



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**DETERMINACIÓN DEL DETERIORO
DE NÚCLEOS DE IGNIMBRITAS A
TRAVÉS DE ENSAYOS EN
LABORATORIO**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS
TERRESTRES**

PRESENTA:

ING. JUAN CARLOS LUZ MARTÍNEZ

ASESOR:

DR. JOSÉ ELEAZAR ARREYGUE ROCHA

CO-ASESOR:

DRA. LUISA NICTÉ EQUIHUA ANGUIANO



Morelia, Michoacán, diciembre de 2019.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, siempre estaré agradecido con mis padres por la educación que me han brindado, por su esfuerzo, paciencia y dedicación. Invariablemente estarán en mi mente y corazón.

A CONACYT por el apoyo brindado durante los dos años del programa de estudios.

A la MITRVT por haberme permitido formarme en ella, a todos mis profesores gracias por compartir sus conocimientos, a mis compañeros de generación gracias por darle el toque agradable a las experiencias que compartimos.

A mis asesores por el apoyo brindado durante mi investigación y en especial al doctor José Eleazar Arreygue Rocha por sus consejos y cada momento dedicado para la aclaración de mis dudas.

Y a todas las personas que han participado de alguna manera en esta etapa de mi vida. Muchas gracias.

RESUMEN

El comportamiento de las rocas en el subsuelo involucra cambios de esfuerzos al momento de sufrir cualquier tipo de excavación que, influyen directamente en las propiedades físicas y mecánicas de las mismas, lo que se traduce en un deterioro relacionado con la inestabilidad de los macizos rocosos. Al deterioro de la roca se le da poca importancia, ya que los métodos de diseño se enfocan en evitar mecanismos de falla más profundos. Una manera de caracterizar el deterioro de un macizo rocoso en laboratorio, es a través de los núcleos de roca obtenidos de los sondeos geotécnicos. Este trabajo se centró en la determinación del deterioro de núcleos de rocas ignimbríticas del sur de la ciudad de Morelia, a través de ensayos de laboratorio. Se determinaron las propiedades de densidad, absorción, porosidad, resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la tensión, velocidad de onda P y durabilidad de acuerdo con la normativa correspondiente. También se realizaron las clasificaciones geomecánicas RMR y Q. En la prueba de durabilidad se realizaron tres ciclos adicionales a los considerados en las normativas (dos ciclos). El índice de durabilidad después del quinto ciclo (I_{d5}) se relacionó con las demás propiedades determinadas. De lo anterior, se pudo observar la influencia del estado de alteración en los cambios de las propiedades físicas y mecánicas. Las ignimbritas con I_{d5} alto tienen bajos valores de porosidad y absorción y altos valores de densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tensión y velocidad de onda P, y de manera recíproca. Por último se realizó una comparación de las propiedades determinadas en este trabajo con otras investigaciones aplicadas en este mismo tipo de roca y en otros países. Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos publicados por otros investigadores.

Palabras clave: Deterioro, Pruebas de laboratorio, Núcleos de roca, Ignimbritas, Durabilidad.

ABSTRACT

Rock behaviour in the subsoil involves stress changes due excavations among others factors that affecting physical and mechanical properties. Furthermore, if it is conjugate with the rock deterioration it will have rock mass instabilities. Rock degradation has been few considered in the traditional design methods, because these focus in the “in situ” rock properties obtained in the moment of the exploration. One way to characterize the rock mass deterioration is through rock cores obtained from geotechnical boreholes, applying the observational method and the laboratory test. In this study it is obtained the deterioration in ignimbrite rock samples from south Morelia, through laboratory tests with the finality to study the influence in the changes of its physical and mechanical rock properties. In this way, it were determined density, absorption, porosity, uniaxial compressive strength, tensile strength, P wave velocity and the durability, according to the normative. Also, RMR and Q classification systems were realized. In the case of the slake durability test, it was added three cycles to those considered in the normative. The durability index obtained after the fifth cycle (I_{d5}) was correlated with the other determined properties, this allowed defining that from the fifth cycle the wastage rock is constant. Furthermore and according to the obtained results it was observed that the state of alteration impact in the mechanical and the physical properties. Ignimbrites with high I_{d5} presents low porosity and absorption as well as, high values of density, compressive strength, tensile strength and P wave velocity values. Finally, to validate results a comparison of the mechanical and physical properties with other investigations in ignimbrites rocks were realized. The values obtained are according within the ranges published by the other researchers.

Key words: Deterioration, Laboratory tests, Rock cores, Ignimbrites.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----|
| AGRADECIMIENTOS | i |
| RESUMEN | ii |
| ABSTRACT..... | iii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | v |
| ÍNDICE DE TABLAS | vii |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Justificación y objetivos | 3 |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO | 4 |
| 2.1 Descripción de sondeos de roca..... | 4 |
| 2.2 Deterioro en rocas | 5 |
| 2.3 Clasificaciones geomecánicas | 6 |
| 2.4 Condición geotécnica | 7 |
| CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE | 8 |
| 3.1 Importancia de la caracterización del deterioro | 8 |
| 3.2 Factores relacionados con el deterioro en rocas..... | 10 |
| 3.3 Relaciones entre el deterioro y las propiedades físicas y mecánicas de las rocas | 11 |
| CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA..... | 13 |
| 4.1 Valoración de los sondeos de los núcleos de rocas ignimbríticas | 13 |
| 4.2 Pruebas de laboratorio | 14 |
| 4.3 Clasificaciones geomecánicas | 19 |
| CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 21 |
| 5.1 Caso de estudio..... | 21 |
| 5.2 Reconocimiento de los sondeos 1 y 2..... | 23 |
| 5.3 Densidad, absorción, porosidad y resistencia a la compresión uniaxial de los núcleos de ignimbrita..... | 28 |
| 5.4 Velocidad de onda P y resistencia a tensión | 34 |
| 5.5 Clasificaciones geomecánicas RMR y Sistema Q | 39 |
| 5.6 Durabilidad de las ignimbritas..... | 41 |
| 5.7 Relaciones entre el I_{d5} y las propiedades determinadas..... | 46 |
| CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN..... | 52 |
| CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES..... | 62 |
| REFERENCIAS..... | 67 |
| ANEXOS | 73 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 Distribución de las clases de deterioro para túneles de presión sin revestimiento (Ribeiro y Sousa, 2006)..... | 9 |
| Figura 3.2 Distribución de las clases de deterioro para túneles de presión con revestimiento de concreto (Ribeiro y Sousa, 2006). | 10 |
| Figura 5.1 Localización de los sondeos 1 y 2..... | 21 |
| Figura 5.2 Secuencia estratigráfica de la ciudad de Morelia, Michoacán (Arreygue-Rocha et al., 2002)..... | 22 |
| Figura 5.3 Variación del RQD con la profundidad en los sondeos 1 y 2. | 27 |
| Figura 5.4 Variación de la densidad (ρ) con la profundidad a) sondeo 1 y b) sondeo 2. | 28 |
| Figura 5.5 Variación de la absorción con la profundidad a) sondeo 1 y b) sondeo 2. | 29 |
| Figura 5.6 Variación de la porosidad (n) con la profundidad a) sondeo 1 y b) sondeo 2.... | 30 |
| Figura 5.7 Variación de la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) con la profundidad a) sondeo 1 y b) sondeo 2. | 31 |
| Figura 5.8 Relación entre la densidad (ρ) y la absorción y la porosidad (n) (sondeo 1)..... | 32 |
| Figura 5.9 Relación entre la densidad (ρ) y la absorción y la porosidad (n) (sondeo 2)..... | 32 |
| Figura 5.10 Relación entre la densidad (ρ) y la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) sondeos 1 y 2. | 33 |
| Figura 5.11 Relación entre la porosidad (n) y la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) sondeos 1 y 2. | 34 |
| Figura 5.12 Relación entre la velocidad de onda P (V_p) y la densidad (ρ) sondeos 1 y 2.... | 35 |
| Figura 5.13 Relación entre la velocidad de onda P (V_p) y la porosidad (n) sondeos 1 y 2. . | 35 |
| Figura 5.14 Relación entre la velocidad de onda P (V_p) y la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) sondeos 1 y 2. | 36 |
| Figura 5.15 Relación entre la resistencia a tensión (σ_t) y la densidad (ρ) sondeos 1 y 2. | 37 |
| Figura 5.16 Relación entre la resistencia a tensión (σ_t) y la porosidad (n) sondeos 1 y 2.... | 37 |
| Figura 5.17 Relación entre la resistencia a tensión (σ_t) y la resistencia a compresión uniaxial (σ_c) sondeos 1 y 2. | 38 |
| Figura 5.18 Relación entre la velocidad de onda P, (V_p) y la resistencia a tensión (σ_t) sondeos 1 y 2. | 39 |
| Figura 5.19 Comportamiento del índice de durabilidad de las unidades del sondeo 1. | 42 |
| Figura 5.20 Comportamiento del índice de durabilidad de las unidades del sondeo 2. | 43 |
| Figura 5.21 Pérdida de material entre ciclos adyacentes de las unidades del sondeo 1. | 44 |
| Figura 5.22 Pérdida de material entre ciclos adyacentes de las unidades del sondeo 2. | 44 |
| Figura 5.23 Relación entre los índices de durabilidad I_{d2} e I_{d5} del sondeo 1. | 45 |
| Figura 5.24 Relación entre los índices de durabilidad I_{d2} e I_{d5} del sondeo 2. | 46 |
| Figura 5.25 Relación entre el índice de durabilidad después del quinto ciclo (I_{d5}) y la densidad (ρ) de las unidades los sondeos 1 y 2. | 47 |
| Figura 5.26 Relación entre el índice de durabilidad después del quinto ciclo (I_{d5}) y la porosidad (n) de las unidades de los sondeos 1 y 2..... | 48 |
| Figura 5.27 Relación entre el índice de durabilidad slake después del quinto ciclo (I_{d5}) y la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) de las unidades de los sondeos 1 y 2. | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.28 Relación entre el índice de durabilidad slake después del quinto ciclo (I_{d5}) y la resistencia a la tensión (σ_t) de las unidades de los sondeos 1 y 2..... | 50 |
| Figura 5.29 Relación entre el índice de durabilidad después del quinto ciclo (I_{d5}) y la velocidad de onda p (V_p) de las unidades de los sondeos 1 y 2. | 51 |
| Figura 6.1 Comparación de la relación entre la densidad y la porosidad de las ignimbritas de Morelia (este trabajo), tobas de Roma (Zhu et al., 2011) e ignimbritas de Nueva Zelanda (Moon, 1993)..... | 53 |
| Figura 6.2 Valores máximos y mínimos de densidad de las ignimbritas de Morelia (este trabajo) en comparación con ignimbritas (Central Anatolia) Özbek (2013) y tobas (Cappadocia) Aydan y Ulusay (2003) Ulusay et al. (1997), (Afyonkarahisar) Çelik & Ergül (2015) de Turquía. | 54 |
| Figura 6.3 Valores máximos y mínimos de porosidad de las ignimbritas de Morelia (este trabajo) en comparación con ignimbritas (Central Anatolia) Özbek (2013) y tobas (Cappadocia) Aydan y Ulusay (2003), Ulusay et al. (1997) de Turquía..... | 54 |
| Figura 6.4 Comparación de la relación entre la densidad y la resistencia a la compresión uniaxial de las ignimbritas de Morelia (este trabajo) y tobas de USA (Apache Leap) Fuenkajorn & Daeme, (1992)..... | 55 |
| Figura 6.5 Valores mínimos y máximos de resistencia a la compresión uniaxial de las ignimbritas de Morelia (este trabajo) en comparación con tobas de USA (Apache Leap) Fuenkajorn y Daemen (1992) y con tobas (Cappadocia) Aydan y Ulusay (2003) Ulusay et al. (1997) e ignimbritas (Central Anatolia) Özbek (2013) de Turquía. | 56 |
| Figura 6.6 Comparación de la relación entre la resistencia a la tensión y la resistencia a la compresión simple de las ignimbritas de Morelia (este trabajo) e ignimbritas de Nueva Zelanda (Moon, 1993)..... | 57 |
| Figura 6.7 Valores mínimos y máximos de la resistencia a la tensión de las ignimbritas de Morelia (este trabajo) en comparación con ignimbritas de Nueva Zelanda (Moon, 1993) y con tobas (Cappadocia) Aydan y Ulusay (2012), Ulusay et al.(1997) de Turquía..... | 58 |
| Figura 6.8 Comparación de los valores de velocidad de onda P de las ignimbritas de Morelia con los de dos tipos de ignimbritas de las Islas Canarias (Tenerife y Gran Canaria) Rodríguez et al. (2007)..... | 59 |
| Figura 6.9 Valores mínimos y máximos de la velocidad de onda P de las ignimbritas de Morelia en comparación con ignimbritas de las Islas Canarias (Rodríguez et al., 2007) y con tobas (Cappadocia) (Aydan y Ulusay, 2003), (Aydan y Ulusay, 2012) y (Ulusay et al., 1997) de Turquía. | 59 |
| Figura 6.10 Comparación entre el comportamiento del índice de durabilidad de las ignimbritas de Morelia y tobas de la región de Cappadocia Aydan y Ulusay (2003), Erguler (2009) de Turquía. | 60 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 3.1 Clases de deterioro en túneles de presión (Lamas, 1993). | 9 |
| Tabla 4.1 Calidades del macizo rocoso (Barton et al., 1974). | 20 |
| Tabla 5.1 División de unidades para los sondeos 1 y 2. | 24 |
| Tabla 5.2 Clasificación de la calidad de la roca por unidad. | 26 |
| Tabla 5.3 Resumen de valoración de las clasificaciones geomecánicas de los sondeos 1 y 2 | 39 |
| Tabla 5.4 Clasificación RMR de los sondeos 1 y 2. | 40 |
| Tabla 5.5 Clasificación Q de los sondeos 1 y 2. | 40 |
| Tabla 5.6 Clasificación RMR para la zona circundante del túnel 1. | 40 |
| Tabla 5.7 Clasificación Sistema Q para la zona circundante del túnel 1. | 40 |
| Tabla 5.8 Clasificación de durabilidad de las unidades de los sondeos 1 y 2 después del segundo ciclo. | 41 |
| Tabla 5.9 Índice de durabilidad (I_d) después de cada ciclo para las unidades de los sondeos 1 y 2. | 42 |
| Tabla 5.10 Clasificación de durabilidad de las unidades de los sondeos 1 y 2 después del quinto ciclo. | 43 |

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La construcción de túneles en la red vial es cada vez más importante en todo el mundo. Debido a la aceleración del transporte los túneles carreteros proporcionan una protección óptima para el medio ambiente y el paisaje. Sin embargo, la construcción de un túnel es uno de los desafíos más complejos en el campo de la ingeniería civil. La operación segura del túnel es muy importante, ya que estas estructuras específicas, se construyen para acortar las distancias de las rutas de transporte y mejorar la seguridad vial. Su construcción puede ser en suelo o roca, mencionando que cada uno tiene particularidades en los métodos de diseño y construcción.

Cuando los túneles son construidos en roca se debe garantizar la estabilidad del macizo rocoso. El deterioro se produce porque la excavación perturba el macizo rocoso al liberar el confinamiento, lo que lleva a una recuperación y reacomodo (Gerber y Scheidegger, 1969), y porque la excavación expone al macizo rocoso a las condiciones ambientales, como las fluctuaciones de temperatura y humedad (Feld, 1966). El deterioro está relacionado con la inestabilidad del macizo rocoso (Brox, 2017), y se le ha dado poca importancia, ya que los métodos de diseño se enfocan en evitar mecanismos de falla más profundos.

Una manera de caracterizar el deterioro en laboratorio del macizo rocoso, es a través del estudio de los núcleos de rocas obtenidos de los sondeos geotécnicos. El análisis de los núcleos permite determinar las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso, así como el estado de alteración y la durabilidad que tienen.

En esta investigación se realizó la determinación del deterioro en núcleos de rocas ignimbríticas mediante diferentes pruebas de laboratorio en los núcleos de roca considerando la normativa correspondiente. Los parámetros determinados a través de los ensayos de laboratorio fueron: densidad, absorción, porosidad, resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la tensión, velocidad de onda P y durabilidad. La prueba que describe el comportamiento de la roca frente al deterioro es la prueba de durabilidad, la cual considera ciclos de humedecimiento y secado sometidos a un desgaste constante. En la normativa correspondiente se consideran dos ciclos de durabilidad, en este trabajo se realizaron tres ciclos más. El índice de durabilidad después del quinto ciclo de durabilidad (I_{d5}) describe mejor el comportamiento de las ignimbríticas frente a la durabilidad. El I_{d5} se relacionó con las demás propiedades determinadas para observar la influencia del estado de alteración en las propiedades físicas y mecánicas.

El presente documento está dividido en 7 capítulos, en el primer capítulo se presenta una breve introducción al tema en estudio, la justificación y los objetivos de la investigación.

En el segundo capítulo se presentan los conceptos necesarios para entender el proceso de esta investigación como la descripción que se debe realizar en los sondeos geotécnicos, la definición del deterioro y las dos clasificaciones geomecánicas más utilizadas en túneles relacionadas con las condiciones geotécnicas.

En el tercer capítulo se exponen primeramente las opiniones, algunos casos y recomendaciones respecto al deterioro, después los estudios recopilados en relación con este tema, las investigaciones sirvieron como apoyo para lograr esta investigación, atendiendo las recomendaciones, y tomando en cuenta los hallazgos y opiniones de los diferentes autores.

El cuarto capítulo comprende los procedimientos seguidos a lo largo de esta investigación, se tomó en cuenta la normativa correspondiente, el material y el equipo necesario para la realización de las pruebas y la obtención de las clasificaciones geomecánicas.

En el quinto capítulo se presentan los resultados de las pruebas de laboratorio, se revisa la variación y rangos de las propiedades obtenidas. Posteriormente se comparan las propiedades las propiedades entre sí para observar cuál es su relación, los resultados de la prueba de durabilidad se analizan a fondo y se relacionan con las demás propiedades obtenidas.

El sexto capítulo comprende los resultados obtenidos en esta investigación y su comparación con otros estudios alrededor del mundo para verificar las diferencias y semejanzas.

Y por último en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones de esta investigación y posteriormente el trabajo futuro.

1.1 Justificación y objetivos

Con frecuencia la información con mayor certeza de los macizos rocosos que conforman los túneles carreteros es aportada por los núcleos de roca, obtenidos de los sondeos geotécnicos, dicha información resulta muy valiosa cuando se analizan de manera correcta las muestras de roca. En ocasiones el enfoque de los estudios se centra únicamente en la determinación de las propiedades geotécnicas y se deja de lado el grado o la susceptibilidad al deterioro, el cual está relacionado con la inestabilidad de los macizos rocosos.

En el caso de los túneles construidos en roca uno de los principales retos en la ingeniería de túneles es definir cuál va ser el comportamiento del macizo rocoso durante la excavación y después de ésta, con el fin de garantizar su estabilidad y seguridad. Un posible escenario a largo plazo es la degradación del macizo rocoso.

Objetivos

Esta investigación estará regida por los siguientes objetivos:

Objetivo general

Determinar el estado de alteración en núcleos de rocas ignimbríticas a través de ensayos de laboratorio

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización y clasificación geológico-geotécnica de los núcleos de roca.
- Realizar la clasificación geomecánica del macizo rocoso.
- Determinar la durabilidad al deterioro de los núcleos de roca para que sea considerada en el diseño de los túneles.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Una de las informaciones más precisas sobre los macizos rocosos se obtiene a través de la extracción de muestras de roca. Con frecuencia los núcleos de roca extraídos mediante sondeos de perforación son la única información disponible y certera. La extracción de los núcleos de roca es el proceso mediante el cual un cortador de diamante giratorio se presiona contra la base. El diamante, el más duro de todos los materiales, atraviesa la roca y se obtiene un núcleo. Durante el proceso de extracción de los núcleos, se inyecta agua para mantener fría la broca del núcleo y para eliminar los recortes (Rajapakse, 2015).

2.1 Descripción de sondeos de roca

La descripción de los sondeos de roca tiene como objetivo garantizar que el registro resultante permita interpretaciones confiables de las condiciones geológicas y geotécnicas para la mayoría de las obras de ingeniería. El registro no debe ser tan complejo para evitar que su uso sea impráctico o innecesariamente engorroso. Además debe tener en cuenta los procedimientos estandarizados existentes.

Porcentaje de recuperación

El porcentaje de recuperación o la recuperación total del núcleo se define como la proporción del núcleo recuperado a longitud total perforada (Valentine y Norbury, 2011). Este porcentaje incluye tanto el núcleo sólido como el núcleo no sólido. Los registros se realizan como longitudes y se ingresan en la hoja de registro del sondeo.

Índice de calidad de la roca (RQD)

El índice de calidad de la roca fue propuesto por Deere y Deere (1988), representa la relación entre la suma de las longitudes de los fragmentos de roca mayores de 10 cm y la longitud total del tramo considerado. Sirve para determinar la calidad de la roca (en términos de fracturamiento) y fue desarrollado como un medio para describir cualitativamente si un macizo rocoso es favorable para la construcción de un túnel (Tatiya, 2005).

Descripción litológica

La descripción litológica de una roca se refiere al nombre geológico dado al tipo de roca en función de su composición mineralógica, textura y, en algunos casos, su origen. Estos factores forman la base para la mayoría de los esquemas de clasificación de rocas. Para

realizar una descripción práctica, los núcleos de roca se deben describir de manera general utilizando términos sencillos (Deere, 1963).

Grado de meteorización

La meteorización puede definirse como la alteración física o química de la roca debida a la reacción con los gases atmosféricos y las soluciones acuosas. El interés de la ingeniería en la meteorización surge debido a su influencia en las propiedades mecánicas del material intacto (Boyd, 1975).

2.2 Deterioro en rocas

Harrison y Hudson (2000) señalan que hay factores que influyen en la estabilidad del macizo rocoso, especialmente el deterioro de la roca debido a la exposición y otros efectos dependientes del tiempo. Así mismo, mencionan que la posibilidad de introducir nuevos métodos de excavación es poco probable. Del mismo modo, no anticipan que se introduzcan nuevos métodos de estabilización. Las fallas en el macizo rocoso ocurren debido a la presencia de un aumento en los esfuerzos de la roca, fracturas preexistentes, presión y flujo de agua, y deterioro de la roca con el tiempo. Es poco probable que se realicen mejoras de estabilización porque los factores enumerados anteriormente no se pueden eliminar, y las técnicas de anclaje, concreto lanzado, revestimiento y lechada ofrecen soluciones a los efectos adversos.

En el caso de las superficies expuestas a la intemperie, el deterioro se define como una alteración superficial, progresiva, física y química del material rocoso y su posterior desprendimiento y eliminación o redistribución por agentes de transporte. Por lo general, es de pequeña escala en relación con fallas más profundas, pero es difícil especificar con precisión el tamaño del evento involucrado (Nicholson y Hencher, 1997). Abarca los resultados combinados de meteorización, desprendimiento y transporte que actúan sobre un macizo rocoso y se manifiesta como una serie de procesos erosivos y movimientos de masas a pequeña escala.

Si bien los procesos de meteorización pueden ser lentos, dependen del tipo de roca y la situación. Es evidente que en diferentes partes del mundo ha habido “eventos climáticos” regionales, que ciertamente involucran aguas subterráneas y probablemente elevan la temperatura, lo que acelera la tasa de deterioro. La meteorización y la erosión están asociadas con el paso de aguas subterráneas a través de la zona. El agua introduce nuevas sustancias químicas que fomentan la descomposición de los minerales que integran la roca, pero también actúa para transportar los desechos descompuestos y desintegrados de la roca madre (Hencher, 2015).

2.3 Clasificaciones geomecánicas

El diseño y la realización de un trabajo subterráneo requieren de datos sintetizados en un modelo geológico, además de datos de resistencia y deformación que son esenciales para definir un modelo de comportamiento confiable de los materiales, así como para la fase de diseño del revestimiento, trabajos de estabilización, trabajos de mejora del terreno y también elegir el método de excavación correcto (Gattinoni et al., 2014).

En un macizo rocoso la correcta determinación de la resistencia y la deformabilidad de ese macizo (considerado como la combinación de la roca intacta y las discontinuidades (Narimani Dehnavi y Sadeghi, 2017)) mediante pruebas in situ y de laboratorio es difícil. Las propiedades mecánicas se determinan preferiblemente a partir de las propiedades de la roca matriz, utilizando correlaciones empíricas y modelos basados en la definición de una “calidad” geomecánica.

Con ese objetivo, a lo largo de los años, diferentes autores desarrollaron una serie de criterios para la atribución de cualidades geomecánicas, conocidas como Clasificaciones Geomecánicas.

Las clasificaciones geomecánicas son herramientas muy útiles ya que permiten la categorización, dentro de ciertos límites, del comportamiento del material de acuerdo con sus características geomecánicas. Por lo tanto, representan una base técnica universal, un lenguaje común para los técnicos de este sector (Gattinoni, et al., 2014).

Dos de las clasificaciones geomecánicas más difundidas en la ingeniería de túneles son el Rock Mass Rating o clasificación RMR de (Bieniawski, 1989) y la clasificación del Instituto Geotécnico Noruego, o sistema Q, desarrollada por (Barton, et al., 1974).

Clasificación RMR

La clasificación RMR ha sido desarrollada por (Bieniawski, 1989) y está basada en mediciones de campo de más de 300 casos de túneles y cimentaciones en todo el mundo. Esta clasificación toma en cuenta las características de las discontinuidades, la resistencia a la compresión uniaxial y el RQD.

Los parámetros tomados en cuenta para esta clasificación se encuentran tabulados (Anexo 2), correspondiendo a cada rango una puntuación, la suma de todas las puntuaciones obtenidas en cada apartado determinará el índice RMR.

Además el autor considera un factor de corrección por la orientación de las discontinuidades respecto a la excavación. Asimismo el RMR define cinco categorías de calidad de la roca. El cálculo del índice RMR permite estimar los parámetros de resistencia y deformabilidad del macizo rocoso (a partir de correlaciones empíricas), y establecer su posible comportamiento frente a excavaciones.

Clasificación Q (NGI)

La clasificación Q o el índice de calidad “NGI” (Barton et al., 1974), está basada en el análisis de unos 200 casos de túneles a partir del cual se estableció una correlación entre la cantidad y el tipo de soporte permanente y la calidad del macizo rocoso Q, con respecto a la estabilidad del túnel, toma en cuenta el grado de fracturamiento del macizo rocoso, las características de las discontinuidades, la presencia de agua y el esfuerzo activo.

A los parámetros tomados en cuenta en este sistema también corresponden rangos de puntuaciones, los cuales están definidos de acuerdo a sus características (Anexo 3).

En Barton et al., (1974) se establece que el índice Q varía desde 0.001 hasta 1000, si el índice Q es menor a 0.001 no aplica el método, ya que no se considera un macizo rocoso.

2.4 Condición geotécnica

En ingeniería de túneles las clasificaciones geomecánicas tienen un gran impacto en los métodos de diseño y construcción, porque permiten tener una idea inicial de la calidad de la roca que conformará el túnel y una estimación de las propiedades geomecánicas de la roca, además de que las dos clasificaciones geomecánicas descritas anteriormente y utilizadas en esta investigación presentan una serie de recomendaciones para la construcción de los túneles y los tipos de soporte definitivo.

Actualmente existe un manual para diseño de túneles carreteros elaborado por la SCT en el 2016 a través de la Dirección General de Servicios Técnicos, el cual sugiere diferentes tipos de sostenimientos de acuerdo a las condiciones geotécnicas definidas por los resultados de las clasificaciones geomecánicas.

Resulta conveniente definir entonces que es una condición geotécnica, que de acuerdo con SCT (2016) es el conjunto de factores determinantes en la respuesta del terreno ante las acciones de excavación. Debe diferenciarse de una unidad geotécnica definida en el mismo manual como una porción del terreno que tiene características que la distinguen de otras porciones vecinas, es decir, puede conformar un paquete de roca o suelo de una determinada litología o estar compuesta por intercalaciones de distintas litologías, pero con características mecánicas similares (el grado de fracturamiento, de alteración, las condiciones de humedad e incluso, las condiciones topográficas). Entonces una condición geotécnica puede tener diferentes unidades geotécnicas y viceversa.

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE

Uno de los principales retos en la ingeniería de túneles es definir cuál va a ser el comportamiento del macizo rocoso a largo plazo, con el fin de garantizar la estabilidad y seguridad de las estructuras subterráneas. Un posible escenario a largo plazo es el deterioro del macizo rocoso, especialmente en rocas susceptibles a la degradación. La falta de medidas de mitigación y la incorrecta evaluación de la susceptibilidad al deterioro en casos extremos podría afectar las propiedades físicas y mecánicas de las rocas y alterar el comportamiento ingenieril en alguna medida.

3.1 Importancia de la caracterización del deterioro

El deterioro en las rocas se puede observar durante las investigaciones in situ, donde las muestras de roca se exponen a un cambio en el contenido de humedad natural en el medio ambiente y se liberan de los esfuerzos a los que estaban sometidas. El deterioro o la durabilidad de la roca y el potencial de expansión se asocian comúnmente con rocas volcánicas geológicamente jóvenes, incluidas andesitas, basaltos, tobas y brechas, pero también para rocas sedimentarias de baja resistencia que incluyen arcillas y lodolita, donde los minerales disolubles y expansibles son comunes (Brox, 2017).

Las razones de las fallas en las obras después de la construcción son probablemente debido al deterioro de los macizos rocosos en las excavaciones (Tating, Hack, & Jetten, 2013).

También en Brox (2017) se sugiere que el potencial de deterioro o la falta de durabilidad de cualquier tipo de roca que se encuentre a lo largo de la alineación de un túnel deben evaluarse y cuantificarse minuciosamente y presentarse en términos de la gravedad del potencial de deterioro y expansión. Las observaciones del deterioro de la roca, si es aparente, deben documentarse con fotografías con fecha y hora durante la investigación de un sitio. Se puede realizar una indicación temprana del potencial de deterioro mediante el simple remojo o inmersión de muestras en agua y la documentación de observaciones durante un período de tiempo inicial. En algunos casos, es posible observar el rápido deterioro de la roca a partir de múltiples inspecciones de los núcleos obtenidos de sondeos de perforación durante el período de un programa de investigación del sitio.

Lamas (1993) describe diversos accidentes y otros daños en túneles hidráulicos, la Tabla 3.1 muestra diferentes clases de deterioro que corresponden a situaciones típicas que ocurren en estos trabajos. La mayoría de los problemas ocurrieron en túneles con soportes de concreto o sin ningún tipo de soporte.

Tabla 3.1 Clases de deterioro en túneles de presión (Lamas, 1993).

| Clase | Descripción del deterioro |
|-------|--|
| A | Inadecuado confinamiento, lo que lleva a tasas de flujo excesivas, elevación hidráulica o inestabilidad del macizo rocoso, incluidos desprendimientos o elevación. |
| B | Características geológicas específicas de alta conductividad hidráulica, que conducen a fugas, elevación hidráulica o inestabilidad del macizo rocoso, incluidos desprendimientos o elevación. |
| C | Deterioro del macizo rocoso, a saber, debido a la erosión de las grietas, disolución y expansión, que conduce a fugas excesivas, caídos de rocas o inestabilidad del macizo rocoso. |
| D | Excesiva presión del agua en lo que respecta a las barreras impermeables, como las juntas o las fallas rellenas de arcilla, que provocan movimientos e inestabilidad de los macizos rocosos, incluidos deslizamientos de tierra. |
| E | Macizo rocoso deformable, lechada ineficiente o construcción deficiente, que conduce a la falla del revestimiento, es decir, debido a la presión interna del agua. |
| F | Pandeo de revestimiento de acero causado por presión externa de agua o lechada. |
| G | Fluctuaciones dinámicas de la presión del agua. |

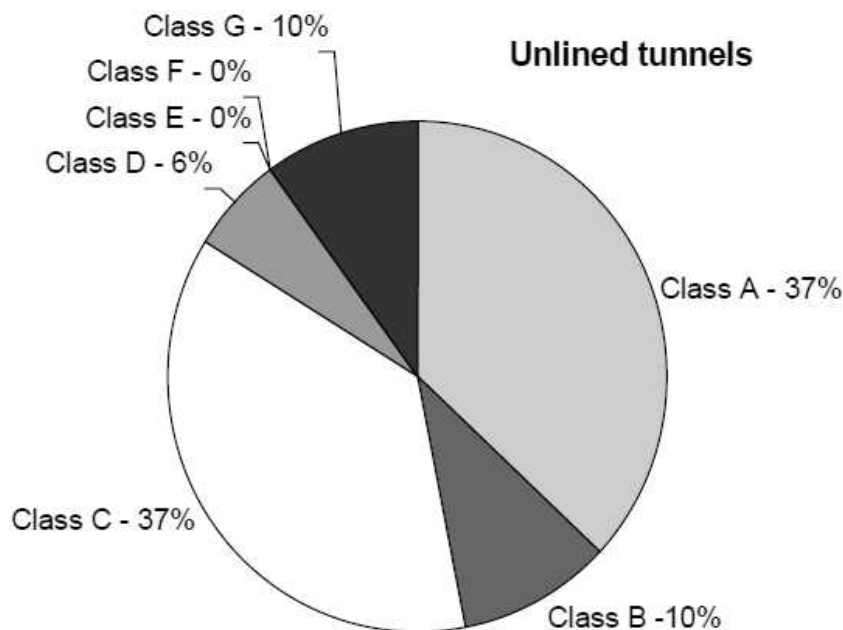


Figura 3.1 Distribución de las clases de deterioro para túneles de presión sin revestimiento (Ribeiro y Sousa, 2006).

Las Figuras 3.1 y 3.2 muestran la distribución de los casos de deterioro, en porcentaje, para las situaciones de túneles hidráulicos sin revestimiento y con revestimiento de concreto. Para los túneles de alta presión con revestimiento de acero, los casos de deterioro estudiados se incluyen principalmente en las clases E y F, con solo algunas situaciones en las clases D y G. El análisis de la figura permite identificar los mecanismos más importantes, responsables del deterioro del eje de presión y túneles.

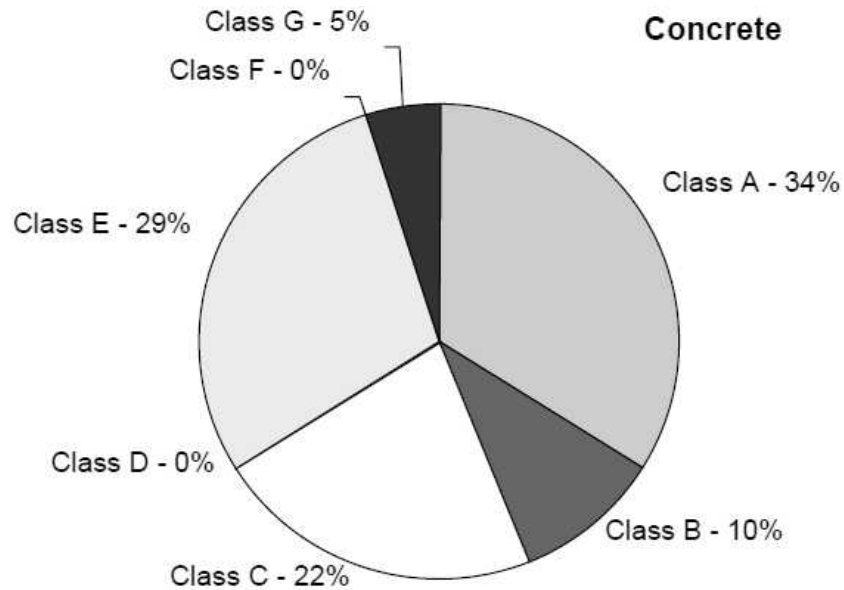


Figura 3.2 Distribución de las clases de deterioro para túneles de presión con revestimiento de concreto (Ribeiro y Sousa, 2006).

3.2 Factores relacionados con el deterioro en rocas

Diversos factores como la humedad, la temperatura y el tiempo aceleran el deterioro de las rocas (Narimani Dehnavi y Sadeghi, 2017). Debido a la complejidad del fenómeno su caracterización no se encuentra bien definida. También por la falta de comprensión y apreciación de la influencia de los factores involucrados. Comúnmente ocurre como resultado de los cambios en el contenido de humedad y de temperatura y la presencia de minerales expansivos como las arcillas.

Las tasas de deterioro dependen de las propiedades del macizo rocoso, incluida su historia geológica, y del entorno en el que está expuesto. La velocidad disminuye con el tiempo debido a la formación de una capa de material residual que evita un mayor contacto entre el macizo intacto y los agentes de meteorización (Tating et al., 2013).

La mayoría de las obras de ingeniería civil construidas en macizos rocosos se ven afectadas por la meteorización, lo que implica un deterioro y cambio de estado de una condición original a una nueva condición como resultado de procesos externos. La meteorización ocurre en todos los ambientes, pero es más intensa en climas cálidos y húmedos donde se puede esperar que la meteorización se extienda a grandes profundidades (Goel, 2015).

De la información revisada se deduce que la sensibilidad de las rocas a los cambios de humedad y temperatura influye en el potencial de alteración de las mismas. En este trabajo se buscó analizar la influencia de los dos parámetros que se pueden controlar en laboratorio, es decir, la humedad y la temperatura.

3.3 Relaciones entre el deterioro y las propiedades físicas y mecánicas de las rocas

La durabilidad de la roca o el deterioro y expansión son aspectos importantes para el diseño del túnel en relación con la estabilidad de la excavación, los requisitos iniciales de soporte y la aceptabilidad de túneles sin revestimiento o parcialmente revestidos para la estabilidad a largo plazo y el rendimiento operativo. La prueba de durabilidad es una prueba simplificada que debe realizarse para caracterizar la durabilidad de rocas sospechosas (Brox, 2017).

La prueba de durabilidad determina el comportamiento de la roca frente al deterioro y fue desarrollada por Franklin & Chandra (1972). Las principales limitaciones del ensayo de durabilidad recaen en cuál es el número óptimo de ciclos de ensayo. Los investigadores Martínez-Bofill, et al. (2013) realizaron un estudio con el objetivo de mejorar la sensibilidad del ensayo de durabilidad y su potencial de predicción de la degradabilidad. Se caracterizaron muestras de distintos taludes, previamente clasificados en función de su comportamiento frente a la alteración, para validar los índices que se obtuvieron en laboratorio. Los mejores resultados se obtuvieron realizando al menos 4 ciclos de ensayo, sobre muestra intacta y sobre muestra envejecida en ciclos de congelación.

Aún con las limitaciones del número óptimo de ciclos, el índice de durabilidad (I_d) se considera adecuado para presentar la vulnerabilidad de las rocas a los frecuentes ciclos de humedecimiento y secado (Narimani Dehnavi y Sadeghi, 2017). Debido a esto algunos investigadores han tratado de encontrar correlaciones entre el I_d y algunas propiedades físicas y mecánicas como la densidad, absorción, porosidad, la velocidad de onda P y la resistencia a compresión simple.

Un estudio acerca de la relación entre el deterioro y la densidad, la absorción y la porosidad de rocas basálticas, andesíticas, riolíticas y graníticas fue realizado por Ondrášik y Kopecký (2014), concluyeron que el deterioro de los tipos de rocas estudiadas está fuertemente relacionado con la estructuras de los poros de la roca debido a que el contenido de agua absorbida y la relación entre el agua absorbida y el agua en peso en los poros están controlados por la porosidad y la estructura de los poros.

La prueba de durabilidad en conjunto con la prueba de carga puntual fueron utilizadas en una investigación realizada por Narimani Dehnavi y Sadeghi (2017). La prueba de carga puntual aplicada a los núcleos de roca fue utilizada para caracterizar el macizo rocoso. Y el índice de durabilidad se utilizó para evaluar la vulnerabilidad de las rocas a los cambios en el contenido de agua y se correlacionó con los valores de carga puntual. Como resultados se obtuvieron curvas de reacción en el terreno en condiciones a corto y largo plazo, asimismo se sugirió otro sistema de soporte y se aplicó en las secciones inestables del túnel para evitar nuevos peligros.

Otros estudios realizados Jamshidi et al. (2009), Rodríguez et al. (2007) han incluido la prueba de tensión brasileña para tener otro parámetro de resistencia de la roca intacta. Como resultado de esos estudios se han establecido correlaciones entre el valor de resistencia a la tensión y los métodos empleados para simular la acción del deterioro (Congelación y descongelación y humedecimiento y secado).

Si existe un parámetro que se puede correlacionar con las propiedades físicas y mecánicas de las rocas es la velocidad de onda P, a este respecto Kurtuluş et al. (2016) llevaron a cabo un estudio para determinar la correlación entre el índice de carga puntual (I_s), la resistencia a tensión (σ_t), y la porosidad y la velocidad de onda P en rocas volcánicas y sedimentarias. Encontraron altos coeficientes de correlación ($R > 0.7$) para las relaciones entre las propiedades estudiadas.

En los proyectos de ingeniería civil las propiedades físicas y mecánicas de las rocas afectan tanto el diseño, como la construcción y la operación. La determinación de varias de las propiedades de las rocas es costosa y lleva mucho tiempo, y a veces es muy difícil obtener núcleos para realizar pruebas directas para evaluar macizos rocosos (Khandelwal, 2013). Debido a lo anterior la prueba de velocidad de onda sónica tiene la ventaja de ser una prueba no destructiva y por esta razón está considerada dentro de las pruebas de caracterización en esta investigación.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el proceso seguido para el desarrollo de ésta investigación, las muestras analizadas fueron extraídas de dos sondeos a rotación de 100 m de longitud cada uno. A partir de lo expuesto en el capítulo 3, se espera caracterizar el deterioro de los núcleos de roca obtenidos de los sondeos a rotación para esta investigación, teniendo en cuenta que los resultados de los estudios revisados hasta ahora servirán de guía para lograrlo. Además de que el análisis de las propiedades básicas puede aportar resultados útiles por la relación que existe con las propiedades mecánicas.

4.1 Valoración de los sondeos de los núcleos de rocas ignimbríticas

Una vez extraídos los núcleos a través de los sondeos a rotación fueron trasladados al laboratorio para su estudio. Debido a que el proceso de perforación se realizó por tramos de 1.5 m, primeramente se determinó el grado de meteorización por tramos siguiendo la tabla del Anexo 1.

De manera análoga se calculó el porcentaje de recuperación con la siguiente expresión:

$$Rec(\%) = \frac{\text{Largo o suma de trozos}}{\text{Largo o total del tramo del sondeo}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Posteriormente se determinó el RQD de acuerdo con la Ecuación 4.2, inicialmente solo se utilizaba en el diseño de túneles, en la actualidad se utiliza ampliamente en la mecánica de rocas y el procedimiento para su determinación está establecido en la norma ASTM D 6032 (2017).

$$RQD = \frac{\sum \text{Longitud de los fragmentos} > 10\text{cm}}{\text{Longitud total}} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Continuando con la valoración de los sondeos se obtuvo el ángulo de fricción básico de los núcleos de ignimbrita, definido como el ángulo de inclinación de una placa sobre otra en el momento del deslizamiento. Debido a la forma de los núcleos (muestras cilíndricas) los ensayos se realizaron tal como lo propuso Stimpson (1981). El ensayo se denomina *tilt test* y es el ensayo sugerido por la ISRM (Alejano et al., 2018).

A partir de la configuración geométrica del ensayo y la demostración de Stimpson (1981), el ángulo de fricción básico de la roca se calculó con la Ecuación 4.3.

$$\phi_b = \tan^{-1} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \tan \alpha \right) \quad (4.3)$$

Donde,

ϕ_b = Ángulo de fricción básico de la roca

α = Ángulo de inclinación en el momento del comienzo del deslizamiento.

Debido a que ϕ_b solo puede utilizarse en caso de que la superficie de la discontinuidad no este meteorizada ni húmeda, ϕ_b debe sustituirse por ϕ_r . El ángulo de fricción residual (ϕ_r) se calculó de acuerdo con la Ecuación 4.4 y que fue propuesta por Barton y Choubey (1977).

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \cdot (r/R) \quad (4.4)$$

Donde,

r = Rebote del martillo de Schmidt en superficies húmedas y meteorizadas, tal y como se suelen encontrar normalmente en campo

R = Rebote del martillo de Schmidt en superficies lisas no alteradas de la misma roca.

Dentro de la observación visual se identificaron características físicas como el cambio de color, la textura y la forma del grano gracias a éstas se hizo más fácil la identificación de las diferencias entre los núcleos a lo largo de la profundidad del sondeo. En el caso de las discontinuidades para la determinación de la rugosidad se utilizó el peine de Barton y se obtuvo el coeficiente de rugosidad de acuerdo a los perfiles de rugosidad propuestos en Barton y Choubey (1977).

4.2 Pruebas de laboratorio

Para las pruebas de laboratorio los especímenes utilizados en los ensayos fueron seleccionados y preparados de acuerdo con lo establecido en ASTM D4543-08e1 (2017).

Las pruebas de densidad, absorción y porosidad se realizaron en todos los tramos de los dos sondeos. Estas pruebas son importantes ya que a menudo las rocas expuestas a condiciones de deterioro presentan cambios en su estructura, además de que las propiedades determinadas con estas pruebas tienen relación con otras propiedades físicas y mecánicas.

Densidad, ρ

Es la relación entre la masa de una muestra de roca y el volumen que ocupa (Zhang, 2016), para el cálculo de este parámetro se utilizó la Ecuación 4.5.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4.5)$$

Donde,

ρ es la densidad de la roca, en g/cm^3 .

m es la masa de la muestra de roca, g.

v es el volumen de la muestra de roca cm^3 .

Absorción

Es el agua que llena los poros de una muestra de roca sumergida en agua (Zhang, 2016), para su determinación se utilizó Ecuación 4.3.

$$\text{Absorción, \%} = \frac{B - A}{A} \cdot 100 \quad (4.6)$$

Donde,

A es la masa de la muestra secada al horno, g.

B es la masa de la muestra saturada, g.

Porosidad, n

En una roca, es el volumen de poros expresado en porcentaje respecto al volumen total (Wyllie, 2018), en el cálculo de esta propiedad se utilizó la Ecuación 1.4.

$$n = \frac{V_v}{V} \cdot 100 \quad (4.7)$$

Donde,

n es la porosidad de la roca

V_v es el volumen de vacíos

V es el volumen total

El procedimiento seguido y el equipo utilizado para la realización de las pruebas de densidad y porosidad son los sugeridos por la ISRM (1981) y para la absorción los indicados en ASTM D 6473 (2015).

En mecánica de rocas una de las pruebas más utilizadas como parámetro de resistencia es la prueba de carga puntual debido a su simplicidad y su aplicación en algunas de las clasificaciones geomecánicas, por estas razones se decidió añadirse a este trabajo de investigación.

Índice de carga puntual, I_s

La resistencia a la compresión uniaxial de fragmentos irregulares de roca, núcleos cilíndricos de sondeos o bloques puede ser determinada mediante el ensayo de carga puntual, a partir del índice de carga puntual (I_s).

El índice de carga puntual sin corrección se calculó de acuerdo a la Ecuación 4.8 (Broch & Franklin, 1972).

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (4.8)$$

Donde,

I_s es el índice de carga puntual, MPa.

P es la carga de falla, N.

D_e es el diámetro equivalente del núcleo, mm.

Resistencia a la compresión uniaxial, σ_c

La correlación entre el índice I_s y la resistencia a la compresión uniaxial de la roca σ_c , está dada por la Ecuación 4.9 (Bieniawski Z. T., 1975).

$$\sigma_c = f I_s \quad (4.9)$$

Donde f es el factor de corrección y varía según el diámetro de la muestra, se puede calcular gráficamente o de acuerdo con la Ecuación 4.10.

$$f = \left(D_e / 50 \right)^{0.45} \quad (4.10)$$

El procedimiento seguido se encuentra descrito en ASTM D 5731 (2016). Se cuidaron los aspectos más importantes como el punto de aplicación de la carga, la relación largo-diámetro ($L > 0.5D$) y en el caso de las rocas más suaves la penetración en mm para la determinación del diámetro equivalente. A partir de del I_s y las Ecuaciones 4.9 y 4.10 se determinó la resistencia a la compresión uniaxial de los núcleos de ignimbritas.

En esta investigación se tuvo la oportunidad de realizar la determinación de la velocidad de propagación de las ondas de compresión de las ignimbritas. Esta velocidad se determina a través de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, una prueba poco común en laboratorio en esta área de la ingeniería civil.

Velocidad de pulso ultrasónico

Las ondas de compresión (ondas primarias u ondas P) se propagan alternando compresión y dilatación en la dirección de las ondas (Barton N. , 2007). La velocidad de la onda P (V_p) que depende de la densidad y las propiedades elásticas de las rocas se ha utilizado durante muchos años para determinar las propiedades físico-mecánicas de diferentes rocas por varios autores (Kurtuluş et al., 2016).

En el cálculo de esta propiedad se utilizó la Ecuación 4.11.

$$V_p = L_p / T_p \quad (4.11)$$

Donde,

V_p es la velocidad de propagación del pulso (m/s)

L_p es la distancia de recorrido del pulso (m)

T_p es el tiempo de viaje de pulso efectivo (s)

Dado que los requerimientos que marca la norma seguida para esta prueba ASTM D 2845 (2008) son más rigurosos en cuanto a las características de los especímenes, por ejemplo la relación largo-diámetro y una forma regular de los especímenes (probeta cilíndrica) no fue posible realizar las mediciones en todos los tramos de los sondeos, sin embargo el número de ensayos realizados se considera representativo ya que se pudo efectuar la prueba en todos los cambios de material a lo largo de la profundidad de ambos sondeos. El equipo utilizado para esta prueba fue el sistema de pulsos de ultrasonido modelo V-Meter MK IV marca James Instruments, la utilización este equipo tiene dos ventajas, la primera es que el diámetro de los núcleos de los dos sondeos (tipo NQ) coincide con el diámetro de los transductores utilizados para la toma de las lecturas de la velocidad de onda P y la segunda que los cálculos son fácilmente verificables dado que el equipo muestra el tiempo de atenuación de las ondas, lo anterior es importante ya que en un principio se trató de determinar la velocidad de onda P con un generador de onda y un osciloscopio digital, sin embargo los resultados no eran del todo convincentes. Como parte del ensayo utilizando el sistema de pulsos de ultrasonido antes de realizar la lectura de la velocidad se debe efectuar una calibración entre los transductores lo que garantiza mejores resultados en las tomas de lecturas.

Como otro parámetro de resistencia se optó por incorporarse la prueba de tensión indirecta (brasileña).

Resistencia a la tensión, σ_t

Las rocas se caracterizan por su baja resistencia a tensión y ésta puede ser determinada directamente o indirectamente. En este trabajo se utilizó un método indirecto denominado “ensayo brasileño”, en el cual una probeta cilíndrica de roca se somete a compresión.

La resistencia a tensión de la probeta se determinó con la Ecuación 4.12 (Andreev, 1991).

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot D} \quad (4.12)$$

Donde,

σ_t es la resistencia a la tensión, MPa

P es la carga máxima aplicada, N

t es el espesor de la probeta, mm

D es el diámetro de la probeta, mm

El ensayo se realizó de acuerdo con lo establecido en ASTM D 3967 (2016). También se verificó la relación largo-diámetro y la forma de falla de los especímenes.

La prueba que relaciona el comportamiento de la roca frente al deterioro es la prueba de durabilidad ya que considera ciclos de humedecimiento y secado sometidos a un desgaste constante.

Durabilidad

Es el comportamiento de la roca frente al deterioro, también se conoce inversamente como alterabilidad. El ensayo de durabilidad para determinar esta propiedad fue desarrollado por Franklin y Chandra (1972). El índice de durabilidad, I_d , representa el porcentaje de roca, en peso seco, que queda retenido en el tambor después de uno o dos ciclos de desmoronamiento (I_{d1} , I_{d2}) y puede variar entre 0% y 100%.

El índice de durabilidad se calculó de acuerdo con la Ecuación 4.13 (Franklin & Chandra, 1972).

$$I_d = \frac{W_F - C}{B - C} \cdot 100 \quad (4.13)$$

Donde,

I_d es el índice de durabilidad, %

B es la masa del tambor más muestra secada al horno antes del ciclo, g.

W_F es la masa del tambor más muestra retenida seca al horno después del ciclo, g.

C es la masa del tambor, g.

En la norma ASTM D 4644 (2016) se describe la forma de realizar cada ciclo de desgaste, también se especifica que el número de ciclos deben ser dos, sin embargo debido a que los núcleos estudiados en este trabajo presentan una variación notoria en cuanto a sus características, se consideró realizar tres ciclos más con el fin de observar un mejor comportamiento del tipo de roca en estudio. Es importante aclarar que el procedimiento para cada ciclo fue el mismo, es decir, secado, humedecimiento y desgaste constante.

4.3 Clasificaciones geomecánicas

A partir de los datos obtenidos de la valoración de los dos sondeos éstos se dividieron en unidades de ignimbrita para facilitar su estudio. Las clasificaciones geomecánicas se realizaron en todas las unidades en las que se separaron los sondeos. En la caracterización de discontinuidades se identificaron los diferentes planos de orientación respecto al eje vertical del sondeo, se estimó el espaciamiento entre las discontinuidades de acuerdo al tamaño de los núcleos, también se determinaron la rugosidad, la abertura y el tipo de relleno.

Índice RMR

Para la realización de la clasificación RMR además de las características de las discontinuidades y las condiciones del agua subterránea, fueron necesarios los datos de la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) y el índice de calidad de la roca (RQD), los valores correspondientes a cada parámetro se obtuvieron del Anexo 2. Una vez obtenido el valor correspondiente a cada parámetro se determinó el índice RMR utilizando la Ecuación 4.14.

$$RMR = R_c + R_{RQD} + R_d + R_s + R_u \quad (4.14)$$

Donde,

R_c es la resistencia de la roca inalterada

R_s es el estado de las discontinuidades (abertura, continuidad, rugosidad, estado de las paredes, relleno en fisuras)

R_d es el espaciamiento de las discontinuidades

R_{RQD} es el RQD

R_u representa las condiciones del agua subterránea

El índice RMR fue determinado en cada unidad, obteniéndose así la clase y calidad del macizo rocoso.

Índice de calidad del macizo Q

De manera similar se realizó la clasificación Q, pero en ésta ya no se requirieron los datos de la resistencia a la compresión uniaxial y se consideró el esfuerzo activo. Siguiendo el Anexo 3 se determinaron las puntuaciones de cada parámetro y con la Ecuación 4.15 se calculó el índice de calidad del macizo.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (4.15)$$

Donde,

Q es el índice de calidad del macizo

RQD es el índice de calidad de la roca

J_n es el número de familias

J_r es el número de rugosidad de las discontinuidades

J_a es el número de alteración de las discontinuidades

J_w es el factor de reducción por la presencia de agua en las juntas

SRF es el factor por reducción de esfuerzos

El primer factor representa el tamaño de los bloques, el segundo la resistencia al corte entre los bloques y el tercero la influencia en el estado de esfuerzos. Con el valor del índice Q se obtuvo la clasificación del macizo rocoso en términos de calidad para cada unidad de ignimbrita de acuerdo con la Tabla 3.2.

Tabla 4.1 Calidades del macizo rocoso (Barton et al., 1974).

| Calidad del macizo rocoso | Valores de Q |
|---------------------------|----------------|
| Excepcionalmente mala | 0.001-0.01 |
| Extremadamente mala | 0.01-0.1 |
| Muy mala | 0.1-1.0 |
| Mala | 1.0-4.0 |
| Regular | 4.0-10.0 |
| Buena | 10.0-40.0 |
| Muy buena | 40.0-100.0 |
| Extremadamente buena | 100.0-400.0 |
| Excepcionalmente buena | 400.0-1000.0 |

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados y su análisis del presente trabajo de investigación. Puesto que la distancia entre los sondeos 1 y 2 es relativamente corta y existe una relación entre la estratigrafía encontrada en ambos sondeos los resultados de ambos se tratan de presentar simultáneamente, con la finalidad de observar las relaciones.

5.1 Caso de estudio

Los dos sondeos forman parte de los estudios geotécnicos de exploración de un túnel del Ramal Camelinas en Morelia Michoacán México. La profundidad de perforación fue de 100 m en ambos casos. El diámetro de ambos sondeos es de 47.6 mm (núcleos tipo NQ). En la Figura 2.3 de muestra el perfil del túnel 1 con la localización de los dos sondeos. El túnel en esta zona se encuentra en un rango de profundidad aproximado de 70 a 90 m.

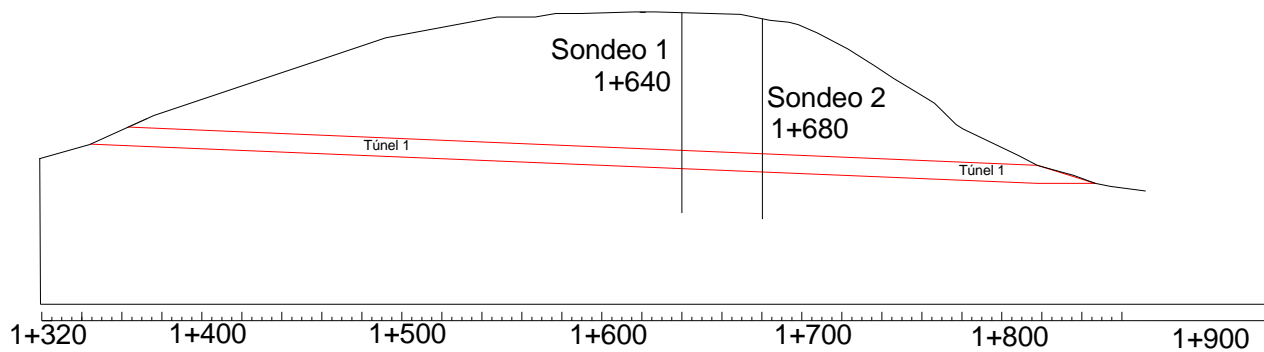


Figura 5.1 Localización de los sondeos 1 y 2.

La longitud de los sondeos analizados en este trabajo es de una profundidad considerable, y dado que existen otros estudios donde también se realizaron sondeos en zonas cercanas al túnel, la roca en estudio debe estar relacionada con lo ya encontrado, bajo este contexto en un estudio realizado por (Arreygue-Rocha et al., 2002) se determinó la secuencia estratigráfica de la ciudad de Morelia, dicha secuencia está formada primeramente por la unidad volcánica de composición andesítica denominada *Mil Cumbres*, estos materiales se encuentran aflorando en diferentes partes de la ciudad, la segunda unidad volcánica es una secuencia piroclástica con un espesor máximo de aproximadamente 200 m llamada *La Cantera de Morelia* aflorando en modo disperso en toda la ciudad debido a su geometría de bloques basculados con dirección sur. La secuencia piroclástica está dividida en varios intervalos: desde la base hasta la cima se observa una brecha soldada en conjunto con brechas de arrastre las cuales hacen el contacto con la unidad Mil Cumbres y tienen un espesor de 1-5 m, sobreyacen a la brecha de arrastre flujos piroclásticos de color blanco poco cementados

con un espesor de entre 50 y 70 m. Sobre los flujos anteriores existe un nivel de conglomerados y brechas con un espesor de 20 a 40 m el cual es cubierto por un nivel continuo consolidado y fracturado de ignimbrita soldada con espesor de entre 15 y 30 m. Todos los paquetes son de composición riolítica y son calcialcalinos. Coronando la serie y descansando en forma discordante hay un depósito de caída con un espesor variable de 1 a 5 m. En la Figura 2.4 se muestra un esquema de la explicación anterior.

Como se mencionó anteriormente todos los productos piroclásticos de composición riolítica y que generalmente son de color rosa, ricos en líticos de andesitas y pómez forman *La Cantera de Morelia*. Tiene un espesor de 200 m y se clasifica como una roca piroclástica denominada Ignimbrita (Garduño-Monroy et al., 1999). Y esta unidad se puede dividir en varios horizontes (brechas, flujos piroclásticos e ignimbritas de varios colores y con diferente grado de soldadura) como se muestra en la Figura 2.4

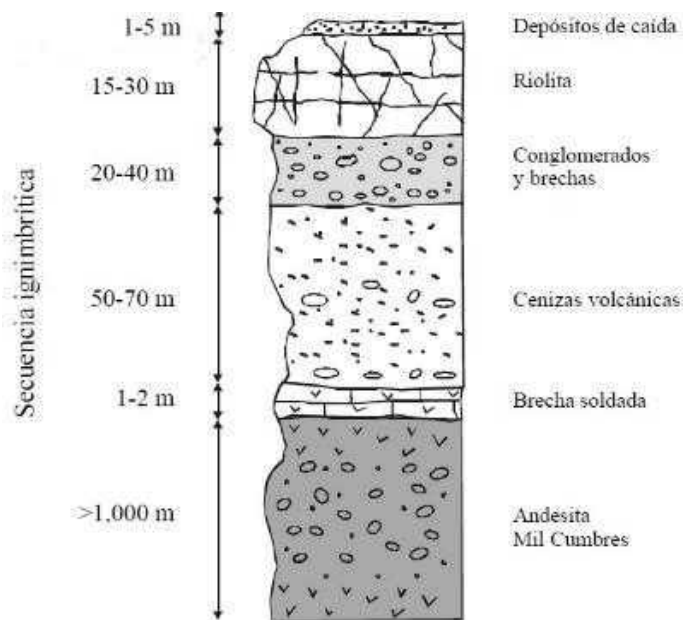


Figura 5.2 Secuencia estratigráfica de la ciudad de Morelia, Michoacán (Arreygue-Rocha et al., 2002).

El término “ignimbrita” fue utilizado por primera vez por (Marshall, 1935), la etimología de la palabra proviene del latín *ignis*: fuego e *imber*: lluvia y lo utilizó para designar una roca volcánica especial de Nueva Zelanda que tenía una apariencia de lava y cuya estructura se aproximaba a la de las tobas. La hipótesis de Marshall dice que las ignimbritas se originaron por deposición de inmensas lluvias o nubes de material volcánico generalmente pequeño e intensamente caliente.

5.2 Reconocimiento de los sondeos 1 y 2

Descripción de las unidades de roca de los sondeos 1 y 2

Debido a que las diferencias entre los núcleos de roca resultaron visibles a partir de la valoración de los sondeos y las pruebas realizadas en el laboratorio se decidió dividir ambos sondeos en seis unidades las cuales se denominaron Ig-A, Ig-B, Ig-C, Ig-D, IgE e Ig-F identificándose con los números 1 y 2 para cada sondeo respectivamente.

De las observaciones realizadas en la valoración de los sondeos 1 y 2 se lograron las siguientes descripciones de las unidades de roca:

La unidad Ig-A se encuentra conformada por rocas ignimbritas color café claro, con presencia de grandes partículas de pómez, mal soldadas, con un grado de fracturamiento considerable y los tramos más cercanos a la superficie muy meteorizados. En el sondeo 2 se observa un mayor grado de alteración.

En la unidad Ig-B la roca ignimbrita cambia a un color gris oscuro, se siguen presentando partículas de pómez pero en menores cantidades y tamaños, el grado de soldadura aumenta y la roca tiene una apariencia casi masiva.

En cuanto a la unidad Ig-C conserva características similares a las de la unidad anterior pero el color cambia a un color gris claro, la presencia de pómez es más visible y la meteorización solo se observa en las discontinuidades o zonas con fracturamiento intenso. En el sondeo 1 el color es más claro.

La unidad Ig-D está formada por una ignimbrita de color rosa muy soldada, tiene una apariencia masiva pero se encuentra fracturada, también se observan lentes de pómez y no presenta meteorización salvo en las discontinuidades.







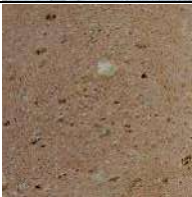





En la unidad Ig-E se presenta un cambio de material muy notorio, se observan clastos de diferentes tamaños envueltos por una matriz arenosa con diferentes grados de cementación. Este cambio en el tipo de material podría influir en la variación de los resultados. En el sondeo 2 el tamaño de los clastos es mayor.

La unidad más profunda es la Ig-F en este tipo de material la presencia de grandes poros es más visible, está mal soldada, el grado de fracturamiento disminuye y la textura es marcadamente porfídica, se aprecia que en el sondeo 2 la unión de las partículas es más fuerte.

La división del sondeo en unidades facilitó su análisis, además de que la determinación del grado o susceptibilidad al deterioro debe realizarse de una manera práctica, sin embargo no se subestimaron las propiedades del macizo rocoso porque dicha división considera los cambios del tipo de material.

En la Tabla 5.1 se muestran las profundidades de cada unidad así como una imagen del tipo de roca.

Tabla 5.1 División de unidades para los sondeos 1 y 2.

| Sondeo 1 | | Imagen | Sondeo 2 | | Imagen |
|-----------------|--------|---|-----------------|--------|---|
| Profundidad (m) | Unidad | | Profundidad (m) | Unidad | |
| 4.4-10.0 | Ig-A1 |  | 4.1-17.5 | Ig-A2 |  |
| 10.0-35.5 | Ig-B1 |  | 17.5-40.0 | Ig-B2 |  |
| 35.5-49.0 | Ig-C1 |  | 40.0-50.5 | Ig-C2 |  |
| 49.0-59.5 | Ig-D1 |  | 50.5-62.5 | Ig-D2 |  |
| 59.5-76.0 | Ig-E1 |  | 62.5-74.5 | Ig-E2 |  |
| 76.0-100.0 | Ig-F1 |  | 74.5-100.0 | Ig-F2 |  |

Grado de meteorización

Esta etapa se realizó de acuerdo a lo descrito en el primer párrafo del subcapítulo 4.1. Se encontró que a lo largo de la profundidad del sondeo se presentan desde el grado II (roca levemente meteorizada) hasta el grado V (roca completamente meteorizada), siendo mayores los grados de meteorización en los primeros metros del sondeo y en los últimos del mismo, aunque la determinación del grado de meteorización depende de la experiencia y criterio del investigador, ésta permite un primer acercamiento con el estado de alteración de la roca. Se

vuelve necesario encontrar otro parámetro para determinar el estado de alteración de la roca que cumpla con las características principales de los ensayos de laboratorio (reproducibilidad y repetibilidad). Lo anterior permite disminuir la incertidumbre en cuanto a los resultados cuantitativos de las propiedades físicas y mecánicas de la roca y la relación con el estado de alteración que ésta presenta y la susceptibilidad al deterioro. Los resultados para todos los tramos de los sondeos se presentan en el Anexo 4.

Coefficiente de rugosidad, JRC

Este coeficiente se obtuvo de acuerdo a lo descrito en el último párrafo del subcapítulo 4.1. El coeficiente de rugosidad (JRC) que se determinó tiene valores en los rangos de 5 a 15 en el sondeo 1 y de 7 a 15 en el sondeo 2. Siendo en la mayoría de los casos encontrados mayor a 7 en ambos sondeos (ver Anexo 4). Los valores obtenidos del JRC son independientes del grado de meteorización, es decir, que valores altos y bajos de JRC pueden presentarse tanto en rocas muy meteorizadas como en rocas sanas. Los valores determinados también pueden utilizarse indirectamente para las clasificaciones geomecánicas, en RMR en las condiciones de las discontinuidades y en el sistema Q para la determinación del factor J_r .

Ángulo de fricción básico de la roca, ϕ_b

De acuerdo al ensayo *tilt test* y la Ecuación 4.3 se determinó el ángulo de fricción básico de los núcleos de ignimbrita. El rango de valores determinados fue de 30 a 45 grados (Anexo 4), en este trabajo de investigación los resultados obtenidos serán utilizados únicamente para la clasificación geomecánica Q, en general su aplicación está dirigida a los modelos para estimar las propiedades resistentes de las discontinuidades rugosas sin relleno.

Porcentaje de recuperación

Este porcentaje se determinó de acuerdo con la Ecuación 4.1. El porcentaje de recuperación determinado se considera representativo de los sondeos ya que en la mayor parte de los tramos el porcentaje de recuperación es superior al 50% en promedio, el porcentaje para el sondeo 1 fue de 77.6% y para el sondeo 2 de 72.5% (ver Anexo 4). Es difícil lograr un porcentaje de recuperación del 100% pues éste depende del equipo de perforación, la habilidad de los operadores y el estado del macizo rocoso, ya que se ha encontrado que cuando la roca presenta menor calidad los dos primeros factores tienen una mayor influencia. Es importante que el porcentaje sea representativo porque los núcleos recuperados son utilizados para diversos estudios. Un parámetro con una estrecha relación es el índice de calidad de la roca (RQD). En esta investigación el cálculo de dicho índice se realizó con los núcleos recuperados.

Índice de calidad de la roca (RQD)

El RQD fue determinado de acuerdo a lo descrito en el segundo párrafo del subcapítulo 4.1. En la determinación del RQD se presentaron todos los casos que influyen en éste índice (núcleos altamente meteorizados, núcleos con longitudes inferiores a 10 cm, fracturas inducidas debido al proceso de perforación, tramos sin recuperación y núcleos con apariencia

sana y longitudes mayores a 10 cm) y que se encuentran explicados en Deere y Deere, (1988), además de estar establecidos en ASTM D 6032 (2017), esto es importante ya que una incorrecta determinación de éste índice producirá una subestimación del macizo rocoso y por ende impactará de forma significativa en las clasificaciones geomecánicas.

Los resultados del RQD en ambos sondeos y de acuerdo con Deere y Deere (1988) muestran que la calidad de la roca va de mala a muy mala. Como se puede apreciar en el Anexo 4 en la mayoría de los tramos donde se pudo determinar el índice RQD los valores son inferiores al 50% lo que indica un grado de fracturamiento elevado, hay tramos donde el índice es mayor al 50%, es decir el tamaño de los núcleos en esos tramos es mayor. Dado que el RQD solo considera los núcleos con longitudes mayores a 10 cm, existen tramos donde es nulo, esto es un grado de fracturamiento intenso o pérdida de material. Los resultados de la clasificación de la calidad de la roca por unidad de ignimbrita se muestran en la Tabla 4.1, los valores del índice indican que los patrones de fracturamiento son diferentes en casi todas las unidades a excepción de la unidad Ig-E donde los valores son similares.

Tabla 5.2 Clasificación de la calidad de la roca por unidad.

| Sondeo 1 | | | Sondeo 2 | | |
|----------|---------|----------|----------|---------|----------|
| Unidad | RQD (%) | Calidad | Unidad | RQD (%) | Calidad |
| Ig-A1 | 42.6 | Mala | Ig-A2 | 9.7 | Muy mala |
| Ig-B1 | 27.7 | Mala | Ig-B1 | 13.3 | Muy mala |
| Ig-C1 | 12.6 | Muy mala | Ig-C1 | 21.1 | Muy mala |
| Ig-D1 | 11.0 | Muy mala | Ig-D1 | 23.9 | Muy mala |
| Ig-E1 | 13.2 | Muy mala | Ig-E1 | 12.4 | Muy mala |
| Ig-F1 | 22.0 | Muy mala | Ig-F1 | 37.3 | Mala |

Para observar mejor el comportamiento del RQD se graficaron los resultados de los dos sondeos, en la Figura 5.3 se muestra la variación con la profundidad, de 0 a los 4.4 m no se presentaron resultados dado que es el estrato de suelo (sondeo 1) y los núcleos recuperados se encontraban muy meteorizados (sondeo 2) no se consideran se puede observar claramente que no existe una relación entre los valores estimados para ambos sondeos.

En el sondeo 1 hasta los primeros 20 m el valor determinado es de aproximadamente 40%, después conforme aumenta la profundidad existe una mayor variación que va desde un valor nulo hasta valores mayores al 40%, al final del mismo sondeo (80-100 m) el RQD presenta algunos valores entre el 20% y el 40%. Para el sondeo 2 la variación es mayor incluso desde los primeros metros del sondeo, se presentan valores cercanos al 40% después de los 40 m de profundidad hasta los 65 m y en los últimos 20 m del sondeo los valores comienzan a incrementar superando en algunos casos el 40%. Si bien es claro que la calidad de la roca es mala en la mayor parte, existen tramos en los dos sondeos donde la calidad de la roca es media, es decir el grado de fracturación es menor por lo que el tamaño de los núcleos en dichos tramos es mayor. De los resultados sobre este índice también se observa

que al menos para el macizo rocoso en estudio, el RQD no tiene una relación con la profundidad puesto que en los últimos metros de los sondeos el tamaño de los núcleos es considerable.

Índice de calidad de la roca (RQD)

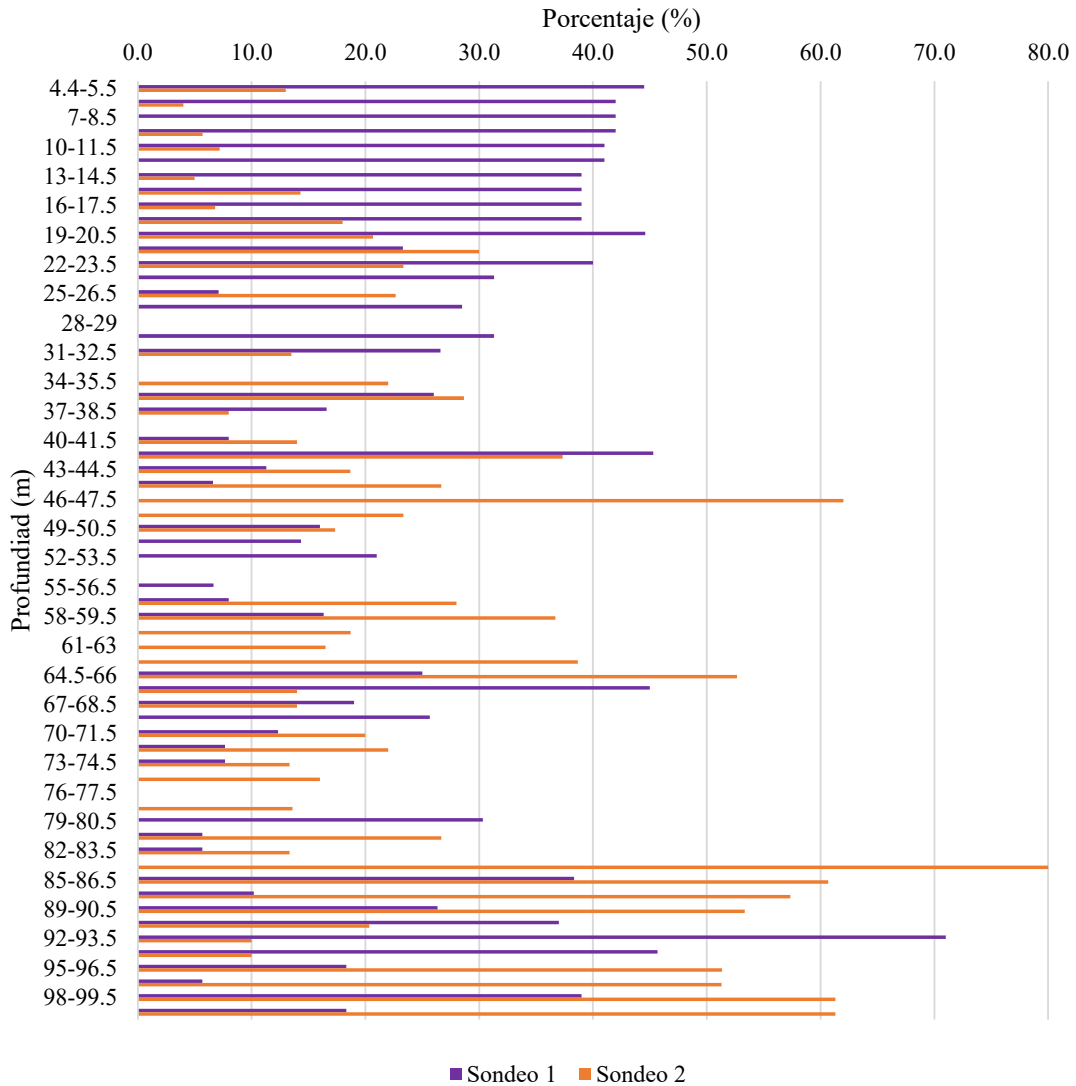


Figura 5.3 Variación del RQD con la profundidad en los sondeos 1 y 2.

5.3 Densidad, absorción, porosidad y resistencia a la compresión uniaxial de los núcleos de ignimbrita

En este capítulo se presentan los resultados de las siguientes propiedades de los núcleos de ignimbrita:

Densidad, ρ

Esta parte se llevó a cabo de acuerdo con lo descrito en el subcapítulo 4.2 y empleando la Ecuación 4.5. Dada la sencillez del ensayo para determinar la densidad de la roca, se llevó a cabo en todos los tramos de los dos sondeos. Hasta los primeros 75 m aproximadamente, en ambos sondeos el rango de valores esta entre 1.80 y 2.40 g/cm³, después de los 75 m los valores disminuyen hasta un rango de 1.20 a 1.60 g/cm³. En el Anexo 5 se encuentran tabulados los valores determinados y en la Figura 5.4 se graficaron dichos valores para observar su variación con la profundidad. Los valores más bajos de densidad se encuentran en los primeros metros y en los últimos de los dos sondeos. Los valores más altos pertenecen a las profundidades entre los 50 y 60 m.

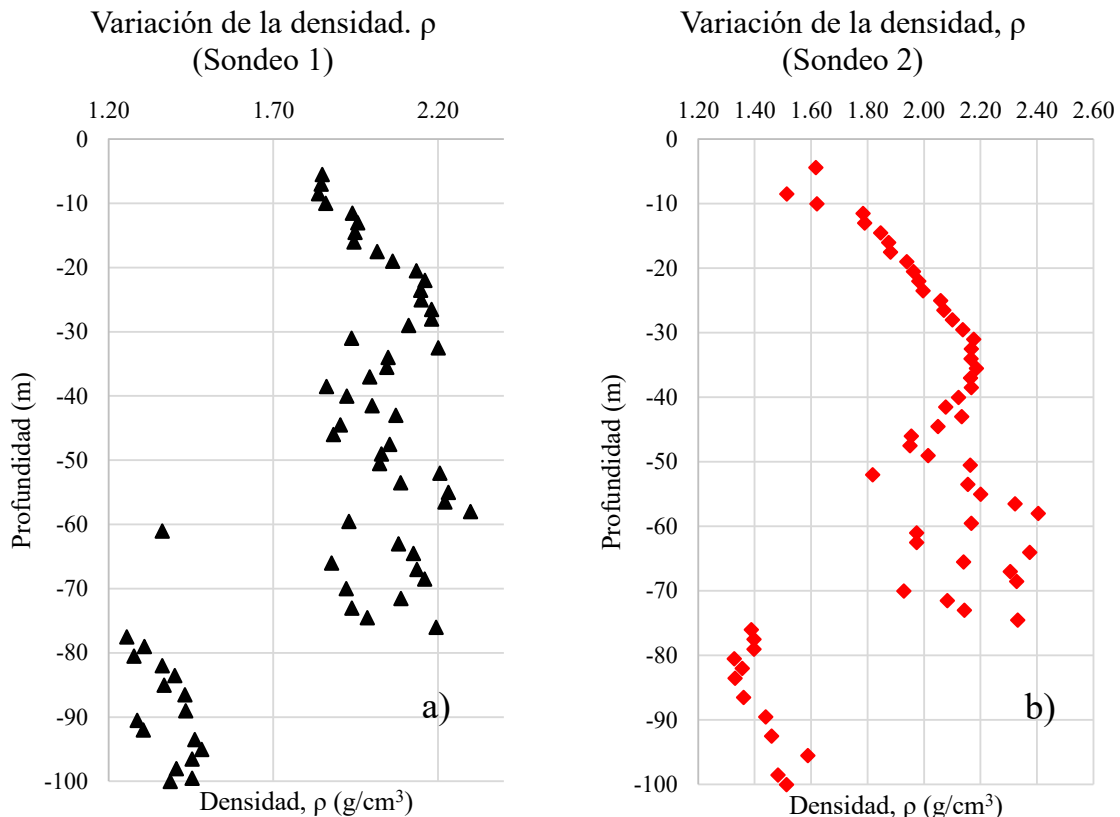


Figura 5.4 Variación de la densidad (ρ) con la profundidad a) sondeo 1 y b) sondeo 2.

El cálculo de los valores de esta propiedad se realizó utilizando la Ecuación 4.6 y el procedimiento señalado en el subcapítulo 4.2, los valores de absorción también se encuentran en la tabla del Anexo 5, en la Figura 5.5 se muestra la variación de la absorción en porcentaje con la profundidad, en el sondeo 1 hasta los 75 m de profundidad aproximadamente, están entre un rango de 3% y el 11%, después de dicha profundidad los valores aumentan considerablemente hasta un rango de 22% a 36%. En el sondeo 2 después de los primeros 10 m de profundidad la tendencia de los valores es similar a la del sondeo 1, en los últimos metros la variación se mantiene entre un 20% y 30% aproximadamente. Los valores más altos de absorción de ambos sondeos se presentan en los últimos metros de la profundidad excavada, además de que la dispersión de los mismos es mayor que en los demás tramos del sondeo. De los resultados mostrados en las Figuras 5.4 y 5.5 se observa que al menos para el tipo de roca en estudio, valores altos de densidad presentan valores bajos de absorción y viceversa.

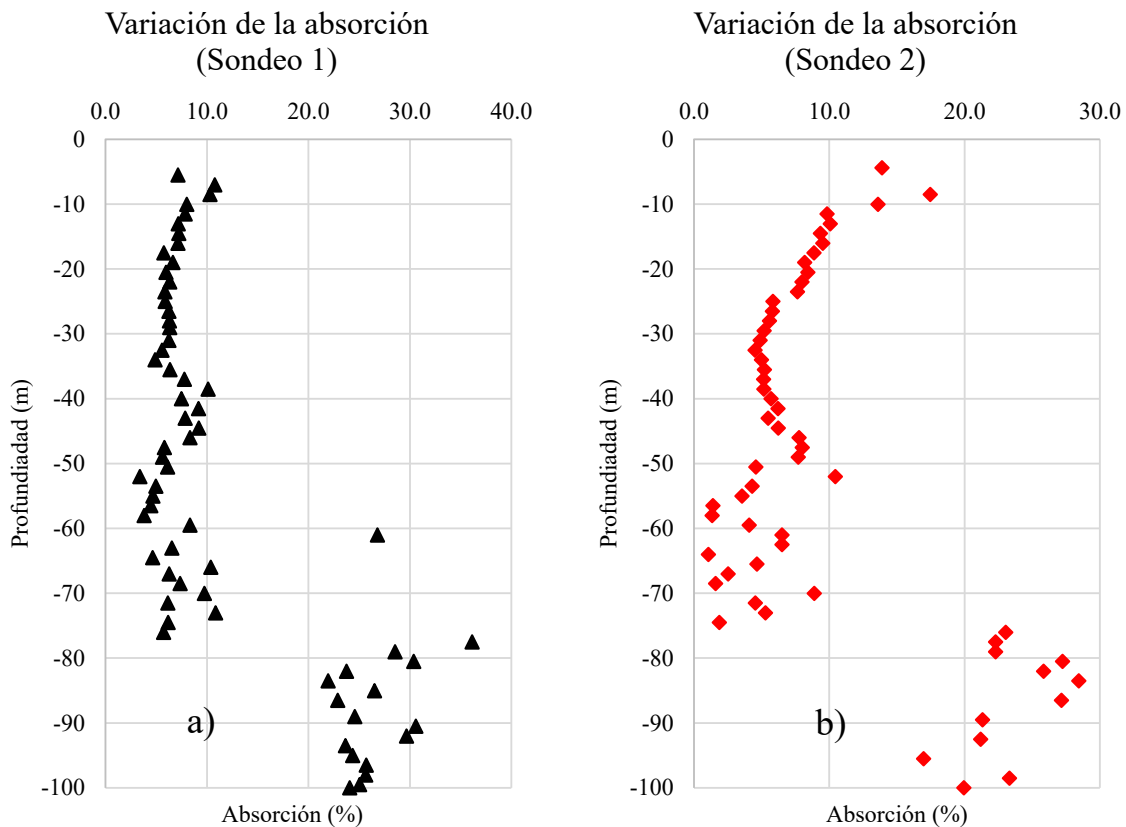


Figura 5.5 Variación de la absorción con la profundidad a) sondeo 1 y b) sondeo 2.

Porosidad, n

La determinación de esta propiedad se realizó siguiendo el procedimiento marcado en el subcapítulo 4.2 y utilizado la Ecuación 4.7. Al igual que los valores de las dos propiedades anteriormente descritas, los valores de la porosidad se determinaron en todos los tramos de

los sondeos y se presentan en el Anexo 5. En la Figura 5.6 se muestra la variación de la porosidad con la profundidad de los sondeos 1 y 2. En la figura se observa que los resultados tienen casi el mismo comportamiento que los valores de absorción, lo que significa que para el tipo de roca analizada existe una clara relación entre ambas propiedades. Se pueden notar en general dos rangos de porosidades 10%-20% y 30%-40%. En el sondeo 2 la porosidad presenta valores inferiores al 10% en las profundidades de 50 m a 75 m. Los valores más altos de porosidad se presentaron en la parte más profunda de los sondeos.

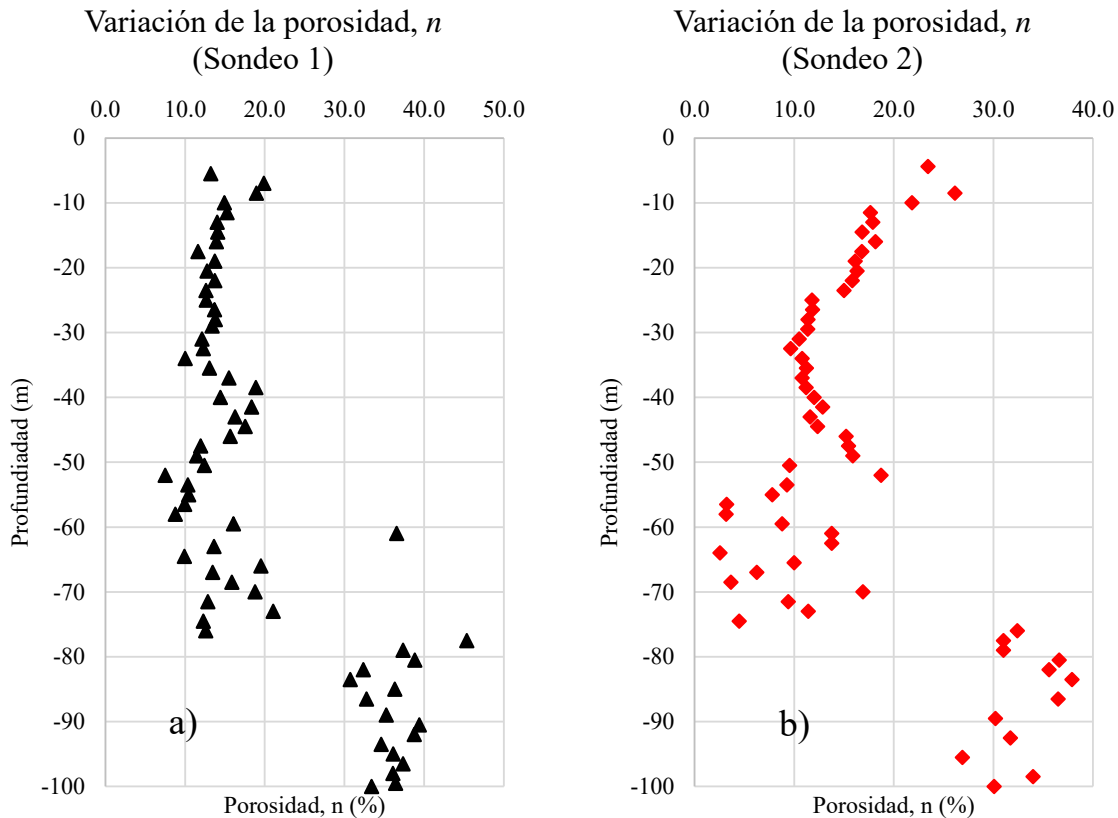


Figura 5.6 Variación de la porosidad (n) con la profundidad a) sondeo 1 y b) sondeo 2.

Resistencia a la compresión uniaxial

Esta resistencia fue determinada por medio del ensayo de carga puntual y en el cálculo se utilizaron las Ecuaciones 4.8, 4.9 y 4.10 como se señaló en el subcapítulo 4.2. Los valores de la resistencia a la compresión uniaxial se encuentran tabulados en el Anexo 5, existen tramos donde no se pudo llevar a cabo la prueba, debido a que la norma ASTM D 5731 (2016) establece ciertas características que deben cumplir los especímenes y en algunos tramos el fracturamiento de los núcleos no lo permitió. En la Figura 5.7 se puede apreciar la variación de la resistencia a la compresión uniaxial con la profundidad, en los primeros metros de ambos sondeos la resistencia es menor a 50 MPa, después de los 20 m de profundidad la resistencia comienza a incrementar hasta los 60 m de profundidad con un

rango de 50 a 150 MPa, después de esa profundidad los valores de resistencia vuelven a estar por debajo de los 50 MPa. En el sondeo 2 se presentaron algunos valores superiores a 150 MPa, correspondientes a los tramos de roca aparentemente sana. También después de los 60 m de profundidad en el sondeo 2 la resistencia disminuye en comparación con el sondeo 1, lo que se puede apreciar en la Figura 5.7.

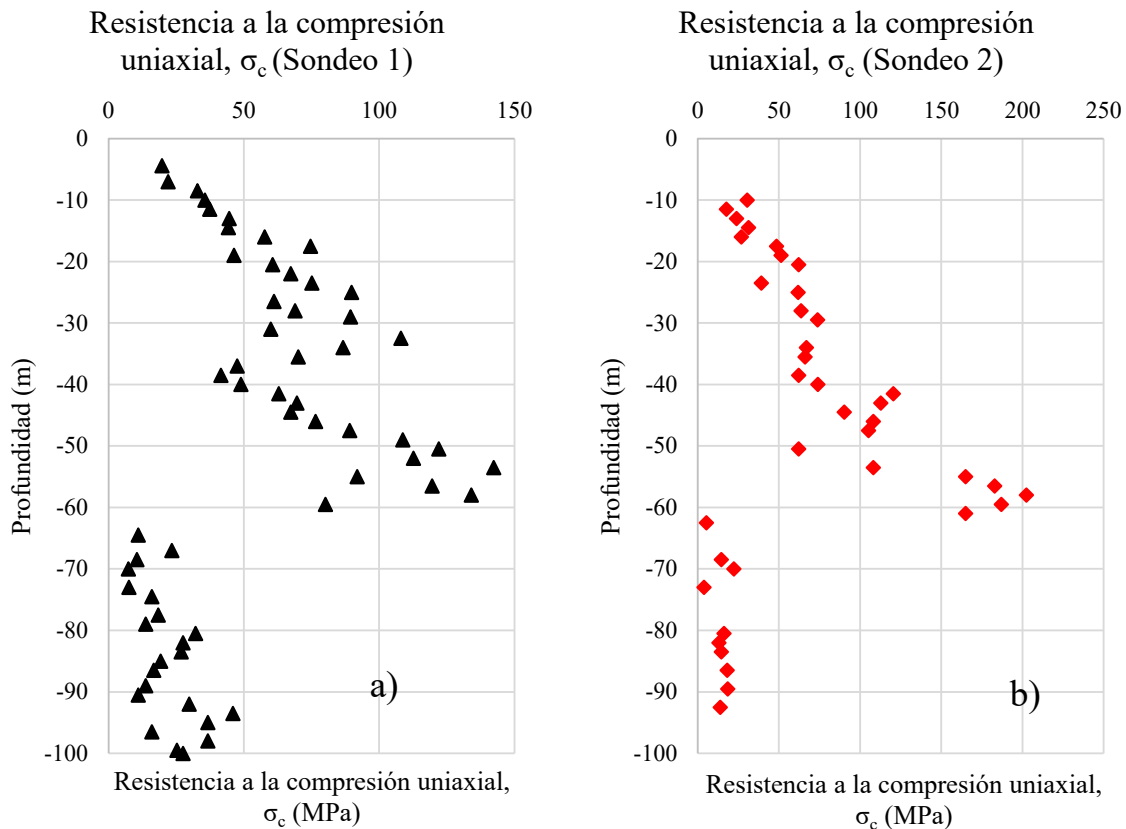


Figura 5.7 Variación de la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) con la profundidad a) sondeo 1 y b) sondeo 2.

Relación entre la densidad y la absorción y la porosidad

Para observar mejor la relación entre la densidad, el porcentaje de absorción y la porosidad se decidió graficar la densidad en función del porcentaje de absorción y la porosidad, en las Figuras 5.8 y 5.9 se muestran los resultados obtenidos de ambos sondeos.

En las mismas figuras se puede observar que existe una clara relación entre los valores de la densidad y los valores de absorción y porosidad. Puede verse que a medida que aumentan los valores de la densidad disminuyen los porcentajes de absorción y porosidad, lo que significa que la densidad es proporcional a la absorción y porosidad, ignimbritas con densidades altas poseen bajos porcentajes de absorción y de porosidad. Y al menos para este tipo de roca, las relaciones se cumplen en todos los casos. Del mismo modo puede observarse que las líneas de tendencia tienen una forma parecida debido a que también existe una relación entre el porcentaje de absorción y el de porosidad, es decir ignimbritas con bajos porcentajes de absorción presentan bajos porcentajes de porosidad. Las densidades bajas,

porosidades y absorción altas en las ignimbritas pueden ser indicadores del estado de alteración y su comportamiento frente al deterioro.

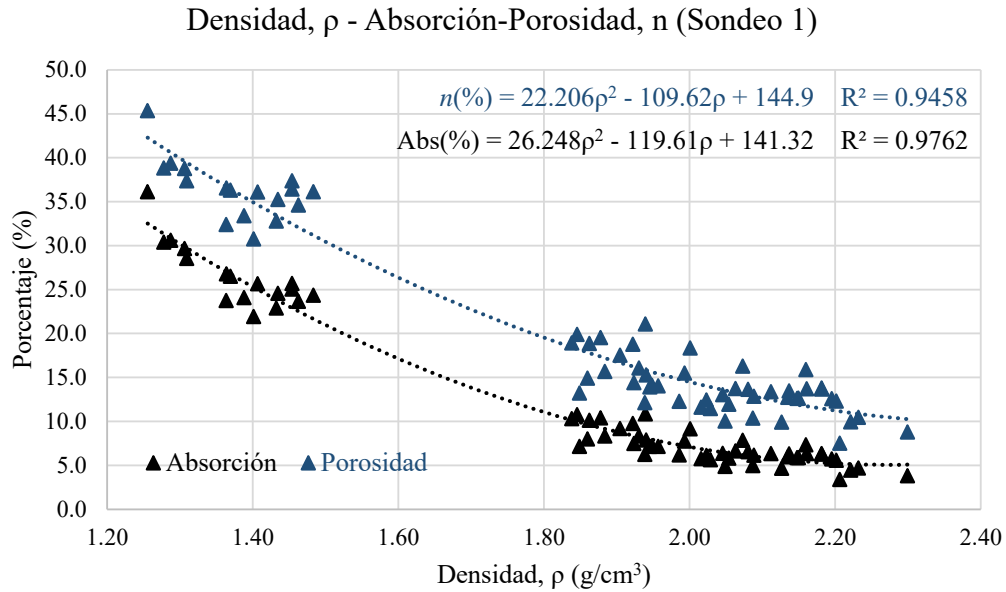


Figura 5.8 Relación entre la densidad (ρ) y la absorción y la porosidad (n) (sondeo 1).

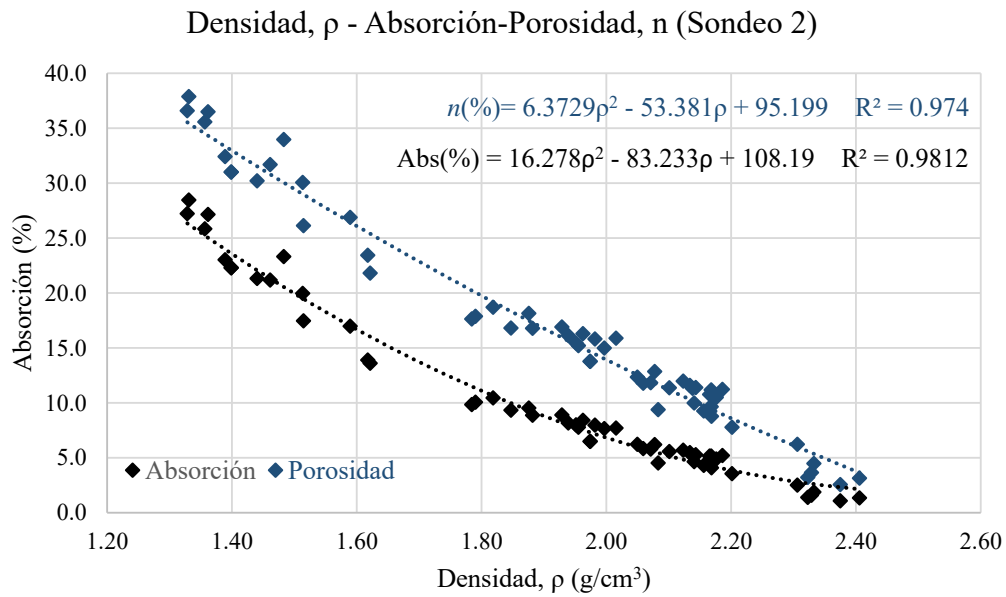


Figura 5.9 Relación entre la densidad (ρ) y la absorción y la porosidad (n) (sondeo 2).

Relación entre la densidad y la resistencia a la compresión uniaxial

En Figura 5.10 se presenta los resultados de la densidad versus la resistencia a la compresión uniaxial de los dos sondeos, se puede observar que no siempre se cumple la relación densidad-resistencia a compresión, ya que muestras de ignimbrita con densidades altas tienen valores de resistencia a compresión uniaxial bajos, solo en el caso de las densidades entre 1.2 y 1.5 g/cm³ se tiene cierta correspondencia con los valores de resistencia a la compresión (< 50 MPa). Entonces valores altos de resistencia podrían ser indicadores de un bajo grado de meteorización pero no así con los valores altos de densidad, por lo que es necesario encontrar otros parámetros que se relacionen mejor con el estado de alteración o la susceptibilidad al deterioro de las rocas ignimbríticas.

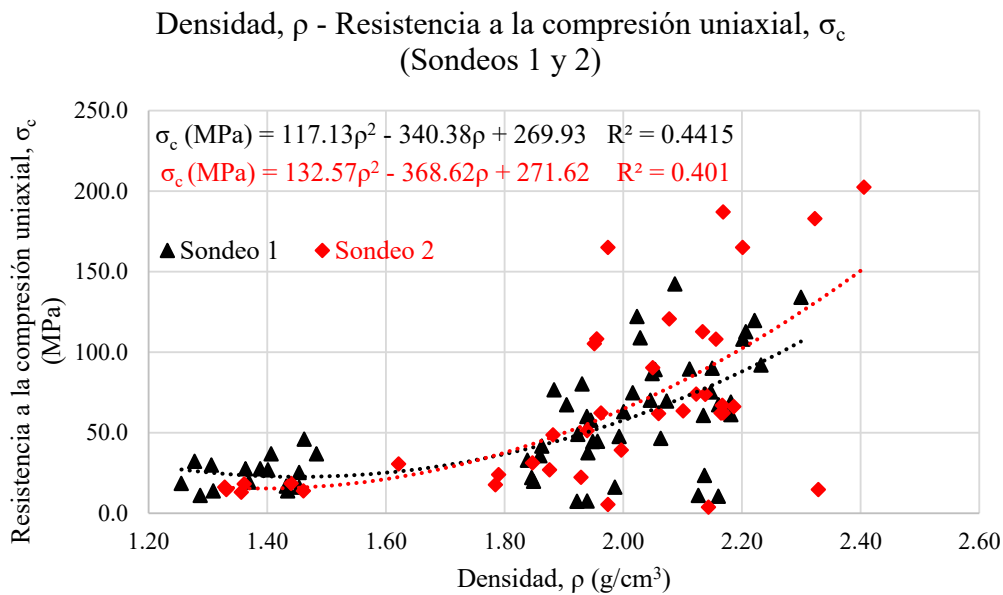


Figura 5.10 Relación entre la densidad (ρ) y la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) sondeos 1 y 2.

Relación entre la porosidad y la resistencia a compresión uniaxial

Para reafirmar lo anteriormente dicho y dado que la densidad tiene una relación estrecha con la porosidad se decidió compararla con la resistencia a la compresión uniaxial, en la Figura 5.11 se puede apreciar que la relación entre estas dos propiedades también es baja, existe una gran variación en las muestras de ignimbrita con porosidades menores al 25% pues presentan valores de resistencias que van de 5 MPa hasta 200 MPa, en el caso de las muestras con porosidades mayores al 30% poseen resistencias a la compresión menores a 50 MPa.

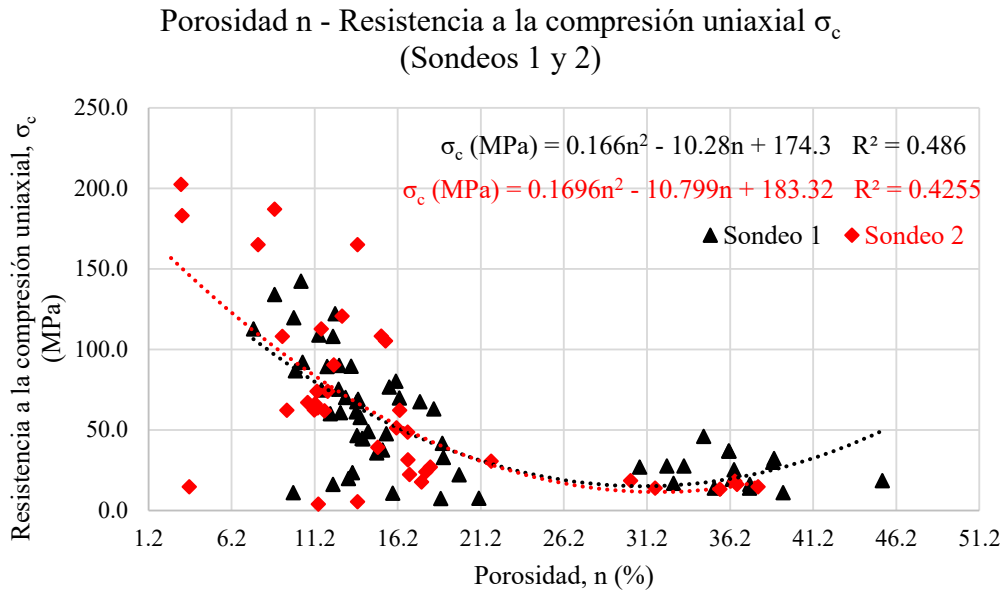


Figura 5.11 Relación entre la porosidad (n) y la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) sondeos 1 y 2.

5.4 Velocidad de onda P y resistencia a tensión

Velocidad de onda P, V_p

La determinación de la velocidad de onda P se realizó a través de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico descrita en el subcapítulo 4.2 y empleando la Ecuación 4.11 para el cálculo. En la Figura 5.12 se presenta la relación entre la velocidad de onda P y la densidad, las velocidades más altas de las ondas P corresponden a las muestras de ignimbritas con las densidades más altas, lo que confirma la fuerte influencia de la densidad en la velocidad de onda P, algo que ya había sido informado por (Barton N. , 2007).

A diferencia de las relaciones entre resistencia a compresión uniaxial con la densidad y porosidad, la velocidad de onda P tiene una mejor correlación con éstas propiedades, en la Figura 5.13 se presenta la relación entre la velocidad de onda P y la porosidad, se puede ver que a medida que la porosidad va disminuyendo la velocidad de la onda P incrementa, lo que significa que la onda P puede viajar más rápido a través de las partículas sólidas que en los espacios vacíos, lo que reafirma la dependencia de la densidad.

Debido a las relaciones encontradas entre la velocidad de onda P y la absorción y porosidad, también se graficó contra la resistencia a la compresión uniaxial, en la Figura 5.14 se aprecian dichos resultados, puede notarse que a medida que incrementan los resultados de la velocidad de onda P también aumentan los valores de resistencia a la compresión uniaxial y que esta tendencia se cumple para los dos sondeos.

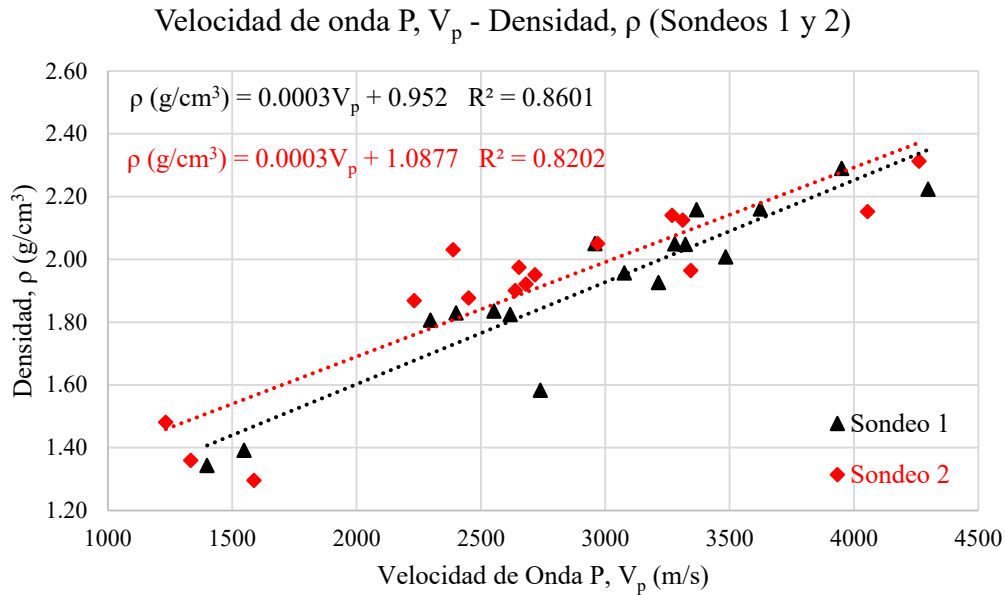


Figura 5.12 Relación entre la velocidad de onda P (V_p) y la densidad (ρ) sondeos 1 y 2.

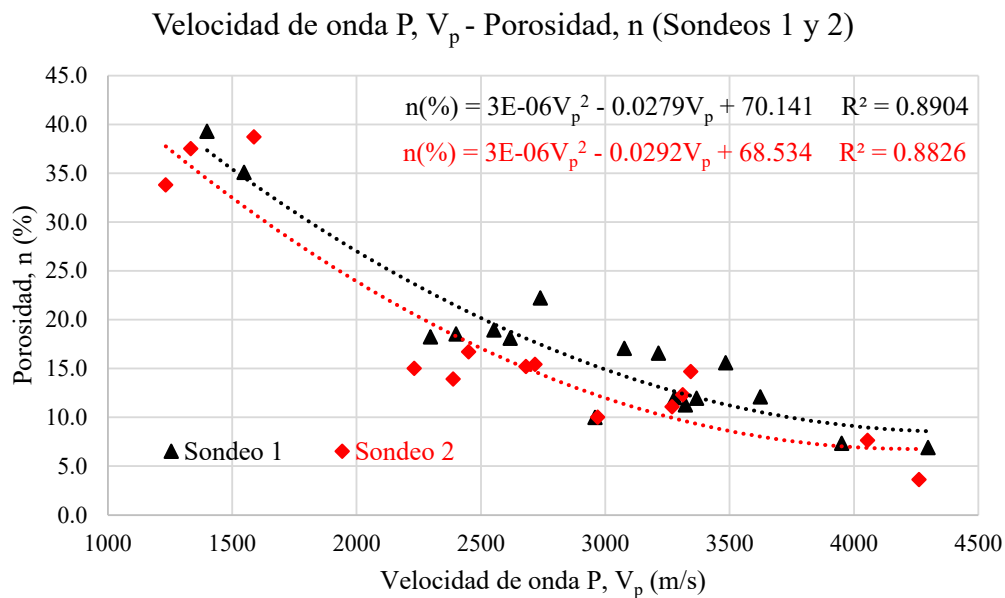


Figura 5.13 Relación entre la velocidad de onda P (V_p) y la porosidad (n) sondeos 1 y 2.

Entonces al menos para las rocas ignimbríticas la velocidad de onda P si está relacionada con la resistencia a la compresión uniaxial y dicha relación disminuye a medida que aumenta el grado de alteración, pues los puntos que se encuentran más alejados de las líneas de tendencia en ambos sondeos corresponden a las muestras con mayor grado de alteración. De los resultados entre estos dos parámetros se puede inferir que la velocidad de onda P también depende del grado de cementación del tipo de roca.

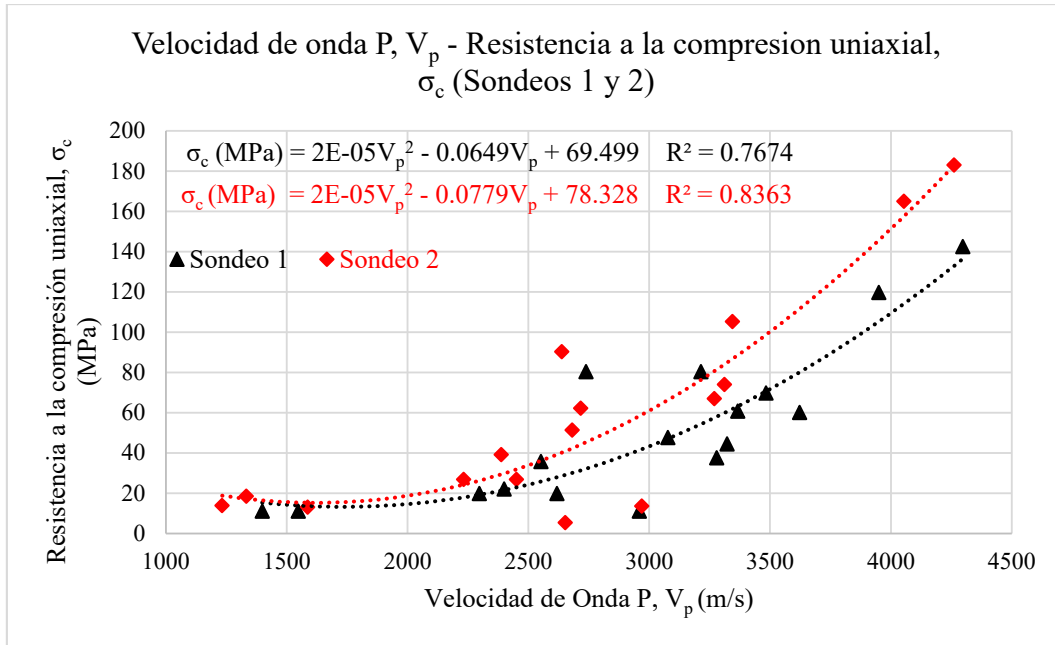


Figura 5.14 Relación entre la velocidad de onda P (V_p) y la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) sondeos 1 y 2.

Resistencia a la tensión, σ_t

Esta propiedad se obtuvo a partir de los resultados de la prueba de tensión indirecta brasileña y la Ecuación 4.12, el procedimiento seguido se especificó en el subcapítulo 4.2 Aunque la resistencia a tensión en rocas es muy baja, es importante contar con otro parámetro de resistencia, en la Figura 5.15 se muestra la relación entre la resistencia a la tensión y la densidad de las ignimbritas, se puede apreciar que a medida que aumenta la resistencia a tensión también incrementan los valores de densidad y la relación entre estos dos parámetros es mayor a diferencia de la relación mostrada en la Figura 5.10 (ρ - σ_c). Dicha relación puede deberse a que el rango de variación en la resistencia a tensión es menor que el rango de variación de la resistencia a la compresión uniaxial.

Si bien la relación entre la resistencia a tensión y la densidad de las ignimbritas es clara, cuando se comparó la resistencia a tensión con la porosidad se obtuvieron coeficientes de correlación más bajos, en la Figura 5.16 se muestra ésta relación, puede apreciarse que las muestras de ignimbrita con valores más altos de resistencia a la tensión, presentan valores bajos de porosidad y viceversa, aunque la dispersión respecto a las líneas de tendencia en ambos sondeos es mayor.

De los resultados mostrados anteriormente la resistencia a la tensión presenta cierta relación con la densidad y porosidad en las muestras de las rocas ignimbriticas, los especímenes con los valores más altos de resistencia a la tensión presentan valores de densidad altos y valores de porosidad bajos, la relación con la densidad es mayor que la relación con la porosidad, lo que significa que las muestras con mayor densidad presentan

mayor resistencia a la tensión en casi todos los casos, esto no se cumple en la comparación contra la porosidad, entonces la resistencia a la tensión está relacionada con el estado de alteración que presentan las rocas y depende no solo de los espacios vacíos entre las partículas sino también de la magnitud con que éstas se encuentran unidas.

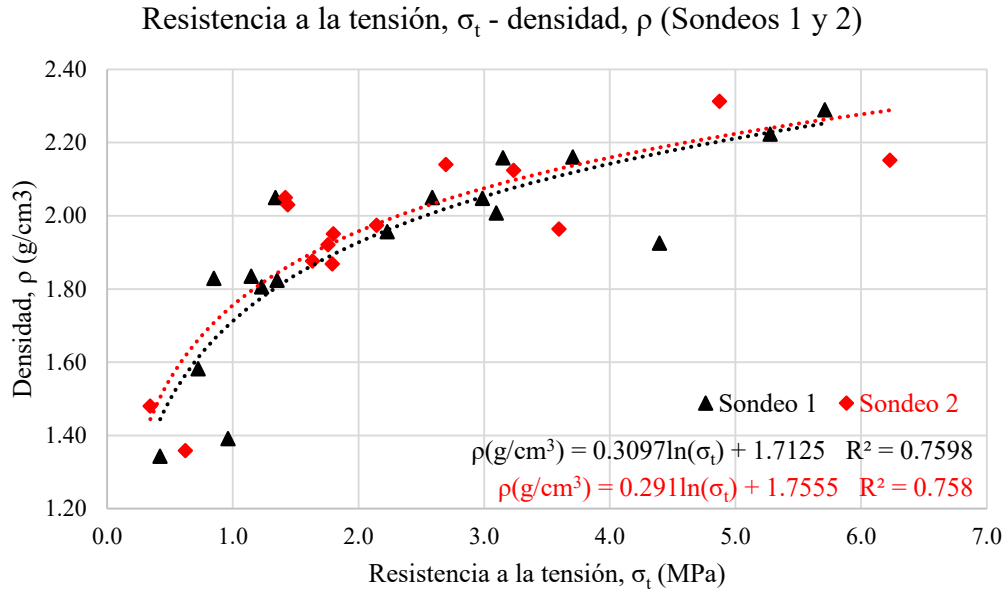


Figura 5.15 Relación entre la resistencia a tensión (σ_t) y la densidad (ρ) sondeos 1 y 2.

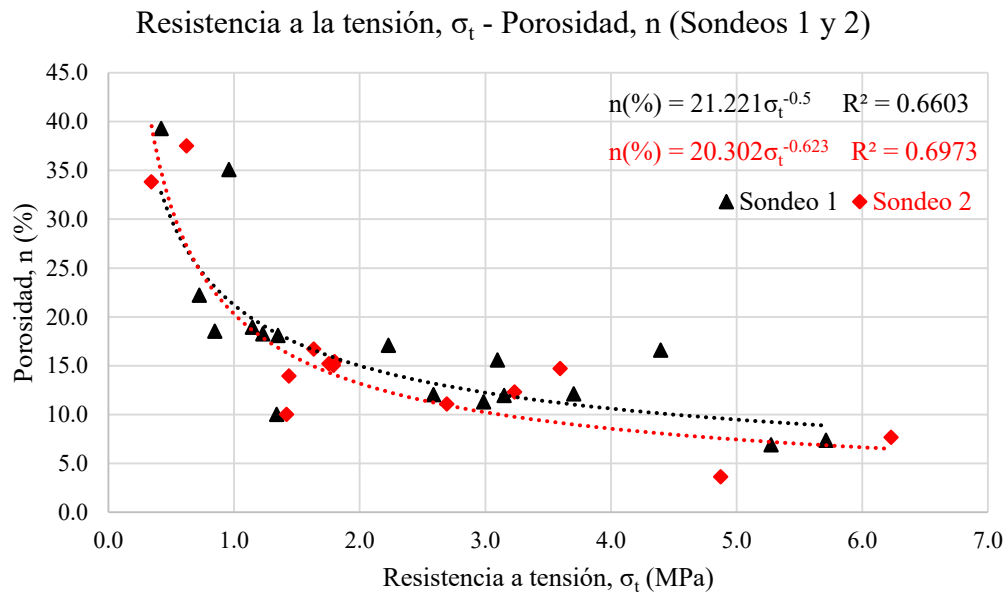


Figura 5.16 Relación entre la resistencia a tensión (σ_t) y la porosidad (n) sondeos 1 y 2.

Una relación más clara de la resistencia a la tensión se presenta en la Figura 5.17 en la cual se graficó contra la resistencia a la compresión uniaxial de las ignimbritas, en el sondeo 1 el coeficiente de correlación es más bajo que en el sondeo 2, esto se debe a que la dispersión de los puntos en el sondeo 1 es mayor, en el caso del sondeo 2 se podría decir que la dispersión es mínima. Los coeficientes de correlación son mayores, es decir, ignimbritas con resistencia a la tensión alta también tienen una resistencia a la compresión uniaxial alta, esto confirma porque influye la fuerza de unión entre las partículas que forman la roca pues como se demostró al graficar la densidad y porosidad contra la resistencia a la compresión uniaxial (Figs. 5.8 y 5.9) densidades altas y porosidades bajas no son indicativos de resistencias altas. Los puntos que se encuentran más alejados de las líneas de tendencia corresponden a las muestras que no presentan una correspondencia entre ambas resistencias.

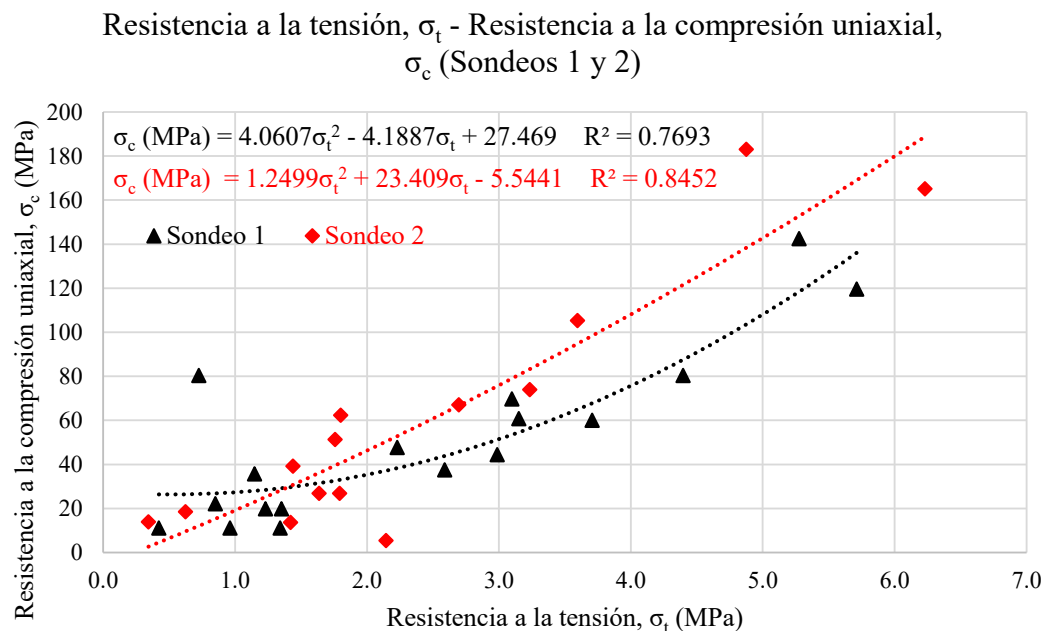


Figura 5.17 Relación entre la resistencia a tensión (σ_t) y la resistencia a compresión uniaxial (σ_c) sondeos 1 y 2.

Como se vio al principio de este capítulo los resultados de la velocidad de onda P presentan una correlación aceptable con las otras propiedades determinadas. En la Figura 5.18 se muestra la relación entre la velocidad de onda P y la resistencia a tensión donde aprecia a medida que incrementan las velocidades de onda P incrementan los valores de la resistencia a la tensión, además de que los coeficientes de correlación son relativamente altos en ambos sondeos, de aquí la importancia que en lo sucesivo sean tomadas en cuenta estas dos pruebas como parte de la caracterización de las rocas.

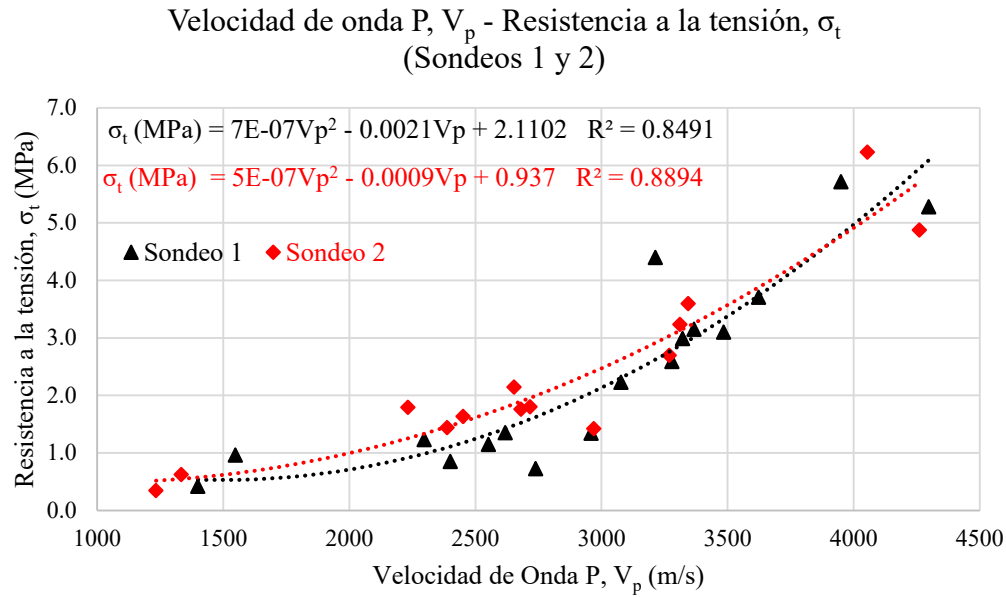


Figura 5.18 Relación entre la velocidad de onda P, (V_p) y la resistencia a tensión (σ_t) sondeos 1 y 2.

5.5 Clasificaciones geomecánicas RMR y Sistema Q

Las clasificaciones geomecánicas se determinaron en cada una de las unidades en que fue dividido el sondeo, de acuerdo a lo descrito en el subcapítulo 4.3, para el cálculo de los índices se utilizaron las Ecuaciones 4.14 (índice RMR) y 4.15 (índice de calidad del macizo Q). En los Anexos 7 y 8 se presentan las tablas de valoración de la clasificación RMR y el Sistema Q para las unidades de los dos sondeos y la clasificación general del macizo rocoso.

Tabla 5.3 Resumen de valoración de las clasificaciones geomecánicas de los sondeos 1 y 2

| Unidad | Sondeo 1 | | Unidad | Sondeo 2 | |
|--------|---------------------------|----------|--------|---------------------------|----------|
| | Clasificación geomecánica | | | Clasificación geomecánica | |
| | Índice RMR | Índice Q | | Índice RMR | Índice Q |
| Ig-A1 | 44 | 11.4 | Ig-A2 | 43 | 1.6 |
| Ig-B1 | 51 | 3.2 | Ig-B2 | 53 | 2.0 |
| Ig-C1 | 48 | 2.0 | Ig-C2 | 53 | 2.7 |
| Ig-D1 | 53 | 2.4 | Ig-D2 | 56 | 2.8 |
| Ig-E1 | 47 | 7.7 | Ig-E2 | 47 | 6.5 |
| Ig-F1 | 47 | 10.7 | Ig-F2 | 50 | 14.8 |

En la Tabla 5.3 se muestra un resumen de las valoraciones determinadas para las unidades de los sondeos mediante ambas clasificaciones geomecánicas, en el caso de la clasificación de RMR en ambos sondeos el rango de valores está entre 43 y 56 lo que corresponde a un macizo rocoso clase III siendo de una calidad de la roca regular, para el sistema Q el rango

es mayor en términos de ésta clasificación y va de 2 hasta 14.8 correspondiendo dentro de este rango a calidades del macizo rocoso mala, regular y buena.

En las Tablas 5.4 y 5.5 se presentan las clasificaciones RMR y Q de los dos sondeos, en el caso de la clasificación RMR la clase del macizo rocoso es III siendo una calidad de la roca regular y en el caso de la clasificación Q la calidad del macizo rocoso es regular.

Tabla 5.4 Clasificación RMR de los sondeos 1 y 2.

| RMR | Sondeo 1 | Sondeo 2 |
|-----------------------------------|-----------|-----------|
| Promedio índice RMR | 48.33 | 50.33 |
| Corrección por orientación | -5 | -5 |
| Valoración | 43.33 | 45.33 |
| Clase del macizo rocoso | Clase III | Clase III |
| Calidad de la roca | Regular | Regular |

Tabla 5.5 Clasificación Q de los sondeos 1 y 2.

| Sistema Q | Sondeo 1 | Sondeo 2 |
|----------------------------------|----------|----------|
| Promedio Índice Q | 6.2 | 5.1 |
| Calidad del macizo rocoso | Regular | Regular |

De acuerdo con SCT (2011) el túnel 1 se encuentra entre la profundidad de 70 m y 90 m, por lo que las unidades que atraviesa el túnel son la unidad Ig-E y la unidad Ig-F en ambos sondeos. En las tablas 4.3 y 4.4 se presentan las clasificaciones RMR y sistema Q de la zona circundante del túnel (promedio de las unidades Ig-E e Ig-F). De acuerdo con el Anexo 9 y la clasificación RMR obtenida a la zona circundante del túnel le corresponde una condición geotécnica C⁽⁻⁾ y tomando en cuenta el mismo anexo y la clasificación Q le corresponde una condición geotécnica B, los resultados de las clasificaciones no coinciden en la asignación de la condición geotecnia, esto podría ser consecuencia de la fuerte influencia que tiene el RQD en el sistema Q, ya que en las unidades Ig-F de ambos sondeos este parámetro aumenta respecto a las demás unidades.

Tabla 5.6 Clasificación RMR para la zona circundante del túnel 1.

| RMR | Sondeo 1 | Sondeo 2 |
|-----------------------------------|-----------|-----------|
| Promedio de valoración | 47 | 48.5 |
| Corrección por orientación | -5 | -5 |
| Valoración | 42 | 43.5 |
| Clase | Clase III | Clase III |
| Calidad | Regular | Regular |

Tabla 5.7 Clasificación Sistema Q para la zona circundante del túnel 1.

| Sistema Q | Sondeo 1 | Sondeo 2 |
|----------------------------------|----------|----------|
| Promedio de valoración | 9.2 | 10.7 |
| Calidad del macizo rocoso | Regular | Buena |

5.6 Durabilidad de las ignimbritas

La prueba de durabilidad fue realizada en las unidades en las que se dividió el sondeo de acuerdo a lo descrito en la última parte del subcapítulo 4.2 y en el cálculo del índice de durabilidad después de cada ciclo se utilizó la Ecuación 4.13, es una prueba que relaciona el comportamiento de la roca frente al deterioro por considerar ciclos de humedecimiento y secado sometidos a un desgaste constante. En la Tabla 5.8 se presentan los resultados y clasificación de las unidades después del segundo ciclo de durabilidad de acuerdo con lo propuesto por Franklin & Chandra (1972). La mayoría de los valores de las primeras cuatro unidades en ambos sondeos caen dentro de una clasificación “extremadamente alta”, asimismo se puede apreciar que solo las unidades Ig-E y Ig-F presentan índices de durabilidad por debajo del 90% después del segundo ciclo que corresponden a una clasificación “alta”.

Tabla 5.8 Clasificación de durabilidad de las unidades de los sondeos 1 y 2 después del segundo ciclo.

| Sondeo 1 (Unidad) | I _{d2} (%) | Clasificación | Sondeo 2 (Unidad) | I _{d2} (%) | Clasificación |
|-------------------|---------------------|---------------|-------------------|---------------------|---------------|
| Ig-A1 | 96.5 | E. Alta | Ig-A2 | 93.6 | Muy alta |
| Ig-B1 | 97.0 | E. Alta | Ig-B2 | 97.1 | E. Alta |
| Ig-C1 | 95.6 | E. Alta | Ig-C2 | 98.4 | E. Alta |
| Ig-D1 | 99.5 | E. Alta | Ig-D2 | 98.7 | E. Alta |
| Ig-E1 | 80.0 | Alta | Ig-E2 | 89.9 | Alta |
| Ig-F1 | 89.2 | Alta | Ig-F2 | 78.2 | Alta |

Como se mencionó en el último párrafo del subcapítulo 4.2 se realizaron 3 ciclos más del mismo ensayo, los resultados se presentan en la Tabla 5.9, en el quinto ciclo la mayoría de las unidades conserva un índice superior al 90%. No así en el caso de las unidades circundantes al túnel (unidades Ig-E e Ig-F de ambos sondeos) donde los rangos del I_{d5} están dentro del 60% al 80%.

Para observar el mejor comportamiento de las muestras de ignimbritas frente a los ciclos de humedecimiento y secado se graficó el índice de durabilidad (I_d) obtenido después de cada ciclo, en las Figuras 5.19 y 5.20 se muestran los índices de los sondeos 1 y 2 respectivamente. Se observa que las unidades que presentaron una pérdida en porcentaje mayor al 10% (Ig-E e Ig-F) en el segundo ciclo tienen un comportamiento más desfavorable frente al deterioro en los ciclos subsecuentes, lo anterior sería un indicador de cuándo efectuar ciclos adicionales al segundo, en este tipo de roca. En general las muestras de las unidades con pérdidas menores al 10% en el segundo ciclo conservan un I_d superior al 90% en el quinto ciclo a excepción de la unidad Ig-E2 con un I_d de 89%. En esta investigación las unidades más profundas presentan un mayor estado de alteración y son las mismas que presentan menor durabilidad durante los ciclos de humedecimiento y secado. En el sondeo 1 la unidad que presentó mayor desgaste a los ciclos de humedecimiento y secado fue la unidad Ig-E1 mientras que en el sondeo 2 fue

la unidad Ig-F2, esto se debe a que en la unidad Ig-E2 el tamaño de los fragmentos de roca contenidos en la matriz de ceniza es mayor que en la unidad Ig-E1.

Tabla 5.9 Índice de durabilidad (I_d) después de cada ciclo para las unidades de los sondeos 1 y 2.

| Sondeo 1 | Índice de durabilidad, I_d (%) | | | | | Sondeo 2 | Índice de durabilidad, I_d (%) | | | | |
|--------------|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|--------------|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | I_{d1} | I_{d2} | I_{d3} | I_{d4} | I_{d5} | | I_{d1} | I_{d2} | I_{d3} | I_{d4} | I_{d5} |
| Ig-A1 | 97.4 | 96.5 | 95.6 | 94.9 | 94.1 | Ig-A2 | 95.5 | 93.6 | 92.0 | 90.4 | 89.0 |
| Ig-B1 | 97.6 | 97.0 | 96.8 | 96.4 | 96.2 | Ig-B2 | 97.7 | 97.1 | 96.4 | 95.9 | 95.4 |
| Ig-C1 | 96.8 | 95.6 | 94.8 | 94.0 | 93.5 | Ig-C2 | 98.5 | 98.4 | 98.0 | 97.8 | 97.6 |
| Ig-D1 | 99.7 | 99.5 | 99.4 | 99.2 | 99.1 | Ig-D2 | 98.7 | 98.7 | 98.6 | 98.3 | 98.3 |
| Ig-E1 | 82.0 | 80.0 | 78.3 | 76.8 | 75.7 | Ig-E2 | 92.9 | 89.9 | 88.4 | 85.5 | 83.9 |
| Ig-F1 | 93.7 | 89.2 | 85.5 | 82.0 | 78.4 | Ig-F2 | 85.8 | 78.2 | 72.4 | 67.0 | 62.7 |

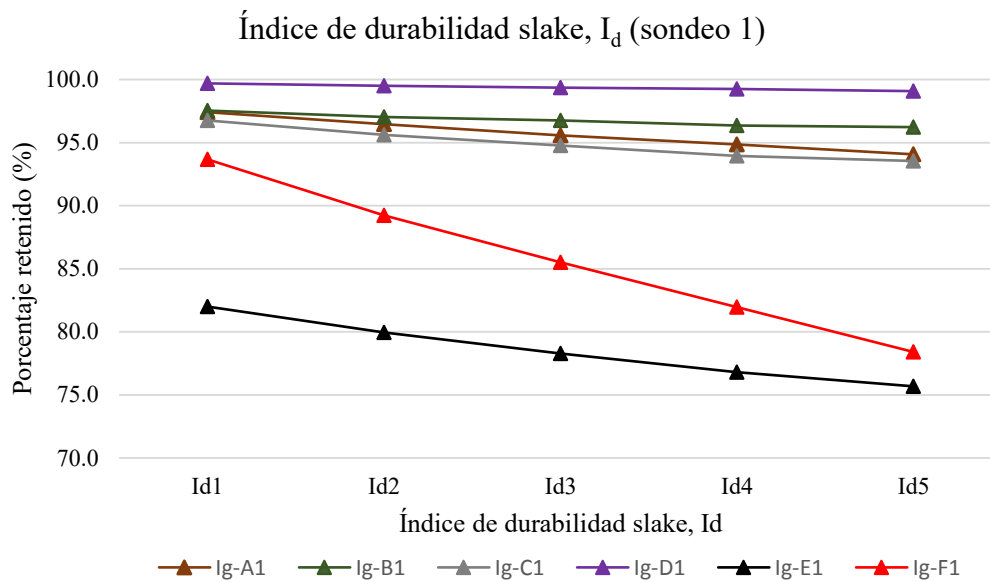


Figura 5.19 Comportamiento del índice de durabilidad de las unidades del sondeo 1.

En el caso de la unidad Ig-F2, el I_{d5} es menor que el de la unidad Ig-F1, esto puede atribuirse a que la fuerza de unión entre las partículas también es menor que en la unidad Ig-F1, además de que la acción del agua tiene un mayor impacto. Ambas unidades (Ig-E e Ig-F) presentan el comportamiento más desfavorable ante la acción de los ciclos de humedecimiento y secado.

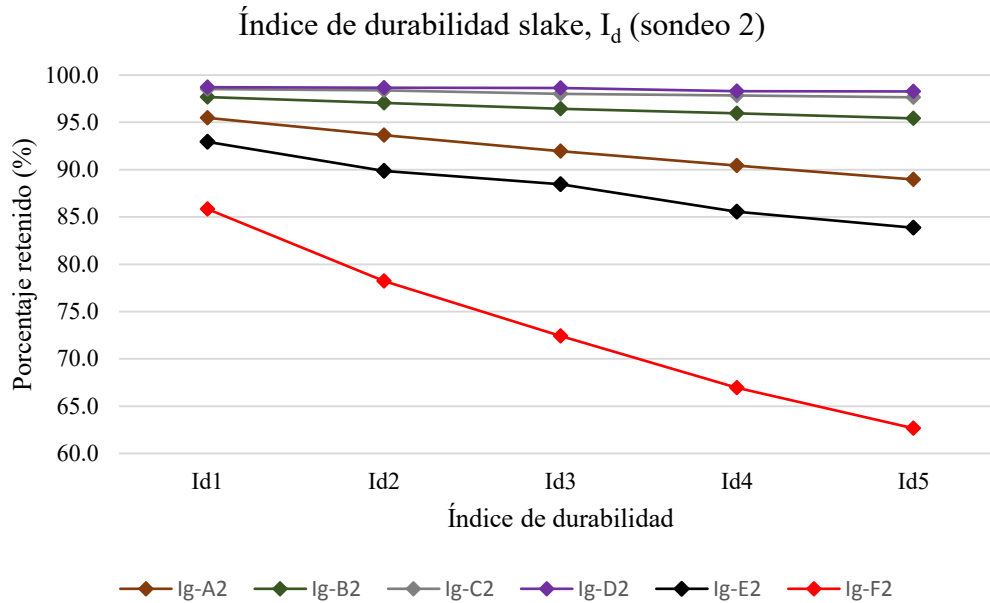


Figura 5.20 Comportamiento del índice de durabilidad de las unidades del sondeo 2.

Si se clasifican los resultados del I_{d5} de acuerdo con lo sugerido por (Franklin & Chandra, 1972), algunas unidades cambian de clasificación, en la Tabla 5.10 se presentan la clasificación de durabilidad de las unidades de ambos sondeos después del quinto ciclo. Algunas unidades cambian de “extremadamente alta” a “muy alta” como las unidades Ig-A1 e Ig-C1, la unidad Ig-A2 cambia de una clasificación “muy alta” a una “alta” y la unidad Ig-F2 cambia de una “alta” a una “media”, el resto de las unidades conserva la misma clasificación después del segundo ciclo. Las unidades que presentaron una clasificación “alta” después del segundo ciclo y que conservan la misma clasificación después del quinto ciclo no cambian debido a que el rango para esta categoría es más amplio (75% - 90%), los mismos autores sugieren que son necesarias subdivisiones adicionales que reflejen la resistencia al deterioro, debido a que la mayoría de las rocas tienen una durabilidad “Extremadamente alta”. Por lo tanto las subdivisiones adicionales dependerán del tipo de roca que se trate y de acuerdo con la experiencia de quien la estudia.

Tabla 5.10 Clasificación de durabilidad de las unidades de los sondeos 1 y 2 después del quinto ciclo.

| Unidad | Sondeo 1 | Clasificación | Unidad | Sondeo 2 | Clasificación |
|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| | I_{d5} (%) | | | I_{d5} (%) | |
| Ig-A1 | 94.1 | Muy Alta | Ig-A2 | 89.0 | Alta |
| Ig-B1 | 96.2 | E. Alta | Ig-B2 | 95.4 | E. Alta |
| Ig-C1 | 93.5 | Muy Alta | Ig-C2 | 97.6 | E. Alta |
| Ig-D1 | 99.1 | E. Alta | Ig-D2 | 98.3 | E. Alta |
| Ig-E1 | 75.7 | Alta | Ig-E2 | 83.9 | Alta |
| Ig-F1 | 78.4 | Alta | Ig-F2 | 62.7 | Media |

De las Figuras 5.19 y 5.20 también se observa que después del primer ciclo la pérdida de material es mayor que en los ciclos subsecuentes, esto se debe a que los efectos de meteorización comienzan a afectar la roca inmediatamente después de que las condiciones a las que se encuentra sometida en condiciones naturales cambian, al comenzar la alteración de la superficie de la roca intacta actúa como una capa protectora que disminuye la velocidad del deterioro de la roca a medida que se profundiza en la roca, lo anterior se ve reflejado en las Figuras 5.21 y 5.22.

Pérdida de material entre ciclos (Sondeo 1)

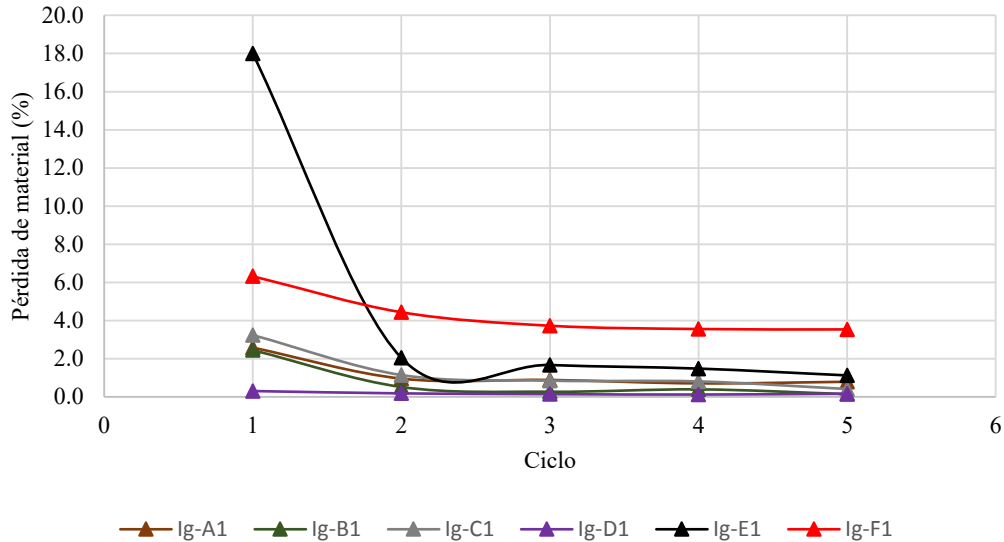


Figura 5.21 Pérdida de material entre ciclos adyacentes de las unidades del sondeo 1.

Pérdida de material entre ciclos (Sondeo 2)

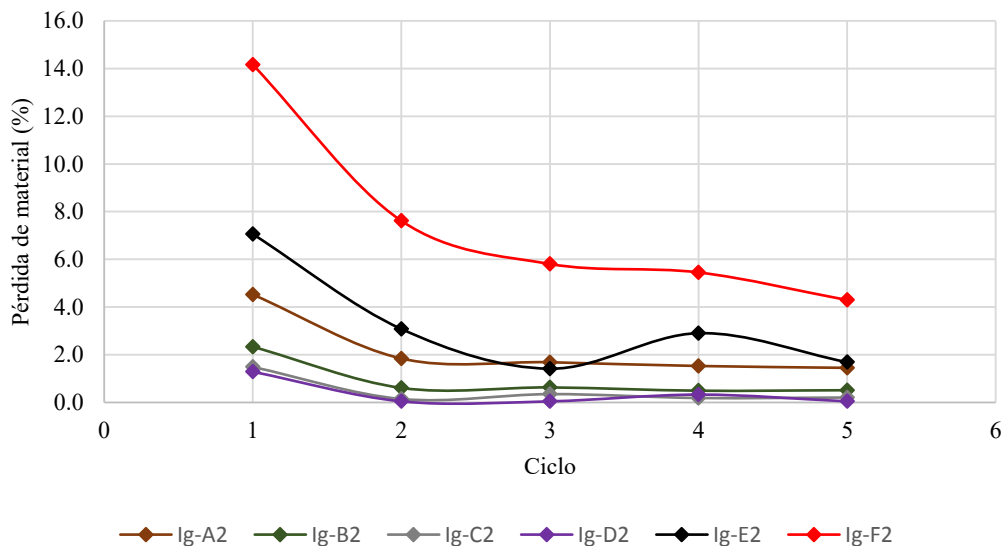


Figura 5.22 Pérdida de material entre ciclos adyacentes de las unidades del sondeo 2.

Se observa en ambas figuras que después del primer y segundo ciclo se producen las mayores pérdidas de material, en el tercer ciclo comienza a disminuir la pérdida de manera notable y entre el cuarto y quinto ciclo los valores de pérdida de material son prácticamente iguales, en el caso de la unida Ig-E2 muestra un comportamiento que difiere de las demás unidades al igual que en otros parámetros determinados anteriormente, la unidad Ig-F2 también muestra un comportamiento un tanto diferente al resto de las unidades pero se podría decir que a partir del tercer ciclo comienza a estabilizarse la pérdida del material. El comportamiento expuesto por la pérdida de material en las unidades reafirma lo comentado al principio del párrafo anterior.

Los valores de I_{d5} (Figs. 5.19 y 5.20) muestran un comportamiento casi lineal, por tal razón se decidió graficar los resultados del segundo ciclo contra los del quinto ciclo con la finalidad de ver la relación entre ambos índices. En las Figuras 5.23 y 5.24 se muestra las relaciones en el I_{d2} y el I_{d5} de los sondeos 1 y 2 respectivamente. Es evidente que la relación entre ambos índices es grande, sobre todo en el sondeo 2, en el caso del sondeo 1 la unidad Ig-F1 se aleja de la línea de tendencia considerablemente esto se debe posiblemente a que presenta características similares a las de la unidad Ig-F2, la fuerza de unión entre las partículas es mayor, esto tiene sentido ya que como se recordará la unidad Ig-F1 presenta valores de resistencia a la compresión uniaxial mayores que los de la unidad Ig-F2, también se puede notar que el valor del I_{d2} de la unidad Ig-F1 es mayor que el de la unidad Ig-F2, (aproximadamente un 11%).

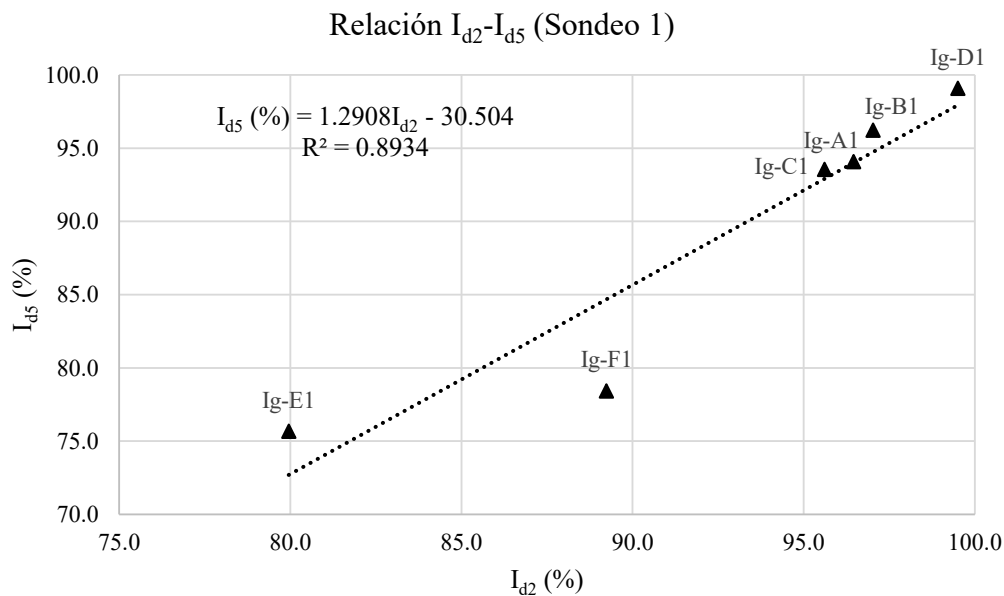


Figura 5.23 Relación entre los índices de durabilidad I_{d2} e I_{d5} del sondeo 1.

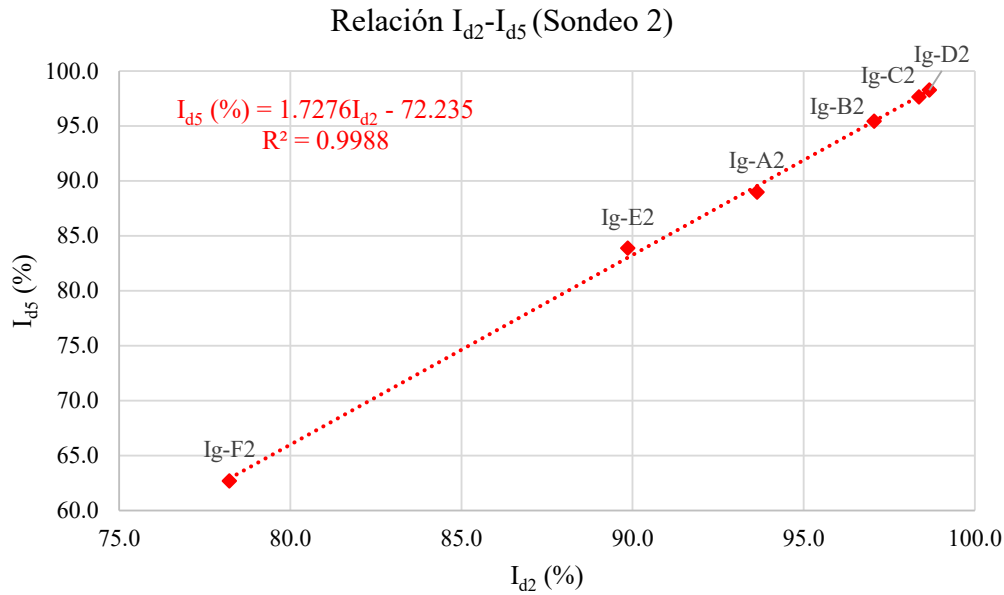


Figura 5.24 Relación entre los índices de durabilidad I_{d2} e I_{d5} del sondeo 2.

De los resultados mostrados en este subcapítulo es claro que el I_{d5} describe el comportamiento de las ignimbritas, ya que en el quinto ciclo las muestras no presentan diferencia significativa de pérdida de material en comparación con el cuarto ciclo, es decir, la pérdida tiende a ser casi constante, también se puede observar una marcada división, algunas ignimbritas se mantienen casi intactas (Ig-B, Ig-C e Ig-D) mientras algunas presentan una pérdida considerable durante los ciclos de humedecimiento y secado (Ig-E e Ig-F), por lo tanto las posibles relaciones entre el I_{d5} y las demás propiedades determinadas se vuelven importantes para este tipo de roca.

5.7 Relaciones entre el I_{d5} y las propiedades determinadas

En este subcapítulo se presentan las relaciones entre el índice de durabilidad del quinto ciclo (I_{d5}) y las demás propiedades determinadas en esta investigación.

Relación del I_{d5} con la densidad ρ

La densidad es uno de los parámetros más significativos en las rocas, a este respecto es común que a densidades altas las rocas presenten buenas propiedades mecánicas, dado que el I_{d5} describe de buena manera el comportamiento de las ignimbritas frente al deterioro, se esperaría que las ignimbritas con un I_{d5} alto también presenten valores de densidad altos, en la Figura 5.25 se presentan los resultados del I_{d5} contra los valores de la densidad de ambos

sondeos, en el sondeo 1 la unidad Ig-E1 se encuentra más alejada de la tendencia que presentan las demás unidades, en realidad, si se observa con detenimiento la gráfica se puede ver que todas las unidades a excepción de la unidad Ig-E en ambos sondeos siguen una misma tendencia; a medida que aumentan los valores del I_{d5} también aumentan los valores de densidad. La unidad Ig-E no sigue este comportamiento debido a las características que presenta (clastos de roca envueltos en una ceniza volcánica) propias de su génesis. Las ignimbritas con I_{d5} mayor a 85% presentan densidades superiores a 1.80 g/cm^3 , la unidad Ig-A2 tiene un I_{d5} de 89% debido a que como se recordará presenta un mayor estado de alteración y la unidad Ig-F1 tiene un I_{d5} de 78.4% superior al de la unidad Ig-F2 (62.7%) sin embargo, los valores de densidad son casi iguales 1.37 g/cm^3 y 1.38 g/cm^3 respectivamente, lo que reafirma la dependencia del I_{d5} de la fuerza de unión entre las partículas que forman el tipo de roca en estudio.

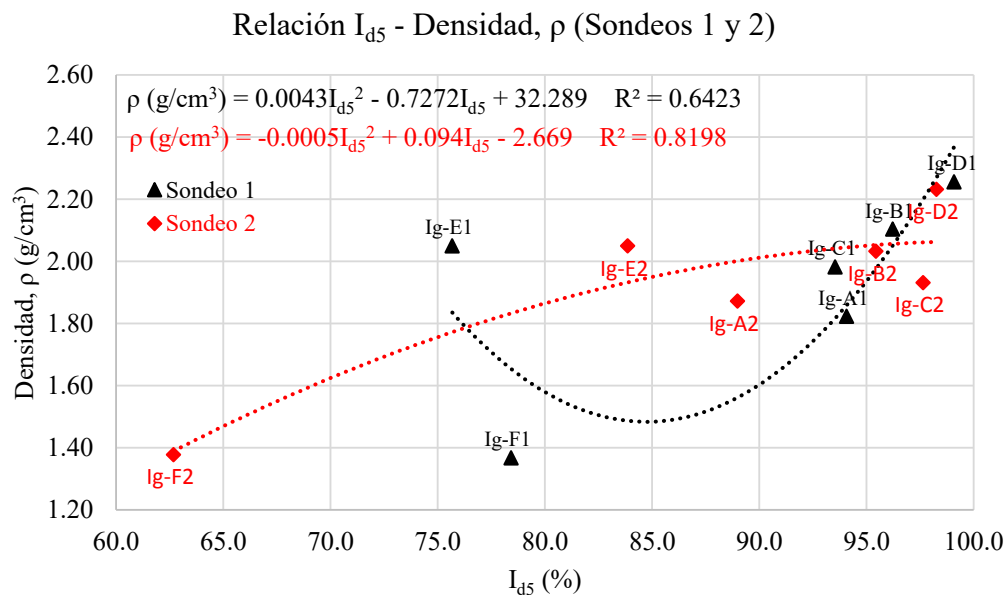


Figura 5.25 Relación entre el índice de durabilidad después del quinto ciclo (I_{d5}) y la densidad (ρ) de las unidades los sondeos 1 y 2.

Relación del I_{d5} con la porosidad n

Teniendo en cuenta la relación entre la densidad y la porosidad, se decidió graficar el I_{d5} contra los valores de porosidad, en la Figura 5.26 se muestra la relación entre el I_{d5} y la porosidad de los dos sondeos, en general a medida que incrementan los valores del I_{d5} los valores de porosidad disminuyen, los puntos correspondientes a las unidades Ig-E de ambos sondeos tienen una mayor dispersión debido a que sus porosidades son bajas en comparación con el resto de las unidades, nuevamente la relación del sondeo 2 es mayor que la del sondeo 1, es evidente que la durabilidad de las ignimbritas en términos de porosidad no depende de

la cantidad de poros si no de la estructura de éstos, ya que aunque las unidades presentan valores similares de porosidad su comportamiento frente a los ciclos de humedecimiento y secado es diferente.

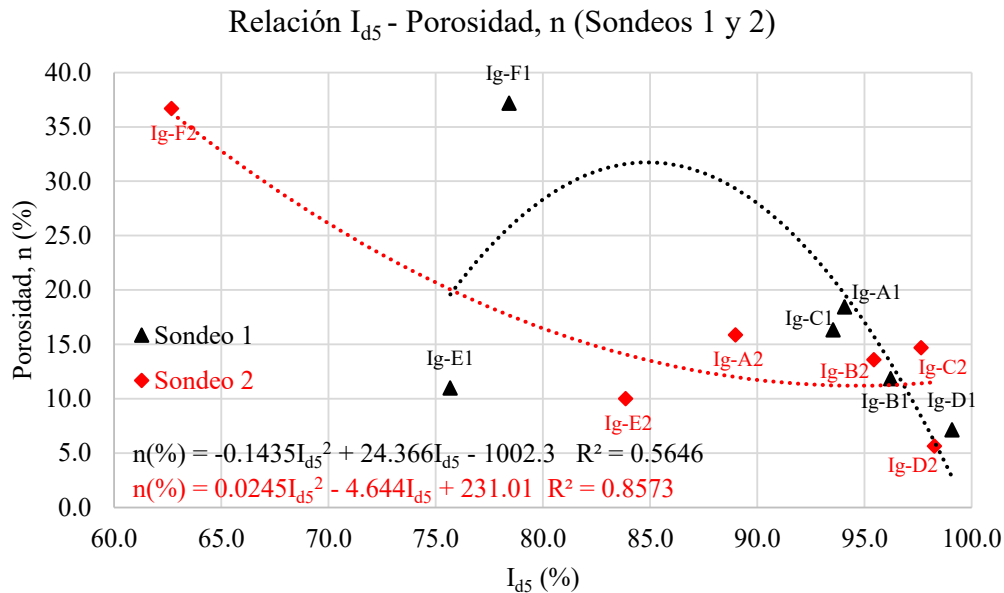


Figura 5.26 Relación entre el índice de durabilidad después del quinto ciclo (I_{d5}) y la porosidad (n) de las unidades de los sondeos 1 y 2.

Relación I_{d5} con la resistencia a la compresión uniaxial σ_c

En las relaciones explicadas anteriormente no hay una correspondencia absoluta entre las propiedades y el índice de durabilidad después del quinto ciclo, entonces si se relaciona el I_{d5} con un parámetro de resistencia la relación sería más clara. En la Figura 5.27 se presenta la relación obtenida entre el índice de durabilidad después del quinto ciclo y la resistencia a la compresión uniaxial de cada una de las unidades de los sondeos, es evidente que a medida que incrementa el índice de durabilidad aumenta la resistencia a compresión uniaxial, lo que reafirma la dependencia que existe entre la durabilidad y la fuerza de unión entre las partículas de las rocas. Esta relación es más clara pues se cumple que las unidades de ignimbrita con I_{d5} menores al 85% tienen valores de resistencia a la compresión uniaxial menores a 30 MPa. Las unidades con un I_{d5} mayores a 85% presentan valores de resistencia a la compresión uniaxial 20 MPa a 180 MPa, dentro de este rango se encuentran las unidades IG-A1 e IG-A2 que son las unidades más cercanas a la superficie y que presentaron un grado de alteración considerable, como se recordará éstas unidades tuvieron una pérdida de material considerable durante los dos primeros ciclos de humedecimiento y secado y después se mantuvo casi constante, por lo tanto además de la fuerza de unión entre las partículas la composición mineralógica propia de la génesis también influye en su comportamiento frente al deterioro, pues las reacciones al contacto con el agua serán diferentes, lo explicado

anteriormente y asociado al amplio rango de los valores de resistencia a la compresión uniaxial disminuyen el coeficiente de correlación en las relaciones de los dos sondeos.

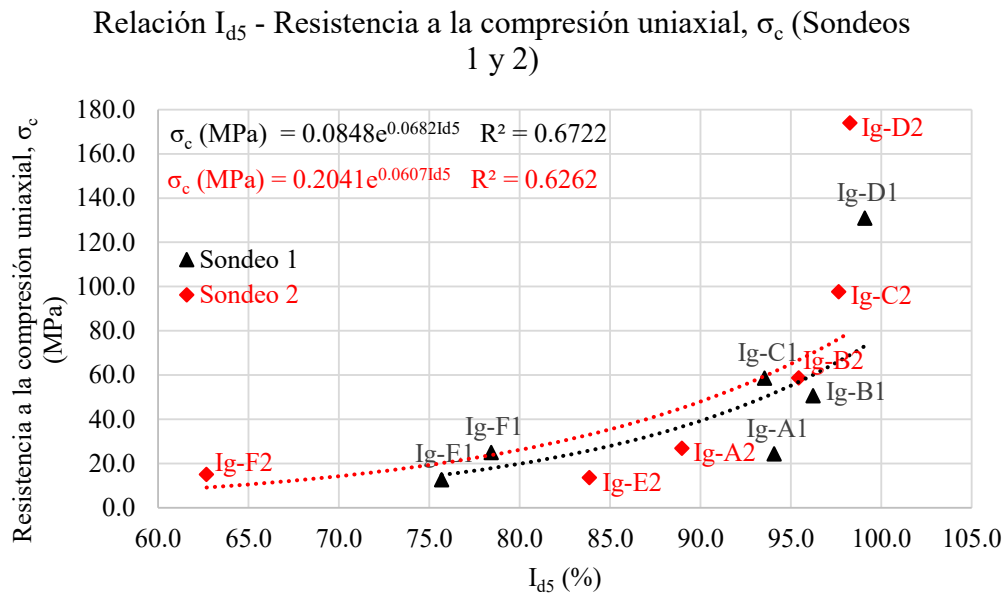


Figura 5.27 Relación entre el índice de durabilidad slake después del quinto ciclo (I_{d5}) y la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c) de las unidades de los sondeos 1 y 2.

Relación entre el I_{d5} y la resistencia a tensión σ_t

Como se explicó en el subcapítulo 5.4, existe una relación clara entre la resistencia a la compresión uniaxial y la resistencia a la tensión de las ignimbritas. Y dado que en la relación anterior (I_{d5} - σ_c) las unidades que presentan mayores índices de durabilidad ($I_{d5}>95\%$) también tienen valores de resistencia a la compresión uniaxial altos (>40 MPa), también debe existir una relación entre I_{d5} y la resistencia a la tensión.

En la Figura 5.28 se muestra la relación entre el índice de durabilidad después del quinto ciclo y la resistencia a la tensión de las unidades de ambos sondeos, también se cumple que cuando aumenta el I_{d5} de las unidades incrementa su valor de resistencia a tensión, la unidad Ig-A1 se aleja de la línea de tendencia lo que disminuye el coeficiente de correlación para el sondeo 1, en el caso del sondeo 2 el coeficiente de correlación es mayor ($R=0.95$) lo que puede deberse a la menor variación en los valores de resistencia a la tensión comparada con la variación de la resistencia a compresión uniaxial, se observa también (Fig. 5.28) que la ubicación de las unidades dentro de la gráfica es similar a la relación anterior y que era de esperarse por la relación que guardan estos dos parámetros de resistencia.

La incorporación de la prueba de tensión indirecta “brasileña” en este trabajo de investigación ha aportado buenos resultados, dado que sirve como un criterio de resistencia

adicional y presenta una buena relación con el tema en estudio. También ha ayudado en la generación de información sobre las propiedades de las ignimbritas de la región, que puede ser utilizada posteriormente como un parámetro de referencia para otros investigadores.

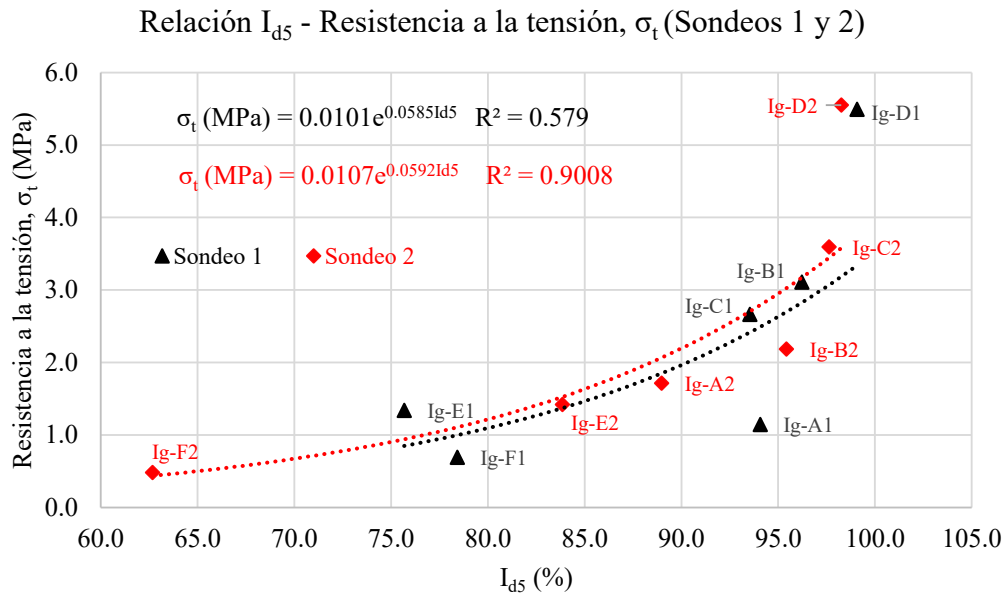


Figura 5.28 Relación entre el índice de durabilidad slake después del quinto ciclo (I_{d5}) y la resistencia a la tensión (σ_t) de las unidades de los sondeos 1 y 2.

Relación entre el I_{d5} y la velocidad de onda P

Los resultados de la relación entre el índice de durabilidad después del quinto ciclo y la velocidad de onda P de las unidades de los sondeos se presentan en la Figura 5.29, en la gráfica se observa que las unidades que presentan una mayor durabilidad también presentan las velocidades de onda P más altas, cuando el I_{d5} es mayor de 85% las velocidades de las ignimbritas son superiores a 2000 m/s, dado que la velocidad de onda P en rocas depende de la densidad, es claro porque las unidades Ig-E de ambos sondeos no siguen la misma tendencia, ya que como se recordará los valores de la densidad de estas unidades son altos en comparación con el resto de las unidades, pero poseen una durabilidad baja, en el caso de las unidades Ig-F1 e Ig-F2 tienen valores de velocidad de onda P similares pero una diferencia notable en el I_{d5} esto ya se ha explicado anteriormente y en lo que respecta a los valores de velocidad es claro que las ondas viajan más rápido a través de las partículas sólidas que en los espacios vacíos.

Los resultados de la velocidad de onda P muestra una buena correlación con los demás parámetros determinados, además de que es una prueba relativamente fácil de implementar y no destructiva, generalmente en los estudios exploratorios de anteproyecto o proyecto de

tuéneles se realizan estudios de refracción sísmica, lo que puede dar una idea de la durabilidad de la roca mediante el análisis de la velocidad de onda P.

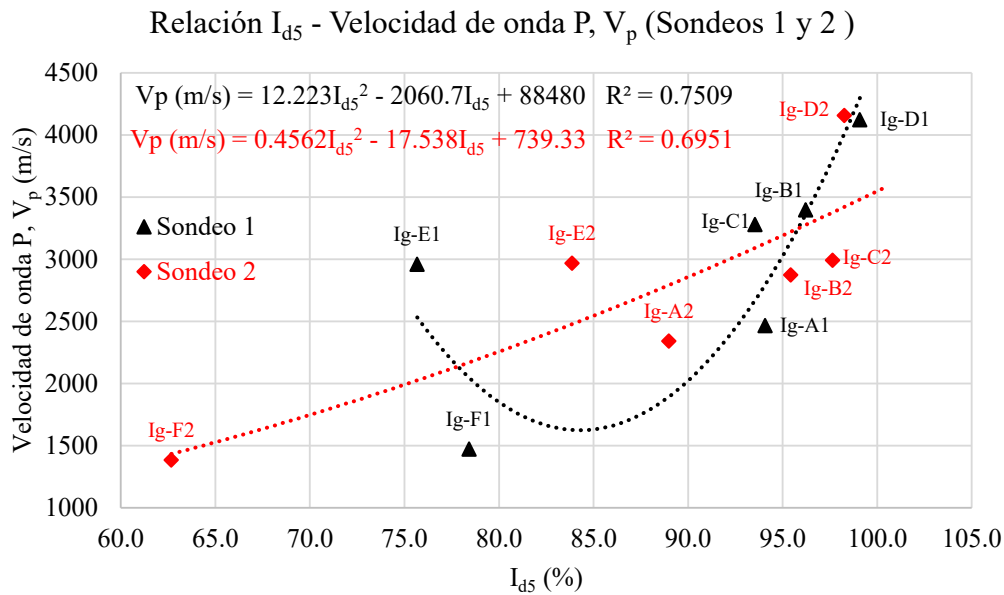


Figura 5.29 Relación entre el índice de durabilidad después del quinto ciclo (I_{d5}) y la velocidad de onda p (V_p) de las unidades de los sondeos 1 y 2.

Como se ha explicado a lo largo de este subcapítulo las unidades que presentan un mejor comportamiento frente a la durabilidad tienen buenas propiedades de densidad, baja porosidad, resistencia a la compresión alta, resistencia a la tensión alta y velocidades de onda P grandes. Resulta muy notorio el comportamiento de la unidad Ig-E de ambos sondeos frente a las demás unidades, solo para observar la influencia en los resultados, en el Anexo 10 se presentan las relaciones del I_{d5} con las demás propiedades abarcadas en este estudio y sin contemplar las unidades Ig-E1 e Ig-E2, solo para fines comparativos. En la realidad no se pueden omitir los resultados de las unidades Ig-E de ambos sondeos porque es una de las unidades circundantes al túnel.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

En este capítulo se hace una comparación de los resultados de las propiedades obtenidas en esta investigación a través de los ensayos en laboratorio, con los de otros autores alrededor del mundo, se incluyen los resultados de rocas clasificadas como ignimbritas y también de tobas que de acuerdo con Moon (1993) y Marshall (1935) son comparables con las ignimbritas.

Densidad, ρ y porosidad, n

El objetivo de analizar los resultados entre la densidad y la porosidad es porque a menudo las rocas alteradas presentan cambios en su génesis. En este trabajo de investigación, las rocas de la secuencia ignimbrítica con densidades mayores a 1.80 g/cm^3 tienen porosidades en porcentaje menores al 20% y rocas con densidades menores a 1.60 g/cm^3 poseen valores de porosidad mayores al 25%. Se cumple que sí la densidad aumenta, hay una disminución de la porosidad y por lo tanto de la absorción.

En otros estudios alrededor del mundo también se han determinado las propiedades de densidad y porosidad en rocas semejantes a las de este trabajo. En la Figura 6.1 se muestra la relación entre la densidad y la porosidad de las ignimbritas estudiadas en este trabajo, en la misma figura se presentan los resultados obtenidos por Zhu et al. (2011) en tobas de la ciudad de Roma en Italia y por Moon (1993) en ignimbritas de Nueva Zelanda. Se puede observar que de acuerdo con las líneas de tendencia, las ignimbritas de Morelia tienen propiedades de densidad y absorción más parecidas a las ignimbritas de Nueva Zelanda. En comparación con las tobas de Roma y conforme a la línea de tendencia que presentan, las ignimbritas de Morelia tienen una menor porosidad.

De acuerdo con Moon (1993) las ignimbritas con densidades bajas están dentro de un rango de 1.21 a 1.92 g/cm^3 y con porosidades altas dentro de un rango de 18% a 51%, en relación a esto, otros investigadores han reportado valores máximos y mínimos de densidad y porosidad para diversas tobas e ignimbritas de Turquía.

En la Figura 6.2 se presentan los valores máximos y mínimos de densidad obtenidos en este trabajo y su comparación con ignimbritas y tobas de Turquía. Los valores dentro del círculo en rojo corresponden a las densidades de las seis unidades de ignimbritas de este trabajo, con un valor mínimo de 1.26 g/cm^3 y un máximo de 2.41 g/cm^3 , Aydan y Ulusay (2003) reportaron un valor mínimo de 1.40 g/cm^3 y un máximo de 1.62 g/cm^3 para un tipo de tobas, mientras que Özbek (2013) determinó la densidad en cuatro tipos de ignimbritas con valores mínimos y máximos de: en ignimbrita negra 1.44 g/cm^3 y 1.53 g/cm^3 , ignimbrita amarilla, 1.54 g/cm^3 y 1.71 g/cm^3 , ignimbrita gris 1.43 g/cm^3 y 1.73 g/cm^3 y ignimbrita roja 1.86 g/cm^3 y 1.92 g/cm^3 respectivamente, Çelik y Ergül (2015) también reportaron valores

mínimos y máximos de dos tipos de tobas, uno con un mínimo de 2.24 g/cm^3 y un máximo 2.31 g/cm^3 y el otro tipo con un mínimo de 2.39 y un máximo de 2.53 g/cm^3 y de la misma manera Ulusay et al. (1997) obtuvieron valores de densidad de dos tipos de tobas, un tipo con un mínimo de 1.14 g/cm^3 y un máximo de 1.76 g/cm^3 y otro con un mínimo de 1.11 g/cm^3 y un máximo de 1.54 g/cm^3 . Los valores de densidad obtenidos en esta investigación están dentro de los rangos reportados por los investigadores citados en este análisis.

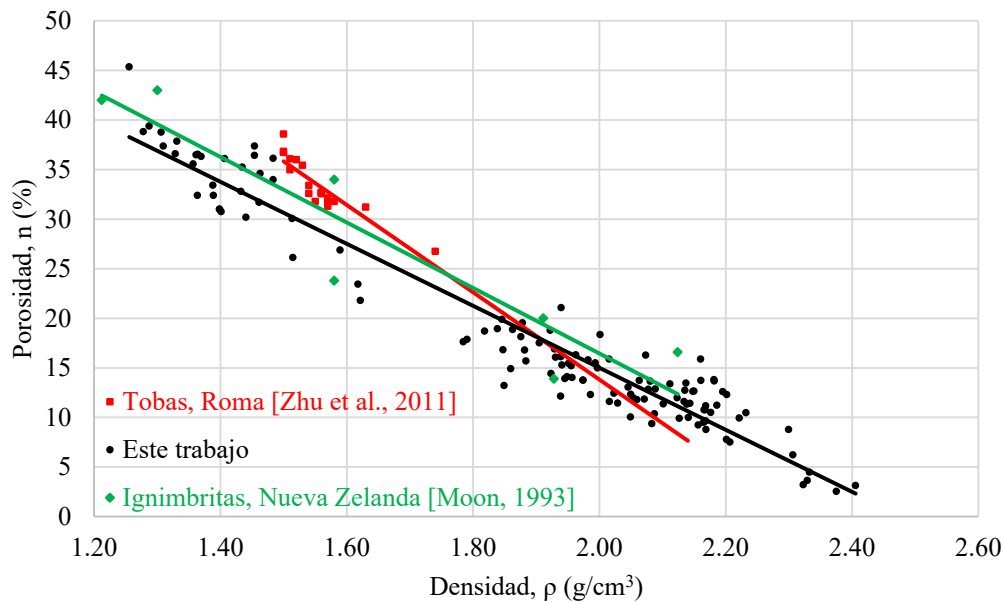


Figura 6.1 Comparación de la relación entre la densidad y la porosidad de las ignimbritas de Morelia (este trabajo), tobas de Roma (Zhu et al., 2011) e ignimbritas de Nueva Zelanda (Moon, 1993).

Respecto a la porosidad en la Figura 6.3 se muestran los valores determinados en este trabajo para las seis unidades de ignimbrita definidas (valores dentro de la forma de contorno rojo) y su comparación con ignimbritas y tobas de Turquía. En esta investigación el valor mínimo de porosidad fue de 2.55% y el máximo de 45.36%, Aydan y Ulusay (2003) reportaron valores de un tipo de tobas con un mínimo de 14.1% y un máximo de 28.5%, de igual forma Özbek (2013) informó de porosidades de cuatro ignimbritas con valores mínimos y máximos de: ignimbrita negra 21.45% y 38.58%, ignimbrita amarilla 21.47% y 29.57%, ignimbrita gris 18.61% y 28.49% e ignimbrita roja 20.40% y 25.58% respectivamente, también Ulusay et al. (1997) determinaron esta propiedad en otros dos tipos de tobas, un tipo con un mínimo de 28.0% y un máximo de 37.6% y el otro tipo de toba con un mínimo de 28.8% y un máximo de 41.6%. Los valores de porosidad determinados en este trabajo están dentro los rangos reportados por los investigadores mencionados, sin embargo, hay cuatro unidades de esta investigación que poseen valores de porosidad inferiores.

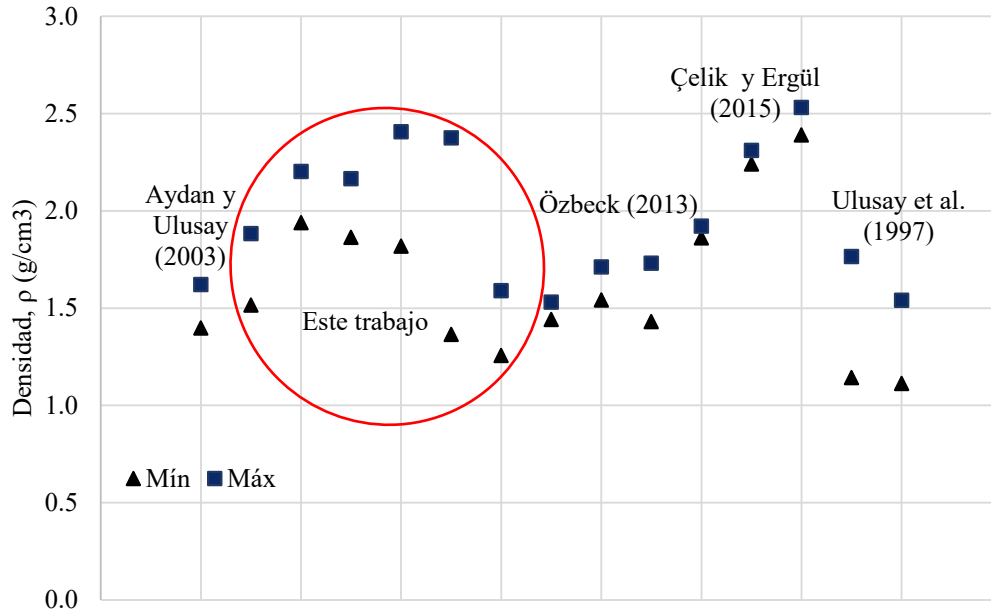


Figura 6.2 Valores máximos y mínimos de densidad de las ignimbritas de Morelia (este trabajo) en comparación con ignimbritas (Central Anatolia) Özbek (2013) y tobas (Cappadocia) Aydan y Ulusay (2003), Ulusay et al. (1997), (Afyonkarahisar) Çelik & Ergül (2015) de Turquía.

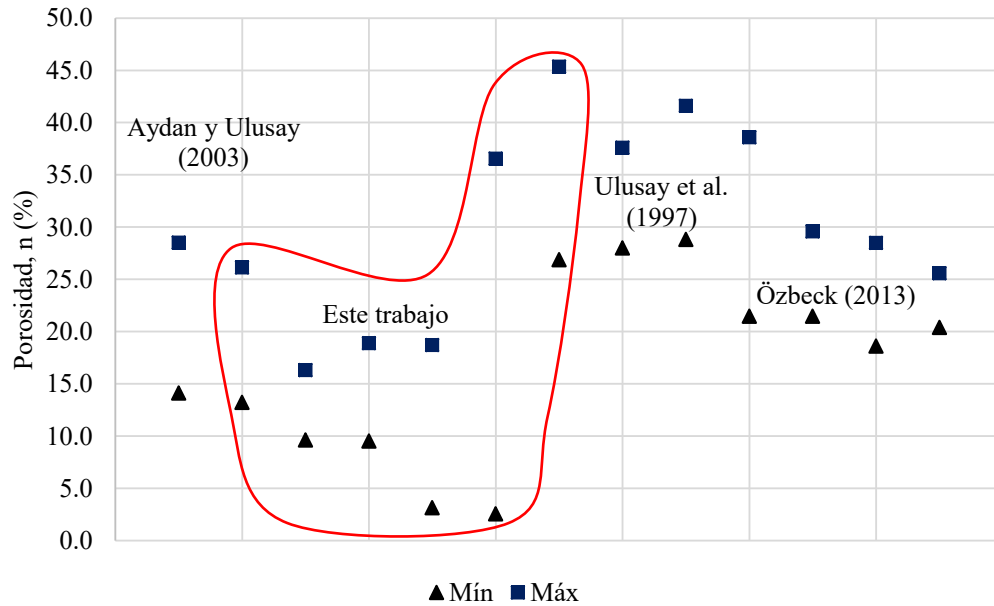


Figura 6.3 Valores máximos y mínimos de porosidad de las ignimbritas de Morelia (este trabajo) en comparación con ignimbritas (Central Anatolia) Özbek (2013) y tobas (Cappadocia) Aydan y Ulusay (2003), Ulusay et al. (1997) de Turquía.

Resistencia a la compresión uniaxial, σ_c

La resistencia de las ignimbritas es un buen indicador del comportamiento frente al deterioro, en general ignimbritas con resistencias altas (> 40 MPa) tienen I_{d5} mayor a 90% tal como se presentó en el subcapítulo 5.7 (relación $I_{d5} - \sigma_c$).

En la Figura 6.4 se muestra la relación entre la densidad y la resistencia a la compresión uniaxial de las ignimbritas de Morelia y su comparación con la misma relación ($\rho - \sigma_c$) que obtuvo Fuenkajorn y Daemen (1992) de un tipo de tobas de Estados Unidos (Apache Leap). Es notorio que el rango de densidades es mayor en las ignimbritas de Morelia, así como el rango de valores de resistencia a la compresión uniaxial. También puede notarse que las tobas de Estados Unidos tienen un rango definido de resistencia a la compresión uniaxial (52-115 MPa), lo que se debe al tipo de roca utilizada para desarrollar un criterio de resistencia empírica (Fuenkajorn & Daemen, 1992). En el caso de las ignimbritas de Morelia la dispersión en los valores se debe al estado de alteración de las rocas, rocas deterioradas presentan resistencias bajas y rocas intactas tienen resistencias similares a las de las tobas de Estados Unidos (>50 MPa). Akin et al. (2017) informaron de un caso similar en ignimbritas de Turquía en el que obtuvieron un coeficiente de determinación de 0.43 (0.44 y 0.40 sondeos 1 y 2 respectivamente, en este trabajo) para la misma relación analizada en esta parte.

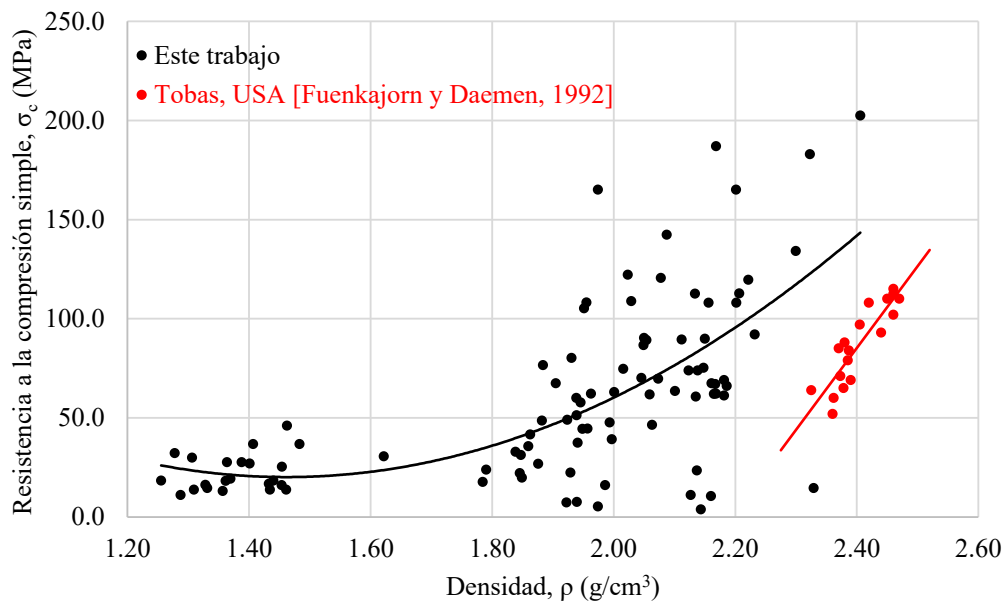


Figura 6.4 Comparación de la relación entre la densidad y la resistencia a la compresión uniaxial de las ignimbritas de Morelia (este trabajo) y tobas de USA (Apache Leap) Fuenkajorn & Daeme, (1992).

Otros autores también han informado sobre valores mínimos y máximos de resistencia a la compresión uniaxial, en la Figura 6.5 se exhiben los valores mínimos y máximos de la resistencia a la compresión uniaxial de las ignimbritas de Morelia (valores dentro de la forma de contorno rojo) y su comparación con otras ignimbritas y tobas. El valor mínimo calculado

en este trabajo fue de 3.8 MPa y el máximo 202.4 MPa, Fuenkajorn y Daemen (1992) reportaron valores de un tipo de tobas de Estados Unidos con un mínimo de 52.0 MPa y un máximo de 115.0 MPa. En Turquía Aydan y Ulusay (2003) obtuvieron un valor mínimo de 2.5 MPa y un máximo de 8.0 MPa para un tipo de tobas, mientras que Ulusay et al. (1997) los determinaron en dos tipos de tobas, en el primer caso un mínimo de 28.0 MPa y un máximo de 37.6 MPa, en el segundo caso un mínimo de 28.8 MPa y un máximo de 41.6 MPa. Özbek (2013) también calculó valores mínimos y máximos de resistencia a compresión simple en cuatro tipos de ignimbritas: negra 21.5 MPa y 38.6 MPa, amarilla 21.5 MPa y 29.6 MPa, gris 18.6 MPa y 28.5 MPa y roja 20.4 MPa y 25.6 MPa. Tres unidades de la secuencia ignimbrítica de Morelia tienen valores de resistencia a la compresión uniaxial similares a las tobas e ignimbritas de Turquía, dos unidades poseen valores de resistencia más parecidos a las tobas de USA, solo una unidad presenta un máximo diferente a los valores investigados, se trata de la unidad Ig-D con I_{d5} mayor a 98.0 %.

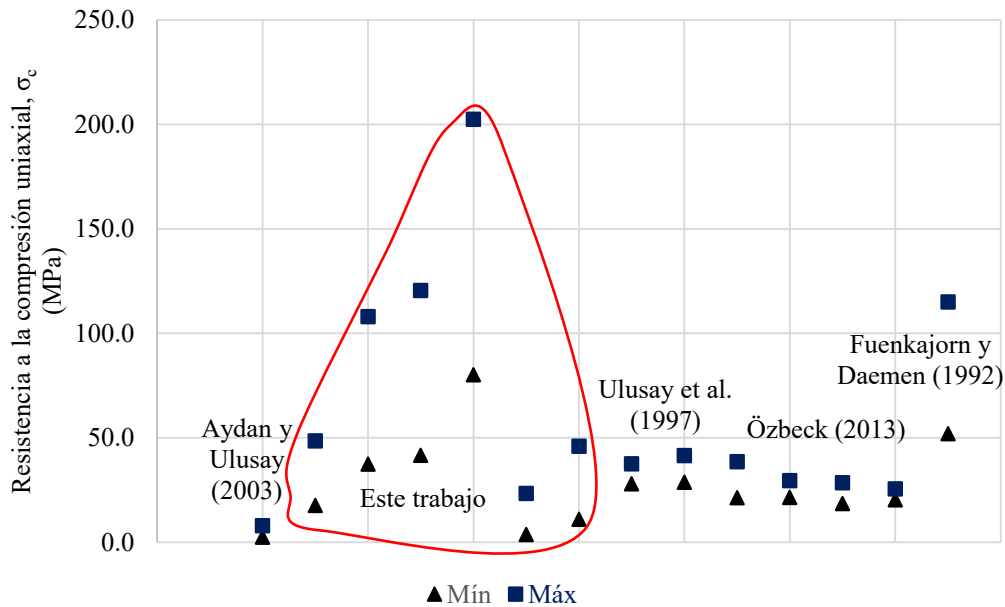


Figura 6.5 Valores mínimos y máximos de resistencia a la compresión uniaxial de las ignimbritas de Morelia (este trabajo) en comparación con tobas de USA (Apache Leap) Fuenkajorn y Daemen (1992) y con tobas (Cappadocia) Aydan y Ulusay (2003) Ulusay et al. (1997) e ignimbritas (Central Anatolia) Özbek (2013) de Turquía.

Resistencia a la tensión, σ_t

El otro parámetro de resistencia tomado en cuenta en esta investigación es la resistencia a tensión, en la Figura 6.6 se presenta la relación entre la resistencia a la tensión y la resistencia a la compresión simple de las ignimbritas de Morelia, también se anexa una relación reportada por Moon (1993) de ignimbritas de Nueva Zelanda, se puede observar que las ignimbritas de Nueva Zelanda poseen una mayor resistencia a la tensión respecto a los valores de compresión que las ignimbritas de Morelia, aunque son valores relativamente altos

de tensión. Rodríguez et al. (2007) han reportado valores de resistencia a tensión de ignimbritas de las Islas Canarias de hasta 50 MPa, tampoco es una regla que ignimbritas con resistencias altas a la tensión tengan resistencias altas a la compresión (Moon, 1993), lo que se puede notar en la misma figura, especímenes con resistencias a la compresión uniaxial altas tienen resistencias bajas a tensión y viceversa, la dispersión de los puntos es mayor en muestras con resistencias altas que en muestras con resistencias bajas.

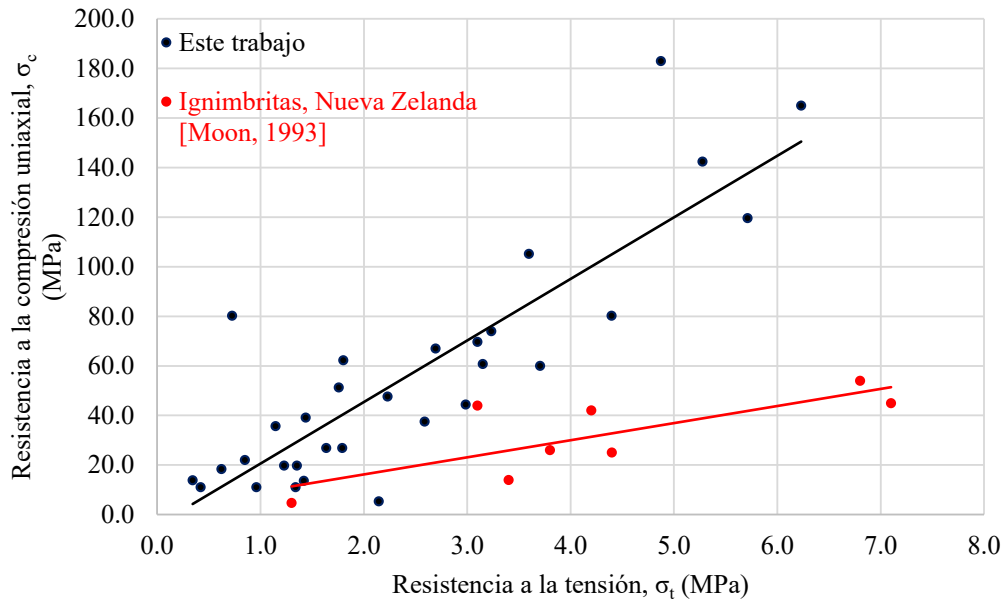


Figura 6.6 Comparación de la relación entre la resistencia a la tensión y la resistencia a la compresión simple de las ignimbritas de Morelia (este trabajo) e ignimbritas de Nueva Zelanda (Moon, 1993).

En relación a los valores reportados como mínimos y máximos de la resistencia a tensión en la Figura 6.7 se muestra una comparación de los valores determinados en esta investigación y su comparación con valores reportados por otros autores, el valor mínimo obtenido en este trabajo fue de 0.34 MPa y el máximo de 6.23 MPa, mientras que Moon (1993) informó de un mínimo de 1.30 MPa y un máximo de 7.10 MPa, Aydan y Ulusay (2012) reportó un mínimo de 0.50 MPa y un máximo de 1.40 MPa y Ulusay et al. (1997) presentaron resultados de resistencia a la tensión de dos tipos de tobas, la primera con un mínimo de 0.30 MPa y un máximo de 0.46 MPa y la segunda con un mínimo de 0.26 MPa y el máximo también de 0.46 MPa, los tres tipos de tobas pertenecientes a la región de Capadocia en Turquía.

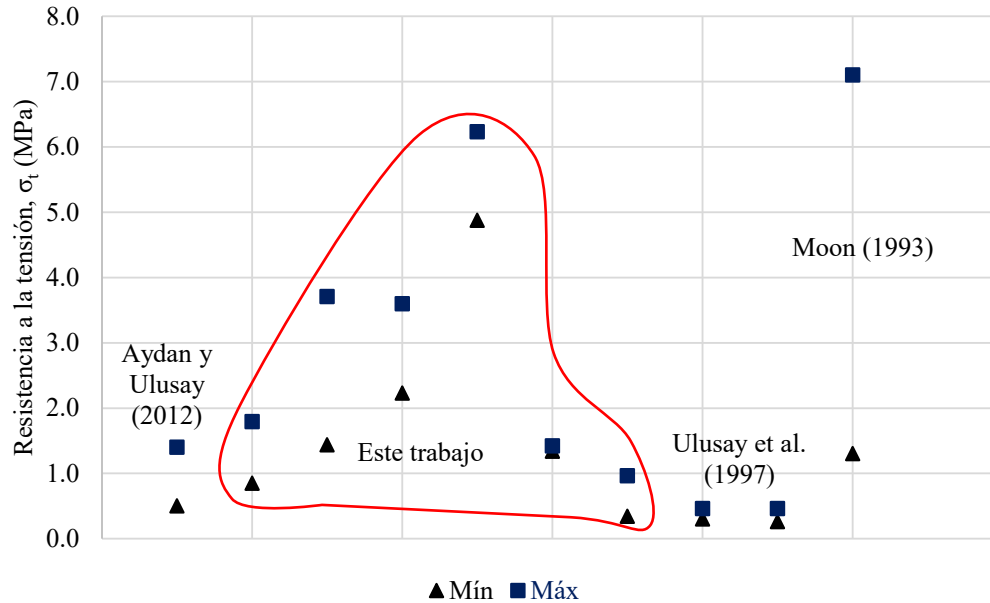


Figura 6.7 Valores mínimos y máximos de la resistencia a la tensión de las ignimbritas de Morelia (este trabajo) en comparación con ignimbritas de Nueva Zelanda (Moon, 1993) y con tobas (Cappadocia) Aydan y Ulusay (2012), Ulusay et al. (1997) de Turquía.

Velocidad de onda P, V_p

La velocidad de onda P tiene valores grandes en ignimbritas con mayor durabilidad, como se vio en el subcapítulo 5.7 (relación $I_{d5} - V_p$) las ignimbritas con velocidades mayores a 2400 m/s tienen I_{d5} mayor a 90%. En Figura 6.8 se presenta una comparación de los valores de velocidad de onda P de las ignimbritas de Morelia con dos tipos de ignimbritas de las Islas Canarias (Tenerife y Gran Canaria), se puede observar que el rango de la mayoría de las ignimbritas es de 2000 a 5000 m/s, algunas están por debajo de 2000 m/s y corresponden a las muestras que presentaron una menor durabilidad ($I_{d5} < 80\%$), relacionado a esto (Pusch, 1995) menciona que rocas con valores de velocidad de onda P inferiores a 4000 m/s indican meteorización y que rocas sin intemperismo tienen una velocidad de onda P promedio en el rango de 4700-6800 m/s. En esta investigación las ignimbritas con velocidades superiores a 4000 m/s tienen un I_{d5} mayor a 98%, lo que significa que es muy durable.

En la Figura 6.9 se presenta una comparación entre los valores mínimos y máximos de las ignimbritas de Morelia y otras tobas e ignimbritas. En este trabajo el valor mínimo obtenido fue de 1233 m/s y el máximo de 4298 m/s, Rodríguez et al. (2007) informaron de una velocidad mínima de 2317 m/s y una máxima de 4866 m/s en ignimbritas de las Islas Canarias, Aydan y Ulusay (2003) reportaron un valor mínimo de 1280 m/s y un máximo de 1440 m/s en tobas de Cappadocia, también Aydan y Ulusay, (2012) obtuvieron una velocidad mínima de 1500 m/s y una máxima de 2200 m/s en tobas de la misma región y Ulusay, et al. (1997) reportaron valores de tobas también de Cappadocia, un tipo con un mínimo de 1200 m/s y un máximo de 1830 m/s y el otro tipo un mínimo de 1240 m/s y un máximo de 1540 m/s, en Turquía. Los valores de las velocidades de onda P de las tobas de Turquía son

parecidos a los de la unidad Ig-F, el resto de las unidades tiene valores similares a las de las ignimbritas de las Islas Canarias.

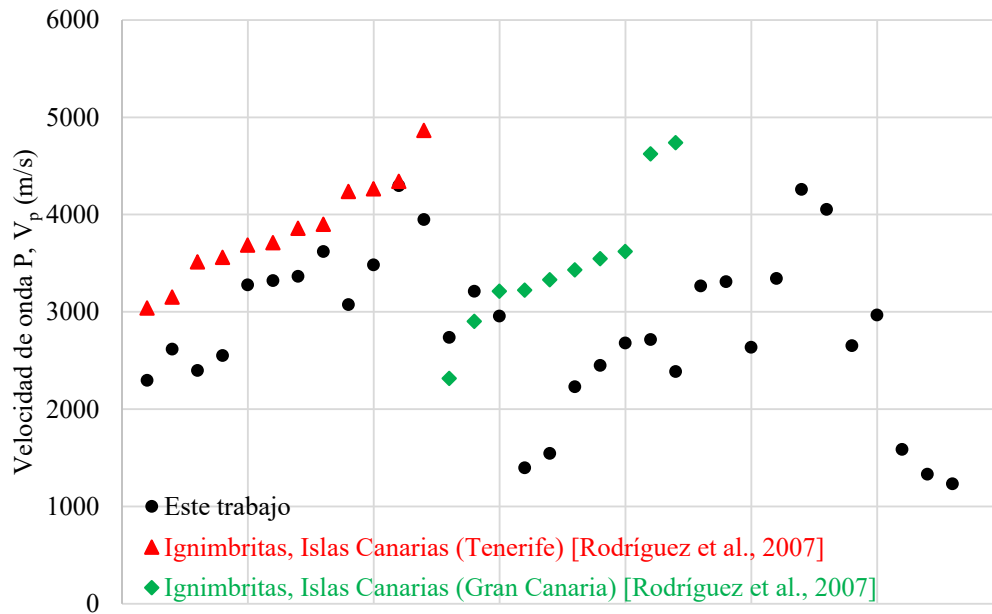


Figura 6.8 Comparación de los valores de velocidad de onda P de las ignimbritas de Morelia con los de dos tipos de ignimbritas de las Islas Canarias (Tenerife y Gran Canaria) Rodríguez et al. (2007).

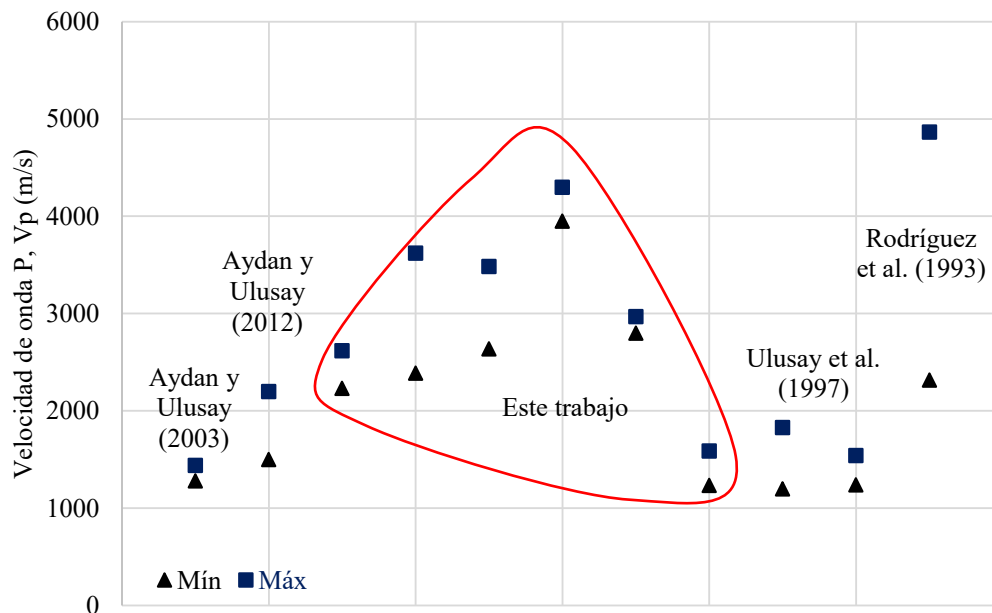


Figura 6.9 Valores mínimos y máximos de la velocidad de onda P de las ignimbritas de Morelia en comparación con ignimbritas de las Islas Canarias (Rodríguez et al., 2007) y con tobas (Cappadocia) (Aydan y Ulusay, 2003), (Aydan y Ulusay, 2012) y (Ulusay et al., 1997) de Turquía.

Índice de durabilidad, I_d

Diversos autores señalan las limitaciones del ensayo de durabilidad Fuenkajorn (2011) Gokceoglu y Aksoy (2000) Martínez-Bofill (2013) debido a que es una prueba dinámica que ocasiona fracturas en las rocas ensayadas y en condiciones naturales el deterioro ocurre en condiciones estáticas, además de que el proceso de humedecimiento y secado *in situ* ocurre en mucho tiempo (Erguler, 2009), incluso han surgido nuevas clasificaciones basadas en este ensayo como la propuesta por Fuenkajorn (2011) basada en la pérdida de material entre ciclos adyacentes o la realización de un solo ciclo incrementando el tiempo de ensayo (10, 25, 60, 120 minutos) (Hopkins & Deen, 1984). Pese a las limitaciones mencionadas, modificaciones de la prueba y nuevas clasificaciones basadas en ella, tiene ventajas como su sencillez y bajo costo económico, además de ser el ensayo recomendado por la ISRM para evaluar la durabilidad de las rocas. Actualmente el índice de durabilidad es el que más se aplica (Heidari, Rafiei, Mohebbi, & Torabi, 2015).

En este trabajo el índice de durabilidad después del quinto ciclo (I_{d5}) ha resultado eficiente para describir el comportamiento de las ignimbritas frente a los ciclos de humedecimiento y secado con desgaste constante, en la Figura 6.10 se presenta una comparación del comportamiento del índice de durabilidad de las ignimbritas de Morelia y tres tipos de tobas de la región de Cappadocia en Turquía.

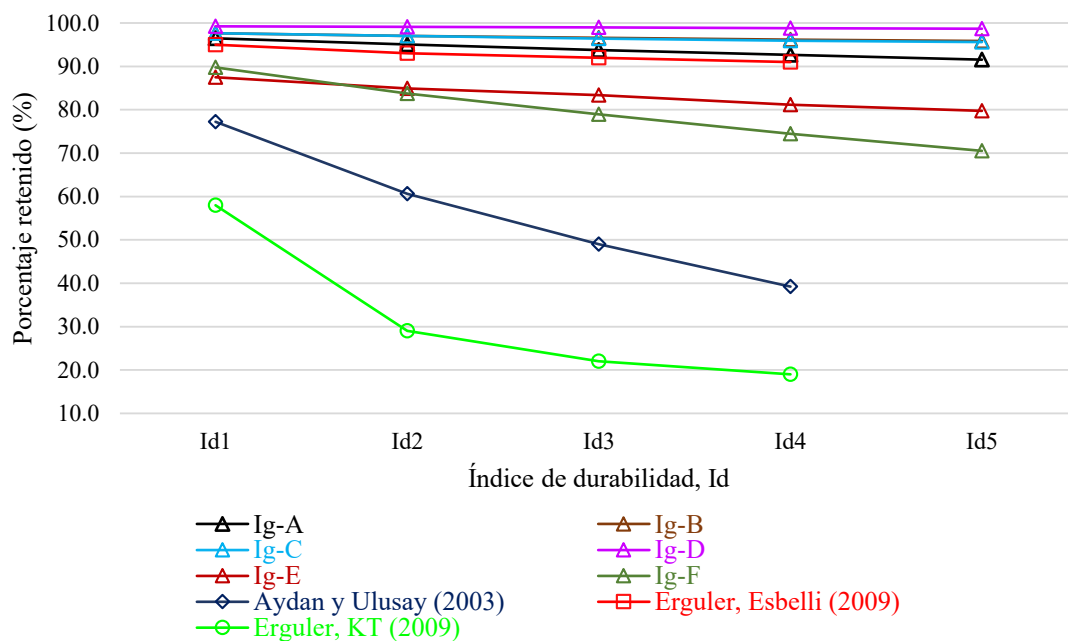


Figura 6.10 Comparación entre el comportamiento del índice de durabilidad de las ignimbritas de Morelia y tobas de la región de Cappadocia Aydan y Ulusay (2003), Erguler (2009) de Turquía.

En el caso de las ignimbritas de Morelia se presentan los resultados de cinco ciclos dado que fue el número mínimo que mejor describe su comportamiento. Respecto a las tobas de Turquía se presentan los resultados de cuatro ciclos ya que los estudios se basaron en la sugerencia realizada por Gokceoglu y Aksoy (2000) quienes recomiendan para rocas con

altos contenidos de arcillas y rocas débiles, la realización de cuatro ciclos para determinar su durabilidad. Es evidente que los tipos de tobas estudiados por Aydan & Ulusay, (2003) y el tipo KT en Turquía por Erguler (2009) tienen una menor durabilidad y los valores de los ciclos están sumamente alejados de los que se obtuvieron para las ignimbritas de Morelia. En el caso del tipo de toba Esbelli en Turquía analizado por Erguler (2009) tiene un comportamiento similar al de las primeras cuatro unidades de ignimbritas estudiadas en este trabajo, lo anterior reafirma la necesidad de realizar un mayor número de ciclos cuando el I_{d2} es menor a 90%. Moon (1993) estableció que ignimbritas con I_{d2} mayor a 90% podrían ser clasificadas como ignimbritas *altamente durables* e ignimbritas con I_{d2} menor al 30% como ignimbritas *no durables*, el tipo de toba KT se clasificaría como no durable ya que su I_{d2} es de 29%.

Los resultados de durabilidad han sido considerados en el diseño del tipo de soporte de túneles, el ensayo de durabilidad se aplica en la clasificación RMR mediante un coeficiente de reducción para las propiedades intactas de la roca (González de Vallejo, 2003). Basados en los resultados de esta investigación y tomando en cuenta que el ensayo de durabilidad representa una condición a largo plazo (el proceso de humedecimiento y secado en condiciones naturales ocurre en mucho tiempo), se recomienda disminuir a la siguiente condición geotécnica (ver Anexo 9) más desfavorable cuando el resultado del I_{d5} se menor a 90%.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

En esta investigación se determinaron parámetros físicos y mecánicos de dos sondeos (profundidad de 100 m) extraídos de un macizo rocoso que conforma un túnel dentro de la secuencia ignimbrítica de la ciudad de Morelia. La determinación se llevó a cabo por medio de ensayos en laboratorio, la aportación principal de este trabajo es el índice de durabilidad después del quinto ciclo (I_{d5}), debido a que describe mejor el comportamiento del tipo de roca en estudio frente a los ciclos de humedecimiento y secado con desgaste constante, simulando la acción de un deterioro rápido.

En base al análisis de los resultados el I_{d5} mostró una buena relación con las demás propiedades determinadas en esta investigación, lo que permite reafirmar las propiedades físicas y mecánicas de las rocas intactas, así como su grado de alteración, además de predecir la durabilidad de las ignimbritas frente al deterioro.

Las propiedades determinadas fueron comparadas con otros estudios alrededor del mundo, relacionados con el tipo de roca analizado y se discutieron los resultados.

De acuerdo al reconocimiento en laboratorio de los sondeos se lograron las siguientes conclusiones:

- Las ignimbritas analizadas son de varias tonalidades (café, gris, rosa y blanco), la presencia de pómez es muy visible así como los fragmentos de otros tipos de roca, tales características sirvieron para la separación del sondeo en unidades con la finalidad de hacer más fácil su identificación y análisis. Ambos sondeos fueron divididos en seis unidades denominadas: Ig-A, Ig-B, Ig-C, Ig-D, Ig-E, e Ig-F, identificando cada unidad al sondeo correspondiente con los números 1 y 2. La ubicación del túnel se localiza entre 70 m y 90 m de profundidad, atravesando las unidades Ig-E e Ig-F.
- De acuerdo a la clasificación visual, el grado de meteorización en ambos sondeos está entre el grado II que corresponde a una roca levemente meteorizada (unidades Ig-B, Ig-C e Ig-D) y el grado V (roca completamente meteorizada). El resto de las unidades tienen tramos con grados de meteorización de hasta V.
- En la identificación de las discontinuidades se diferenció entre las fracturas naturales y las mecánicamente inducidas por el proceso de perforación. En este sentido se identificaron diferentes planos de orientación de las discontinuidades respecto al eje del sondeo. La rugosidad de las discontinuidades se caracterizó por medio del coeficiente de rugosidad JRC, los valores están entre 5 y 15 (onduladas y ligeramente rugosas). La separación de las discontinuidades se estimó de acuerdo al tamaño de los núcleos, identificándose la abertura y el tipo de relleno (arcilla y productos de la alteración de la misma roca)
- El Angulo de fricción básico de las ignimbritas (ϕ_b) está entre 30 y 45 grados.

- El porcentaje de recuperación es mayor al 70% en ambos sondeos, se considera un porcentaje representativo, debido a que es difícil lograr un porcentaje de recuperación del 100%, dada la profundidad y las características del material.
- En la determinación del RQD fueron tomados en cuenta todos los parámetros que influyen en este índice, la calidad de la roca va de mala a muy mala, las unidades con los valores más altos son la unidad Ig-A1 y la unidad Ig-F2 con 42.6% y 37.3% respectivamente, el resto de las unidades poseen valores inferiores al 30% lo que indica un grado de fracturamiento intenso, aunque la distancia es relativamente corta (40 m) entre los sondeos, no existe una relación entre el grado de fracturamiento, ya que las unidades similares entre sí tienen diferentes valores de RQD, lo que podría ser resultado del vulcanismo de la zona.
- La densidad se determinó en toda su longitud del sondeo, los primeros 75m dieron valores de 1.80 g/cm³ a 2.40 g/cm³, después de esa profundidad disminuyen a un rango de 1.20 g/cm³ a 1.60 g/cm³. Por lo anterior se expresa que los valores más bajos se tienen en los primeros 10 m de los sondeos y en los últimos 25 m, en cambio los más altos están entre los 50 m y 60 m (sondeo 1) y 50 m y 70 m (sondeo 2).
- En cuanto a la absorción se menciona que en el tramo de 10 m hasta 75 m los valores fueron de 3% a 11%, valores inferiores a los determinados en los últimos 25 m de los sondeos tienen un rango de 20 a 40%. Los valores más altos se encontraron en los primeros 10 m y después de los 75 m. Los valores mínimos se identificaron intercalados entre los 50 m y 75 m en ambos sondeos.
- En términos de porosidad se expresa que de los 10 m a hasta los 75 m el rango oscila entre 10% y 20% en ambos sondeos, cabe mencionar que en el sondeo 2 hay valores inferiores al 10% entre los 50 m y 75 m. Los valores máximos se encuentran en los primeros 10 m y en los últimos 25 m, los mínimos en el sondeo 1 se encuentran entre los 50 m y los 60 m y en el sondeo 2 entre los 50 m y 75 m.
- La resistencia a la compresión uniaxial fue determinada por medio de la prueba de carga puntual, y en los tramos donde fue posible debido a los requerimientos del ensayo. Para el sondeo 1 en los primeros 20 m de profundidad las resistencias son inferiores a 50 MPa, después de esa profundidad y hasta los 60 m la resistencia aumenta hasta 150 MPa. En el sondeo 2 se registraron valores por encima de los 150 MPa, después de los 60m las resistencias no superan los 50 MPa. En ambos sondeos los valores mínimos se presentaron en los primeros 20 m y en los últimos 40 m, mientras que los máximos se registraron en la parte media de los sondeos.
- Por lo anteriormente expuesto se considera que existe una clara relación entre las propiedades de densidad, absorción y porosidad, dentro de los rangos determinados en estas propiedades, ignimbritas con valores altos de densidad poseen valores de absorción y porosidades bajos y viceversa, los coeficientes de determinación son altos para estas relaciones (>0.94).
- La relación entre la densidad y la resistencia a la compresión uniaxial se pueden dividir en dos partes, una con cierta correspondencia (densidades menores a 1.50 g/cm³) y la otra con una gran dispersión (densidades mayores a 1.70 g/cm³), esto

produce bajos coeficientes de determinación en esta relación (<0.5). Entonces para el tipo de roca en estudio, un valor alto de densidad no significa un valor alto de resistencia y por lo tanto, valores altos de resistencia a la compresión uniaxial pueden ser indicadores de un bajo grado de meteorización pero no así con los valores de densidad.

- La relación entre la porosidad y la resistencia a la compresión uniaxial tiene cierta similitud, debido a la correlación entre densidad y la porosidad, los coeficientes de determinación también son bajos (<0.5), ignimbritas con porosidades menores al 25% pueden presentar resistencias altas o bajas y con porosidades mayores al 30% no sobrepasan los 50 MPa. Una baja porosidad no es indicador de una resistencia alta.
- La velocidad de onda P se determinó en las unidades en estudio, tramos donde fue posible la ejecución de la prueba, el rango de las velocidades va de 1200 a 4300 m/s, los valores mínimos se determinaron en la unidad Ig-F y los máximos en la unidad Ig-D.
- Los parámetros de velocidad de onda P y la densidad de las ignimbritas tiene una buena correlación, el coeficiente de determinación es mayor a 0.8, velocidades altas corresponden a ignimbritas con densidades altas y viceversa. En general, ignimbritas con velocidades superiores a 2200 m/s tienen densidades mayores a 1.80 g/cm^3 y velocidades inferiores a 1600 m/s las densidades son menores a 1.5 g/cm^3 .
- La velocidad de la onda P también se relaciona con la porosidad (mejor que en la relación $n - \sigma_c$), con coeficientes de determinación mayores a 0.8, ignimbritas con porosidades menores a 25% tienen valores de velocidad de onda P mayores a 2200 m/s y con porosidades mayores a 30% velocidades menores a 1600 m/s.
- Entre la velocidad de onda P y la resistencia a la compresión uniaxial de las ignimbritas se obtuvieron coeficientes de determinación mayores a 0.75. En general se cumple que valores de resistencia a la compresión uniaxial altos coincidan con velocidades altas y viceversa, a excepción de los tramos de la unidad Ig-E (velocidades altas y resistencias a compresión bajas). Por lo que las velocidades de onda P son independientes de las fuerzas de unión entre las partículas.
- La resistencia a tensión se consideró como otro parámetro de resistencia, también fue determinada en todas las unidades de las ignimbritas por medio de la prueba brasileña, el rango de resistencia a la tensión fue de 0.3 a 6.3 MPa. Los valores mínimos se localizan en los últimos 25 m de los dos sondeos y los máximos entre los 50 y 60 m de profundidad.
- Existe una relación entre la resistencia a la tensión y la densidad, los coeficientes de determinación son mayores a 0.75, es una correlación mayor que la que existe entre la relación $\rho - \sigma_c$, lo que puede ser resultado de la variación que existe en los valores de resistencia a compresión, en rocas la resistencia a tensión es baja. En el caso de las ignimbritas en estudio tienen un incremento en el valor de su densidad, así como también lo tienen en la resistencia a la tensión.

- En la relación de la resistencia a la tensión con la porosidad, los coeficientes de determinación disminuyen en los dos sondeos en comparación con la relación anterior, que son menores a 0.70, esto puede ser resultado de la estructura de los poros, ignimbritas con porosidades del 10% tienen valores de resistencia a la tensión bajos.
- Entre los dos parámetros de resistencia (σ_c y σ_t) existe una mejor relación, en general el aumento de la resistencia a la compresión en ignimbritas implica un incremento en la resistencia a la tensión, lo que vuelve a reafirmar la influencia de la fuerza de unión entre las partículas que forman la roca.
- Existe una mayor correspondencia entre los valores de la resistencia a la tensión y las velocidades de onda P, dentro del rango de los valores determinados en ambas propiedades, las ignimbritas con resistencias a la tensión altas presentan velocidades de onda P altas y viceversa, los coeficientes de determinación son mayores a 0.8.
- Para la zona de interés, los resultados de las clasificaciones geomecánicas fueron: en el caso de RMR, se obtuvo una Clase III siendo una calidad de roca regular (condición geotécnica C⁽⁻⁾), para el Sistema Q, calidad del macizo rocoso fue regular (condición geotécnica B). Como se observa las condiciones geotécnicas no coinciden, lo que podría ser resultado de la fuerte influencia del RQD en el índice Q.
- Las primeras cuatro unidades en los dos sondeos (Ig-A, Ig-B, Ig-C e Ig-D) tienen un $I_{d2} > 90\%$, por lo que se clasificaron como ignimbritas *altamente durables* (Moon V. G., 1993), las últimas dos unidades (Ig-E e Ig-F) poseen un $I_{d2} < 90\%$. De acuerdo a Moon (1993) no existe una clasificación para ignimbritas con valores de I_{d2} entre 90 y 30%.
- La realización de tres ciclos adicionales de durabilidad a los que se consideran en las normativas ha dado buenos resultados, por lo que se logró una mejor descripción del comportamiento de las ignimbritas en estudio frente a los ciclos de humedecimiento y secado con un desgaste constante. Siempre que en el segundo ciclo se obtengan pérdidas mayores al 10% se vuelve necesaria la realización de más ciclos. Para nuestro caso las unidades con valores menores a I_{d5} fueron las unidades Ig-E e Ig-F ($I_d < 80\%$ en promedio), la unidad con valores mayores de I_{d5} fue la unidad Ig-D ($I_d > 98\%$).
- La pérdida de material entre ciclos adyacentes se vuelve casi constante después del tercer ciclo de durabilidad, por lo que el quinto ciclo se considera adecuado en la predicción de durabilidad de las ignimbritas en estudio.
- A partir del comportamiento observado durante los ciclos de durabilidad, se deduce la existencia de una relación entre el I_{d2} y el I_{d5} , las relaciones presentan coeficientes de determinación elevados (> 0.89).
- Dado que el I_{d5} describe de buena manera el comportamiento de las ignimbritas frente al deterioro, las relaciones con las demás propiedades determinadas en esta investigación se vuelven importantes, debido a que las unidades Ig-B, Ig-C e Ig-

D tuvieron una pérdida de material muy pequeña y las unidades Ig-E e Ig-F presentaron una pérdida considerable.

- La relación entre el I_{d5} y la densidad en casi todas las unidades presenta una misma tendencia, valores altos de I_{d5} corresponden a ignimbritas con densidades altas y viceversa, con excepción de la unidad Ig-E debido a características propias de su génesis.
- En términos de porosidad, las ignimbritas con $I_{d5} > 85\%$ tienen valores de porosidad menores al 20%, en ignimbritas con I_{d5} menores a 85% los valores de porosidad tienen una variación mayor, por lo que la estructura de los poros tiene cierta influencia.
- El I_{d5} tiene una relación alta con la resistencia a la compresión uniaxial de las ignimbritas, valores altos de I_{d5} corresponden a ignimbritas con resistencias a la compresión altas y recíprocamente. Los valores de los coeficientes de determinación son resultado de la variación de la gran diferencia entre los valores de resistencia.
- También existe una buena correlación entre los valores del I_{d5} y la resistencia a la tensión, sin embargo, la influencia del estado de alteración de las ignimbritas se ve reflejada en algunas unidades del sondeo 1. En general las ignimbritas con I_{d5} altos tienen resistencias a la tensión altas y viceversa.
- Los valores del I_{d5} tienden a incrementar con el aumento de las velocidades de onda P y de manera recíproca, las unidades estudiadas presentan una misma tendencia, con excepción de la unidad Ig-E.
- Las unidades que presentan un mejor comportamiento frente a la durabilidad tienen buenas propiedades de densidad, baja porosidad, resistencia a la compresión alta, resistencia a la tensión alta y velocidades de onda P grandes.

TRABAJO FUTURO

- Se recomienda que se hagan más ciclos en la prueba de durabilidad (entre 5 y 10), con el objeto de conocer mejor el comportamiento de la roca.
- Buscar métodos que puedan complementar la prueba de durabilidad, con el propósito de tener una mejor predicción del deterioro.
- En próximos trabajos incluir la prueba de velocidad de onda de corte, para correlacionar mejor las características de las rocas en estudio.

REFERENCIAS

- Akin, M., Özvan, A., Dinçer, I., y Topal, T. (2017). Evaluation of the physico-mechanical parameters affecting the deterioration rate of Ahlat ignimbrites (Bitlis, Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 1-22.
- Alejano, L. R., Muralha, J., Ulusay, R., et al. (2018). ISRM Suggested Method for Determining the Basic Friction Angle of Planar Rock Surfaces by Means of Tilt Tests. *Rock Mech Rock Eng*, 51, 3853–3859. doi:<https://doi.org/10.1007/s00603-018-1627-6>
- Alvarado, G. E., Carboni, S., Cordero, M., Avilés, E., & Valverde, M. (2010). Stability of the cone and foundation of Arenal volcano, Costa Rica . *Volcanic Rock Mechanics*, 135-150.
- Andreev , G. E. (1991). A review of the Brazilian test for rock tensile strength determination. Part I: calculation formula. *Mining Science and Technology*, 13(3), 445-456.
- Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V. H., Canuti, P., Casaglie, N., Iotti, A., y Sergio, C. (2002). Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(2), 91-106.
- ASTM D 2845. (2008). *Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D 3967. (2016). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D 4644 . (2016). *Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D 5731 . (2016). *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D 6032. (2017). *Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D 6473. (2015). *Standard Test Method For Specific Gravity And Absorption of Rock For Erosion Control*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D4543-08e1. (2017). *Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Aydan , Ö., y Ulusay, R. (2012). Geomechanical Evaluation of Derinkuyu Antique Underground City and its Implications in Geoengineering. *Rock Mech Rock Eng*, 43(731).
- Aydan, Ö., y Ulusay, R. (2003). Geotechnical and geoenvironmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey. *Engineering geology*, 245-272.
- Barton, N. (1976). The shear strength of rock and rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13, 255-279. doi:[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90003-6)

- Barton, N. (1987). Predicting the behavior of underground openings in jointed rock. *4th Manual Rocha Memorial Lecture, Lisbon*, 1-21.
- Barton, N. (2007). *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. London, UK: Taylor & Francis.
- Barton, N., y Choubey, V. (1977). The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics*, 1-54.
- Barton, N., Lien, R., y Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6/4, 189-236.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering rock mass classifications*. Pennsylvania, USA: John Wiley & Sons.
- Bieniawski, Z. T. (1975). The point-load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*, 9(1), 1-11.
- Boyd, J. M. (1975). PhD thesis. *The Interpretation of Geological Structure for Engineering Design in Rock*. University of London.
- Broch, E., y Franklin, J. A. (1972). The point-load strength test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 9(6), 669-676.
- Brown, E. T. (Ed.). (1981). *Rock characterization, testing and monitoring - ISRM suggested methods*. Oxford: Pergamon.
- Brox, D. (2017). *Practical Guide to Rock Tunneling*. London: CRC Press.
- Çelik, M. Y., y Ergül, A. (2015). The influence of the water saturation on the strength of volcanic tuffs used as building stones. *Environ Earth Sci*, 74, 3223–3239.
- Deere, D. U. (1963). Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 16-22.
- Deere, D. U. (1989). *Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years*. Washington, DC: U.S. Department of Commerce.
- Deere, D. U., y Deere, D. W. (1988). The rock quality designation (RQD) index in practice. *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, 91-101.
- Diederichs, M. S. (2000). D. Thesis. *Instability of hard rockmasses: The role of tensile damage and relaxation*, 556. Waterloo, Ontario, Canada.
- Erguler, Z. A. (2009). Field-based experimental determination of the weathering rates of the Cappadocian tuffs. *Engineering Geology*, 186–199.
- Feld, J. (1966). Rock movements from load release in excavated cuts. In: *Proceedings 1st International Congress Society Rock Mechanics, Lisbon*, 139-140.
- Franklin, J. A., y Chandra, R. (1972). The slake durability test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 325-341.
- Fuenkajorn, K. (2011). Experimental assessment of long-term durability of some rocks. *Bull Eng Geol Environ*, 203-211.

- Fuenkajorn, K., y Daemen, J. (1992). An empirical strength criterion for heterogeneous tuff. *Engineering Geology*, 32, 209-223.
- Garduño-Monroy, V. H., Rodríguez-Torrez, G. M., Israde-Alcántara, I., Arreygue, E., Canuti, P., y Chiesa, S. (1999). Efecto Del Clima (El Niño) En Los Fenómenos De Fluencia De Las Fallas Geológicas De La Ciudad De Morelia. *GEOS*, 19(2), 84-93.
- Gattinoni, P., Pizzarotti, E. M., y Scesi, L. (2014). *Engineering Geology for Underground Works*. London: Springer.
- Gerber, E., y Scheidegger, A. (1969). Stress-induced weathering of rock masses. *Eclog. Geol. Helv.*, 401-406.
- Goel, R. K. (2015). Importance of Weathering in Rock Engineerin. *Special Publication, J of EG*, 231-245.
- Gokceoglu, C., y Aksoy, H. (2000). New approaches to the characterization of clay-bearing, densely jointed and weak rock masses. *Engineering Geology*, 1-23.
- González de Vallejo, L. I. (2003). SRC rock mass classification of tunnels under high tectonic stress excavated in weak rocks. *Engineering Geology*, 273-285.
- Harrison, J. P., y Hudson, J. A. (2000). *Engineering rock mechanics: part 2*. The Netherlands: Pergamon.
- Heidari, M., Rafiei, B., Mohebbi, Y., y Torabi, K. (2015). Assessing the behavior of clay-bearing rocks using static and dynamic slaking indices . *Geotechnical and Geological Engineering*, 1017-1030.
- Hencher, S. (2015). *Practical rock mechanics*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Hoek, E., y Brown, E. T. (1980). *Underground Excavations in rock*. London: Institution of Mining and Metallurgy.
- Hopkins, T., y Deen, R. (1984). Identification of Shales. *Geotechnical Testing Journal* 7, 10-18.
- International Society for Rock Mechanics and Franklin, J. (1977). Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. 143-1451.
- ISRM. (1981). Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. (E. Brown, Ed.) Pergamon Press.
- Jamshidi, A., Reza Nikudel, M., y Khomehchiyan, M. (2009). Predicting the long-term durability of building stones against freeze-thaw using a decay function model. *Cold Regions Science and Technol*, 29-36.
- Khandelwal, M. (2013). Correlating P-wave Velocity with the Physico-Mechanical Properties of Different Rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 507-514.
- Kurtuluş, C., Sertçelik, F., y Sertçelik, I. (2016). Correlating physico-mechanical properties of intact rocks with P-wave velocity. *Acta Geod Geophys*, 571-582.

- Lajtai, E. Z., Carter, B. J., y Ayari, M. L. (1990). Criteria for brittle fracture in compression. *Engineering Fracture Mechanics*, 37(1), 59-74.
- Lamas, L. N. (1993). Contributions to understanding the hydromechanical behaviour of pressure tunnels. *PhD Thesis*. London: Imperial College.
- Marinos, P., y Hoek, E. (2000). GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Int. Proceedings of the GeoEng2000 at the international conference on geotechnical and geological engineering*, 1422-1446.
- Marshall, P. (1935). Acid Rocks of the Taupo-Rotorua Volcanic Distric. *Royal Society of New Zealand*, 64(3), 323-366.
- Martínez-Bofill, J., Corominas, J., Soler, A., Polvoreda, R., y Navarro, J. A. (2013). Propuesta De Mejora De La Sensibilidad Del Ensayo Slake Durability Test Para La Caracterización De Taludes Excavados En Rocas Arcillosas. *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, 2017-218.
- Moon, V. G. (1993). Geotechnical characteristics of ignimbrite: A soft pyroclastic rock type. *Engineering Geology*, 35, 33-48.
- Moon, V. G., y Beattie, A. G. (1995). Textural and microstructural influence on the durability of Waikato coal measures mudrocks. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 303-312.
- Narimani Dehnavi, R., y Sadeghi, M. (2017). Deterioration of weak rocks over time and its effect on designing tunnel support systems. *Eng Geol Environ*, 78, 1045–1056. doi:<https://doi.org/10.1007/s10064-017-1154-9>
- Nicholson, D. T., y Hencher, S. (1997). Assessing the potential for deterioration of engineered rockslopes. In P. G. Marinos, *Engineering Geology and the Environment* (Vol. 4, pp. 911-917). Balkema, Rotterdam: CRC Press.
- Ondrášik, M., y Kopecký, M. (2014). Rock Pore Structure As Main Reason Of Rock Deterioration. *Studia Geotechnica et Mechanica*, XXXVI(1), 79-88.
- Özbek, A. (2013). Investigation of the effects of wetting–drying and freezing–thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 595-609.
- Palmstron, A. (February de 2009). Combining the RMR, Q, and RMi classification systems. www.rockmass.net.
- Pusch, R. (1995). *Rock Mechanics on a Geological Base*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science.
- Rajapakse, R. (2015). *Geotechnical engineering calculations and rules of thumb*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier.
- Ramírez O., P., y Alejano M., L. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. España: S/E.
- Rey Sabin , A., Pardo Fernández, G., y Hurtado Agra, R. (2010). *Túneles y Obras Subterráneas*. España: Sika.

- Ribeiro e Sousa, L. (2006). *Learning with accidents and damage associated to underground works*. London: Taylor & Francis Group.
- Rodríguez L, J. A., Hernández G, L. E., y Mora F, A. L. (2007). Geotechnical features of the welded ignimbrites of the Canary Islands. (Malheiro , & Nunes, Edits.) *Volcanic Rocks*, 29-33.
- SCT. (2011). TÚNEL 1 "LIBRAMIENTO SUR MORELIA". *Planta y perfil geológico*. D.F., México: Dirección General de Carreteras.
- SCT. (2016). *Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera*. D.F., México: Dirección General de Servicios Técnicos.
- Siratovich, P. A., Davidson, J., Villeneuve, M., Gravley, D., Kennedy, B., Cole, J., . . . Price, L. (2012). Physical And Mechanical Properties Of The Rotokawa Andesite From Production Wells Rk 27_L2, Rk 28 And Rk 30. *New Zealand Geothermal Workshop*, 1-7.
- Sivakugan, N., Shukla, S. K., y Das, B. M. (2013). *Rock Mechanics AN INTRODUCTION*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.
- Smith, R. D., Cameron, K. L., Mcdowell, F. W., Niemeyer, S., y Sampson, D. E. (1996). Generation of voluminous silicic magmas and formation of Mid-Cenozoic crust beneath North-Central Mexico: evidence from ignimbrites, associated lavas, deep crustal granulites and mantle pyroxenites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123, 375–389.
- Sonmez, H., Ercanoglu, M., Kalender, A., Dagdelenler, G., y Tunusluoglu, C. (2016). Predicting uniaxial compressive strength and deformation modulus of volcanic bimrock considering engineering dimension. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 91-103.
- Stimpson, B. (1981). A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18, 63-65. doi:[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90266-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90266-7)
- Tating, F. F., Hack, R., y Jetten, V. (2013). Quantification Of Rock Mass Deterioration Process For Cut Slope Design In Humid Tropical Areas – Case Study Northern Kota Kinabalu, Sabah Malaysia. *National Geoscience Conference 2013 of the Geological Society of Malaysia; Geoscience for environmental wellbeing, Kuala Lumpur, Malaysia*, 102-104.
- Tatiya, R. (2005). *Civil excavations and tunnelling – a practical guide*. London, Great Britain: Thomas Telford.
- Temel, A., Gundogdu, M. N., Gourgau, A., y Le Pennec, J.-L. (1998). Ignimbrites of Cappadocia (Central Anatolia, Turkey): petrology and geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 447-471.
- Ulusay, R., Gokceoglu, C., y Binal, A. (1997). Physical and mechanical properties of the tuff samples from Cappadocia Region. *Technical Report*, 32 pp.
- Valentine, S., y Norbury, D. (2011). Measurement of total core recovery; dealing with core loss and gain. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 44, 397-403.
- Walker, G. P. (1983). Ignimbrite types and ignimbrite problems. *J. Volcanol. Getherm. Res.*, 17, 65-88.

- Wark, D. A. (1991). Oligocene ash-flow volcanism northern Sierra Madre Occidental: Role of mafic and intermediate composition magmas in rhyolite genesis. *J. Geophys. Res.*, 96, 13389–13411.
- Wyllie, D. C. (2018). *Rock Slope Engineering Civil Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Zhang, L. (2016). *Engineering Properties of Rocks*. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heineman.
- Zhu, W., Baud, P., Vinciguerra, S., y Wong, T.-f. (2011). Micromechanics of brittle faulting and cataclastic flow in Alban Hills tuff. *Journal of Geophysical Research*, 116, 1-23.

ANEXOS

Anexo 1 Grado de meteorización in (ISRM, 1981).

| Término | Descripción | Grado |
|---------------------------|--|-------|
| Roca fresca | No presenta signos visibles de meteorización en la roca: tal vez una leve decoloración en las superficies de las discontinuidades mayores. | I |
| Levemente meteorizada | La decoloración indica meteorización de la roca y en las superficies de las discontinuidades. La roca en su totalidad puede estar decolorada por la meteorización y puede estar externamente algo más débil, que en su condición fresca. | II |
| Moderadamente meteorizada | Menos de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como una estructura continua o como núcleos aislados. | III |
| Muy meteorizada | Más de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como una estructura continua o como núcleos aislados. | IV |
| Completamente meteorizada | Toda la roca está descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La estructura original del macizo rocoso aún se mantiene en gran parte intacta. | V |
| Suelo residual | Toda la roca está convertida como un suelo. La estructura del macizo rocoso y la fábrica del material están destruidas. Existe un gran cambio de volumen, sin embargo el suelo no ha sido transportado significativamente. | VI |

Anexo 2 The Rock Mass Rating System in (Bieniawski, 1989).

| A. CLASIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS | | | | | | | | | |
|---|----------------------------------|--|--|---|--|--|---|------|----|
| Parameter | | | Ranges of Values | | | | | | |
| 1 | Strenght of intact rock material | Point-load strenght index (MPa) | >10 | 4—10 | 2—4 | 1—2 | For this low range, unaxial compressive test preferred | | |
| | | Unaxial compressive strenght (MPa) | >250 | 100-250 | 50-100 | 25-50 | 5—25 | 5—25 | <1 |
| | Rating | | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| 2 | Drill core quality RQD % | | 90-100 | 75-90 | 50-75 | 25-50 | <25 | | |
| | Rating | | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 | | |
| 3 | Spacing of discontinuities | | >2 m | 0.6-2 m | 200-600 mm | 60-200 mm | <60 mm | | |
| | Rating | | 20 | 15 | 10 | 6 | 5 | | |
| 4 | Condition of discontinuities | | Very rough surfaes Not continuous No separation Unweathered wall rock | Slightly rough surfaces Separation < 1mm Slightly weathered walls | Slightly rough surfaces Separation < 1mm Highly weathered wall | Sickensided surfaces or Gouge < 5mm thick or Separation 1-5 mm Continuous | Soft gouge > 5mm thick or Separation > 5 mm Continuous | | |
| | Rating | | 30 | 25 | 20 | 10 | 0 | | |
| 5 | Groundwater | Inflow per 10 m tunnel lenght (L/min) | None | <10 | oct-25 | 25-125 | >125 | | |
| | | Ratio= Joint water pressure/Major principal stress | 0 | <0.1 | 0.1-0.2 | 0.2-0.5 | >0.5 | | |
| | General conditions | | Completely dry | Damp | Wet | Dripping | Flowing | | |
| | Rating | | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 | | |
| B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS | | | | | | | | | |
| Strike and Dip Orientations of Discontinuities | | | Very Favorable | Favorable | Fair | Unfavorable | Very Unfavorable | | |
| Ratings | Tunnels and mines | | 0 | -2 | -5 | -10 | -12 | | |
| | Foundations | | 0 | -2 | -7 | -15 | -25 | | |
| | Slopes | | 0 | -5 | -25 | -50 | -60 | | |
| C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS | | | | | | | | | |
| Rating | | | 100←81 | 80←61 | 60←41 | 40←21 | <20 | | |
| Class no. | | | I | II | III | IV | V | | |
| Description | | | Very good rock | Good rock | Fair rock | Poor rock | Very poor rock | | |

Anexo 3 Descriptions and Ratings for the Parameters RQD, Jn, and Jr in (Barton, Lien, & Lunde, 1974).

| | | |
|---|------------------|---|
| 1. Rock Quality Designation | RQD | <p>Note: Where RQD is reported or measured as ≤ 10 (including 0) a nominal value of 10 is used to evaluate Q in Eq (1) RQD intervals of 5, i.e. 100, 95, 90, etc. are sufficiently accurate</p> |
| A. Very Poor | 0-25 | |
| B. Poor | 25-50 | |
| C. Fair | 50-75 | |
| D. Good | 75-90 | |
| E. Excellent | 90-100 | |
| 2. Joint Set Number | (Jn) | <p>Note: (i) For intersections use (3.0 x Jn) (ii) For portals use (2.0 x Jn)</p> |
| A. Massive, no or few joints | 0.5-1.0 | |
| B. One joint set | 2 | |
| C. One joint set plus random | 3 | |
| D. Two joint sets | 4 | |
| E. Two joint sets plus random | 6 | |
| F. Three joint sets | 9 | |
| G. Three joint sets plus random | 12 | |
| H. Four or more joint sets, random, heavily jointed, "sugar cube", etc. | 15 | |
| I. Crushed rock, earthlike | 20 | |
| 3. Joint Roughness Number (a) Rock Wall contact and (b) Rock Wall contact before 10 cm shear | (Jr) | <p>Note: (i) Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m (ii) Jr= 0.5 can be used for planar slickensided joints having lineations, provided the lineations are favourably orientated</p> |
| A. Discontinuous joints | 4 | |
| B. Rough or irregular, undulating | 3 | |
| C. Smooth, undulating | 2 | |
| D. Slickensided, undulating | 1.5 | |
| E. Rough or irregular, planar | 1.5 | |
| F. Smooth, planar | 1.0 | |
| G. Slickensided, planar (c) No rock wall contact when sheared | 0.5 | |
| H. Zone containing clay mineral thick enough to prevent rock or crushed zone | 1.0 (nominal) | |
| I. Sandy, gravelly or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact | 1.0 (nominal) | |

Anexo 3 (Continuación) Descriptions and Ratings for the Parameters J_a and J_w in (Barton, Lien, & Lunde, 1974).

| 4. Joint Alteration Number (a). Rock Wall contact | (J_a) | Φ_r (approx.) | Note: (i) Values of Φ_r are intended as an approximate guide to the mineralogical properties of the alteration products, if present |
|--|---------------------------|--|--|
| A. Tightly healed, hard non-softening, impermeable filling, i.e. quartz or epidote | 0.75 | - | |
| B. Unaltered joint walls, surface staining only | 1.0 | (25°-35°) | |
| C. Slightly altered joint walls. Non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc. | 2.0 | (25°-30°) | |
| D. Silty-, or sandy-clay coatings, small clay-fraction (non-softening) | 3.0 | (20°-25°) | |
| E. Softening or low friction clay mineral coatings i.e. kaolinite, mica. Also chlorite, talc gypsum and graphite etc., and small quantities of swelling clays (Discontinuous coatings, 1-2 mm or less thickness) | 4.0 | (8°-16°) | |
| (b) Rock wall contact before 10 cms shear | | | |
| F. Sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc. | 4.0 | (25°-30°) | |
| G. Strongly over-consolidated, non-softening clay mineral fillings (Continuous, <5mm thickness) | 6.0 | (16°-24°) | |
| H. Medium or low over-consolidation, softening, clay mineral fillings. (Continuous, <5mm in thickness) | 8.0 | (12°-16°) | |
| J. Swelling clay fillings, i.e. montmorillonite (continuous, <5mm in thickness). Value of J_a depends on percent of swelling clay-size particles, and access to water, etc. | 8.0-12.0 | (6°-12°) | |
| K, L, Zones or bands of disintegrated | 6.0,8.0 | (6°-24°) | |
| M. or crushed rock and clay (see G, H, J for description of clay condition) | 8.0-12.0 | | |
| N. Zones or bands of silty- or sandy clay, small clay fraction (non-softening) | 5.0 | | |
| O, P, Thick, continuous zones | 10.0, 13.0 or 13.0, 20.0 | (6°-24°) | |
| R. or bands of clay (see G, H, J for description of clay condition) | | | |
| 5. Joint Water Reduction Factor | (J_w) | Approx. water pressure (kg/cm ²) | Note: (i) Factors C to F are crude estimates, Increase J_w if drainage measures are installed (ii) Special problems caused by ice formation are not considered |
| A. Dry excavations or minor inflow, i.e. <5l/min. locally. | 1.0 | <1 | |
| B. Medium inflow or pressure occasional outwash of joint fillings. | 0.66 | 1.0-2.5 | |
| C. Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints. | 0.5 | 2.5-10.0 | |
| D. Large inflow or high pressure, considerable outwash of joint fillings. | 0.33 | 2.5-10.0 | |
| E. Exceptionally high inflow or water pressure at blasting, decaying with time | 0.2-0.1 | >10.0 | |
| F. Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay. | 0.1-0.05 | >10.0 | |

Anexo 3 (Continuación) Descriptions and Ratings for the Parameter SRF in (Barton, Lien, & Lunde, 1974).

| 6. Stress reduction factor <i>(a) Weakness zones intersecting excavation which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated</i> | SRF | Note: (i) Reduce these values of SRF by 25-50% if the relevant shear zones only influence but do not intersect the excavation (ii) For strongly anisotropic stress field (if measured): when $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$, reduce σ_c and σ_t to $0.8 \sigma_c$ and $0.8 \sigma_t$; when $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reduce σ_c and σ_t to $0.6 \sigma_c$ and $0.6 \sigma_t$ where: σ_c = unconfined compression strength, σ_t = tensile strength (point load), σ_1 and σ_3 = major and minor principal stresses (iii) Few case records available where depth of crown below surface is less than span width. Suggest SRF increase from 2.5 to 5 for such cases (see H) |
|--|------------------------------|---|
| A. Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth) | 10.0 | |
| B. Single weakness zones containing clay, chemically disintegrated rock (depth of excavation ≤ 50 m) | 5.0 | |
| C. Single weakness zones containing clay, or chemically disintegrated rock (depth of excavation > 50 m) | 2.5 | |
| D. Multiple shear zones in competent rock (clay free), loose surrounding rock (any depth) | 7.5 | |
| E. Single shear zones in competent rock (clay free) (depth excavation ≤ 50 m) | 5.0 | |
| F. Single shear zones in competent rock (clay free) (depth of excavation > 50 m) | 2.5 | |
| G. Loose open joints, heavily jointed or "sugar cube" etc. (any depth) (b) Competent rock, rock stress problems | 5.0 | |
| H. Low stress, near surface | > 200 > 13 2.5 | |
| J. Medium stress | 200-10 13-0.66 1.0 | |
| K. High stress, very tight structure (Usually favourable to stability, may be unfavourable to wall stability) | < 2.5 < 0.16 10-20 | |
| L. Mild rock burst (massive rock) (c) squeezing rock; plastic flow incompetent rock under the influence of high rock pressures | 5-2.5 0.33-0.16 5-10 | |
| M. Mild squeezing rock pressure | 5-10 | |
| N. Heavy squeezing rock pressure (d) Swelling rock; chemical swelling activity depending on presence of water | 10-20 | |
| R. Mild swelling rock pressure | 5-10 | |
| O. Heavy swelling rock pressure | 10-15 | |

Anexo 4 Tabla de valoración de los sondeos 1 y 2.

| Sondeo 1 | | | | | | | Sondeo 2 | | | | | | |
|-----------------|-------|------------------------|-----|----------|------------------|---------|-----------------|-------|------------------------|-----|----------|------------------|---------|
| Profundidad (m) | | Grado de meteorización | JRC | ϕ_b | Recuperación (%) | RQD (%) | Profundidad (m) | | Grado de meteorización | JRC | ϕ_b | Recuperación (%) | RQD (%) |
| Desde | Hasta | | | | | | Desde | Hasta | | | | | |
| 4.4 | 5.5 | III | 9 | 38.5 | 39.3 | 44.5 | 0.0 | 2.1 | V | 9 | 39.8 | 28.6 | 13.0 |
| 5.5 | 7.0 | III | 9 | 36.4 | 86.7 | 42.0 | 2.1 | 3.6 | V | 11 | 39.8 | 53.3 | 4.0 |
| 7.0 | 8.5 | III | 9 | 36.4 | 97.3 | 42.0 | 3.6 | 4.1 | IV | 7 | --- | 40.0 | 0.0 |
| 8.5 | 10.0 | II | 11 | 36.4 | 98.7 | 42.0 | 4.1 | 6.1 | III | 11 | --- | 12.5 | 5.7 |
| 10.0 | 11.5 | II | 15 | 35.5 | 100.0 | 41.0 | 6.1 | 8.5 | III | 9 | --- | 27.1 | 7.2 |
| 11.5 | 13.0 | II | 13 | 35.5 | 97.3 | 41.0 | 8.5 | 10.0 | III | 13 | --- | 40.0 | 0.0 |
| 13.0 | 14.5 | III | 9 | 33.8 | 100.0 | 39.0 | 10.0 | 11.5 | III | 15 | --- | 73.3 | 5.0 |
| 14.5 | 16.0 | II | 11 | 33.8 | 99.3 | 39.0 | 11.5 | 13.0 | III | --- | 40.7 | 83.3 | 14.3 |
| 16.0 | 17.5 | II | 9 | 33.8 | 95.3 | 39.0 | 13.0 | 14.5 | III | 15 | 39.8 | 80.0 | 6.8 |
| 17.5 | 19.0 | III | 9 | 33.8 | 93.3 | 39.0 | 14.5 | 16.0 | III | 9 | 40.7 | 73.3 | 18.0 |
| 19.0 | 20.5 | II | 11 | 33.8 | 99.3 | 44.6 | 16.0 | 17.5 | III | --- | 39.8 | 83.3 | 20.7 |
| 20.5 | 22.0 | III | 11 | 32.9 | 90.7 | 23.3 | 17.5 | 19.0 | III | --- | 39.0 | 81.3 | 30.0 |
| 22.0 | 23.5 | III | 13 | 33.8 | 81.3 | 40.0 | 19.0 | 20.5 | III | 5 | 38.1 | 90.0 | 23.3 |
| 23.5 | 25.0 | II | 13 | 33.8 | 99.3 | 31.3 | 20.5 | 22.0 | IV | 13 | 37.2 | 36.7 | 0.0 |
| 25.0 | 26.5 | III | 15 | 32.9 | 88.0 | 7.1 | 22.0 | 23.5 | III | 9 | 37.2 | 100.0 | 22.7 |
| 26.5 | 28.0 | III | 7 | 32.0 | 93.3 | 28.5 | 23.5 | 25.0 | IV | 7 | 38.1 | 63.3 | 0.0 |
| 28.0 | 29.0 | III | 9 | 32.9 | 70.0 | 0.0 | 25.0 | 26.5 | IV | 7 | 40.7 | 43.3 | 0.0 |
| 29.5 | 31.0 | III | 11 | 32.9 | 100.0 | 31.3 | 26.5 | 28.0 | IV | 7 | 40.7 | 48.0 | 0.0 |
| 31.0 | 32.5 | II | 15 | 33.8 | 86.0 | 26.6 | 28.0 | 29.5 | III | --- | 40.7 | 40.0 | 13.5 |
| 32.5 | 34.0 | III | 7 | 32.0 | 42.7 | 0.0 | 29.5 | 31.0 | III | --- | 39.8 | 46.7 | 0.0 |
| 34.0 | 35.5 | III | 7 | 32.0 | 38.7 | 0.0 | 31.0 | 32.5 | III | --- | 39.0 | 30.0 | 22.0 |
| 35.5 | 37.0 | III | 9 | 32.9 | 100.0 | 26.0 | 32.5 | 34.0 | III | 13 | 38.1 | 76.7 | 28.7 |
| 37.0 | 38.5 | III | 7 | 32.9 | 86.7 | 16.6 | 34.0 | 35.5 | III | --- | 35.5 | 60.0 | 8.0 |
| 38.5 | 40.0 | IV | 13 | 32.9 | 34.7 | 0.0 | 35.5 | 37.0 | IV | 9 | --- | 16.7 | 0.0 |
| 40.0 | 41.5 | III | 13 | 32.9 | 15.3 | 8.0 | 37.0 | 38.5 | III | 11 | 34.6 | 73.3 | 14.0 |
| 41.5 | 43.0 | II | 7 | 33.8 | 86.7 | 45.3 | 38.5 | 40.0 | II | 9 | 36.4 | 100.0 | 37.3 |
| 43.0 | 44.5 | III | 15 | 34.6 | 73.3 | 11.3 | 40.0 | 41.5 | II | 7 | 34.6 | 100.0 | 18.7 |
| 44.5 | 46.0 | III | 7 | 34.6 | 52.0 | 6.6 | 41.5 | 43.0 | II | 11 | 36.4 | 100.0 | 26.7 |
| 46.0 | 47.5 | IV | 9 | 34.6 | 76.7 | 0.0 | 43.0 | 44.5 | II | --- | 37.2 | 100.0 | 62.0 |
| 47.5 | 49.0 | IV | 13 | 32.9 | 66.7 | 0.0 | 44.5 | 46.0 | II | 7 | 34.6 | 100.0 | 23.3 |
| 49.0 | 50.5 | III | 15 | 33.8 | 72.7 | 16.0 | 46.0 | 47.5 | III | --- | 35.1 | 80.0 | 17.3 |
| 50.5 | 52.0 | III | 11 | 33.8 | 70.0 | 14.3 | 47.5 | 49.0 | IV | --- | --- | 26.7 | 0.0 |
| 52.0 | 53.5 | III | 11 | 34.6 | 68.0 | 21.0 | 49.0 | 50.5 | IV | 9 | 31.2 | 26.7 | 0.0 |
| 53.5 | 55.0 | IV | 11 | 35.5 | 54.0 | 0.0 | 50.5 | 52.0 | IV | 7 | --- | 66.7 | 0.0 |
| 55.0 | 56.5 | III | 9 | 31.2 | 90.0 | 6.7 | 52.0 | 53.5 | IV | 5 | 34.6 | 64.0 | 0.0 |
| 56.5 | 58.0 | III | 5 | 32.9 | 100.0 | 8.0 | 53.5 | 55.0 | III | 5 | 34.6 | 92.0 | 28.0 |
| 58.0 | 59.5 | III | 7 | 32.0 | 100.0 | 16.3 | 55.0 | 56.5 | III | 7 | 33.8 | 100.0 | 36.7 |

Anexo 4 Tabla de valoración de los sondeos 1 y 2 (Continuación).

| Sondeo 1 | | | | | | | Sondeo 2 | | | | | | |
|-----------------|-------|------------------------|-----|----------|------------------|---------|-----------------|-------|------------------------|-----|----------|------------------|---------|
| Profundidad (m) | | Grado de meteorización | JRC | ϕ_b | Recuperación (%) | RQD (%) | Profundidad (m) | | Grado de meteorización | JRC | ϕ_b | Recuperación (%) | RQD (%) |
| Desde | Hasta | | | | | | Desde | Hasta | | | | | |
| 59.5 | 61.0 | V | --- | 34.6 | 100.0 | 0.0 | 56.5 | 58.0 | III | --- | 32.9 | 99.3 | 18.7 |
| 61.0 | 63.0 | IV | 7 | 34.6 | 100.0 | 0.0 | 58.0 | 59.5 | III | --- | 33.8 | 99.3 | 18.7 |
| 63.0 | 64.5 | IV | --- | 34.6 | 99.3 | 0.0 | 59.5 | 61.0 | II | 7 | 32.9 | 98.7 | 38.7 |
| 64.5 | 66.0 | III | --- | 35.5 | 90.0 | 25.0 | 61.0 | 62.5 | III | --- | 36.4 | 100.0 | 52.7 |
| 66.0 | 67.0 | III | --- | 35.5 | 60.0 | 45.0 | 62.5 | 64.0 | III | 5 | --- | 73.3 | 14.0 |
| 67.0 | 68.5 | III | --- | 37.2 | 89.3 | 19.0 | 64.0 | 65.5 | III | --- | 36.4 | 98.0 | 14.0 |
| 68.5 | 70.0 | III | 11 | 38.1 | 70.0 | 25.7 | 65.5 | 67.0 | IV | --- | --- | 57.3 | 0.0 |
| 70.0 | 71.5 | III | --- | 39.0 | 81.3 | 12.3 | 67.0 | 68.5 | III | 9 | 35.5 | 82.0 | 20.0 |
| 71.5 | 73.0 | III | 9 | 39.8 | 78.0 | 7.7 | 68.5 | 70.0 | III | --- | 35.5 | 100.0 | 22.0 |
| 73.0 | 74.5 | III | --- | 36.4 | 34.7 | 7.7 | 70.0 | 71.5 | III | 11 | 35.5 | 99.3 | 13.3 |
| 74.5 | 76.0 | IV | --- | 35.5 | 8.7 | 0.0 | 71.5 | 73.0 | III | --- | 34.6 | 85.3 | 16.0 |
| 76.0 | 77.5 | IV | 7 | 32.0 | 0.0 | 0.0 | 73.0 | 74.5 | IV | --- | --- | 36.7 | 0.0 |
| 77.5 | 79.0 | IV | --- | 34.6 | 53.3 | 0.0 | 74.5 | 76.0 | III | --- | --- | 73.3 | 13.6 |
| 79.0 | 80.5 | III | 11 | 40.7 | 100.0 | 30.3 | 76.0 | 77.5 | IV | 11 | --- | 34.0 | 0.0 |
| 80.5 | 82.0 | III | --- | 41.6 | 100.0 | 5.7 | 77.5 | 79.0 | III | 11 | --- | 90.0 | 26.7 |
| 82.0 | 83.5 | III | 13 | 40.7 | 63.3 | 5.7 | 79.0 | 80.5 | III | 13 | --- | 100.0 | 13.3 |
| 83.5 | 85.0 | IV | --- | 42.4 | 83.3 | 0.0 | 80.5 | 82.0 | III | 13 | 36.4 | 100.0 | 80.0 |
| 85.0 | 86.5 | III | 5 | 43.3 | 74.0 | 38.3 | 82.0 | 83.5 | III | 11 | 38.1 | 100.0 | 60.7 |
| 86.5 | 89.0 | III | --- | 41.6 | 52.0 | 10.2 | 83.5 | 86.5 | III | 15 | 36.4 | 100.0 | 57.3 |
| 89.0 | 90.5 | III | 7 | 40.7 | 71.3 | 26.3 | 86.5 | 89.5 | III | 11 | 36.4 | 93.3 | 53.3 |
| 90.5 | 92.0 | III | --- | 44.2 | 93.3 | 37.0 | 89.5 | 92.5 | III | 15 | 40.7 | 83.3 | 20.3 |
| 92.0 | 93.5 | III | 11 | 39.8 | 86.7 | 71.0 | 92.5 | 95.5 | III | --- | 39.8 | 70.0 | 10.0 |
| 93.5 | 95.0 | III | --- | 39.0 | 99.3 | 45.7 | 95.5 | 98.5 | III | --- | 40.7 | 96.7 | 51.3 |
| 95.0 | 96.5 | III | 13 | 38.1 | 84.0 | 18.3 | 98.5 | 100.0 | III | --- | 40.7 | 100.0 | 61.3 |
| 96.5 | 98.0 | III | --- | 39.0 | 72.7 | 5.7 | | | | | | | |
| 98.0 | 99.5 | III | 9 | 32.9 | 76.7 | 39.0 | | | | | | | |
| 99.5 | 100.0 | III | --- | 33.8 | 100.0 | 18.3 | | | | | | | |

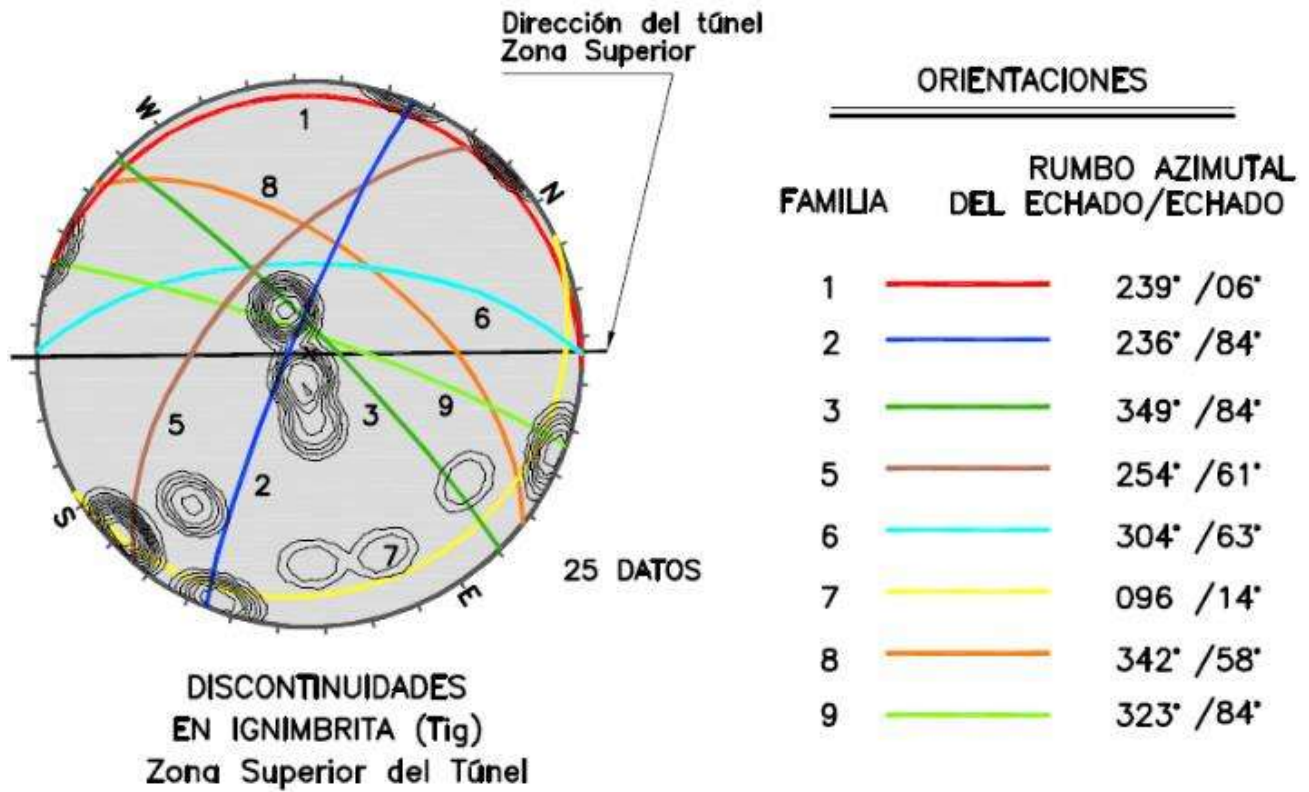
Anexo 5 Tabla de resultados de densidad (ρ), absorción, porosidad (n) y resistencia a la compresión (σ_c) de los sondeos 1 y 2.

| Sondeo 1 | | | | | | Sondeo 2 | | | | | |
|-----------------|-------|--------------------------------------|---------------|-----------------|------------------|-----------------|-------|--------------------------------------|-------------|-----------------|------------------|
| Profundidad (m) | | Densidad ρ (g/cm ³) | Absorción (%) | Porosidad n (%) | σ_c (MPa) | Profundidad (m) | | Densidad ρ (g/cm ³) | Absorción % | Porosidad n (%) | σ_c (MPa) |
| Desde | Hasta | | | | | Desde | Hasta | | | | |
| 4.4 | 5.5 | 1.85 | 7.2 | 13.2 | 19.8 | 0.0 | 2.1 | --- | --- | --- | --- |
| 5.5 | 7.0 | 1.85 | 10.8 | 19.9 | 22.1 | 2.1 | 3.6 | --- | --- | --- | --- |
| 7.0 | 8.5 | 1.84 | 10.3 | 18.9 | 32.9 | 3.6 | 4.1 | --- | --- | --- | --- |
| 8.5 | 10.0 | 1.86 | 8.0 | 14.9 | 35.7 | 4.1 | 6.1 | 1.62 | 13.9 | 23.4 | --- |
| 10.0 | 11.5 | 1.94 | 7.9 | 15.3 | 37.5 | 6.1 | 8.5 | 1.51 | 17.5 | 26.1 | --- |
| 11.5 | 13.0 | 1.96 | 7.2 | 14.0 | 44.6 | 8.5 | 10.0 | 1.62 | 13.6 | 21.8 | 37.6 |
| 13.0 | 14.5 | 1.95 | 7.2 | 14.1 | 44.4 | 10.0 | 11.5 | 1.78 | 9.8 | 17.6 | 21.5 |
| 14.5 | 16.0 | 1.95 | 7.2 | 13.9 | 57.7 | 11.5 | 13.0 | 1.79 | 10.1 | 17.9 | 26.7 |
| 16.0 | 17.5 | 2.02 | 5.8 | 11.6 | 74.8 | 13.0 | 14.5 | 1.85 | 9.3 | 16.8 | 35.5 |
| 17.5 | 19.0 | 2.06 | 6.7 | 13.7 | 46.5 | 14.5 | 16.0 | 1.88 | 9.5 | 18.2 | 31.5 |
| 19.0 | 20.5 | 2.14 | 6.0 | 12.8 | 60.7 | 16.0 | 17.5 | 1.88 | 8.9 | 16.8 | 53.5 |
| 20.5 | 22.0 | 2.16 | 6.4 | 13.7 | 67.4 | 17.5 | 19.0 | 1.94 | 8.2 | 16.1 | 54.9 |
| 22.0 | 23.5 | 2.15 | 5.9 | 12.6 | 75.2 | 19.0 | 20.5 | 1.96 | 8.4 | 16.3 | 66.6 |
| 23.5 | 25.0 | 2.15 | 5.9 | 12.7 | 89.9 | 20.5 | 22.0 | 1.98 | 8.0 | 15.8 | --- |
| 25.0 | 26.5 | 2.18 | 6.3 | 13.7 | 61.2 | 22.0 | 23.5 | 2.00 | 7.7 | 15.0 | 41.5 |
| 26.5 | 28.0 | 2.18 | 6.3 | 13.8 | 69.0 | 23.5 | 25.0 | 2.06 | 5.8 | 11.8 | 71.8 |
| 28.0 | 29.0 | 2.11 | 6.3 | 13.4 | 89.5 | 25.0 | 26.5 | 2.07 | 5.8 | 11.8 | --- |
| 29.5 | 31.0 | 1.94 | 6.3 | 12.1 | 60.0 | 26.5 | 28.0 | 2.10 | 5.6 | 11.4 | 68.3 |
| 31.0 | 32.5 | 2.20 | 5.6 | 12.3 | 108.1 | 28.0 | 29.5 | 2.14 | 5.2 | 11.3 | 78.3 |
| 32.5 | 34.0 | 2.05 | 4.9 | 10.0 | 86.7 | 29.5 | 31.0 | 2.18 | 4.9 | 10.5 | --- |
| 34.0 | 35.5 | 2.05 | 6.4 | 13.1 | 70.2 | 31.0 | 32.5 | 2.17 | 4.5 | 9.6 | --- |
| 35.5 | 37.0 | 1.99 | 7.8 | 15.5 | 47.6 | 32.5 | 34.0 | 2.17 | 5.0 | 10.8 | 72.6 |
| 37.0 | 38.5 | 1.86 | 10.1 | 18.9 | 41.6 | 34.0 | 35.5 | 2.19 | 5.2 | 11.2 | 70.7 |
| 38.5 | 40.0 | 1.92 | 7.5 | 14.4 | 49.0 | 35.5 | 37.0 | 2.17 | 5.2 | 10.8 | --- |
| 40.0 | 41.5 | 2.00 | 9.2 | 18.4 | 63.0 | 37.0 | 38.5 | 2.17 | 5.2 | 11.2 | 63.7 |
| 41.5 | 43.0 | 2.07 | 7.9 | 16.3 | 69.7 | 38.5 | 40.0 | 2.12 | 5.7 | 12.0 | 74.9 |
| 43.0 | 44.5 | 1.90 | 9.2 | 17.5 | 67.4 | 40.0 | 41.5 | 2.08 | 6.2 | 12.8 | 123.7 |
| 44.5 | 46.0 | 1.88 | 8.3 | 15.7 | 76.6 | 41.5 | 43.0 | 2.13 | 5.5 | 11.6 | 115.9 |
| 46.0 | 47.5 | 2.05 | 5.8 | 12.0 | 89.2 | 43.0 | 44.5 | 2.05 | 6.2 | 12.4 | 91.8 |
| 47.5 | 49.0 | 2.03 | 5.6 | 11.5 | 108.8 | 44.5 | 46.0 | 1.96 | 7.8 | 15.2 | 110.1 |
| 49.0 | 50.5 | 2.02 | 6.1 | 12.4 | 122.1 | 46.0 | 47.5 | 1.95 | 8.0 | 15.5 | 106.6 |
| 50.5 | 52.0 | 2.21 | 3.4 | 7.5 | 112.7 | 47.5 | 49.0 | 2.02 | 7.7 | 15.9 | --- |
| 52.0 | 53.5 | 2.09 | 5.0 | 10.4 | 142.4 | 49.0 | 50.5 | 2.16 | 4.6 | 9.5 | --- |
| 53.5 | 55.0 | 2.23 | 4.7 | 10.5 | 92.0 | 50.5 | 52.0 | 1.82 | 10.5 | 18.7 | --- |
| 55.0 | 56.5 | 2.22 | 4.5 | 9.9 | 119.6 | 52.0 | 53.5 | 2.16 | 4.3 | 9.3 | --- |
| 56.5 | 58.0 | 2.30 | 3.8 | 8.8 | 134.1 | 53.5 | 55.0 | 2.20 | 3.6 | 7.8 | 169.7 |

Anexo 5 Tabla de resultados de densidad (ρ), absorción, porosidad (n) y resistencia a la compresión (σ_c) de los sondeos 1 y 2 (Continuación).

| Sondeo 1 | | | | | | Sondeo 2 | | | | | |
|-----------------|-------|--------------------------------------|-------------|-----------------|------------------|-----------------|-------|--------------------------------------|-------------|-----------------|------------------|
| Profundidad (m) | | Densidad ρ (g/cm ³) | Absorción % | Porosidad n (%) | σ_c (MPa) | Profundidad (m) | | Densidad ρ (g/cm ³) | Absorción % | Porosidad n (%) | σ_c (MPa) |
| Desde | Hasta | | | | | Desde | Hasta | | | | |
| 58.0 | 59.5 | 1.93 | 8.3 | 16.1 | 80.3 | 55.0 | 56.5 | 2.32 | 1.4 | 3.2 | 188.1 |
| 59.5 | 61.0 | 1.36 | 26.8 | 36.6 | --- | 56.5 | 58.0 | 2.41 | 1.4 | 3.2 | 208.1 |
| 61.0 | 63.0 | 2.08 | 6.6 | 13.7 | --- | 58.0 | 59.5 | 2.17 | 4.1 | 8.8 | --- |
| 63.0 | 64.5 | 2.13 | 4.7 | 9.9 | 11.0 | 59.5 | 61.0 | 1.97 | 6.5 | 13.8 | 169.7 |
| 64.5 | 66.0 | 1.88 | 10.4 | 19.5 | --- | 61.0 | 62.5 | 1.97 | 6.5 | 13.8 | 5.5 |
| 66.0 | 67.0 | 2.14 | 6.3 | 13.5 | 23.5 | 62.5 | 64.0 | 2.38 | 1.1 | 2.6 | --- |
| 67.0 | 68.5 | 2.16 | 7.4 | 15.9 | 10.6 | 64.0 | 65.5 | 2.14 | 4.7 | 10.0 | --- |
| 68.5 | 70.0 | 1.92 | 9.8 | 18.8 | 7.4 | 65.5 | 67.0 | 2.31 | 2.5 | 6.2 | --- |
| 70.0 | 71.5 | 2.09 | 6.2 | 12.9 | --- | 67.0 | 68.5 | 2.33 | 1.6 | 3.7 | 15.0 |
| 71.5 | 73.0 | 1.94 | 10.9 | 21.1 | 7.6 | 68.5 | 70.0 | 1.93 | 8.9 | 16.9 | 23.0 |
| 73.0 | 74.5 | 1.99 | 6.2 | 12.3 | 16.1 | 70.0 | 71.5 | 2.08 | 4.5 | 9.4 | --- |
| 74.5 | 76.0 | 2.20 | 5.7 | 12.6 | 0.0 | 71.5 | 73.0 | 2.14 | 5.3 | 11.4 | 3.9 |
| 76.0 | 77.5 | 1.26 | 36.1 | 45.4 | 18.4 | 73.0 | 74.5 | 2.33 | 1.9 | 4.5 | --- |
| 77.5 | 79.0 | 1.31 | 28.5 | 37.4 | 13.8 | 74.5 | 76.0 | 1.39 | 23.0 | 32.4 | --- |
| 79.0 | 80.5 | 1.28 | 30.4 | 38.8 | 32.2 | 76.0 | 77.5 | 1.40 | 22.3 | 31.0 | --- |
| 80.5 | 82.0 | 1.36 | 23.8 | 32.4 | 27.6 | 77.5 | 79.0 | 1.40 | 22.3 | 31.0 | --- |
| 82.0 | 83.5 | 1.40 | 22.0 | 30.8 | 26.9 | 79.0 | 80.5 | 1.33 | 27.2 | 36.6 | 16.6 |
| 83.5 | 85.0 | 1.37 | 26.5 | 36.3 | 19.3 | 80.5 | 82.0 | 1.36 | 25.9 | 35.6 | 13.4 |
| 85.0 | 86.5 | 1.43 | 22.9 | 32.8 | 16.8 | 82.0 | 83.5 | 1.33 | 28.5 | 37.9 | 15.0 |
| 86.5 | 89.0 | 1.43 | 24.6 | 35.3 | 13.8 | 83.5 | 86.5 | 1.36 | 27.2 | 36.5 | --- |
| 89.0 | 90.5 | 1.29 | 30.6 | 39.4 | 11.0 | 86.5 | 89.5 | 1.44 | 21.3 | 30.2 | --- |
| 90.5 | 92.0 | 1.31 | 29.7 | 38.8 | 29.9 | 89.5 | 92.5 | 1.46 | 21.2 | 31.7 | --- |
| 92.0 | 93.5 | 1.46 | 23.7 | 34.6 | 46.0 | 92.5 | 95.5 | 1.59 | 17.0 | 26.9 | --- |
| 93.5 | 95.0 | 1.48 | 24.4 | 36.1 | 36.8 | 95.5 | 98.5 | 1.48 | 23.3 | 34.0 | --- |
| 95.0 | 96.5 | 1.45 | 25.7 | 37.4 | 16.1 | 98.5 | 100.0 | 1.51 | 20.0 | 30.1 | --- |
| 96.5 | 98.0 | 1.41 | 25.7 | 36.1 | 36.8 | | | | | | |
| 98.0 | 99.5 | 1.45 | 25.1 | 36.4 | 25.3 | | | | | | |
| 99.5 | 100.0 | 1.39 | 24.1 | 33.4 | 27.6 | | | | | | |

Anexo 6 Número de familias en el túnel 1 (SCT, 2011).



Anexo 7 Tablas de valoración de las clasificaciones RMR y sistema Q del sondeo 1.

Tabla 1 Valoración RMR de las unidades del sondeo 1.

| Unidad | Resistencia de la matriz rocosa | | RQD | Separación de juntas | | | Estado de las discontinuidades | | | | | | | | | | Agua freática | | Total |
|--------|---------------------------------|-------|------|----------------------|----------|-------|--------------------------------|---|----------|---|-------------|---|---------|---|-------------|---|---------------|----|-------|
| | | | | | | | Longitud | | Abertura | | Rugosidad | | Relleno | | Alteración | | | | |
| | MPa | Valor | % | Valor | m | Valor | m | V | mm | V | | V | <5mm | V | | V | V | | |
| Ig-A1 | 27.6 | 4 | 42.6 | 6 | 0.06-0.2 | 8 | 3.0-10.0 | 2 | 1.0-5.0 | 1 | Ligeramente | 3 | Blando | 2 | Moderada | 3 | Seco | 15 | 44 |
| Ig-B1 | 67.3 | 7 | 27.7 | 6 | 0.2-0.6 | 10 | 3.0-10.0 | 2 | 1.0-5.0 | 1 | Ligeramente | 3 | Blando | 2 | Ligeramente | 5 | Seco | 15 | 51 |
| Ig-C1 | 68.1 | 7 | 12.6 | 3 | 0.2-0.6 | 10 | 3.0-10.0 | 2 | 1.0-5.0 | 1 | Ligeramente | 3 | Blando | 2 | Ligeramente | 5 | Seco | 15 | 48 |
| Ig-D1 | 114.7 | 12 | 11.8 | 3 | 0.2-0.6 | 10 | 3.0-10.0 | 2 | 1.0-5.0 | 1 | Ligeramente | 3 | Blando | 2 | Ligeramente | 5 | Seco | 15 | 53 |
| Ig-E1 | 22.3 | 2 | 12.9 | 3 | >2.0 | 20 | >20 | 0 | >5.0 | 0 | Ondulada | 1 | >5mm | 0 | Inalterada | 6 | Seco | 15 | 47 |
| Ig-F1 | 24.9 | 2 | 22 | 3 | >2.0 | 20 | >20 | 0 | >5.0 | 0 | Ondulada | 1 | >5mm | 0 | Inalterada | 6 | Seco | 15 | 47 |

Tabla 2 Clasificación RMR del macizo rocoso sondeo 1.

| RMR Sondeo 1 | |
|----------------------------|-----------|
| Promedio índice RMR | 48.33 |
| Corrección por orientación | -5 |
| Valoración | 43.33 |
| Clase del macizo rocoso | Clase III |
| Calidad de la roca | Regular |

Tabla 3 Valoración Sistema Q de las unidades del sondeo 1.

| Unidad | RQD | Juntas | Rugosidad | Alteración | Agua | Esfuerzo | Total |
|--------|------|--------|-----------|------------|------|----------|-------|
| | % | Jn | Jr | Ja | Jw | SRF | |
| Ig-A1 | 42.6 | 4 | 3 | 8 | 1 | 2.5 | 11.4 |
| Ig-B1 | 27.7 | 12 | 3 | 6 | 1 | 2.5 | 3.2 |
| Ig-C1 | 12.6 | 12 | 3 | 6 | 1 | 2.5 | 2.0 |
| Ig-D1 | 11.8 | 12 | 3 | 3 | 1 | 2.5 | 2.4 |
| Ig-E1 | 12.9 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2.5 | 7.7 |
| Ig-F1 | 22 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2.5 | 10.7 |

Tabla 4 Clasificación Sistema Q del macizo rocoso sondeo 1.

| Sistema Q Sondeo 1 | |
|---------------------------|---------|
| Promedio índice Q | 6.2 |
| Calidad del macizo rocoso | Regular |

Anexo 8 Tablas de valoración de las clasificaciones RMR y sistema Q del sondeo 2.

Tabla 1 Valoración RMR de las unidades del sondeo 2.

| Unidad | Resistencia de la matriz rocosa | | RQD | | Separación de juntas | | Estado de las discontinuidades | | | | | | | | | | Agua freática | | Total |
|--------|---------------------------------|-------|------|-------|----------------------|-------|--------------------------------|---|----------|---|-------------|---|---------|---|-------------|---|---------------|----|-------|
| | | | | | | | Longitud | | Abertura | | Rugosidad | | Relleno | | Alteración | | | | |
| | MPa | Valor | % | Valor | m | Valor | m | V | mm | V | | V | <5mm | V | | V | V | | |
| Ig-A2 | 29.8 | 4 | 9.7 | 3 | 0.2-0.6 | 10 | 3.0-10.0 | 2 | 1.0-5.0 | 1 | Ligeramente | 3 | Blando | 2 | Moderada | 3 | Seco | 15 | 43 |
| Ig-B2 | 62.1 | 7 | 13.3 | 3 | 0.6-2.0 | 15 | 3.0-10.0 | 2 | 1.0-5.0 | 1 | Ligeramente | 3 | Blando | 2 | Ligeramente | 5 | Seco | 15 | 53 |
| Ig-C2 | 99.8 | 7 | 21.1 | 3 | 0.6-2.0 | 15 | 3.0-10.0 | 2 | 1.0-5.0 | 1 | Ligeramente | 3 | Blando | 2 | Ligeramente | 5 | Seco | 15 | 53 |
| Ig-D2 | 145.1 | 12 | 23.9 | 3 | 0.6-2.0 | 15 | 3.0-10.0 | 2 | 1.0-5.0 | 1 | Ligeramente | 3 | Blando | 2 | Moderada | 3 | Seco | 15 | 56 |
| Ig-E2 | 13.6 | 2 | 12.4 | 3 | >2.0 | 20 | >20 | 0 | >5.0 | 0 | Ondulada | 1 | >5mm | 0 | Inalterada | 6 | Seco | 15 | 47 |
| Ig-F2 | 15.7 | 2 | 37.3 | 6 | >2.0 | 20 | >20 | 0 | >5.0 | 0 | Ondulada | 1 | >5mm | 0 | Inalterada | 6 | Seco | 15 | 50 |

Tabla 2 Clasificación RMR del macizo rocoso sondeo 2.

| RMR Sondeo 2 | |
|----------------------------|-----------|
| Promedio índice RMR | 50.33 |
| Corrección por orientación | -5 |
| Valoración | 45.33 |
| Clase | Clase III |
| Calidad | Regular |

Tabla 3 Valoración Sistema Q de las unidades del sondeo 2.

| Unidad | RQD | Juntas | Rugosidad | Alteración | Agua | Esfuerzo | Total |
|--------|------|--------|-----------|------------|------|----------|-------|
| | % | Jn | Jr | Ja | Jw | SRF | |
| Ig-A2 | 10 | 12 | 3 | 8 | 1 | 2.5 | 1.6 |
| Ig-B2 | 13.3 | 12 | 3 | 6 | 1 | 2.5 | 2.0 |
| Ig-C2 | 21.1 | 12 | 3 | 6 | 1 | 2.5 | 2.7 |
| Ig-D2 | 23.9 | 12 | 3 | 8 | 1 | 2.5 | 2.8 |
| Ig-E2 | 12.4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2.5 | 6.5 |
| Ig-F2 | 37.3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2.5 | 14.8 |

Tabla 4 Clasificación Sistema Q del macizo rocoso sondeo 2.

| Sistema Q Sondeo 2 | |
|---------------------------|---------|
| Promedio índice Q | 5.1 |
| Calidad del macizo rocoso | Regular |

Anexo 9 Relación entre calidades geotécnicas y esquemas constructivos propuestos (SCT, Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera, 2016).

| Condición geotécnica | RMR (Bieniawski, 1989) | Sistema Q (Barton, Lien, & Lunde, 1974) | Tipo de sostenimiento |
|-----------------------------|--|---|------------------------------|
| A | ≥ 81 Roca muy buena | ≥ Roca muy buena | ST-1 |
| B | 61 a 80 Roca buena | 6 a 45 Roca regular a buena | ST-2 |
| C ⁽⁺⁾ | 51 a 60 Roca regular a buena | 4 a 6 Roca mala a regular | ST-3 |
| C ⁽⁻⁾ | 41 a 50 Roca regular | 1 a 4 Roca mala | ST-4 |
| D ⁽⁺⁾ | 21 a 30 Roca mala a muy mala | 0.4 a 1.0 Roca muy mala a extremadamente mala | ST-5 |
| D ⁽⁻⁾ | ≤ 20 Roca muy mala (Túnel) | 0.01 a 0.1 Roca extremadamente mala (Túnel) | ST-6 |
| E | ≤ Roca Mala a muy mala (Emportalamiento) | ≤ 0.4 Roca muy mala a extremadamente mala (Emportalamiento) | ST-E |

Anexo 10 Relaciones entre el I_{d5} y ρ , n , σ_c , σ_t y V_p de las ignimbritas.

