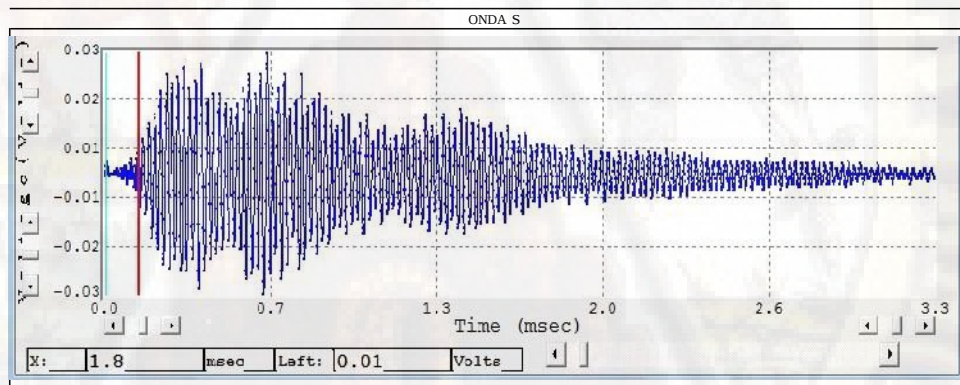
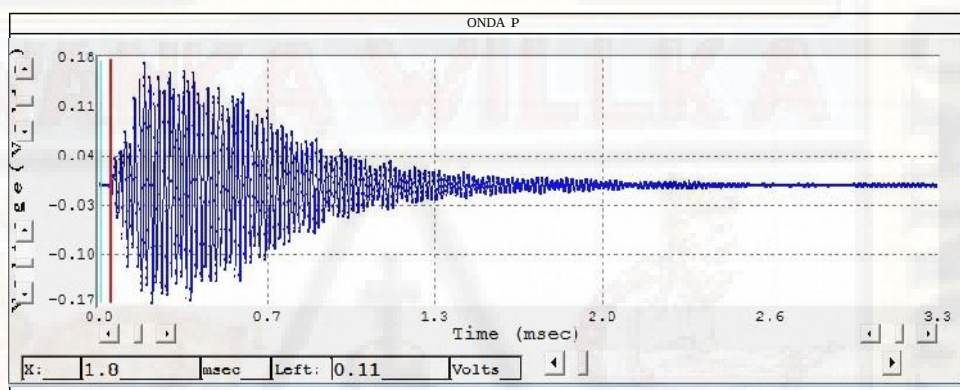
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M7
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	10.061
DIAMETRO (cm)	4.869
PESO MUESTRA (gr)	418.7
AREA (cm²)	18.620
VOLUMEN (cm³)	187.331
γ (gr/cm³)	2.235



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (ν)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2509.00	841.00	0.44	4544516.00	11960926.00	1581608.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

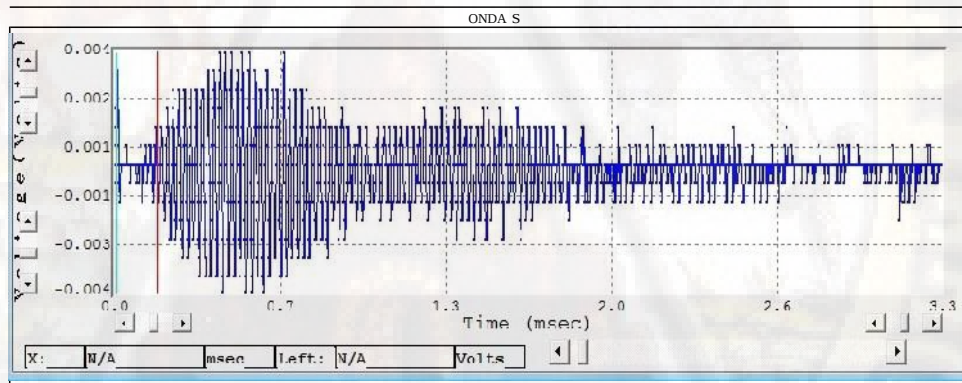
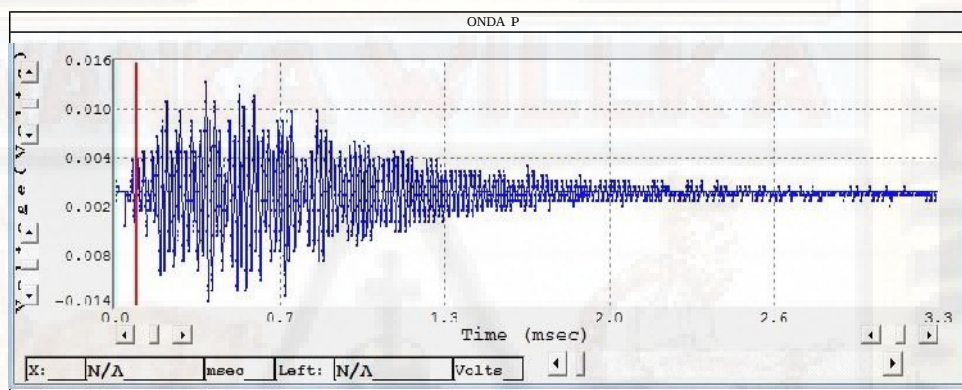
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M4
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.6
DIAMETRO (cm)	4.879
PESO MUESTRA (gr)	408
AREA (cm²)	18.696
VOLUMEN (cm³)	179.483
γ (gr/cm³)	2.273



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	1184.00	573.00	0.35	2010004.00	2191999.00	746009.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

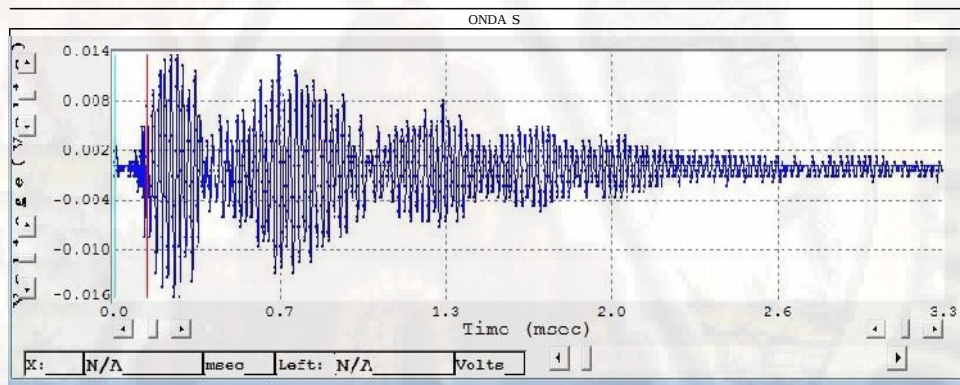
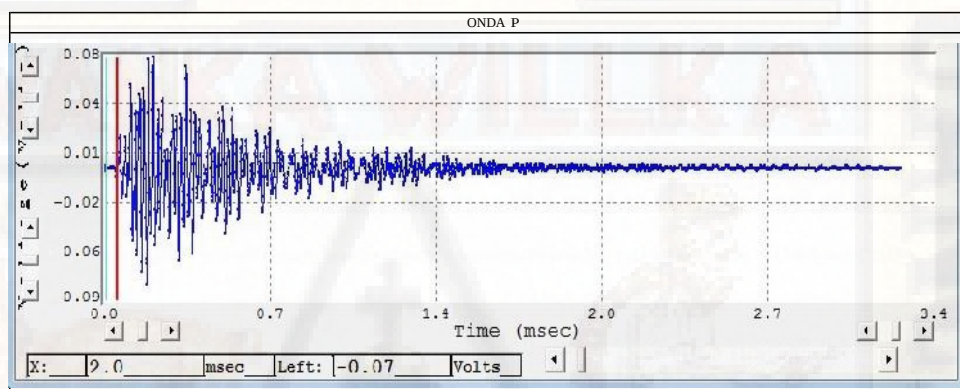
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M5
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.99
DIAMETRO (cm)	4.816
PESO MUESTRA (gr)	408.6
AREA (cm²)	18.216
VOLUMEN (cm³)	181.982
γ (gr/cm³)	2.245



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E" (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2307.00	1020.00	0.38	6435026.00	8839880.00	2333773.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

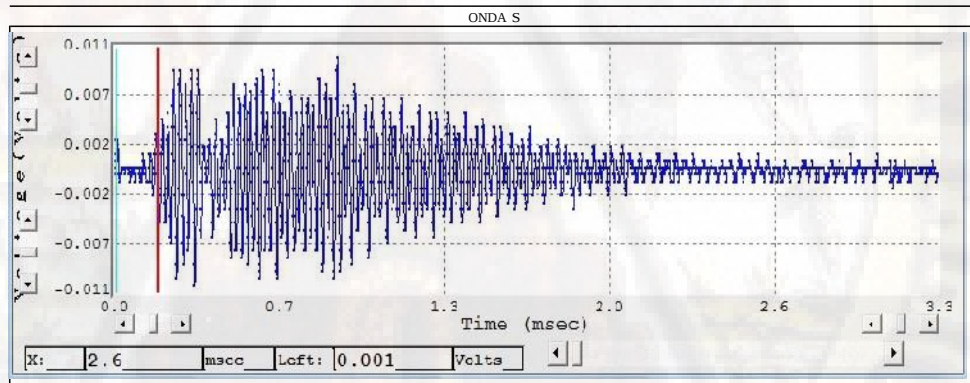
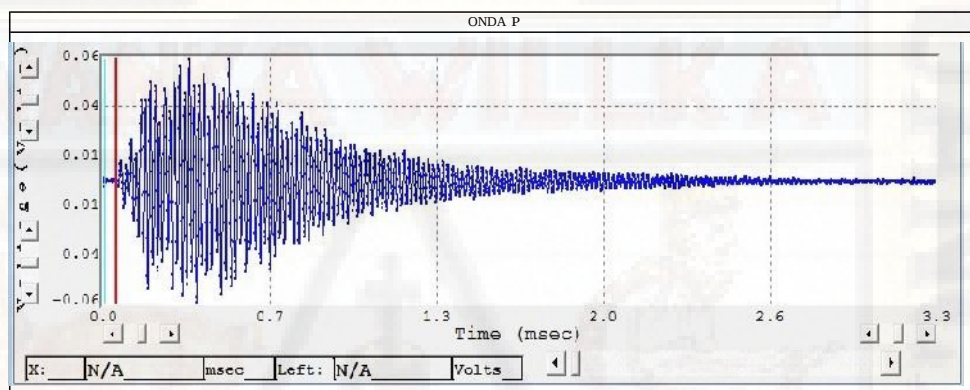
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M6
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.957
DIAMETRO (cm)	4.841
PESO MUESTRA (gr)	413.2
AREA (cm²)	18.406
VOLUMEN (cm³)	183.269
γ (gr/cm³)	2.255



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2141.00	761.00	0.43	3725434.00	8598183.00	1304619.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

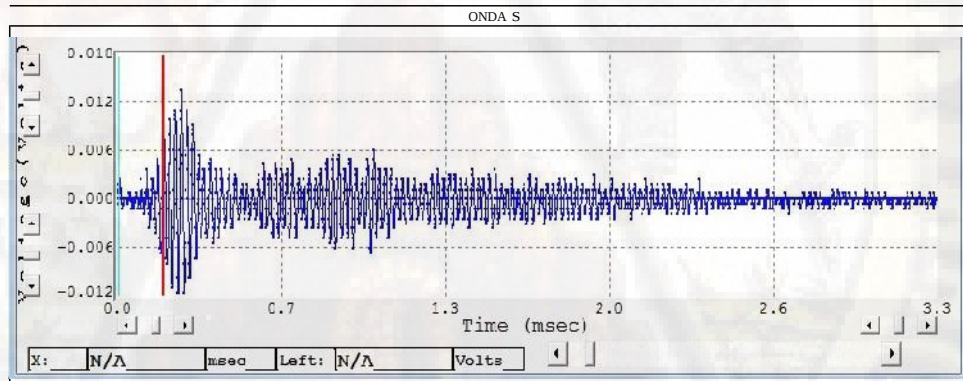
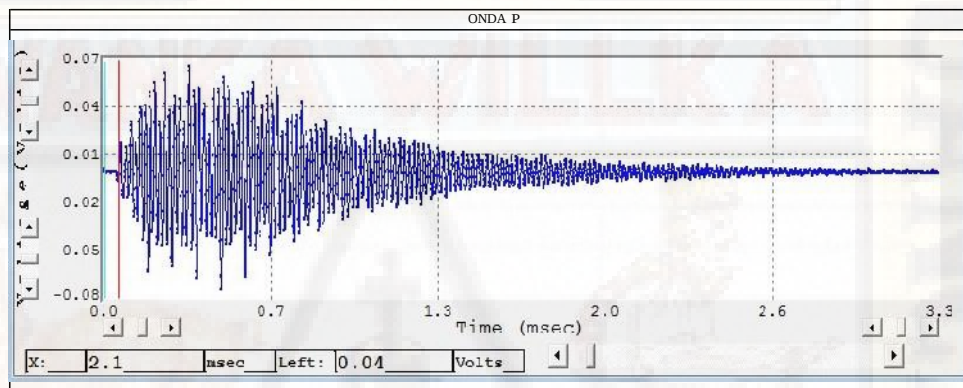
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M7
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.989
DIAMETRO (cm)	4.875
PESO MUESTRA (gr)	427.5
AREA (cm²)	18.665
VOLUMEN (cm³)	186.449
γ (gr/cm³)	2.293



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2225.00	763.00	0.43	3827565.00	9567913.00	1335204.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

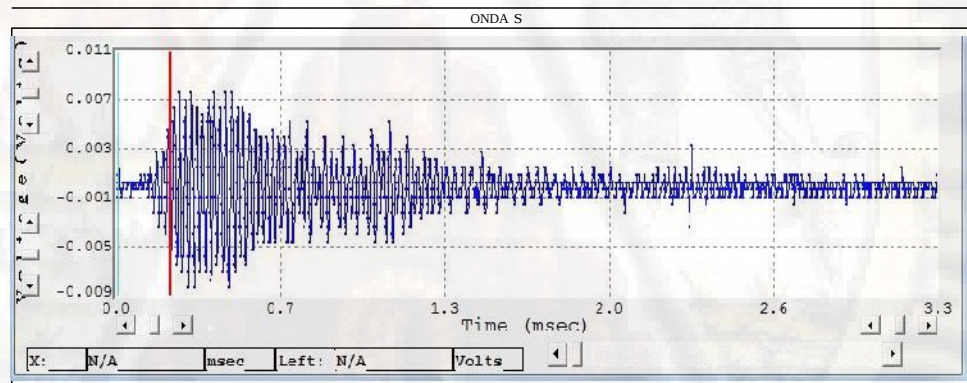
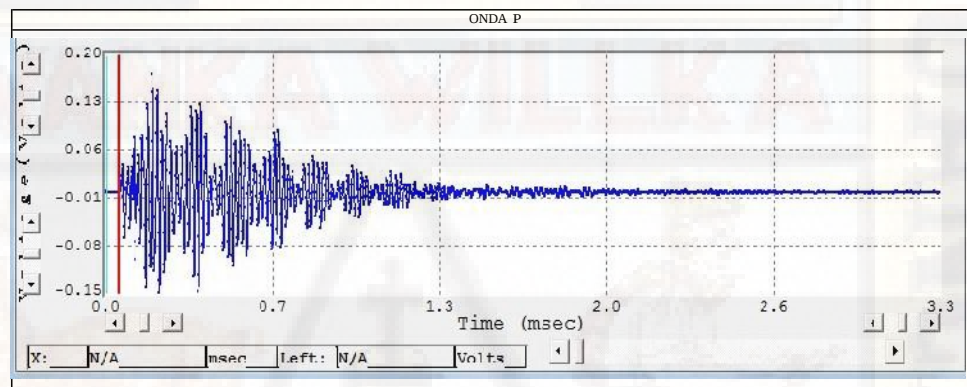
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M8
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.952
DIAMETRO (cm)	4.804
PESO MUESTRA (gr)	405.1
AREA (cm²)	18.126
VOLUMEN (cm³)	180.387
γ (gr/cm³)	2.246



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2298.00	767.00	0.44	3797911.00	10101627.00	1321161.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

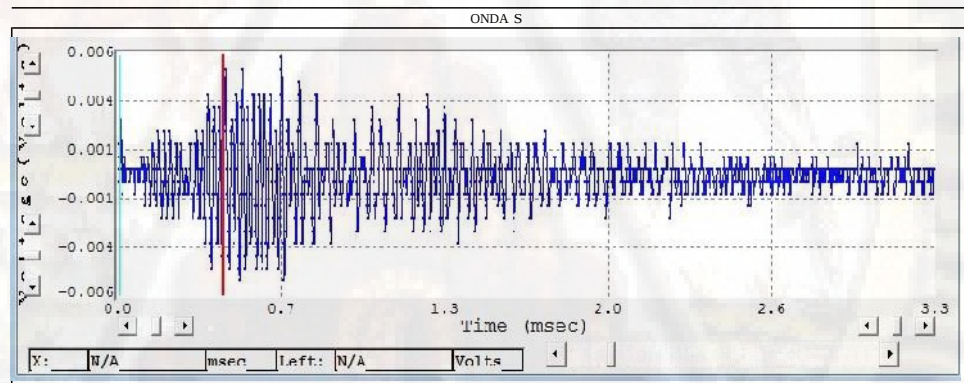
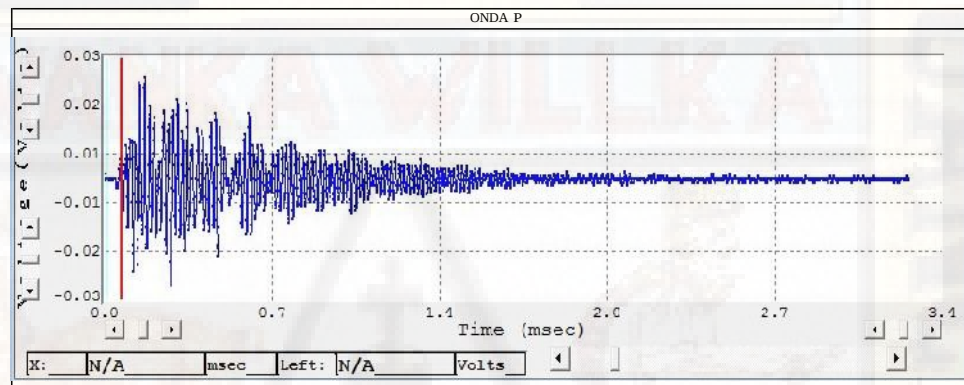
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M9
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.77
DIAMETRO (cm)	4.835
PESO MUESTRA (gr)	411.3
AREA (cm²)	18.360
VOLUMEN (cm³)	179.381
γ (gr/cm³)	2.293



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2353.00	980.00	0.39	6147799.00	9756316.00	2203548.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

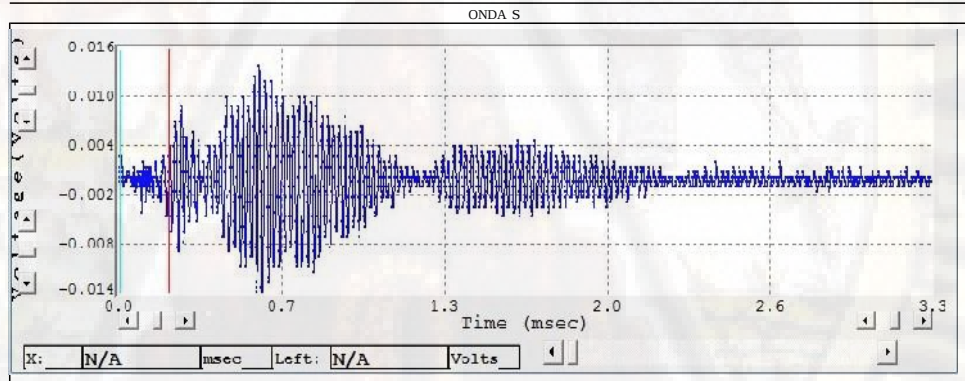
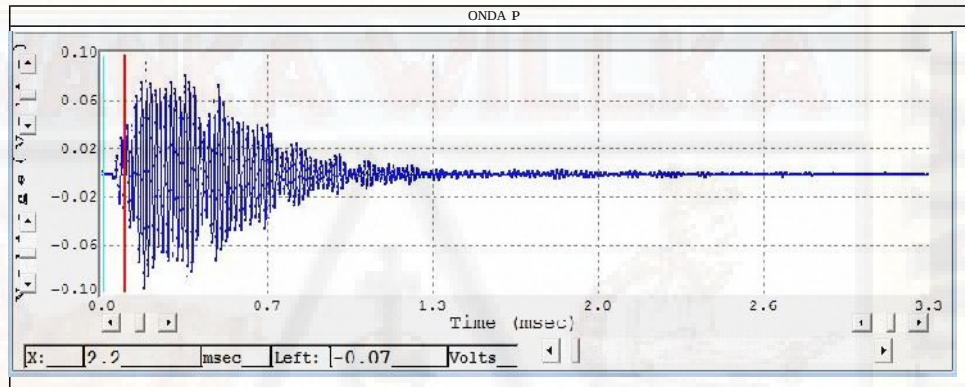
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M3
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	10.097
DIAMETRO (cm)	4.921
PESO MUESTRA (gr)	428
AREA (cm²)	19.019
VOLUMEN (cm³)	192.039
γ (gr/cm³)	2.229



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2518.00	745.00	0.45	3594294.00	12480007.00	1237705.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

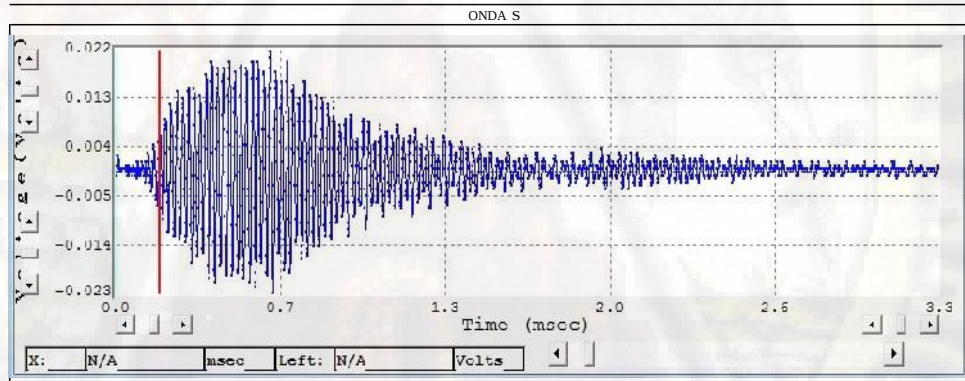
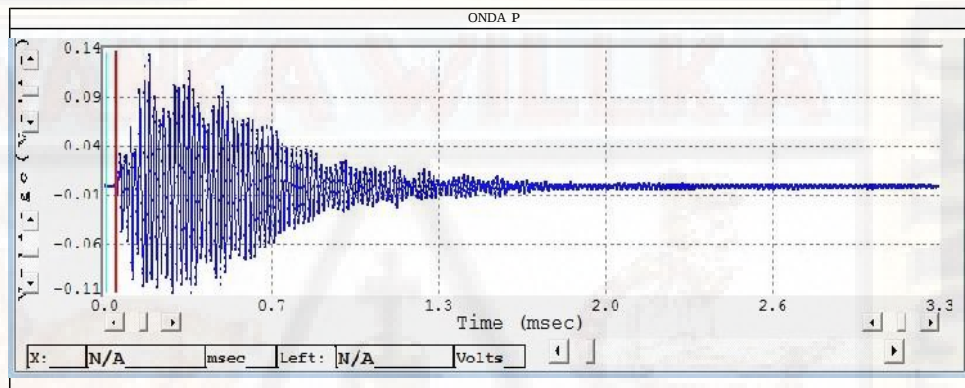
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M4
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	10.001
DIAMETRO (cm)	4.876
PESO MUESTRA (gr)	422.2
AREA (cm²)	18.673
VOLUMEN (cm³)	186.750
γ (gr/cm³)	2.261



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2598.00	859.00	0.44	4802314.00	13029880.00	1669124.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

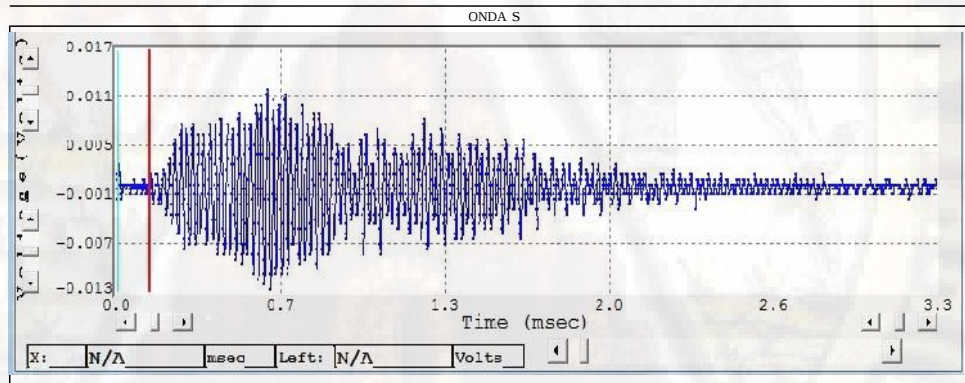
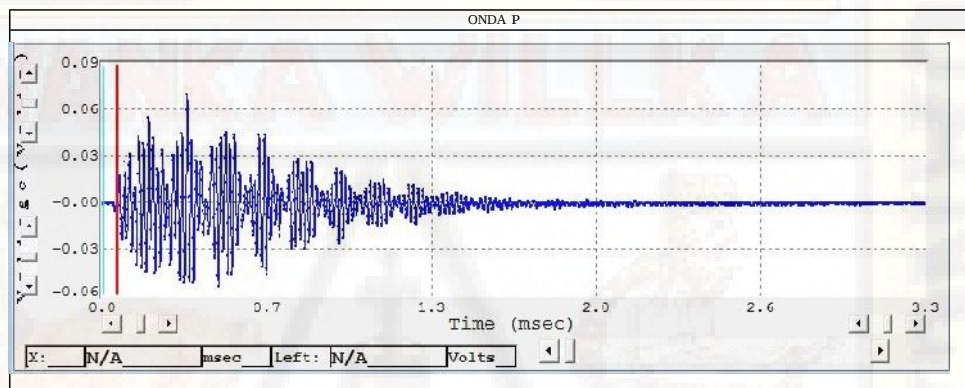
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M6
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.765
DIAMETRO (cm)	4.877
PESO MUESTRA (gr)	418.3
AREA (cm ²)	18.681
VOLUMEN (cm ³)	182.418
γ (gr/cm ³)	2.293



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2342.00	769.00	0.44	3903773.00	10766713.00	1355881.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

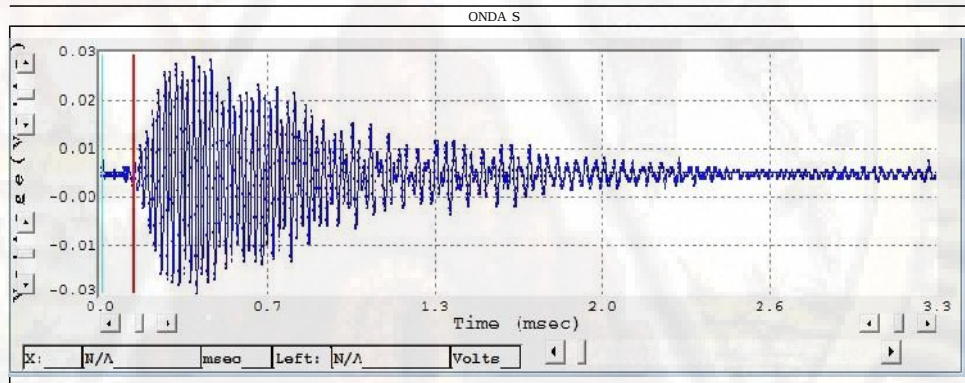
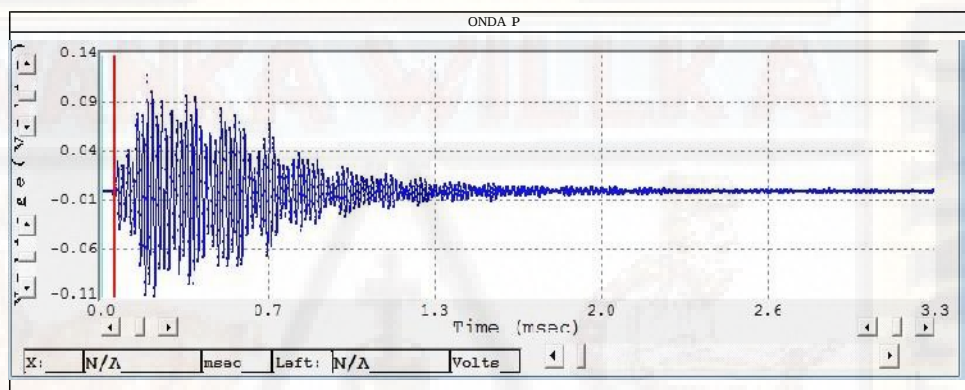
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M7
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.904
DIAMETRO (cm)	4.881
PESO MUESTRA (gr)	405.5
AREA (cm ²)	18.711
VOLUMEN (cm ³)	185.318
γ (gr/cm ³)	2.188



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2363.00	826.00	0.43	4269327.00	10224495.00	1492347.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

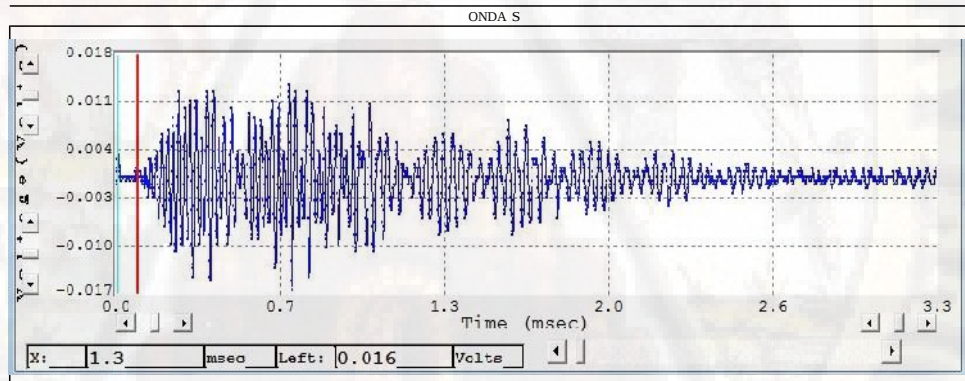
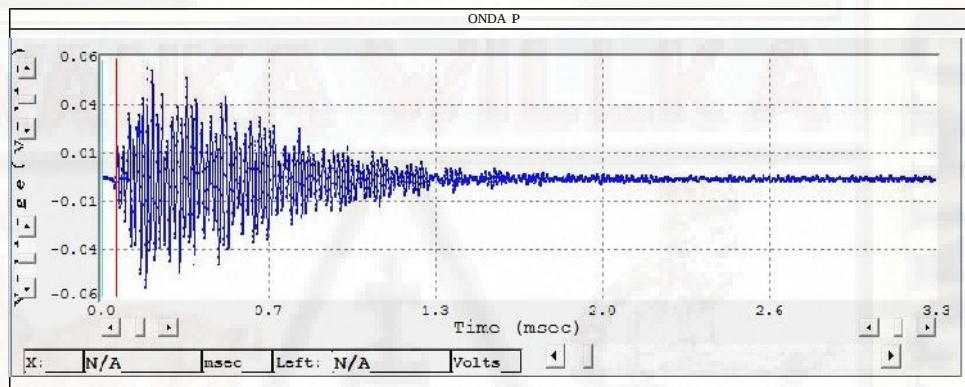
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M8
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.978
DIAMETRO (cm)	4.863
PESO MUESTRA (gr)	422.2
AREA (cm²)	18.574
VOLUMEN (cm³)	185.328
γ (gr/cm³)	2.278



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "E _d " (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2304.00	935.00	0.40	5580984.00	9442492.00	1991087.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

ENSAYO DE ULTRASONIDO

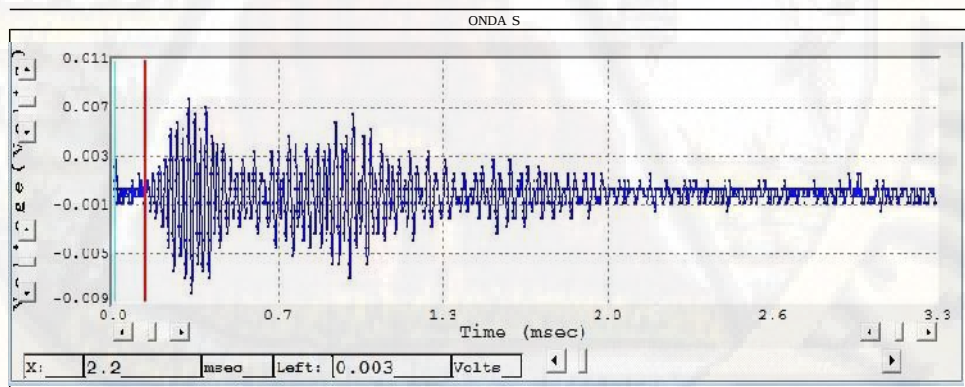
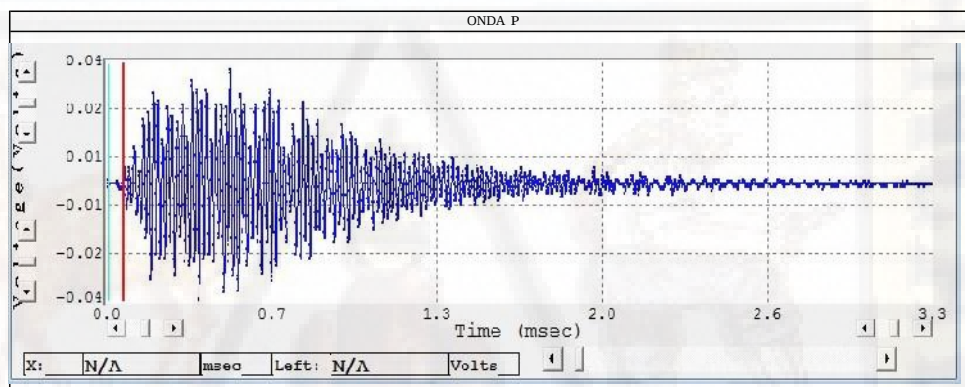
PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 24 DE JUNIO DE 2015

No. DE MUESTRA	P3 -M9
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	9.991
DIAMETRO (cm)	4.826
PESO MUESTRA (gr)	418.1
AREA (cm²)	18.292
VOLUMEN (cm³)	182.757
γ (gr/cm³)	2.288



Sentido de medida	Velocidades		Relación de Poisson (v)	Modulo de Young "Ea" (KPa)	Modulo de Bulk (KPa)	Modulo de Rigidez "G" (KPa)
	Onda P (m/s)	Onda S (m/s)				
Altura	2708.00	747.00	0.46	3728066.00	15067742.00	1277818.00

SEÑAL DE ULTRASONIDO SENTIDO DE ALTURA



Fuente: Autor del proyecto

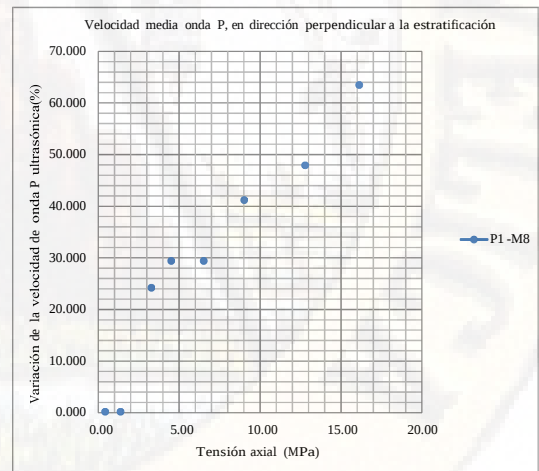
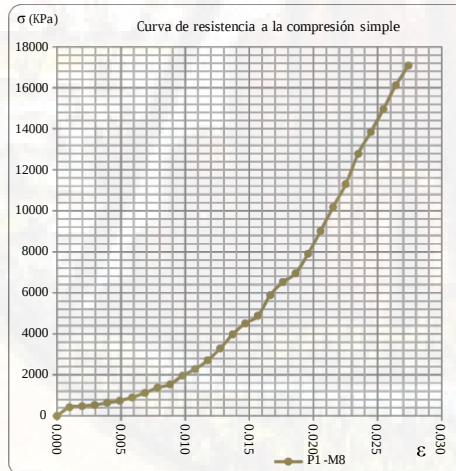
**ENSAYO DE VELOCIDAD DE ONDA P DE ULTRASONIDO EN DIRECCIÓN PERPENDICULAR A LOS PLANOS DE ESTRATIFICACIÓN
CON TENSION UNIAxIAL VARIABLE**

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 19 DE AGOSTO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M8
FORMA DE MUESTRA	Cilíndrica
ALTURA (cm)	10.217
DIAMETRO (cm)	4.899
PESO MUESTRA (gr)	446
AREA (cm²)	18.850
VOLUMEN (cm³)	192.588
γ (gr/cm³)	2.316
VELOCIDAD ONDA P ULTRASONICA TENSION UNIAxIAL=0 (m/s)	2056



DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)	VELOCIDAD ULTRASONICA Onda P CON CARGA VARIABLE (m/s)	VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE ONDA P (%)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00		
10	0.8	0.00097876	424.41	0.42	2060	0.195
20	0.9	0.00195752	477.46	0.48		
30	1.0	0.00293628	530.51	0.53		
40	1.2	0.00391504	636.61	0.64		
50	1.4	0.00489380	742.72	0.74		
60	1.7	0.00587257	901.87	0.90		
70	2.1	0.00685133	1114.08	1.11		
80	2.6	0.00783009	1379.33	1.38	2060	0.195
90	2.9	0.00880885	1538.48	1.54		
100	3.7	0.00978761	1962.89	1.96		
110	4.3	0.01076637	2281.20	2.28		
120	5.1	0.01174513	2705.61	2.71		
130	6.2	0.01272389	3289.17	3.29	2554	24.222
140	7.5	0.01370265	3978.84	3.98		
150	8.5	0.01468141	4509.35	4.51	2661	29.426
160	9.2	0.01566017	4880.71	4.88		
170	11.1	0.01663894	5888.68	5.89		
180	12.3	0.01761770	6525.30	6.53	2661	29.426
190	13.1	0.01859646	6949.71	6.95		
200	14.9	0.01957522	7904.63	7.90		
210	17	0.02055398	9018.70	9.02	2903	41.196
220	19.2	0.02153274	10185.83	10.19		
230	21.3	0.02251150	11299.91	11.30		
240	24.1	0.02349026	12785.34	12.79	3041	47.909
250	26.1	0.02446902	13846.36	13.85		
260	28.2	0.02544778	14960.44	14.96		
270	30.4	0.02642654	16127.57	16.13	3361	63.473
280	32.2	0.02740530	17082.49	17.08		



Fuente: Autor del proyecto

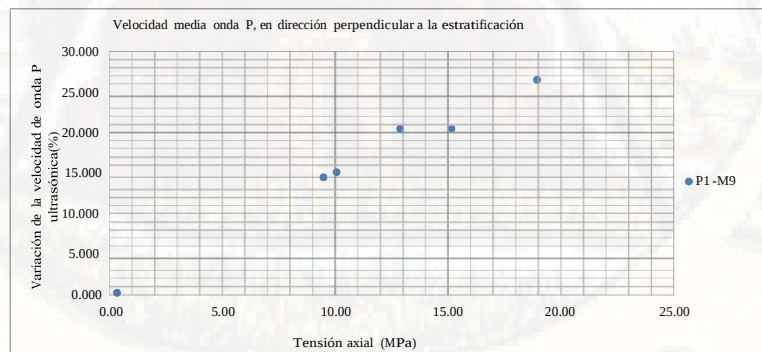
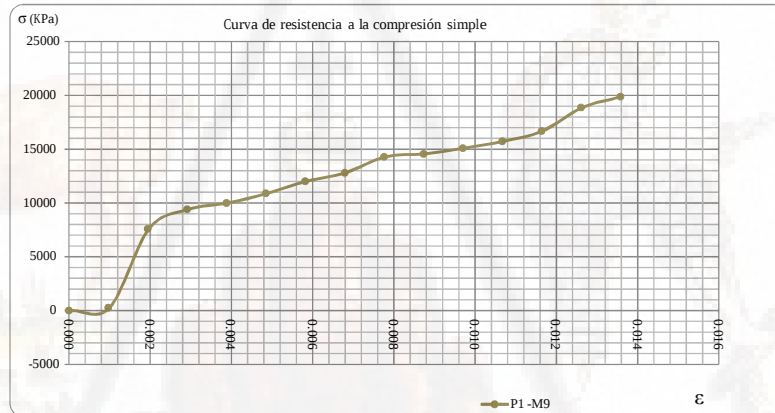
**ENSAYO DE VELOCIDAD DE ONDA P DE ULTRASONIDO EN DIRECCIÓN PERPENDICULAR A LOS PLANOS DE ESTRATIFICACIÓN
CON TENSIÓN UNIAxIAL VARIABLE**

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 19 DE AGOSTO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M9
FORMA DE MUESTRA	Cilíndrica
ALTURA (cm)	10.313
DIAMETRO (cm)	4.894
PESO MUESTRA (gr)	449.4
AREA (cm²)	18.811
VOLUMEN (cm³)	194.000
γ (gr/cm³)	2.316
VELOCIDAD ONDA P ULTRASONICA TENSION UNIAxIAL=0 (m/s)	2679



DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)	VELOCIDAD ULTRASONICA Onda P CON CARGA VARIABLE (m/s)	VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE ONDA P (%)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00		
10	0.5	0.00096965	265.80	0.27	2686	0.261
20	14.3	0.00193930	7601.83	7.60		
30	17.7	0.00290895	9409.26	9.41	3069	14.558
40	18.8	0.00387860	9994.02	9.99	3086	15.192
50	20.5	0.00484825	10897.73	10.90		
60	22.6	0.00581790	12014.08	12.01	3223	20.306
70	24.1	0.00678755	12811.48	12.81	3230	20.567
80	26.9	0.00775720	14299.95	14.30		
90	27.4	0.00872685	14565.75	14.57		
100	28.4	0.00969650	15097.34	15.10	3230	20.567
110	29.6	0.01066615	15735.26	15.74		
120	31.4	0.01163580	16692.13	16.69		
130	35.5	0.01260545	18871.68	18.87	3392	26.614
140	37.4	0.01357510	19881.71	19.88		



Fuente: Autor del proyecto

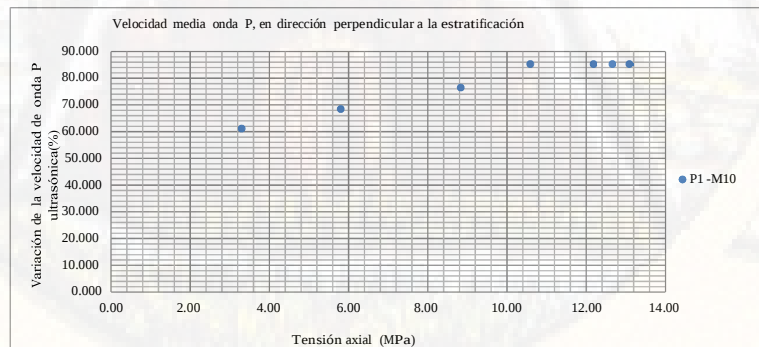
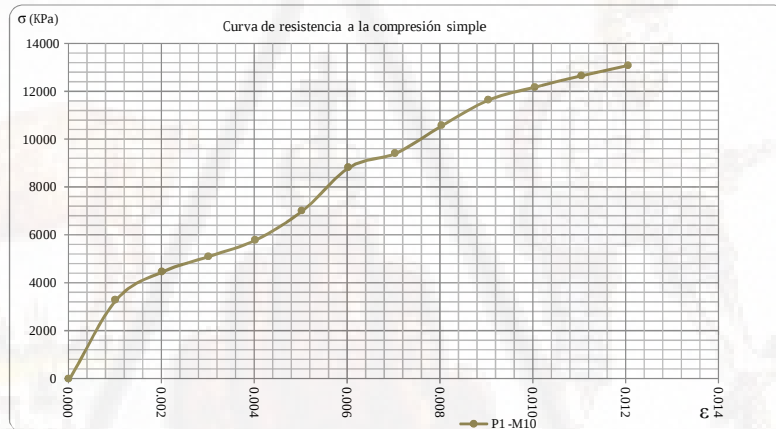
**ENSAYO DE VELOCIDAD DE ONDA P DE ULTRASONIDO EN DIRECCIÓN PERPENDICULAR A LOS PLANOS DE ESTRATIFICACIÓN
CON TENSIÓN UNIAxIAL VARIABLE**

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 19 DE AGOSTO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M10
FORMA DE MUESTRA	Cilíndrica
ALTURA (cm)	9.961
DIAMETRO (cm)	4.892
PESO MUESTRA (gr)	426.4
AREA (cm²)	18.796
VOLUMEN (cm³)	187.226
γ (gr/cm³)	2.277
VELOCIDAD ONDA P ULTRASONICA TENSIÓN UNIAxIAL=0 (m/s)	1680



DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ε)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)	VELOCIDAD ULTRASONICA Onda P CON CARGA VARIABLE (m/s)	VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE ONDA P (%)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00		
10	6.2	0.00100392	3298.59	3.30	2707	61.131
20	8.4	0.00200783	4469.06	4.47		
30	9.6	0.00301175	5107.50	5.11		
40	10.9	0.00401566	5799.14	5.80	2830	68.452
50	13.2	0.00501958	7022.81	7.02		
60	16.6	0.00602349	8831.72	8.83	2965	76.488
70	17.7	0.00702741	9416.95	9.42		
80	19.9	0.00803132	10587.42	10.59	3113	85.298
90	21.9	0.00903524	11651.49	11.65		
100	22.9	0.01003915	12183.52	12.18	3113	85.298
110	23.8	0.01104307	12662.35	12.66	3113	85.298
120	24.6	0.01204698	13087.97	13.09	3113	85.298



Fuente: Autor del proyecto

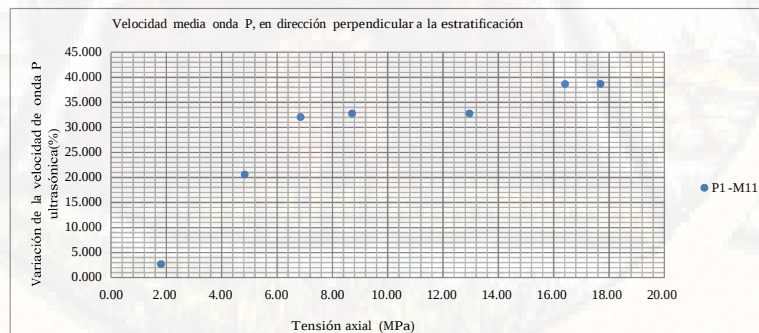
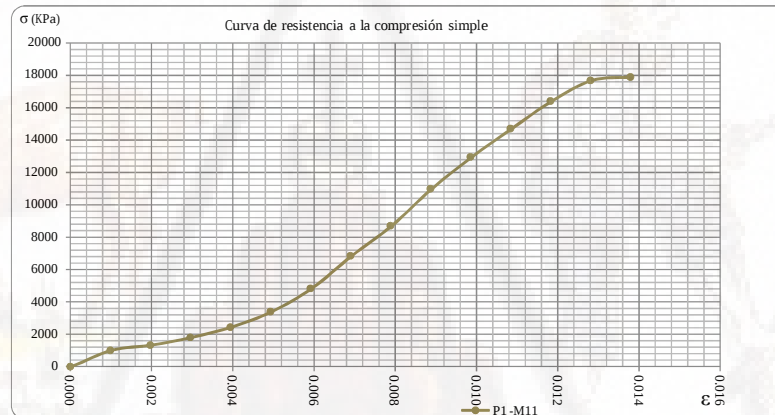
**ENSAYO DE VELOCIDAD DE ONDA P DE ULTRASONIDO EN DIRECCIÓN PERPENDICULAR A LOS PLANOS DE ESTRATIFICACIÓN
CON TENSIÓN UNIAXIAL VARIABLE**

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 19 DE AGOSTO DE 2015

No. DE MUESTRA	P1 -M11
FORMA DE MUESTRA	Cilíndrica
ALTURA (cm)	10.153
DIAMETRO (cm)	4.896
PESO MUESTRA (gr)	434
AREA (cm²)	18.827
VOLUMEN (cm³)	191.147
γ (gr/cm³)	2.271
VELOCIDAD ONDA P ULTRASONICA TENSIÓN UNIAXIAL=0 (m/s)	2288



DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)	VELOCIDAD ULTRASONICA Onda P CON CARGA VARIABLE (m/s)	VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE ONDA P (%)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00		
10	1.9	0.00098493	1009.21	1.01		
20	2.5	0.00196986	1327.91	1.33		
30	3.4	0.00295479	1805.95	1.81	2350	2.710
40	4.6	0.00393972	2443.35	2.44		
50	6.4	0.00492465	3399.44	3.40		
60	9.1	0.00590958	4833.58	4.83	2759	20.586
70	12.9	0.00689451	6851.99	6.85	3022	32.080
80	16.4	0.00787944	8711.06	8.71	3038	32.780
90	20.7	0.00886438	10995.06	11.00		
100	24.4	0.00984931	12960.36	12.96	3038	32.780
110	27.7	0.01083424	14713.20	14.71		
120	30.9	0.01181917	16412.92	16.41	3173	38.680
130	33.3	0.01280410	17687.71	17.69	3173	38.680
140	33.7	0.01378903	17900.17	17.90		



Fuente: Autor del proyecto

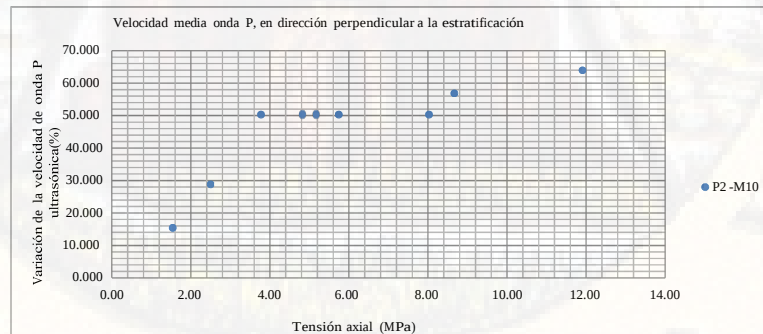
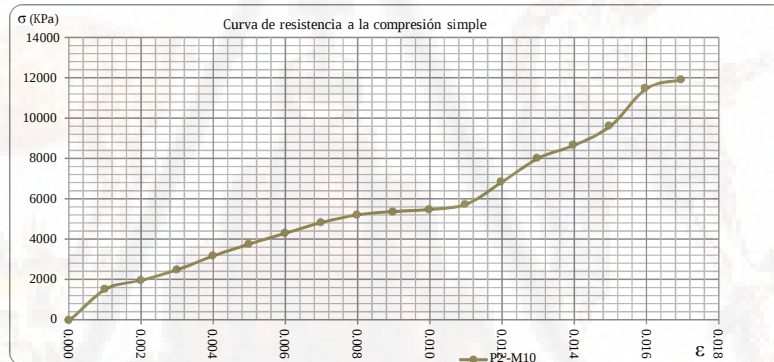
ENSAYO DE VELOCIDAD DE ONDA P DE ULTRASONIDO EN DIRECCIÓN PERPENDICULAR A LOS PLANOS DE ESTRATIFICACIÓN CON TENSIÓN UNIAxIAL VARIABLE

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACÁ - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 19 DE AGOSTO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M10
FORMA DE MUESTRA	Cilíndrica
ALTURA (cm)	10.019
DIAMETRO (cm)	4.894
PESO MUESTRA (gr)	414.4
AREA (cm²)	18.811
VOLUMEN (cm³)	188.470
γ (gr/cm³)	2.199
VELOCIDAD ONDA P ULTRASONICA TENSION UNIAxIAL=0 (m/s)	1736



DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)	VELOCIDAD ULTRASONICA Onda P CON CARGA VARIABLE (m/s)	VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE ONDA P (%)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00		
10	2.9	0.00099810	1541.63	1.54	2003	15.380
20	3.7	0.00199621	1966.91	1.97		
30	4.7	0.00299431	2498.50	2.50	2236	28.802
40	6.0	0.00399241	3189.58	3.19		
50	7.1	0.00499052	3774.34	3.77	2609	50.288
60	8.1	0.00598862	4305.93	4.31		
70	9.1	0.00698673	4837.53	4.84	2609	50.288
80	9.8	0.00798483	5209.65	5.21	2609	50.288
90	10.1	0.00898293	5369.13	5.37		
100	10.3	0.00998104	5475.44	5.48		
110	10.8	0.01097914	5741.24	5.74	2609	50.288
120	12.9	0.01197724	6857.60	6.86		
130	15.1	0.01297535	8027.11	8.03	2609	50.288
140	16.3	0.01397345	8665.02	8.67	2723	56.855
150	18.1	0.01497155	9621.90	9.62		
160	21.6	0.01596966	11482.49	11.48		
170	22.4	0.01696776	11907.76	11.91	2846	63.940



Fuente: Autor del proyecto

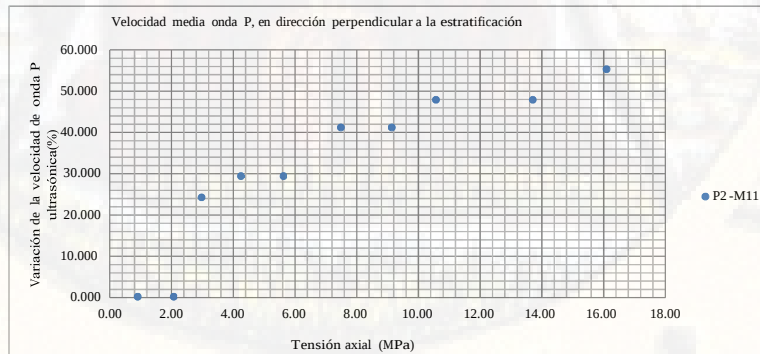
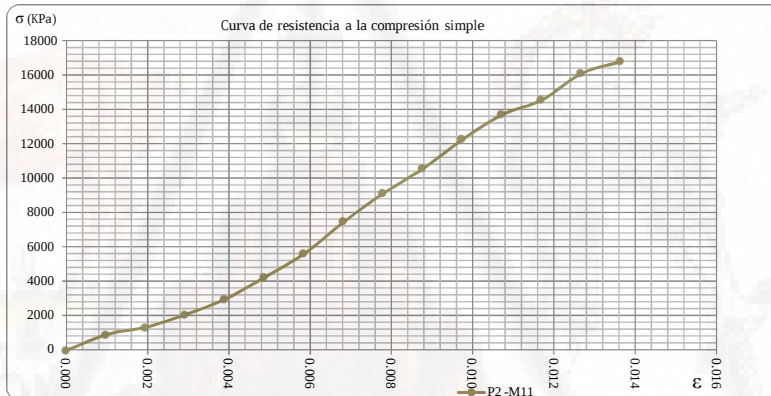
**ENSAYO DE VELOCIDAD DE ONDA P DE ULTRASONIDO EN DIRECCIÓN PERPENDICULAR A LOS PLANOS DE ESTRATIFICACIÓN
CON TENSIÓN UNIAXIAL VARIABLE**

PROYECTO :	APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS, EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA	
LOCALIZACIÓN :	VEREDA PILAR Y CEIBITA - MUNICIPIO DE SOGAMOSO - DEPARTAMENTO DE BOYACA - PAIS COLOMBIA	
MUESTRA	ROCA FOSFORICA	FECHA : 19 DE AGOSTO DE 2015

No. DE MUESTRA	P2 -M11
FORMA DE MUESTRA	Cilindrica
ALTURA (cm)	10.278
DIAMETRO (cm)	4.896
PESO MUESTRA (gr)	440
AREA (cm²)	18.827
VOLUMEN (cm³)	193.500
γ (gr/cm³)	2.274
ULTRASONICA TENSION UNIAXIAL=0 (m/s)	2068



DESPLAZAMIENTO VERTICAL x (0,01 mm)	RESISTENCIA (KN)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ε)	ESFUERZO (KPa)	ESFUERZO (MPa)	VELOCIDAD ULTRASONICA Onda P CON CARGA VARIABLE (m/s)	VARIACIÓN DE VELOCIDAD DE ONDA P (%)
0	0.0	0.00000000	0.00	0.00		
10	1.7	0.00097295	902.98	0.90	2072	0.193
20	2.5	0.00194590	1327.91	1.33		
30	3.9	0.00291886	2071.53	2.07	2072	0.193
40	5.6	0.00389181	2974.51	2.97	2570	24.275
50	8.0	0.00486476	4249.30	4.25	2677	29.449
60	10.6	0.00583771	5630.32	5.63	2677	29.449
70	14.1	0.00681066	7489.39	7.49	2920	41.199
80	17.2	0.00778362	9135.99	9.14	2920	41.199
90	19.9	0.00875657	10570.13	10.57	3059	47.921
100	23.1	0.00972952	12269.85	12.27		
110	25.8	0.01070247	13703.99	13.70	3059	47.921
120	27.4	0.01167542	14553.85	14.55		
130	30.3	0.01264838	16094.22	16.09	3212	55.319
140	31.6	0.01362133	16784.73	16.78		



Fuente: Autor del proyecto

Artículo Científico

ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE METODOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA ESTABILIDAD DE PILARES EN MINAS DE ROCA FOSFORICA

ANALYSIS AND APPLICATION OF NOT DESTRUCTIVE METHODS FOR THE STABILITY OF PILLARS IN MINES OF PHOSPHORIC ROCK

Gustavo Sierra Albarracín
Universidad Nacional de Huancavelica
gus8555@hotmail.com

Resumen

El estudio geotécnico y geomecánico en explotaciones por cámaras y pilares es de gran interés para la optimización de operaciones de extracción de minerales, así como el conocimiento de las propiedades físico – mecánicas de la matriz rocosa y la determinación de la resistencia del macizo rocoso que conforma el pilar marcando la base para el diseño de pilares en excavaciones subterráneas. La determinación de la resistencia del macizo rocoso para diseño de pilares ha presentado dificultades, ya que las relaciones empíricas disponibles no son aplicables en todos los casos y los ensayos in-situ resultan bastantes costosos, para ello el uso de métodos no destructivos de campo y laboratorio basados en la propagación de ondas mecánicas a través de medios sólidos puede ser una alternativa confiable, brindando mayor certidumbre que los métodos empíricos y siendo más económicos que los ensayos in-situ.

Abstract

The Geotechnical and geomechanical in the room and pillar operations study is of great interest to the optimization of mining operations, as well as knowledge of the physical - mechanical properties of the rock matrix and the determination of rock mass strength forming pillar marking the basis for the design of pillars in underground excavations. The determination of rock mass strength of pillar design has presented difficulties because the available empirical relationships are not applicable in all cases and in-situ tests prove costly, for which the use of non-destructive methods and field based on the propagation of mechanical waves through solid laboratory media can be a reliable alternative, providing greater certainty that the empirical methods and being more economical than in-situ tests.

empresa Fosfatos Boyacá, localizada en el Municipio de Sogamoso (Boyacá).

Descripción del material

En la Tabla 1 resume algunas propiedades de la roca y del macizo rocoso.

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas matriz rocosa

Propiedad	Valor
Densidad (gr/cm ³)	2,55
Contenido de agua (%)	12,43
Porosidad (%)	29,30
Grado de saturación (%)	96,06
Peso específico (KN/m ³)	25,03

Muestreo y preparación de muestras

Para el muestreo se seleccionó un pilar que se encuentra entre los niveles 3 y 4 de la mina de roca fosfórica "Carolina". Se obtuvieron un total de 30 especímenes irregulares para propiedades físicas. Los ensayos de compresión uniaxial fueron realizados en una prensa hidráulica con capacidad de 1500 kN. Para ello se tomaron muestras de bloque de roca fosfórica de las paredes de los pilares, que fueron llevados al laboratorio, y allí se prepararon 21 especímenes cilíndricos con diámetro promedio de 50 mm y altura promedio de 100 mm; de estos, 15 especímenes fueron fallados de acuerdo con los métodos sugeridos por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1999) con aplicación de carga en dirección perpendicular a los planos de estratificación; los 6 restantes se sometieron a un proceso similar, pero durante la aplicación de carga, hasta la falla, se hicieron mediciones de velocidad de propagación de onda, de acuerdo con lo propuesto por Gonzatti (2007) para la determinación del coeficiente F1. Adicionalmente, se prepararon 10 especímenes de forma cúbica, con arista variable (5 de 70 mm de arista; 1 de 90 mm de arista; 1 de 110 mm de arista; 2 de 130 mm de arista; y 1 de 140 mm de arista), en

este caso se realizó la medición de propagación de velocidad de onda en sentido horizontal durante el proceso de aplicación de carga, de acuerdo con lo propuesto por Gonzatti (2007) para la determinación del coeficiente F1.

Medición de velocidad de propagación de onda

Las velocidades de propagación de ondas ultrasónicas (P y S) en roca fosfórica fueron determinadas mediante el equipo GCTS Testing Systems CATS Ultrasonics 1.83, que consta de una unidad generadora de pulsos, capaz de emitir señales de ondas P y S, con frecuencias entre 500 Hz hasta 10 MHz, lo que lo hace adecuado para la realización de medidas en rocas. Se realizaron mediciones de velocidad de propagación de onda en 15 especímenes cilíndricos de acuerdo con los métodos sugeridos por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1978c). Con los 6 especímenes cilíndricos restantes se hicieron mediciones de velocidad de propagación durante el proceso de aplicación de carga en pruebas de compresión simple, con el fin de estudiar el efecto del nivel de esfuerzo en la magnitud de la velocidad de propagación de onda; se alcanzaron a hacer alrededor de 8 mediciones de velocidad de propagación de onda en cada prueba a compresión uniaxial.

Ensayos de compresión simple con medición de velocidad de onda

Los ensayos de compresión uniaxial fueron realizados en una prensa hidráulica con capacidad de 1500 kN, midiendo la deformación axial con un deformímetro análogo. Adicionalmente, durante la ejecución de ensayos de resistencia se realizaron mediciones de velocidad de propagación de onda con el equipo GCTS Testing Systems CATS Ultrasonics 1.83, en dirección paralela y perpendicular a la acción de la carga axial, por lo que fue necesario la elaboración de dos carcasas en acero para protección de los transductores y la fijación

de los mismos por medio de un gel de transferencia de ultrasonido.



Medición de propagación de ondas ultrasónicas con carga uniaxial.

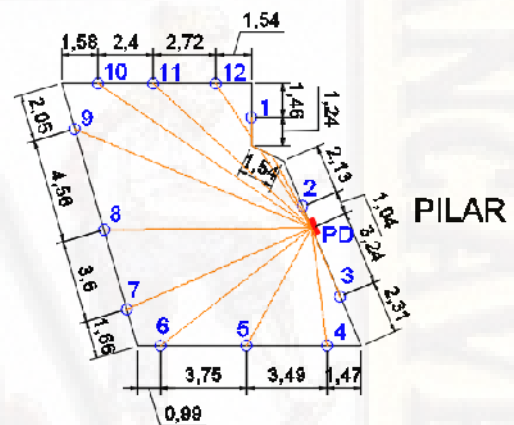
Variación de la velocidad de ondas de ultrasonido con respecto a la Saturación

Para los especímenes cúbicos se evaluó la velocidad de propagación de onda en tres direcciones (en sentido de la altura, en sentido del ancho y en sentido del largo), con el fin de evaluar la anisotropía de la roca fosfórica en función de esta variable. Adicionalmente, se evaluó el efecto del nivel de saturación en la magnitud de la velocidad de propagación de onda, al realizar mediciones, para una condición de humedad natural de las muestras; se hicieron mediciones en condición de 100% de saturación, para lo cual se dejaron sumergidos los especímenes en agua durante 24 horas, se secaron superficialmente y se procedió a realizar mediciones de velocidad de propagación de onda; se hicieron mediciones en condición seca, para lo cual se llevaron los especímenes al horno a una temperatura de 110°C durante 24 horas y se procedió a realizar mediciones de velocidad de propagación de onda. Finalmente, se sometieron los especímenes cúbicos a pruebas de compresión simple, y durante el proceso de aplicación de carga se realizaron mediciones de velocidad de propagación de la onda en sentido horizontal, paralelo a los estratos.

Medición In situ mediante geofísica

La determinación de la velocidad de propagación de onda P in situ, se realizó con la utilización de un equipo sísmico tipo P.A.S.I. – LCM-3, que cuenta con tres canales de medición, permite hacer pruebas de refracción sísmica, Down-hole y Cross - hole; y maneja una frecuencia de 80 kHz. Se realizaron mediciones en los tres pilares, con un total de 36 mediciones.

El método que se utilizó para la medición de las ondas P, fue el de mediciones alrededor del pilar en sentido horizontal, para lo cual los geófonos fueron colocados en las cuatro caras del pilar a mitad de su altura.



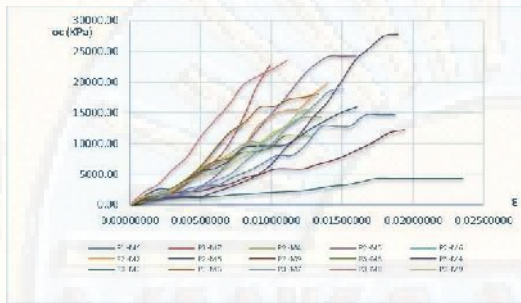
Ensayo de refracción sísmica en pilares de Roca Fosfórica.

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

Resistencia a la compresión uniaxial de roca fosfórica

Se realizaron ensayos a compresión simple, con probetas cilíndricas de volumen único y probetas cúbicas de volumen variable donde la carga axial se aplicó en sentido perpendicular a los planos de estratificación, de acuerdo a la metodología propuesta por Gonzatti (2007). Se fallaron 10 muestras

cúbicas y 15 muestras cilíndricas. La resistencia a la compresión uniaxial definitiva se obtuvo mediante el fallamiento de probetas cilíndricas de roca fosfórica, logrando un resultado de 18 MPa. Resistencia a compresión simple.



Compresión uniaxial en testigos cilíndricos de roca fosfórica.

Velocidad de propagación de onda P

Se realizaron mediciones de ondas de ultrasonido a través de especímenes de roca fosfórica cilíndricos y cúbicos (cilíndricos – dirección perpendicular al plano de estratificación y cúbicos – perpendicular y paralela a los planos de estratificación), siguiendo la metodología propuesta por Gonzatti (2007). Los resultados se presentan a continuación:

Velocidad de ondas P, muestras cúbicas

Velocidad de ondas P, muestras cilíndricas

Influencia de la tensión axial en ondas de ultrasonido

Cuando se realiza una excavación minera subterránea el estado de esfuerzos natural es modificado por efecto de la excavación, en el caso de pilares en sus paredes la roca está sometida a una condición de esfuerzo a compresión simple, pero en su interior la condición de esfuerzos es triaxial. Para el presente proyecto se limitó la investigación a la influencia de tensiones en condición de compresión uniaxial.

La variación de las velocidades de ondas P de ultrasonido, en dirección paralela a la estratificación, se puede observar que a medida que se aumenta la compresión



uniaxial en cada cubo de roca fosfórica las velocidades de ondas P de ultrasonido tienden a atenuarse y decrecer su velocidad

Variación de las ondas P de ultrasonido en dirección paralela a la estratificación.

La variación de las velocidades de ondas P de ultrasonido, en dirección perpendicular a la estratificación, la variación de la velocidad de onda P ultrasónica, se observa un comportamiento incremental, es decir que para esta condición la velocidad de onda P aumenta con el incremento de la magnitud del esfuerzo a compresión hasta cierto punto a partir del cual la variación permanece casi constante antes de que el espécimen alcanza la falla.

Variaciones de las ondas P de ultrasonido con respecto a su carga axial en dirección perpendicular a la estratificación.

Teniendo en cuenta estas condiciones se determinó diferentes valores de corrección debido al esfuerzo los cuales se presentan a continuación:

Valores para el factor de corrección por esfuerzo axial

Influencia del nivel de saturación frente a propagación de ondas de ultrasonido

Debido a que la humedad al interior de los pilares puede variar a lo largo del tiempo, el análisis de la influencia del agua es de vital importancia ya que la saturación puede provocar que las velocidades de onda P, sean mayores o menores según su grado de la misma (Clovis Gonzatti, 2007), esto puede ser explicado debido a que el agua es un conductor de pulsos vibratorios y las ondas de ultrasonido se inducen por pulsos que alteran por medio de vibraciones a la muestra en análisis. Para determinar el factor de corrección F2, se determinó una velocidad ponderada paralela a la estratificación por medio de la ecuación 6, tanto en un estado de humedad natural de las muestras, en un estado seco y un estado saturado.

$$V_{\text{pond. par}} = (V_{\text{ancho}} * V_{\text{profundidad}})^{0.5} \quad (6)$$

Donde

V pond. Par: Velocidad ponderada en dirección paralela a los planos de estratificación (m/s).

V ancho: Velocidad en sentido del ancho de la probeta cúbica (m/s).

V profundidad: Velocidad en sentido de la profundidad de la probeta cúbica (m/s).

Para determinar factores de corrección por humedad, es necesario determinar la variación de cada una de las velocidades ponderadas con base a los datos de velocidades de ondas P, en un medio seco. Para este fin se procedió a la utilización de la ecuación 7, la cual involucra la velocidad ponderada de cada una de las probetas cúbicas en su estado Semi saturado, saturado y seco.

$$\begin{aligned} &\text{Var. } V_{\text{pond. par}} \\ &= \left(\frac{V_{\text{pond. variable}} - V_{\text{pond. seca}}}{V_{\text{pond. seca}}} \right) \\ &* 100 \quad (7) \end{aligned}$$

Donde

Var. V pond. Par: Variación de la velocidad ponderada en dirección paralela a los planos de estratificación (%).

V pond: variable Velocidad Ponderada variable en dirección paralela a los planos de estratificación saturada o Semi saturada (m/s)

V pond. Seca: velocidad ponderada en condición seca en dirección paralela a los planos de estratificación (m/s).

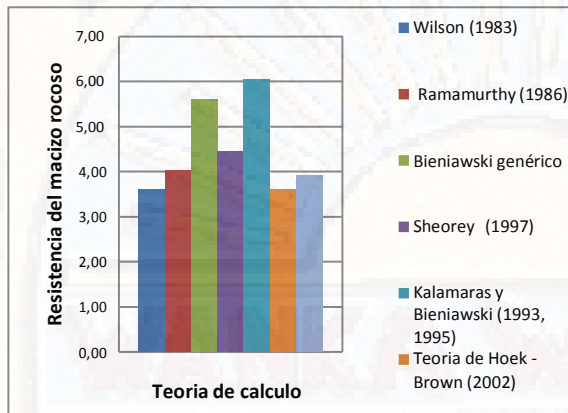
Debido a que la roca puede presentar diferentes estados de humedad dependiendo de las condiciones que presente la explotación por cámaras y pilares en la mina de roca fosfórica carolina, se presentan diferentes factores de corrección por humedad (ver 0).

Factor de corrección por humedad.

CONDICION DE HUMEDAD	FACTOR DE CORRECCIÓN POR CONDICIONES DE HUMEDAD (F2)
ROCA SECA O EN HUMEDAD NATURAL (No se observa agua en las paredes del pilar)	1
ROCA HUMEDA (Paredes del pilar mojadas)	0.97
ROCA SATURADA (Agua escurriendo en las paredes del pilar)	0.9

a. Velocidades de propagación de ondas p in situ por refracción sísmica

Se realizó la misma configuración de puntos de disparo y recepción de señal para los



pilares en estudio y siguiendo la metodología propuesta por el Gonzatti (2007) en su proyecto de doctorado, se obtuvieron diferentes resultados los cuales se resumen en la 0.

Velocidades de ondas P, obtenidas por refracción sísmica en pilares de roca fosfórica.

No. DE PILAR	VELOCIDAD DE ONDA P, PROMEDIO (m/s)
Pilar 1	1527.599
Pilar 2	1608.111
Pilar 3	2136.319
Promedio	1757.000

b. Análisis comparativo con otras teorías de resistencia de macizos rocosos

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de los parámetros de cálculo según la teoría propuesta por Clovis Gonzatti y la ecuación 1, aplicada al macizo rocoso de roca fosfórica, se obtuvo la siguiente resistencia del macizo rocoso:

Vsísmica	1757 m/s
V _{POUL}	2561 m/s
F1	0.83

F2	1
σ_{ci}	18 MPa
σ_m	3,92 MPa

A partir de los resultados obtenidos y con el fin de validar la aplicación de la teoría de Clovis Gonzatti en la estimación de la resistencia de macizos rocosos en roca fosfórica, se presentan en la 0, diferentes resultados obtenidos aplicando teorías de resistencia en macizos rocosos entre las cuales se tiene: Wilson (1983), Ramamurthy (1986), Kalamaras y Bieniawski (1993) y Sheorey et al. (1997), Kalamaras y Bieniawski (1993, 1995), Criterio generalizado de Hoek – Brown (2002).

Comparación de resultados de la teoría de Clovis Gonzatti (2007) aplicada a pilares en roca fosfórica y otras teorías.

ii. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en el proyecto se verifica el gran potencial de los métodos no destructivos utilizados, debido a que se pudieron establecer relaciones como: factor de corrección de la velocidad de ondas sísmicas debido al efecto de la tensión in situ igual a 0,83; factor de corrección de la velocidad de ondas sísmicas en función de las condiciones de humedad de la roca igual a 1, resistencia a la compresión uniaxial de la roca fosfórica igual a 18 MPa; resistencia del macizo rocoso igual a 3,92 MPa; entre otros.

El estudio de la velocidad de propagación de onda en diferentes direcciones durante un proceso de aplicación de carga a compresión, evidencia que la roca experimenta un cambio en sus propiedades, lo cual llama a desarrollar técnicas de caracterización de rocas y macizos rocosos, los cuales no solo se concentren en determinar propiedades de resistencia y deformabilidad si no que se enfoquen en comprender y representar el proceso de

deterioro de estos materiales durante la excavación de obras subterráneas.

Con los métodos no destructivos (ultrasonido y refracción sísmica), se brinda mayor soporte a los cálculos de resistencia de macizos rocosos con relación a los métodos empíricos que no siempre son aplicables a nuestro contexto, generando resultados confiables tanto en mantos de Carbón como de bancos de roca fosfórica, sin embargo, es importante continuar validando este tipo de propuestas adoptándolas a las condiciones geológicas de nuestro país.

iii. Referencias Bibliograficas

GONZATTI, Clovis (2007). "Propuesta para la determinación de resistencias a la compresión uniaxial insitu de cámaras en carbón utilizando métodos geofísicos", Sao Paulo Brasil: Universidad de Sao Paulo: 1 - 274.

GONZALES DE VALLEJO, Luis (2002). Ingeniería geológica. Editorial Prentice Hall. Madrid: 334 -744.

FOSFATOS BOYACA. Informe de amojonamiento contrato 696R roca fosfórica: 1 - 52.

HOEK, Evert Y BROWN (1995). Excavaciones subterráneas en roca. México: Editorial McGraw Hill.

HOEK, Evert, CARRANZA TORRES, C, CORKUM, B. Criterio de falla de Hoek – Bown. Edision (2002). In North American Rock Mechanics Symposium, 5th, Proceedings. Toronto, Canadá: 267 – 273 p.

JOJOA MUÑOZ, Jaime William (2010). Módulo 3 Excavaciones subterráneas múltiples, diseño geomecánico de explotaciones por cámaras y pilares. Sogamoso Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia: 1 - 95 p.

KALAMARAS, G. S. & BIENIAWSKI, Z. T. (1995). A rock mass concept for coal seams incorporating the effect of time. In.: International Congress on Rock Mechanics, 8th. Proceedings. Tokyo, Japão, v. 1: 295-302.

M. FERRER y L. GONZÁLEZ DE VALLEJO (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME, Madrid: 1 - 132.

MARINEZ MARTINEZ, Javier (2008). Tesis doctoral: Influencia de la alteración sobre las propiedades mecánicas de calizas, dolomías y mármoles. Evaluación mediante estimadores no destructivos (ultrasonidos). Universidad de Alicante: 100 - 295.

SALAMON, M. D. G.; GALVIN, J. M.; HOCKING, G.; ANDERSON, I. (1996). Coal pillar strength from back-calculation. The University of New South Wales, Department of Mining Engineering. October, Progress Report: 62.

TORRES SUAREZ, Mario Camilo (2005). Aplicación de métodos no destructivos para la determinación de propiedades mecánicas de macizos rocosos de origen sedimentario. Bogotá Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 1 - 320 p.