



Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Geológica

Regularización y Tratamiento de Datos de Propiedades Físicas del Macizo Rocosó en
Mina El Teniente.
Caso Estudio Proyecto Andes Norte, Mina El Teniente

Ignacio Daniel Herrera Molina

Profesor guía: Jack Cubillos Cadena

Pasantía profesional para optar al título de Ingeniero Civil Geólogo.

Rancagua, Chile
2023

Agradecimientos

Esta memoria representa el fin de estos años de aprendizajes y desafíos, pero también de obstáculos y dificultades las cuales he podido superar gracias a la ayuda de Dios, que, si no fuera por su dirección, nada hubiese podido lograr.

Primeramente, agradecer a CODELCO – CHILE, específicamente a la División El Teniente por la oportunidad que me brindó para realizar mi pasantía profesional. Junto a ello, agradecer a quien fue mi tutor y profesor guía, Jack Cubillos, por siempre confiar en mí y no poner en duda mis aptitudes. También agradecer, a quien es parte de mi comisión, Karina Olivo, por su eterna paciencia y ayuda durante todo este proceso y a Santiago Tassara, por su enseñanza sobre la excelencia en el área profesional.

Sin lugar a duda este proceso de años no hubiese podido realizarlo sin el apoyo incondicional de mi familia, donde en primer lugar, destaco a mi mamá, Verónica Molina, quien es mi contención y pilar de vida. A mi hermana Andrea Herrera, por su apoyo. A mi tía, Débora (Lela) Molina, quien estuvo siempre atenta a mí. A mi tata, Armando Molina, por sus oraciones. A mi abuela, Erta Alarcón, por su amor entregado. A mi tía Clara Molina, por creer en mí. A mi prima, Maite González, por su alegría. Y a mi polola Moira Pozo, por su compañía y amor. Sin la ayuda de ellos, no hubiese logrado llegar donde estoy. Les amo mucho.

He de destacar también, quienes, de forma indirecta, fueron parte de este transcurso de años. Agradecer a Gianfranco Liberona, quien comenzó siendo mi profesor, y de quien tengo el honor de decir que es mi amigo. Gracias por tanto. A mis geo-compas, Paloma Sepúlveda, Rodrigo (Pochi) González, Yoseanni Ortiz y Rocío Gubernatti. A mi primer amigo universitario, Matías Cabezas. A mis amigos Joaquín Donoso, Dylan Yáñez, Gerson Fuenzalida, Jonathan Ahumada y Camilo Arancibia, quienes siempre estuvieron conmigo. Y a Javier Contreras, por ayudarme en este proceso final.

Finalmente agradecer a las personas con las que siempre conté. A mi papá, Daniel “Kustha” Herrera, por siempre confiar en mí. A mi familia del sur, quienes siempre estuvieron orando por mí. A mis Tío Luis Riquelme y Carlos Yáñez, por sus consejos y palabras de aliento, junto con mi tía Kathy Poblete. Mi tío Andrés Ramírez y mi tía Ruth Henríquez, por estar siempre cuando los necesité. Y mi tío Lalo con su bella familia, por cada momento juntos.

Gracias a todas y todos por ser parte de mi vida.

Contenido

1. Resumen	9
2. Introducción.....	10
3. Objetivo General.....	11
3.1 Objetivos específicos.....	11
4. Antecedentes	11
4.1 Ubicación de la zona de estudio.....	11
4.1.1 Ubicación División El Teniente	11
4.1.2 Proyecto Andes Norte.....	12
4.2 Antecedentes del yacimiento	14
5. Marco Geológico.....	15
5.1 Geología regional.....	15
5.2 Litologías.....	18
5.3 Matriz rocosa, discontinuidades y macizo rocoso	22
5.4 Ensayos Geotécnicos	23
5.4.1 Ensayo de Compresión Uniaxial Simple (UCS)	23
5.4.2 Ensayo de Compresión Triaxial.....	25
5.4.3 Ensayo de Tracción Indirecta	27
5.4.4 Tipos de Rupturas.....	28
6. Marco Metodológico	29
6.1 Tipos de ruptura válidas.....	29
6.2 Metodología de trabajo	32
6.3 Regularización de Datos.....	32
6.4 Análisis estadístico.....	34
6.4.1 Extracción de valores atípicos (<i>Outliers</i>).....	35
6.5 Utilización de Programa <i>Rocdata v.5</i>	36
7. Resultados y Análisis	38
7.1 Resultados de parámetros geotécnicos	38
7.1.1 Ruptura A-B-C	38
7.1.2 Ruptura A-B	42
7.2 Resultados obtenidos en programa <i>Rocdata v.5</i>	45

7.3 Resumen de resultados de parámetros geotécnicos.	47
7.4 Resumen de Ensayos Geotécnicos para rupturas de tipo A – B – C y A – B.	49
8. Conclusiones y Discusiones	53
9. Recomendaciones.....	57
10. Referencias	58
11. Anexos	61
Anexo A: Base de Datos	61
Anexo B: Propiedades Físicas Litologías	61
B.1 Ruptura A – B – C.....	61
B.2 Ruptura A – B.....	64

Índice de Figuras

Figura 1: Ubicación de Mina El Teniente. (Software Google Earth Pro, 2023).	12
Figura 2: a) Ubicación ensayos geotécnicos contenidos en el volumen de análisis. Vista en planta Modelo geológico Leapfrog año 2023 cota 1887 Andes Norte; b) Ubicación de las muestras dentro del polígono Andes Norte y ubicación espacial de éstas dentro del volumen de análisis entre cota 1700 a 2100 m.s.n.m. (Propiedades Físicas de Roca Intacta Proyecto Andes Norte 2023, GRMD–SGL–NI–00139–2023. Rancagua)	13
Figura 3: Vista 3D de los niveles de producción de la mina El Teniente. (Tomado de Díaz, 2013).	15
Figura 4: Imagen esquemática de las unidades Geomorfológicas de la VI región de Chile. (Modificado de Börgel, 1983).	16
Figura 5: Mapa Geológico Regional (Modificado de Charrier et al., 1996, tomado por León, 2016).	17
Figura 6: Fotografía de roca perteneciente a CMET de El Teniente. (De los Santos, C. 2011).	18
Figura 7: Fotografía de roca perteneciente al Complejo Brecha Braden (CBB) de El Teniente. (De los Santos, C. 2011).	19
Figura 8: Fotografía de roca perteneciente litología Pórfido Diorítico (PDI) de El Teniente. (De los Santos, C. 2011).	20
Figura 9: Fotografía de roca perteneciente litología Pórfido Dacítico (PDA) de El Teniente. (De los Santos, C. 2011).	20
Figura 10: Fotografía de roca perteneciente Brecha Ígnea de CMET (BXC MET) de El Teniente. (De los Santos, C. 2011).	21

Figura 11: Stockwork (enrejado de vetillas polidireccionales) característicos de El Teniente (fuente: González. R. 2018).	22
Figura 12: Esquema de Ensayo de Compresión Uniaxial Simple (UCS). (González de Vallejo et al, 2002).	23
Figura 13: Strain Gauges ubicado en una probeta de ensayo (encerrado en rojo). (Fuente: Informe de Resultados Ensayos Geotécnicos Proyecto Sector Inicio Foot Print Fw, 2010).	24
Figura 14: Stress Axial (Mpa) v/s Strain (%) (Modificado de González de Vallejo et al, 2002).	25
Figura 15: Esquema de ensayo de Compresión Triaxial. (González de Vallejo et al, 2002).	26
Figura 16: Envolvente de falla de Mohr. (Salas 2011).	26
Figura 17: Ensayo de ensayo con Tracción Indirecta (Modificado de González de Vallejo et al, 2002).	27
Figura 18: Tipos de ruptura en probetas con su curva típica de resistencia asociada (Marambio et al, 2000).	28
Figura 19: Tipo de ruptura de las probetas con su curva de resistencia asociada, donde se encierra en rojo las de tipo A, B y C, las cuales serán consideradas para el tratamiento de datos (Marambio et al, 2000).	30
Figura 20: Ejemplo de ruptura “Tipo A”. Correspondiente a una brecha marginal clorita – probetas pre y postensayo. Generación de un plano de ruptura por roca (Capítulo 8, Propiedades del Macizo Rocos. Codelco Chile – División El Teniente).	30
Figura 21: Ejemplo de ruptura “Tipo B”. Correspondiente a Andesita Tte. 4 Fortuna – probetas pre y postensayo. Generación de dos planos de ruptura: uno por venilla existente y otro por roca. (Capítulo 8, Propiedades del Macizo Rocos. Codelco Chile – División El Teniente).	31
Figura 22: Ejemplo de ruptura “Tipo C”. Correspondiente a Andesita Tte. 4 Fortuna – probetas pre y postensayo. Generación de dos planos de ruptura, ambos por venillas existente. (Capítulo 8, Propiedades del Macizo Rocos. Codelco Chile – División El Teniente).	31
Figura 23: Diagrama de flujo a partir de la metodología de trabajo (Elaboración propia).	32
Figura 24: Ejemplo de valores atípicos (outliers) identificados por el programa Rocdata v.5 mediante la línea de Mogi, donde los outliers corresponden a los círculos de color rojo y la línea de Mogi a la recta de color negro, en un gráfico de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología CMET con ruptura A – B. (Realizado en programa Rocdata v.5).	36
Figura A: Extracto de base de datos unificada general sin filtrar, que contiene 13187 datos, de nombre “BDA_LF_ZDE_MODULOS”.	61
Figura B.1 Compilación de propiedades físicas de litología Brecha Ígnea de CMET (BXICMET) con ruptura A–B–C.	61
Figura B.2 Compilación de propiedades físicas de litología Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI) con ruptura A–B–C.	62

Figura B.3 Compilación de propiedades físicas de litología Complejo Máfico El Teniente (CMET) con ruptura A-B-C.	62
Figura B.4 Compilación de propiedades físicas de litología Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw) con ruptura A-B-C.	63
Figura B.5 Compilación de propiedades físicas de litología Complejo Máfico El Teniente “Patilla” (CMET Fw) con ruptura A-B-C.	63
Figura B.6 Compilación de propiedades físicas de litología Pórfido Diorítico (PDI) con ruptura A-B-C.	64
Figura B.7 Compilación de propiedades físicas de litología Brecha Ígnea de CMET (BXICMET) con ruptura A-B.	64
Figura B.8 Compilación de propiedades físicas de litología Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI) con ruptura A-B.	65
Figura B.9 Compilación de propiedades físicas de litología Complejo Máfico El Teniente (CMET) con ruptura A-B.	65
Figura B.10 Compilación de propiedades físicas de litología Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw) con ruptura A-B.	66
Figura B.11 Compilación de propiedades físicas de litología Complejo Máfico El Teniente “Patilla” (CMET Fw) con ruptura A-B.	66
Figura B.12 Compilación de propiedades físicas de litología Pórfido Diorítico (PDI) con ruptura A-B.	67
Figura B.13 Compilación de propiedades físicas de litología Pórfido Dacítico (PDA) con ruptura A-B.	67

Índice de Tablas

Tabla 1: Cantidad de datos según el tipo de ruptura.	33
Tabla 2: Parámetros geotécnicos.	34
Tabla 3 y 4: Resumen de litologías analizadas según tipo de ruptura.	35
Tabla 5: Índice de Resistencia Geológica (GSI). (Marinos, P. & Hoek, E. 2000)	37
Tabla 6: Valor GSI para unidades litológicas por el estándar Teniente. (GRMD-SGL-INF-0041-2018).	37
Tabla 7: Recuento de número de datos con respecto a litologías en ensayos geotécnicos aplicados a rupturas de tipo A, B y C.	38
Tabla 8: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Brecha Ígnea de CMET (BXICMET).	39
Tabla 9: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Brecha Ígnea de CMET (BXICMET Fw).	39
Tabla 10: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI).	40

Tabla 11: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Complejo Máfico El Teniente (CMET).	40
Tabla 12: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw).	40
Tabla 13: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Complejo Máfico El Teniente “Patilla” (CMET Fw).	41
Tabla 14: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Pórfido Diorítico (PDI).	41
Tabla 15: Recuento de número de datos con respecto a litologías en ensayos geotécnicos aplicados a rupturas de tipo A y B.	42
Tabla 16: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Brecha Ígnea de CMET (BXICMET).	43
Tabla 17: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Brecha Ígnea de CMET “Patilla” (BXICMET Fw).	43
Tabla 18: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI).	43
Tabla 19: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Complejo Máfico El Teniente (CMET).	44
Tabla 20: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw).	44
Tabla 21: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Complejo Máfico El Teniente “Patilla” (CMET Fw).	44
Tabla 22: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Pórfido Dacítico (PDA).	45
Tabla 23: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Pórfido Diorítico (PDI).	45
Tabla 24: Resistencia a la Compresión Uniaxial de la roca intacta (σ_{ci}) y valor de UCS, para rupturas de tipo A (por matriz rocosa), B (mixta: matriz y estructura) y C (varias vetillas). (Realizado en el programa Rocdata v.5).	46
Tabla 25: Resistencia a la Compresión Uniaxial de la roca intacta (σ_{ci}) y valor de UCS, para rupturas de tipo A (por matriz rocosa) y B (mixta: matriz y estructura). (Realizado en el programa Rocdata v.5).	46
Tabla 26: Propiedades geotécnicas roca intacta para litologías Brecha Ígnea de CMET (BXICMET), Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI), Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw), Complejo Máfico El Teniente (CMET Fw) y Pórfido Diorítico (PDI) de ensayos con tipo de ruptura A - B - C.	47
Tabla 27: Propiedades geotécnicas roca intacta para litologías Brecha Ígnea de CMET (BXICMET), Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI), Complejo Máfico El Teniente (CMET),	

Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw), Complejo Máfico El Teniente (CMET Fw),
Pórfido Dacítico (PDA) y Pórfido Diorítico (PDI) de ensayos con tipo de ruptura A – B.48

Índice de Gráficos

GRÁFICO 7.1: ENSAYOS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL SIMPLE (UCS) PARA LITOLOGÍAS CON RUPTURA TIPO A – B – C.	50
Gráfico 7.2: Ensayos de Compresión Uniaxial Simple (UCS) para litologías con ruptura tipo A – B.	50
Gráfico 7.3: Ensayos de Compresión Triaxial para litologías con ruptura tipo A – B – C.....	51
Gráfico 7.4: Ensayos de Compresión Triaxial para litologías con ruptura tipo A – B.	51
Gráfico 7.5: Ensayos de Tracción Indirecta para litologías con ruptura tipo A – B – C.....	52
Gráfico 7.6: Ensayos de Tracción Indirecta para litologías con ruptura tipo A – B.....	52

1. Resumen

Los ensayos y estudios geotécnicos son fundamentales para comprender el comportamiento físico de un macizo rocoso. Existen varios métodos o ensayos para determinar los parámetros geotécnicos de un macizo rocoso, entre estos, Compresión Uniaxial Simple (UCS), Compresión Triaxial y Tracción Indirecta. La División El Teniente explota mineral primario con comportamiento heterogéneo debido a su macizo rocoso tipo *Stockwork*, que corresponde a un enrejado de vetillas de mayor persistencia y espaciamiento, en combinación con sistemas de fallas principales. Este comportamiento diferencial afecta la estabilidad y la fragmentación de la roca. Por esto, se requiere definir las propiedades físicas de cada tipo litológico en cada sector minero a través de ensayos de laboratorio, además de regularizar la base de datos de la división. Esto permite prever el comportamiento futuro y tomar medidas de fortificación en el área productiva, como el Proyecto Andes Norte.

Con la finalidad de comprender de mejor manera las propiedades del macizo rocoso tipo *Stockwork* característico de la mina El Teniente, y también de analizar el estándar de caracterización física de la roca, se realizan diversos análisis estadísticos de datos. Esto para determinar los parámetros geotécnicos de las diversas litologías existentes en el yacimiento, para que de esa manera, se pueda obtener información para la realización de futuros proyectos.

Con respecto a los resultados obtenidos, a partir del procedimiento metodológico (análisis estadísticos, extracción de valores atípicos y comparación de datos), se logra complementar información sobre el área de estudio. También, se permite identificar la diferencia en los valores de resistencia con respecto a los tipos de ruptura en base al estándar Teniente, el cual indica que para obtener propiedades físicas de un Macizo Rocosos se contemplan rupturas de tipo A – B – C. En este estudio se observa el cambio al considerar solo rupturas de tipo A – B, logrando así, observar el aumento o disminución de valores dependiendo el tipo de litología. Esto conlleva al planteamiento de una modificación del estándar Teniente, para que de esa forma cada litología presente en el yacimiento tenga su respectivo estándar de caracterización.

Palabras claves: Ensayos geotécnicos, tipos de rupturas, análisis estadístico, División El Teniente.

2. Introducción

Los ensayos de Compresión Uniaxial Simple (UCS), Compresión Triaxial y Tracción Indirecta (método brasileño) permiten obtener la envolvente de fallamiento –resistencia– del macizo rocoso, es decir, una representación gráfica que establece el límite entre la estabilidad elástica y la fractura de la roca bajo diferentes condiciones de carga. Entregando como resultado las propiedades físicas del macizo rocoso tipo *Stockwork* de El Teniente, el cual se caracteriza por ser de alta frecuencia de vetillas selladas, polidireccionales y de pequeña escala que se cruzan entre sí.

En este caso, la División El Teniente se caracteriza por la explotación de roca primaria (macizo rocoso no alterado), el cual tiene un comportamiento heterogéneo, incluso dentro de un mismo sector productivo, debido a la naturaleza de su macizo rocoso eminentemente tipo *Stockwork*. El comportamiento diferencial del macizo rocoso ante su explotación tiene consecuencias en la estabilidad, hundibilidad y fragmentación de la roca. Para esto se necesita definir las propiedades físicas para cada uno de los tipos litológicos presentes en cada sector minero a través de ensayos de laboratorios, y posteriormente el tratamiento y regularización de la base de datos de la división. Con esto, se espera poder predecir el comportamiento diferencial del macizo rocoso que ayude en la determinación de medidas de fortificación del área productiva en el futuro. Para este caso particular se realizará la caracterización de propiedades físicas del polígono del Proyecto Andes Norte (Figura 2).

El presente trabajo abordará la definición de cada ensayo geotécnico aplicado en laboratorio, junto con los parámetros geotécnicos y su posterior análisis estadístico. Se definirán los objetivos del trabajo a realizar, luego se presentarán los antecedentes necesarios para comprender este trabajo, la metodología del proceso en el cual se definieron las litologías de interés con sus respectivos parámetros geotécnicos, junto con su análisis estadístico a partir de los resultados de la regularización y tratamiento de la base de datos con respecto a los tres ensayos geotécnicos considerados para el macizo rocoso del proyecto Andes Norte. Finalmente, se presenta una discusión de los resultados obtenidos junto con recomendaciones orientadas a la mejora y complementación del proyecto.

3. Objetivo General

El objetivo principal es la determinación de las propiedades físicas de los diferentes tipos litológicos del macizo rocoso El Teniente del polígono del proyecto Andes Norte. Mediante la revisión, regularización y tratamiento estadístico de los datos de ensayos geotécnicos históricos existentes en la división.

3.1 Objetivos específicos

- Recopilar información relacionada a ensayos geotécnicos para el proyecto Nuevo Nivel Mina (NNM).
- Sistematizar las propiedades físicas del macizo rocoso El Teniente, a partir del tratamiento de información de interés para realizar análisis estadísticos de la base de datos regularizada.
- Comprender las relaciones entre las propiedades físicas del macizo rocoso, los tipos de ruptura y las litologías, mediante los resultados obtenidos.

4. Antecedentes

4.1 Ubicación de la zona de estudio

4.1.1 Ubicación División El Teniente

La División El Teniente se encuentra en la comuna de Machalí, en plena cordillera de Los Andes Centrales de Chile, a los 34°04' latitud sur y 70°22' longitud oeste, con altitudes que oscilan entre los 2.200 y los 3.200 metros sobre el nivel del mar. Está situada a una distancia de 54 kilómetros de Rancagua, la capital de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

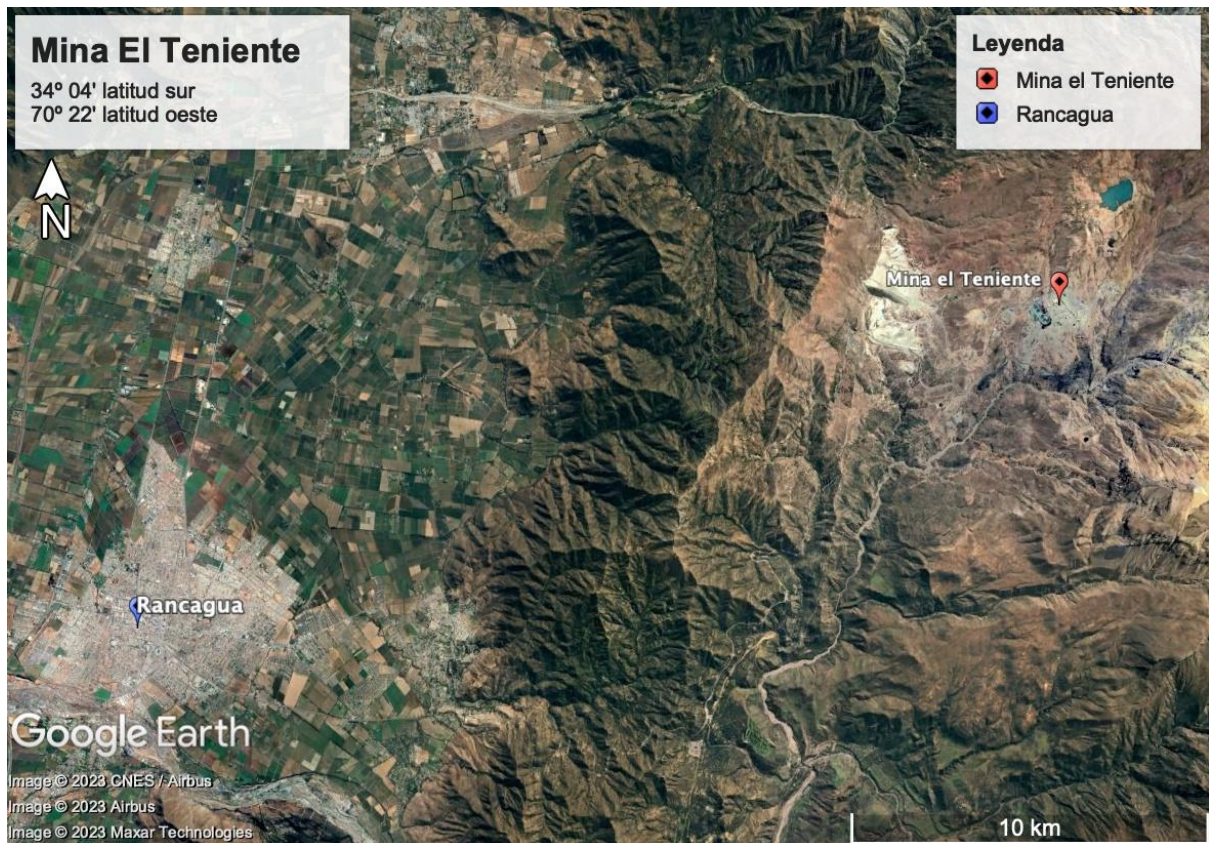


Figura 1: Ubicación de Mina El Teniente. (Software Google Earth Pro, 2023).

4.1.2 Proyecto Andes Norte

El Proyecto Andes Norte contempla el desarrollo de un nuevo nivel de explotación para dar continuidad operacional a la División El Teniente, donde las muestras que sustentan la caracterización de las propiedades físicas de la roca intacta se emplazan en un volumen que suscribe al polígono del Proyecto Andes Norte, desde las coordenadas 300E a 1600E, 350N a 1650N y desde las cotas 1700 a 2100, correspondiente a un volumen con largo y ancho de 1300 metros y 400 metros de alto (Figura 2).

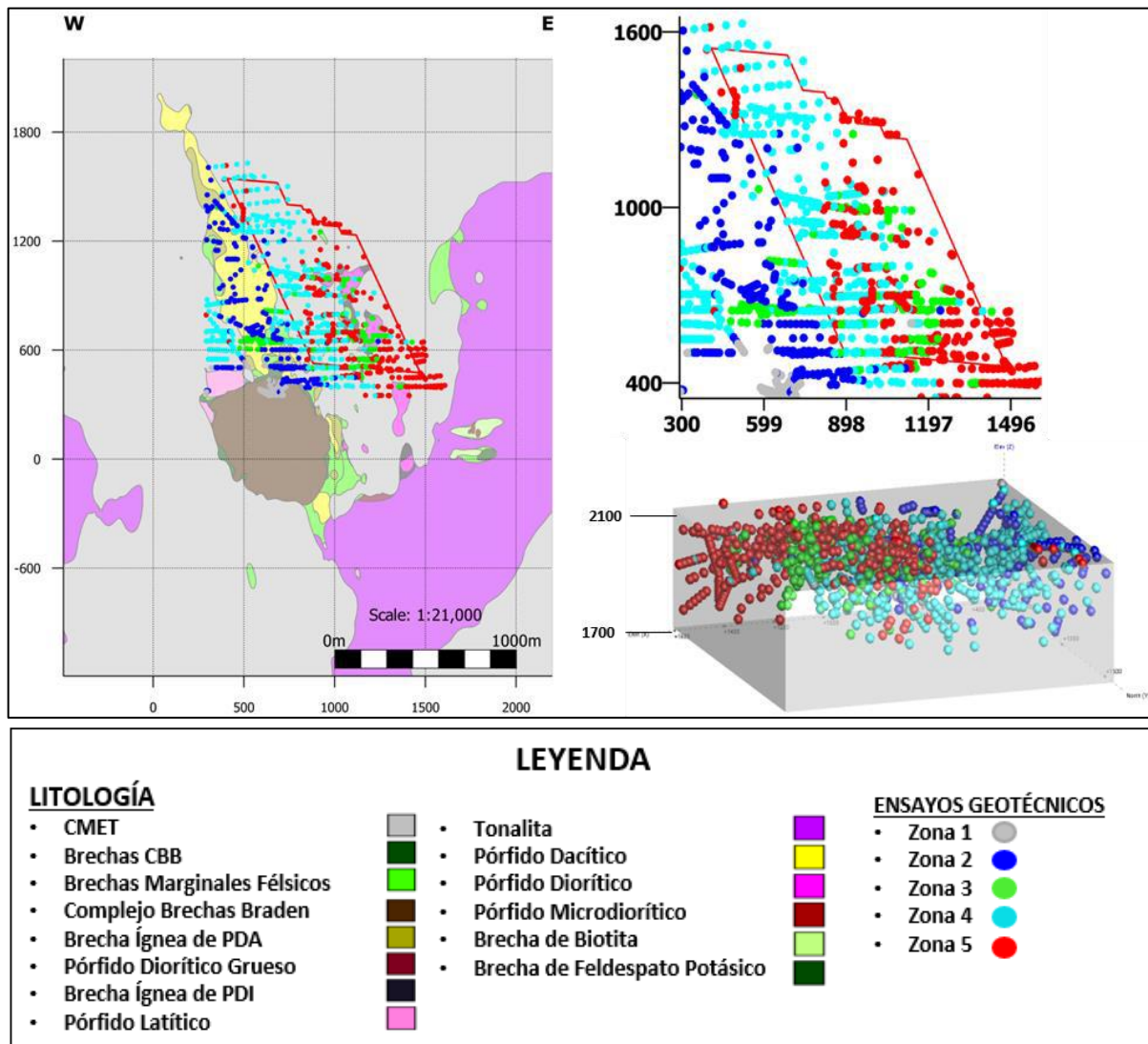


Figura 2: a) Ubicación ensayos geotécnicos contenidos en el volumen de análisis. Vista en planta Modelo geológico Leapfrog año 2023 cota 1887 Andes Norte; b) Ubicación de las muestras dentro del polígono Andes Norte y ubicación espacial de éstas dentro del volumen de análisis entre cota 1700 a 2100 m.s.n.m. (Propiedades Físicas de Roca Intacta Proyecto Andes Norte 2023, GRMD-SGL-NI-00139-2023. Rancagua)

El volumen de análisis cuenta con una significativa representatividad de muestras en el espacio, con mejor cobertura dentro de la mitad sur del polígono Andes Norte, concentrando 1.826 probetas al sur de la coordenada 800N (Figura 2). Las Zonas Geotécnicas mejor representadas, en termino de propiedades físicas, dentro del polígono del Punto de Inicio del Proyecto Andes Norte corresponden a la zona 5, zona 4 y en menor medida la zona 3.

4.2 Antecedentes del yacimiento

La Mina El Teniente forma parte de la CORPORACIÓN NACIONAL DEL COBRE (CODELCO – CHILE). Corresponde al yacimiento de cobre – molibdeno (Cu – Mo) subterráneo más grande del mundo (Skewes et al, 2002). Está ubicada en la Cordillera de los Andes, en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile.

El yacimiento se compone de más de 3000 km de galerías subterráneas y también cuenta con operaciones a cielo abierto. Se accede a la mina a través de la Carretera del Cobre, construida específicamente para ese propósito.

El Teniente ha sido explotado desde 1906 y utiliza métodos como el "Hundimiento de Bloques" y el "Hundimiento de Paneles" para la extracción de cobre. Es una mina subterránea en funcionamiento con una producción diaria de alrededor de 140.000 toneladas.

La mina se encuentra en una zona geológica dominada por rocas volcánicas y presenta una mineralización principalmente en forma de vetillas o *stockwork*. La roca de mineral primario es masiva y competente, lo que la hace adecuada para la extracción.

El complejo industrial de la mina incluye el concentrador Colón y la Fundición Caletones. Es una importante fuente de empleo y contribuye significativamente a la economía de la región y del país. (De Los Santos, C. 2011).

Históricamente este mega-yacimiento ha sido explotado por sectores a distintas cotas, profundizando cada vez más a medida que avanza la extracción. Las principales minas productivas (Figura 3), con sus respectivas cotas son las siguientes: Sur Andes Pipa (Suapi), 2.207 m s.n.m; Esmeralda, 2.210 m s.n.m; Reservas Norte (RENO), 2.120 m s.n.m; Teniente 4 Sur, 2.372 m s.n.m; Diablo Regimiento, 2.210 m s.n.m; Pipa Norte, 2.207 m s.n.m.

Por último, es importante resaltar que todas las labores subterráneas al interior de la mina se encuentran referenciadas con respecto a un sistema de coordenadas locales cuyo origen en coordenadas UTM (Sistema de Referencia WGS84) corresponde a 374615,79E – 6227561,66N.

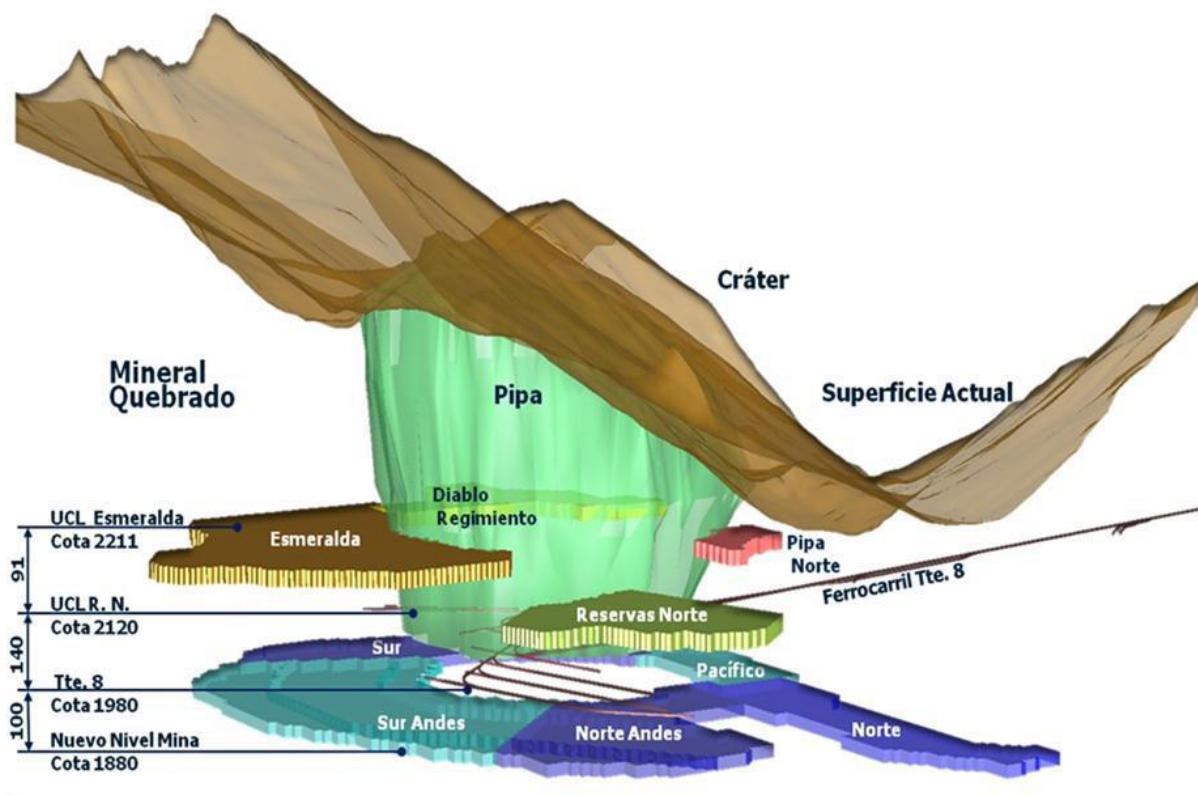


Figura 3: Vista 3D de los niveles de producción de la mina El Teniente. (Tomado de Díaz, 2013).

5. Marco Geológico

5.1 Geología regional

En la región central de la Cordillera de los Andes, a una latitud aproximada de 34° sur, se pueden identificar diferentes unidades morfológicas según la clasificación de Charrier (1981). Una de estas unidades es la Cordillera de la Costa, la cual está compuesta por rocas sedimentarias y volcánicas del Paleozoico Tardío. Estas rocas han sido instruidas por un batolito y han experimentado una historia de deformación compleja. Hacia el este, se encuentra el Valle Central, que separa la Cordillera de la Costa de la Cordillera Principal (Figura 4). El Valle Central es una depresión que se extiende en dirección norte-sur y está principalmente rellena de sedimentos del Cuaternario. Por otro lado, la Cordillera Principal está formada por rocas estratificadas que abarcan desde el Mesozoico hasta el Terciario. Estas rocas han sido instruidas por rocas plutónicas e hipabisales del Terciario. En el flanco occidental de la Cordillera Principal, en la VI región, se encuentra el importante yacimiento de

cobre–molibdeno conocido como El Teniente. A continuación, se describirá el contexto geológico regional y distrital de este mega–yacimiento, junto con sus características estructurales y su evolución tectónica.



Figura 4: Imagen esquemática de las unidades Geomorfológicas de la VI región de Chile.
(Modificado de Börgel, 1983).

El yacimiento de cobre–molibdeno "El Teniente" se encuentra en los Andes Centrales, en la Franja Cuprífera del Mioceno Superior–Plioceno. A nivel regional, el área del yacimiento está compuesta por secuencias de rocas volcánicas y sedimentarias de diferentes edades, desde el Triásico hasta el Cuaternario, que forman parte del Ciclo Orogénico Andino. Estas rocas están intruidas por cuerpos plutónicos e hipabisales de edad Cenozoica, como batolitos, stocks, diques y apófisis. Se puede ver un mapa geológico regional en la Figura 5, extraído de Charrier et al. (1996).

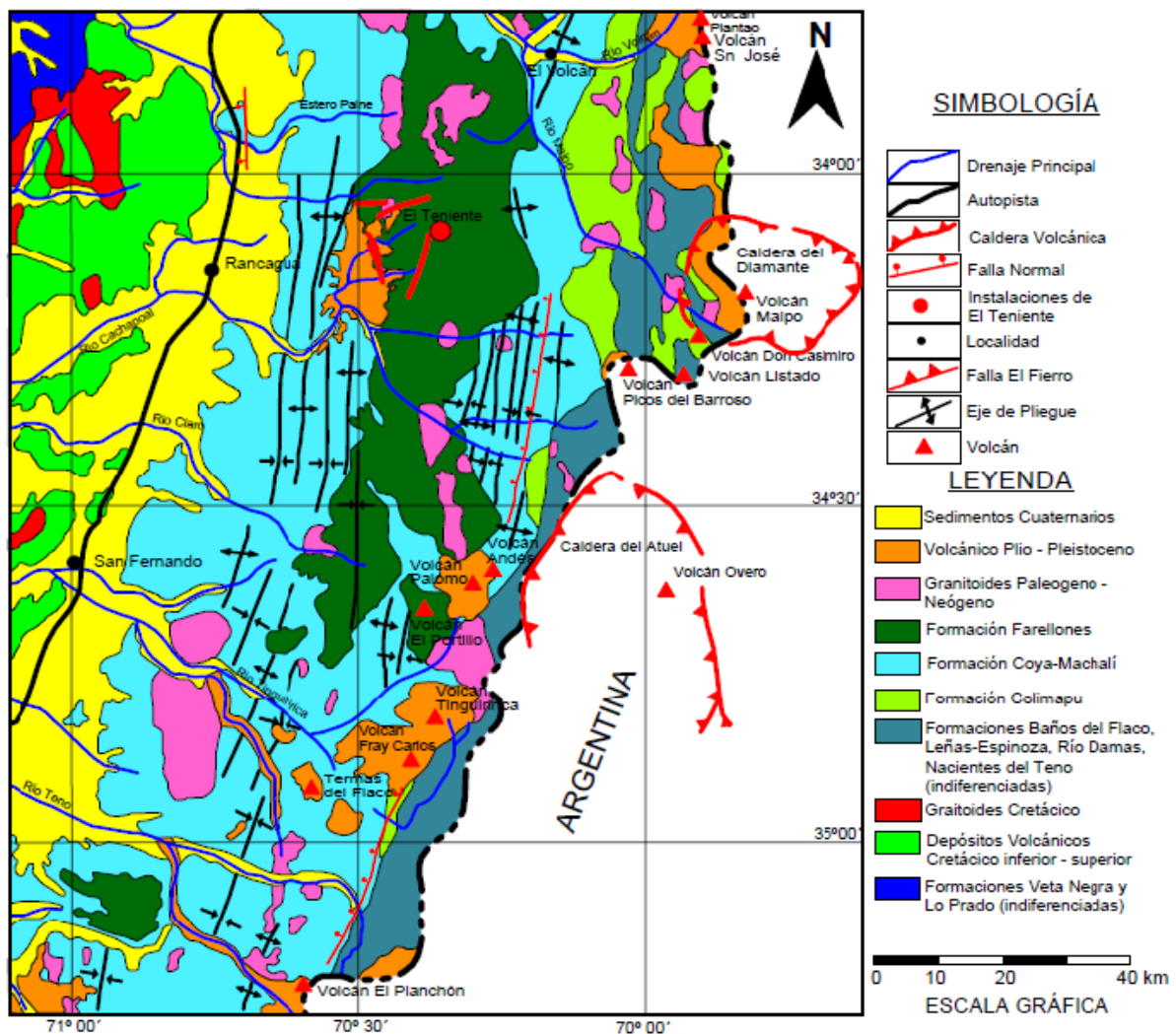


Figura 5: Mapa Geológico Regional (Modificado de Charrier et al., 1996, tomado por León, 2016).

Notas: Cordillera de la Costa: (1) Formaciones Veta Negra y Lo Prado (indiferenciadas). Depósitos de cuenca intra- arco volcánico (dominio volcánico) y marino sedimentarios (Jurásico Superior a Cretácico Inferior) (2) Depósitos volcánicos continentales (dominio volcánico, Cretácico inferior a superior) (3) Granitoides (intrusivos, Cretácico). Cordillera Principal: (4) Formaciones Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Río Damas, Nacientes del Teno (indiferenciadas, marino y continental, Jurásico). (5) formación Colimapu (Jurásico Superior a Cretácico inferior, marino). (6) Formación Coya-Machali (Palógeno, volcánico continental). (7) Formación Farellones (Neógeno, volcánico continental). (8) Granitoides (Paleógeno-Neógeno). (9) Volcánico (Pioceno-Pleistoceno). (10) Cuaternario continental clástico.

5.2 Litologías

Las litologías contempladas en el presente informe incluyen las siguientes definidas según González, R. 2018:

- **Complejo Máfico El Teniente (CMET):** Se trata de un conjunto de rocas volcánicas de composición básica que se encuentra bajo la superficie. Estas rocas tienen una afinidad toleítica y son responsables del 80% de los depósitos de cobre en la zona. Esta formación es la más extensa en el yacimiento, abarcando un área de más de 2 kilómetros de altura, 2.4 kilómetros de ancho y 1.2 kilómetros de largo. Según las dataciones realizadas, se estima que estas rocas se formaron durante el periodo Mioceno Superior.



Figura 6: Fotografía de roca perteneciente a CMET de El Teniente. (De los Santos, C. 2011).

- **Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw):** El CMET Hw o también conocido como CMET “Cabeza”, se refiere a una subdivisión de rocas dentro del Complejo Máfico El Teniente, que se encuentra en una franja de aproximadamente 200 a 250 metros alrededor del Complejo de Brechas Braden. Esta unidad de roca se caracteriza por la presencia predominante de pequeñas vetas asociadas al ambiente de mineralización, del último pulso de Alteración Hidrotermal (HT), las cuales están rellenas de minerales como anhidrita, carbonatos, bornita, clorita, yeso y tennantita. Además, también se encuentran vetas relacionadas con ambientes de mineralización de Alteración Tardimagmática (TM), que están rellenas de cuarzo, anhidrita y ocasionalmente sulfuros. Los mineros que han trabajado en esta área describen estas rocas como sólidas y poco propensas a hundirse.
- **Complejo Máfico El Teniente “Patilla” (CMET Fw):** El CMET Fw o también conocido como CMET “Patilla”, se utiliza para referirse a las rocas del Complejo Máfico El Teniente que se

encuentran principalmente en el sector Este del yacimiento. Esta unidad se distingue por tener numerosas vetas asociadas al ambiente de mineralización de Alteración Hidrotermal Principal (HP), que están mayoritariamente rellenas de minerales como calcopirita, pirita y anhidrita. En comparación con el CMET Hw, en este sector las vetas relacionadas con los ámbitos de alteración HT y TM se observan con menor densidad. La transición entre el CMET Hw y el Fw se caracteriza por un aumento en la proporción de vetas con alteración principal (HP) en comparación con las vetas con alteración tardía (HT).

- **Complejo Brecha Braden (CBB):** El Complejo de Brechas Braden, también conocido como "Pipa Braden", es una diatrema de origen freatomagmático que se encuentra en la zona central del yacimiento, según los estudios de Sillitoe (1985) y Makshev et al (2004). Esta brecha tiene una forma de cono invertido con una planta subcircular, con un diámetro cercano a 1200 metros en la superficie actual y se extiende verticalmente por más de 3000 metros. El contacto oriental de la brecha con las rocas circundantes es subvertical, mientras que el contacto occidental tiene una inclinación aproximada de 60 grados hacia el este.

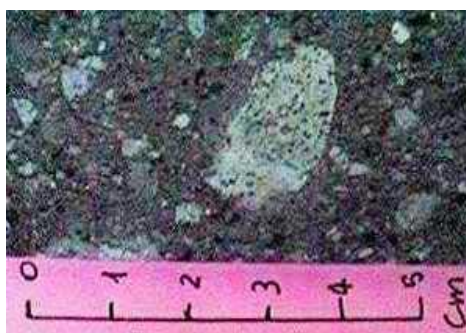


Figura 7: Fotografía de roca perteneciente al Complejo Brecha Braden (CBB) de El Teniente.

(De los Santos, C. 2011).

- **Pórfido Diorítico (PDI):** Se trata de una serie de cuerpos intrusivos más pequeños, como stocks y diques, que se disponen en una dirección aproximada de N30°W, ubicados en la parte norte y central del yacimiento. Estos cuerpos intrusivos tienen una textura porfídica, lo que significa que están compuestos por fenocristales de plagioclasa, biotita y pequeñas inclusiones de cuarzo, que representan alrededor del 30% al 60% del total de la roca.

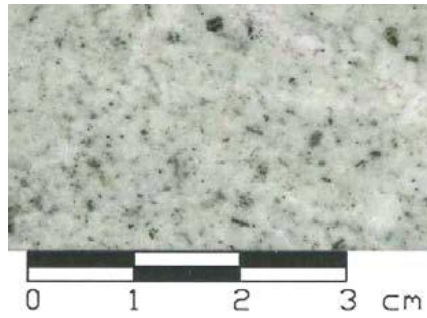


Figura 8: Fotografía de roca perteneciente litología Pórfido Diorítico (PDI) de El Teniente. (De los Santos, C. 2011).

- **Pórfido Dacítico (PDA):** Este es un cuerpo intrusivo tabular de forma subvertical y orientación general de norte a sur. Se encuentra al norte de la Brecha Braden y se introduce dentro del Complejo Máfico El Teniente. Tiene un color que varía entre gris claro y blanco. Los límites de contacto con la unidad litológica CMET pueden ser claros pero irregulares, presentando características brechosas o transicionales.

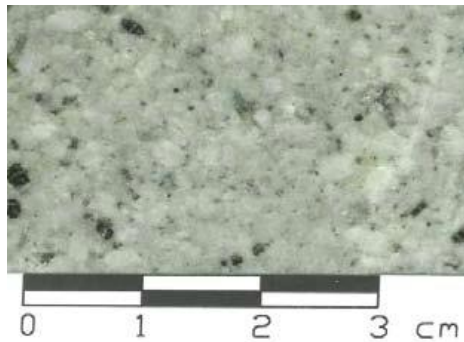
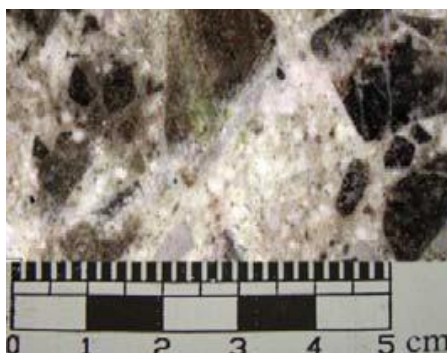


Figura 9: Fotografía de roca perteneciente litología Pórfido Dacítico (PDA) de El Teniente. (De los Santos, C. 2011).

- **Pórfido Latítico (PLA):** La roca presenta una textura porfídica con un tamaño de grano medio a grueso, donde alrededor del 60% de los cristales son fenocristales de plagioclasa, biotita, anfíbola alterada y cuarzo. Estos cristales se encuentran dispersos en una matriz compuesta principalmente por cuarzo y feldespato. Esta unidad se caracteriza por tener una baja concentración de cobre, con una ley media inferior al 0.2%, lo que la convierte en una unidad prácticamente estéril en cuanto a contenido de cobre. Se encuentra en las proximidades del Pórfido Dacítico.
- **Brecha de Anhidrita (BXANH):** Estos cuerpos son brechas hidrotermales que se encuentran en los límites entre el CMET y las siguientes unidades litológicas: Complejo Brecha Braden,

Pórfido Dacítico, Tonalita y pórfidos dioríticos. La composición de los fragmentos de roca en estas brechas es polimíctica, lo que significa que están compuestos por diferentes tipos de rocas. El cemento de estas brechas está compuesto principalmente por anhidrita y cuarzo, y también contiene minerales como calcopirita, pirita y molibdenita.

- **Brecha de Cuarzo (BXQZ):** Roca que contiene fragmentos angulosos de cuarzo incrustados en una matriz de material más fino. Los fragmentos de cuarzo pueden variar en tamaño y están unidos por cemento de cuarzo. Estas brechas de cuarzo se forman a través de procesos de meteorización y erosión, donde el cuarzo es liberado de su roca madre y posteriormente se deposita y compacta en una nueva formación rocosa. Son conocidas por su dureza y resistencia.
- **Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI):** La Brecha Pórfido Diorítico es una roca ígnea volcánica que se caracteriza por su textura brechoidal, compuesta por fragmentos angulares de diorita cementados por una matriz de grano fino. Se forma en erupciones explosivas donde la roca se fragmenta y luego se cementa. Puede estar asociada con depósitos minerales y tiene importancia económica en la minería.
- **Brecha Ígnea de CMET (BXICMET):** Las brechas ígneas son rocas conformadas por clastos (fragmentos de rocas) unidos por una matriz o cemento, donde en este caso, las brechas ígneas de CMET son fragmentos de rocas unidos por una matriz de composición máfica (básica) de coloración negra a gris oscura, ricos en minerales de Fe y Mg. Donde, además, se divide la Brecha Ígnea de CMET (BXICMET) tanto para el oeste en Brecha Ígnea de CMET “head” (BXICMET Hw o BXICMET “Cabeza”) y para el este del yacimiento en Brecha Ígnea de CMET “foot” (BXICMET Fw o BXICMET “Patilla”).



*Figura 10: Fotografía de roca perteneciente Brecha Ígnea de CMET (BXICMET) de El Teniente.
(De los Santos, C. 2011).*

- **Dique de Cuarzo (DQZ):** Estructura geológica tabular formada por la infiltración de un fluido mineralizado cuyas condiciones de presión y temperatura al momento de cristalizar, favorecen la formación masiva del cuarzo. Puede variar en tamaño y color, además de que es resistente.

5.3 Matriz rocosa, discontinuidades y macizo rocoso

En base a Ferrer y de Vallejo (2007), la matriz rocosa es el material rocoso sólido sin discontinuidades, mientras que las discontinuidades son planos mecánicos o sedimentarios en el macizo rocoso que tienen una baja o nula resistencia a la tracción. El macizo rocoso se compone tanto de la matriz rocosa como de las discontinuidades. La presencia de discontinuidades confiere al macizo rocoso un carácter heterogéneo y un comportamiento no continuo, que está influenciado por la naturaleza, frecuencia y orientación de estos planos, afectando su comportamiento geomecánico e hidráulico.

Por otra parte, el macizo rocoso primario en El Teniente, se caracteriza por ser una roca competente, masiva y con escasas discontinuidades abiertas. Sin embargo, los procesos hidrotermales de alteración y mineralización, que dieron origen al yacimiento, generaron una alta frecuencia de vetillas selladas, polidireccionales, de pequeña escala, que se entrecruzan y dan origen al “*Stockwork*” (Figura 11) característico de El Teniente.



Figura 11: *Stockwork* (enrejado de vetillas polidireccionales) característicos de El Teniente (fuente: González. R. 2018).

5.4 Ensayos Geotécnicos

En el área de la geotecnia, es fundamental la realización de ensayos geotécnicos para la determinación de las propiedades físicas de un macizo rocoso, donde dentro de la variedad de los ensayos que existen, se recopilaron datos de tres tipos de ensayos pertenecientes al polígono de Nuevo Nivel Mina:

5.4.1 Ensayo de Compresión Uniaxial Simple (UCS)

Este ensayo, también conocido como ensayo de carga no confinada, es ampliamente practicado en laboratorios para determinar la resistencia a la compresión uniaxial simple (UCS) de muestras de roca. El UCS representa la carga máxima axial que puede soportar el espécimen de roca.

El ensayo se lleva a cabo aplicando gradualmente una carga axial no confinada, es decir, sin aplicar esfuerzos laterales, sobre una muestra de roca. Se utiliza maquinaria con un pistón hidráulico y dos placas metálicas para comprimir la roca hasta que se produce una ruptura, lo que permite determinar la resistencia a la compresión uniaxial. En este ensayo, la relación de esfuerzos es $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. (González de Vallejo et al, 2002).

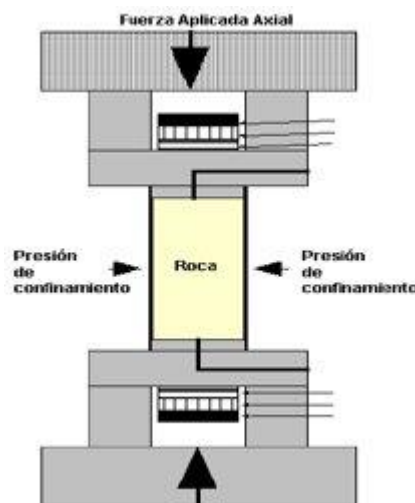


Figura 12: Esquema de Ensayo de Compresión Uniaxial Simple (UCS). (González de Vallejo et al, 2002).

Sus constantes elásticas corresponden al Módulo de Young (E) y al coeficiente de Poisson (ν). Para la medición de éstas se utiliza una estampilla (*Strain Gauge*) con el fin de medir la deformación mediante un arreglo eléctrico. Este arreglo está definido según el Puente

de Wheatstone (circuito eléctrico que se utiliza para medir resistencias desconocidas), obteniendo fácilmente las lecturas que luego son procesadas para obtener las deformaciones transversales y longitudinales en función de los intervalos de carga aplicada.



Figura 13: Strain Gauges ubicado en una probeta de ensayo (encerrado en rojo). (Fuente: Informe de Resultados Ensayos Geotécnicos Proyecto Sector Inicio Foot Print Fw, 2010).

Las muestras utilizadas en este ensayo son testigos obtenidos de sondeos de roca. Es importante seleccionar y cortar las probetas de roca con precaución para que representen de manera precisa la formación rocosa de la cual se extrajeron.

Según la norma propuesta por la ISRM (1979) para la realización de este ensayo, las muestras deben ser cilíndricas, con las caras pulidas, paralelas y sin grietas. La relación entre el largo y el diámetro de las muestras (L/D) debe estar en el rango de 2.5 a 3.0. Para obtener un valor confiable de la resistencia UCS, se recomienda realizar al menos 5 ensayos.

Después de ensayar la roca, se examina el modo de fractura y se evalúa la fiabilidad del ensayo. Los resultados obtenidos pueden ser representados en un gráfico (Figura 14) que muestra la relación entre la deformación (Strain) y el esfuerzo axial (Stress).

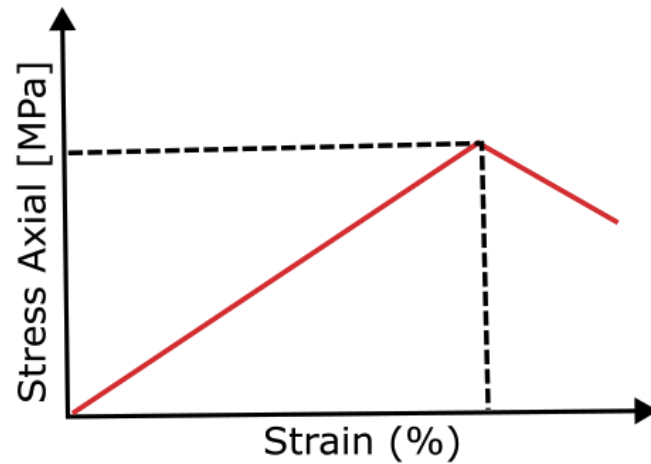


Figura 14: Stress Axial (Mpa) v/s Strain (%) (Modificado de González de Vallejo et al, 2002).

Finalmente, para calcular la resistencia a la compresión simple (σ_c) se emplea la siguiente ecuación (González de Vallejo et al, 2002):

$$\sigma_c = \frac{p}{\pi D^2/4} \quad (1),$$

donde “P” es la carga de ruptura de la muestra (N) y “D” es el diámetro de la probeta (cm).

5.4.2 Ensayo de Compresión Triaxial

El objetivo del ensayo es recrear las condiciones *in-situ* de la roca directamente en el lugar donde se encuentra utilizando esfuerzos confinantes. Esto se logra aplicando presión hidráulica uniforme alrededor de la muestra de roca. La relación entre los esfuerzos aplicados a la muestra es la siguiente: σ_1 es mayor que σ_2 , que es igual a σ_3 , y todos ellos son mayores que cero, es decir, $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ (De Los Santos, C. 2011).

Con el fin de recrear las condiciones confinantes, se utiliza una celda especial diseñada para contener la muestra de roca, en la cual se aplica presión utilizando un fluido. Esta presión de confinamiento, representada por σ_3 , es crucial ya que permite establecer una relación gráfica con la compresión axial aplicada, σ_1 , a través de la construcción de los Círculos de Mohr. Por lo tanto, se requiere llevar a cabo múltiples ensayos triaxiales con el objetivo de construir la envolvente de ruptura de la roca en el eje τ - σ (Figura 15).

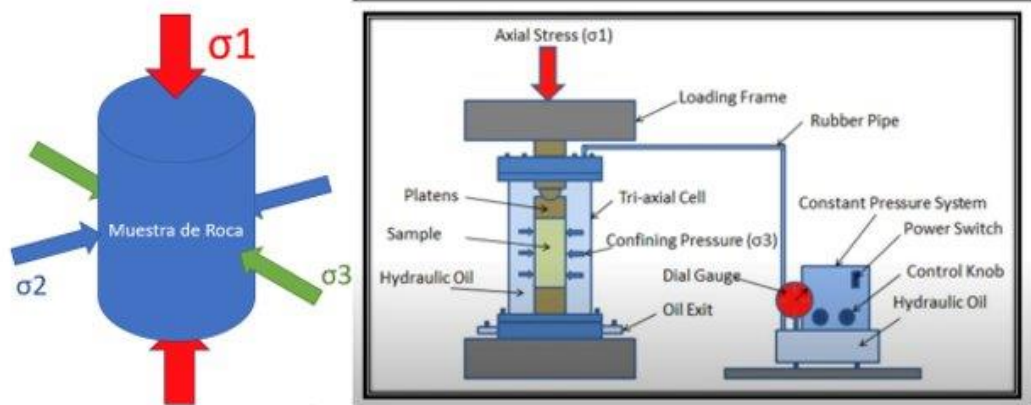


Figura 15: Esquema de ensayo de Compresión Triaxial. (González de Vallejo et al, 2002).

La envolvente no solo proporciona información sobre el comportamiento mecánico de la roca, sino que también nos permite calcular otros parámetros importantes, como la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ). En la imagen adjunta, se puede observar que la cohesión se determina a través del punto de intersección de la envolvente con el eje T, mientras que el ángulo de fricción se obtiene a partir de la pendiente de la recta que representa la envolvente de falla. Es relevante destacar que, la cohesión está condicionada por los agregados minerales presentes en el plano de ruptura (De los Santos, C. 2011).

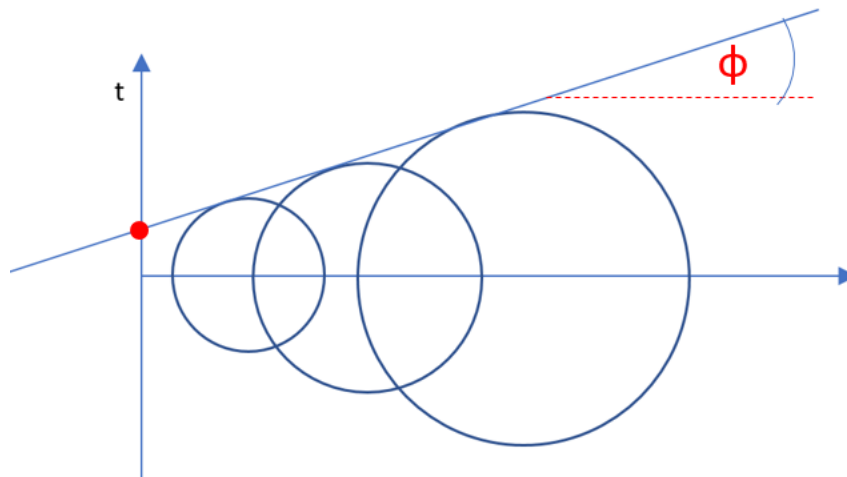


Figura 16: Envolvente de falla de Mohr. (Salas 2011).

Las muestras deben contar también con un estándar de dimensiones y relación de Largo y Ancho (L/D) de 2.0 a 2.5. Las caras deben encontrarse pulidas, sin irregularidades y los extremos deben ser paralelos y no presentar grietas (rectificación).

Para determinar la resistencia a la Compresión Triaxial de la roca, se emplea la siguiente ecuación (González de Vallejo et al, 2002):

$$Q_{ct} = \frac{Q}{A} \quad (2),$$

donde Q_{ct} es la resistencia a la carga triaxial ($\frac{Kg}{cm^3}$), “Q” es la carga máxima soportada por el testigo de roca y A es el área donde se aplica la carga (cm^2).

5.4.3 Ensayo de Tracción Indirecta

El ensayo de tracción indirecta, también conocido como ensayo Brasileño, consiste en aplicar una carga de compresión diametral a una probeta cilíndrica. La carga se aplica de manera uniforme a lo largo de una línea o generatriz de la probeta hasta que se produce la rotura. Este método experimental es ampliamente utilizado para medir la resistencia a la tracción del macizo rocoso debido a su simplicidad. Puede ser realizado tanto en probetas cilíndricas, ya sean moldeadas o testigos de hormigón endurecido, como en probetas cúbicas. Este ensayo tiene una resistencia TS medida en MPa. (Carmona 2009).

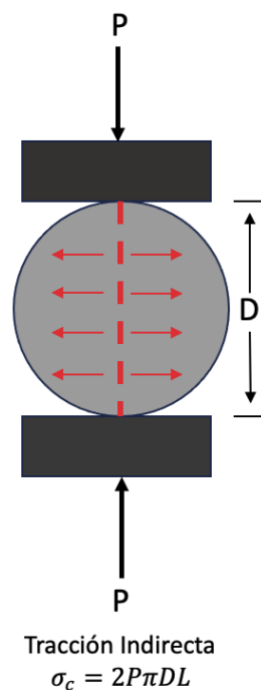


Figura 17: Ensayo de ensayo con Tracción Indirecta (Modificado de González de Vallejo et al, 2002).

5.4.4 Tipos de Rupturas

En el yacimiento El Teniente las rocas presentan distintos tipos y grados de alteración y mineralización, estando esta última alojada principalmente en el Stockwork. Por lo tanto, es de suma relevancia describir los tipos de ruptura (Figura 18) según Marambio et al, 2000:

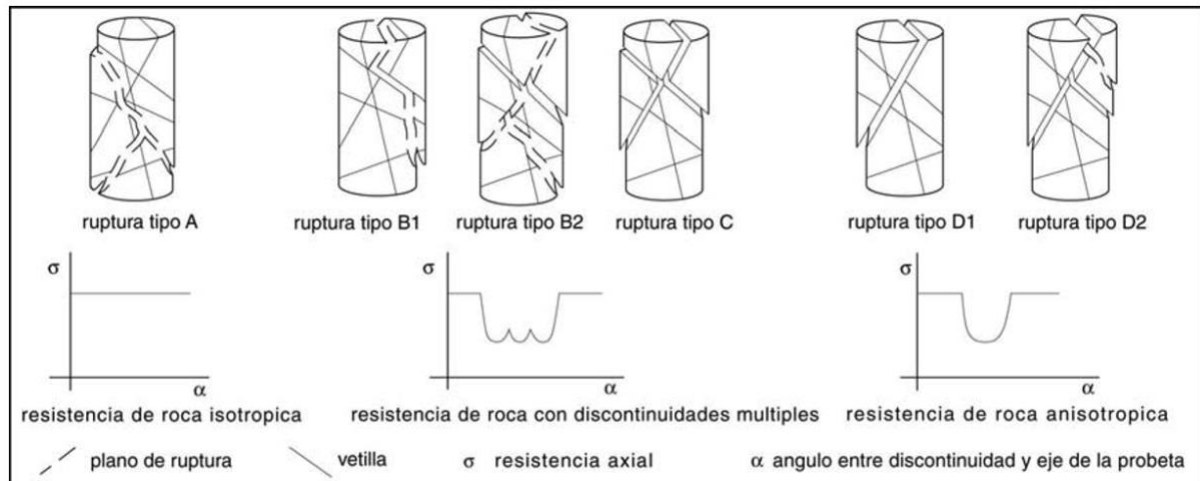


Figura 18: Tipos de ruptura en probetas con su curva típica de resistencia asociada (Marambio et al, 2000).

- **Tipo A: Ruptura por Roca (Matriz):** Ruptura de una o más superficies irregulares, que cruzan de manera indiferenciada tanto a la roca como a las vetillas, sin canalizarse por estas últimas. El resultado es una probeta fracturada en múltiples fragmentos.
- **Tipo B: Ruptura Mixta:** Se caracteriza por propagarse, simultáneamente, por roca y vetillas. Este tipo de ruptura puede dividirse en dos sub-tipos:
 - **B1: Superficie Única Mixta:** Este sub-tipo se caracteriza por presentar una sola superficie de ruptura, la cual se propaga en parte por roca y en parte por vetilla, generando dos trozos de roca.
 - **B2: Mixto Múltiple:** Este sub-tipo se caracteriza por presentar varias superficies de rupturas simultáneas, propagándose por roca y vetillas, rompiendo la probeta en varios fragmentos.
- **Tipo C: Ruptura por Varias Vetillas:** Describe una ruptura que se propagó, a lo menos, a través de dos vetillas simultáneamente, generando varios trozos de roca.
- **Tipo D: Ruptura por una Vetilla (Estructura):** En este caso la probeta falla por una sola vetilla preexistente, dividiendo la probeta en dos Trozos. Un caso particular que oculta

este tipo, presenta varios planos de ruptura, uno de ellos se propaga a través de una vetilla que cruza una de las bases de la probeta y los demás planos se ubican a un sólo lado de la vetilla fallada y se interrumpen contra ella. Este caso se ha considerado como ruptura por una sola vetilla, siendo los demás planos generados con posterioridad al peak de falla por los siguientes motivos:

- Al fallar la vetilla se genera el deslizamiento del trozo de probeta libre, provocando esfuerzos de tracción que fracturan el resto del testigo.
- Al deslizarse el trozo de roca, disminuye el área de apoyo de una de las bases de la probeta, generando un aumento puntual e instantáneo de la presión ejercida, que provoca un fracturamiento en el resto de la probeta, posterior al peak de falla.
- **Tipo E: Otros:** En este último tipo se agrupan todas las rupturas anómalas, causadas ya sea por defecto de probeta y/o probable defecto de ensayo. Ejemplos de este tipo corresponden a fracturamiento perpendicular al esfuerzo axial σ_1 .

6. Marco Metodológico

6.1 Tipos de ruptura válidas.

Para la regularización y tratamiento de datos se consideraron válidos los ensayos cuyas rupturas fueron del tipo A, B y C, según el estándar Teniente (Figura 19), aplicados para los ensayos de Compresión Uniaxial Simple (UCS), Compresión Triaxial y Tracción Indirecta (método brasileño). Esto es debido a que las probetas cuyas rupturas corresponden a los tipos A y B son representativas de la roca intacta y se consideran válidas para el cálculo de sus propiedades físicas. Por otra parte, los valores obtenidos en rupturas por varias vetillas, tipo C, representan la resistencia de la roca con *Stockwork* típica de El Teniente, por lo tanto, representativas de la roca intacta El Teniente.

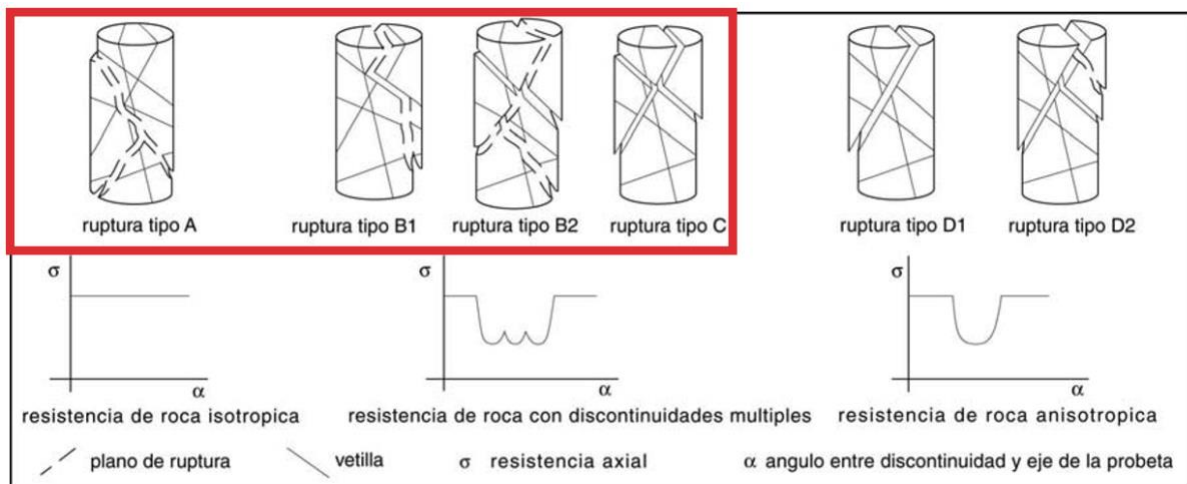


Figura 19: Tipo de ruptura de las probetas con su curva de resistencia asociada, donde se encierra en rojo las de tipo A, B y C, las cuales serán consideradas para el tratamiento de datos (Marambio et al, 2000).

Para que la validación del tipo de ruptura sea establecida, el profesional a cargo debe verificar que el tipo de ruptura declarada por el laboratorio ejecutor sea el correcto según el soporte de roca señalado, esto a partir de que el testigo de roca sea devuelto hacia el profesional o mediante fotografía (antes/después) y/o video 3D de la roca ensayada. A continuación, se muestran ejemplos de fotografías antes/después de testigos de roca que fueron validadas por el profesional a cargo con respecto al tipo de ruptura:

- Ruptura tipo A: Ruptura por roca (matriz)



Figura 20: Ejemplo de ruptura "Tipo A". Correspondiente a una brecha marginal clorita - probetas pre y postensayo. Generación de un plano de ruptura por roca (Capítulo 8, Propiedades del Macizo Rocoso. Codelco Chile - División El Teniente).

- Ruptura tipo B: Ruptura Mixta

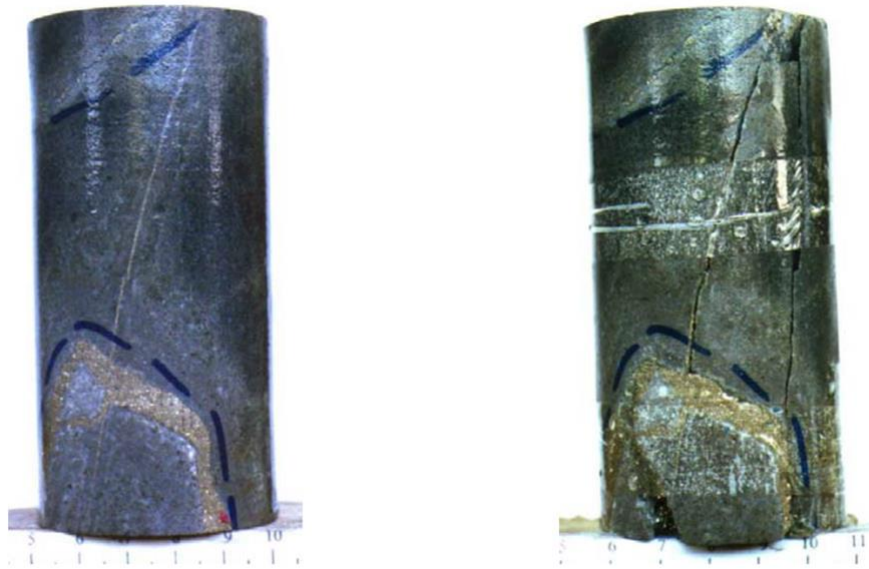


Figura 21: Ejemplo de ruptura “Tipo B”. Correspondiente a Andesita Tte. 4 Fortuna – probetas pre y postensayo. Generación de dos planos de ruptura: uno por venilla existente y otro por roca. (Capítulo 8, Propiedades del Macizo Rocos. Codelco Chile – División El Teniente).

- Ruptura tipo C: Ruptura por Varias Vetillas



Figura 22: Ejemplo de ruptura “Tipo C”. Correspondiente a Andesita Tte. 4 Fortuna – probetas pre y postensayo. Generación de dos planos de ruptura, ambos por venillas existente. (Capítulo 8, Propiedades del Macizo Rocos. Codelco Chile – División El Teniente).

6.2 Metodología de trabajo

Para la realización de este estudio se ha dividido el trabajo en diferentes etapas, las cuales se exponen a continuación:

1. Recopilación y revisión de bibliografía, junto con una regularización de datos geotécnicos históricos.
2. Incorporación de nuevos datos de ensayos geotécnicos al repositorio general histórico de la base de datos. Dentro de esta etapa también se realiza un primer filtro de información para cada litología analizada, donde se utilizó el programa Excel y el software libre *Rocdata v.5*.
3. Análisis estadísticos de los resultados obtenidos a partir de los parámetros geotécnicos.
4. Interpretación de resultados a partir del nuevo repositorio de datos.
5. Comparación y validación de resultados con referencias bibliográficas.

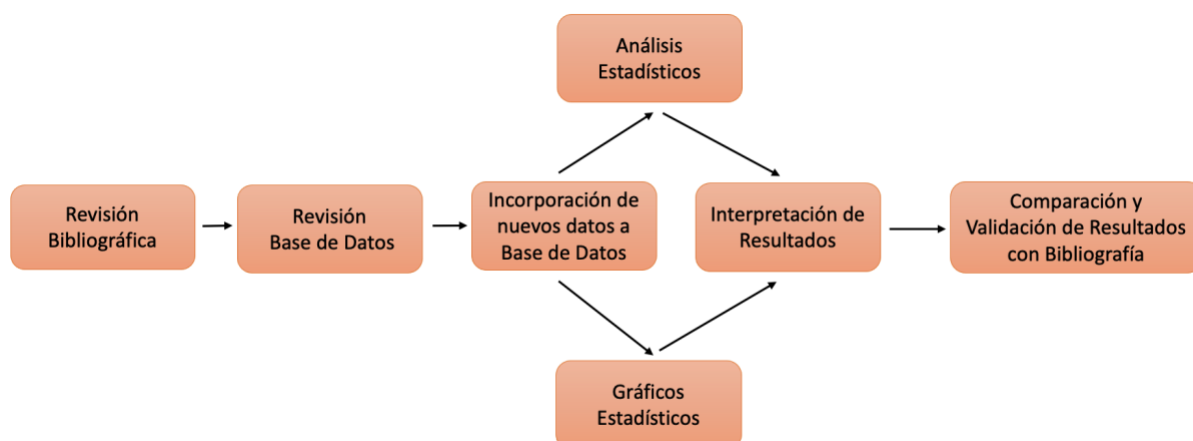


Figura 23: Diagrama de flujo a partir de la metodología de trabajo (Elaboración propia).

6.3 Regularización de Datos

En un principio, los datos de probetas ensayadas geotécnicamente en la Mina El Teniente eran de un total de 13187. Donde se seleccionaron las que tienen información relevante para el proyecto Nuevo Nivel Mina (NNM) (Anexo A).

Para la regularización de datos, se generaron dos hojas de cálculo, cuyo contenido se detalla a continuación:

Título columna: Descripción de información

- **Objetivo:** Roca primaria (Macizo rocoso no alterado).
- **Zonación geotécnica:** Primario.
- **Tipo de ensayo:** Ensayo de Compresión Uniaxial Simple (UCS), Ensayo de Compresión Triaxial y Ensayo de Tracción Indirecta (brasileño).
- **Coordenadas:** Ubicación Proyecto Andes Norte NNM 300 Este a 1600 Este, 350 Norte a 1650 Norte y cota (msnm) 1700 a 2100.
- **Litología:** Tipos litológicos División El Teniente, por ejemplo: Brecha de Anhidrita (BXANH); Complejo Máfico El Teniente (CMET) que se subdivide en CMET Hw (Cabeza) y CMET (Patilla); Brecha ígnea de CMET (BXICMET) que a su vez está dividida por Brecha Ígnea de CMET “Cabeza” (BXICMET Hw) y Brecha ígnea de CMET “Patilla” (BXICMET Fw); Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI); Brecha de Cuarzo (BXQZ); Dique de Cuarzo (DQQZ); Pórfido Dacítico (PDA); Pórfido Diorítico (PDI) y Pórfido Latítico (PLA).

Se agruparon los ensayos geotécnicos entre rupturas tipo A y B, mientras que un segundo grupo se conformó con los ensayos geotécnicos con rupturas tipo A, B y C. Esto para comprobar si existen mayores diferencias significativas al añadir un nuevo tipo de ruptura a la información analizada.

Es importante mencionar que al grupo de datos con el tipo de ruptura A y B, se le añadió información de los últimos informes traspasados en la recopilación y revisión bibliográfica, donde había un total de 877 datos, pero se consideraron los de tipo A y B, quedando un total de 647 nuevos datos agregados.

En resumen, ambas hojas de cálculo con datos regularizados quedaron de la siguiente manera:

Tabla 1: Cantidad de datos según el tipo de ruptura.

Ruptura	Cantidad de datos
A - B	1065
A - B - C	1189

6.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico básico se realizó a partir de los parámetros geotécnicos estipulados en “Propiedades Físicas de Roca Intacta Proyecto Andes Norte 2023” para ambas hojas de cálculo. Esto desarrollado por tipo de litología: Brecha de Anhidrita (BXANH); Complejo Máfico El Teniente (CMET) que se subdivide en CMET Hw (Cabeza) y CMET (Patilla); Brecha ígnea de CMET (BXICMET) que a su vez está dividida por Brecha Ígnea de CMET “Cabeza” (BXICMET Hw) y Brecha ígnea de CMET “Patilla” (BXICMET Fw); Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI); Brecha de Cuarzo (BXQZ); Dique de Cuarzo (DQQZ); Pórfido Dacítico (PDA); Pórfido Diorítico (PDI) y Pórfido Latítico (PLA), quedando de la siguiente manera:

Tabla 2: Parámetros geotécnicos.

LITOLOGÍA										
Parámetros geotécnicos	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	N° de datos
γ (gr/cm3)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
n (%)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
UCS (Mpa)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
TI (Mpa)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
E (Gpa)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
Vp (m/s)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
Vs (m/s)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
E/UCS	-	±	-	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	-	±	-							
mi				Parámetros del criterio de Hoeak - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)										
σti (Mpa)										
c (Mpa)				Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)										

Notas: γ : Densidad. η : Porosidad. UCS: Resistencia a la compresión simple. TI: Resistencia a la tracción. E: Módulo de Young. ν : Razón de Poisson. Vs: Velocidad de onda S. Vp: Velocidad de onda P. E/UCS: Razón deformación compresión. UCS/TI: Razón compresión tracción indirecta. m_i : constante de roca intacta. σ_{ci} : Resistencia a la compresión simple. σ_{ti} : Resistencia a la tracción. C: Cohesión. Φ : ángulo de fricción.

Como resultado del análisis estadístico básico, se obtuvo que en las litologías BXQZ, DQQZ, PDA y PLA no existían ensayos con tipo de ruptura C. Quedando las litologías BXANH, BXICMET (BXICMET Hw – BXICMET Fw), BXIPDI, CMET (CMET Hw – CMET Fw) y PDI con el tratamiento de datos realizados en la hoja de cálculo de ensayos con tipo de ruptura A, B y C.

El resumen de los datos analizados según su litología y tipo de ruptura es el siguiente:

Tabla 3 y 4: Resumen de litologías analizadas según tipo de ruptura.

Ruptura A - B	Litología	
	BXANH	
	BXICMET	BXICMET Hw
		BXICMET Fw
	BXIPDI	
	BXQZ	
	CMET	CMET Hw
		CMET Fw
	DQQZ	
	PDA	
	PDI	
	PLA	

Ruptura A - B - C	Litología	
	BXANH	
	BXICMET	BXICMET Hw
		BXICMET Fw
	BXIPDI	
	CMET	CMET Hw
		CMET Fw
	PDI	

6.4.1 Extracción de valores atípicos (*Outliers*).

Para trabajar en un conjunto de datos con mayor confiabilidad, se realizó la extracción de datos que se escapan de la tendencia general de la envolvente de fallamiento de los ensayos geotécnicos de cada litología en cada tipo de ruptura (A - B y A - B - C). Este trabajo se llevó a cabo mediante dos métodos que se detallarán a continuación:

- **Método rango intercuartílico (IQR):** Este método toma como referencia la diferencia entre el cuartil primero Q_1 y el tercer cuartil Q_3 . Esto se utiliza para construir diagramas de caja y bigote (*box plots*), que permiten visualizar la variabilidad de una variable y comparar distribuciones de la misma variable, además de identificar valores extremos. Para extraer valores atípicos del conjunto de datos, ya sean bajos o altos, se emplean las siguientes fórmulas:

Siendo Q_1 el primer cuartil y Q_3 el tercer cuartil, se tiene que *IQR* corresponde a la diferencia entre el tercer y primer cuartil ($Q_3 - Q_1$) (Ríos, I. & Quintana, C. 2020).

Valor atípico (*outlier*) más bajo:

$$Q_1 - (1.5 \times IQR) \quad (3)$$

Valor atípico (*outlier*) más alto:

$$Q_3 + (1.5 \times IQR) \quad (4)$$

- **Línea de Mogi (*Rocdata v.5*):** La línea de Mogi es una función automática del programa *Rocdata*, la cual define la relación de tensiones principales efectivas mayores y menores en las que hay una transición de falla frágil a dúctil. Esta línea se traza como una línea

verde en el gráfico de tensión principal. La línea de Mogi indica dos factores (Rocscience Inc. 2004):

- Si la envolvente de falla por tensión principal se encuentra por encima de la línea de Mogi, esto indica un modo de falla frágil.
- Si la envolvente de falla del esfuerzo principal se encuentra por debajo de la línea de Mogi, esto indica un modo de falla dúctil.

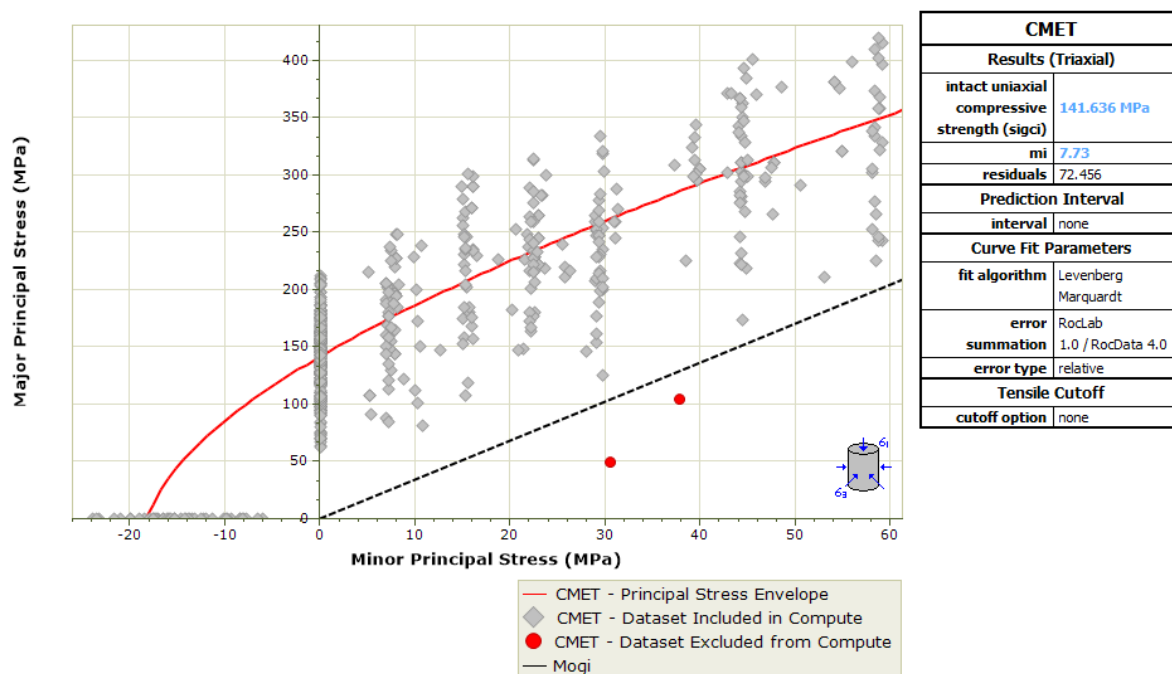


Figura 24: Ejemplo de valores atípicos (outliers) identificados por el programa Rocdata v.5 mediante la línea de Mogi, donde los outliers corresponden a los círculos de color rojo y la línea de Mogi a la recta de color negro, en un gráfico de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología CMET con ruptura A - B. (Realizado en programa Rocdata v.5).

6.5 Utilización de Programa Rocdata v.5

Rocdata es un programa que permite determinar parámetros geotécnicos según diversos criterios, tales como el Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, Barton-Bendis o curva de poder (power curve).

Para la ejecución del programa se utilizaron los datos de los tres tipos de ensayos geotécnicos (ensayo de compresión uniaxial simple (UCS), ensayo de compresión triaxial y tracción indirecta) por litología. Es de suma importancia destacar lo anterior, debido a que hay litologías que solo cuentan con un tipo de ensayo geotécnico aplicado, por lo tanto, no

7. Resultados y Análisis

7.1 Resultados de parámetros geotécnicos

De acuerdo con los resultados obtenidos anteriormente, una vez realizado el tratamiento de datos, se obtienen las siguientes tablas resúmenes de ensayos geotécnicos aplicados a litologías según el tipo de ruptura. También, se detallan los parámetros geotécnicos mencionados en la Tabla 2 para cada litología.

7.1.1 Ruptura A-B-C

De acuerdo con el estándar Teniente (GRMD-SGL-INF-0041-2018), para la obtención de propiedades físicas para ensayos con tipo de ruptura A - B - C, se tiene el siguiente recuento:

Tabla 7: Recuento de número de datos con respecto a litologías en ensayos geotécnicos aplicados a rupturas de tipo A, B y C.

A - B - C	Ensayo geotécnico (cantidad de probetas ensayadas)		
Litología	Compresión Uniaxial Simple (UCS)	Compresión Triaxial (TX)	Tracción Indirecta (TI)
BXANH	4	Sin ensayo	Sin ensayo
BXICMET	13	19	Sin ensayo
BXICMET Hw	2	Sin ensayo	Sin ensayo
BXICMET Fw	11	19	Sin ensayo
BXIPDI	28	53	4
CMET	336	325	58
CMET Hw	135	114	9
CMET Fw	80	76	48
PDI	26	50	Sin ensayo

En base a la norma propuesta por la ISRM (1979), para que se logre realizar de forma correcta un tratamiento de datos a partir de ensayos geotécnicos, primeramente, se debe considerar que en los ensayos de Compresión Uniaxial Simple (UCS) deben existir al menos 5 ensayos como mínimo para que se puedan considerar confiables los valores. En caso de que esto no llegase a ocurrir pueden ser descartados para el tratamiento de datos del Nuevo Nivel Mina. Esto ocurre con las litologías Brecha de Anhidrita (BXANH) que contiene 4 ensayos de UCS y Brecha Ígnea de CMET (BXICMET Hw) que contiene 2 ensayos de UCS, litologías que serán descartadas. No así con las litologías restantes: Brecha Ígnea de CMET (BXICMET), Brecha

Ígnea de CMET “Patilla” (BXC MET Fw), Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI), Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw), Complejo Máfico El Teniente “Patilla” (CMET Fw) y Pórfido Diorítico (PDI), que se detallarán sus respectivos parámetros geotécnicos a continuación:

Tabla 8: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Brecha Ígnea de CMET (BXICMET).

BIXCMET										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,77	±	0,02	2,74	2,81	2,77	2,77	2,75	0,02	12
n (%)	0,73	±	0,20	0,26	0,99	0,70	0,73	0,70	0,20	12
UCS (Mpa)	154,32	±	23,78	121,69	191,04	153,10	154,32	-	23,78	13
TI (Mpa)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
E (Gpa)	56,71	±	9,62	44,90	95,83	56,88	56,71	-	9,62	31
V	0,24	±	0,06	0,11	0,35	0,22	0,24	0,24	0,06	31
Vp (m/s)	4415,00	±	400,47	4155,00	5395,00	4578,91	4415,00	-	400,47	11
Vs (m/s)	2657,00	±	221,06	2416,00	3113,00	2685,47	2657,00	-	221,06	11
E/UCS	353,45	±	49,35	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	-	±	-							
mi	1			Parámetros del criterio de Hoeak - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)	152,2									
σti (Mpa)	-16,39									
c (Mpa)	9,45			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	15,34									

Tabla 9: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Brecha Ígnea de CMET (BXICMET Fw).

BXICMET Fw										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,77	±	0,02	2,74	2,81	2,77	2,77	2,75	0,02	11
n (%)	0,75	±	0,21	0,26	0,99	0,71	0,75	0,99	0,21	11
UCS (Mpa)	154,32	±	23,15	129,20	191,04	154,65	154,32	-	23,15	11
TI (Mpa)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
E (Gpa)	57,77	±	9,43	44,90	95,83	57,72	57,77	-	9,43	29
V	57,77	±	9,43	0,14	95,83	57,72	57,77	-	9,43	29
Vp (m/s)	4486,00	±	417,40	4155,00	5395,00	4595,75	4486,00	-	417,40	10
Vs (m/s)	2630,50	±	232,20	2416,00	3113,00	2679,16	2630,50	-	232,20	10
E/UCS	353,45	±	46,22	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	-	±	-							
mi	1			Parámetros del criterio de Hoeak - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)	152,58									
σti (Mpa)	-16,43									
c (Mpa)	9,48			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	15.34									

Tabla 10: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI).

BXIPDI										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,72	±	0,09	2,56	3,00	2,71	2,72	2,64	0,09	27
n (%)	1,18	±	0,81	0,50	4,20	1,22	1,18	1,00	0,81	17
UCS (Mpa)	135,64	±	36,29	77,48	191,95	126,97	135,64	-	36,29	28
TI (Mpa)	9,55	±	4,86	5,36	17,00	9,54	9,55	-	4,86	4
E (Gpa)	50,20	±	9,19	18,77	57,48	45,66	50,20	50,20	9,19	28
V	0,24	±	0,06	0,10	0,28	0,21	0,24	0,28	0,06	28
Vp (m/s)	4531,00	±	-	4531,00	4531,00	4531,00	4531,00	-	-	1
Vs (m/s)	2817,00	±	-	2817,00	2817,00	2817,00	2817,00	-	-	1
E/UCS	344,25	±	96,41	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	9,25	±	3,23							
mi	10,58			Parámetros del criterio de Hoek - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)	142,64									
σti (Mpa)	-3,14									
c (Mpa)	12,84			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	38,67									

Tabla 11: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Complejo Máfico El Teniente (CMET).

CMET										
Parámetros geotécnicos	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	N° de datos
γ (gr/cm3)	2,80	±	0,06	2,60	3,08	2,80	2,80	2,79	0,06	162
n (%)	0,60	±	0,47	0,10	3,31	0,58	0,60	0,70	0,47	152
UCS (Mpa)	140,20	±	34,88	7,12	289,00	132,47	140,20	145,28	34,88	343
TI (Mpa)	14,24	±	5,23	4,62	28,72	13,48	14,24	-	5,23	59
E (Gpa)	51,01	±	9,77	25,07	82,19	50,23	51,01	57,00	9,77	167
V	0,16	±	0,06	0,05	0,34	0,16	0,16	0,12	0,06	166
Vp (m/s)	4734,00	±	609,35	3400,00	6228,00	4703,93	4734,00	5499,00	609,35	323
Vs (m/s)	2899,50	±	298,21	2087,00	4165,00	2901,57	2899,50	2901,00	298,21	324
E/UCS	350,79	±	96,61	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	8,16	±	6,50							
mi	7,93			Parámetros del criterio de Hoek - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)	141,76									
σti (Mpa)	-1,93									
c (Mpa)	9,24			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	32,80									

Tabla 12: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Complejo Máfico El Teniente "Cabeza" (CMET Hw).

CMET Hw										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,79	±	0,06	2,60	3,01	2,78	2,79	2,79	0,06	91
n (%)	0,70	±	0,47	0,10	3,31	0,70	0,70	0,60	0,47	80
UCS (Mpa)	145,33	±	32,66	7,12	217,64	137,44	145,33	145,28	32,66	141
TI (Mpa)	11,28	±	4,18	4,62	16,72	9,79	11,28	-	4,18	9
E (Gpa)	50,00	±	10,08	25,07	82,19	48,77	50,00	43,00	10,08	115
V	0,16	±	0,06	0,05	0,29	0,16	0,16	0,12	0,06	114
Vp (m/s)	4491,15	±	524,00	3426,41	5842,21	4490,24	4491,15	4578,00	524,00	63
Vs (m/s)	2775,18	±	254,73	2167,00	3320,48	2755,69	2775,18	-	254,73	64
E/UCS	334,81	±	90,99	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	12,33	±	11,61							
mi	8,35			Parámetros del criterio de Hoek - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)	149,08									
σti (Mpa)	-1,92									
c (Mpa)	9,8			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	33,26									

Tabla 13: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Complejo Máfico El Teniente "Patilla" (CMET Fw).

CMET Fw										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,83	±	0,06	2,70	3,08	2,83	2,83	2,79	0,06	71
n (%)	0,38	±	0,45	0,16	2,43	0,47	0,38	0,70	0,45	72
UCS (Mpa)	126,85	±	28,71	63,89	181,32	121,66	126,85	-	28,71	80
TI (Mpa)	15,28	±	5,13	6,01	28,72	14,27	15,28	-	5,13	50
E (Gpa)	55,00	±	8,34	32,40	71,16	53,61	55,00	57,00	8,34	52
V	0,16	±	0,08	0,07	0,34	0,17	0,16	0,14	0,08	52
Vp (m/s)	5437,71	±	403,10	4641,24	6212,14	5374,46	5437,71	5768,30	403,10	65
Vs (m/s)	3176,72	±	320,06	2087,00	4165,00	3192,79	3176,72	3330,15	320,06	65
E/UCS	395,76	±	84,46	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	7,64	±	3,91							
mi	9			Parámetros del criterio de Hoek - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)	131,39									
σti (Mpa)	-1,57									
c (Mpa)	8,74			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	33.93									

Tabla 14: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B-C realizados en la litología Pórfido Diorítico (PDI).

PDI										
Parámetros geotécnicos	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Nº de datos
γ (gr/cm3)	2,64	±	0,04	2,53	2,74	2,63	2,64	2,64	0,04	26
n (%)	1,82	±	0,99	0,50	5,30	1,73	1,82	1,40	0,99	26
UCS (Mpa)	146,59	±	41,83	60,99	243,81	141,54	146,59	-	41,83	26
TI (Mpa)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
E (Gpa)	48,10	±	8,03	29,11	62,00	47,22	48,10	54,90	8,03	25
V	0,17	±	0,07	0,06	0,28	0,16	0,17	0,13	0,07	25
Vp (m/s)	4576	±	-	4576	4576	4576	4576	-	-	1
Vs (m/s)	2554	±	-	2554	2554	2554	2554	-	-	1
E/UCS	335,31	±	87,44	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	-	±	-							
mi	14,2			Parámetros del criterio de Hoeak - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)	164,11									
σti (Mpa)	-2,69									
c (Mpa)	15,18			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	41,37									

7.1.2 Ruptura A-B

De acuerdo con el estándar Teniente (GRMD-SGL-INF-0041-2018), para la obtención de propiedades físicas para ensayos con tipo de ruptura A - B, se tiene el siguiente recuento:

Tabla 15: Recuento de número de datos con respecto a litologías en ensayos geotécnicos aplicados a rupturas de tipo A y B.

A - B	Ensayo geotécnico (cantidad de probetas ensayadas)		
	Compresión Uniaxial Simple (UCS)	Compresión Triaxial (TX)	Tracción Indirecta (TI)
BXANH	3	Sin ensayo	Sin ensayo
BXICMET	12	12	Sin ensayo
BXICMET Hw	2	Sin ensayo	Sin ensayo
BXICMET Fw	10	12	Sin ensayo
BXIPDI	27	29	4
BXQZ	4	4	Sin ensayo
CMET	303	271	47
CMET Hw	116	81	3
CMET Fw	68	55	44
DQQZ	5	Sin ensayo	1
PDA	82	96	53
PDI	24	47	Sin ensayo
PLA	4	Sin ensayo	Sin ensayo

De la misma manera que en el apartado anterior (7.1.1), de acuerdo con lo mencionado según la norma propuesta por el ISRM (1979), con respecto a los ensayos de Compresión Uniaxial Simple (UCS), se descartan para el tratamiento de datos las litologías: Brecha de Anhidrita (BXANH) la cual contiene 3 ensayos de UCS; Brecha Ígnea de CMET “Cabeza” (BXICMET Hw) que contiene 2 ensayos de UCS; Brecha de Cuarzo (BXQZ) que contiene 4 ensayos de UCS; Dique de Cuarzo (DQQZ) que contiene 5 ensayos de UCS y Pórfido Latítico (PLA) que contiene 4 ensayos de UCS. Por otra parte, el tratamiento de datos y de parámetros geotécnicos se realiza para las litologías restantes que cumplen con las normas (ISRM, 1979): Brecha de CMET (BXICMET), Brecha Ígnea de CMET “Patilla” (BXICMET Fw), Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI), Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw), Complejo Máfico El Teniente “Patilla” (CMET Fw), Pórfido Dacítico (PDA) y Pórfido Diorítico (PDI), las cuales se detallarán sus respectivos parámetros geotécnicos a continuación:

Tabla 16: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Brecha Ígnea de CMET (BXICMET).

BXICMET										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,77	±	0,02	2,74	2,81	2,77	2,77	2,76	0,02	11
n (%)	0,75	±	0,13	0,58	0,99	0,77	0,75	0,70	0,13	11
UCS (Mpa)	156,31	±	23,50	121,69	191,04	155,28	156,31	-	23,50	12
TI (Mpa)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
E (Gpa)	56,71	±	6,97	44,90	67,86	56,12	56,71	-	6,97	25
V	0,24	±	0,06	0,11	0,33	0,22	0,24	0,24	0,06	25
Vp (m/s)	4415,00	±	400,47	4155,00	5395,00	4578,91	4415,00	-	400,47	11
Vs (m/s)	2657,00	±	221,06	2416,00	3113,00	2685,47	2657,00	-	221,06	11
E/UCS	353,45	±	49,35	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	-	±	-							
mi	1			Parámetros del criterio de Hoek - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)	154,48									
σti (Mpa)	-16,64									
c (Mpa)	9,6			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	15,34									

Tabla 17: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Brecha Ígnea de CMET "Patilla" (BXICMET Fw).

BXICMET Fw										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,77	±	0,02	2,74	2,81	2,77	2,77	2,78	0,02	10
n (%)	0,77	±	0,14	0,58	0,99	0,78	0,77	0,99	0,14	10
UCS (Mpa)	156,31	±	22,50	130,88	191,04	157,45	156,31	-	22,50	10
TI (Mpa)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
E (Gpa)	58,46	±	6,48	44,90	67,86	57,09	58,46	-	6,48	23
V	0,24	±	0,05	0,14	0,33	0,23	0,24	0,24	0,05	23
Vp (m/s)	4486,00	±	417,40	4155,00	5395,00	4595,75	4486,00	-	417,40	10
Vs (m/s)	2630,50	±	232,20	2416,00	3113,00	2679,16	2630,50	-	232,20	10
E/UCS	353,45	±	46,22	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	-	±	-							
mi	1			Parámetros del criterio de Hoek - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)	155,3									
σti (Mpa)	-16,72									
c (Mpa)	9,65			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	15.34									

Tabla 18: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI).

BXIPDI										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,71	±	0,09	2,56	3,00	2,70	2,71	2,64	0,09	26
n (%)	1,18	±	0,81	0,50	4,20	1,22	1,18	1,00	0,81	17
UCS (Mpa)	133,62	±	36,91	77,48	191,95	126,39	133,62	-	36,91	27
TI (Mpa)	9,55	±	4,86	5,36	17,00	9,54	9,55	-	4,86	4
E (Gpa)	50,20	±	9,34	18,77	57,48	45,50	50,20	50,20	9,34	27
V	0,24	±	0,07	0,10	0,28	0,20	0,24	0,28	0,07	27
Vp (m/s)	4531,00	±	-	4531,00	4531,00	4531,00	4531,00	-	-	1
Vs (m/s)	2817,00	±	-	2817,00	2817,00	2817,00	2817,00	-	-	1
E/UCS	339,19	±	98,15	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	9,25	±	3,90							
mi	12,18			Parámetros del criterio de Hoek - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)	144,99									
σti (Mpa)	-2,77									
c (Mpa)	13,21			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	39,97									

Tabla 19: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Complejo Máfico El Teniente (CMET).

CMET										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,80	±	0,06	2,60	3,08	2,80	2,80	2,79	0,06	136
n (%)	0,60	±	0,48	0,10	3,31	0,57	0,60	0,60	0,48	133
UCS (Mpa)	142,24	±	34,75	7,12	289,00	132,70	142,24	145,28	34,75	312
TI (Mpa)	15,30	±	5,16	6,01	28,72	14,34	15,30	-	5,16	49
E (Gpa)	50,67	±	9,76	25,07	82,19	49,75	50,67	57,00	9,76	143
V	0,15	±	0,06	0,05	0,34	0,16	0,15	0,12	0,06	142
Vp (m/s)	4718,81	±	600,09	3400,00	6228,00	4680,07	4718,81	5499,00	600,09	313
Vs (m/s)	2892,93	±	277,47	2087,00	4130,00	2885,54	2892,93	2901,00	277,47	314
E/UCS	349,00	±	93,56	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	7,96	±	4,18							
mi	7,73			Parámetros del criterio de Hoek - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σ_{ci} (Mpa)	141,64									
σ_{ti} (Mpa)	-1,97									
c (Mpa)	9,19			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	35,57									

Tabla 20: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Complejo Máfico El Teniente "Cabeza" (CMET Hw).

CMET Hw										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,78	±	0,06	2,60	3,01	2,77	2,78	2,79	0,06	73
n (%)	0,70	±	0,49	0,10	3,31	0,71	0,70	0,60	0,49	69
UCS (Mpa)	145,28	±	33,16	7,12	217,64	135,31	145,28	145,28	33,16	122
TI (Mpa)	11,28	±	3,06	8,12	14,24	10,92	11,28	-	3,06	3
E (Gpa)	49,33	±	10,15	25,07	82,19	48,37	49,33	43,00	10,15	97
V	0,15	±	0,05	0,05	0,29	0,15	0,15	0,12	0,05	96
Vp (m/s)	4474,67	±	508,92	3426,41	5842,21	4474,04	4474,67	4578,00	508,92	62
Vs (m/s)	2771,36	±	247,41	2167,00	3320,48	2747,76	2771,36	-	247,41	63
E/UCS	335,72	±	96,21	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	13,79	±	3,15							
mi	8,65			Parámetros del criterio de Hoek - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)	148,54									
σti (Mpa)	-1,85									
c (Mpa)	9,82			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
φ (°)	33,57									

Tabla 21: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Complejo Máfico El Teniente "Patilla" (CMET Fw).

CMET Fw										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,83	±	0,06	2,70	3,08	2,83	2,83	2,78	0,06	63
n (%)	0,38	±	0,44	0,16	2,43	0,45	0,38	0,70	0,44	64
UCS (Mpa)	128,19	±	27,42	68,66	181,32	125,53	128,19	-	27,42	68
TI (Mpa)	15,74	±	5,18	6,01	28,72	14,60	15,74	-	5,18	46
E (Gpa)	54,20	±	8,35	32,40	71,16	52,79	54,20	57,00	8,35	46
V	0,16	±	0,08	0,07	0,34	0,16	0,16	0,14	0,08	46
Vp (m/s)	5411,33	±	411,96	4641,24	6212,14	5353,89	5411,33	5768,30	411,96	56
Vs (m/s)	3115,29	±	280,22	2087,00	4130,00	3150,37	3115,29	3330,15	280,22	56
E/UCS	390,08	±	80,18	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	7,92	±	4,15							
mi	8,4			Parámetros del criterio de Hoek - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σ_{ci} (Mpa)	132,06									
σ_{ti} (Mpa)	-1,69									
c (Mpa)	8,69			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	33,31									

Tabla 22: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Pórfido Dacítico (PDA).

PDA										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,60	±	0,03	2,44	2,70	2,60	2,60	2,61	0,03	67
n (%)	1,40	±	1,06	0,82	6,44	1,60	1,40	1,10	1,06	67
UCS (Mpa)	143,23	±	48,14	43,81	239,92	140,17	143,23	-	48,14	82
TI (Mpa)	8,13	±	2,31	2,98	12,13	7,68	8,13	-	2,31	53
E (Gpa)	45,30	±	7,78	22,36	53,30	43,93	45,30	44,90	7,78	16
V	0,33	±	0,11	0,10	0,40	0,25	0,33	0,11	0,11	16
Vp (m/s)	3924,04	±	454,45	3442,84	4992,00	4021,94	3924,04	-	454,45	32
Vs (m/s)	2127,77	±	285,40	1956,55	2847,00	2237,69	2127,77	-	285,40	32
E/UCS	297,22	±	58,29	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	18,60	±	9,81							
mi	22,57			Parámetros del criterio de Hoek - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σci (Mpa)	167,9									
σti (Mpa)	-2,24									
c (Mpa)	17,93			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	46.59									

Tabla 23: Parámetros geotécnicos de ensayos con tipo de ruptura A-B realizados en la litología Pórfido Diorítico (PDI).

PDI										
Parámetros	Valor estimado			Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación	N° de datos
geotécnicos									estándar	
γ (gr/cm3)	2,64	±	0,05	2,53	2,74	2,63	2,64	2,66	0,05	24
n (%)	1,87	±	1,01	0,50	5,30	1,77	1,87	1,40	1,01	24
UCS (Mpa)	146,59	±	42,34	60,99	243,81	141,33	146,59	-	42,34	24
TI (Mpa)	-	±	-	-	-	-	-	-	-	-
E (Gpa)	48,05	±	8,28	29,11	62,00	46,82	48,05	54,90	8,28	23
V	0,17	±	0,08	0,06	0,28	0,16	0,17	0,13	0,08	23
Vp (m/s)	4576,00	±	-	4576,00	4576,00	4576,00	4576,00	-	-	1
Vs (m/s)	2554,00	±	-	2554,00	2554,00	2554,00	2554,00	-	-	1
E/UCS	335,31	±	86,06	Calculados sobre la base de los valores estimados						
UCS/TI	-	±	-							
mi	13,15			Parámetros del criterio de Hoeak - Brown (sobre ensayos Triaxiales)						
σ_{ci} (Mpa)	168,79									
σ_{ti} (Mpa)	-2,99									
c (Mpa)	15,49			Parámetros del criterio de Mohr - Coulomb (sobre ensayos Triaxiales)						
Φ (°)	40,67									

7.2 Resultados obtenidos en programa Rocdata v.5

A continuación, se detalla el resultado de la resistencia a la Compresión Uniaxial de la roca intacta (σ_{ci}) (valor entregado por el programa Rocdata v.5) y el valor de UCS (valor obtenido a partir del análisis estadístico de cada litología) para aquellas rupturas de tipo A (por matriz rocosa), B (mixta: matriz y estructura) y C (varias vetillas), y para las rupturas de tipo A (por matriz rocosa) y B (mixta: matriz y estructura) para las litologías válidas en el polígono de análisis de “Propiedades Físicas de Roca Intacta Proyecto Andes Norte 2023”:

Tabla 24: Resistencia a la Compresión Uniaxial de la roca intacta (σ_{ci}) y valor de UCS, para rupturas de tipo A (por matriz rocosa), B (mixta: matriz y estructura) y C (varias vetillas). (Realizado en el programa Rocdata v.5).

A - B - C	Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta			
Litología	UCS (MPa)	N° Datos	σ_{ci} (MPa)	N° Datos
BXICMET	154,32	13	152,2	32
BXICMET Fw	154,32	11	152,58	30
BXIPDI	135,64	28	142,64	85
CMET	140,2	343	141,76	719
CMET Hw	145,33	141	149,08	258
CMET Fw	126,85	80	131,39	204
PDI	146,59	26	164,11	76

Tabla 25: Resistencia a la Compresión Uniaxial de la roca intacta (σ_{ci}) y valor de UCS, para rupturas de tipo A (por matriz rocosa) y B (mixta: matriz y estructura). (Realizado en el programa Rocdata v.5).

A - B	Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta			
Litología	UCS (MPa)	N° Datos	σ_{ci} (Mpa)	N° Datos
BXICMET	156,31	12	154,48	24
BXICMET Fw	156,31	10	155,3	22
BXIPDI	133,62	27	144,99	60
CMET	142,24	312	141,64	621
CMET Hw	145,28	122	148,54	200
CMET Fw	128,19	68	132,06	167
PDA	143,23	82	167,9	231
PDI	146,59	24	168,79	71

Se aprecia que la cantidad de datos de las litologías con tipo de ruptura A - B - C, son mayores que las con tipo de ruptura A - B. Por otra parte, existe una disminución en los valores de resistencia a la Compresión Uniaxial de la roca intacta (σ_{ci}) de ruptura A - B de las de ruptura A - B - C, como es el caso de las litologías tipo Brecha Ígnea de CMET (BXICMET) donde σ_{ci} pasa de 154.5 MPa (ruptura A - B) a 152 MPa (ruptura A - B - C); la litología tipo Brecha Ígnea de CMET "Patilla" (BXICMET Fw) donde σ_{ci} pasa de 155 MPa (ruptura A - B) a 152.6 MPa (ruptura A - B - C); la litología tipo Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI) donde σ_{ci} pasa de 145 MPa (ruptura A - B) a 142.6 MPa (ruptura A - B - C); la litología tipo Complejo Máfico El Teniente "Patilla" (CMET Fw) donde σ_{ci} pasa de 132 MPa (ruptura A - B) a 131 MPa (ruptura A - B - C); y finalmente la litología tipo de Pórfido Diorítico (PDI) donde σ_{ci} pasa de 169 MPa (ruptura A - B) a 164 MPa (ruptura A - B - C). A diferencia de dos litologías, donde sucede el caso contrario, es decir, el valor σ_{ci} de las rupturas A - B - C es ligeramente mayor

que el de las rupturas A – B, como es el caso de la litología tipo Complejo Máfico El Teniente (CMET) donde σ_{ci} pasa de 141.8 MPa (ruptura A – B – C) a 141.6 MPa (ruptura A – B); y con la litología tipo Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw) donde σ_{ci} pasa de 149 MPa (ruptura A – B – C) a 148.5 MPa (ruptura A – B). Esto es debido a que no se tiene la claridad si de parte del laboratorio de muestras se sabe reconocer realmente un testigo de roca con ruptura tipo C, provocando así, que el aumento del valor de σ_{ci} sea ligeramente mayor en rupturas de tipo A – B – C con respecto a las rupturas A – B.

7.3 Resumen de resultados de parámetros geotécnicos.

Para los ensayos geotécnicos de ruptura A – B – C, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 26: Propiedades geotécnicas roca intacta para litologías Brecha Ígnea de CMET (BXICMET), Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI), Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw), Complejo Máfico El Teniente (CMET Fw) y Pórfido Diorítico (PDI) de ensayos con tipo de ruptura A – B – C.

Parámetros geotécnicos	BXICMET			N°	BXIPDI			N°	CMET			N°	CMET Hw			N°	CMET Fw			N°	PDI			N°
γ (gr/cm ³)	2,77	±	0,02	12	2,72	±	0,09	27	2,80	±	0,06	162	2,79	±	0,06	91	2,83	±	0,06	71	2,64	±	0,04	26
n (%)	0,73	±	0,20	12	1,18	±	0,81	17	0,60	±	0,47	152	0,70	±	0,47	80	0,38	±	0,45	72	1,82	±	0,99	26
UCS (Mpa)	154,32	±	23,78	13	135,64	±	36,29	28	140,20	±	34,88	343	145,33	±	32,66	141	126,85	±	28,71	80	146,59	±	41,83	26
TI (Mpa)	-	±	-	-	9,55	±	4,86	4	14,24	±	5,23	59	11,28	±	4,18	9	15,28	±	5,13	50	-	±	-	-
E (Gpa)	56,71	±	9,62	31	50,20	±	9,19	28	51,01	±	9,77	167	50,00	±	10,08	115	55,00	±	8,34	52	48,10	±	8,03	25
v	0,24	±	0,06	31	0,24	±	0,06	28	0,16	±	0,06	166	0,16	±	0,06	114	0,16	±	0,08	52	0,17	±	0,07	25
Vp (m/s)	4415	±	400,47	11	4531	±	-	1	4734	±	609,35	323	4491	±	524,00	63	5438	±	403,10	65	4576	±	-	1
Vs (m/s)	2657	±	221,06	11	2817	±	-	1	2900	±	298,21	324	2775	±	254,73	64	3177	±	320,06	65	2554	±	-	1
E/UCS	353,45	±	49,35	-	344,25	±	96,41	-	350,79	±	96,61	-	334,81	±	90,99	-	395,76	±	84,46	-	335,31	±	87,44	-
UCS/TI	-	±	-	-	9,25	±	3,23	-	8,16	±	6,50	-	12,33	±	11,61	-	7,64	±	3,91	-	-	±	-	-
mi	1			32	10,58			85	7,93			719	8,35			258	9			204	14,2			76
σ_{ci} (Mpa)	152,2			32	142,64			85	141,76			719	149,08			258	131,39			204	164,11			76
σ_{ti} (Mpa)	-16,39			32	-3,14			85	-1,93			719	-1,92			258	-1,57			204	-2,69			76
c (Mpa)	9,45			32	12,84			85	9,24			719	9,8			258	8,74			204	15,18			76
Φ (°)	15,34			32	38,67			85	32,8			719	33,26			258	33,93			204	41,37			76

Notas: γ : Densidad. η : Porosidad. UCS: Resistencia a la compresión simple. TI: Resistencia a la tracción. E: Módulo de Young. v: Razón de Poisson. Vs: Velocidad de onda S. Vp: Velocidad de onda P. E/UCS: Razón deformación compresión. UCS/TI: Razón compresión tracción indirecta. *mi*: constante de roca intacta. σ_{ci} : Resistencia a la compresión simple. σ_{ti} : Resistencia a la tracción. C: Cohesión. ϕ : ángulo de fricción.

La tabla 26 muestra la compilación de los parámetros geotécnicos, los que se calcularon considerando tipo de ruptura A (por matriz rocosa), B (mixta: matriz y estructura) y C (varias vetillas).

También, se nota que la resistencia a la Compresión Uniaxial Simple (UCS) corresponde a 154 MPa para la litología tipo Brecha Ígnea de CMET (BXICMET); 135 MPa para la Brecha

Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI); valores de 140 MPa, 145 MPa y 127 MPa para las litologías del Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” y “Patilla” (CMET Hw y CMET Fw), respectivamente y para el Pórfido Diorítico (PDI) arroja valores UCS de 147 MPa. Mientras que según criterio Hoek & Brown, a escala de roca intacta, la resistencia a la compresión simple (σ_{ci}) de la litología tipo Brecha Ígnea de CMET (BXICMET) corresponde a 152 MPa; para la Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI) arroja valores de 143 MPa; para las litologías del Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” y “Patilla” (CMET Hw y CMET Fw), corresponden valores de 142 MPa, 149 MPa y 131 MPa respectivamente, mientras que el Pórfido Diorítico (PDI) es de 164 MPa, donde es importante considerar que las cantidades de muestras para cada zona geotécnica dentro del volumen analizado son diferentes e influye en su variabilidad. En parámetros de elasticidad, el Módulo de Young en la litología tipo Brecha Ígnea de CMET (BXICMET) es de 57 MPa; para Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI) es de 50 MPa; para el Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” y “Patilla” (CMET Hw y CMET Fw) corresponden valores de 51 MPa, 50 MPa y 55 MPa, respectivamente y para Pórfido Diorítico (PDI) es de 48 MPa.

Para los ensayos geotécnicos de ruptura A – B , se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 27: Propiedades geotécnicas roca intacta para litologías Brecha Ígnea de CMET (BXICMET), Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI), Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw), Complejo Máfico El Teniente (CMET Fw), Pórfido Dacítico (PDA) y Pórfido Diorítico (PDI) de ensayos con tipo de ruptura A – B.

Parámetros geotécnicos	BXICMET			N°	BXIPDI			N°	CMET			N°	CMET Hw			N°	CMET Fw			N°	PDA			N°	PDI			N°
γ (gr/cm ³)	2,77	±	0,02	11	2,71	±	0,09	26	2,80	±	0,06	136	2,78	±	0,06	73	2,83	±	0,06	63	2,60	±	0,03	67	2,64	±	0,05	24
n (%)	0,75	±	0,13	11	1,18	±	0,81	17	0,60	±	0,48	133	0,70	±	0,49	69	0,38	±	0,44	64	1,40	±	1,06	67	1,87	±	1,01	24
UCS (Mpa)	156,31	±	23,50	12	133,62	±	36,91	27	142,24	±	34,75	312	145,28	±	33,16	122	128,19	±	27,42	68	143,23	±	48,14	82	146,59	±	42,34	24
TI (Mpa)	-	±	-	-	9,55	±	4,86	4	15,30	±	5,16	49	11,28	±	3,06	3	15,74	±	5,18	46	8,13	±	2,31	53	-	±	-	-
E (Gpa)	56,71	±	6,97	25	50,20	±	9,34	27	50,67	±	9,76	143	49,33	±	10,15	97	54,20	±	8,35	46	45,30	±	7,78	16	48,05	±	8,28	23
V	0,24	±	0,06	25	0,24	±	0,07	27	0,15	±	0,06	142	0,15	±	0,05	96	0,16	±	0,08	46	0,33	±	0,11	16	0,17	±	0,08	23
Vp (m/s)	4415	±	400,47	11	4531	±	-	1	4719	±	600,09	313	4475	±	508,92	62	5411	±	411,96	56	3924	±	454,45	32	4576	±	-	1
Vs (m/s)	2657	±	221,06	11	2817	±	-	1	2893	±	277,47	314	2771	±	247,41	63	3115	±	280,22	56	2128	±	285,4	32	2554	±	-	1
E/UCS	353,45	±	49,35	-	339,19	±	98,15	-	349,00	±	93,56	-	335,72	±	96,21	-	390,08	±	80,18	-	297,22	±	58,29	-	335,31	±	86,06	-
UCS/TI	-	±	-	-	9,25	±	3,90	-	7,96	±	4,18	-	13,79	±	3,15	-	7,92	±	4,15	-	18,60	±	9,81	-	-	±	-	-
mi	1			24	12,18			60	7,73			621	8,65			200	8,40			167	22,57			231	13,15			71
σ_{ci} (Mpa)	154,48			24	144,99			60	141,64			621	148,54			200	132,06			167	167,9			231	168,79			71
σ_{ti} (Mpa)	-16,64			24	-2,77			60	-1,97			621	-1,85			200	-1,69			167	-2,24			231	-2,99			71
c (Mpa)	9,60			24	13,21			60	9,19			621	9,82			200	8,69			167	17,93			231	15,49			71
Φ (°)	15,34			24	39,97			60	35,57			621	33,57			200	33,31			167	46,59			231	40,67			71

Notas: γ : Densidad. η : Porosidad. UCS: Resistencia a la compresión simple. TI: Resistencia a la tracción. E: Módulo de Young. ν : Razón de Poisson. Vs: Velocidad de onda S. Vp: Velocidad de onda P. E/UCS: Razón deformación compresión. UCS/TI: Razón compresión tracción indirecta. m_i : constante de roca intacta. σ_{ci} : Resistencia a la compresión simple. σ_{ti} : Resistencia a la tracción. C: Cohesión. ϕ : ángulo de fricción.

La tabla 27 muestra la compilación de los parámetros geotécnicos, los que se calcularon considerando tipo de ruptura A (por matriz rocosa) y B (mixta: matriz y estructura).

En la compilación de los resultados de los parámetros geotécnicos, en la tabla 27 se aprecia que la resistencia a la Compresión Uniaxial Simple (UCS) corresponde a 156 MPa para la litología tipo Brecha Ígnea de CMET (BXICMET); 134 MPa para la Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI); valores de 142 MPa, 145 MPa y 128 MPa para las litologías de Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” y “Patilla” (CMET Hw y CMET Fw), respectivamente; 143 MPa para Pórfido Dacítico (PDA) y para el Pórfido Diorítico (PDI) arroja valores UCS de 147 MPa. Mientras que según criterio Hoek & Brown, a escala de roca intacta, la resistencia a la compresión simple (σ_{ci}) de la litología tipo Brecha Ígnea de CMET (BXICMET) corresponde a 154 MPa; para Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI) arroja valores de 145 MPa; para las litologías Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” y “Patilla” (CMET Hw y CMET Fw) corresponden valores de 142 MPa, 149 MPa y 132 MPa respectivamente; para la litología Pórfido Dacítico (PDA) 168 MPa mientras que el Pórfido Diorítico (PDI) es de 169 MPa, considerando que las cantidades de muestras para cada zona geotécnica dentro del volumen analizado son diferentes e influye en su variabilidad. En parámetros de elasticidad, el Módulo de Young en la litología Brecha Ígnea de CMET (BXICMET) es de 57 MPa; para Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI) es de 50 MPa; para el Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” y “Patilla” (CMET Hw y CMET Fw) corresponden valores de 51 MPa, 49 MPa y 54 MPa, respectivamente; mientras que para las litologías Pórfido Dacítico (PDA) y para el Pórfido Diorítico (PDI) existen valores de elasticidad de 45 MPa y 48 MPa.

7.4 Resumen de Ensayos Geotécnicos para rupturas de tipo A – B – C y A – B.

A continuación, se presentan gráficos de caja y bigotes (*box-plot*) de los tres tipos de ensayos geotécnicos tratados en este trabajo, Ensayo de Compresión Uniaxial Simple (UCS), Ensayo de Compresión Triaxial y Ensayo de Tracción Indirecta, tanto para rupturas de tipo A – B – C como para A – B.

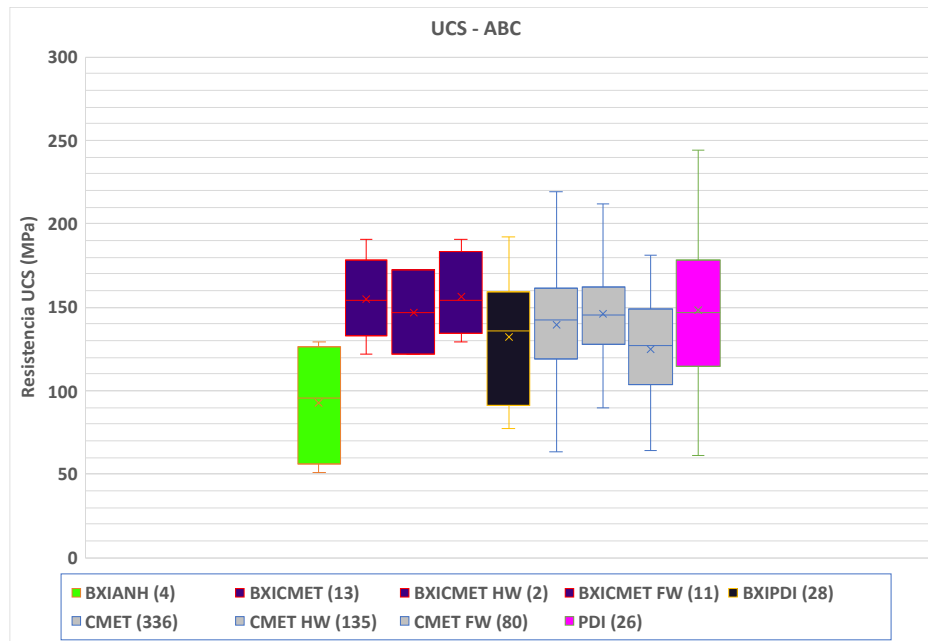


GRÁFICO 7.1: ENSAYOS DE COMPRESIÓN UNIAxIAL SIMPLE (UCS) PARA LITOLOGÍAS CON RUPTURA TIPO A – B – C.

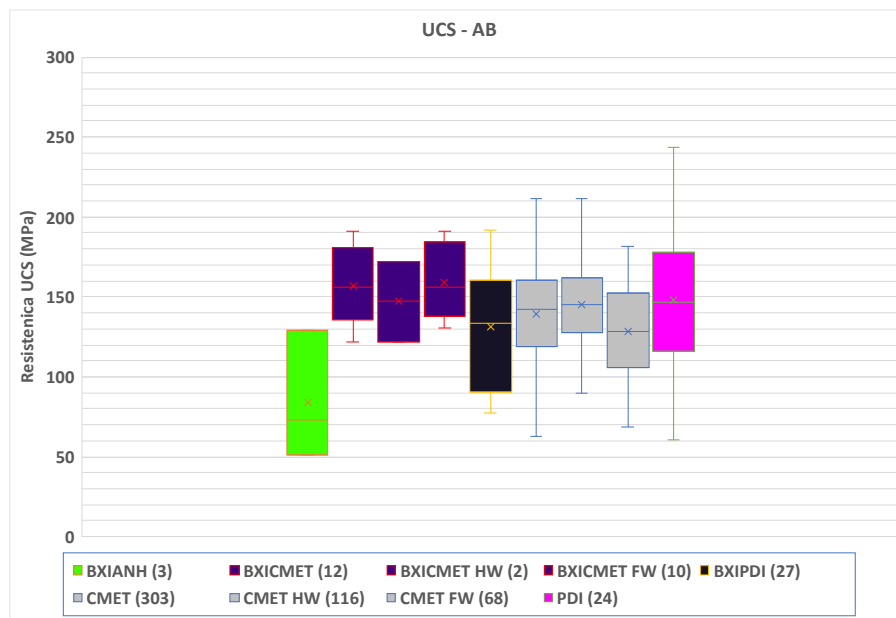


Gráfico 7.2: Ensayos de Compresión Uniaxial Simple (UCS) para litologías con ruptura tipo A – B.

Como se observa, las litologías representadas en al Gráfico 7.1 y 7.2 para Ensayos de Compresión Uniaxial (UCS) son de tipo Brecha de Anhidrita (BXANH), Brecha Ígnea de CMET (BXICMET), Brecha Ígnea de CMET “Cabeza” y “Patilla” (BXICMET Hw y BXICMET Fw), Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI), Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” y “Patilla” (CMET Hw y CMET Fw) y Pórfido Diorítico (PDI). También se aprecia un ligero aumento en la resistencia UCS de los ensayos con tipo de ruptura A – B que de los de A – B – C.

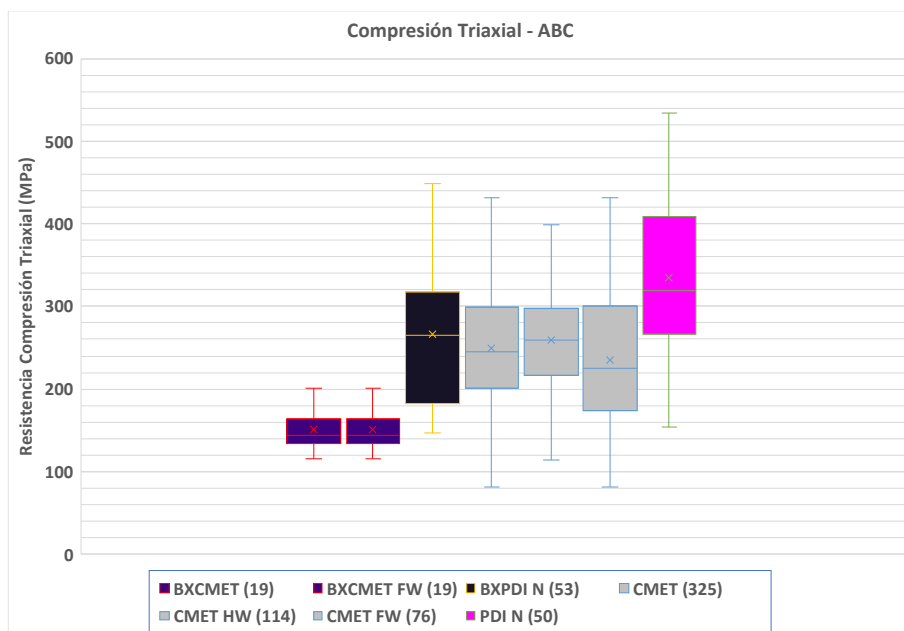


Gráfico 7.3: Ensayos de Compresión Triaxial para litologías con ruptura tipo A - B - C.

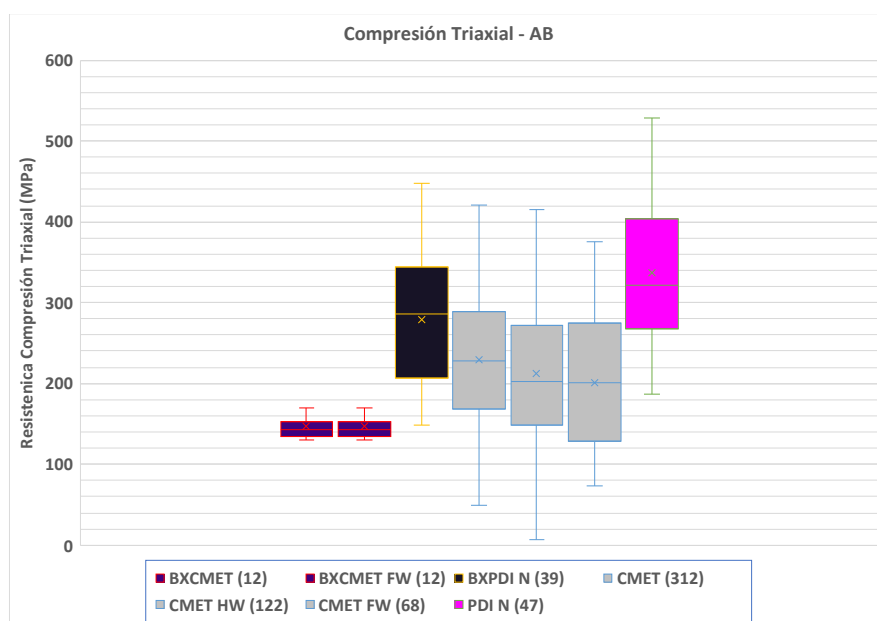


Gráfico 7.4: Ensayos de Compresión Triaxial para litologías con ruptura tipo A - B.

Las litologías representadas en el Gráfico 7.3 y 7.4 para Ensayos de Compresión Triaxial son de tipo Brecha Ígnea de CMET (BXC MET), Brecha Ígnea de CMET “Patilla” (BXC MET Fw), Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXPDI), Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” y “Patilla” (CMET Hw y CMET Fw) y Pórfido Diorítico (PDI). También se aprecia un ligero aumento en la resistencia de los ensayos con tipo de ruptura A - B que de los de A - B - C.

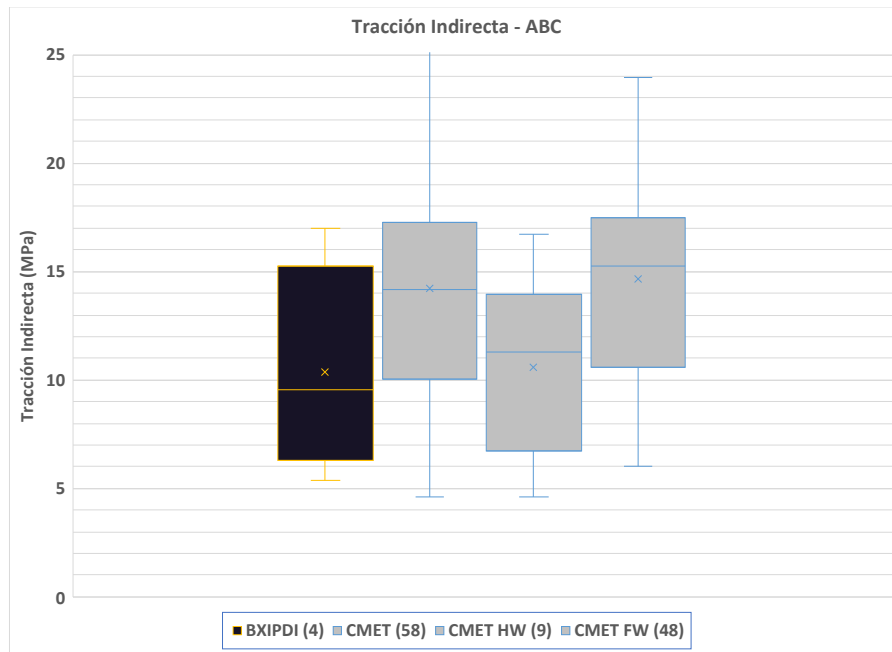


Gráfico 7.5: Ensayos de Tracción Indirecta para litologías con ruptura tipo A - B - C.

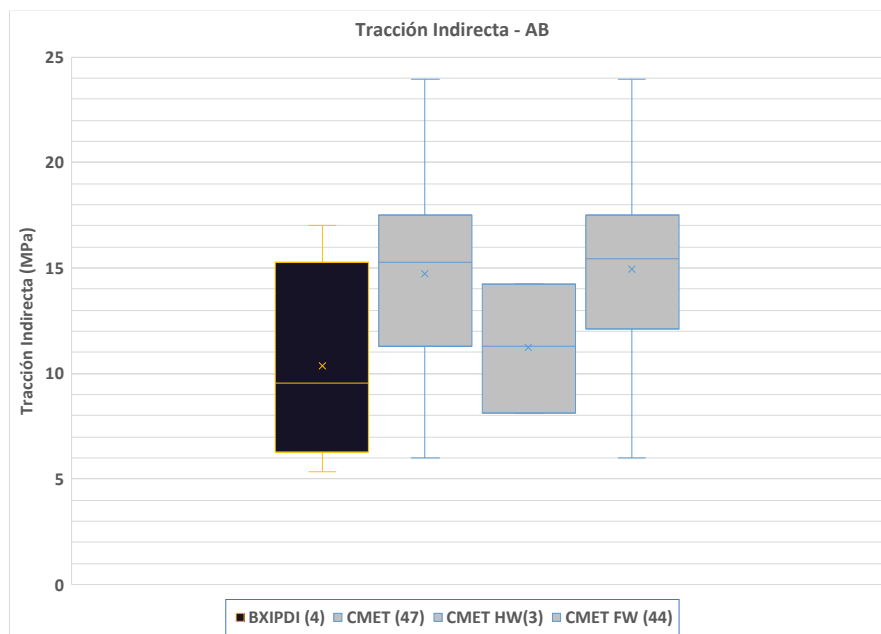


Gráfico 7.6: Ensayos de Tracción Indirecta para litologías con ruptura tipo A - B.

Por último, las litologías representadas en al Gráfico 7.5 y 7.6 para Ensayos de Tracción Indirecta son de tipo Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI), Complejo Máfico El Teniente (CMET), Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” y “Patilla” (CMET Hw y CMET Fw). También se aprecia un ligero aumento en la resistencia de los ensayos con tipo de ruptura A - B que de los de A - B - C.

8. Conclusiones y Discusiones

En primer lugar, el tratamiento y regularización de datos lograron el objetivo de permitir robustecer la base de datos de información de propiedades del macizo rocoso tipo *Stockwork* característico de la mina El Teniente. Esto a partir de ensayos geotécnicos de laboratorio, de los que se obtienen parámetros geotécnicos para cada litología, valores cuyo propósito es de gran utilidad para futuros proyectos como el de Nuevo Nivel Mina (NNM).

La agrupación de datos para tipos de ruptura A-B considera un mayor grupo de litologías que al agregar rupturas tipo C (Grupo de rupturas A-B-C), lo que conlleva a la sugerencia de aplicar ensayos geotécnicos de laboratorio (UCS, Compresión Triaxial y Tracción Indirecta) a todas las litologías pertenecientes al proyecto Andes Norte del Nuevo Nivel Mina, de manera que se puedan obtener mejores propiedades del macizo rocoso y su posterior trabajo en zona.

A - B - C	Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta			
Litología	UCS (MPa)	N° Datos	σ_{ci} (MPa)	N° Datos
BXICMET	154,32	13	152,2	32
BXICMET Fw	154,32	11	152,58	30
BXIPDI	135,64	28	142,64	85
CMET	140,2	343	141,76	719
CMET Hw	145,33	141	149,08	258
CMET Fw	126,85	80	131,39	204
PDI	146,59	26	164,11	76

A - B	Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta			
Litología	UCS (MPa)	N° Datos	σ_{ci} (Mpa)	N° Datos
BXICMET	156,31	12	154,48	24
BXICMET Fw	156,31	10	155,3	22
BXIPDI	133,62	27	144,99	60
CMET	142,24	312	141,64	621
CMET Hw	145,28	122	148,54	200
CMET Fw	128,19	68	132,06	167
PDA	143,23	82	167,9	231
PDI	146,59	24	168,79	71

Tabla 24 y 25: Resistencia a la Compresión Uniaxial de la roca intacta (σ_{ci}) y valor de UCS, para litologías con ruptura tipo A - B - C y A - B.

Es destacable que al comparar los resultados de ensayos UCS con el parámetro de compresión uniaxial roca intacta σ_{ci} obtenidos a partir de la envolvente de falla obtenida mediante el programa *Rocdata v.5* en la tabla 24 y 25, se puede observar un notorio aumento de los valores de la resistencia a la compresión uniaxial simple de la roca intacta (σ_{ci}) en la Tabla 25 (ruptura A - B) en comparación a la tabla 24 (ruptura A - B - C), considerando que

de acuerdo al estándar de la Mina El Teniente (GRMD-SGL-INF-0041-2018) se consideran los ensayos geotécnicos con tipo de ruptura A - B - C para definir propiedades físicas de la roca intacta.

Para profundizar en lo anterior, los resultados para la litología tipo CMET, son los que menos variabilidad tienen al considerar rupturas tipo A - B - C y A - B, esto es debido a la naturaleza de esta litología, pues es la que más evidencia el *Stockwork* característico de El Teniente. Que, a modo de descripción, es un enrejado de vetillas polidireccionales originadas por tres pulsos hidrotermales donde CMET los alberga todos (convirtiéndose en roca hospedante), por eso, su *Stockwork* es el más denso y, por lo tanto, su resistencia está gobernada por la resistencia del relleno mineral. Por lo tanto, se pueden considerar rupturas A - B - C específicamente para CMET a la hora de obtener propiedades físicas en roca intacta.

Parámetros geotécnicos	BXICMET	N°	BXIPDI	N°	CMET	N°	CMET Hw	N°	CMET Fw	N°	PDI	N°
γ (gr/cm ³)	2,77 ± 0,02	12	2,72 ± 0,09	27	2,80 ± 0,06	162	2,79 ± 0,06	91	2,83 ± 0,06	71	2,64 ± 0,04	26
n (%)	0,73 ± 0,20	12	1,18 ± 0,81	17	0,60 ± 0,47	152	0,70 ± 0,47	80	0,38 ± 0,45	72	1,82 ± 0,99	26
UCS (Mpa)	154,32 ± 23,78	13	135,64 ± 36,29	28	140,20 ± 34,88	343	145,33 ± 32,66	141	126,85 ± 28,71	80	146,59 ± 41,83	26
TI (Mpa)	- ± -	-	9,55 ± 4,86	4	14,24 ± 5,23	59	11,28 ± 4,18	9	15,28 ± 5,13	50	- ± -	-
E (Gpa)	56,71 ± 9,62	31	50,20 ± 9,19	28	51,01 ± 9,77	167	50,00 ± 10,08	115	55,00 ± 8,34	52	48,10 ± 8,03	25
V	0,24 ± 0,06	31	0,24 ± 0,06	28	0,16 ± 0,06	166	0,16 ± 0,06	114	0,16 ± 0,08	52	0,17 ± 0,07	25
Vp (m/s)	4415 ± 400,47	11	4531 ± -	1	4734 ± 609,35	323	4491 ± 524,00	63	5438 ± 403,10	65	4576 ± -	1
Vs (m/s)	2657 ± 221,06	11	2817 ± -	1	2900 ± 298,21	324	2775 ± 254,73	64	3177 ± 320,06	65	2554 ± -	1
E/UCS	353,45 ± 49,35	-	344,25 ± 96,41	-	350,79 ± 96,61	-	334,81 ± 90,99	-	395,76 ± 84,46	-	335,31 ± 87,44	-
UCS/TI	- ± -	-	9,25 ± 3,23	-	8,16 ± 6,50	-	12,33 ± 11,61	-	7,64 ± 3,91	-	- ± -	-
mi	1	32	10,58	85	7,93	719	8,35	258	9	204	14,2	76
σ_{ci} (Mpa)	152,2	32	142,64	85	141,76	719	149,08	258	131,39	204	164,11	76
σ_{ti} (Mpa)	-16,39	32	-3,14	85	-1,93	719	-1,92	258	-1,57	204	-2,69	76
c (Mpa)	9,45	32	12,84	85	9,24	719	9,8	258	8,74	204	15,18	76
Φ (°)	15,34	32	38,67	85	32,8	719	33,26	258	33,93	204	41,37	76

Parámetros geotécnicos	BXICMET	N°	BXIPDI	N°	CMET	N°	CMET Hw	N°	CMET Fw	N°	PDA	N°	PDI	N°
γ (gr/cm ³)	2,77 ± 0,02	11	2,71 ± 0,09	26	2,80 ± 0,06	136	2,78 ± 0,06	73	2,83 ± 0,06	63	2,60 ± 0,03	67	2,64 ± 0,05	24
n (%)	0,75 ± 0,13	11	1,18 ± 0,81	17	0,60 ± 0,48	133	0,70 ± 0,49	69	0,38 ± 0,44	64	1,40 ± 1,06	67	1,87 ± 1,01	24
UCS (Mpa)	156,31 ± 23,50	12	133,62 ± 36,91	27	142,24 ± 34,75	312	145,28 ± 33,16	122	128,19 ± 27,42	68	143,23 ± 48,14	82	146,59 ± 42,34	24
TI (Mpa)	- ± -	-	9,55 ± 4,86	4	15,30 ± 5,16	49	11,28 ± 3,06	3	15,74 ± 5,18	46	8,13 ± 2,31	53	- ± -	-
E (Gpa)	56,71 ± 6,97	25	50,20 ± 9,34	27	50,67 ± 9,76	143	49,33 ± 10,15	97	54,20 ± 8,35	46	45,30 ± 7,78	16	48,05 ± 8,28	23
V	0,24 ± 0,06	25	0,24 ± 0,07	27	0,15 ± 0,06	142	0,15 ± 0,05	96	0,16 ± 0,08	46	0,33 ± 0,11	16	0,17 ± 0,08	23
Vp (m/s)	4415 ± 400,47	11	4531 ± -	1	4719 ± 600,09	313	4475 ± 508,92	62	5411 ± 411,96	56	3924 ± 454,45	32	4576 ± -	1
Vs (m/s)	2657 ± 221,06	11	2817 ± -	1	2893 ± 277,47	314	2771 ± 247,41	63	3115 ± 280,22	56	2128 ± 285,4	32	2554 ± -	1
E/UCS	353,45 ± 49,35	-	339,19 ± 98,15	-	349,00 ± 93,56	-	335,72 ± 96,21	-	390,08 ± 80,18	-	297,22 ± 58,29	-	335,31 ± 86,06	-
UCS/TI	- ± -	-	9,25 ± 3,90	-	7,96 ± 4,18	-	13,79 ± 3,15	-	7,92 ± 4,15	-	18,60 ± 9,81	-	- ± -	-
mi	1	24	12,18	60	7,73	621	8,65	200	8,40	167	22,57	231	13,15	71
σ_{ci} (Mpa)	154,48	24	144,99	60	141,64	621	148,54	200	132,06	167	167,9	231	168,79	71
σ_{ti} (Mpa)	-16,64	24	-2,77	60	-1,97	621	-1,85	200	-1,69	167	-2,24	231	-2,99	71
c (Mpa)	9,60	24	13,21	60	9,19	621	9,82	200	8,69	167	17,93	231	15,49	71
Φ (°)	15,34	24	39,97	60	35,57	621	33,57	200	33,31	167	46,59	231	40,67	71

Tabla 26 y 27: Parámetros Geotécnicos para litologías con ruptura tipo A - B - C y A - B.

Ahora bien, haciendo una comparativa general de las tablas de compilación de parámetros geotécnicos (26 y 27) es posible discernir que al separar el tipo litológico CMET según su ubicación espacial en CMET Hw y CMET Fw, éste último presenta una disminución en su valor UCS pasando de 128 MPa a 126 MPa al considerar ensayos con tipo de ruptura C

(por varias vetillas), no así en CMET Hw que mantiene su valor UCS al considerar rupturas A-B como A-B-C, esto es atribuible a la naturaleza del CMET en el lado patilla (Este) del yacimiento donde su enrejado polidireccional de vetillas es más denso que del lado Hw (Oeste). Mismo caso al considerar la disminución del valor UCS para el tipo litológico BXICMET que pasa de 156 MPa en rupturas A-B a 154 MPa al adicionar ensayos con rupturas tipo C (por varias vetillas).

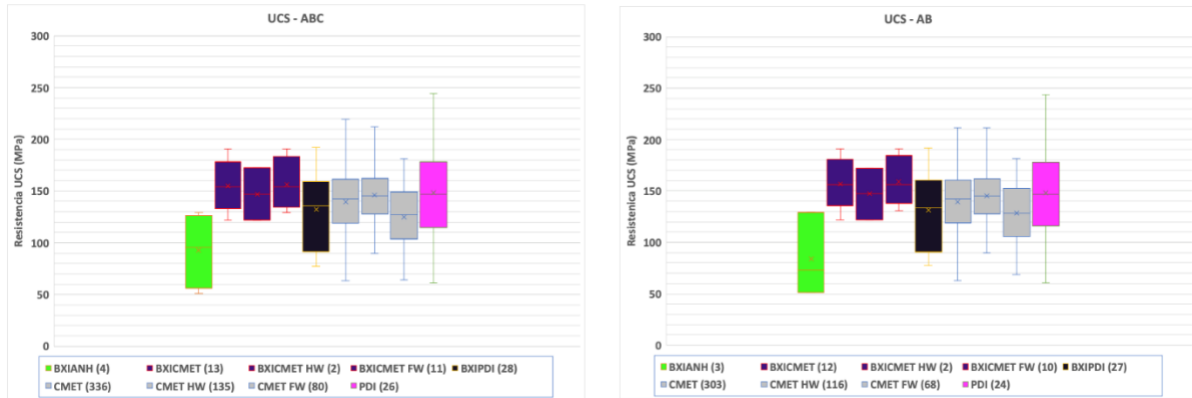


Gráfico 7.1 y 7.2: Ensayos de Compresión Uniaxial Simple (UCS) para litología s con ruptura tipo A - B - C y A - B.

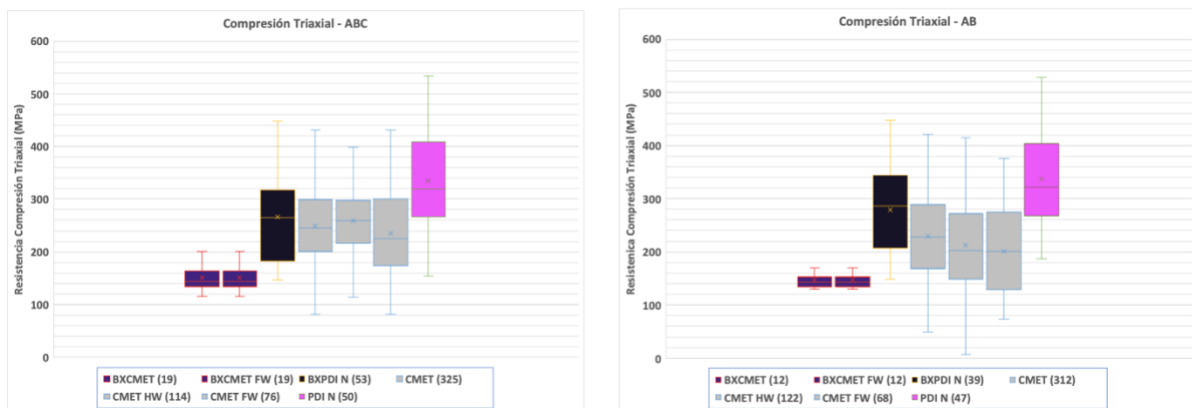


Gráfico 7.3 y 7.4: Ensayos de Compresión Triaxial para litologías con ruptura tipo A - B - C y A - B.

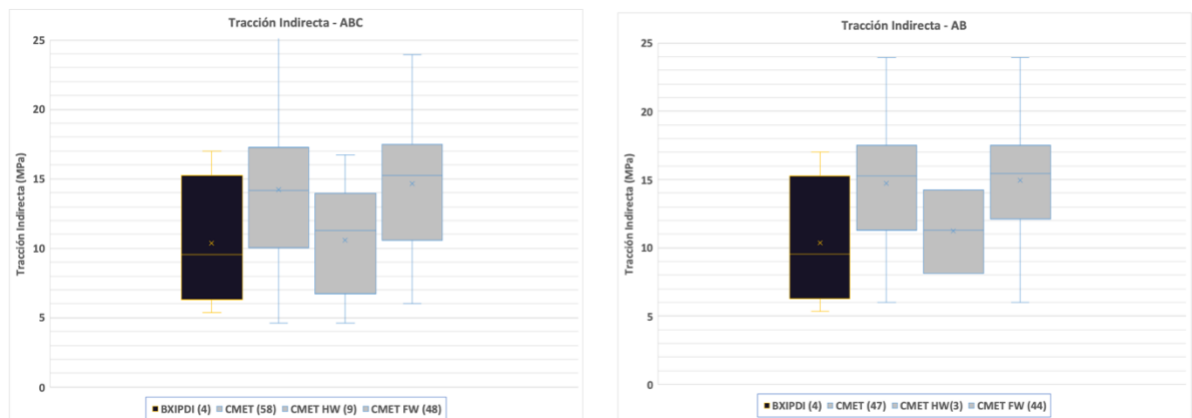


Gráfico 7.5 y 7.6: Ensayos de Tracción Indirecta para litologías con ruptura tipo A - B - C y A - B.

A partir de los gráficos 7.1; 7.2; 7.3; 7.4; 7.5 y 7.6 se aprecia que en los ensayos de Compresión Uniaxial Simple (UCS), Compresión Triaxial y Tracción Indirecta, hay una notoria disminución de los valores al considerar ensayos en los tipos de ruptura A – B – C y que al incluir tipo de ruptura C, por varias vetillas en el análisis, éste disminuye la mediana de las resistencias físicas consideradas. Esto puede estar relacionado a que al incluir ensayos con tipo de ruptura C, éstas puedan provocar una baja de resistencia dependiendo de la mineralogía en el relleno de las estructuras. Entonces, a partir de eso y en base al estándar El Teniente (GRMD–SGL–INF–0041–2018), se puede concluir que, para la determinación de las propiedades físicas se hace necesario discriminar el tipo de ruptura considerado en el análisis según el tipo litológico, además de prestar atención a la ubicación espacial de las muestras de cada tipo litológico presente en el yacimiento. Por ejemplo, el Complejo Máfico El Teniente (CMET) es una litología caracterizada por la presencia predominante de un denso enrejado polidireccional de vetillas asociadas a todas las etapas de Alteración del yacimiento: Tardimagmática (TM), Hidrotermal Principal (HP) e Hidrotermal Tardía (HT). En ésta última predomina el relleno de minerales blandos como anhidrita, carbonatos, bornita, clorita, yeso y tennantita, lo que hace necesariamente que los tipos de ruptura considerados en este tipo litológico, para representar mejor las propiedades de “Roca Intacta El Teniente”, sean A (Matriz), B (Matriz y estructura) y C (por varias estructuras). Por otra parte, el tipo litológico Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI), es una litología félsica que no se caracteriza por tener un enrejado denso de vetillas, sino más bien por ser una roca más compacta con textura brechosa, compuesta por fragmentos angulares de diorita cementados por una matriz de grano fino, por lo tanto, el tipo de ruptura que mejor podría caracterizar este tipo de litología es el de tipo A – B.

Por otra parte, en los gráficos 7.1; 7.2; 7.3; 7.4; 7.5 y 7.6, se aprecian litologías donde la dispersión de datos es demasiado amplia, como es el caso de la Brecha de Anhidrita (BXANH) de los gráficos 7.1 y 7.2, lo que significa que existe una baja cantidad de ensayos por litología, que, a su vez, dificulta poder caracterizar el macizo rocoso. Por lo tanto, es recomendable y de suma importancia, tener en consideración aumentar la cantidad de ensayos por litología de manera de que la dispersión sea menor y el resultado que se pretenda obtener a partir de un tratamiento de datos sea más confiable.

9. Recomendaciones

En vista y considerando todo el trabajo compilado anteriormente, se sugiere a modo de recomendación:

1. Realizar una mayor cantidad de ensayos geotécnicos de laboratorio, debido a lo observado a lo largo del trabajo, existen diversas litologías que no cumplen con la cantidad mínima de ensayos para poder realizar un tratamiento de datos. De acuerdo con el ISRM, 1979, que recomienda una cantidad mínima de 5 ensayos de Compresión Uniaxial Simple (UCS) para obtener un valor confiable, esto sin añadir la importancia de tener ensayos de los de tipo de Compresión Triaxial y Tracción Indirecta, donde, para poder obtener una regularización que aumente la fiabilidad de los datos y a su vez busque reducir la dispersión de los mismos, para que de esta forma, se puedan utilizar los resultados para obtener los parámetros geotécnicos y así también sea factible trabajar en softwares de caracterización de rocas cumpliendo la norma del ISRM, 1979.
2. Revisar por parte de los profesionales (geólogos, ingenieros civiles geólogos o profesionales del área de la geotecnia) los testigos de roca tanto enviados como recibidos del laboratorio. Esto es crucial, debido a que una buena observación de parte de la persona a cargo del proceso puede diferenciar el tipo de ruptura de la muestra. Donde hay que considerar siempre que el concepto de Roca Intacta en Teniente es diferente, debido a la naturaleza del macizo rocoso tipo *Stockwork*.
3. Se recomienda que a la hora de obtener propiedades físicas de roca intacta se discriminen, para cada litología, los tipos de ruptura, entendiendo que de los datos históricos no todos los resultados tienen rupturas validadas y no se puede asegurar que una ruptura tipo C pueda efectivamente corresponder a una "ruptura por varias vetillas" ya sea porque el laboratorio no está capacitado para el reconocimiento de los tipos de ruptura según el estándar Teniente, o porque el transporte de las muestras puede alterar las rupturas post-ensayo, o porque no existió la validación de ruptura post-ensayo.
4. Como una propuesta de valor, se podría considerar generar o activar el convenio de colaboración entre la División El Teniente con el laboratorio de mecánicas de rocas de la Universidad de O'Higgins. Esto es para favorecer nuevos estudios de caracterización del macizo rocoso y sus propiedades geotécnicas.

10. Referencias

- Bieniawski, Z. T. 1979.** The geomechanics classification in rock engineering applications. In ISRM Congress (pp. ISRM-4CONGRESS). ISRM.
- Carmona, S. 2009.** Efecto del tamaño de la probeta y condiciones de carga en el ensayo de tracción indirecta. *Materiales de construcción*, (294), 7-18.
- Charrier, R. 1981.** Mesozoic and Cenozoic stratigraphy of the Central Argentinean-Chilean Andes (32°-35°S) and chronology of their tectonic evolution. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Stuttgart*. Vol 1 (3-4): 344-355.
- Charrier, R.; Wyss, A.; Flynn, J.; Swisher III, C.; Mark, N.; Zapatta, F.; Mckenna, M.; Novacek, N. 1996.** New evidence for Late Mesozoic-Early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the Upper Tinguiririca Valley (35° S, Central Chile). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 9, N° 5/6, Departamento de Geología Universidad de Chile, p. 393-422.
- De Los Santos, C. 2011.** Efecto de la mineralogía, alteración y geometría en la resistencia mecánica de las vetillas, mina El Teniente, Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Geología, Concepción.
- Díaz, D. 2013.** Morfología de las estrcuturas geológicas para la caracterización geotécnica en mina El Teniente, VI Región, Chile. Memoria para optar Título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile.
- Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología en Minas. Capítulo 8, Propiedades del Macizo Rocos. Codelco Chile – División El Teniente.
- Ferrer, M., & de Vallejo, L. I. G. (Eds.). 2007.** Manual De Campa Para La Descripción Y Caracterización De Macizos Rocosos En Afloramientos (Vol. 4). Igme.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Pearson Educación.

González, R. 2018. Modelo Geotécnico Para el Macizo Rocoso y su Aplicación en la Minería de El Teniente. GRMD-SGL-INF-0041-2018. Rancagua.

Informe de Resultados Ensayos Geotécnicos Proyecto Sector Inicio Foot Print Fw, 2010.

León, Í. 2016. Determinación del tamaño de las vetillas tipo Stockwork mediante fotografía digital 3D y análisis estocástico, Mina El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.

Maksaev, V. 2004. Metallogeny, geological evolution, and thermochronology of the Chilean Andes between latitudes 21° and 26° south, and the origin of major porphyry copper deposits.

Marinos, P. & Hoek, E. 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In ISRM international symposium (pp. ISRM-IS). ISRM.

Ríos, I. & Quintana, C. 2020. Diagrama de Caja y Bigotes. <https://institutoclaret.cl/wp-content/uploads/2020/06/GU%C3%8DA-DIAGRAMA-DE-CAJON-Y-BIGOTE-4%C2%B0-PD-MAT..pdf>.

Rocscience Inc. 2004. User's Guide RocData. <https://www.rocscience.com/support/rocddata/release-notes>.

Propiedades Físicas de Roca Intacta Proyecto Andes Norte 2023, GRMD-SGL-NI-00139-2023. Rancagua

Sillitoe, R. H. 1985. Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs. *Economic geology*, 80(6), 1467–1514.

Skewes, M., Arévalo, A., Floody, R., Zúñiga, P & Stern, Ch. 2002. The Giant El Teniente breccia deposit: Hypogene Copper distribution and emplacement. *Society of Economic Geologists. Special Publication 9*: 299–332. Colorado

11. Anexos

Anexo A: Base de Datos

LF mid_x	LF mid_y	LF mid_z	ID PROBETA	OBJETIVO ENSAYO	ZONA GEOTECNICA	DIAMETRO [cm]	LONGITUD [cm]	PD_POROSIDAD [%]	PD_DENSIDAD [gr/cm3]
1007,590379	698,0774501	2043,669288	DDH2243_200.00_200.10	Roca Intacta	Primario	4,7	9,75	1,31	2,79
966,7731422	999,7284091	1773,527581	DDH2383_300.00_300.10	Roca Intacta	Primario	4,77	10,32	0,5	2,77
1194,80386	549,875	2027,813844	DDH2163_100.00_100.10	Roca Intacta	Primario	4,7	9,82	-	-
1194,904737	549,875	2027,857707	DDH2163_100.11_100.21	Roca Intacta	Primario	4,7	9,69	-	-
1069,985185	652,8929825	2051,746881	DDH2190_140.09_140.19	Roca Intacta	Primario	4,76	9,85	-	-
1096,53	677,08	2076,38	GT-02431	Roca Intacta	Primario	6,31	12,72	0,9	2,76
1093,62	680,31	2080,52	GT-02434	Roca Intacta	Primario	6,29	12,03	0,75	2,78
1086,35	688,38	2090,86	GT-02437	Roca Intacta	Primario	6,25	13,05	0,7	2,75
1086,84	687,84	2090,17	GT-02436	Roca Intacta	Primario	6,25	12,42	0,71	2,75
1087,32	687,3	2089,48	GT-02462	Roca Intacta	Primario	6,24	13,04	-	-

Figura A: Extracto de base de datos unificada general sin filtrar, que contiene 13187 datos, de nombre "BDA_LF_ZDE_MODULOS".

Anexo B: Propiedades Físicas Litologías

B.1 Ruptura A – B – C

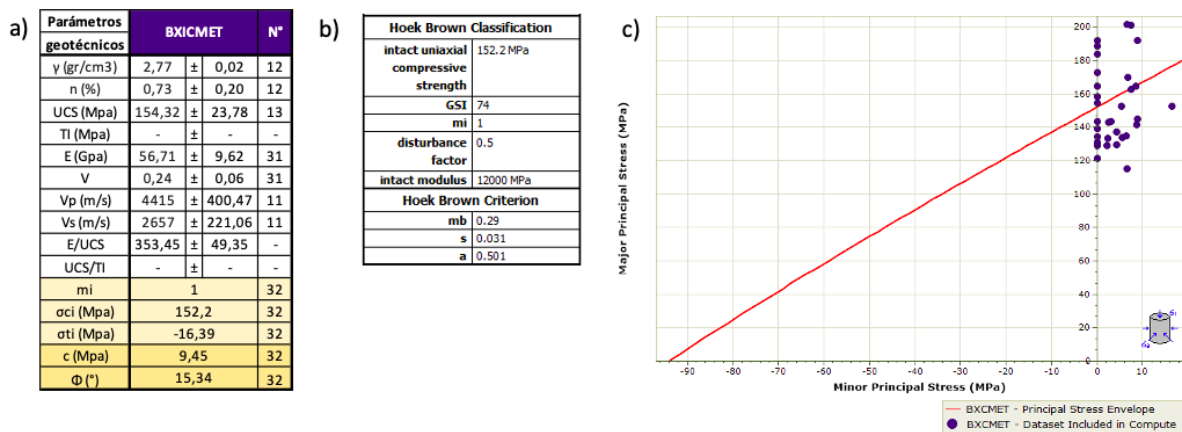


Figura B.1 Compilación de propiedades físicas de litología Brecha Ígnea de CMET (BXICMET) con ruptura A-B-C.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software Rocdata v.5), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software Rocdata v.5).

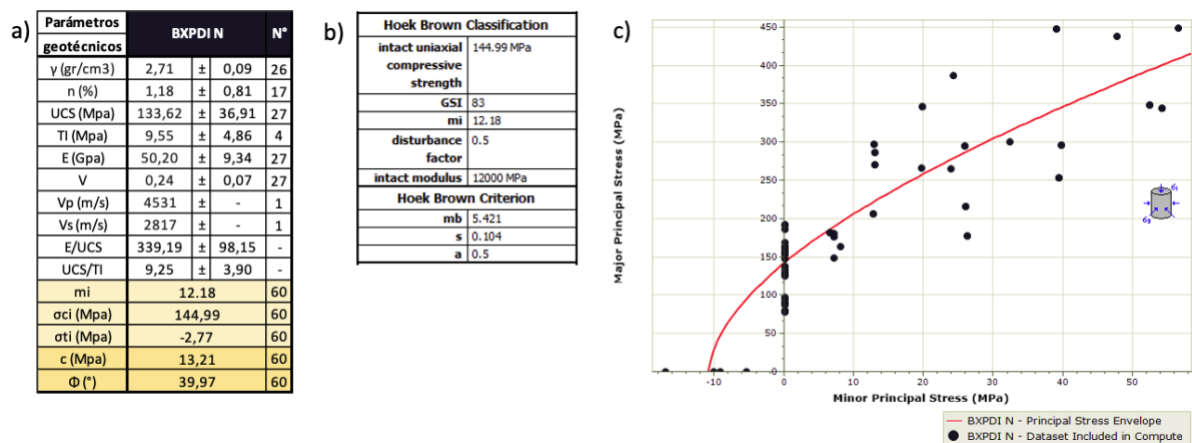


Figura B.2 Compilación de propiedades físicas de litología Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXPDI) con ruptura A-B-C.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software *Rocdata v.5*), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software *Rocdata v.5*).

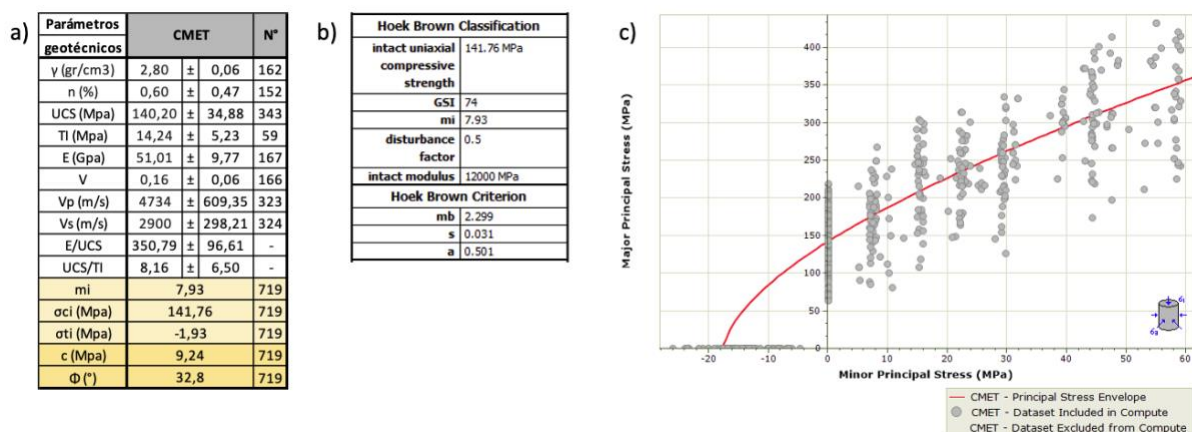


Figura B.3 Compilación de propiedades físicas de litología Complejo Máfico El Teniente (CMET) con ruptura A-B-C.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software *Rocdata v.5*), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software *Rocdata v.5*).

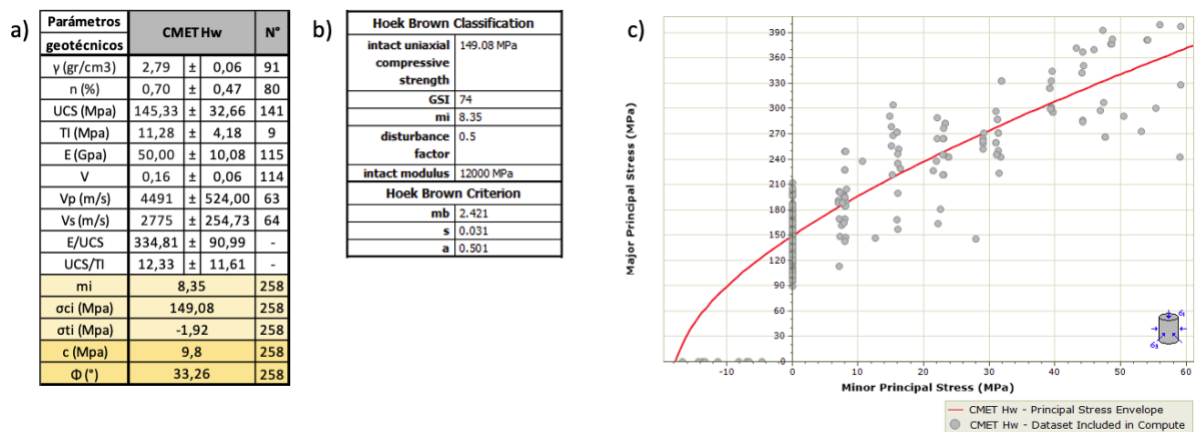


Figura B.4 Compilación de propiedades físicas de litología Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw) con ruptura A-B-C.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software *Rocdata v.5*), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software *Rocdata v.5*).

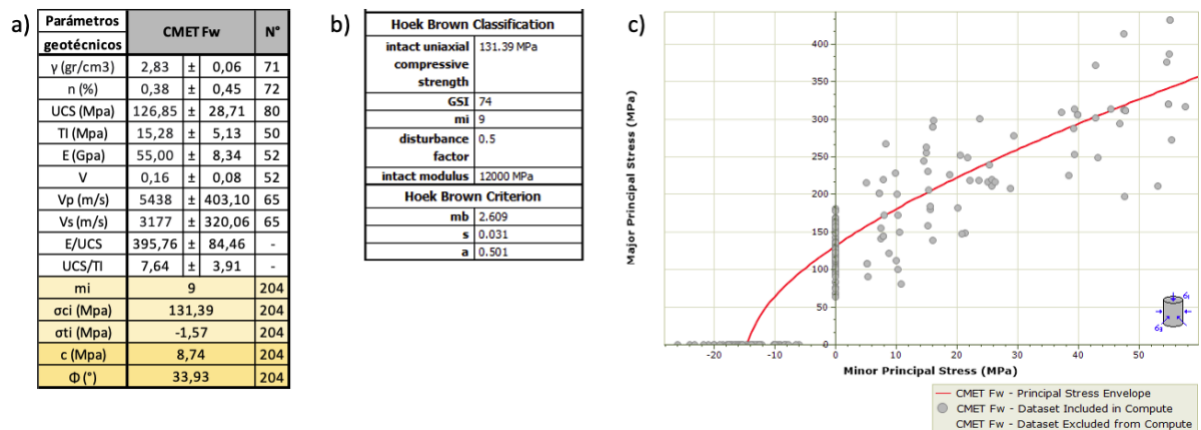


Figura B.5 Compilación de propiedades físicas de litología Complejo Máfico El Teniente “Patilla” (CMET Fw) con ruptura A-B-C.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software *Rocdata v.5*), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software *Rocdata v.5*).

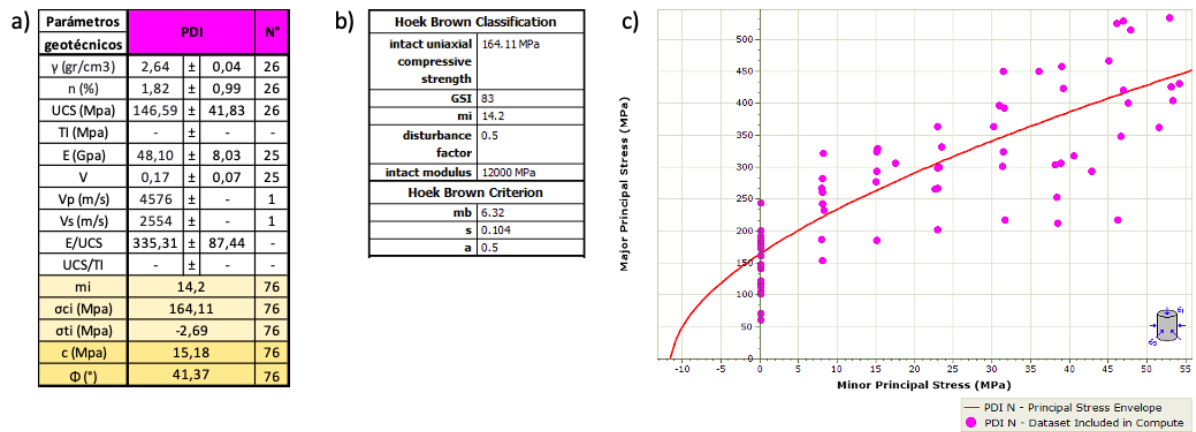


Figura B.6 Compilación de propiedades físicas de litología Pórfido Diorítico (PDI) con ruptura A–B–C.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software *Rocdata v.5*), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software *Rocdata v.5*).

B.2 Ruptura A – B

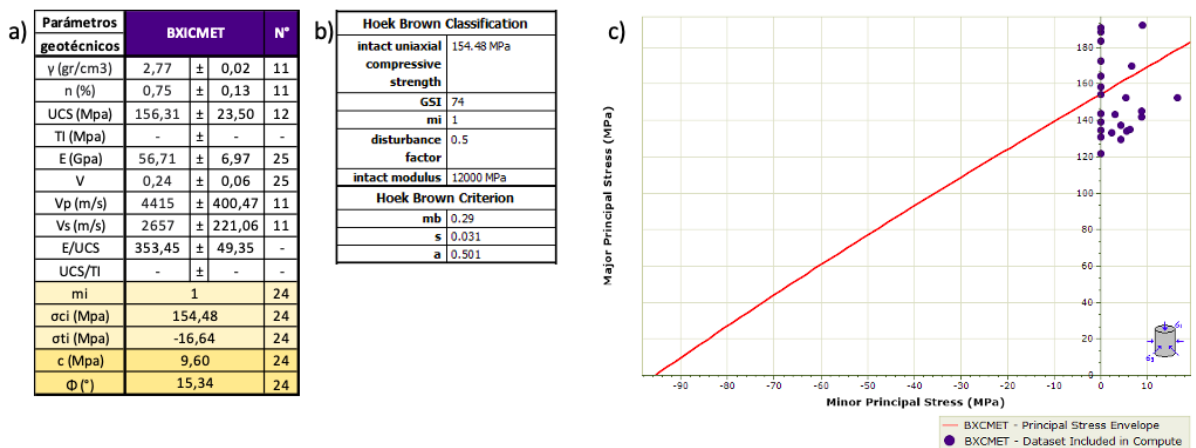


Figura B.7 Compilación de propiedades físicas de litología Brecha Ígnea de CMET (BXICMET) con ruptura A–B.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software *Rocdata v.5*), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software *Rocdata v.5*).

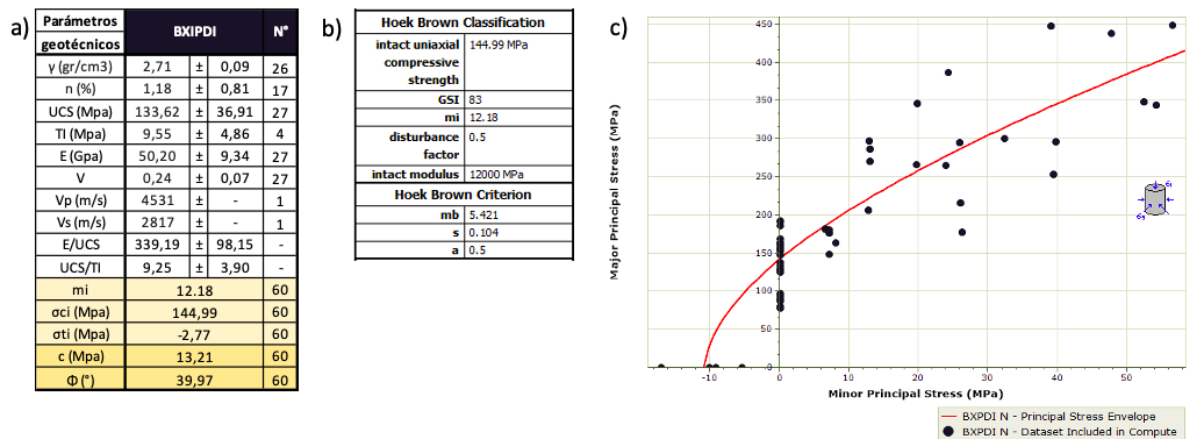


Figura B.8 Compilación de propiedades físicas de litología Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico (BXIPDI) con ruptura A-B.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software Rocdata v.5), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software Rocdata v.5).

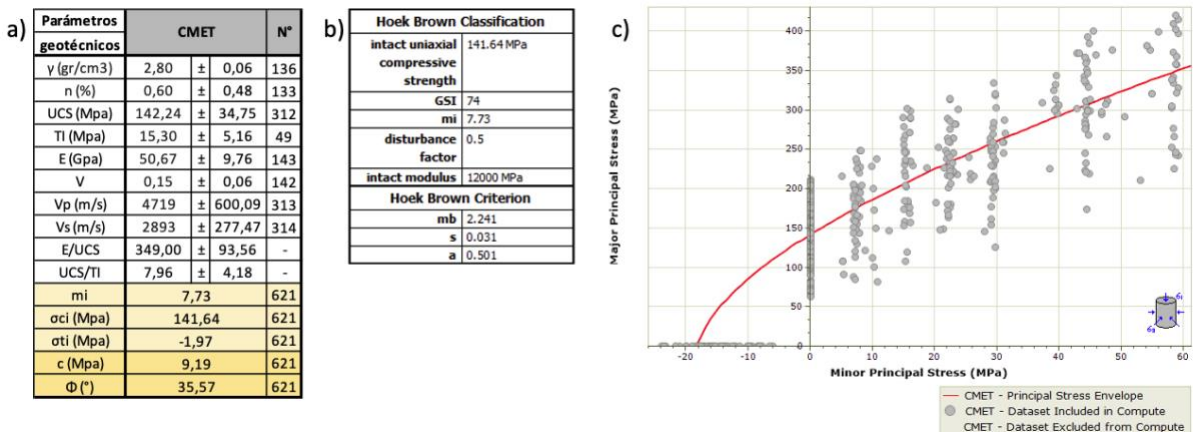


Figura B.9 Compilación de propiedades físicas de litología Complejo Máfico El Teniente (CMET) con ruptura A-B.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software Rocdata v.5), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software Rocdata v.5).

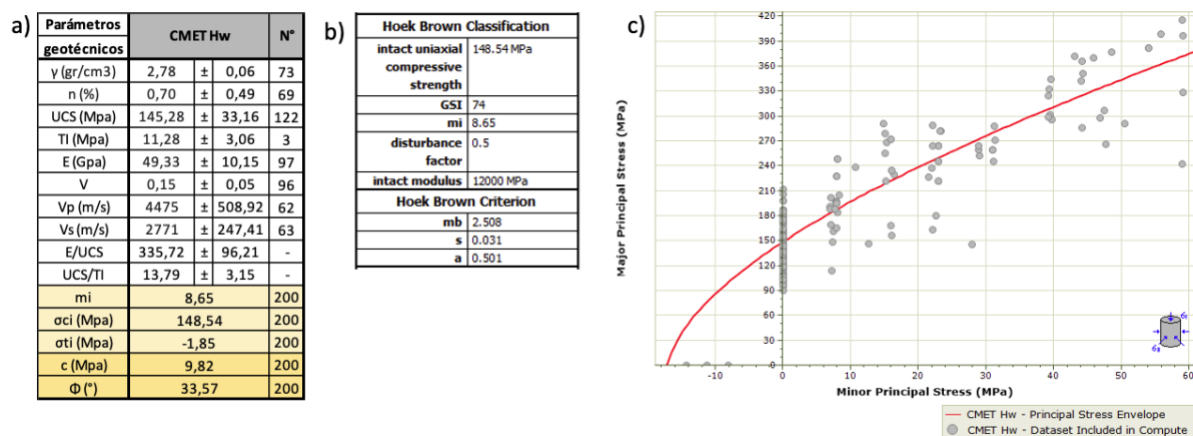


Figura B.10 Compilación de propiedades físicas de litología Complejo Máfico El Teniente “Cabeza” (CMET Hw) con ruptura A-B.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software *Rocdata v.5*), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software *Rocdata v.5*).

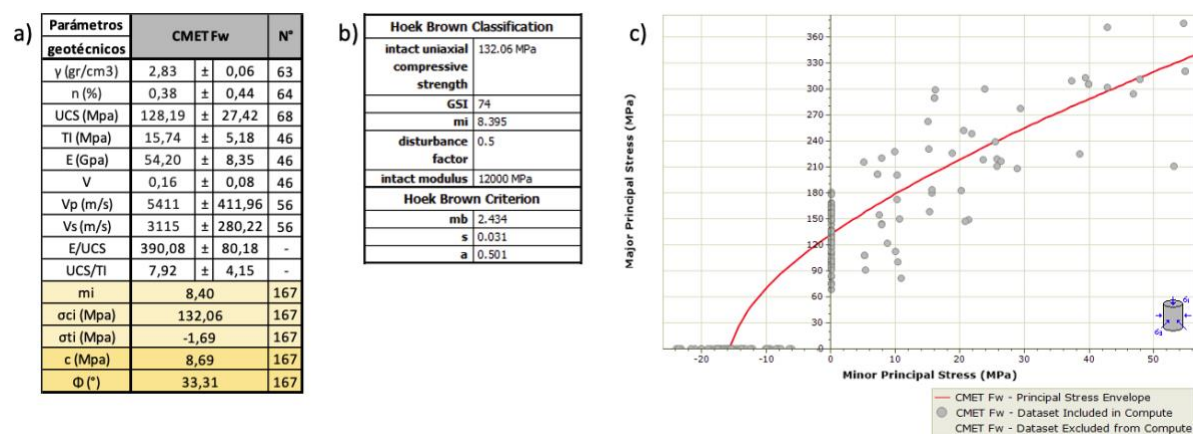


Figura B.11 Compilación de propiedades físicas de litología Complejo Máfico El Teniente “Patilla” (CMET Fw) con ruptura A-B.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software *Rocdata v.5*), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software *Rocdata v.5*).

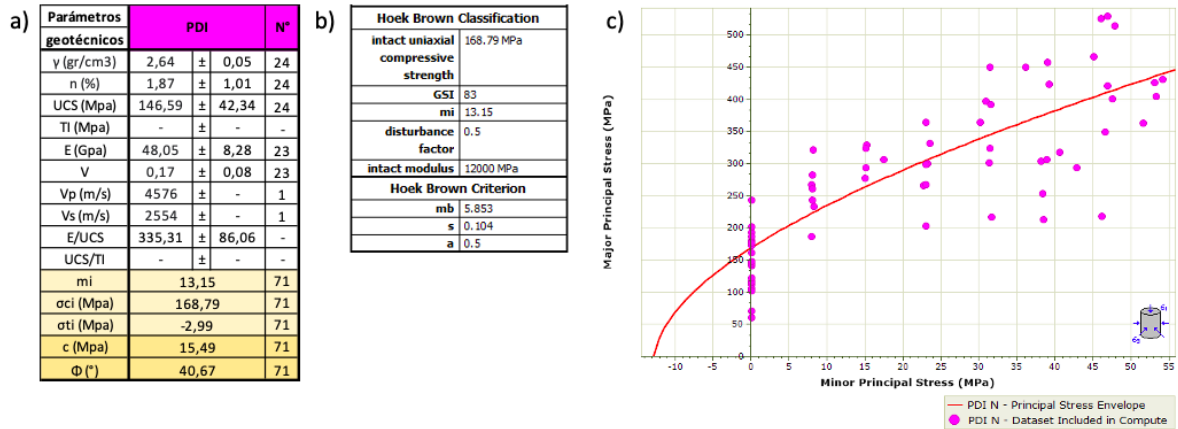


Figura B.12 Compilación de propiedades físicas de litología Pórfido Diorítico (PDI) con ruptura A-B.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software *Rocdata v.5*), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software *Rocdata v.5*).

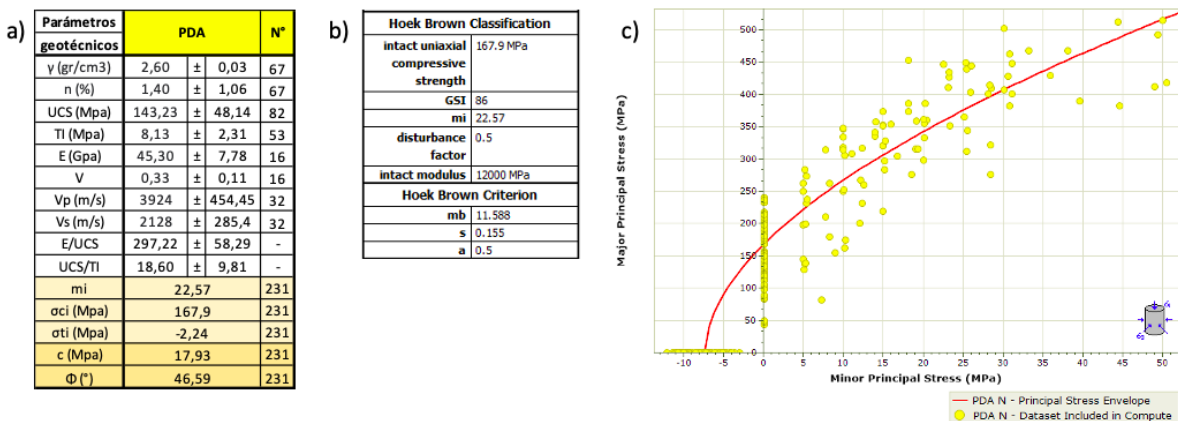


Figura B.13 Compilación de propiedades físicas de litología Pórfido Dacítico (PDA) con ruptura A-B.

Notas: a) Parámetros geotécnicos, b) Clasificación Hoek Brown y criterios Hoek Brown (clasificación entregada por software *Rocdata v.5*), c) Gráfica de Estrés mayor principal (MPa) v/s Estrés menor principal (MPa) de los ensayos geotécnicos aplicados a la litología (realizado en software *Rocdata v.5*).