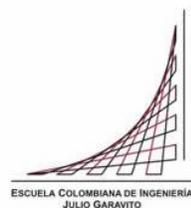


Maestría en Ingeniería Civil

**APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA
DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO**

Eldibrando Patiño Barrera

Bogotá, D.C., 03 de Noviembre de 2015



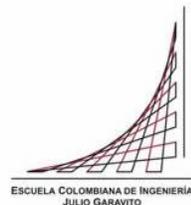
APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en geotecnia vial**

Jorge Enrique Puerto Garzón

Director

Bogotá, D.C., 03 de Noviembre de 2015



La tesis de maestría titulada “Aplicación de métodos no destructivos en la definición de propiedades del macizo rocoso”, presentada por Eldibrando Patiño Barrera, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Director de la tesis

Jorge Enrique Puerto Garzón

Jurado

Sandra Ximena Campagnoli Martínez

Jurado

Claudia Jeanneth Ríos Reyes

Bogotá D.C., 3 de Noviembre de 2015

Dedicatoria

A Hérica del Pilar Parra Triana mi querida esposa, por su apoyo incondicional y su constante ayuda para el logro de este nuevo objetivo

Agradecimientos

A mi director de tesis por su tiempo y aporte de conocimientos en el desarrollo del trabajo de investigación

A la ingeniera Nancy Torres Castellanos por su incondicional colaboración para el desarrollo del programa de laboratorio

Al personal técnico de los laboratorios de geotecnia y estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería por su inmensa colaboración durante la ejecución de los ensayos en roca

Al personal técnico de la empresa I.G.P. Ingeniería, Geología y Perforaciones Ltda. por su colaboración y dedicación durante la exploración de campo para sacar adelante el proyecto de investigación.

Resumen

Los avances en los proyectos de ingeniería asociados a medios rocosos requieren cada día procedimientos más modernos para determinar las propiedades mecánicas del subsuelo, debido a que los métodos que se han venido implementando han perdido vigencia debido a su agotamiento, demora, complejidad y un elevado costo para su ejecución. Los Métodos No Destructivos – MND, que utilizan las ondas elásticas, se han constituido en una herramienta importante para la investigación del subsuelo porque con su sencillez, rapidez y bajo costo, agilizan los trabajos, dando resultados satisfactorios en el desarrollo de la ingeniería. Con la aplicación de este método es posible obtener indirectamente las propiedades mecánicas del macizo rocoso, sin embargo, las relaciones que se emplean todavía están en proceso de comprobación, Como contribución en el proceso de investigación técnico-científica, en el presente trabajo se exponen algunos razonamientos y procedimientos que permiten darle a los métodos no destructivos una aplicación más práctica en el conocimiento del macizo rocoso.

En la mecánica de rocas, los parámetros mecánicos más representativos del medio rocoso son la resistencia a la compresión simple y el módulo de deformación. Los MND, mediante la utilización de ondas elásticas que se desplazan en el macizo rocoso, generaron un campo de investigación muy amplio, el cual cada vez se fertiliza más con los resultados que se van produciendo y que son aplicados a la ingeniería de rocas.

En el marco de la investigación adelantada, los trabajos de campo consistieron en la ejecución de tres perforaciones en medios rocosos conformados por calizas, areniscas y arcillolitas, respectivamente, obteniendo el muestreo de rocas para desarrollar el programa de laboratorio y adicionalmente, se realizaron pruebas Down Hole sobre las perforaciones midiendo la velocidad de ondas elásticas en los macizos rocosos explorados.

En el laboratorio se ejecutaron pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión Uniaxial midiendo la deformación axial sobre 90 especímenes de roca. Analizando los resultados de las pruebas de laboratorio y los trabajos de campo, se logró obtener los índices de integridad del módulo de deformación K_E , módulo de la resistencia a la compresión simple K_R y el módulo de velocidad de ondas longitudinales K_V propuestos por Savich. Posteriormente con la aplicación de expresiones matemáticas comprobadas experimentalmente se obtuvo el módulo de deformación " $E^{(m)}$ " y resistencia a la compresión uniaxial " $\sigma_c^{(m)}$ " para los macizos rocosos investigados.

Índice general

1.	Objetivos	16
1.1.	Objetivo General	16
1.2.	Objetivos Específicos	16
2.	Aspectos Básicos.....	18
2.1.	Propiedades Deformativas de la Roca	18
2.2.	Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico	20
2.3.	Prueba de Compresión Uniaxial	20
2.4.	Prueba de Downhole	21
3.	Trabajos de Campo.....	23
3.1.	Reconocimientos de Campo	23
3.2.	Perforaciones Mecanizadas	23
3.2.1.	Perforación en Rocas Calizas.....	25
3.2.2.	Perforación en Rocas Areniscas.....	26
3.2.3.	Perforación en Rocas Arcillolitas	27
3.3.	Toma de Muestreo	28
3.4.	Ejecución de Pruebas Hownhole	29
4.	Trabajos de Laboratorio	35
4.1.	Preparación de las Muestras	35
4.2.	Pruebas de Velocidad de Pulso Ultrasónico	40
4.3.	Ensayos destructivos	43
4.3.1.	Refrentado de Caras	44
4.3.2.	Instalación de Straing Gage.....	45
4.3.3.	Prueba de resistencia a la compresión simple	46
5.	Análisis de Ingeniería	48
5.1.	Evolución del Tema	48
5.2.	Análisis	66
5.2.1.	Diaclasamiento y velocidad de las ondas	66
5.2.2.	Determinación tradicional del módulo de deformación del macizo rocoso ..	69
5.2.3.	Módulo de deformación del macizo rocoso y velocidad de las ondas	72

5.2.4.	Compresión uniaxial del macizo rocoso y velocidad de las ondas	77
6.	Procedimiento para Aplicar el Método	84
6.1.	Etapa de campo	84
6.2.	Etapa de laboratorio	85
6.3.	Etapa de oficina	85
7.	Conclusiones.....	86
8.	Bibliografía	89
9.	ANEXOS	92

Índice de Tablas

Tabla 1. Velocidad de ondas compresionales y de corte obtenidas en la prueba Downhole para un medio rocoso de calizas de la Formación Belencito Coordenadas Norte = 1119536, Este = 1135638,.....	32
Tabla 2. Velocidad de ondas compresionales y de corte obtenidas en la prueba Downhole para un medio rocoso de areniscas de la Formación Arenisca Tierna Coordenadas Norte = 1016846, Este = 1006437.	33
Tabla 3. Velocidad de ondas compresionales y de corte obtenidas en la prueba Downhole para un medio rocoso de arcillolitas de la Formación Caja Coordenadas Norte= 1068989, Este = 1176102.....	34
Tabla 4. Datos de diámetro, longitud y peso de las muestras de caliza ensayadas en laboratorio,.....	36
Tabla 5. Datos de diámetro, longitud y peso de las muestras de areniscas ensayadas en laboratorio.....	38
Tabla 6. Datos de diámetro, longitud y peso de las muestras de arcillolitas ensayadas en laboratorio.....	39
Tabla 7. Coeficientes obtenidos a partir de la relación de ondas compresionales v_p y ondas de corte v_s en los macizos rocosos.	43
Tabla 8. Relaciones de los índices de integridad (Savich, 1990).....	62
Tabla 9. Clasificación del macizo rocoso por su índice de velocidad obtenida en Las Tres Gargantas (Dong, 1993).....	64
Tabla 10. Relaciones del "Kv" con características del macizo rocoso McDowell (1993)....	65
Tabla 11. Valores del módulo de deformación del macizo rocoso obtenidos a partir de la relación de los índices de integridad de Savich K_i y K_e para diferentes tipo de roca.	76
Tabla 12. Coeficientes de debilitamiento del macizo rocoso. Fuente Hoek, 2008	79
Tabla 13. Valores de la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso obtenidos a partir de la relación de los índices de integridad de Savich K_i y K_r para diferentes tipo de roca.....	82

Índice de Figuras

Figura 1. Localización de las perforaciones ejecutadas para la extracción de muestras de roca caliza, areniscas y arcillolitas respectivamente. Fuente, Servicio geológico colombiano 2009. Fuente: Servicio Geológico Colombiano.....	24
Figura 2. Extracción de muestreo de rocas calizas en la Formación Belencito Norte = 1119536, Este = 1135638. Fuente: Propia	25
Figura 3 Extracción de muestreo de rocas areniscas sobre la Formación Arenisca Tierna coordenadas Norte = 1016846. Fuente Propia	26
Figura 4. Extracción de muestreo de rocas arcillolitas sobre la Formación Caja, nótese el testigo de roca sana obtenido coordenadas Norte= 1068989, Este = 1176102. Fuente propia.....	27
Figura 5. Almacenamiento de testigos de roca en cajas metálicas con capacidad para 5.0 ml. Fuente propia.....	28
Figura 6. Captura de información durante la ejecución de Pruebas Downhole en las perforaciones ejecutadas previamente entubadas con tubería PVC. Fuente: Propia.....	30
Figura 7. Esquema para el montaje de equipos durante la adquisición de información en las pruebas Downhole. Fuente: Subsuelos 3d	30
Figura 8. Equipo de registro usado para la adquisición de información primaria en las pruebas Downhole Fuente: Subsuelos 3d.....	31
Figura 9. Preparación de muestras de roca para pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión simple. Fuente: Propia	40
Figura 10 Ejecución de pruebas de velocidad de pulso ultrasónico para muestras de calizas, areniscas y arcillolitas. Fuente: Propia	41
Figura 11 Equipo para la medición de la velocidad del pulso ultrasónico E48. Fuente: Escuela colombiana de ingeniería Fuente: Propia.....	42
Figura 12 Refrentado de caras usando azufre en estado de líquido para cada muestra de roca ensayada. Fuente: Propia	44
Figura 13 Instalación de Strain gage para medición de deformación axial durante la prueba de resistencia a la compresión simple. Fuente: Propia	45
Figura 14 Equipo universal UH-1000kNX empleado para las pruebas de compresión simple. Fuente: Propia.....	47
Figura 15 Ejecución de la prueba de compresión Uniaxial en la maquina universal con medición de deformación axial. Fuente: Propia.....	47
Figura 16 Gráficos promediados de la relación módulo de deformación (E) y módulo de elasticidad dinámico (Ed) en pruebas de laboratorio. 1 – Rocas carbonosas; 2 – Rocas volcánicas; 3 – Rocas metamórficas. Fuente: (Savich, 1969).	50

Figura 17 Relación entre el módulo de deformación E y el módulo de elasticidad dinámico Ed para rocas calizas, areniscas y arcillolitas a partir de ensayos de velocidad de pulso ultrasónico en el laboratorio. Fuente: Propia	51
Figura 18 Relación entre velocidad de las ondas longitudinales y la resistencia a la compresión simple (Prochujan, 1971).....	52
Figura 19 Relación entre módulo de deformación y velocidad de las ondas. Fuente: (Prochujan, 1971).	53
Figura 20. Relación entre el módulo de deformación E y velocidad de ondas Vp obtenidos en el laboratorio para tres tipos de rocas. Fuente: Propia	54
Figura 21. Relación entre el módulo de deformación E y velocidad de ondas Vp obtenidos en el laboratorio para el macizo rocoso conformado por calizas, Fuente: Propia	55
Figura 22. Relación entre el módulo de deformación E y velocidad de ondas Vp obtenidos en el laboratorio para el macizo rocoso conformado por areniscas, Fuente: Propia	55
Figura 23. Relación entre el módulo de deformación E y velocidad de ondas Vp obtenidos en el laboratorio para el macizo rocoso conformado por arcillolitas, Fuente: Propia	56
Figura 24. Relaciones velocidad – resistencia a la compresión simple (Nikitin, 1981)	57
Figura 25. Variaciones velocidad – resistencia a la compresión simple en rocas cristalinas (Gupta, 1998).	58
Figura 26. Relación entre la velocidad de ondas compresionales Vp y la resistencia a la compresión Uniaxial σ_c para rocas calizas de la Formación Belencito obtenidas en laboratorio, Fuente: Propia.....	58
Figura 27. Relación entre la velocidad de ondas compresionales Vp y la resistencia a la compresión Uniaxial σ_c para rocas areniscas de la Formación Arenisca Tierna obtenidas en laboratorio. Fuente: Propia	59
Figura 28. Relación entre la velocidad de ondas compresionales Vp y la resistencia a la compresión Uniaxial σ_c para rocas arcillolitas de la Formación Caja obtenidas en laboratorio, Fuente: Propia.....	59
Figura 29. Proyecto Las Tres Gargantas, relación velocidad de ondas - módulo de deformación (Xuecheng, 1993).....	63
Figura 30. Proyecto Las Tres Gargantas, relación velocidad de ondas - resistencia a la compresión simple (Xuecheng, 1993).....	64
Figura 31. Relaciones de velocidad longitudinal de las ondas con el fracturamiento del macizo Fuente: Barton, 2007.	67
Figura 32. Relaciones de velocidad longitudinal de las ondas con el RQD del macizo conformado por rocas calizas de la Formación Belencito, Fuente: Propia	68
Figura 33. Relaciones de velocidad longitudinal de las ondas con el RQD del macizo conformado por rocas areniscas de la Formación Arenisca Tierna. Fuente: Propia.....	68
Figura 34. Relaciones de velocidad longitudinal de las ondas con el RQD del macizo conformado por rocas arcillolitas arenosas de la Formación Caja. Fuente: Propia	69
Figura 35. Relación del módulo de deformación del macizo rocoso con clasificaciones geotécnicas, Fuente: Hoek, 2008	70

Figura 36. Relación del módulo de deformación del macizo rocoso con la clasificación GSI. Fuente: Hoek, 2008.....	71
Figura 37. Relaciones entre RQD y E_m/E_r , en donde E_m es el módulo de deformación del macizo rocoso y E_r el de la muestra intacta, Fuente: Zhang, 2007.	72
Figura 38. Relación entre el índice de integridad de velocidad de ondas K_i e índice de integridad de deformación K_e para rocas calizas de la Formación Belencito. Fuente: Propia	74
Figura 39. Relación entre el índice de integridad de velocidad de ondas K_i e índice de integridad de deformación K_e para rocas areniscas de la Formación Arenisca Tierna. Fuente: Propia.....	74
Figura 40. Relación entre el índice de integridad de velocidad de ondas K_i e índice de integridad de deformación K_e para rocas arcillolitas arenosas de la Formación Caja. Fuente: Propia.....	75
Figura 41. Relación entre el índice de integridad de velocidad de ondas K_i e índice de integridad de la resistencia a la compresión simple K_r para rocas calizas de la Formación Belencito. Fuente: Propia.....	80
Figura 42. Relación entre el índice de integridad de velocidad de ondas K_i e índice de integridad de la resistencia a la compresión simple K_r para rocas areniscas de la Formación Arenisca Tierna. Fuente: Propia	81
Figura 43. Relación entre el índice de integridad de velocidad de ondas K_i e índice de integridad de la resistencia a la compresión simple K_r para rocas arcillolitas arenosas de la Formación Caja. Fuente propia.....	81

Índice de anexos

Anexo A. Registros de perforación y columnas litoestratigráficas.....	92
Anexo B. Formatos de adquisición de información primaria durante la ejecución de las pruebas de velocidad de pulso ultrasonido en el laboratorio	95
Anexo C. Formatos resultados obtenidos de las pruebas de compresión simple ejecutadas en el laboratorio	98
Anexo D. Formatos: Cálculos de los índices de integridad Savich	128

Introducción

El acelerado ritmo del desarrollo de proyectos de ingeniería en el mundo crea la necesidad ocupar macizos rocosos especialmente en la proyección de túneles, vías y proyectos mineros. Es por esta razón que se crea la necesidad de estudiar y determinar las propiedades mecánicas de los materiales frente a la implantación de cargas estáticas y dinámicas. Además de los parámetros de corte, las propiedades mecánicas más representativas del medio rocoso son la resistencia a la compresión simple y el módulo de deformación. La predicción de estas dos propiedades en el macizo rocoso es uno de los problemas abordados con más intensidad por los investigadores, quienes a lo largo de muchos años han hallado procedimientos que de una u otra forma son utilizados por los diseñadores para caracterizar geomecánicamente el medio en donde se proyecta una obra. Estos procedimientos pueden agruparse en tres tipos: a) Los que implican ensayos "in-situ" para obtener directamente la propiedad buscada; b) los que combinan ensayos tradicionales de laboratorio aplicando coeficientes para hallar la magnitud en el macizo rocoso; c) los que utilizan medios no destructivos para estimar indirectamente valores aplicables al macizo rocoso.

Los primeros son los más confiables porque proporcionan información directa del sitio en donde se realiza el ensayo, pero no están exentos de desventajas, generadas porque los equipos tienen todavía deficiencias, los procedimientos dejan dudas, el dato obtenido es muy puntual, son demasiado costosos y pueden tardar mucho tiempo. Estos métodos son aplicables al módulo de deformación pero no a la resistencia a la compresión, porque es prácticamente inviable implementar ensayos "in-situ" para hallar esta propiedad en el macizo rocoso.

Los ensayos tradicionales de laboratorio no han dado respuesta efectiva al conocimiento de propiedades del macizo rocoso porque es bien conocido que el espécimen ensayado difiere mucho del medio de donde se extrajo y la aplicación de coeficientes tiene un alto nivel de incertidumbre, entre otras razones, debido al efecto escala. La aplicación de los MND en el conocimiento de propiedades del macizo rocoso ha abierto una puerta muy promisoriosa en el muro que levanta el tradicionalismo, porque este ya agotó sus posibilidades sin que lograra resolver problemas muy significativos para el avance de la

Mecánica de Rocas. Los MND, mediante la utilización de ondas elásticas que se desplazan en el macizo rocoso, generaron un campo de investigación muy amplio, el cual cada vez se fertiliza más con los resultados que se van produciendo.

De acuerdo con lo anterior, el presente estudio de investigación, se orienta a evaluar los parámetros de resistencia a la compresión Uniaxial y módulo de deformación para macizos rocosos constituido por calizas, areniscas y arcillolitas a partir de pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y de ensayos de compresión Uniaxial con medición de la deformación axial en laboratorio sobre especímenes de roca obtenidos mediante perforaciones. La información obtenida del análisis de laboratorio es correlacionada con las velocidades de ondas compresionales (V_p) y de corte (V_s) obtenidas a partir de ensayos Down Hole ejecutados en cada una de las perforaciones donde se extrajo el muestreo. Usando los índices de integridad de Savich formulados en el presente estudio y aplicando los MND es posible determinar los parámetros mecánicos de resistencia a la compresión Uniaxial y el módulo de deformación para cualquier macizo rocoso en el sitio que sea requerido para un proyecto de ingeniería.

1. Objetivos

La finalidad del presente proyecto de investigación se enfoca en determinar las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión Uniaxial y módulo de deformación de tres macizos rocosos conformados por rocas calizas de la Formación Belencito, rocas areniscas de la formación Arenisca Tierna y rocas arcillolitas de la Formación Caja, aflorantes en la Cordillera Oriental colombiana. Del mismo modo establecer correlaciones entre la velocidad de ondas compresionales e índice de calidad de la roca RQD enfocados a conseguir una forma rápida y segura para la clasificación del macizo rocoso dejando de lado la subjetividad. A continuación se describe el objetivo principal y los objetivos específicos que abarca el presente estudio de investigación.

1.1. Objetivo General

Determinar la resistencia a la compresión simple y el módulo de deformación para tres macizos rocosos conformados por calizas, areniscas y arcillolitas respectivamente haciendo uso de MND en Mecánica de Rocas, empleando los índices de integridad de Savich.

1.2. Objetivos Específicos

- Ejecutar un muestreo de especímenes de roca en tres formaciones rocosas que involucren materiales de calizas, areniscas y arcillolitas, seleccionando los núcleos con las dimensiones estandarizadas para ensayos de compresión uniaxial.
- Ensayar las muestras seleccionadas sometiénolas al ensayo de velocidad de pulso ultrasonido y posteriormente a compresión uniaxial con medición de deformaciones axiales.
- Elaborar la curva esfuerzo-deformación para cada muestra ensayada, tomando los resultados de resistencia a la compresión en el punto de rotura y el módulo de deformación en la tangente de la curva al 50% de la resistencia a la compresión.

- Correlacionar las velocidades de onda compresionales obtenidas en las pruebas Down Hole con el índice de calidad de la roca RQD con el fin de poder obtener una clasificación del macizo rocoso con métodos experimentales.
- Obtener el índice de integridad de velocidad " K_i ", y hallar el módulo de deformación " $E^{(m)}$ " y resistencia a la compresión Uniaxial " $\sigma_c^{(m)}$ " del macizo rocoso usando los índices de integridad de Savich.
- Divulgar el resultado del proyecto de investigación en medios relacionados con la ingeniería geotécnica como revistas, simposios, eventos y universidades

2. Aspectos Básicos

La resistencia a la compresión simple de la roca intacta se halla en especímenes cilíndricos de 50 mm de diámetro en promedio. En el macizo rocoso se hicieron hace un tiempo ensayos para conocer la resistencia a la compresión simple, pero los equipos y procedimientos eran muy complicados con resultados muy puntuales y dudosos, razón por la cual estos ensayos cayeron en desuso. Por tal circunstancia, esta propiedad del macizo rocoso ha sido estimada con aproximaciones empíricas no comprobadas. La Mecánica de Rocas, no ha resuelto este problema satisfactoriamente y dista mucho de resolverse con los métodos tradicionales. Las propiedades deformativas de los materiales rocosos se expresan de diferentes formas, las cuales es conveniente definir:

2.1. Propiedades Deformativas de la Roca

Módulo de elasticidad estático – E_0 : Se obtiene mediante ensayo estático en laboratorio o en el macizo rocoso, considerando exclusivamente las deformaciones elásticas del material. Este parámetro se halla mediante ensayo de carga-descarga, calculando la pendiente de los segmentos de descarga-recarga.

Módulo de elasticidad dinámico – E_d : Se obtiene mediante ensayo dinámico con ensayos de velocidad de pulso ultrasónico, pruebas de refracción y/o reflexión sísmica y pruebas Down Hole, aplicando la teoría de ondas. Se difiere del módulo de elasticidad estático porque en este caso, las cargas son dinámicas, caracterizadas por ser cíclicas, muy débiles y breves.

Módulo de deformación – E : Se obtiene mediante ensayo estático en laboratorio o en el macizo rocoso, considerando globalmente deformaciones elásticas y plásticas. Es propio de un medio elasto-plástico.

Módulo de deformación de laboratorio – $E^{(l)}$: Corresponde con el módulo obtenido en el laboratorio sobre muestras de 50 mm de diámetro aproximadamente correspondiendo con el diámetro NQ en el proceso de perforación. Se halla como pendiente de la tangente en

la curva esfuerzo-deformación, correspondiente al punto del 50% de la resistencia a la compresión.

Módulo de deformación del macizo rocoso – $E^{(m)}$: Es el obtenido estáticamente para el macizo rocoso, ya sea en forma directa con ensayos o deducido de otras pruebas. Incluye deformaciones elásticas y plásticas.

En la literatura técnica existen relaciones entre los diferentes módulos, las cuales tienen en general diferencias, algunas de ellas sustanciales.

Teniendo en cuenta que las obras de ingeniería se construyen en el macizo rocoso, en forma práctica, merecen investigarse con más detalle las propiedades de este medio, que son las más difíciles de obtener y los procedimientos utilizados adolecen de altos grados de incertidumbre. El macizo rocoso en esencia es elasto-plástico sin importar que los elementos rocosos que lo conforman puedan ser elásticos. Es decir, en este medio natural se manifiestan deformaciones elásticas y plásticas a la vez.

Las diferencias de magnitud entre módulos se pueden generalizar con la ecuación:

$$E^{(m)} < E^{(l)} \leq E_0 < E_d \quad (1)$$

De acuerdo con la física ondulatoria, las expresiones básicas que relacionan las ondas longitudinales (v_p) y transversales (v_s) con propiedades deformativas de un medio sólido idealmente elástico son¹:

$$\mu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (2)$$

$$E_d = \frac{v_p^2 \gamma (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{g(1 - \mu)} \quad (3)$$

En donde

E_d – Módulo de elasticidad dinámico, MPa

¹ Nikitin V.N. – Fundamentos de Ingeniería Sísmica. Edit. MGU. Moscú, 1981. – 176 pags. (en ruso)

γ – Peso unitario del medio, MN/m³

μ – Coeficiente de Poisson

g – Aceleración de la gravedad, m/s.

2.2. Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico es determinar el tiempo de penetración de una onda determinada (ondas “P” y ondas “S”), al realizar el recorrido a través de una muestra de roca; por medio del tiempo y la distancia recorrida por la onda, se puede determinar la velocidad de penetración o propagación de la onda. Esta prueba es frecuentemente empleada para determinar las propiedades del concreto, sin embargo, aún es poco usada para obtener las propiedades físico-mecánicas de materiales rocosos a pesar de que el método se ha convertido en una herramienta fundamental para la búsqueda de estos parámetros.

2.3. Prueba de Compresión Uniaxial

La prueba de compresión uniaxial también se conoce con el nombre de compresión simple (en rocas) y compresión inconfiada (en suelos), corresponde con un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material y la deformación al ser sometido a un esfuerzo de compresión. Generalmente se usa para para determinar la resistencia en cilindros de hormigón pero puede ser usado para cualquier tipo de materiales.

La prueba se ejecuta sobre muestras cilíndricas previamente preparadas y normalizada sometiéndolas a compresión en una maquina universal siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- Se toman las medidas iniciales de la muestra a ensayar, largo, diámetro y peso.
- Se lleva a cabo el refrentado de caras usando Azufre en estado líquido.

- Se toman nuevamente las dimensiones de la muestra.
- Se instala el Strain gage para la medición de deformación.
- posteriormente, la probeta se instala en la parte central de la máquina universal y se da inicio al ensayo.
- Aplicar cargas axiales controladas y medir la deformación hasta llegar a la falla
- Elaborar la curva esfuerzo-deformación para cada muestra ensayada. En esa curva tomar los resultados de resistencia a la compresión y módulo de deformación. Éste último hallarlo tangencial a la curva en el 50% de la resistencia a la compresión

2.4. Prueba de Downhole

Las pruebas Downhole son utilizadas en la ingeniería de rocas y en general en la geotecnia con el propósito de obtener información de velocidades de ondas para complementar la interpretación estructural y estratigráfica de la sísmica de superficie. El método consiste en instalar un receptor triaxial a una profundidad conocida dentro de una perforación y se generan trenes de onda en superficie mediante un golpe con un martillo sobre una pequeña superficie de acero, las cuales son percibidas por cada una de las componentes del geófono. El Receptor se va moviendo a lo largo de la perforación previamente entubada, captando información en el mismo sobre las velocidades de onda del macizo rocoso con intervalos de un metro generalmente o más detallada según los requerimientos del proyecto. La velocidad para cada uno de los niveles muestreados, se obtiene mediante la ecuación de Dix presentada a continuación:

$$V_{int} = \sqrt{\frac{vb^2tb - va^2ta}{tb - ta}} \quad (4)$$

En dónde:

Vb: Velocidad de un rayo recto que viaja desde el punto donde está la fuente hasta el nivel de muestreo

tb: Tiempo que tarda la onda en llegar a ese nivel

Va: Velocidad de un rayo recto que viaja desde el punto donde está la fuente hasta el nivel anterior que se está muestreando

ta: Tiempo que tarda la onda en llegar al nivel anterior al muestreado (Flores, 2006)

3. Trabajos de Campo

El desarrollo del proyecto inicia con la recopilación y análisis de información secundaria. Seguidamente se estructuró y se ejecutó un programa de exploración del campo encaminado a la selección de muestras de roca para los análisis de laboratorio. Los especímenes de los materiales se obtuvieron mediante la ejecución de perforaciones mecanizadas sobre rocas calizas de la Formación Belencito en la mina San Antonio propiedad de la empresa Argos S.A., vereda San Antonio jurisdicción del municipio de Duitama Boyacá, areniscas de la Formación Arenisca Tierna del Grupo Guadalupe la perforación se ejecutó hacia el costado oriental del carrera 7ª a la altura de la calle 171B en la Ciudad de Bogotá D.C., un tercer grupo de muestras se obtuvo de la perforación realizada sobre rocas arcillolitas arenosas pertenecientes a la Formación Caja superior sobre la margen izquierda de la quebrada Iguamena, Vereda Iguamena Jurisdicción del municipio de aguazul Casanare.

En cada sitio donde se ejecutaron las perforaciones mecanizadas se programó una prueba de Downhole posterior a la entubación de cada pozo registrando información sísmica cada un metro hasta alcanzar la profundidad de exploración de los macizos rocosos. A continuación se hace la descripción detallada de las actividades de campo realizadas para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

3.1. Reconocimientos de Campo

Esta actividad consistió en visitas de campo a los sitios donde se adelantó la exploración del subsuelo por medio de perforaciones mecanizadas y pruebas Downhole. Durante los recorridos se observó el entorno geológico de cada sitio, condiciones de accesibilidad para equipos de perforación y seguridad entre otros.

3.2. Perforaciones Mecanizadas

La exploración del subsuelo mediante perforaciones mecánicas utilizando el método de rotación fue desarrollada por la compañía I.G.P. Ingeniería, Geología y perforaciones Ltda, coordinadas por el proponente del proyecto de investigación. Las perforaciones se

ejecutaron con diámetro Nq3 empleando toma-muestras de triple pared para mayor recuperación. La exploración directa en los macizos rocosos se llevó a cabo a profundidades entre 17 y 19 metros de acuerdo con los registros de perforación presentados en el anexo 1 midiendo además el índice de calidad de la roca RQD. En la figura 1 se muestra la localización de las perforaciones dentro del entorno geológico nacional.

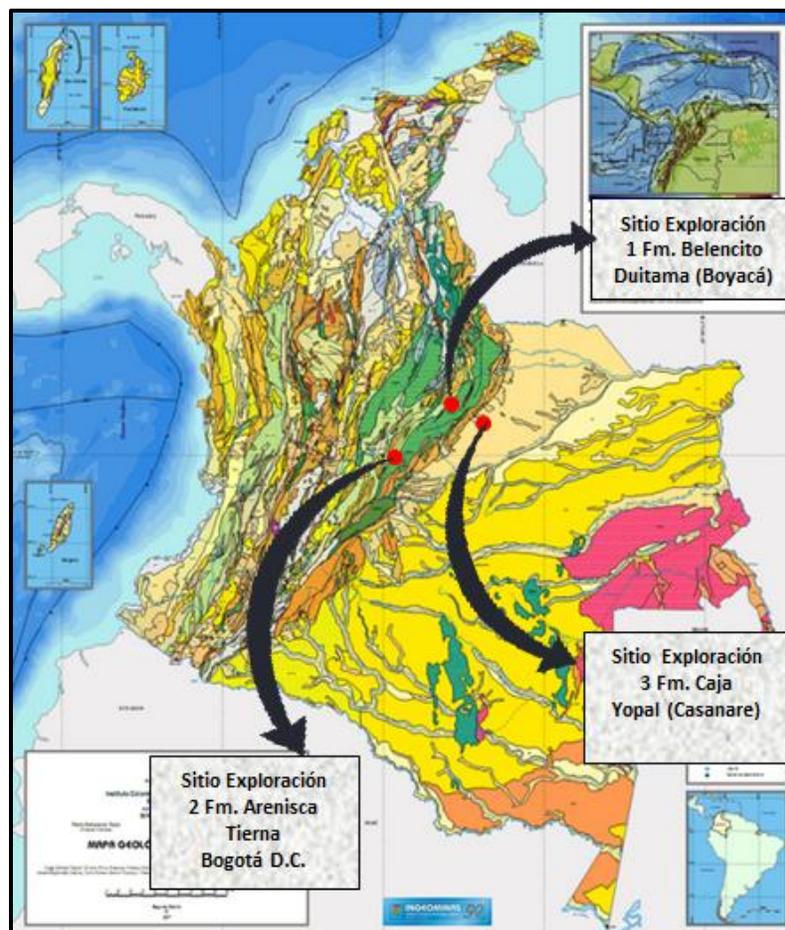


Figura 1. Localización de las perforaciones ejecutadas para la extracción de muestras de roca caliza, areniscas y arcillolitas respectivamente. Fuente, Servicio geológico colombiano 2009. Fuente: Servicio Geológico Colombiano.

3.2.1. Perforación en Rocas Calizas

Para la obtención de muestras de roca calizas, se ejecutó una perforación mecanizada sobre rocas de la Formación Belencito conformada por potentes bancos de calizas de color gris, fosilíferas, con algunas intercalaciones de arcillolitas y areniscas calcáreas de grano fino. La exploración del macizo rocoso se llevó a cabo en la Mina San Antonio Propiedad de la empresa Argos S.A. Vereda San Antonio jurisdicción del municipio de Duitama, la profundidad alcanzada fue de 17 metros de acuerdo con los registros de perforación presentados en el anexo 1. En la figura 2 se muestra el sitio y equipo empleado para la extracción de las muestras de roca caliza.



Figura 2. Extracción de muestreo de rocas calizas en la Formación Belencito Norte = 1119536, Este = 1135638. Fuente: Propia

3.2.2. Perforación en Rocas Areniscas

Desenado conocer las propiedades mecánicas de las rocas areniscas, se adelantó una perforación mecanizada con extracción de muestreo continuo, diámetro Nq3 sobre un afloramiento de la Formación Arenisca Tierna del Grupo Guadalupe localizado sobre el costado oriental de la carrera 7ª a la altura de la calle 171B. La formación rocosa consta predominantemente de areniscas de grano grueso a muy grueso en potentes bancos, separados por finos paquetes oscuros de lodolitas, limolitas y arcillolitas interestratificadas, la profundidad de exploración fue de 17 metros logrando obtener testigos de roca de buena calidad de acuerdo con el índice de calidad de la roca medido en campo. La figura 3 indica el sitio y el equipo de perforación usado para la extracción del muestreo en areniscas.



Figura 3 Extracción de muestreo de rocas areniscas sobre la Formación Arenisca Tierna coordenadas Norte = 1016846. Fuente Propia

3.2.3. Perforación en Rocas Arcillolitas

Los testigos de roca arcillolita se obtuvieron a partir de una perforación mecanizada con diámetro Nq3 ejecutada sobre el Nivel Inferior de la Formación Caja conformado principalmente por arcillolitas abigarradas con tonalidades que van desde el amarillo hasta el rosado y areniscas de colores amarillos claros a rojizos de grano fino a medio, deleznales, con delgadas intercalaciones de areniscas de colores claros de grano medio a conglomerático. La exploración del subsuelo se ubicó sobre la margen derecha de la quebrada Iguamena, vereda Iguamena jurisdicción del municipio de Aguazul en el departamento de Casanare a una profundidad de 20 metros donde se logró obtener especímenes de roca fresca de buena calidad tal como se evidencia en la figura 4.



Figura 4. Extracción de muestreo de rocas arcillolitas sobre la Formación Caja, nótese el testigo de roca sana obtenido coordenadas Norte= 1068989, Este = 1176102. Fuente propia.

3.3. Toma de Muestreo

El muestreo en rocas se obtuvo mediante el método de rotación usando un barrena de triple pared y brocas con impregnación de diamante y descarga frontal, diámetro de perforación Nq3 equivalente a 47.6 mm. El muestreo obtenido fue almacenado en cajas metálicas con capacidad de 5.0 ml (Figura 5), haciendo la respectiva descripción de la litología, medición de la muestra y la longitud recuperada, con esta información se calcula el índice RQD (designación de calidad de la roca) para el macizo rocoso explorado y a criterio del ingeniero geólogo se seleccionan los testigos para los análisis de laboratorio. En total se seleccionaron 100 testigos de roca entre calizas, areniscas y arcillolitas obtenidos a diferentes profundidades durante la etapa de campo, posteriormente, en el laboratorio se alistaron y se prepararon 90 muestras para la ejecución de las pruebas a criterio del proponente del presente trabajo de investigación.



Figura 5. Almacenamiento de testigos de roca en cajas metálicas con capacidad para 5.0 ml. Fuente propia.

3.4. Ejecución de Pruebas Hownhole

Las pruebas Downhle se llevaron a cabo en los sitios donde se ejecutaron las perforaciones (figura 6), la metodología para la adquisición de la información se describe a continuación:

- Entubación de la perforación con tubería PVC diámetro de 2”.
- Relleno con mortero fluido ocupando el espacio dejado entre las paredes de la perforación y la tubería instalada.
- Instalación del geófono dentro de la perforación con su respectiva conexión al sismógrafo.
- Instalación de placa metálica con una dimensión de 0.20 * 0.02 m a una distancia de 1.5 metros de cada perforación.
- Producción de impactos sobre la plancha metálica usando un martillo de 9 kg (cinco impactos por cada metro explorado).
- Toma de información primaria con intervalos de muestreo de 0.25 mseg y longitud de registro de 0.5 seg.
- Verificación de la calidad de información antes de pasar al siguiente segmento de investigación (cada metro)



Figura 6. Captura de información durante la ejecución de Pruebas Downhole en las perforaciones ejecutadas previamente entubadas con tubería PVC. Fuente: Propia

En la figura 7 se muestra el esquema usada para el montaje de equipos y adquisición de información en las pruebas Downhole.

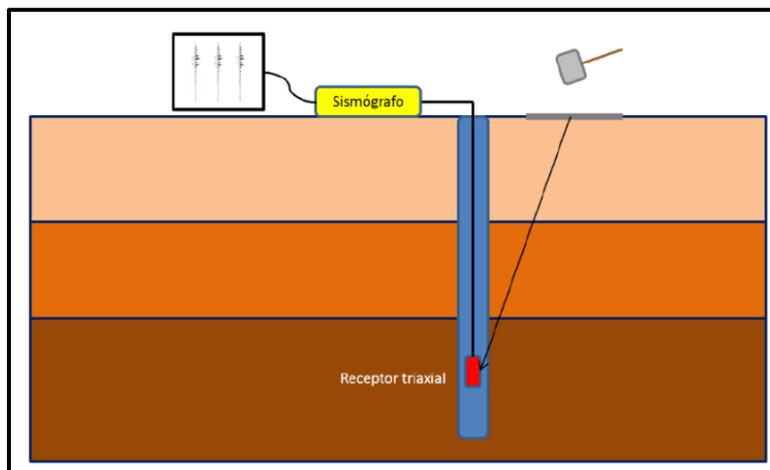


Figura 7. Esquema para el montaje de equipos durante la adquisición de información en las pruebas Downhole. Fuente: **Subsuelos 3d**

Para la adquisición de la información se empleó el equipo de registro compuesto principalmente por sensores y fuente sísmica mostrado en la figura 8.

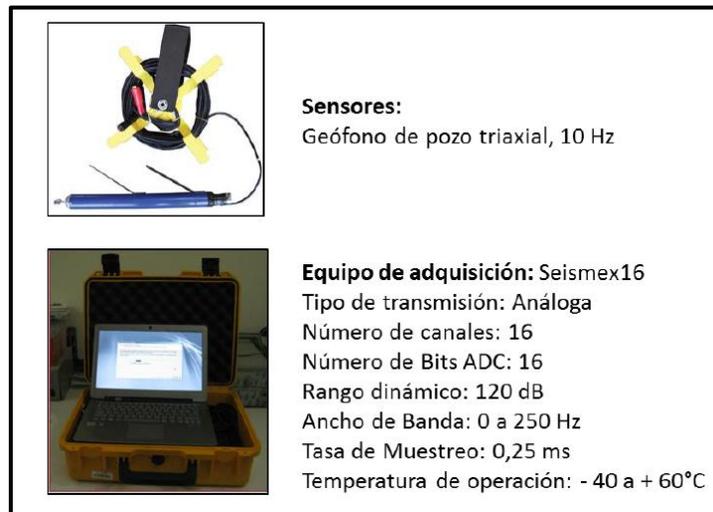


Figura 8. Equipo de registro usado para la adquisición de información primaria en las pruebas Downhole Fuente: Subsuelos 3d

Finalizados los trabajos de campo se dio inicio a la interpretación de la información levantada, para este fin y teniendo en cuenta los disparos se seleccionaron las primeras llegadas o registros en el sismógrafo correspondientes con las ondas compresionales V_p y las ondas de corte V_s para cada uno de los canales (componentes del geófono). En las tablas 1 al 3 se presentan los valores de velocidad de ondas para los tres materiales explorados.

Tabla 1. Velocidad de ondas compresionales y de corte obtenidas en la prueba Downhole para un medio rocoso de calizas de la Formación Belencito Coordenadas Norte = 1119536, Este = 1135638,

profundidad		Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	Relación de Poisson
Desde	Hasta			
0	1	1490,7	1315,3	-1,26
1	2	890,9	388,4	0,38
2	3	1543	444,1	0,45
3	4	745,4	435,2	0,24
4	5	865,3	479,8	0,28
5	6	915,7	523,9	0,26
6	7	2476,7	1344,5	0,29
7	8	3289,7	871,9	0,46
8	9	3423,8	955,2	0,46
9	10	3541,1	962,5	0,46
10	11	3644,7	1605	0,38
11	12	2878,7	1299,8	0,37
12	13	3798	1465,9	0,41
13	14	3872,5	1195,8	0,45
14	15	3939,9	1690	0,39
15	16	4001,1	1710,8	0,39
16	17	3076,5	1217,5	0,41

Fuente: Propia

Tabla 2. Velocidad de ondas compresionales y de corte obtenidas en la prueba Downhole para un medio rocoso de areniscas de la Formación Arenisca Tierna Coordenadas Norte = 1016846, Este = 1006437.

Profundidad		Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	Relación de Poisson
Desde	Hasta			
0	1	456,2	453,3	-38,13
1	2	409,4	638,7	1,35
2	3	510,4	308,6	0,21
3	4	557	382,8	0,05
4	5	487,9	339	0,03
5	6	921,7	491,3	0,3
6	7	1121,8	383,7	0,43
7	8	1159,1	383,9	0,44
8	9	927,6	433,9	0,36
9	10	1102	368,6	0,44
10	11	2051,5	647,8	0,44
11	12	2116,4	434,6	0,48
12	13	1837,7	453,5	0,47
13	14	2224,5	434,7	0,48
14	15	2274,9	473,7	0,48
15	16	2321,6	453,8	0,48
16	17	2418,5	512,5	0,48
17	18	2608,7	605,2	0,47
18	19.5	2824,8	731,1	0,46
19	19,5	2834,8	889,2	0,45

Fuente: Propia

Tabla 3. Velocidad de ondas compresionales y de corte obtenidas en la prueba Downhole para un medio rocoso de arcillolitas de la Formación Caja Coordinadas Norte= 1068989, Este = 1176102.

Profundidad		Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	Relación de Poisson
Desde	Hasta			
0	1	790	500	0,37
1	2	723,5	448,2	0,37
2	3	725,5	449,8	0,37
3	4	750	480,7	0,37
4	5	735,8	470,9	0,37
5	6	1240,4	560,6	0,37
6	7	1900,3	520,5	0,4
7	8	2406,3	890,7	0,4
8	9	2410	890,5	0,4
9	10	2450,8	1003,6	0,4
10	11	2450,8	1003,5	0,4
11	12	2620	1305	0,4
12	13	2100,6	1020,4	0,4
13	14	2500,2	880,7	0,4
14	15	2503,5	880,3	0,4
15	16	2700,3	1050,4	0,4
16	17	2650,6	1080,2	0,4

Fuente: Propia

4. Trabajos de Laboratorio

Finalizada la etapa de campo se procede con la selección y alistamiento de los especímenes de muestras para la adelantar las pruebas de laboratorio, esta actividad se desarrolló en dos fases, la primera consistió en la realización de pruebas no destructivas (velocidad de pulso ultrasónico) con la finalidad de obtener las velocidades de onda compresionales (V_p), seguidamente se desarrolló la segunda fase del programa de laboratorio con la ejecución de ensayos de compresión simple midiendo la deformación axial con Strain gage previamente instalados en la muestras ensayadas, de esta prueba se obtuvo la resistencia a la compresión Uniaxial y el módulo de deformación de laboratorio.

4.1. Preparación de las Muestras

La preparación de la muestras inicia la selección y corte de los testigos a una longitud de 100 mm usando disco con polvo de diamante y cumpliendo con la norma ASTM 4543 ¹ en total se cortaron 100 muestras entre calizas, areniscas y arcillitas, posteriormente fueron conducidas al laboratorio dando inicio a las pruebas. Para los ensayos de laboratorio se seleccionaron 30 muestras por cada material a criterio del proponente del presente trabajo de investigación tomando registro del diámetro, longitud, y peso de cada muestra. Los valores iniciales de las muestras son presentados en las tablas 4, 5 y 6. La figura 9 muestra una de las muestras de roca preparada para los ensayos de laboratorio.

¹ D 4543 Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances

Tabla 4. Datos de diámetro, longitud y peso de las muestras de caliza ensayadas en laboratorio,

Muestra	Diámetro (mm)	Longitud sin Capin (mm)	Longitud con Capin (mm)	peso (gramos)	Peso unitario (KN/m ³)
CB-01	45	101	104,0	418,15	27
CB-02	47	101	105,0	430,72	28
CB-03	47	100	105,0	418,65	27
CB-04	44	99	104,6	406,13	28
CB-05	45	99	103,0	399,22	27
CB-06	44	94	103,7	398,27	29
CB-07	45	98	105,0	412,96	28
CB-08	45	97	102,1	406,81	27
CB-09	44	96	101,2	408,82	29
CB-10	44	99	105,2	424,93	29
CB-11	44	100	105,5	421,83	29
CB-12	44	97	103,5	410,18	29
CB-13	44	99	104,8	417,89	29
CB-14	44	101	106,8	432,59	29
CB-15	44	102	107,2	435,97	29
CB-16	44	90	95,3	377,72	29
CB-17	44	100	104,3	424,58	29
CB-18	44	101	105,9	431,29	29
CB-19	44	99	103,7	410,41	28
CB-20	44	100	104,8	414,22	28
CB-21	44	100	103,5	416,84	28

CB-22	44	99	103,6	416,60	28
CB-23	44	102	105,5	406,96	27
CB-24	44	100	105,2	416,32	28
CB-25	44	98	104,1	406,51	28
CB-26	44	90	95,5	377,60	29
CB-27	44	93	95,6	390,32	28
CB-28	44	100	92,4	371,66	24
CB-29	44	100	103,8	412,25	28
CB-30	44	99	100,7	466,50	28

Fuente: Propia

Tabla 5. Datos de diámetro, longitud y peso de las muestras de areniscas ensayadas en laboratorio.

Muestra	Diámetro (mm)	Longitud sin Capin (mm)	Longitud con Capin (mm)	peso (gramos)	Peso unitario (KN/m ³)
AT-01	47	97	101,3	359,55	21
AT-02	47	99	102,8	416,80	24
AT-03	47	97	103,9	388,74	23
AT-04	47	97	103,0	376,35	22
AT-05	47	99	104,6	398,41	23
AT-06	47	98	102,1	384,99	23
AT-07	47	98	102,3	417,94	25
AT-08	47	98	103,9	420,64	25
AT-09	47	97	101,6	375,16	22
AT-10	47	97	100,8	372,94	22
AT-11	47	99	102,1	380,59	22
AT-12	47	98	103,2	416,94	25
AT-13	47	99	103,0	418,51	24
AT-14	47	97	101,9	409,65	24
AT-15	47	98	101,5	375,42	22
AT-16	47	98	102,6	415,39	24
AT-17	47	98	102,3	414,41	24
AT-18	47	98	102,7	394,58	23
AT-19	47	98	102,0	404,59	24
AT-20	47	98	102,5	378,89	22
AT-21	47	97	100,8	379,84	23
AT-22	47	99	104,7	424,32	25
AT-23	47	98	102,1	393,57	23
AT-24	47	99	103,0	405,16	24
AT-25	47	98	101,9	398,75	23
AT-26	47	98	101,7	389,15	23
AT-27	47	98	102,6	368,92	22
AT-28	47	97	101,2	375,00	22
AT-29	47	98	101,8	365,13	21
AT-30	47	99	104,1	379,13	22

Fuente: Propia

Tabla 6. Datos de diámetro, longitud y peso de las muestras de arcillolitas ensayadas en laboratorio.

Muestra	Diámetro (mm)	Longitud sin Capin (mm)	Longitud con Capin (mm)	peso (gramos)	Peso unitario (KN/m ³)
AC-01	47	100	103,6	437,70	26
AC-02	46	100	102,9	419,71	25
AC-03	47	100	104,8	440,47	25
AC-04	47	100	103,9	434,13	25
AC-05	46	100	104,5	432,28	26
AC-06	46	100	103,9	427,12	26
AC-07	47	101	105,2	439,34	25
AC-08	46	162	106,2	438,32	26
AC-09	47	162	106,5	445,59	25
AC-10	46	99	105,3	413,96	25
AC-11	46	100	105,5	435,55	26
AC-12	46	102	105,8	445,78	26
AC-13	47	102	106,2	441,63	25
AC-14	47	101	104,9	435,56	25
AC-15	47	97	102,2	428,43	25
AC-16	47	102	104,4	440,97	25
AC-17	46	101	104,4	440,97	26
AC-18	47	101	104,3	436,68	25
AC-19	46	100	102,1	440,07	26
AC-20	46	100	103,1	433,42	26
AC-21	47	100	104,0	435,68	25
AC-22	46	100	103,7	435,89	26
AC-23	47	100	104,2	430,78	25
AC-24	47	102	106,2	442,31	25
AC-25	46	100	105,2	431,17	26
AC-26	46	96	98,7	407,55	26
AC-27	46	101	104,6	420,22	25
AC-28	46	98	102,9	423,49	26
AC-29	46	101	103,8	411,11	26
AC-30	46	100	102,5	413,12	25

Fuente: Propia



Figura 9. Preparación de muestras de roca para pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión simple. Fuente: Propia

4.2. Pruebas de Velocidad de Pulso Ultrasónico

Seleccionadas y preparadas las muestras se procedió con la ejecución de pruebas de ultrasonido el cual consiste en la medición del tiempo que emplea un impulso ultrasónico, es decir con una frecuencia entre 20 y 150 kHz al recorrer la distancia entre un transductor emisor Tx y un transductor receptor Rx conectados a la muestra que se está ensayando tal como se muestra en la figura 10. Para la ejecución de la prueba de ultrasonido se empleó el tester de velocidad de pulso ultrasónico E48 (figura 11), en las instalaciones del laboratorio de la Escuela Colombiana de ingeniería. En el anexo 2 se presentan los formatos de adquisición de información primaria durante la ejecución de las pruebas de velocidad de pulso ultrasonido en el laboratorio.

La velocidad de transmisión o velocidad de propagación se determina para cada muestra ensayada por el cociente entre la distancia o separación D entre los transductores y el tiempo de tránsito de impulso ultrasónico T y está dada por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{D}{T} \quad (5)$$

Dónde:

D = Distancia entre transductores

T = tiempo de tránsito del impulso ultrasónico para la distancia D



Figura 10 Ejecución de pruebas de velocidad de pulso ultrasónico para muestras de calizas, areniscas y arcillolitas. Fuente: Propia



Figura 11 Equipo para la medición de la velocidad del pulso ultrasónico E48. Fuente: Escuela colombiana de ingeniería Fuente: Propia

Como se mencionó anteriormente, mediante la prueba de velocidad de pulso ultrasónico se obtuvo la velocidad de las ondas compresionales V_p para cada muestra, la velocidad de las ondas de corte V_s se obtuvieron teóricamente a partir de la correlación entre las ondas compresionales v_p y de corte V_s del macizo rocoso donde se obtuvieron las muestras, para este caso se obtuvo un factor de conversión que corresponde al promedio de la diferencia entre las velocidades obtenidas en el macizo rocoso mediante la ejecución de pruebas Downhole, teniendo en cuenta lo anterior, se procede al cálculo de la velocidad de las ondas de corte V_s en laboratorio mediante la siguiente expresión:

$$V_s = V_p * K \quad (6)$$

Dónde:

V_s = Velocidad de ondas de corte para muestras en laboratorio (m/seg)

V_p = Velocidad de ondas compresionales obtenidas en laboratorio

K = Promedio de la diferencia entre las ondas V_p y V_s del macizo rocoso

En la tabla 7 se relacionan los coeficientes obtenidos en el macizo rocoso para el cálculo de la velocidad de ondas de corte V_s en el laboratorio

Tabla 7. Coeficientes obtenidos a partir de la relación de ondas compresionales v_p y ondas de corte v_s en los macizos rocosos.

TIPO DE ROCA	FACTOR DE CONVERSIÓN (K)
Calizas de la Formación Belencito	0.45
Areniscas de la Formación Arenisca Tierna	0.44
Arcillolitas arenosas de la Formación Caja	0.46

Fuente: Propia

4.3. Ensayos destructivos

Finalizada la primera etapa de laboratorio con la ejecución de pruebas no destructivas (velocidad de pulso ultrasónico), se continuó con la realización de pruebas de compresión uniaxial para los 90 testigos de roca ensayados en la primera etapa. Esta actividad se desarrolló teniendo en cuenta los pasos que se describen a continuación.

4.3.1. Refrentado de Caras

El refrentado de caras consiste en homogenizar las caras de la muestra hasta que queden perfectamente lisas para aplicar la carga en el ensayo de compresión simple. Para alisar las caras se aplica azufre en estado de fusión previo al secado del espécimen de roca, el azufre debe permanecer sobre una superficie totalmente lisa y nivelada tal como se muestra en la figura 12. Este procedimiento es necesario hacerse debido a que el corte con el disco de diamante no es plenamente ortogonal y pueden además quedar estrías y rugosidades que provocan variación en las lecturas cuando se ejecuta el ensayo de compresión simple.



Figura 12 Refrentado de caras usando azufre en estado de líquido para cada muestra de roca ensayada. Fuente: **Propia**

4.3.2. Instalación de Straing Gage

Refrentadas las caras con azufre se procede con la instalación de deformímetros electrónicos tipo Straing Gage con el objeto de medir las deformaciones unitarias de cada muestra durante la ejecución de las pruebas de compresión uniaxial posteriormente poder calcular el módulo de deformación. Para el desarrollo de esta actividad se emplearon deformímetros tipo KFG-20-120-C1-11 de 120 ohm. En la figura 13 se muestra uno de los deformímetros instalados.



Figura 13 Instalación de Strain gage para medición de deformación axial durante la prueba de resistencia a la compresión simple. Fuente: **Propia**

4.3.3. Prueba de resistencia a la compresión simple

Preparadas los especímenes de muestras e instalados los deformímetros tipo Strain Gage se dio inicio a la ejecución de las pruebas de compresión simple, para el desarrollo de esta actividad se empleó el equipo Universal Testing Machine modelo UH-1000kNX con capacidad para 1000 kN (figura 14) permitiendo aplicación de cargas controladas y graduales en este caso se aplicaron cargas con intervalos de 500 kgf a una velocidad de deformación de 0.5 mm/min. La prensa está compuesta por un marco de carga y una bomba hidráulica que suministra presión a un flujo de aceite, encargada de proporcionar una deformación constante entre los apoyos superior e inferior en donde se ubica un juego de rotulas, las cuales permiten corregir pequeños defectos de paralelismo entre las caras de la muestra a ser ensayada. La velocidad de deformación es controlada internamente por el software del equipo.

Debido a que las deformaciones en las rocas ensayadas son muy pequeñas, se hace necesario determinarlas mediante medidores de deformación (Strain Gage) para esta labor se utilizó el puente de Wheatstone², el cual permite medir los pequeños cambios de deformación.

El software de la máquina universal empleada para el desarrollo del proyecto permite obtener la resistencia máxima a la compresión uniaxial (σ_c) en tiempo real, del mismo modo se puede obtener el módulo de deformación (E) medido al 50% de la resistencia máxima de la compresión simple sobre la curva esfuerzo-deformación para cada muestra ensayada. En total se ensayaron 90 especímenes de muestras de roca roca, 30 muestras de caliza de la formación Belencito, 30 de Areniscas de la formación Arenisca Tierna y 30 de Arcillolitas arenosas de la formación Caja, en el anexo 3 se presentan los formatos y curvas obtenidas de las pruebas de compresión simple ejecutadas en el laboratorio de estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería. En la figura 15 se muestra una prueba de compresión simple para una muestra de caliza antes y después de la falla.

² Puente para medición de pequeñas deformaciones inventado por Físico inglés, Charles Wheatstone en 1843



Figura 14 Equipo universal UH-1000kNX empleado para las pruebas de compresión simple. Fuente: Propia



Figura 15 Ejecución de la prueba de compresión Uniaxial en la maquina universal con medición de deformación axial. Fuente: Propia

5. Análisis de Ingeniería

5.1. Evolución del Tema

Los métodos de investigación del subsuelo por medio de sismica se vienen utilizando desde hace muchos años, especialmente en la obtención de modelos geológicos. En Colombia aparece ya una mención de utilización de tales métodos en una revista de análisis de Ingeniería³ de 1926. En la actualidad, estos métodos han tenido un significativo desarrollo debido a los colosales avances de la electrónica y la informática, los cuales han permitido crear equipos más efectivos y utilizar software más precisos.

Esta herramienta moderna se ha vuelto imprescindible actualmente en la exploración petrolera con magníficos resultados, mientras en el tema geotécnico su introducción ha sido un poco más lenta, pero a medida que se conoce su potencial, la utilización se ha intensificado.

En el caso particular de las ondas en el estudio de propiedades mecánicas del macizo rocoso, su empleo ha dado lugar a la introducción de los métodos no destructivos MND, los cuales hicieron su aparición hacia mediados del siglo XX, y uno de los primeros trabajos fue realizado por Nikitin⁴ en 1959, haciendo estudios sobre propiedades elásticas en diabasas. El tema despertó mucho interés entre los investigadores y se fue desarrollando paulatinamente, buscando relaciones útiles entre propiedades dinámicas y estáticas del material rocoso.

Tal como lo reseña Barton⁵, en 1967 Deere utilizó la relación de velocidades longitudinales en campo y laboratorio, elevadas al cuadrado, para estimar el RQD en la siguiente forma:

³ Métodos geofísicos modernos usados para exploraciones. Bogotá, Anales de Ingeniería. No 396, Marzo de 1926. Pags 565-571.

⁴ Nikitin V.N. – Experimento de registro de ondas refractadas intercambiadas tipo PSP con el fin de calcular las constantes elásticas de diabasas bajo depósitos detríticos. “Ediciones de AN CCCP. Serie Geofísica”, No. 8, 1959. (en ruso).

⁵ Barton N. – Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy. Taylor & Francis, London, 2007. – 729 pags.

$$\text{RQD}\% \approx 100(v_p^{(m)}/v_p^{(l)})^2 \quad (7)$$

En donde

$v_p^{(m)}$ – Velocidad de las ondas longitudinales en el campo (macizo rocoso)

$v_p^{(l)}$ – Velocidad de las ondas longitudinales en laboratorio (espécimen de roca).

$(v_p^{(m)}/v_p^{(l)})^2$ - Índice de velocidad, “ K_v ”.

Esto indica que el índice de velocidad es aproximadamente la centésima parte del RQD (varía de 0 a 100%). En la misma forma podría pensarse que fuera la centésima parte del RMR o el GSI, que también oscilan entre 0 y 100.

En este desarrollo de los MND es importante mencionar el trabajo de Savich⁶ en la URSS, quien estudió en laboratorio las relaciones E-E_d, obteniendo las gráficas de la Figura 16.

⁶ Savich A.I. y otros – Métodos Sismoacusticos para el Estudio de Macizos Rocosos. Nedra, Moscú, 1969. (En ruso)

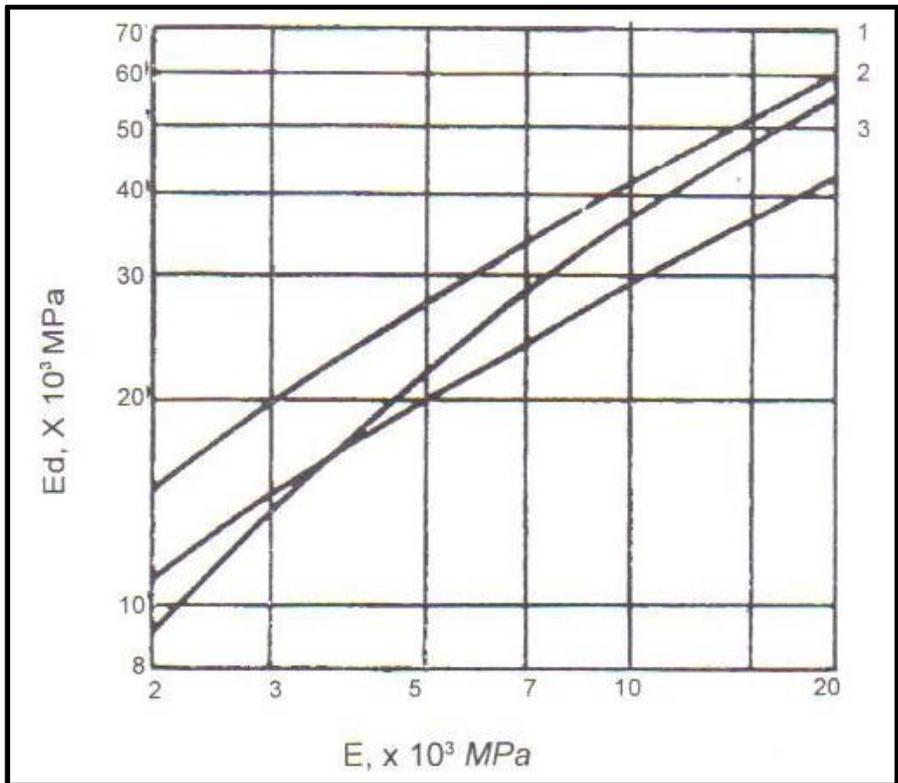


Figura 16 Gráficos promediados de la relación módulo de deformación (E) y módulo de elasticidad dinámico (Ed) en pruebas de laboratorio. 1 – Rocas carbonosas; 2 – Rocas volcánicas; 3 – Rocas metamórficas. Fuente: (Savich, 1969).

Como se puede observar en las gráficas precedentes, existe relación satisfactoria entre los dos módulos, con valores sustancialmente más bajos para el módulo de deformación, notándose a la vez que tal relación no es única. Esto es, para cada grupo de rocas existe su propia relación $E = f(Ed)$. La figura 17 muestra la relación entre el módulo de deformación E y el módulo de elasticidad dinámico Ed para los tres tipos de roca estudiadas en el presente proyecto de investigación.

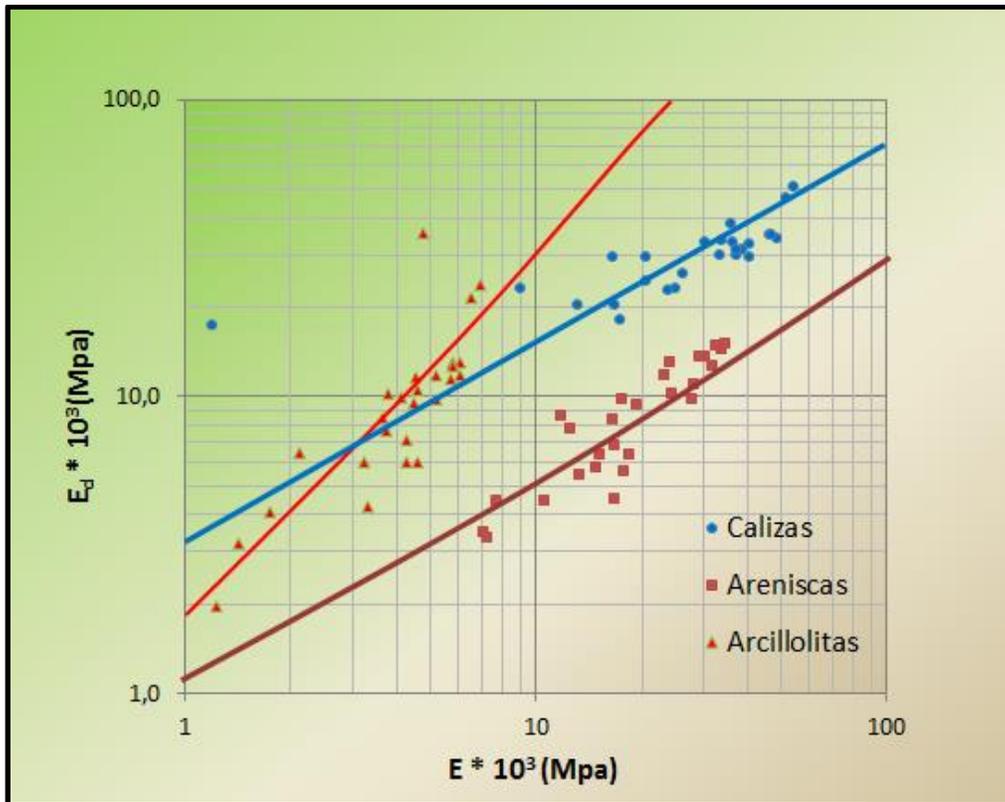


Figura 17 Relación entre el módulo de deformación E y el módulo de elasticidad dinámico E_d para rocas calizas, areniscas y arcillolitas a partir de ensayos de velocidad de pulso ultrasónico en el laboratorio. Fuente: Propia

De acuerdo con la figura 17 se puede establecer una relación entre los módulos con valores ligeramente más bajos del módulo de deformación, existiendo una diferencia mayor en las rocas arcillolitas de la Formación Caja, también se nota que se puede definir una relación para cada tipo de material analizado $E = f(E_d)$.

Estas primeras relaciones muestran que en el tema deformativo, no se aprecia posibilidad de establecer correspondencia universal entre propiedades dinámicas y estáticas de las rocas, motivo por el cual, se requiere elaborar en laboratorio las curvas propias de cada tipo rocoso para encontrar utilidad práctica, y esto, indudablemente genera dificultades porque pueden existir tantas curvas como litologías locales hay⁷.

⁷ Puerto G.J. – Métodos No Destructivos en Mecánica de Rocas. Revista Ingeniería de Minas. UPTC. No 9, 1997. Pags. 55-62.

Prochujan⁸, citando a Batolin, muestra la gráfica de la Figura 18, en donde puede verse la relación entre la resistencia a la compresión simple (σ_c en este caso) y la velocidad de las ondas longitudinales, obtenida en laboratorio (V_p).

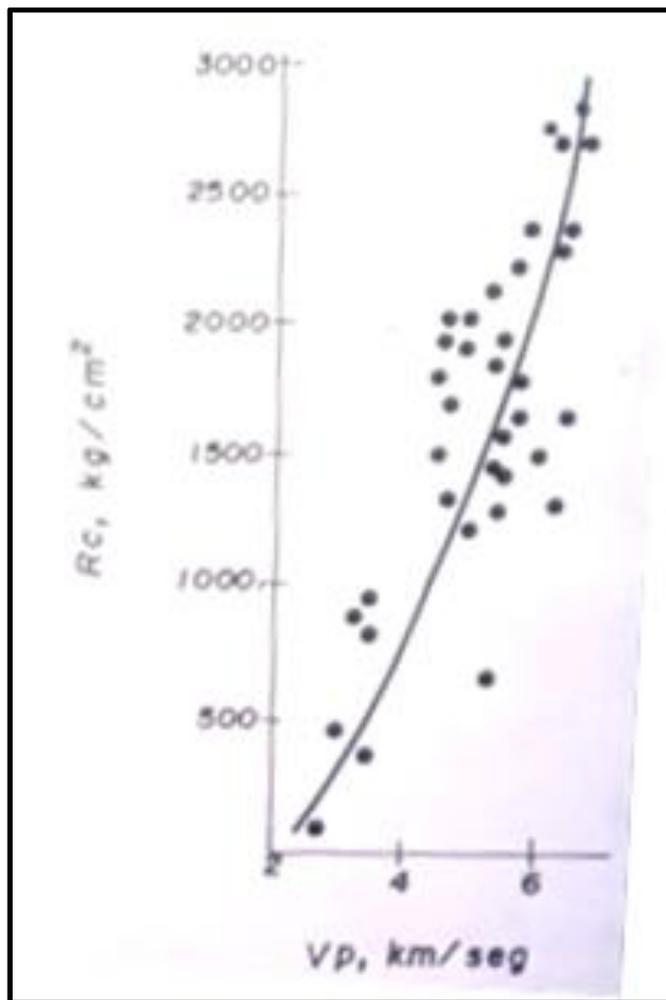


Figura 18 Relación entre velocidad de las ondas longitudinales y la resistencia a la compresión simple (Prochujan, 1971).

El mismo autor también cita los trabajos de Bollo, realizados en 34 grandes presas del mundo, donde se realizaron ensayos de placa para determinar módulo de deformación

⁸ Prochujan D.P., Frid S.A., Domanskiy L.K. – Fundaciones Rocosas de Obras Hidráulicas. Leningrado, 1971 – 190 pags. (en ruso).

del macizo rocoso y sísmica de refracción, de cuya información obtuvo la gráfica de la Figura 19.

En rocas del Himalaya⁹ se adelantaron investigaciones para relacionar las propiedades dinámicas y estáticas de la roca. Según estos estudios, con un coeficiente de Poisson de 0.2 calcularon el módulo de elasticidad dinámico E_d (kg/cm²), utilizando los resultados de velocidad de ondas longitudinales obtenidas con la técnica del ultrasonido. Además realizaron ensayos de laboratorio en esas mismas muestras para obtener el módulo de elasticidad estático E_0 (kg/cm²). La relación entre estas dos propiedades dio como resultado la siguiente expresión lineal.

$$E_0 = (2E_d/3) + 9200 \quad (8)$$

Nikitin (1981) con múltiples ensayos de laboratorio estableció la siguiente relación entre los módulos de elasticidad dinámico y estático:

$$E_0 = 0.13E_d^{1.1410} \quad (9)$$

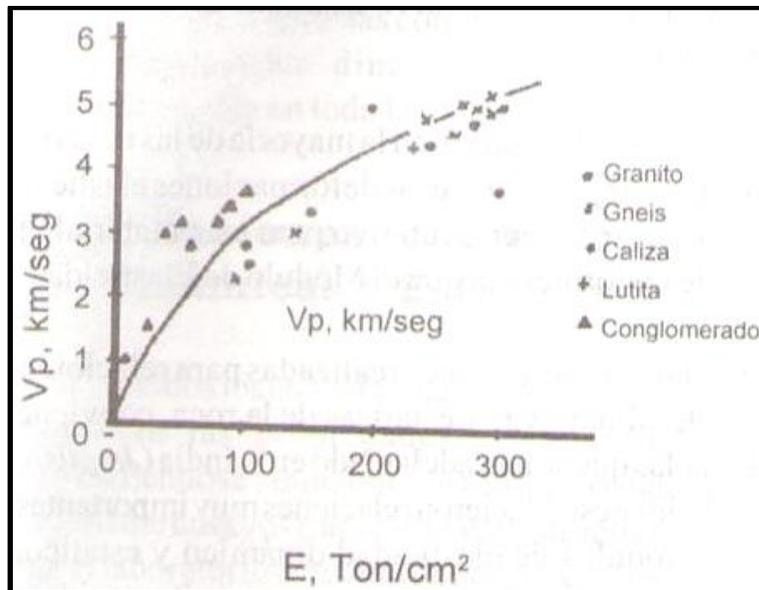


Figura 19 Relación entre módulo de deformación y velocidad de las ondas. Fuente: (Prochujan, 1971).

⁹ Jagdish M.G., Prem D. – Correlation Between Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Rocks. "Irrigation and Power", New Delhi. Vol. 40, No.2, April 1983. Pags 181-187.

En la figura 20 se presenta la relación entre el módulo de deformación y la velocidad de las ondas longitudinales para rocas calizas, areniscas y arcillolitas respectivamente similar a la obtenida por Prochuan en 1971, estos obtenidos sobre especímenes de roca en el laboratorio. De otra parte y para el desarrollo del presente proyecto de investigación también se elaboraron las gráficas por grupo litológico con la finalidad de analizar el comportamiento de las ondas de compresión relacionadas con el módulo de deformación de cada uno de los macizos rocosos explorados. En las figuras 21, 22 y 23 se presentan las relaciones obtenidas.

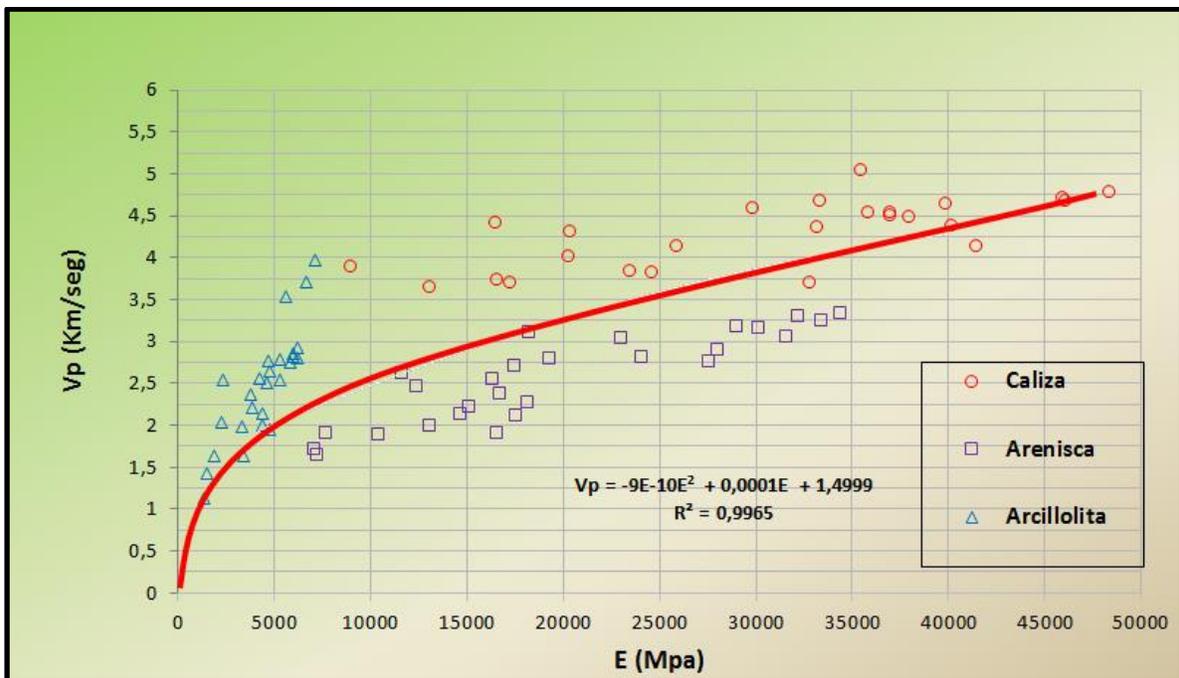


Figura 20. Relación entre el módulo de deformación E y velocidad de ondas Vp obtenidos en el laboratorio para tres tipos de rocas. Fuente: **Propia**

La curva obtenida en la figura 18 muestra un comportamiento entre el módulo de deformación (E) y la velocidad de ondas longitudinales (Vp) directamente proporcional y como era de esperarse los módulos de deformación más altos están asociados a macizos rocosos competentes mientras que los valores más bajos se relacionan con macizos rocosos de rocas blandas.

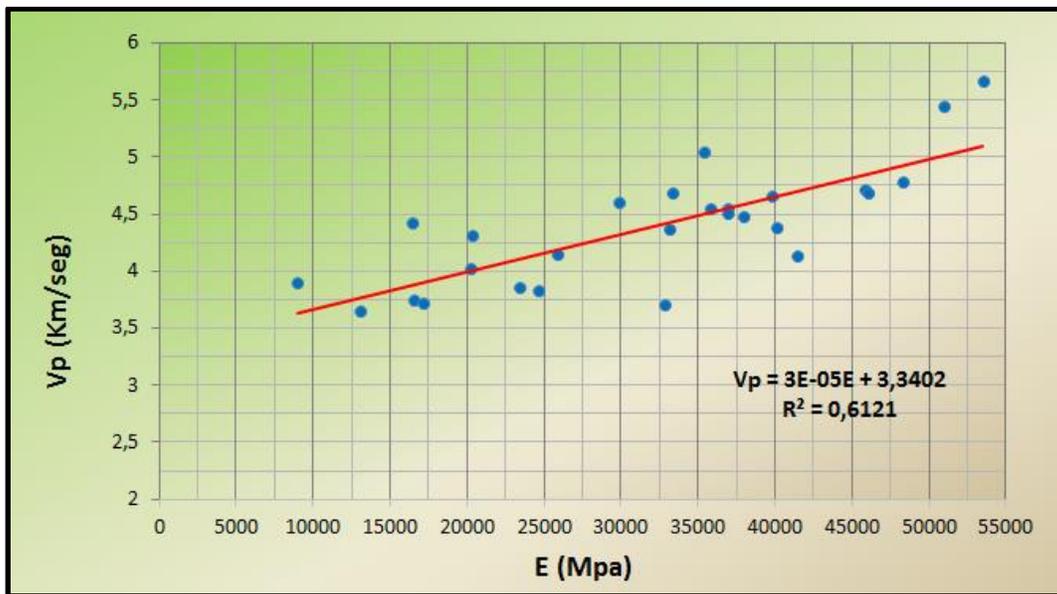


Figura 21. Relación entre el módulo de deformación E y velocidad de ondas Vp obtenidos en el laboratorio para el macizo rocoso conformado por calizas, Fuente: **Propia**

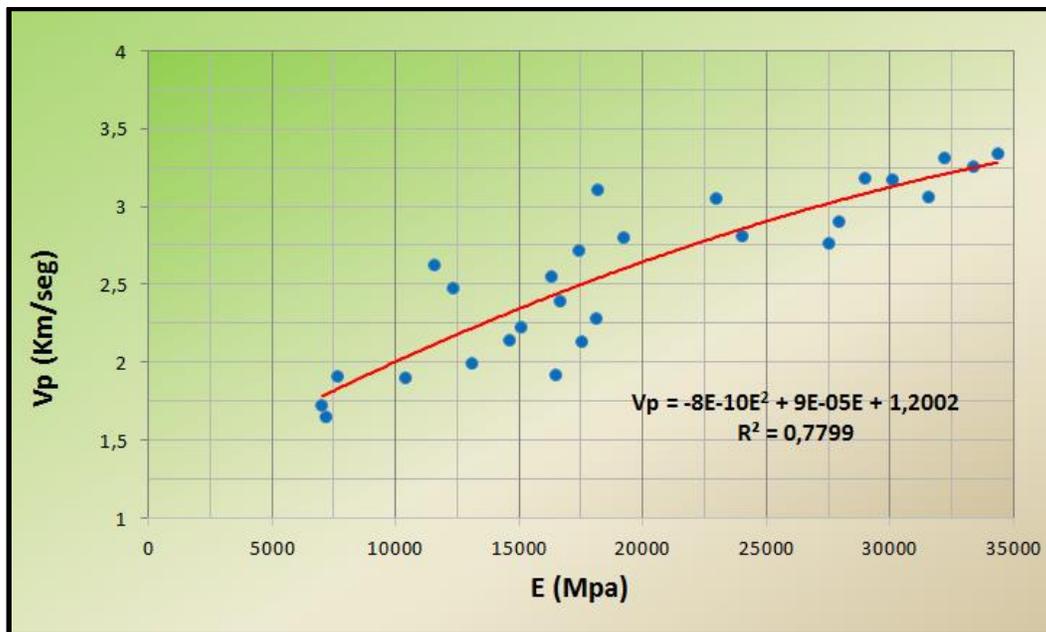


Figura 22. Relación entre el módulo de deformación E y velocidad de ondas Vp obtenidos en el laboratorio para el macizo rocoso conformado por areniscas, Fuente: **Propia**

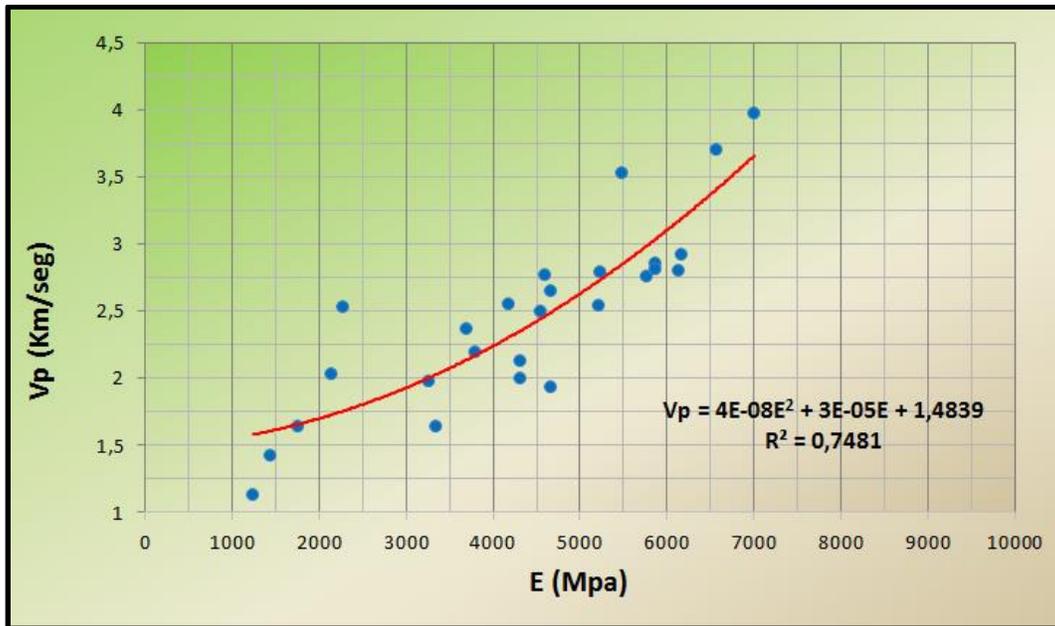


Figura 23. Relación entre el módulo de deformación E y velocidad de ondas Vp obtenidos en el laboratorio para el macizo rocoso conformado por arcillolitas, Fuente: Propia

Claramente se aprecia en las gráficas precedentes que la relación entre el módulo de deformación es directamente proporcional con la velocidad de ondas compresionales en los macizos rocosos explorados de acuerdo con los resultados obtenidos en el laboratorio. De otra parte, es evidente que para los macizos rocosos compuestos por rocas competentes se obtuvieron los mayores valores del módulo de deformación asociados también a mayores velocidades de onda. Los menores valores son registrados en macizos rocosos conformados por rocas blandas.

Las relaciones de velocidad de las ondas con la resistencia a la compresión simple o uniaxial están lejos de ser universales en las rocas, porque cada tipo litológico tiene su propia relación, tal como lo ilustran Nikitin (1981) en la gráfica de la Figura 24 y Gupta¹⁰ en la gráfica de la Figura 25.

¹⁰ Gupta A.S., Seshagiri Rao K. – Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Vol 57 Nu. 2 – Sept. 1998. Pags 161-172.

Para el presente proyecto de investigación se obtuvieron gráficas relacionando la velocidad de las ondas longitudinales V_p y la resistencia a la compresión uniaxial σ_c para rocas calizas, areniscas y arcillolitas respectivamente, los resultados obtenidos ratifican lo expuesto por Nikitin (1981) donde cada litología mantiene su propia relación. En las figuras 24, 25 y 26 se observan las relaciones obtenidas para cada componente litológico en el laboratorio.

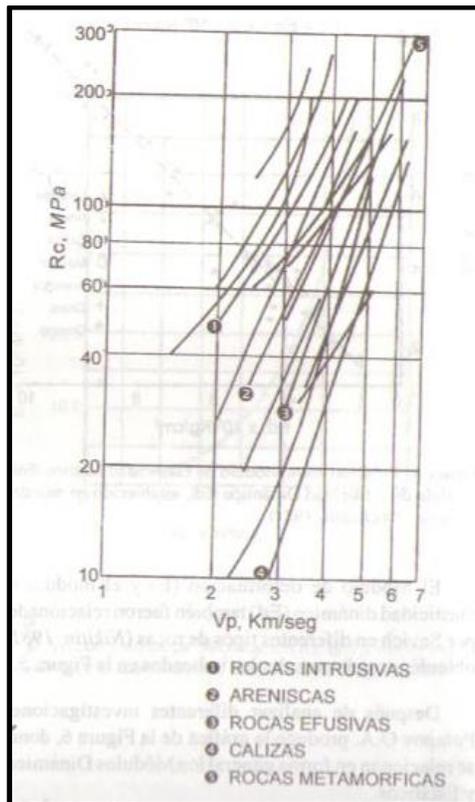


Figura 24. Relaciones velocidad – resistencia a la compresión simple (Nikitin, 1981)

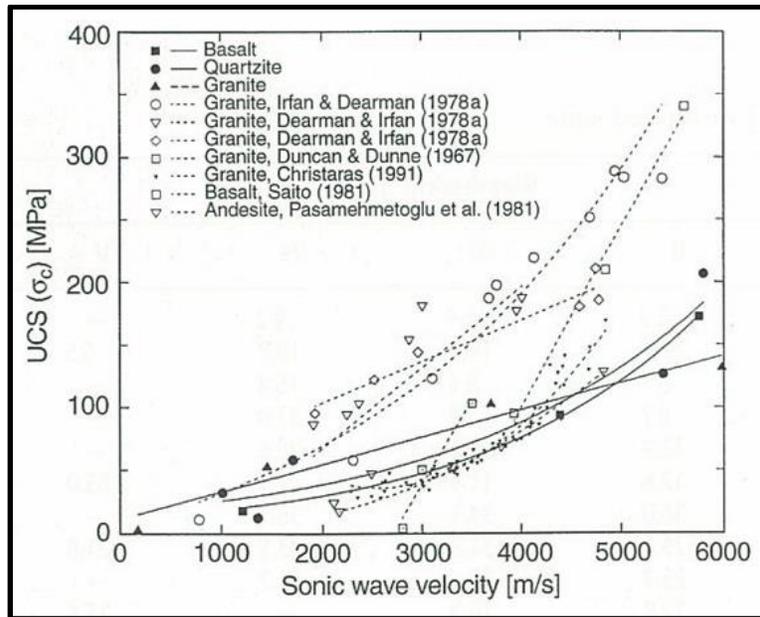


Figura 25. Variaciones velocidad – resistencia a la compresión simple en rocas cristalinas (Gupta, 1998).

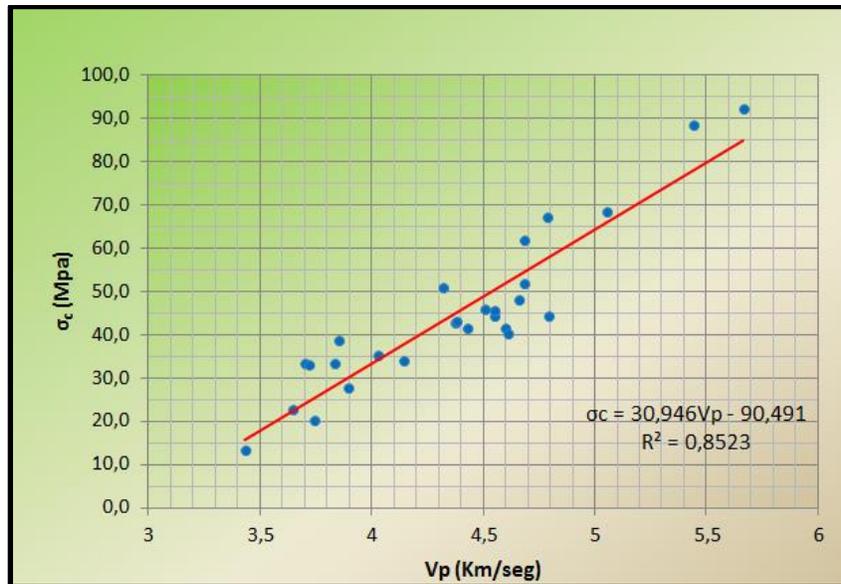


Figura 26. Relación entre la velocidad de ondas compresionales Vp y la resistencia a la compresión Uniaxial σ_c para rocas calizas de la Formación Belencito obtenidas en laboratorio, Fuente: **Propia**

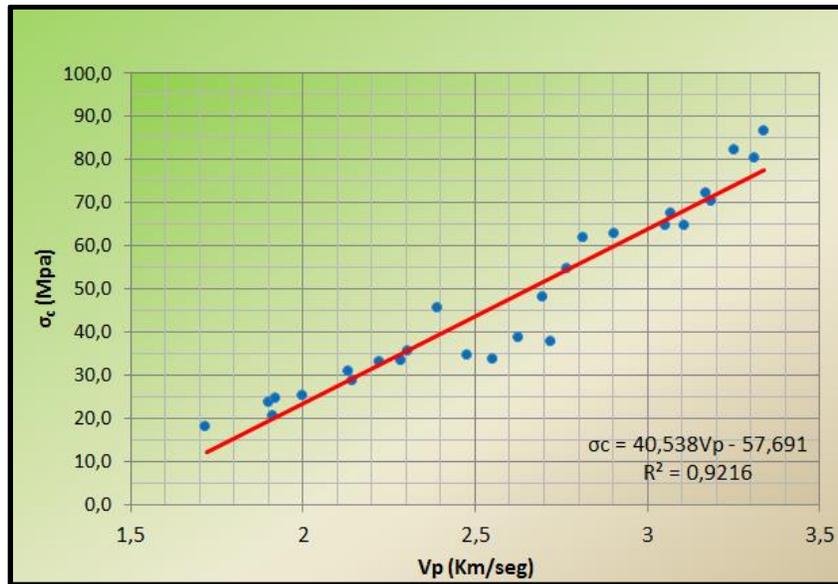


Figura 27. Relación entre la velocidad de ondas compresionales V_p y la resistencia a la compresión Uniaxial σ_c para rocas areniscas de la Formación Arenisca Tierna obtenidas en laboratorio. Fuente: **Propia**

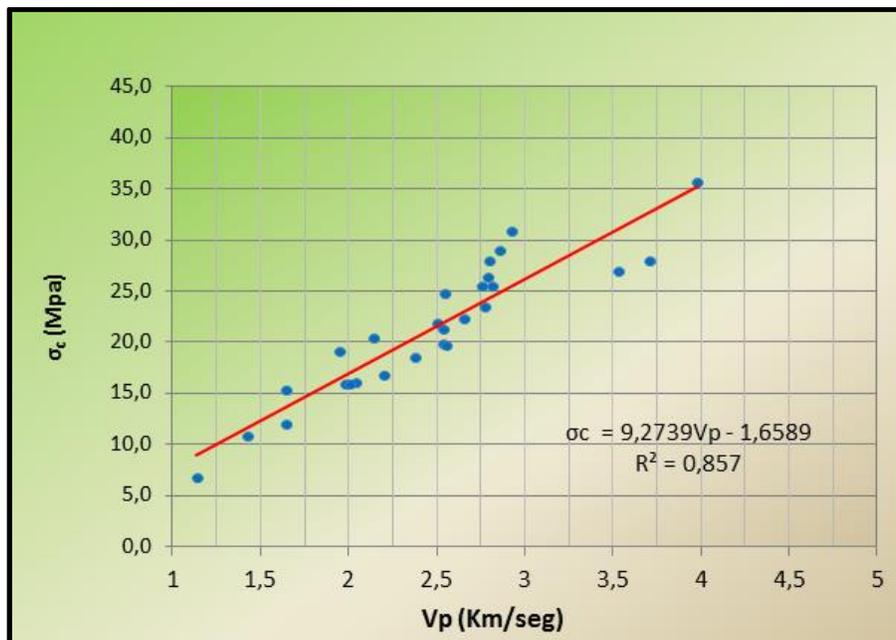


Figura 28. Relación entre la velocidad de ondas compresionales V_p y la resistencia a la compresión Uniaxial σ_c para rocas arcillolitas de la Formación Caja obtenidas en laboratorio, **Fuente:** Propia.

Como se observa en las figuras anteriores, existe relación satisfactoria entre la velocidad de las ondas longitudinales V_p y la resistencia a la compresión simple σ_c para cada tipo de roca ensayada en el laboratorio obteniéndose factores de correlación R^2 cercanos a 1.0

Los análisis presentados anteriormente indican que para determinar la resistencia a la compresión uniaxial a partir de la velocidad de las ondas se requiere haber elaborado antes las curvas específicas del tipo de roca a investigar.

Savich¹¹ consideró necesario establecer una relación entre el módulo de deformación “E” (MPa) y módulo de elasticidad dinámico “ E_d ” (MPa) considerando la siguiente ecuación tipo

$$\log E = a \log E_d + b \quad (10)$$

Los coeficientes “a” y “b” varían dependiendo del tipo de roca y presión a que está sometida, notándose que a mayor presión ambos coeficientes disminuyen. En términos generales el coeficiente “a” oscila entre 1.2 y 2.0, mientras el “b” varía entre 2 y 6.

Golodkovskaya y Sujonov¹², investigando el empleo de los métodos sísmicos en la determinación de propiedades mecánicas de las rocas, resumieron 12 investigaciones anteriores y las suyas propias, encontrando la siguiente relación generalizada para el módulo de deformación E (kg/cm^2) de diferentes tipos de rocas, en función de la velocidad de las ondas longitudinales “ V_p ” (km/s)

$$\text{Log } E = (1.71 \text{ a } 2.44) * \log v_p + (4.0 \text{ a } 4.55) \quad (11)$$

¹¹ Savich A.U. – Relaciones generalizadas entre índices estáticos y dinámicos de deformación en rocas. “Construcciones Hidrotécnicas”, Moscú, No. 8, 1984. Pags. 50-54.

¹² Golodkovskaya G.A., Sujonov A.A. – Estudio de propiedades físico-mecánicas de las rocas por el método de investigación acústica de perforaciones en la exploración de minerales. “Ingeniería Geológica”, No. 3, 1986, Moscú. Pags. 96-104 (En ruso).

También, con resumen de 5 trabajos anteriores y los suyos, relacionaron la resistencia a la compresión simple (kg/cm^2) con la velocidad de las ondas longitudinales “Vp” (km/s) mediante la siguiente expresión generalizada:

$$\sigma_c = 10^{(0.23 \text{ a } 0.49)V_p + (1.20 \text{ a } 2.15)} \quad (12)$$

En las anteriores ecuaciones el valor del coeficiente que se debe utilizar depende del tipo de roca indudablemente. En 1990, Savich y otros investigadores rusos¹³ en estudios del macizo rocoso introdujeron el concepto de “**índice de integridad**”, el cual tiene como característica principal comparar un material rocoso independientemente del grado de alteración con una “muestra patrón” de ese mismo material. Esa “muestra patrón” debe estar en estado sano, inicialmente descargada, ausente de defectos de meteorización, fisuramiento, inundación, carstificación entre otros aspectos.

Savich Define índices de integridad por resistencia a la compresión uniaxial, por módulo de deformación y por velocidad de ondas, mediante las relaciones siguientes:

$$K_E = E/E_{\max} \quad (13)$$

$$K_R = \sigma_c/\sigma_{c \max} \quad (14)$$

$$K_i = (v_p/v_{p(\max)})^2 \quad (15)$$

En donde

K_E , K_R , K_i – Índices de integridad por módulo de deformación, resistencia a la compresión uniaxial y velocidad de las ondas longitudinales.

E , σ_c , v_p – Módulo de deformación, resistencia a la compresión uniaxial, velocidad de las ondas longitudinales, en muestra o macizo rocoso

E_{\max} , $\sigma_{c \max}$, $v_{p \max}$ - Módulo de deformación, resistencia a la compresión uniaxial, velocidad de las ondas longitudinales, de “muestra patrón”

¹³ Savich B.D., Kuyundich V.I., otros – Investigaciones Geofísicas Complejas. Moscú, Nedra, 1990, -462 pags. (En ruso)

En el tema de ondas sísmicas, el método que mejor define la muestra patronada es la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, el cual capta cualquier defecto que se presente en el espécimen, disminuyendo su velocidad. Es decir, las máximas velocidades que se presenten en un muestreo de determinado tipo de roca están definiendo el patrón con la velocidad “ $V_{p(max)}$ ”. En la definición de este parámetro los autores del trabajo expresan: “*la magnitud $V_{p(max)}$ se determina como la media aritmética de los máximos valores de velocidad obtenida para los diferentes tipos de roca, obtenida por ultrasonido*”.

Como deducción obvia, todos los índices de integridad son menores de 1. Con estos índices, utilizando múltiples datos experimentales elaboraron correlaciones y estimaron características del macizo rocoso en la forma como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Relaciones de los índices de integridad (Savich, 1990)

Clase	K_E	K_R	K_i	Características
I	0.7-1.0	0.7-1,0	0.9-1.0	Excelente
II	0.52-0.7	0.46-0.7	0.75-0.9	Bueno
III	0.25-0.52	0.23-0.46	0.5-0.75	Regular
IV	0.11-0.25	0.08-0.23	0.25-0.5	Malo
V	0.04-0.11	0.02-0.08	0.12-0.25	Muy malo

Aclaran que entre la resistencia a la compresión simple y los parámetros dinámicos no existe evidente relación física, toda vez que la velocidad de las ondas no depende de la resistencia del material sino de las propiedades deformativas y la densidad. Sin embargo, puesto que se encuentra relación entre la resistencia a la compresión simple y la densidad, lo mismo que con las propiedades deformativas de la roca, se deduce que debe existir relación de las ondas de velocidad con la resistencia y en ese sentido es correcto el enfoque de tal relación, estableciendo la siguiente ecuación

$$\sigma_c = a \cdot v_p^b \quad (16)$$

En esta expresión las constantes “a” y “b” dependen de tipo litológico y el grado de saturación del material.

En el Proyecto Hidroeléctrico de Las Tres Gargantas en China¹⁴, construido sobre un macizo de rocas ígneas principalmente en granitos, realizaron investigaciones sísmicas, llegando a encontrar relaciones entre parámetros mecánicos y velocidades longitudinales de onda, obtenidas como se muestra en las Figuras 29 y 30.

Además, encontraron una buena forma de clasificar el macizo rocoso basado en la resistencia a la compresión uniaxial, características del fracturamiento y el índice de velocidad “Kv” (ver ecuación 7), tal como puede verse en la Tabla 9.

Tugrul¹⁵, para calizas de Turquía propuso la siguiente relación entre velocidad de las ondas longitudinales (km/s) y la resistencia a la compresión simple (MPa)

$$\sigma_c = 16.73v_p + 21.25 \quad (17)$$

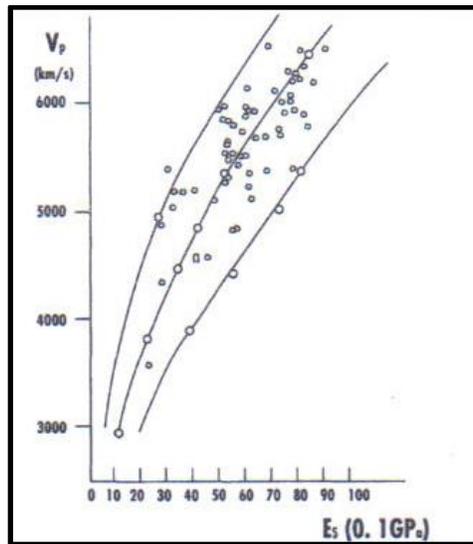


Figura 29. Proyecto Las Tres Gargantas, relación velocidad de ondas - módulo de deformación (Xuecheng, 1993).

¹⁴ Dong Xuecheng – Rock Mechanics Investigations related to the Three Gorges Dam Project. “News Journal”, ISRM Vol. 1 No. 4, 1993. Pags. 6-12.

¹⁵ Tugrul A., Zarif I.H. – Engineering aspects of limestone weathering in Istanbul, Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Vol 58, 2000. Pags. 191-206.

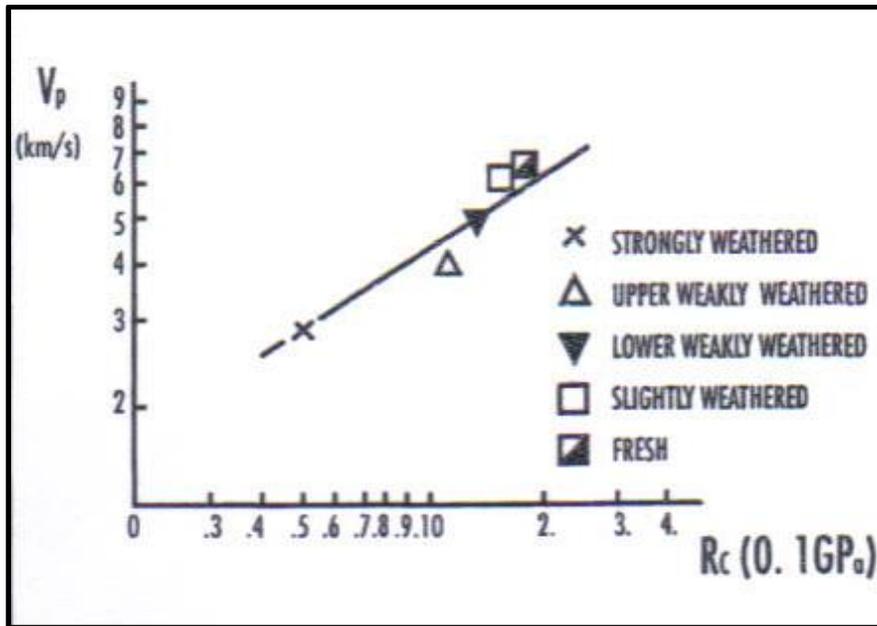


Figura 30. Proyecto Las Tres Gargantas, relación velocidad de ondas - resistencia a la compresión simple (Xuecheng, 1993).

Tabla 9. Clasificación del macizo rocoso por su índice de velocidad obtenida en Las Tres Gargantas (Dong, 1993).

Clase	σ_c , Mpa	Diaclasas/m	RQD %	K_v
I	85-110	1-3	>83	0.82
II	75-85	3	83	0.75
III	40-75	3-4	75	0.69
IV	20-40	>3	29	0.50
V	<20	---	<20	<0.50

Entre las obras más importantes que tratan este tema, editadas últimamente, se destaca la elaborada por Barton en 2007, quien relaciona la velocidad de las ondas longitudinales con las propiedades del macizo rocoso, entre estas el módulo de deformación y el índice Q de clasificación del macizo rocoso. Puesto que en el índice Q no interviene la

resistencia a la compresión, determina el índice Q_c , denominado índice de calidad del macizo rocoso.

$$Q_c = Q \frac{\sigma_c}{100} \quad (18)$$

En donde

σ_c – Resistencia a la compresión simple en muestra de 50 mm, Mpa

Barton, como producto de sus investigaciones estadísticas, establece las siguientes relaciones:

$$V_p = \log Q_c + 3.5 \quad (19)$$

$$E^{(m)} = 10 * Q_c^{1/3} \quad (20)$$

$$E^{(m)} = 10 * 10^{\frac{V_p - 3.5}{3}} \quad (21)$$

En donde $E^{(m)}$ se expresa en GPa y V_p en km/s.

Barton además cita la Tabla 10, obtenida de McDowell (1993), en la que relaciona el índice de velocidad con características del macizo rocoso.

Tabla 10. Relaciones del “Kv” con características del macizo rocoso McDowell (1993)

Calidad	RQD, %	Diaclasas/m	Kv
Excelente	90-100	1	0.8-1.0
Bueno	75-90	1-5	0.6-0.8
Regular	50-75	5-8	0.4-0.6
Malo	25-50	8-18	0.2-0.4
Muy malo	0-25	>18	0-0.2

Teniendo en cuenta los datos de la tabla anterior, el RQD resulta aproximadamente de 125Kv en lugar de 100Kv que definió Deere en 1967.

En un macizo rocoso fracturado a muy fracturado constituido por calizas dolomíticas con algunas intercalaciones muy delgadas de margas, ubicado en Atrani (Italia)¹⁶, realizaron pruebas de sismica en perforaciones (Down-hole), obteniendo relaciones de velocidad longitudinal (km/s) con RQD y módulo de diaclasamiento “F” (diac/m):

$$RQD = (1.22 - v_p)/(-1.22*v_p*0.0069) \quad (22)$$

$$F = (6.33-v_p)/(6.33*v_p*0.025) \quad (23)$$

5.2. Análisis

Por el resumen de los anteriores trabajos, realizados en diferentes latitudes, se deduce que sí es posible utilizar los MND para definir el módulo de deformación y la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso, pero existen diversos enfoques que es necesario analizar.

5.2.1. Diaclasamiento y velocidad de las ondas

La velocidad de las ondas puede ser hallada en el macizo rocoso por medio de pruebas sísmicas, mientras que en las muestras de roca se utiliza el ultrasonido. Los dos resultados no son iguales para la misma matriz rocosa, siendo menor en el macizo rocoso, debido a la presencia de discontinuidades y otras alteraciones. Esto se ilustra muy bien en la Figura 31, presentada por Barton (2007), citando a King (1978). También King y otros investigadores establecieron una relación entre el módulo de diaclasamiento “F” en diaclasas/m y el índice de velocidad, obteniendo la ecuación.

$$(v_p^{(m)}/v_p^{(l)})^2 = 0.96 - 0.036F \quad (24)$$

También cita las investigaciones de Tanimoto e Ikeda en Japón, quienes en 1983, efectuando un trabajo experimental muy grande establecieron la siguiente ecuación para hallar la velocidad de las ondas en rocas fracturadas ($v_p^{(f)}$), utilizando el módulo de diaclasamiento F (diac/m) a partir de la velocidad de las ondas en roca sana ($v_p^{(l)}$).

¹⁶ Budetta P., de Riso R., de Luca C. – Correlations between jointing and seismic velocities in highly fractured rock masses. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Vol. 60, Num. 3, August 2001. Pags 185-192.

$$v_p^{(f)} = v_p^{(l)} [5/(F+4)]^{0.5} \quad (25)$$

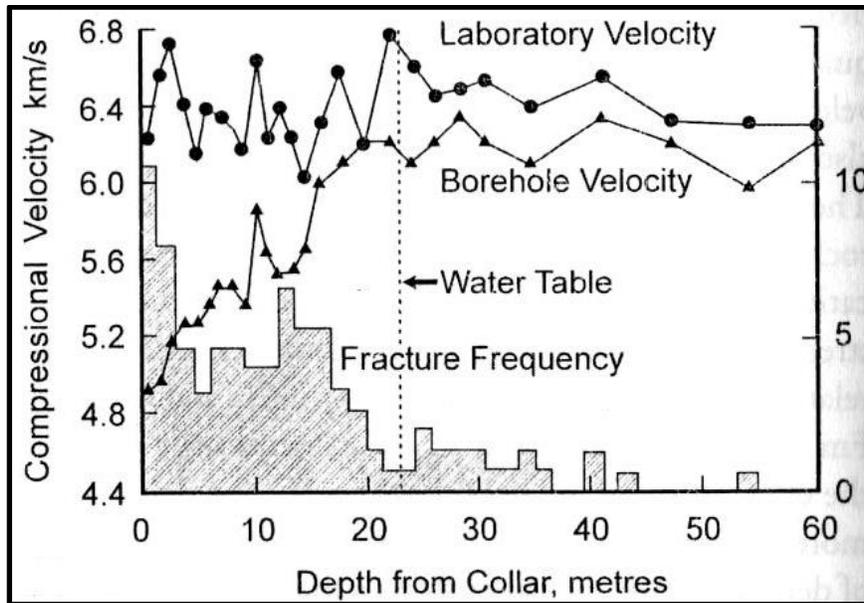


Figura 31. Relaciones de velocidad longitudinal de las ondas con el fracturamiento del macizo Fuente: Barton, 2007.

Como se puede ver, el diaclasamiento del macizo rocoso es el factor más importante en la disminución de su velocidad de ondas. Entre grado de diaclasamiento y velocidad de las ondas existe una relación inversa. También eso es evidente en los datos de las tablas 9 y 10. Lo dicho se encuentra en concordancia con las magnitudes de resistencia a la compresión y módulo de deformación del macizo rocoso, los cuales dependen del grado de diaclasamiento, también con relación inversa.

Para el presente trabajo de investigación se obtuvo la velocidad de las ondas longitudinales y de corte en los sitios donde se ejecutaron las perforaciones por medio de pruebas Down Hole, en el laboratorio se determinó la velocidad de ondas longitudinales por medio del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico notándose claramente valores más bajos en los macizos rocoso corroborando lo expuesto por Barton (2007). Las figuras 32, 33 y 34 representan las relaciones entre velocidades de onda del macizo rocoso y de laboratorio con el RQD medido durante el proceso de perforación.

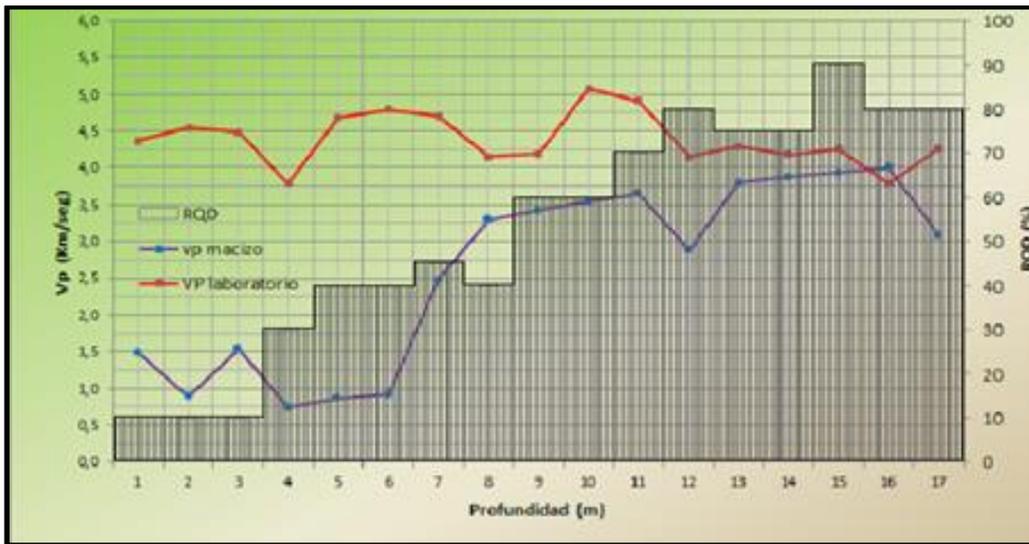


Figura 32. Relaciones de velocidad longitudinal de las ondas con el RQD del macizo conformado por rocas calizas de la Formación Belencito, Fuente: **Propia**

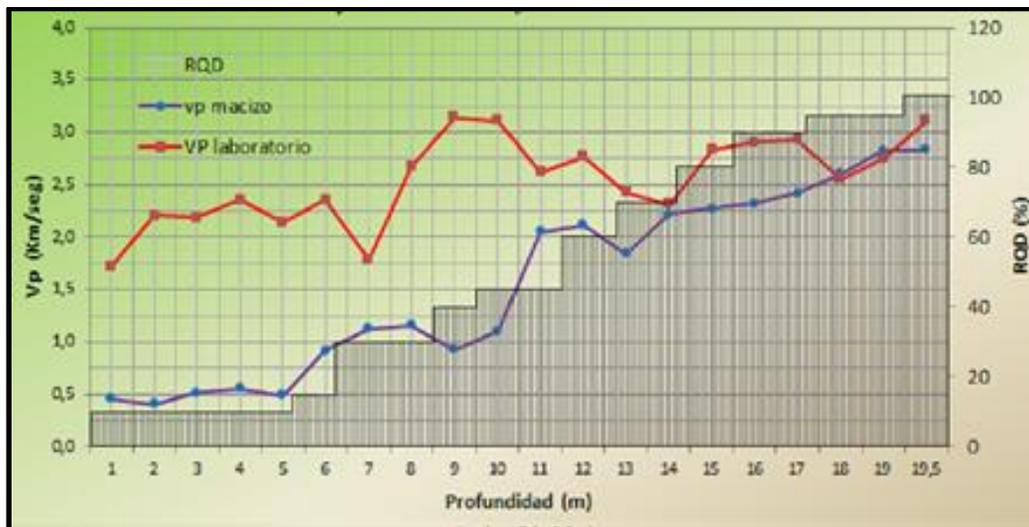


Figura 33. Relaciones de velocidad longitudinal de las ondas con el RQD del macizo conformado por rocas areniscas de la Formación Arenisca Tierna. Fuente: **Propia**

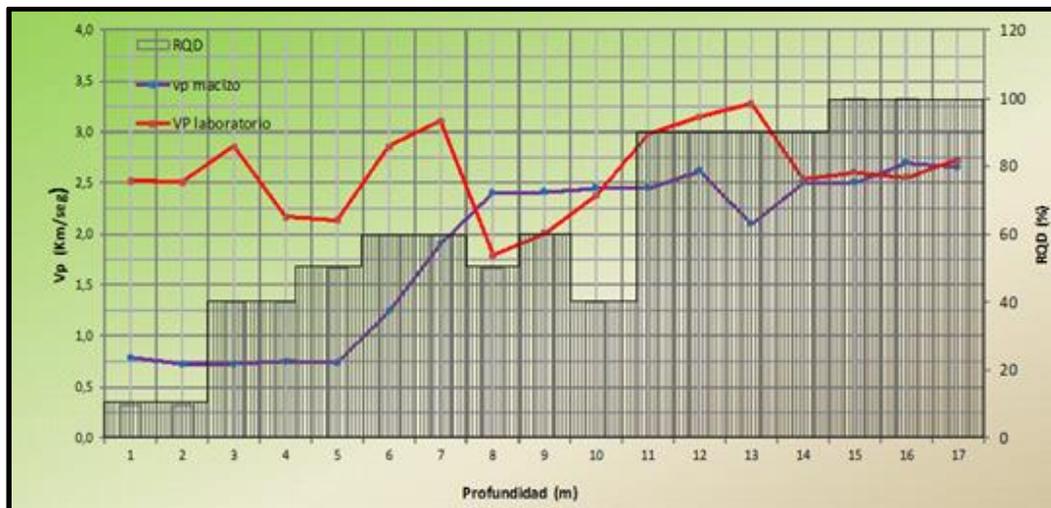


Figura 34. Relaciones de velocidad longitudinal de las ondas con el RQD del macizo conformado por rocas arcillolitas arenosas de la Formación Caja. Fuente: **Propia**

De acuerdo con las figuras precedentes claramente se nota que la velocidad de ondas es menor en el macizo rocoso que las obtenidas en el laboratorio y están directamente relacionadas con el RQD a mayor presencia de discontinuidades la velocidad de las ondas es menor y aumenta además con la profundidad.

5.2.2. Determinación tradicional del módulo de deformación del macizo rocoso

La mejor forma de hallar el “ $E^{(m)}$ ” es mediante pruebas de campo en los sitios representativos del macizo rocoso donde se proyecta la obra. Sin embargo, esta determinación tropieza con inconvenientes derivados de:

- Falta de equipos, sobre todo para investigaciones profundas o cuando la obra no tiene la magnitud para invertir en tales pruebas, las cuales pueden representar costos significativos.

- Teniendo en cuenta que los ensayos son de carácter puntual, es necesario extrapolar esos resultados a un macizo rocoso que en términos generales es heterogéneo, generándose así aproximaciones con alto grado de incertidumbre.

Debido a esto, el módulo de deformación del macizo rocoso en la mayoría de los casos ha sido estimado indirectamente, utilizando otras características.

Hoek y Diederich¹⁷ al igual que otros autores anteriores, se han preocupado por estimar módulos de deformación del macizo rocoso utilizando las clasificaciones geotécnicas del medio rocoso, pero los resultados no han sido satisfactorios debido a la dispersión que se registra y a que aparecen amplias calidades del macizo rocoso sin que se puedan aplicar razonablemente las relaciones. A eso hay que agregar que las clasificaciones geotécnicas tienen un componente subjetivo significativo. En las figuras 35 y 36 se pueden apreciar dos gráficas que ilustran tales problemáticas.

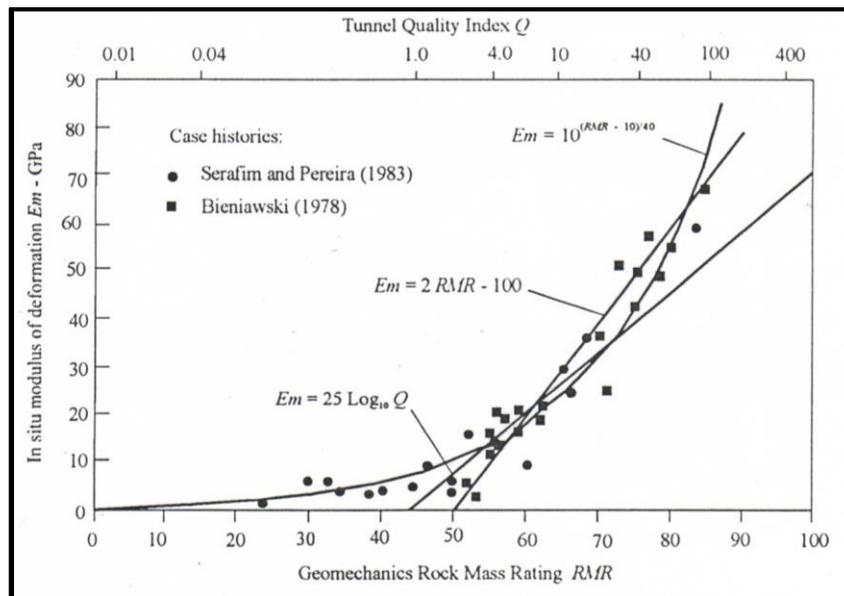


Figura 35. Relación del módulo de deformación del macizo rocoso con clasificaciones geotécnicas, Fuente: Hoek, 2008

¹⁷ Hoek E., Diederich M.S. – Estimación de módulos de los macizos rocosos. IngeotÚNELES, libro 14, Capítulo 1, Editor López Jimeno, Madrid, 2008. Pags. 31-53.

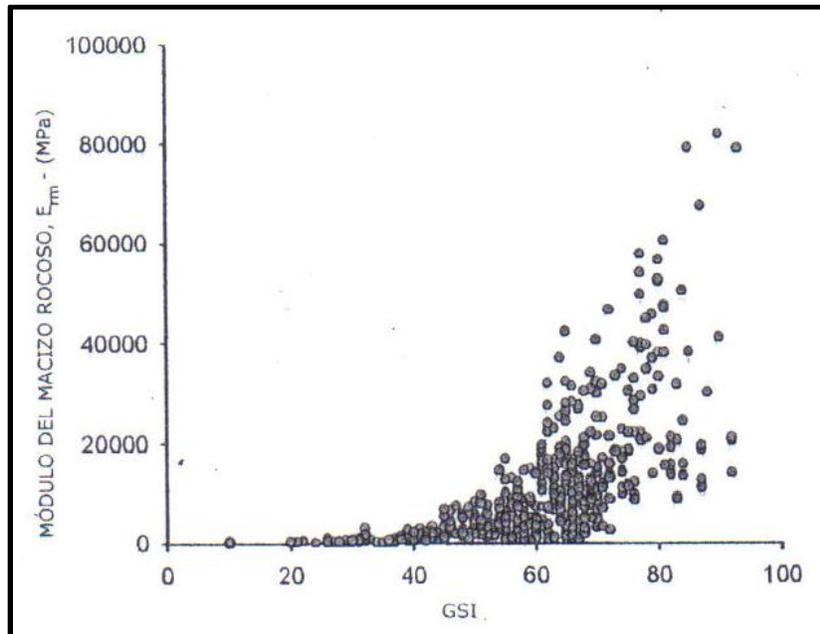


Figura 36. Relación del módulo de deformación del macizo rocoso con la clasificación GSI. Fuente: Hoek, 2008

Cualquier intento para establecer el módulo de deformación del macizo rocoso con nubes de puntos como los mostrados en la Figura 36, tendrá un resultado de muy baja confiabilidad. Zhang L., Einstein H.M.¹⁸ actualizaron información respecto a las relaciones establecidas con anterioridad para estimar módulos de deformación del macizo rocoso, involucrando valores de laboratorio y campo, con resultado presentado en la Figura 37.

Como se puede observar en la gráfica, los datos están muy dispersos debido probablemente al componente subjetivo en la toma del RQD. Además, es evidente que el RQD no reúne todas las características del macizo rocoso.

¹⁸ Zhang L., Einstein H.M. – Estimación de los módulos de deformación de los macizos rocosos a partir del RQD. IngeoTÚNELES, Libro 13. Cap. 3, Editor López Jimeno, Madrid, 2007. Pags 65-73.

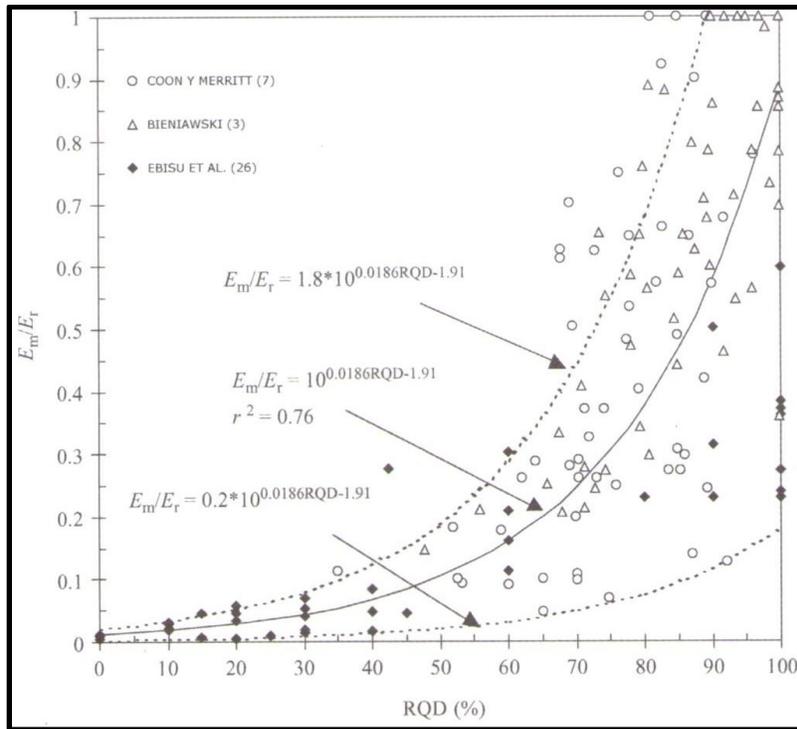


Figura 37. Relaciones entre RQD y E_m/E_r , en donde E_m es el módulo de deformación del macizo rocoso y E_r el de la muestra intacta, Fuente: Zhang, 2007.

Con base en lo expuesto anteriormente queda claro que la magnitud del módulo de deformación depende del grado de alteración del macizo rocoso. Al parecer, la tendencia en este campo es estimar el módulo de deformación del macizo rocoso utilizando una clasificación geotécnica multiparámetros para involucrar la mayor cantidad posible de propiedades.

5.2.3. Módulo de deformación del macizo rocoso y velocidad de las ondas

Buscando mejorar los procedimientos para hallar el módulo de deformación del macizo rocoso, el empleo de los métodos no destructivos MND surge como una alternativa muy promisoría debido a su sencillez, escasa subjetividad y bajo costo, para el desarrollo del presente proyecto de investigación se ejecutaron pruebas de Down Hole en los sitios donde se adelantó la exploración del subsuelo y ensayos de velocidad de pulso ultrasónico sobre especímenes de roca en el laboratorio, los dos métodos con la finalidad de obtener la velocidad de ondas de los materiales rocosos, vale la pena mencionar que

la velocidad de las ondas involucra en gran porcentaje el grado de alteración del macizo rocoso.

En la mayoría de los procedimientos para utilizar el MND, relacionan directamente el “ $E^{(m)}$ ” con la velocidad, notándose particularidad por grupo litológico. Para hacerlo más universal, falta un parámetro que sea atribuible a cualquier litología. Ese eslabón que hace falta para completar la cadena es el módulo de deformación estático, hallado en laboratorio. Con base en lo anterior, el módulo de deformación del macizo rocoso “ $E^{(m)}$ ” se debe expresar mediante una ecuación del tipo.

$$E^{(m)}=f(v_p^{(m)}, v_p^{(l)}, E^{(l)}) \quad (26)$$

Sólo en los procedimientos introducidos por Savich se puede incluir el módulo de deformación hallado en laboratorio. Las gráficas presentadas en las figuras 38, 39 y 40 se obtiene la curva patrón para tres tipos de litología, calizas, areniscas y arcillolitas arenosas, involucrando el módulo de deformación hallado en el laboratorio, los valores de K_i y K_e empleados para el análisis se presentan en el anexo 4. Los valores presentados en la gráfica de la figuras 38, 39 y 40 se obtuvieron a partir del cálculo de los índices de integridad de velocidades de onda e índices de integridad del módulo de deformación eliminando un 10% de los datos más alejados de la mediana calculada estadísticamente, correspondiente al porcentaje de datos que puede ser separada para este tipo de análisis.

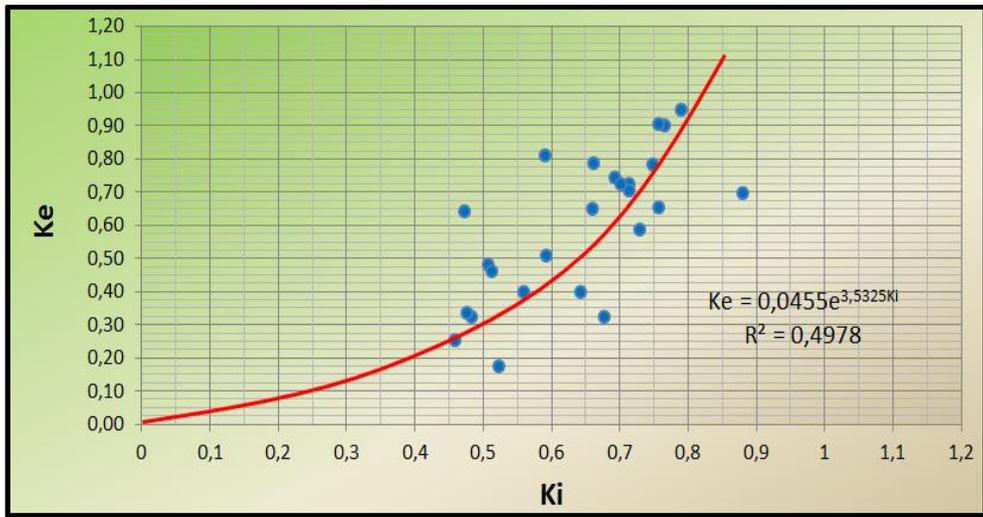


Figura 38. Relación entre el índice de integridad de velocidad de ondas K_i e índice de integridad de deformación K_e para rocas calizas de la Formación Belencito. Fuente: Propia

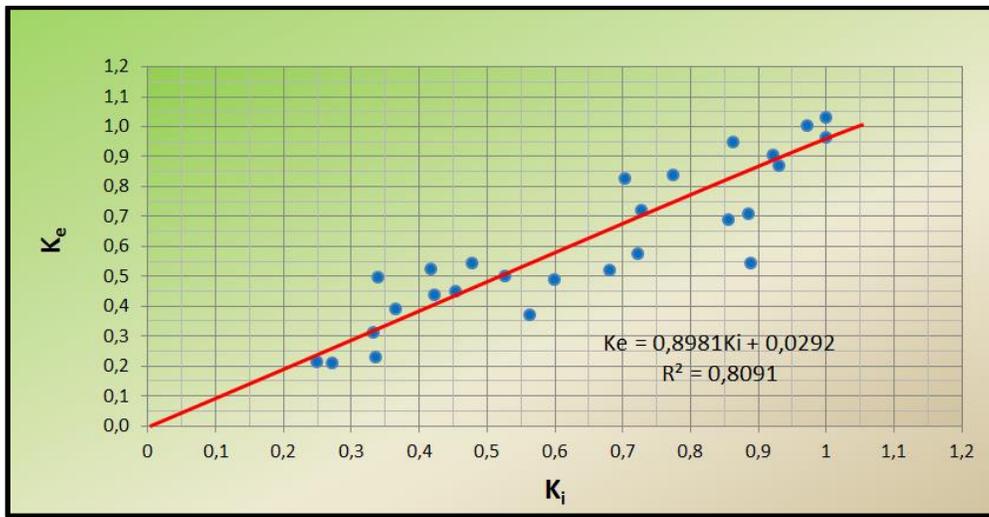


Figura 39. Relación entre el índice de integridad de velocidad de ondas K_i e índice de integridad de deformación K_e para rocas areniscas de la Formación Arenisca Tierna. Fuente: Propia

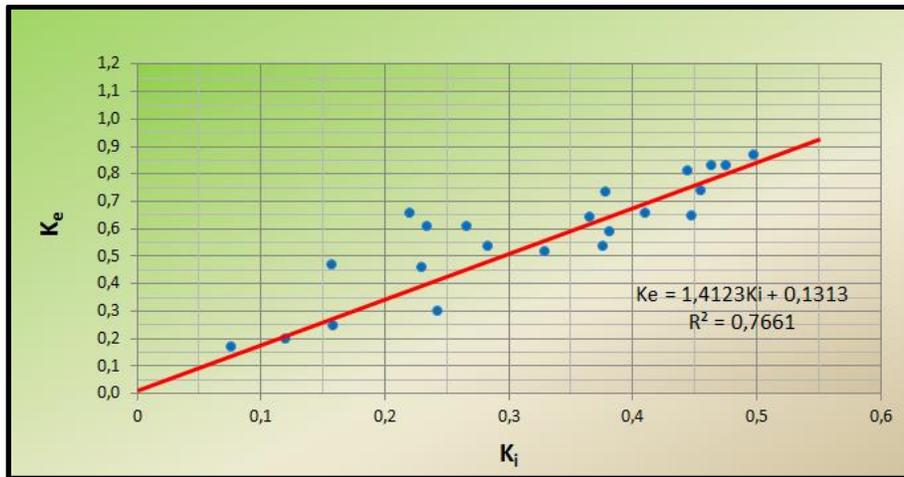


Figura 40. Relación entre el índice de integridad de velocidad de ondas K_i e índice de integridad de deformación K_e para rocas arcillolitas arenosas de la Formación Caja. Fuente: **Propia**

Como se puede ver en las gráficas precedentes, los puntos graficados se aproximan suficientemente a la relación expresada en la siguiente ecuación

$$K_E = a * K_i^b \quad (27)$$

En este caso de las Figuras anteriores, los que más se adaptan estadísticamente en la ecuación 27 son: 1.0 para “a” y 2.0 para “b” de otra parte, el comportamiento de las curvas patrones mantienen la misma forma en los tres materiales investigados pero el módulo de deformación del macizo rocoso se calculará para cada tipo de roca con base en las gráficas obtenidas.

El módulo de deformación del macizo rocoso se podrá obtener mediante las siguientes expresiones, que corresponden con deducciones teóricas y comprobadas experimentalmente a lo largo del desarrollo del presente trabajo de investigación.

$$E_{(m)} = E_{max} K_i^2 \quad (28)$$

$$K_i = (v_{p(m)}/v_{p_{max}})^2 \quad (29)$$

En estas ecuaciones todos los parámetros que intervienen son experimentales, toda vez que el “ E_{max} ” se obtiene en ensayos estáticos de laboratorio, el “ $v_{p(m)}$ ” se obtiene con pruebas sísmicas en el macizo rocoso y el “ $v_{p_{max}}$ ” se obtiene con el ensayo de velocidad del pulso ultrasónico en laboratorio. Como se puede observar, con la aplicación de este procedimiento, se logra alejar sustancialmente el factor subjetivo. En la tabla 11 se presentan algunos valores del módulo de deformación para los macizos rocosos a partir de las gráficas obtenidas.

Tabla 11. Valores del módulo de deformación del macizo rocoso obtenidos a partir de la relación de los índices de integridad de Savich K_i y K_e para diferentes tipo de roca.

Tipo de roca	Vp max (m/seg)	E _{max} (Mpa)	K _i	K _e	E(m) (Mpa)
Calizas de la Formación Belencito	5386	55160	0.20	0.075	3817
			0.40	0.220	11197
			0.60	0.425	21631
			0.80	0.925	47079
Areniscas de la Formación Arenisca Tierna	3300	33300	0.20	0.180	5994
			0.40	0.380	12655
			0.60	0.575	19148
			0.80	0.775	25808
Arcillolitas arenosas de la Formación Caja	4146	7030	0.20	0.330	2320
			0.30	0.500	3516
			0.40	0.675	4746
			0.50	0.830	5836

Fuente: Propia

De acuerdo con los resultados obtenidos y consignados en la tabla 11, existe una relación directamente proporcional entre el índice de integridad del módulo de velocidad de ondas longitudinales K_i y el índice de integridad del módulo de deformación estático K_e , para los tres tipos de rocas investigadas. El módulo de deformación del macizo rocoso calculado es mayor para rocas competentes y más bajo para rocas blandas. Las velocidades de onda obtenidas en macizo rocoso conformado por areniscas corresponden con los valores más bajos en el proyecto de investigación, debido posiblemente al intenso fracturamiento del macizo producto de la actividad tectónica de la zona donde se adelantó la exploración (Cerros Orientales de la ciudad de Bogotá)

5.2.4. Compresión uniaxial del macizo rocoso y velocidad de las ondas

La resistencia a la compresión simple o uniaxial " σ_c " obtenida en el laboratorio no es aplicable al macizo rocoso, debido a que los especímenes ensayados en el laboratorio no representan las condiciones de alteración del macizo rocoso.

Para determinar la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso no existen actualmente equipos ni procedimientos que logren obtener este parámetro tan importante a tener en cuenta en los análisis de ingeniería. En la antigüedad se hicieron algunos ensayos en galerías de prueba, labrando prismas, pero esto resultaba muy complicado y costoso con unos resultados muy puntuales, de poca utilidad, situación que condujo a abandonar esta práctica.

Dadas estas circunstancias, la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso es una propiedad que hasta ahora no se obtiene en el macizo, recurriéndose a procedimientos teóricos para tratar de obtener un dato a partir de los resultados de laboratorio o utilizando clasificaciones u otras características del material. Ningún procedimiento, fórmula o expresión ha podido ser comprobado en la práctica, razón por la cual es viable afirmar que este es un problema que no ha sido resuelto por la Mecánica de Rocas mediante métodos tradicionales y no se ven soluciones a la vista.

Ya en 1956 Ruppeneit¹⁹ anotaba que la resistencia a la compresión simple de los especímenes de roca no era aplicable al macizo rocoso, indicando a la vez que debido a las discontinuidades y defectos del macizo rocoso, era de esperar que en éste la resistencia a la compresión simple fuera menor.

El enfoque más antiguo sobre el tema aparece como resultado del análisis de la Teoría de Coulomb- Mohr. En este caso se obtiene que la resistencia a la compresión simple del

¹⁹ Ruppeneit K.V. – Propiedades Mecánicas de las Rocas. Ugletejizdat. Moscú, 1956. -322 pags. (en ruso).

macizo rocoso – $\sigma_c^{(m)}$ puede obtenerse en función de los parámetros de corte en las discontinuidades.

$$\sigma_c^{(m)} = (2c \cos \varphi) / (1 - \text{Sen} \varphi) \quad (30)$$

La anterior ecuación es recomendada también por Hoek²⁰ para el macizo rocoso.

Tal como se observa, en esta expresión no se incluye la resistencia a la compresión simple obtenida en laboratorio " $\sigma_c^{(l)}$ ". Si se emplea esta fórmula, entonces se pierde toda la información obtenida para esta propiedad en el laboratorio y serían útiles sólo los ensayos de corte directo por discontinuidades. Además, tampoco participa en el resultado el grado de fracturamiento del macizo rocoso, que como se sabe, influye sustancialmente en la resistencia. Estas deficiencias no hacen atractivo este procedimiento.

En la evolución de este tema, parece que la tendencia es a obtener el valor de " $\sigma_c^{(m)}$ " como un producto del valor de laboratorio afectado por un coeficiente de debilitamiento " k_d ", el cual varía entre 0 y 1, dependiendo del grado de fracturamiento del macizo rocoso.

$$\sigma_c^{(m)} = k_d \sigma_c^{(l)} \quad (31)$$

El coeficiente de debilitamiento ha tenido muchos significados. Borisov²¹ en 1980 le dio el valor de 0.30 a 0.35, para macizos medianamente fracturados, pero no dio indicativos para otros niveles de fracturamiento.

Katsaurov²² recomienda obtener la resistencia a la compresión del macizo rocoso con ayuda de los ensayos de laboratorio y aplicación del coeficiente de debilitamiento obtenido por VNIMI, mostrado en la Tabla 12.

Si en la ecuación del Criterio de Rotura de Hoek-Brown para macizos rocosos fracturados, se toma $\sigma_3 = 0$, se obtiene la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso, $\sigma_1 = \sigma_c(s)^a$. Entonces,

²⁰ Hoek E., Kaiser P.K., Bawden WF. – Support of Underground Excavations in Hard Rock. Balkema. Rotterdam, 1997. -215 pags.

²¹ Borisov A.A. – Mecánica de Rocas y Macizos. Nedra. Moscú, 1980. (en ruso).

²² Katsaurov I.N. – Mecánica de Rocas. Nedra. Moscú, 1981. -166 pags. (en ruso).

$$k_d = (s)^a \quad (32)$$

$s = \exp((GSI-100)/9)$, $a = 0.5$; para macizos rocosos de $GSI > 25$;

$s = 0$, $a = 0.65 - GSI/200$; para macizos rocosos con $GSI < 25$.

En esta relación, que tiene carácter empírico, interviene el GSI, el cual se obtiene con un buen componente subjetivo, toda vez que la clasificación GSI es eminentemente cualitativa.

Tabla 12. Coeficientes de debilitamiento del macizo rocoso. Fuente Hoek, 2008

Clase de macizo	Descripción	Kd
Monolítico	<ul style="list-style-type: none"> - Estratificación > 1 m. - No más de un sistema de fracturamiento - Distancia entre fracturas > 2 m. 	1.0
Poco fracturado	<ul style="list-style-type: none"> - Estratificación 0.5 – 1.0 m - No más de dos sistema de fracturamiento - Distancia entre fracturas > 1.5 m. 	0.7
Fracturado	<ul style="list-style-type: none"> - Estratificación menor de 0.5 m - 3 sistemas de fracturas - Distancia entre fracturas < 1.0m 	0.3
Muy fracturado	<ul style="list-style-type: none"> - Zonas de trituración - Más de 3 sistemas de fracturamiento - distancia entre fracturas < 1.0 m 	<0.3

Con la utilización de los MND los intentos que se han hecho para hallar la resistencia a la compresión uniaxial a partir de la velocidad de las ondas han chocado con la gran dispersión que se obtiene y el hecho de obtener resultados particulares por grupo litológico. En este caso, como en el del módulo de deformación, falta un eslabón, y ese

es, la resistencia a la compresión uniaxial hallada en laboratorio. Incluyendo ese parámetro, la ecuación debe ser:

$$\sigma^{(m)} = f(v_p^{(m)}, v_p^{(l)}, \sigma_c^{(l)}) \quad (33)$$

También, para la resistencia a la compresión uniaxial, el procedimiento que más se aproxima es el de Savich.

Las gráficas presentadas en las figuras 41, 42 y 43 se obtiene la curva patrón para tres tipos de litología, calizas, areniscas y arcillolitas arenosas, involucrando la resistencia a la compresión simple hallada en el laboratorio, los valores de K_i y K_R empleados para el análisis se presentan en el anexo 4. Los valores presentados en la gráfica de la figura 41, 42 y 43 se obtuvieron a partir del cálculo de los índices de integridad de velocidades de onda e índices de integridad de la resistencia a la compresión simple eliminando un 10% de los datos más alejados de la mediana calculada estadísticamente, correspondiente al porcentaje de datos que puede ser separada para este tipo de análisis.

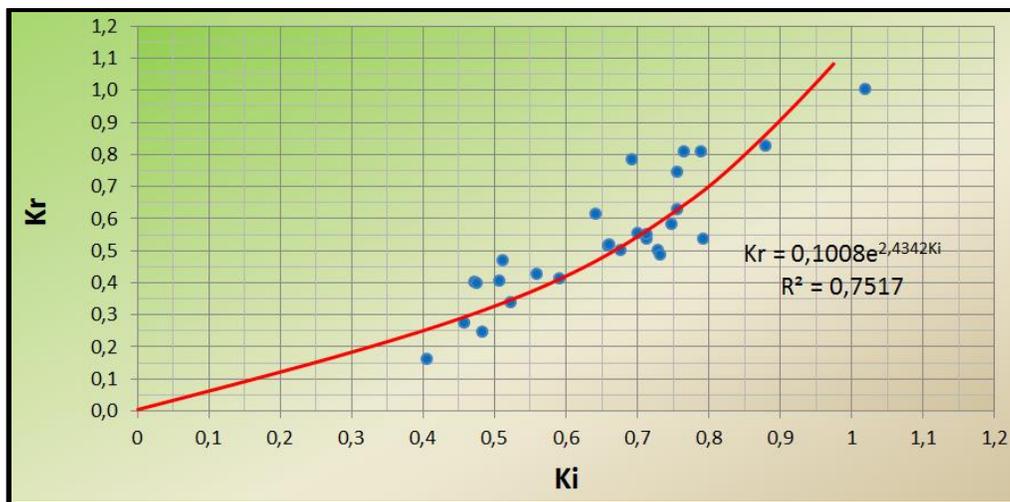


Figura 41. Relación entre el índice de integridad de velocidad de ondas K_i e índice de integridad de la resistencia a la compresión simple K_r para rocas calizas de la Formación Belencito. Fuente: Propia

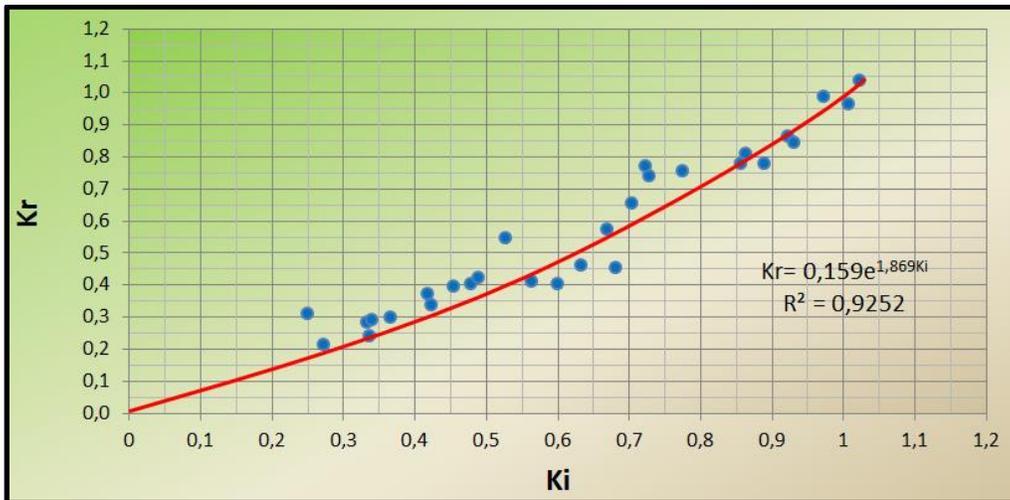


Figura 42. Relación entre el índice de integridad de velocidad de ondas K_i e índice de integridad de la resistencia a la compresión simple K_r para rocas areniscas de la Formación Arenisca Tierna. Fuente: Propia

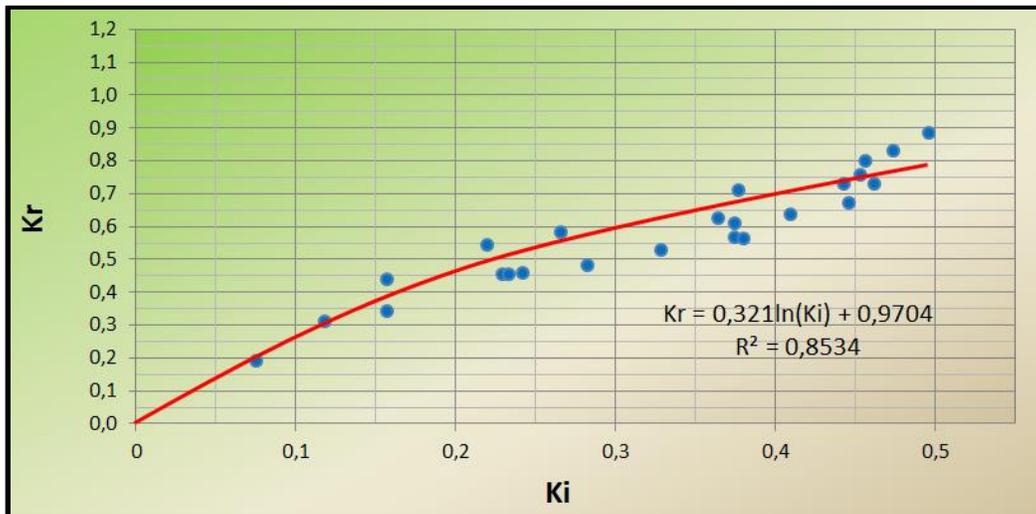


Figura 43. Relación entre el índice de integridad de velocidad de ondas K_i e índice de integridad de la resistencia a la compresión simple K_r para rocas arcillolitas arenosas de la Formación Caja. Fuente: propia

Como se puede observar en las gráficas precedentes, los puntos se ajustan suficientemente a la relación

$$K_R = a'K_i^{b'} \quad (34)$$

Para este caso, como en el módulo de deformación, los valores que más se ajustan son: 1.0 para a' 2.0 para b'. Del mismo modo que en el módulo de deformación, también para la resistencia, estos valores pueden tener variaciones.

La resistencia a la compresión simple del macizo rocoso se podrá obtener mediante las expresiones 35 y 36, que corresponden con deducciones teóricas y comprobadas experimentalmente a lo largo del desarrollo del presente trabajo de investigación.

$$\sigma^{(m)} = \sigma_{\max} K_i^2 \quad (35)$$

$$K_i = (v_p^{(m)} / v_{p \max})^2 \quad (36)$$

En estas ecuaciones todos los parámetros que intervienen son experimentales, toda vez que el “ σ_{\max} ” se obtiene en ensayos estáticos de laboratorio, el “ $v_p^{(m)}$ ” con pruebas Down Hole en el macizo rocoso y el “ $v_{p \max}$ ” con pruebas de velocidad de pulso ultrasónico en laboratorio. Como en el módulo de deformación, en este caso también se logra alejar sustancialmente el factor subjetivo. En la tabla 13 se presentan algunos valores del módulo de deformación para los macizos rocosos a partir de las gráficas obtenidas.

Tabla 13. Valores de la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso obtenidos a partir de la relación de los índices de integridad de Savich K_i y K_r para diferentes tipo de roca.

Tipo de roca	Vp max (m/seg)	σ_{\max} (Mpa)	K_i	K_r	$\sigma^{(m)}$ (Mpa)
Calizas de la Formación Belencito	5386	83,20	0.20	0.125	10.40
			0.40	0.250	20.80
			0.60	0.425	35.40
			0.80	0.700	58.00
Areniscas de la Formación Arenisca Tierna	3300	83.00	0.20	0.140	11.60
			0.40	0.285	23.70
			0.60	0.475	39.00
			0.80	0.710	59.00
Arcillolitas arenosas de la Formación Caja	4146	35.00	0.10	0.260	9.00
			0.20	0.450	16.00
			0.30	0.600	21.00
			0.40	0.700	24.00

Fuente: Propia

De acuerdo con los resultados obtenidos y consignados en la tabla 13, existe una relación directamente proporcional entre el índice de integridad del módulo de velocidad de ondas longitudinales K_i y el índice de integridad de la resistencia a la compresión simple K_r , para los tres tipos de rocas investigadas. Del mismo modo que se obtuvieron los mayores valores del módulo de formación para rocas competentes, en este caso también se obtienen los mayores valores de resistencia a la compresión simple para macizos rocosos conformados por rocas calizas y areniscas correspondientes a las formaciones Belencito y Arenisca Tierna respectivamente. Como era de esperarse, la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso conformado por arcillolitas (Formación Caja) resultó ser la más baja con valores menores a 30 Mpa asociada a las velocidades de onda.

Empleando los índices de integridad de Savich se obtuvieron valores del módulo de deformación y de la resistencia a la compresión simple para el macizo rocoso siendo estos de menor magnitud que los obtenidos directamente sobre muestras de roca sana mediante pruebas de laboratorio de acuerdo con las gráficas de las figuras 19, 20 y 21 y , 24,25 y 26 respectivamente, lo cual resulta ser lógico ya que estos parámetros deben ser más bajos en el macizo rocoso al tener en cuenta el factor escala, el diaclasamiento, la presencia de agua y otros factores que hacen que las propiedades mecánicas del macizo desmejoren. Para los macizos rocosos estudiados se obtuvieron valores del módulo de deformación y resistencia a la compresión simple que oscilan entre el 70 y 80% de las magnitudes obtenidas en el laboratorio sobre muestras de roca sana.

6. Procedimiento para Aplicar el Método

A continuación se lleva a cabo la descripción del procedimiento a tener en cuenta para la obtención de parámetros geomecánicos del macizo rocoso aplicando los métodos no destructivos (MND). Las actividades se desarrollan en tres etapas: Trabajos de campo, Pruebas de laboratorio y procesamiento de información en oficina:

6.1. Etapa de campo

- ✓ Ejecución de perforaciones mecanizadas con el método de rotación y obtención de muestreo continuo usando brocas de diamante y corazonamiento continuo y diámetros NQ.
- ✓ Obtención de especímenes de roca cilíndricos en los sitios donde se quiera hallar el módulo de deformación del macizo rocoso y resistencia uniaxial, buscando muestrear todos los tipos litológicos que se encuentren en el lugar.
- ✓ Seleccionar los núcleos de roca más sanos y que cumplan con las dimensiones estandarizadas para ensayos de compresión uniaxial, se recomienda seleccionar al menos 30 especímenes con la finalidad de obtener correlación satisfactoria de la información una vez se realicen las pruebas de laboratorio.
- ✓ Ejecutar pruebas de refracción sísmica y/o Down Hole en los sitios donde se lleven a cabo las perforaciones mecanizadas con la finalidad de obtener las velocidades de ondas compresionales (P) y de corte (S) en el macizo rocoso a estudiar.

6.2. Etapa de laboratorio

- ✓ Con ayuda de una cortadora con disco de polvo de diamante cortar los especímenes de roca cumpliendo con las dimensiones estándar, esto es, altura de dos veces el diámetro, se recomienda el alistamiento de al menos 30 muestras.
- ✓ A cada muestra alistada realizarle el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico obteniendo la velocidad de ondas P (por grupo litológico)
- ✓ Instalar deformímetros tipo Strain gauge a cada una de las muestras de roca para medición de deformación axial durante la prueba de resistencia a la compresión simple
- ✓ A los núcleos ensayados con ultrasonido hacerles ensayos estáticos a la compresión simple, tomando también la información de deformaciones.

6.3. Etapa de oficina

- ✓ Elaborar la curva esfuerzo-deformación para cada muestra ensayada. En esa curva tomar los resultados de resistencia a la compresión y módulo de deformación. Éste último hallarlo tangencial a la curva en el 50% de la resistencia a la compresión.
- ✓ Seleccionar los resultados por grupos litológicos. Debe haber por lo menos 30 ensayos por grupo litológico.
- ✓ Tomar los 3 valores más altos de la serie por grupo litológico y obtener su promedio, tanto en resistencia a la compresión como en módulo de deformación y velocidad de pulso ultrasónico. Estos valores son: $\sigma_{c \max}$, E_{\max} , $v_{p \max}$.
- ✓ Obtener el índice de integridad de velocidad "Ki", y hallar el módulo de deformación "E(m)" y resistencia a la compresión uniaxial " $\sigma_c(m)$ " de los macizo rocosos a investigar mediante las fórmulas indicadas en el presente documento.

7. Conclusiones

- ❖ El módulo de deformación y la resistencia a la compresión simple de un macizo rocoso se convierten en los parámetros más importantes a la hora de desarrollar un proyecto de ingeniería en un medio rocoso.
- ❖ Con los métodos tradicionales y con el desarrollo de la ciencia no siempre es posible y viable obtener el módulo de deformación de un macizo rocoso in-situ, adicionalmente no existen medios para determinar directamente la resistencia a la compresión uniaxial in-situ del macizo rocoso, de otra parte, estos parámetros son definidos indirectamente mediante métodos empíricos relacionándolos con otras propiedades.
- ❖ Los trabajos de campo para el presente proyecto de investigación se concentraron sobre afloramientos de rocas calizas de la Formación Belencito, rocas areniscas de la Formación Arenisca Tierna del Grupo Guadalupe y Rocas arcillolitas arenosas de la Formación Caja y consistieron en la obtención de especímenes de roca mediante perforaciones mecanizadas, ejecución de pruebas Downhole y medición del parámetro de RQD,
- ❖ Para el desarrollo del programa de laboratorio se ejecutaron ensayos no destructivos midiendo la velocidad de pulso ultrasónico sobre 90 muestras de roca, del mismo modo se ejecutaron pruebas destructivas de compresión uniaxial al mismo número de muestras con medición de la deformación axial mediante Straining gage.
- ❖ Con la ejecución de pruebas Downhole se obtuvieron velocidades de onda compresionales de 4000 m/seg para rocas calizas, 2850 m/seg para areniscas y 2700 m/seg para rocas arcillolitas, la velocidad de las ondas de corte arrojaron valores de 1710 m/seg, 889 m/seg y 1050 m/seg para el mismo tipo de rocas respectivamente.
- ❖ La relación entre la velocidad de ondas compresionales y ondas de corte en los macizos rocosos analizados es del 45% en promedio, siendo menor a la relación

que se obtiene en macizos rocosos de Europa, posiblemente al intenso tectonismo que ha afectado las cordilleras colombianas y por ser rocas más jóvenes en procesos de consolidación.

- ❖ Existe una relación satisfactoria entre la velocidad de las ondas longitudinales V_p y la resistencia a la compresión simple σ_c para cada tipo de roca ensayada en el laboratorio obteniéndose factores de correlación R^2 cercanos a 1.0, los análisis indican que para determinar la resistencia a la compresión uniaxial a partir de la velocidad de las ondas se requiere haber elaborado antes las curvas específicas del tipo de roca a investigar
- ❖ De acuerdo con las pruebas Downhole de campo y con los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico de laboratorio se observó que la velocidad de ondas es menor en el macizo rocoso que las obtenidas en el laboratorio y están directamente relacionadas con el RQD a mayor presencia de discontinuidades la velocidad de las ondas es menor y aumenta además con la profundidad.
- ❖ Los índices de integridad propuestos por Savich, tienen como característica principal comparar un material rocoso independientemente del grado de alteración con una muestra patrón del mismo material, en la aplicación de los MND se recomienda utilizar usar estos índices con los procedimientos formulados en este documento.
- ❖ Con el desarrollo del presente trabajo se logró establecer una relación directamente proporcional entre el índice de integridad del módulo de velocidad de ondas longitudinales K_i y el índice de integridad del módulo de deformación estático K_e , para los tres tipos de rocas investigadas. El módulo de deformación del macizo rocoso calculado es mayor para rocas competentes y más bajo para rocas blandas.
- ❖ Con el análisis de resultados se logró establecer una relación entre el índice de integridad del módulo de velocidad de ondas longitudinales K_i y el índice de integridad de la resistencia a la compresión simple K_r , para los tres tipos de rocas investigadas. Del mismo modo que se obtuvieron los mayores valores del módulo de

formación para rocas competentes, en este caso también se obtienen los mayores valores de resistencia a la compresión simple para macizos rocosos conformados por rocas calizas y areniscas correspondientes a las formaciones Belencito y Arenisca Tierna respectivamente. Como era de esperarse, la resistencia a la compresión simple del macizo rocoso conformado por arcillolitas (Formación Caja) resultó ser la más baja con valores menores a 30 Mpa relacionada a las velocidades de onda

- ❖ Empleando los índices de integridad de Savich se obtienen valores del módulo de deformación y de la resistencia a la compresión simple para cualquier macizo siendo estos de menor magnitud que los obtenidos directamente sobre muestras de roca sana mediante pruebas de laboratorio, lo cual resulta ser lógico ya que estos parámetros deben ser más bajos en el macizo rocoso al tener en cuenta el factor escala, el diaclasamiento, la presencia de agua y otros factores que hacen que las propiedades mecánicas del macizo desmejoren.
- ❖ Los MND se han constituido en una alternativa moderna para definir las propiedades mecánicas mencionadas, toda vez que han resultado confiables, minimizan la subjetividad, son sencillos y económicos, por tal razón se extiende la invitación a los ingenieros geotecnistas para aplicar el método en el desarrollo de los proyectos de ingeniería.

8. Bibliografía

- Barton N. (2007). *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. Taylor & Francis. London, 2007. -729 p.
- Borisov A.A. (1980). *Mecánica de Rocas y Macizos*. Nedra. Moscú, (en ruso).
- Budetta P., de Riso R., de Luca C. (August 2001). *Correlations between jointing and seismic velocities in highly fractured rock masses*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. 60, Num. 3,. Pags 185-192.
- Dong Xuecheng (1993)– *Rock Mechanics Investigations related to the Three Gorges Dam Project*. “News Journal”, ISRM Vol. 1 No. 4, P. 6-12.
- Galera F. J. (1997). *Caracterización Geotécnica de Macizos Rocosos. Cap 6 del Manual de Túneles y Obras Subterráneas*. Editor López Jimeno. Entorno Gráfico S.L. Madrid, P 143-182.
- Golodkovskaya N.N., Liajovskiy F.M.(1986). *Estudio de las Propiedades Físico-mecánicas de las Rocas por el Método de Sondeo Acústico de Perforaciones en Exploración de Yacimientos*. *Ingeniería Geológica*. No.3, en ruso P 96-104.
- Gupta A.S., Seshagiri Rao K. (Sept 1998). *Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol 57 Nu. 2 . P 161-172.
- Hoek E., Diederich M.S.(2008) – *Estimación de módulos de los macizos rocosos*. Ingeo TÚNELES, libro 14, Capítulo 1, Editor López Jimeno, Madrid. P. 31-53.
- Hoek E., Kaiser P.K., Bawden WF (1997). – *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Balkema. Rotterdam,P215.

- Jagdish M.G., Prem D.(1983). *Correlation Between Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Rocks*. "Irrigation and Power", New Delhi. Vol. 40, No.2, April. P 181-187.
- Katsaurov I.N.(1981) – *Mecánica de Rocas. Nedra*. Moscú, P166 (en ruso).
- Nikitin V.N. (1959)– *Experimento de registro de ondas refractadas intercambiadas tipo PSP con el fin de calcular las constantes elásticas de diabasas bajo depósitos detríticos*. "Ediciones de AN CCCP. Serie Geofísica", No. 8(en ruso).
- Nikitin V.N. (1981). *Fundamentos de Ingeniería Sísmica*. MGU. Moscú . P 176
- Métodos geofísicos modernos usados para exploraciones. Bogotá, Anales de Ingeniería. No 396, Marzo de 1926. Pags 565-571.
- Prochujan D.P., Frid S.A., Domanskiy L.K. (1971). *Fundaciones Rocosas de Obras Hidráulicas*. Leningrado, 1971 – P190. (en ruso).
- Puerto G.J. (1997) – *Métodos No Destructivos en Mecánica de Rocas*. Revista Ingeniería de Minas. UPTC. No 9, P. 55-62.
- Ruppeneit K.V. (1956). *Propiedades Mecánicas de las Rocas*. Ugletejizdat. Moscú, - P 322 . (en ruso).
- Ruiz V. M., González H. S. (2002). *Geología Aplicada a la Ingeniería Civil*. Edit. Limusa. P 256.
- Savich A.I. y otros (1969). *Métodos Sismoacusticos para el Estudio de Macizos Rocosos*. (en ruso).
- Savich A.U. (1984) – *Relaciones generalizadas entre índices estáticos y dinámicos de deformación en rocas*. "Construcciones Hidrotécnicas", Moscú, No. 8,. P 50-54.
- Savich B.D., Kuyundich V.I., otros (1990). *Investigaciones Geofísicas Complejas*.P 462 (En ruso)

- Stagg K.G., Zienkiewicz O.C. (1968). *Rock Mechanics in Engineering Practice*. Wiley & Sons, London 442
- Tugrul A., Zarif I.H. (2000). *Engineering aspects of limestone weathering in Istanbul, Turkey*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Vol 58, P. 191-206.

9. ANEXOS

Anexo A. Registros de perforación y columnas litoestratigráficas

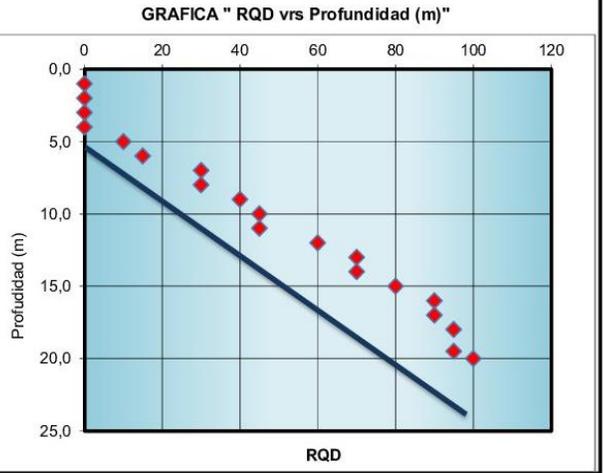
MEMORIA DE SONDEO										
PROYECTO	APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO			OPERARIO	JAIRO MONROY			PERFORACIÓN No.	1	
REALIZÓ	ELDIBRANDO PATIÑO			AYUDANTE	VICTOR ORTIZ CARLOS SALINAS			FECHA DE EJECUCIÓN	OCTUBRE DE 2014	
LOCALIZACIÓN	Mina San Antonio			EQUIPO	MECANICO			HOJA N°	1	de 1
				INCLINACIÓN	VERTICAL					
TABLA DE AGUA (m)					TOTAL PERFORACIÓN					
FECHA				RELLENOS			SUELOS RESIDUALES			
A.M.										
P.M.										
GRAF.	PROF.(m)	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	PERFORACIÓN		Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	RQD	GRAFICA " Vp vrs Vs (m/seg)"		
			DE	A						
	2,00	Limo arenosos color café amarillento de humedad baja, presenta raíces delgadas, óxidos de hierro, micas y carbonatos de calcio. Contiene clastos de lutita, caliza y cuarzo tamaño 0,5 - 3,0 centímetros.	0,00	1,00	1490,7	1315,3	10		GRAFICA " RQD vrs Profundidad (m)" 	
			1,00	2,00	890,9	388,4	10			
			2,00	3,00	1543	444,1	10			
	3,80	Limo arcilloso color café-naranja con trazas arcillosas de color gris claro, este material muestra plasticidad media y bajo contenido de humedad, contiene óxidos de hierro y micas.	3,00	4,00	745,4	435,2	30			
			4,00	5,00	865,3	479,8	40			
			5,00	6,00	915,7	523,9	40			
			6,00	7,00	2476,7	1344,5	45			
	8,60	Intercalaciones de Limolita calcárea color gris claro fosilífera altamente diaclasada y alterada, las diaclasas están rellenas de óxidos de hierro con Caliza fosilífera de color gris claro oxidada, fracturada, alterada y diaclasada.	7,00	8,00	3289,7	871,9	40			
			8,00	9,00	3423,8	955,2	60			
			9,00	10,00	3541,1	962,5	60			
	17,00	Caliza altamente fosilífera color gris claro con óxidos de hierro, levemente fracturada y diaclasada, relativamente sana.	10,00	11,00	3644,7	1605	70			
			11,00	12,00	2878,7	1299,8	80			
			12,00	13,00	3798	1465,9	75			
			13,00	14,00	3872,5	1195,8	75			
			14,00	15,00	3939,9	1690	90			
			15,00	16,00	4001,1	1710,8	80			
			16,00	17,00	3076,5	1217,5	80			

MEMORIA DE SONDEO

PROYECTO	APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO	OPERARIO	JAIRO MONROY	PERFORACIÓN No. 2					
				AYUDANTE	VICTOR ORTIZ				
REALIZÓ	ELDIBRANDO PATIÑO	EQUIPO	MECANICO	FECHA DE EJECUCIÓN		FEBRERO DE 2015			
LOCALIZACION	Carrera 7ª con calle 171B Bogotá	INCLINACIÓN	VERTICAL	HOJA N°	1	de	1		

TABLA DE AGUA (m)				TOTAL PERFORACIÓN					
FECHA	A.M.	P.M.		RELLENOS				SUELOS RESIDUALES	

GRAF.	PROF. (m)	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	PERFORACIÓN		Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	RQD	<div style="text-align: center;"> GRAFICA " Vp vs Vs (m/seg)" </div>
			DE	A				
	4,00	Suelo residual conformado por material limo arenoso color amarillo de baja consistencia, presenta alto contenido de óxidos de hierro.	0,00	1,00	456,2	453,3	0	
			1,00	2,00	409,4	638,7	0	
			2,00	3,00	510,4	308,6	0	
			3,00	4,00	557	382,8	0	
	12,00	Areniscas de grano muy fino color beige de naturaleza cuarzosa con delgadas intercalaciones de arcillolita color gris, presenta óxidos de hierro y se encuentra altamente fracturada y diaclasada.	5,00	6,00	487,9	339	10	
			6,00	7,00	921,7	491,3	15	
			7,00	8,00	1121,8	383,7	30	
			8,00	9,00	1159,1	383,9	30	
			9,00	10,00	927,6	433,9	40	
			10,00	11,00	1102	368,6	45	
			11,00	12,00	2051,5	647,8	45	
			12,00	13,00	2116,4	434,6	60	
	20,00	Arenisca cuarzosa color blanco de grano muy fino levemente fracturada, con delgados niveles de limolitas arenosas y de arcillolitas.	12,00	13,00	1837,7	453,5	70	
			13,00	14,00	2224,5	434,7	70	
			14,00	15,00	2274,9	473,7	80	
			15,00	16,00	2321,6	453,8	90	
			16,00	17,00	2418,5	512,5	90	
			17,00	18,00	2608,7	605,2	95	
			18,00	19,50	2824,8	731,1	95	
19,50	20,00	2834,8	889,2	100				



MEMORIA DE SONDEO

PROYECTO	APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO	OPERARIO	JAIRO MONROY	PERFORACIÓN No. 3			
REALIZÓ	ELDIBRANDO PATIÑO	AYUDANTE	VICTOR ORTIZ	FECHA DE EJECUCIÓN MARZO DE 2015			
LOCALIZACIÓN	Vereda Iguamena municipio de Aguazul	EQUIPO	MECANICO	HOJA N°		1	de 1
		INCLINACIÓN	VERTICAL				

TABLA DE AGUA (m)			TOTAL PERFORACIÓN				
FECHA			RELLENOS				SUELOS RESIDUALES
A.M.							
P.M.							

GRAF.	PROF.(m)	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	PERFORACIÓN		Vp (m/seg)	Vs (m/seg)	RQD	GRAFICA " Vp vs Vs (m/seg)"
			DE	A				
	0,40	Suelo orgánico, de composición limosa color café con raíces delgadas y óxidos de hierro.	0,00	1,00	790	500	0	
			1,00	2,00	723,5	448,2	10	
			2,00	3,00	725,5	449,8	40	
			3,00	4,00	750	480,7	40	
			4,00	5,00	735,8	470,9	50	
			5,00	6,00	1240,4	560,6	60	
			6,00	7,00	1900,3	520,5	60	
			7,00	8,00	2406,3	890,7	50	
			8,00	9,00	2410	890,5	60	
			9,00	10,00	2450,8	1003,6	40	
			10,00	11,00	2450,8	1003,5	90	
			11,00	12,00	2620	1305	90	
			12,00	13,00	2100,6	1020,4	90	
			13,00	14,00	2500,2	880,7	90	
			14,00	15,00	2503,5	880,3	100	
			15,00	16,00	2700,3	1050,4	100	
	17,00	Paquete de arcillolitas de color habano intercaladas con areniscas de color rojizo friables con un alto grado de fracturamiento, presencia de óxidos de hierro.	16,00	17,00	2650,6	1080,2	90	

Anexo B. Formatos de adquisición de información primaria durante la ejecución de las pruebas de velocidad de pulso ultrasonido en el laboratorio

PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO									
PROYECTO DE GRADO:	APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO								
TIPO DE ROCA:	MUESTRAS DE ROCA CALIZA DE LA FORMACION BELENCITO								
FECHA DE EJECUCIÓN:	FEBRERO DE 2015								
REALIZÓ:	ELDIBRANDO PATIÑO BARRERA								
Muestra	Lectura 1 Mseg	Lectura 2 Mseg	Lectura 3 Mseg	Promedio leturas Mseg	Promedio leturas Seg	Long (mm)	Long (m)	Vp Km/s	Vp m/s
CB-01	22,10	22,20	22,30	22,2000	2,220E-05	101,0000	0,1010	4,5495	4.549,550
CB-02	22,90	22,70	22,80	22,8000	2,280E-05	101,0000	0,1010	4,4298	4.429,825
CB-03	29,00	29,30	29,10	29,1333	2,913E-05	100,0000	0,1000	3,4325	3.432,494
CB-04	24,00	23,90	23,80	23,9000	2,390E-05	99,0000	0,0990	4,1423	4.142,259
CB-05	19,50	19,60	19,70	19,6000	1,960E-05	99,0000	0,0990	5,0510	5.051,020
CB-06	21,60	21,90	21,80	21,7667	2,177E-05	94,0000	0,0940	4,3185	4.318,530
CB-07	20,40	20,50	20,40	20,4333	2,043E-05	98,0000	0,0980	4,7961	4.796,085
CB-08	20,20	20,30	20,30	20,2667	2,027E-05	97,0000	0,0970	4,7862	4.786,184
CB-09	20,50	20,40	20,20	20,3667	2,037E-05	96,0000	0,0960	4,7136	4.713,584
CB-10	21,00	21,30	21,10	21,1333	2,113E-05	99,0000	0,0990	4,6845	4.684,543
CB-11	21,70	21,90	21,60	21,7333	2,173E-05	100,0000	0,1000	4,6012	4.601,227
CB-12	26,30	26,20	26,10	26,2000	2,620E-05	97,0000	0,0970	3,7023	3.702,290
CB-13	25,70	25,80	25,90	25,8000	2,580E-05	99,0000	0,0990	3,8372	3.837,209
CB-14	22,10	22,20	22,30	22,2000	2,220E-05	101,0000	0,1010	4,5495	4.549,550
CB-15	17,90	18,00	18,10	18,0000	1,800E-05	102,0000	0,1020	5,6667	5.666,667
CB-16	20,30	19,90	20,00	20,0667	2,007E-05	90,0000	0,0900	4,4850	4.485,050
CB-17	22,70	22,90	23,00	22,8667	2,287E-05	100,0000	0,1000	4,3732	4.373,178
CB-18	18,40	18,60	18,70	18,5667	1,857E-05	101,0000	0,1010	5,4399	5.439,856
CB-19	27,10	27,20	27,10	27,1333	2,713E-05	99,0000	0,0990	3,6486	3.648,649
CB-20	21,30	21,50	21,60	21,4667	2,147E-05	100,0000	0,1000	4,6584	4.658,385
CB-21	25,60	25,70	25,70	25,6667	2,567E-05	100,0000	0,1000	3,8961	3.896,104
CB-22	21,10	21,30	21,00	21,1333	2,113E-05	99,0000	0,0990	4,6845	4.684,543
CB-23	27,10	27,40	27,20	27,2333	2,723E-05	102,0000	0,1020	3,7454	3.745,410
CB-24	21,60	21,80	21,70	21,7000	2,170E-05	100,0000	0,1000	4,6083	4.608,295
CB-25	22,40	22,20	22,50	22,3667	2,237E-05	98,0000	0,0980	4,3815	4.381,520
CB-26	21,80	21,50	21,90	21,7333	2,173E-05	90,0000	0,0900	4,1411	4.141,104
CB-27	24,00	24,20	24,20	24,1333	2,413E-05	93,0000	0,0930	3,8536	3.853,591
CB-28	26,90	26,80	27,00	26,9000	2,690E-05	100,0000	0,1000	3,7175	3.717,472
CB-29	22,00	22,30	22,20	22,1667	2,217E-05	100,0000	0,1000	4,5113	4.511,278
CB-30	24,40	24,60	24,70	24,5667	2,457E-05	99,0000	0,0990	4,0299	4.029,851

PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO

PROYECTO DE GRADO: APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO

TIPO DE ROCA: MUESTRAS DE ROCA ARENISCA DE LA FORMACION ARENISCA TIERNA

FECHA DE EJECUCIÓN: MARZO DE 2015

REALIZÓ: ELDIBRANDO PATIÑO BARRERA

Muestra	Lectura 1 Mseg	Lectura 2 Mseg	Lectura 3 Mseg	Promedio leturas Mseg	Promedio leturas Seg	Long (mm)	Long (m)	Vp Km/s	Vp m/s
AT-01	56,5	56,3	56,4	56,40	5,640E-05	97	0,097	1,720	1719,858
AT-02	36,6	36,7	36,8	36,70	3,670E-05	99	0,099	2,698	2697,548
AT-03	39,2	39,3	39,1	39,20	3,920E-05	97	0,097	2,474	2474,490
AT-04	51,1	50,9	51	51,00	5,100E-05	97	0,097	1,902	1901,961
AT-05	38,6	38,8	38,9	38,77	3,877E-05	99	0,099	2,554	2553,740
AT-06	45,5	45,7	45,9	45,70	4,570E-05	98	0,098	2,144	2144,420
AT-07	30,9	31,1	30,8	30,93	3,093E-05	98	0,098	3,168	3168,103
AT-08	30,2	30	30,2	30,13	3,013E-05	98	0,098	3,252	3252,212
AT-09	58,5	59,2	59,1	58,93	5,893E-05	97	0,097	1,646	1645,928
AT-10	50,4	50,5	50,4	50,43	5,043E-05	97	0,097	1,923	1923,331
AT-11	43,3	43,4	43,5	43,40	4,340E-05	99	0,099	2,281	2281,106
AT-12	32	31,9	32	31,97	3,197E-05	98	0,098	3,066	3065,693
AT-13	31,3	31,1	30,9	31,10	3,110E-05	99	0,099	3,183	3183,280
AT-14	31,2	31,5	31	31,23	3,123E-05	97	0,097	3,106	3105,656
AT-15	51,2	51,1	51,4	51,23	5,123E-05	98	0,098	1,913	1912,817
AT-16	29,4	29,3	29,4	29,37	2,937E-05	98	0,098	3,337	3337,117
AT-17	29,7	29,6	29,5	29,60	2,960E-05	98	0,098	3,311	3310,811
AT-18	44,2	44,1	43,9	44,07	4,407E-05	98	0,098	2,224	2223,903
AT-19	35,8	35,9	36,3	36,00	3,600E-05	98	0,098	2,722	2722,222
AT-20	46,1	46	45,9	46,00	4,600E-05	98	0,098	2,130	2130,435
AT-21	37	36,8	37,1	36,97	3,697E-05	97	0,097	2,624	2623,986
AT-22	49,7	49,6	49,5	49,60	4,960E-05	99	0,099	1,996	1995,968
AT-23	35,3	35,5	35,5	35,43	3,543E-05	98	0,098	2,766	2765,757
AT-24	34,2	34,1	34	34,10	3,410E-05	99	0,099	2,903	2903,226
AT-25	34,8	35	34,7	34,83	3,483E-05	98	0,098	2,813	2813,397
AT-26	32	32,2	32,1	32,10	3,210E-05	98	0,098	3,053	3052,960
AT-27	35	35,1	34,8	34,97	3,497E-05	98	0,098	2,803	2802,669
AT-28	42,1	42,2	42	42,10	4,210E-05	97	0,097	2,304	2304,038
AT-29	41	40,8	41,1	40,97	4,097E-05	98	0,098	2,392	2392,189
AT-30	31,8	31,9	31,8	31,83	3,183E-05	99	0,099	3,110	3109,948

PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO

PROYECTO DE GRADO: APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO

TIPO DE ROCA: MUESTRAS DE ROCA ARCILLOLITAS DE LA FORMACION CAJA

FECHA DE EJECUCIÓN: MARZO DE 2015

REALIZÓ: ELDIBRANDO PATIÑO BARRERA

Muestra	Lectura 1 Mseg	Lectura 2 Mseg	Lectura 3 Mseg	Promedio lecturas Mseg	Promedio lecturas Seg	Long (mm)	Long (m)	Vp Km/s	Vp m/s
AC-01	49,7	34,7	34,6	39,67	3,967E-05	100	0,100	2,521	2521,008
AC-02	40,2	39,2	40,5	39,97	3,997E-05	100	0,100	2,502	2502,085
AC-03	34,8	34	33,9	34,23	3,423E-05	100	0,100	2,921	2921,130
AC-04	34,4	36,4	36,3	35,70	3,570E-05	100	0,100	2,801	2801,120
AC-05	36,5	49,9	49,8	45,40	4,540E-05	100	0,100	2,203	2202,643
AC-06	46,8	46,7	46,9	46,80	4,680E-05	100	0,100	2,137	2136,752
AC-07	44,7	32,1	31,7	36,17	3,617E-05	101	0,101	2,793	2792,627
AC-08	35,6	33,4	33,3	34,10	3,410E-05	162	0,162	4,751	4750,733
AC-09	47,2	47	46,8	47,00	4,700E-05	162	0,162	3,447	3446,809
AC-10	40,7	33,3	33,2	35,73	3,573E-05	99	0,099	2,771	2770,522
AC-11	44,8	69,2	68,8	60,93	6,093E-05	100	0,100	1,641	1641,138
AC-12	52,6	52,5	52,4	52,50	5,250E-05	102	0,102	1,943	1942,857
AC-13	69,4	58,5	58,4	62,10	6,210E-05	102	0,102	1,643	1642,512
AC-14	37,9	44,9	44,7	42,50	4,250E-05	101	0,101	2,376	2376,471
AC-15	42,7	51,9	52,1	48,90	4,890E-05	97	0,097	1,984	1983,640
AC-16	25,2	26	25,7	25,63	2,563E-05	102	0,102	3,979	3979,194
AC-17	28,2	28,9	28,7	28,60	2,860E-05	101	0,101	3,531	3531,469
AC-18	37,2	36,5	36,1	36,60	3,660E-05	101	0,101	2,760	2759,563
AC-19	36,7	34,3	34,1	35,03	3,503E-05	100	0,100	2,854	2854,424
AC-20	27	26,8	27,1	26,97	2,697E-05	100	0,100	3,708	3708,282
AC-21	39,2	39,5	39,1	39,27	3,927E-05	100	0,100	2,547	2546,689
AC-22	33,9	42,2	42,1	39,40	3,940E-05	100	0,100	2,538	2538,071
AC-23	31,8	40,6	40,7	37,70	3,770E-05	100	0,100	2,653	2652,520
AC-24	36,9	41,3	41,5	39,90	3,990E-05	102	0,102	2,556	2556,391
AC-25	58,3	76,1	75,9	70,10	7,010E-05	100	0,100	1,427	1426,534
AC-26	51,8	44,9	44,6	47,10	4,710E-05	96	0,096	2,038	2038,217
AC-27	88,7	88,8	89	88,83	8,883E-05	101	0,101	1,137	1136,961
AC-28	44,7	35,4	35,8	38,63	3,863E-05	98	0,098	2,537	2536,670
AC-29	42,3	32,7	32,5	35,83	3,583E-05	101	0,101	2,819	2818,605
AC-30	33,4	58,2	58,2	49,93	4,993E-05	100	0,100	2,003	2002,670

Anexo C. Formatos resultados obtenidos de las pruebas de compresión simple ejecutadas en el laboratorio

CALIZA CB-01			
Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 – 4500 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	963,454	7203,30	4,52915

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	45,0000	104,0000

CALIZA CB-02				
Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 – 4500 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas	Rotura_Fuerza Sensibilidad 50
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2	kgf
1 _ 1	864,932	7341,17	4,23136	--

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	105,0000

CALIZA CB-03			
Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 8000 – 12000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	1155,87	20725,9	11,9462
CB-03	--	2359,33	1,35989

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	105,0000
CB-03	47,0000	105,0000

CALIZA CB-04

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 – 3500 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1_1	673,652	5293,87	3,48160

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	44,0000	104,6000

CALIZA CB-05

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 4000 – 6000 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1_1	924,117	11121,7	6,99290

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	45,0000	103,0000

CALIZA CB-06

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 – 4500 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1_1	1020,81	7881,10	5,18313

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	44,0000	103,6900

CALIZA CB-07

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3500 – 4200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	908,130	7189,57	4,52052

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	45,0000	105,0000

CALIZA CB-08

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 5000 – 6200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	1259,57	10877,9	6,83961

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	45,0000	102,1100

CALIZA CB-09

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 5000 – 6200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	1196,82	10413,4	6,84854

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	101,2300

CALIZA CB-10

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 4000 – 5200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	1201,76	9582,48	6,30206

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	44,0000	105,2200

CALIZA CB-11

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 – 4200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	853,346	6451,92	4,24320

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	44,0000	105,5000

CALIZA CB-12

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 – 3200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	854,912	5180,47	3,40701

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	44,0000	103,4700

CALIZA CB-13

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 – 3200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	641,582	5197,34	3,41811

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	104,7900

CALIZA CB-14

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 – 4200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	934,488	7088,24	4,66169

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	106,8100

CALIZA CB-15

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 7000 – 8200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	1395,02	14320,3	9,41798

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	107,2000

CALIZA CB-16

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 4500 - 5500 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	989,941	10103,0	6,64439

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	95,3300

CALIZA CB-17

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 - 4200 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	865,268	6637,14	4,36502

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	104,3300

CALIZA CB-18

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 6000 - 7200 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	1328,81	13726,5	9,02742

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	105,9000

CALIZA CB-19

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1500 – 2200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	339,278	3513,43	2,31066

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	103,6500

CALIZA CB-20

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 – 4200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	1038,77	7476,06	4,91675

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	104,7800

CALIZA CB-21

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1800 – 3200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	772,305	4315,53	2,83817

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	103,4800

CALIZA CB-22

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3500 - 4800 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	1135,03	8055,90	5,29809

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	103,5900

CALIZA CB-23

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1000 - 2200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	505,049	3154,38	2,07452

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	105,4700

CALIZA CB-24

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 - 4200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	959,923	6252,96	4,11236

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	105,1700

CALIZA CB-25

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 - 4200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	1047,21	6665,28	4,38352

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	104,0700

CALIZA CB-26

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 4000 - 5200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	1079,93	8991,43	5,91335

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	95,5200

CALIZA CB-27

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2500 - 3500 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	611,402	6013,41	3,95481

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	44,0000	96,6000

CALIZA CB-28

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 – 3200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	448,219	5106,88	3,35862

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	44,0000	92,3800

CALIZA CB-29

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 – 4000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	0,00118	7097,93	4,66806

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	44,0000	0,0001

CALIZA CB-30

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 – 3200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	528,090	5456,25	3,58838

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	44,0000	100,7200

ARENISCA AT-1

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1500 - 1650 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	253,688	3167,20	1,82553

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	101,3100

ARENISCA AT-02

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 - 5000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	447,866	8575,90	4,94304

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	102,8300

ARENISCA AT-03

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 - 4000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	668,935	6085,08	3,50736

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	103,8700

ARENISCA AT-04

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1800 – 2200 kgf	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas	Max_Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	451,942	4190,87	2,41557

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	102,9700

ARENISCA AT-05

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2500 – 3500 kgf	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas	Max_Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	588,108	5944,77	3,42649

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	104,5600

ARENISCA AT-06

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 – 3500 kgf	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas	Max_Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	527,055	5006,64	2,88576

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	102,0700

ARENISCA AT-07

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 5500 - 7000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	1087,39	12723,4	7,33361

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	102,2500

ARENISCA AT-8

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 7000 - 8000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	1205,82	14580,7	8,40413

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	103,9000

ARENISCA AT-09

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 - 3000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	603,656	4598,10	2,65029

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	101,5700

ARENISCA AT-10

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 - 2200 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	596,049	4318,97	2,48940

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	100,8700

ARENISCA AT-11

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2800 - 3000 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	654,194	5930,39	3,41820

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	102,1200

ARENISCA AT-12

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 5000 - 7000 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	1139,94	11932,1	6,87752

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	103,1800

ARENISCA AT-13

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 5000 - 7000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	1046,11	12433,5	7,16651

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	103,0300

ARENISCA AT-14

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 - 5000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	854,909	9136,03	5,26589

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	101,9000

ARENISCA AT-15

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1600 - 1800 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	276,169	3580,58	2,06380

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	101,5300

ARENISCA AT-16

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 7000 – 8050 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	1241,09	15321,1	8,83091

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	102,5700

ARENISCA AT-17

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 7000 – 8050 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	1162,30	14202,4	8,18610

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	102,3400

ARENISCA AT-18

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 – 4000 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	543,525	5849,68	3,37168

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	102,6600

ARENISCA AT-19

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 – 5000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	628,726	6712,04	3,86873

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	102,0300

ARENISCA AT-20

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 – 4000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	633,405	5482,03	3,15977

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	102,5300

ARENISCA AT-21

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 – 4000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	652,867	6890,36	3,97151

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	100,8200

ARENISCA AT-22

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 – 3500 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	471,748	4433,12	2,55519

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	104,6900

ARENISCA AT-23

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 4000 – 6000 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	993,605	9669,02	5,57310

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	102,0900

ARENISCA AT-24

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 5000 – 6500 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	1009,79	11108,2	6,40263

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	103,0100

ARENISCA AT-25

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 5000 – 6500 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	867,071	10933,3	6,30180

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	101,8700

ARENISCA AT-26

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 5000 – 6500 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	955,815	11450,1	6,59970

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	101,7200

ARENISCA AT-27

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 5000 – 6500 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	936,722	11380,2	6,55941

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	102,5500

ARENISCA AT-28

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 – 4500 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	210,816	6231,16	3,59156

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	101,2100

ARENISCA AT-29

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 – 5000 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	684,844	8070,88	4,65195

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	101,7500

ARENISCA AT-30

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 5000 – 6500 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	907,694	11450,5	6,59991

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	104,1000

ARCILLOLITA AC-01

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 – 4000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	500,529	6300,99	3,63181

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	103,8500

ARCILLOLITA AC-02

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1700 – 1900 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	280,180	3685,75	2,21779

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	46,0000	102,9100

ARCILLOLITA AC-03

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 – 3000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	379,676	5440,17	3,13564

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	104,8000

ARCILLOLITA AC-04

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2350 – 3500 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	393,008	4938,40	2,84643

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	103,8500

ARCILLOLITA AC-05

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1400 – 1500 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	241,953	2841,16	1,70958

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	46,0000	104,4500

ARCILLOLITA AC-06

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 – 3200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	431,867	6294,72	3,62819

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	104,4400

ARCILLOLITA AC-07

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2250 – 2400 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	335,822	4658,80	2,68527

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	105,1900

ARCILLOLITA AC-08

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2750 – 2900 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	393,788	5630,55	3,38801

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	46,0000	106,2200

ARCILLOLITA AC-09

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1500 – 1650 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	216,010	3178,48	1,83203

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	106,4700

ARCILLOLITA AC-10

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1850 - 2000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	283,414	3955,29	2,37998

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	46,0000	105,2500

ARCILLOLITA AC-11

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1200 - 1600 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	205,514	2593,22	1,56040

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	46,0000	105,4800

ARCILLOLITA AC-12

Nombre Parametros	MElastico Fuerza 1500 - 1900 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	286,948	3359,41	1,93632

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	105,7700

ARCILLOLITA AC-13

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 900 – 1100 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	108,504	2113,01	1,21792

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	105,2500

ARCILLOLITA AC-14

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1600 – 1400 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	227,114	3162,42	1,82278

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	104,8800

ARCILLOLITA AC- 15

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 900 – 1000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	123,385	1908,55	1,10007

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	103,0000

ARCILLOLITA AC-16

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 3000 - 3200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	431,867	6294,72	3,62819

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	104,4400

ARCILLOLITA AC-17

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2300 - 2400 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	338,333	4749,53	2,73757

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	104,4100

ARCILLOLITA AC-18

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2000 - 2200 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas	Max._Tension Calc. at Entire Areas	Rotura_Fuerza Sensibilidad 50
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2	kgf
1 _ 1	355,017	4311,59	2,59437	-,-

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	46,0000	104,2500

ARCILLOLITA AC-19

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2500 - 2600 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	361,450	5106,75	2,94347

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	102,1200

ARCILLOLITA AC-20

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2300 - 2400 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	404,657	4727,36	2,84455

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	46,0000	103,1200

ARCILLOLITA AC-21

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1900 - 2150 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	32124,0	4189,01	2,52061

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	46,0000	10395,0000

ARCILLOLITA AC-22

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1600 – 1800 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	234,723	3491,79	2,01263

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	103,7100

ARCILLOLITA AC-23

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1800 – 1950 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	287,791	3765,72	2,26591

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	46,0000	104,2100

ARCILLOLITA AC-24

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1700 – 1850 kgf kgf/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad			
1 _ 1	257,359	3473,06	2,00183

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	47,0000	106,2200

ARCILLOLITA AC-25

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 900 – 1000 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	123,385	1908,55	1,10007

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	47,0000	103,0000

ARCILLOLITA AC-26

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1300 – 1450 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	169,744	2700,28	1,62481

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	46,0000	98,6900

ARCILLOLITA AC-27

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 500 – 650 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1_1	76,3587	1126,52	0,67785

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1_1	46,0000	104,6400

ARCILLOLITA AC-28

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1700 - 1950 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	269,548	3605,15	2,16929

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	46,0000	102,9100

ARCILLOLITA AC-29

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 2100 - 2250 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	360,582	4319,03	2,59885

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	46,0000	103,8300

ARCILLOLITA AC-30

Nombre Parametros	M.Elastico Fuerza 1300 - 1450 kgf	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max._Tension Calc. at Entire Areas kgf/mm2
Unidad	kgf/mm2	kgf	kgf/mm2
1 _ 1	265,447	2676,05	1,61023

Nombre de muestra	Diametro	Altura
Unidad	mm	mm
1 _ 1	46,0000	102,5300

Anexo D. Formatos: Cálculos de los índices de integridad Savich

CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE INTEGRIDAD DE SAVICH

PROYECTO DE GRADO:	APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO
TIPO DE ROCA:	MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR CALIZAS DE LA FORMACIÓN BELENCITO
FECHA DE EJECUCIÓN:	MARZO DE 2015
REALIZÓ:	ELDIBRANDO PATIÑO BARRERA

Muestra	σ_c (Mpa)	σ_{cmax}	σ_c/σ_{cmax}	Kr	E (Mpa)	E _{max}	E/E _{max}	Ke	Vp (m/seg)	Vp max	Vp/vpmax	Ki
CB- 01	44,431	83,183	0,534	0,534	36.930	50.896	0,726	0,726	4.550	5.386	0,845	0,714
CB- 02	41,510	83,183	0,499	0,499	16.424	50.896	0,323	0,323	4.430	5.386	0,822	0,676
CB- 03	13,340	83,183	0,160	0,160	1.175	50.896	0,023		3.432	5.386	0,637	0,406
CB- 04	34,154	83,183	0,411	0,411	25.822	50.896	0,507	0,507	4.142	5.386	0,769	0,592
CB- 05	68,600	83,183	0,825	0,825	35.422	50.896	0,696	0,696	5.051	5.386	0,938	0,880
CB- 06	50,846	83,183	0,611	0,611	20.277	50.896	0,398	0,398	4.319	5.386	0,802	0,643
CB- 07	44,346	83,183	0,533	0,533	4.597	50.896	0,090		4.796	5.386	0,890	0,793
CB- 08	67,096	83,183	0,807	0,807	48.280	50.896	0,949	0,949	4.786	5.386	0,889	0,790
CB- 09	67,184	83,183	0,808	0,808	45.875	50.896	0,901	0,901	4.714	5.386	0,875	0,766
CB- 10	61,823	83,183	0,743	0,743	46.064	50.896	0,905	0,905	4.685	5.386	0,870	0,757
CB- 11	41,626	83,183	0,500	0,500	29.825	50.896	0,586	0,586	4.601	5.386	0,854	0,730
CB- 12	33,423	83,183	0,402	0,402	32.769	50.896	0,644	0,644	3.702	5.386	0,687	0,473
CB- 13	33,532	83,183	0,403	0,403	24.592	50.896	0,483	0,483	3.837	5.386	0,712	0,508
CB- 14	45,731	83,183	0,550	0,550	35.820	50.896	0,704	0,704	4.550	5.386	0,845	0,714
CB- 15	92,390	83,183	1,000		53.472	50.896	1,051		5.667	5.386	1,000	1,107
CB- 16	65,181	83,183	0,784	0,784	37.945	50.896	0,746	0,746	4.485	5.386	0,833	0,693
CB- 17	42,821	83,183	0,515	0,515	33.166	50.896	0,652	0,652	4.373	5.386	0,812	0,659
CB- 18	88,559	83,183	1,000	1,000	50.934	50.896	1,001		5.440	5.386	1,000	1,020
CB- 19	22,668	83,183	0,273	0,273	13.005	50.896	0,256	0,256	3.649	5.386	0,677	0,459
CB- 20	48,233	83,183	0,580	0,580	39.817	50.896	0,782	0,782	4.658	5.386	0,865	0,748
CB- 21	27,842	83,183	0,335	0,335	8.967	50.896	0,176	0,176	3.896	5.386	0,723	0,523
CB- 22	51,974	83,183	0,625	0,625	33.323	50.896	0,655	0,655	4.685	5.386	0,870	0,757
CB- 23	20,351	83,183	0,245	0,245	16.534	50.896	0,325	0,325	3.745	5.386	0,695	0,484
CB- 24	40,342	83,183	0,485	0,485	9.798	50.896	0,193		4.608	5.386	0,856	0,732
CB- 25	43,002	83,183	0,517	0,517	40.140	50.896	0,789	0,789	4.382	5.386	0,814	0,662
CB- 26	58,010	83,183	0,697		41.395	50.896	0,813	0,813	4.141	5.386	0,769	0,591
CB- 27	38,797	83,183	0,466	0,466	23.436	50.896	0,460	0,460	3.854	5.386	0,716	0,512
CB- 28	32,948	83,183	0,396	0,396	17.181	50.896	0,338	0,338	3.717	5.386	0,690	0,476
CB- 29	45,794	83,183	0,551	0,551	36.895	50.896	0,725	0,725	4.511	5.386	0,838	0,702
CB- 30	35,202	83,183	0,423	0,423	20.242	50.896	0,398	0,398	4.030	5.386	0,748	0,560

CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE INTEGRIDAD DE SAVICH

PROYECTO DE GRADO: APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO

TIPO DE ROCA: MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR ROCAS ARENISCAS DE LA FORMACIÓN ARENISCA TIERNA

FECHA DE EJECUCIÓN: MARZO DE 2015

REALIZÓ: ELDIBRANDO PATIÑO BARRERA

Muestra	σ_c (Mpa)	σ_{cmax}	σ_c/σ_{cmax}	Kr	E (Mpa)	E _{max}	E/E _{max}	Ke	Vp (m/seg)	Vp max	Vp/vpmax	Ki
AT-01	17,908	83,127	0,215	0,215	7.022	33.300	0,211	0,211	1.720	3.300	0,521	0,272
AT-02	47,926	83,127	0,577	0,577	7.452	33.300	0,224		2.698	3.300		0,668
AT-03	34,407	83,127	0,414	0,414	12.341	33.300	0,371	0,371	2.474	3.300	0,750	0,562
AT-04	23,697	83,127	0,285	0,285	10.382	33.300	0,312	0,312	1.902	3.300	0,576	0,332
AT-05	33,614	83,127	0,404	0,404	16.278	33.300	0,489	0,489	2.554	3.300	0,774	0,599
AT-06	28,309	83,127	0,341	0,341	14.589	33.300	0,438	0,438	2.144	3.300	0,650	0,422
AT-07	71,943	83,127	0,865	0,865	30.098	33.300	0,904	0,904	3.168	3.300	0,960	0,922
AT-08	82,444	83,127	0,992	0,992	33.376	33.300	1,002	1,002	3.252	3.300	0,986	0,971
AT-09	25,999	83,127	0,313	0,313	7.176	33.300	0,215	0,215	1.646	3.300	0,499	0,249
AT-10	24,421	83,127	0,294	0,294	16.498	33.300	0,495	0,495	1.923	3.300	0,583	0,340
AT-11	33,532	83,127	0,403	0,403	18.108	33.300	0,544	0,544	2.281	3.300	0,691	0,478
AT-12	67,468	83,127	0,812	0,812	31.553	33.300	0,948	0,948	3.066	3.300	0,929	0,863
AT-13	70,303	83,127	0,846	0,846	28.956	33.300	0,870	0,870	3.183	3.300	0,965	0,930
AT-14	51,658	83,127	0,621		23.663	33.300	0,711	0,711	3.106	3.300	0,941	0,886
AT-15	20,246	83,127	0,244	0,244	7.644	33.300	0,230	0,230	1.913	3.300	0,580	0,336
AT-16	86,631	83,127	1,042	1,042	34.353	33.300	1,032	1,032	3.337	3.300	1,000	1,000
AT-17	80,305	83,127	0,966	0,966	32.172	33.300	0,966	0,966	3.311	3.300	1,000	1,000
AT-18	33,076	83,127	0,398	0,398	15.044	33.300	0,452	0,452	2.224	3.300	0,674	0,454
AT-19	37,952	83,127	0,457	0,457	17.403	33.300	0,523	0,523	2.722	3.300	0,825	0,680
AT-20	30,997	83,127	0,373	0,373	17.532	33.300	0,526	0,526	2.130	3.300	0,646	0,417
AT-21	38,621	83,127	0,465	0,465	11.582	33.300	0,348		2.624	3.300	0,795	
AT-22	25,066	83,127	0,302	0,302	13.058	33.300	0,392	0,392	1.996	3.300	0,605	0,366
AT-23	54,672	83,127	0,658	0,658	27.502	33.300	0,826	0,826	2.766	3.300	0,838	0,702
AT-24	62,810	83,127	0,756	0,756	27.950	33.300	0,839	0,839	2.903	3.300	0,880	0,774
AT-25	61,821	83,127	0,744	0,744	24.000	33.300	0,721	0,721	2.813	3.300	0,853	0,727
AT-26	64,743	83,127	0,779	0,779	22.952	33.300	0,689	0,689	3.053	3.300	0,925	0,856
AT-27	64,348	83,127	0,774	0,774	19.227	33.300	0,577	0,577	2.803	3.300	0,849	0,721
AT-28	35,233	83,127	0,424	0,424	5.835	33.300	0,175		2.304	3.300		0,487
AT-29	45,675	83,127	0,549	0,549	16.633	33.300	0,499	0,499	2.392	3.300	0,725	0,525
AT-30	64,745	83,127	0,779	0,779	18.165	33.300	0,545	0,545	3.110	3.300	0,942	0,888

CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE INTEGRIDAD DE SAVICH

PROYECTO DE GRADO: APLICACIÓN DE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS EN LA DEFINICIÓN DE PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO

TIPO DE ROCA: MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR ROCAS ARCILLOLITAS ARENOSAS DE LA FORMACIÓN CAJA

FECHA DE EJECUCIÓN: MARZO DE 2015

REALIZÓ: ELDIBRANDO PATIÑO BARRERA

Muestra	σ_c (Mpa)	σ_{cmax}	σ_c/σ_{cmax}	K_r	E (Mpa)	E_{max}	E/E_{max}	K_e	V_p (m/seg)	V_p max	V_p/v_{pmax}	K_i
AC-01	35,628	34,819	1,023		7.539	7.031	1,072		2.521	4.146	0,608	
AC-02	21,756	34,819	0,625	0,625	4.540	7.031	0,646	0,646	2.502	4.146	0,603	0,364
AC-03	30,761	34,819	0,883	0,883	6.152	7.031	0,875	0,875	2.921	4.146	0,705	0,496
AC-04	27,923	34,819	0,802	0,802	6.119	7.031	0,870		2.801	4.146	0,676	0,456
AC-05	16,771	34,819	0,482	0,482	3.795	7.031	0,540	0,540	2.203	4.146	0,531	0,282
AC-06	20,296	34,819	0,583	0,583	4.306	7.031	0,612	0,612	2.137	4.146	0,515	0,266
AC-07	26,342	34,819	0,757	0,757	5.223	7.031	0,743	0,743	2.793	4.146	0,674	0,454
AC-08	33,236	34,819	0,955		4.805	7.031	0,683		4.751	4.146	1,000	
AC-09	17,972	34,819	0,516		3.500	7.031	0,498		3.447	4.146	0,831	
AC-10	23,348	34,819	0,671	0,671	4.593	7.031	0,653	0,653	2.771	4.146	0,668	0,447
AC-11	15,307	34,819	0,440	0,440	3.330	7.031	0,474	0,474	1.641	4.146	0,396	0,157
AC-12	18,995	34,819	0,546	0,546	4.650	7.031	0,661	0,661	1.943	4.146	0,469	0,220
AC-13	11,948	34,819	0,343	0,343	1.758	7.031	0,250	0,250	1.643	4.146	0,396	0,157
AC-14	18,447	34,819	0,530	0,530	3.680	7.031	0,523	0,523	2.376	4.146	0,573	0,329
AC-15	15,839	34,819	0,455	0,455	3.260	7.031	0,464	0,464	1.984	4.146	0,478	0,229
AC-16	35,593	34,819	1,022		6.998	7.031	0,995		3.979	4.146	0,960	
AC-17	26,855	34,819	0,771		5.482	7.031	0,780		3.531	4.146	0,852	
AC-18	25,451	34,819	0,731	0,731	5.753	7.031	0,818	0,818	2.760	4.146	0,666	0,443
AC-19	28,875	34,819	0,829	0,829	5.857	7.031	0,833	0,833	2.854	4.146	0,688	0,474
AC-20	27,905	34,819	0,801		6.557	7.031	0,933		3.708	4.146	0,894	
AC-21	24,727	34,819	0,710	0,710	5.205	7.031	0,740	0,740	2.547	4.146	0,614	0,377
AC-22	19,744	34,819	0,567	0,567	3.804	7.031	0,541	0,541	2.538	4.146	0,612	0,375
AC-23	22,229	34,819	0,638	0,638	4.663	7.031	0,663	0,663	2.653	4.146	0,640	0,409
AC-24	19,638	34,819	0,564	0,564	4.170	7.031	0,593	0,593	2.556	4.146	0,617	0,380
AC-25	10,792	34,819	0,310	0,310	1.438	7.031	0,205	0,205	1.427	4.146	0,344	0,118
AC-26	15,939	34,819	0,458	0,458	2.138	7.031	0,304	0,304	2.038	4.146	0,492	0,242
AC-27	6,650	34,819	0,191	0,191	1.237	7.031	0,176	0,176	1.137	4.146	0,274	0,075
AC-28	21,281	34,819	0,611	0,611	2.264	7.031	0,322		2.537	4.146	0,612	0,374
AC-29	25,495	34,819	0,732	0,732	5.857	7.031	0,833	0,833	2.819	4.146	0,680	0,462
AC-30	15,796	34,819	0,454	0,454	4.299	7.031	0,611	0,611	2.003	4.146	0,483	0,233