



**UNIVERSIDAD  
DE ATACAMA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE  
RESISTENCIA MECÁNICA DE VETILLAS Y FALLAS  
SEGÚN ASOCIACIONES MINERALÓGICAS DEL  
*STOCKWORK* DE MINA EL TENIENTE, REGIÓN DE  
O'HIGGINS, CHILE.**

**Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos  
para obtener el título de Geólogo.**

Profesor Guía: Dr. Wolfgang Griem

Co-Guías: Sr. Carlos de Los Santos

Sr. Roberto González

**Karina Andrea Olivo Soto**

**Copiapó, Chile 2026.**

*Nunca subestimes  
La resistencia de un mineral...*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos a Felipe Celhay, Superintendente de Geología y a Roberto González Lobos, jefe de Unidad de Geología de Minas por darme la oportunidad de efectuar mi memoria de título en la División El Teniente de Codelco.

A los Geólogos Carlos De los Santos y Jack Cubillos, profesionales guía de este estudio, a quien agradezco sus consejos, paciencia y que me permitieran desarrollar mis capacidades profesionales dentro de su equipo de trabajo.

A los Geólogos y personal de la Superintendencia de Geología especialmente a Diego Diaz, Paulina Schachter, Carlos Guzmán que siempre se mostraron dispuestos a contestar mis dudas y hacerme preguntas.

A mi profesor guía, Dr. Wolfgang Griem por su infinita paciencia y recibirme siempre con buena voluntad durante tanto tiempo en que intente sacar esto adelante y a los profesores, Francisco Tapia y Ximena Robles, por las correcciones y sugerencias hechas a este trabajo. A todo el cuerpo docente de la Escuela y funcionarios del Departamento de Geología de la Universidad de Atacama, especialmente a la Pao y Sra Iris, por los conocimientos impartidos y los buenos momentos compartidos. A mis amigos y compañeros de la Universidad, los K.

Finalmente, y más importante, a mi mejor amigo y compañero, Darío, pilar fundamental de mi vida, agradezco su amor sagrado y apoyo incondicional, sinceros consejos y fuerza que me han permitido superar las situaciones adversas de la vida, gracias por estrechar tu mano.

## RESUMEN

La mineralogía del relleno de vetillas y fallas intrabloque ejerce un control decisivo sobre el desarme y comportamiento mecánico del macizo rocoso en minas de hundimiento profundo como El Teniente. Este estudio determina experimentalmente las propiedades de resistencia mecánica de vetillas selladas y fallas del stockwork en función de sus asociaciones mineralógicas, diferenciando entre "vetillas blandas" (<40% de minerales duros,  $H > 4$ ) y "vetillas duras", mediante la combinación de análisis de dureza relativa y ensayos de tracción, corte directo y compresión triaxial.

En términos de dureza, vetillas con calcopirita mayoritaria asociada a pirita presentan valores superiores ( $H \approx 4,9$ ) a las que se asocian con cuarzo ( $H \approx 4,5$ ), mientras que vetillas de pirita mayoritaria incrementan su dureza al asociarse con minerales más duros en la escala de Mohs. La molibdenita masiva en vetillas de cuarzo mayoritario (contenidos >40%) reduce significativamente la dureza ( $H \approx 4,1$ ), y la asociación anhidrita–cuarzo exhibe valores inferiores a los esperados ( $H \approx 4,3$ ). Los ensayos de tracción indirecta tienden a sobreestimar la resistencia respecto a los ensayos directos, aspecto crítico para definir parámetros de estabilidad en excavaciones profundas. En el comportamiento al corte, los parámetros de resistencia disminuyen con el espesor de la estructura, evidenciando un efecto de escala geométrico consistente con trabajos previos. En vetillas blandas, la asociación con minerales más duros incrementa significativamente la dureza relativa y la resistencia al corte; en vetillas duras dominadas por cuarzo o pirita, los minerales blandos pueden reducir sustancialmente la resistencia al cizallamiento, lo que pone de relieve la importancia de la disposición geométrica de las fases minerales en el plano de corte.

Para las fallas del stockwork las envolventes determinadas entregan esfuerzos cortantes menores ( $\tau \approx 2,8$  MPa) que los asumidos en modelos numéricos previos ( $\approx 4$  MPa), indicando una mayor susceptibilidad a la inestabilidad. Estos resultados constituyen una base empírica inédita para la caracterización geotécnica del stockwork y la calibración de modelos numéricos de excavaciones profundas en Mina El Teniente.

## ABSTRACT

The mineralogy of intrablock vein and fault infill exerts decisive control over rock mass degradation and mechanical behaviour in deep block caving mines such as El Teniente. This experimental study determines the mechanical strength properties of sealed veins and faults within the stockwork as a function of their mineralogical associations, distinguishing between "soft veins" (<40% hard minerals, Mohs hardness  $H > 4$ ) and "hard veins", through a combination of relative hardness assessment and direct/indirect tensile, direct shear and triaxial compression testing.

Regarding relative hardness, veins with dominant chalcopyrite associated with pyrite exhibit higher values ( $H \approx 4.9$ ) than those associated with quartz ( $H \approx 4.5$ ), whilst pyrite-dominated veins increase their hardness when associated with progressively harder minerals in the Mohs scale. Massive molybdenite infill within quartz-dominated veins (contents >40%) significantly reduces relative hardness ( $H \approx 4.1$ ), and the anhydrite–quartz association displays values lower than expected ( $H \approx 4.3$ ). Indirect tensile testing tends to overestimate strength relative to direct tensile testing, a critical consideration when establishing stability parameters for deep excavations. Regarding shear behaviour, shear strength parameters decrease with increasing vein thickness, demonstrating a geometric scale effect consistent with previous literature. In soft vein associations, the presence of harder minerals significantly increases both relative hardness and shear strength; in hard veins dominated by quartz or pyrite, soft minerals may substantially reduce shear strength resistance, underscoring the importance of the geometric disposition of mineral phases along the shear plane.

For stockwork faults, the determined Mohr–Coulomb envelopes yield lower shear stresses ( $\tau \approx 2.8$  MPa) than those assumed in previous numerical models ( $\approx 4$  MPa), indicating heightened susceptibility to instability. These results provide a novel empirical foundation for geotechnical characterization of the stockwork and calibration of numerical models applied to deep excavation design at El Teniente mine.

## Tabla de Contenidos

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| RESUMEN .....                                       | 4  |
| ABSTRACT .....                                      | 5  |
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....                      | 10 |
| 1.1    Antecedentes Generales. ....                 | 10 |
| 1.2    Objetivos .....                              | 13 |
| 1.2.1    Objetivo General. ....                     | 13 |
| 1.2.2    Objetivos Específicos.....                 | 13 |
| 1.3    Ubicación y Accesos .....                    | 14 |
| CAPÍTULO II. MARCO GEOLÓGICO.....                   | 16 |
| 2.1    Geología Regional.....                       | 16 |
| 2.1.1    Rocas Estratificadas .....                 | 17 |
| 2.1.2    Rocas Intrusivas .....                     | 21 |
| 2.1.3    Estructuras. ....                          | 22 |
| 2.1.4    Marco Geotectónico .....                   | 24 |
| 2.2    Geología Distrital. ....                     | 26 |
| 2.3.1    Unidades Litológicas.....                  | 29 |
| 2.3.1.1    Complejo Máfico El Teniente (CMET) ..... | 29 |
| 2.3.1.2    Complejo Félsico .....                   | 30 |
| 2.3.1.3    Complejo Brecha Braden .....             | 32 |
| 2.3.1.4    Cuerpos de Brechas .....                 | 33 |
| 2.3.1.5    Cuerpos Intrusivos Menores .....         | 34 |
| 2.3.2    Alteración y mineralización .....          | 36 |
| 2.3.3.1    Etapa tardimagmática .....               | 37 |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.3.2 Etapa hidrotermal principal .....                                                              | 38 |
| 2.3.3.3 Etapa hidrotermal tardía .....                                                                 | 38 |
| 2.3.3.4 Etapa póstuma .....                                                                            | 38 |
| 2.3.3.5 Etapa supérgena .....                                                                          | 39 |
| CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN GENÉTICA DE<br>VETILLAS DEL YACIMIENTO EL TENIENTE. .... | 40 |
| 3.1 Generalidades. ....                                                                                | 40 |
| 3.2 Caracterización de las vetillas selladas. ....                                                     | 41 |
| 3.3 Clasificación de vetillas El Teniente .....                                                        | 43 |
| 3.3.1 Espesor de las vetillas.....                                                                     | 44 |
| 3.3.2 Extensión de la traza de vetillas. ....                                                          | 44 |
| 3.3.3 Mineralogía, alteración y relaciones de contacto. ....                                           | 45 |
| CAPÍTULO IV. GEOTECNIA DEL YACIMIENTO EL TENIENTE. ....                                                | 46 |
| 4.1 Introducción.....                                                                                  | 46 |
| 4.2 Caracterización Geotécnica del Macizo Rocosó Primario. <b>¡Error! Marcador no<br/>definido.</b>    |    |
| 4.2.1 Caracterización de Roca Intacta .....                                                            | 48 |
| 4.2.2 Degradación del Macizo Rocosó en Mina El Teniente. ....                                          | 50 |
| 4.2.3 Efecto Escala en el Macizo Rocosó .....                                                          | 51 |
| CAPÍTULO V. ENSAYOS GEOTÉCNICOS. ....                                                                  | 55 |
| 5.1 Introducción.....                                                                                  | 55 |
| 5.2 Descripción de las muestras sometidas a ensayos.....                                               | 58 |
| 5.2.1 Muestreo .....                                                                                   | 59 |
| 5.2.2 Descripción de vetillas selladas.....                                                            | 61 |
| 5.3 Ensayos de Compresión. ....                                                                        | 64 |
| 5.3.1 Ensayos de Compresión Triaxial.....                                                              | 65 |

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.4. Ensayos de Tensión. ....                                                            | 68 |
| 5.4.1 Ensayos de Tracción Directa.....                                                   | 68 |
| 5.4.2 Ensayos de Tensión Indirecta.....                                                  | 69 |
| 5.5 Ensayos de Corte Directo. ....                                                       | 70 |
| 5.5.1 Preparación de la muestra.....                                                     | 70 |
| 5.5.2 Procedimiento.....                                                                 | 72 |
| 5.6 Ruptura .....                                                                        | 74 |
| 5.6.1 Tipos de Ruptura. ....                                                             | 75 |
| 5.7 Análisis de Datos y Estadística. ....                                                | 77 |
| CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....                                                 | 78 |
| 6.1 Introducción.....                                                                    | 78 |
| 6.2. Determinación de las Asociaciones Minerales del Stockwork .....                     | 78 |
| 6.3 Caracterización Mineralógica y Dureza Relativa en la Escala de Mohs.....             | 82 |
| 6.3.1 Dureza Relativa Ponderada de Asociaciones Minerales. ....                          | 82 |
| 6.2.2 Implicaciones Geotécnicas de la Dureza Mineral. ....                               | 84 |
| 6.3 Ensayos de Resistencia a la Tracción Indirecta (Método Brasileño) .....              | 84 |
| 6.3.1 Distribución de Asociaciones Minerales en ensayos de Tracción .....                | 84 |
| 6.3.2 Resultados de Resistencia a la Tracción Indirecta por Asociación mineral.<br>..... | 86 |
| 6.3.3 Análisis del Efecto Escala: Influencia del espesor de Vetilla .....                | 88 |
| 6.4 Ensayos de Resistencia a la Tracción Directa .....                                   | 89 |
| 6.4.1 Distribución de Asociaciones Minerales en Ensayos de Tracción Directa              | 89 |
| 6.4.2 Resultados de Resistencia a la Tracción Directa por Asociación mineral.            | 90 |
| 6.4.3 Análisis del Efecto Escala en los Ensayos de Tracción Directa.....                 | 93 |
| 6.5 Ensayos de Resistencia a la Compresión Triaxial.....                                 | 94 |

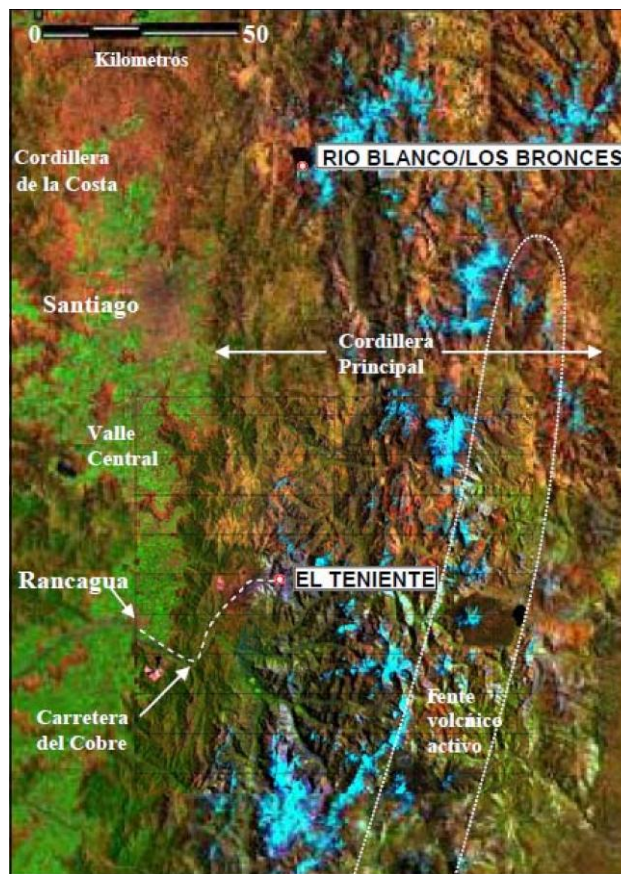


|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.5.1 Caracterización de Muestras y tipos de Ruptura .....                 | 94  |
| 6.5.1 Envolventes de Resistencia Mohr-Coulomb .....                        | 96  |
| 6.5.2 Análisis Comparativo y Tendencias Generales Ensayos Triaxiales ..... | 105 |
| 6.6 Ensayos de Resistencia al Corte Directo en Vetillas.....               | 107 |
| 6.5.1. Caracterización de la Base de Datos Ensayos Corte Directo .....     | 107 |
| 6.5.2. Envolventes de Resistencia Mohr-Coulomb para Corte Directo. ....    | 109 |
| 6.5.3. Comparativa entre ensayos de Corte Directo y Triaxiales. ....       | 112 |
| 6.7 Ensayos de Resistencia al Corte Directo en Fallas.....                 | 112 |
| 6.7.1 Metodología corte directo en Fallas. ....                            | 112 |
| 6.7.1. Caracterización de Fallas Ensayadas.....                            | 114 |
| 6.7.2. Envolventes de Resistencia al Corte Directo en Fallas. ....         | 116 |
| 6.7.3. Envolvente General de Resistencia al Corte para Fallas .....        | 118 |
| 6.7.4. Parámetros Críticos de Resistencia en Fallas Diamante/ RRNN .....   | 120 |
| CAPÍTULO VII. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....                                | 121 |
| CAPÍTULO VIII. RECOMENDACIONES.....                                        | 126 |
| ANEXO I.....                                                               | 132 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                                                          | 127 |

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes Generales.

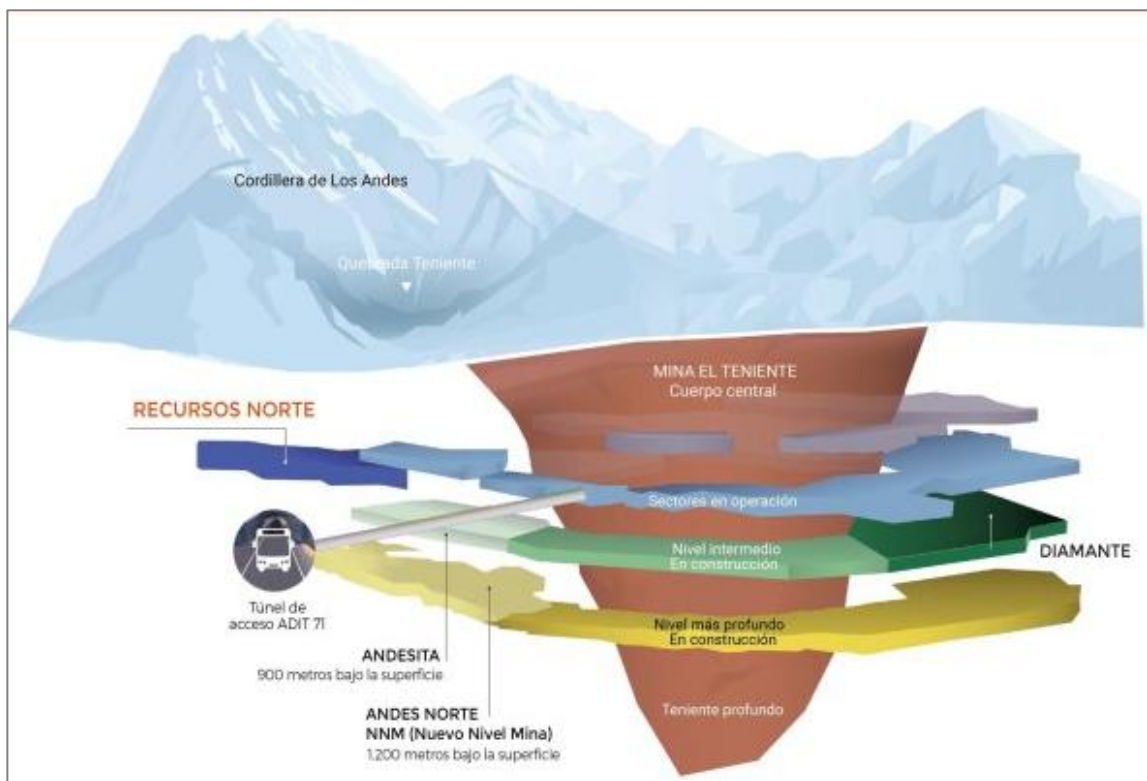
El Teniente es considerado el yacimiento de Cobre-Molibdeno más grande del mundo (Skewes y otros, 2002), ubicado en el flanco poniente de la Cordillera de los Andes (Figura 1.1), y junto al yacimiento Rio Blanco - Los Bronces forman parte del arco magmático del Mioceno-Plioceno temprano que se sitúa en el extremo norte de la Zona Volcánica Sur. Tradicionalmente se incluye dentro de los yacimientos del tipo pórfido cuprífero, en el que la sucesiva intrusión de cuerpos félsicos genéticamente relacionados y cada uno asociado con alteración hidrotermal (Maksaev y otros 2004).



**Figura 1.1:** Imagen Landsat TM de Chile Central entre los 33°S - 35°S, y los 71°W - 72.5°W. El Teniente y Rio Blanco los bronceos son localizados hacia el oeste de la Cordillera de los Andes, además la imagen muestra los dominios morfológicos de la zona (Tomado de Cannell, 2004).

El distrito geológico es dominado por rocas volcánicas del Mioceno correspondientes a la Formación Farellones, localmente instruida por rocas ígneas de composición intermedia, además de brechas hidrotermales (Kay y otros, 1991), las rocas presentan distintos grados de alteración y mineralización, estando esta última principalmente alojado en un enrejado polidireccional de vetillas o stockwork, cortado por un fallamiento tardío, esencialmente de rumbo (Brzovic y Figueroa, 2009). La mineralización metálica que rellena las vetillas comprende esencialmente calcopirita, bornita y molibdenita.

La explotación del yacimiento comenzó en el año 1906 y se ha desarrollado en forma subterránea, mediante la aplicación del método “Hundimiento de Bloques” o *Block Caving*, el que ha sido modificado al *Panel Caving* o “Hundimiento de Paneles” (Rojas y otros, 2001).



**Figura 1.2:** Vista en tres dimensiones de los actuales niveles de producción, así como los futuros desarrollos más profundos (Nuevo Nivel Mina).

El Teniente es la mayor mina subterránea en operación en el mundo extrayendo aproximadamente 140.000 toneladas por día (tpd). Diferentes sectores y niveles son explotados simultáneamente usando distintas variantes del método *Panel Caving*, los sectores de la mina han sido emplazados alrededor de la Pipa Brecha Braden como muestra la Figura 1.2; en esta imagen se incluye los actuales niveles productivos, así como el nuevo nivel mina (NNM), que se encuentra en etapa de implementación.

Hoy en día la mayoría de las operaciones en mina El Teniente ocurren en roca de mena primaria. Estas rocas han sido definidas como masivas y competentes, exhibiendo un fallamiento frágil, al ser sometida a altos esfuerzos (Rojas y otros 2001). Desde el punto de vista de la caracterización geotécnica del macizo rocoso, en estas rocas la presencia de estructuras abiertas del tipo fracturas o *joints* es escasa, reconociéndose solo pequeños sistemas de fallas, siendo las fracturas selladas por rellenos minerales o vetillas las que predominan en la roca (Brzovic y Villaescusa, 2007). Son estas características geotécnicas las que le confieren un carácter masivo y competente al macizo rocoso.

Estudios han demostrado, que las estructuras geológicas más propensas a fallar durante el proceso de hundimiento y fragmentación en la mina, son las vetillas gruesas de rellenos débiles o blandos (Brzovic y Villaescusa 2007), por lo tanto, se considera la necesidad de contar con propiedades físicas del relleno de las vetillas e intentar relacionarlas con sus características geológicas, teniendo estas en conjunto implicancias en el desarme del macizo rocoso. En el presente estudio se ha diseñado una campaña de muestreo y ensayos geotécnicos para poder extraer las propiedades del relleno de las vetillas contenidas en la roca primaria del yacimiento, las que podrán ser incluidas como parámetro de entrada en los programas de modelamiento estructural y predicción de la fragmentación (Ej: Fracman).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General.**

Determinar experimentalmente las propiedades de resistencia mecánica de las estructuras geológicas presentes en mina El Teniente, tanto de “vetillas blandas” como “vetillas duras”, así como obtener valores empíricos de resistencia en fallas, en función de sus características mineralógicas y geométricas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos.**

- Realizar ensayos de compresión triaxial, ensayos de corte directo en celda hoek, para comprender el comportamiento resistente de los componentes del relleno mineral de vetillas y de fallas, bajo ciertas condiciones geológicas y geométricas.
- Aportar al conocimiento de las propiedades de resistencia de vetillas y fallas de mina El Teniente.

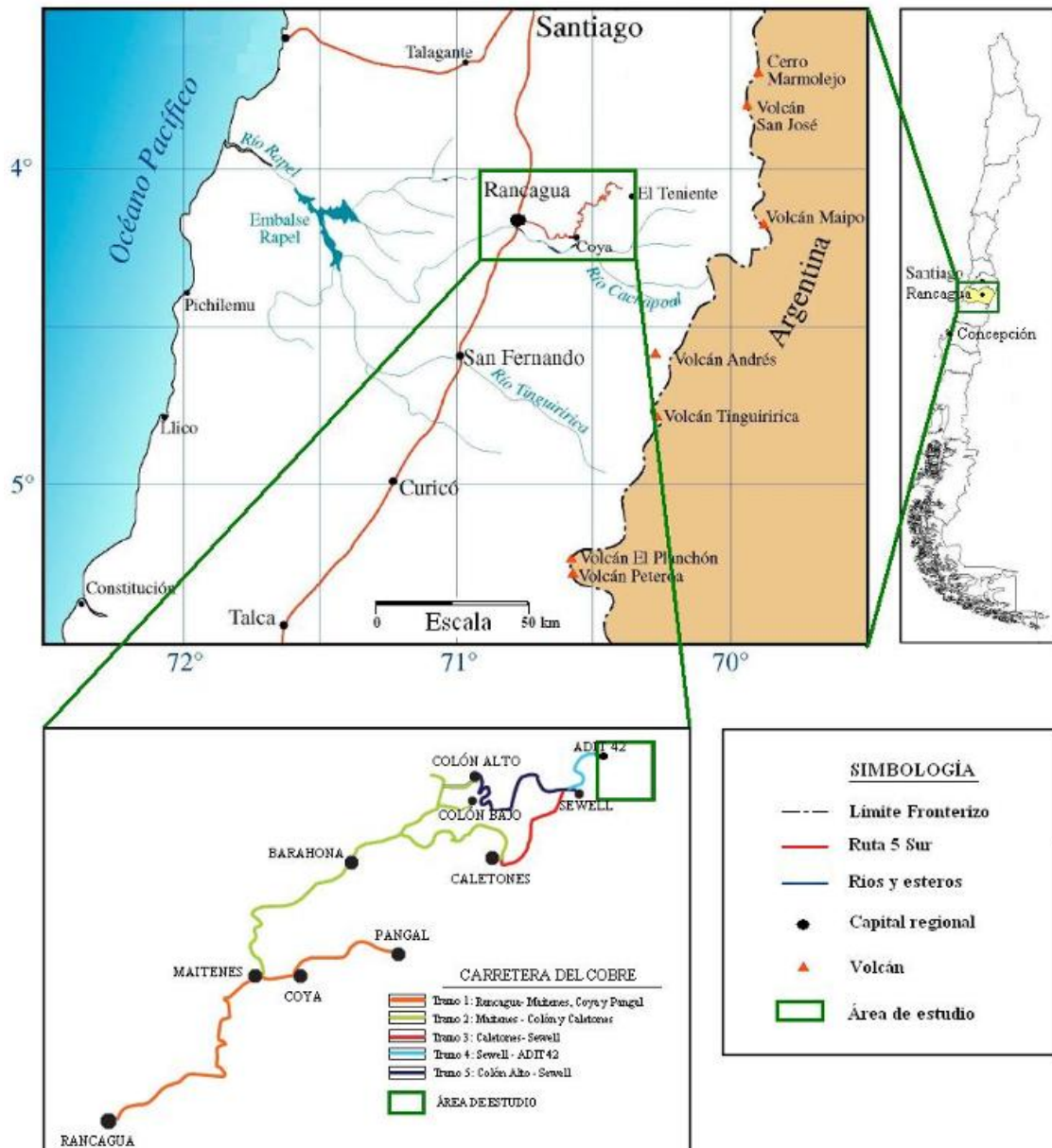
### 1.3 Ubicación y Accesos

El yacimiento El Teniente se localiza en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, provincia del Cachapoal, aproximadamente a 45 km al noreste de la capital regional, Rancagua.

Sus coordenadas geográficas son 70°21" de longitud oeste y 34°14" de latitud sur, con una altura de 2.400 m s.n.m. En la Figura 1.4 se observa el mapa de la ubicación del yacimiento en la región, y los tramos de acceso a la mina.

El acceso a la mina se realiza desde Rancagua por una carretera asfaltada de 60 km llamada "Carretera del Cobre Eduardo Frei Montalva" (ex carretera El Cobre), la que une la ciudad de Rancagua con la localidad de Colón Alto. La carretera está dividida en 5 tramos. El tramo 1 es de uso público hasta el control de acceso al yacimiento (Barrera Maitenes). Los tramos siguientes son caminos privados y su circulación está restringida.

El ingreso a las instalaciones de producción se realiza mediante buses desde la localidad de Colón Alto. En ocasiones, el acceso hacia el interior de la mina es por medio de un túnel de 8 km de largo, utilizando un ferrocarril eléctrico que comunica con el nivel Teniente 8 (1983 m s.n.m.). El ingreso a los distintos niveles de la mina se lleva a cabo a través de piques principales (Pique B, Pique C y Pique 2) y rampas, las que permiten el tránsito de vehículos motorizados a los diferentes frentes de desarrollo.



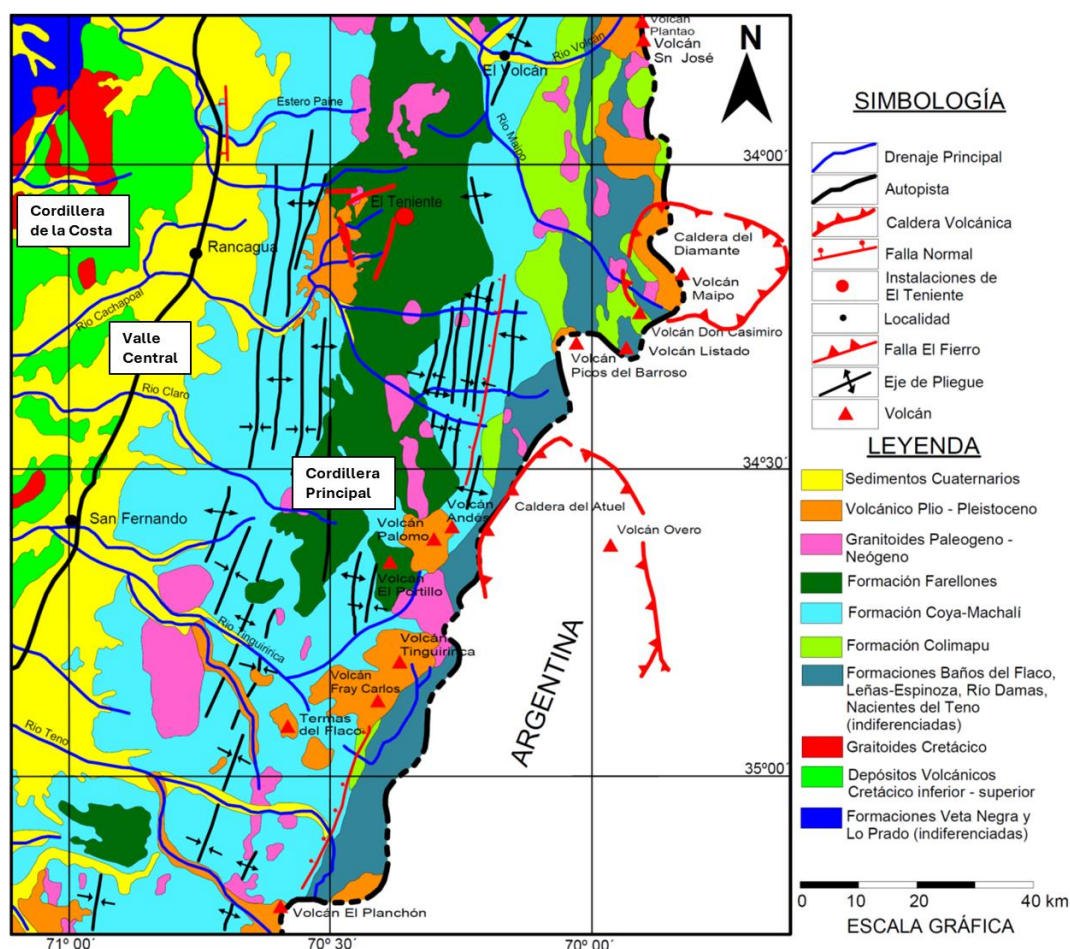
**Figura 1.3:** Ubicación y accesos desde la ciudad de Rancagua hacia Yacimiento El Teniente (Tomado de León, 2016)



## CAPÍTULO II. MARCO GEOLÓGICO

### 2.1 Geología Regional.

La Cordillera de Chile Central, comprendida entre los 33°45' y 34°45' de latitud sur, está constituida principalmente por potentes secuencias de rocas volcánicas intercaladas con depósitos marinos y continentales estratificados (Figura 2.1). Estas secuencias se encuentran intruidas por cuerpos plutónicos e hipabisales de edad cenozoica. Dichas unidades meso–cenozoicas representan la expresión del Ciclo Orogénico Andino (Klöhn, 1960).



**Figura 2.1:** Mapa geológico Regional de la franja de la Cordillera de los Andes de Chile Central (modificado de Charrier et al., 1996, tomado de De los Santos, 2011).



### 2.1.1 Rocas Estratificadas

Diversos autores (Klöhn, 1960; Charrier, 1973, 1981; González, 2000) definen para la franja cordillerana las siguientes formaciones, descritas de la más antigua a la más reciente:

- Formación Nacientes del Teno (Bajociano–Kimmeridgiano inferior): presenta una escasa manifestación en el sector de mina El Teniente. Klöhn (1960) la describe como un conjunto de rocas sedimentarias clásticas depositadas durante el ciclo marino Bajociano–Kimmeridgiano inferior, reconocidas en la parte oriental de la región (Figura 2.1). La localidad tipo se ubica en la hoya hidrográfica del río Teno. Según Davidson y Vicente (1973), está compuesta por dos miembros: (a) el Miembro Superior Evaporítico, con un espesor de 500 a 600 m, que disminuye hacia el este; y (b) el Miembro Inferior Detrítico y Calcáreo. Esta formación subyace concordantemente a la Formación Río Damas (Tabla 2.1).
- Formación Río Damas (Kimmeridgiano superior–Titoniano inferior): definida por Klöhn (1960) como una sucesión de rocas sedimentarias clásticas continentales y depósitos volcánicos de gran espesor, depositados en un ambiente continental durante un ciclo regresivo. Se distribuye a lo largo de una franja norte–sur en el margen oriental de la región (Figura 2.1), con un espesor medio de 3000 m en el río Damas. Se dispone en concordancia sobre la Formación Nacientes del Teno y bajo la Formación Baños del Flaco, y limita localmente por falla con la Formación Leñas–Espinoza (Charrier, 1973).
- Formación Leñas–Espinoza (Kimmeridgiano superior–Titoniano inferior): descrita por Klöhn (1960) y redefinida por Charrier (1981), consiste en una secuencia de rocas sedimentarias detríticas y calcáreas de carácter transgresivo, con un espesor de 1200 m. Se distribuye en afloramientos restringidos de orientación norte–sur (Figura 2.1). Sus contactos se establecen con un límite inferior desconocido y un techo en transición gradual hacia la Formación Baños

del Flaco. Presenta contactos discordantes con la Formación Coya–Machalí y locales fallas con la Formación Río Damas, considerada contemporánea (Tabla 2.1).

- Formación Baños del Flaco (Titoniano–Neocomiano): definida por Klöhn (1960) como una sucesión de rocas sedimentarias marinas con intercalaciones detríticas y volcánicas. Charrier (1981) incorporó a esta formación los estratos superiores de la Formación Leñas–Espinoza. Su localidad tipo se ubica en el valle del río Tinguiririca. Presenta un espesor medio de 1000 m y afloramientos restringidos con orientación norte–sur, truncados al norte por un complejo volcánico más moderno (Figura 2.1). Sobreyace concordantemente a la Formación Río Damas e infrayace concordante a la Formación Colimapu, aunque en algunos sectores se observa erosionada y cubierta discordantemente por la Formación Coya–Machalí. En general, esta unidad está intensamente deformada (Charrier, 1981). Los depósitos marinos de la Formación se asocian al segundo ciclo de trasgresiónregresión que cubrió el ámbito de la Cordillera Principal. Estas características se repiten a lo largo de todo el margen occidental de la Cordillera Principal, en donde la Formación recibe diferentes nombres como Formación Lo Valdés en el sector metropolitano (Thiele, 1980), y Formación San José (Aguirre, 1960), en el sector del Río Aconcagua.
- Formación Colimapu (Barremiano–Albiano): Definida por Klöhn (1960) en la quebrada homónima, corresponde a un conjunto de rocas estratificadas continentales. Se dispone concordantemente sobre la Formación Baños del Flaco y, localmente, bajo la Formación Coya–Machalí en discordancia erosiva (Tabla 2.1). Esta unidad se compone de dos miembros:
  - Miembro Inferior Sedimentario, constituido por areniscas finas epiclásticas y calizas micríticas, con un espesor aproximado de 1 500 m.
  - Miembro Superior Volcánico, conformado por tobas lítico-cristalinas, depósitos de lapilli e ignimbritas, con un espesor cercano a 1 600 m (Charrier, 1981).

Los depósitos se originaron a partir del segundo ciclo sedimentario continental, vinculado a un proceso de alzamiento durante el Barremiano–Albiano, que culminó con una fase de plegamiento de las unidades del Senoniano durante la fase Subhercínica (Charrier, 1973).

- Formación Coya–Machalí (Eoceno superior–Mioceno inferior): Klöhn (1960) la definió como un conjunto de rocas volcánicas continentales, efusivas y piroclásticas de composición ácida, con intercalaciones lacustres. La localidad tipo se ubica en la vertiente norte de la Cordillera Principal, entre los poblados de Machalí y Coya, al este de Rancagua. Aflora en dos franjas orientadas norte–sur, separadas por afloramientos de la Formación Farellones (Charrier et al., 1994).
  - La franja occidental corresponde a lavas afaníticas, porfídicas y microfaneríticas andesíticas.
  - La franja oriental corresponde a rocas piroclásticas con intercalaciones de sedimentitas finas.

El espesor estimado es de 3 200 m. Esta formación, correlacionable con la Formación Abanico, sobreyace discordantemente a las formaciones Baños del Flaco, Leñas–Espinoza, Río Damas y Nacientes del Teno, e infrayace en discordancia angular a la Formación Farellones (Tabla 2.1). Dataciones  $Ar^{40}/Ar^{39}$  y registros fósiles indican una edad que abarca desde el Eoceno superior hasta el Mioceno inferior (Charrier et al., 1994).

- Formación Farellones (Mioceno tardío): Se trata de una potente secuencia, de al menos 2 400 m de espesor, predominantemente volcánica. Está constituida por lavas intermedias a ácidas, rocas piroclásticas e intercalaciones sedimentarias lagunares, tales como areniscas, lutitas, tufitas y capas delgadas de caliza. Estas unidades se disponen plegadas suavemente o subhorizontales (Charrier, 1983). La Formación Farellones se superpone en discordancia angular sobre la Formación Coya–Machalí (Tabla 2.1) y localmente se encuentra cubierta por la Formación Colorado–La Parva (Thiele, 1980). Sus afloramientos presentan distribución norte–sur y se limitan al este y oeste por la Formación Coya–Machalí (Figura 2.1).

Los depósitos son producto de intensa actividad volcánica, predominantemente andesítica, centrada en la actual franja de afloramientos. Dataciones K–Ar sitúan la formación en el Mioceno medio y tardío (Charrier, 1983).

- Formación Colón–Coya (Plioceno–Pleistoceno): Reconocida inicialmente por Enrione (1972) en el área industrial de Colón y el poblado de Coya, fue posteriormente definida como formación por Gómez (2001). Está compuesta por lahares de granulometría heterogénea, en matriz arcillo–cinerítica, con intercalaciones locales de niveles de ceniza, coladas andesíticas de escaso espesor y gravas fluviales. Su potencia varía desde unos pocos centímetros hasta 150 m. Sobreyace en disconformidad a las formaciones Coya–Machalí y Farellones (Tabla 2.1), mientras que su techo corresponde a la superficie de erosión actual. Su edad, determinada por dataciones radiométricas K/Ar en lavas, se ubica entre el Plioceno y el Pleistoceno (Charrier & Munizaga, 1979; Cuadra, 1986).
- Depósitos no consolidados (Plioceno–Pleistoceno): corresponden a depósitos aluviales (fluviales, lacustres y glaciofluviales), glaciares, de escombros y derrumbes (Charrier, 1983). Los sedimentos aluviales, coluviales y los depósitos de relleno de valle se asocian a los cursos de agua actuales, representados en la región por los ríos Cachapoal, Maipo, Teno y Blanco.

**Tabla 2.1:** Resumen de las Formaciones de los Andes de Chile Central. Modificado de Charrier et al (1996), tomado de (De los Santos, 2011).

| FORMACIÓN                              | LITOLOGÍA                                                                        | ESPESOR (m) | EDAD                                       | AUTOR        | OBSERVACIONES                                                   |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------|
| Colón-Coya                             | Lahares, coladas de lavas andesíticas, dacíticas y piroclastos                   | 150         | Plioceno Superior-Reciente                 | Gómez (2001) |                                                                 |
| <b>Discordancia del 3° Plegamiento</b> |                                                                                  |             |                                            |              | Fase del Mioceno-Plioceno                                       |
| Farellones                             | Depósitos continentales, lavas dacíticas y depósitos piroclásticos               | 2400        | Mioceno (25-7 Ma)                          | Klöhn (1960) |                                                                 |
| <b>Discordancia del 2° plegamiento</b> |                                                                                  |             |                                            |              | Fase del Oligoceno Inferior o del Mioceno Inferior              |
| Coya-Machalí                           | Depósitos volcanoclásticos y depósitos detríticos                                | 3200        | Paleógeno-Neógeno Inferior (62.3-164 Ma)   | Klöhn (1960) | Correlacionable con la Formación Abanico                        |
| <b>Discordancia del 1° plegamiento</b> |                                                                                  |             |                                            |              | Fase del Cretácico Superior                                     |
| Colimapu                               | Depósitos sedimentarios rojos (M. Inferior) y depósitos volcánicos (M. Superior) | 2000-3000   | Barremiano-Albiano                         | Klöhn (1960) |                                                                 |
| Baños del Flaco                        | Sedimentarias marinas fosilíferas                                                | 2000        | Titoniano-Neocomiano                       | Klöhn (1960) | Correlacionable a la Formación Lo Valdés                        |
| Leñas- Espinoza                        | Rocas piroclásticas depósitos turbidíticos                                       | 1200        | Kimmeridgiano Superior- Titoniano Inferior | Klöhn (1960) | Concordante y en contacto                                       |
| Río Damas                              | Areniscas rojas contienen- tales, conglomerados y lavas                          | 3000        | Kimmeridgiano Superior- Titoniano Inferior | Klöhn (1960) |                                                                 |
| Nacientes del Teno                     | Areniscas marinas y calizas, 100-200 m de yeso (M. Superior)                     | 600-1000    | Bajociano-Kimmeridgiano Inferior           | Klöhn (1960) | En Los Andes de Chile Central no afloran estratos más antiguos. |

## 2.1.2 Rocas Intrusivas

Los cuerpos intrusivos presentes en la región son de carácter plutónico e hipabisal, con variaciones en composición, textura y dimensiones. Se disponen preferentemente con una alineación norte-sur e intruyen en las formaciones del Mioceno (Figura 2.1). Su composición incluye granodioritas con hornblenda y biotita, pórfidos diorítico-andesíticos, monzonitas, monzodioritas y pórfidos dacíticos. Estos se presentan en diferentes formas, tales como stocks, batolitos, grandes filones, así como cuerpos menores (diques, filones y apófisis) (Charrier, 1981).

Stewart y Araya (1972) asignaron a estos cuerpos una edad relativa posterior a la Formación Farellones, basándose en relaciones de contacto con las rocas encajantes y en

su alineación. Por su parte, Godoy (1993) postuló una edad miocena. Sin embargo, dataciones radiométricas  $Ar^{40}/Ar^{39}$  realizadas por Drake et al. (1982), Gana y Wall (1997), y Kurtz et al. (1997), arrojaron un rango entre 34,3 y 5,5 Ma. En concordancia, Kurtz et al. (1997) y Falcón y Rivera (1998) propusieron que la actividad magmática se habría extendido desde el Oligoceno superior hasta el Mioceno superior, consistente con los rangos temporales de las formaciones Abanico y Farellones.

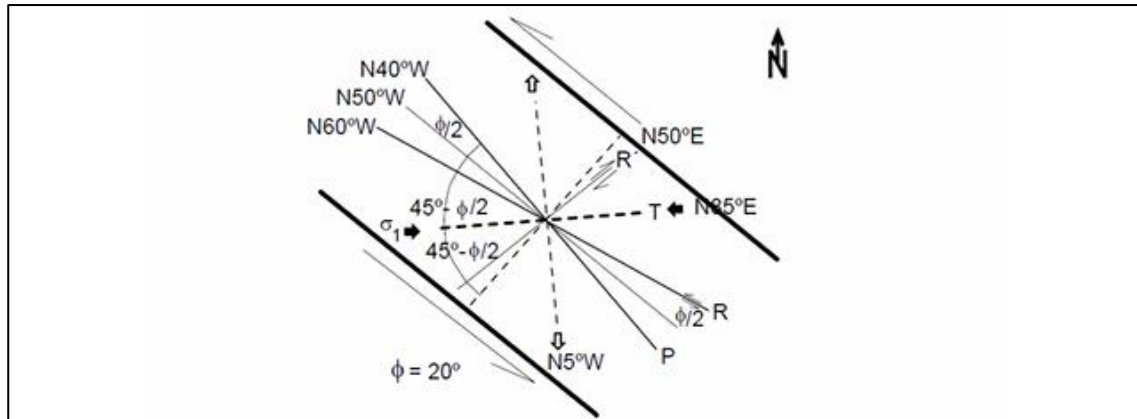
De acuerdo con las dataciones de Kurtz et al. (1997), los intrusivos se diferencian en:

- Complejo Plutónico Antiguo: Mioceno inferior, con edades de  $21,6 \pm 4,9$  Ma y  $16,2 \pm 1,2$  Ma.
- Complejo Plutónico Teniente: subdividido en dos unidades, la primera con edades de  $12,4 \pm 2,5$  Ma y  $11,3 \pm 0,3$  Ma (Mioceno medio), y la segunda con edades de  $8,8 \pm 0,1$  Ma y  $7,7 \pm 0,1$  Ma (Mioceno tardío).
- Complejo Plutónico Joven: intrusivos datados en  $6,6 \pm 0,1$  Ma y  $5,5 \pm 0,2$  Ma (Mioceno tardío).

### 2.1.3 Estructuras.

Los rasgos estructurales de Chile Central (latitudes  $33^{\circ}$ – $39^{\circ}$  S) muestran correlación con estructuras de orientación NW y NNW, generadas por procesos tecto–magnéticos del Paleozoico y Mesozoico (Godoy & Lara, 1994). Estas estructuras han experimentado sucesivas reactivaciones durante el Meso–Cenozoico (Rivera & Cembrano, 2000), cuyos movimientos laterales explicarían la distribución de franjas de centros volcánicos e intrusivos del Mioceno (Falcón & Rivera, 1998).

A escala regional destaca una zona de control tectónico de transcurrencia sinistral con rumbo  $N50^{\circ}W$ , coincidente con la zona de falla Río Blanco–Codegua, relacionada con un sistema de Riedel. Ello genera fracturas sintéticas–sinestrales tipo R ( $N60^{\circ}W$ ) y fracturas antitéticas–dextrales tipo R' ( $N50^{\circ}E$ ) (Figura 2.2) (Falcón & Rivera, 1998).



**Figura.2.2:** Modelo de estructuras tipo Riedel para una zona de transcurrancia sinistral de rumbo N50°W que coincide con la Zona de Falla Río Blanco-Codegua (tomado de Rivera y Falcón,2000).

#### Rasgos estructurales principales:

- Pliegues: Klöhn (1960) y Charrier et al. (1994) describen anticlinales y sinclinales de rumbo norte-sur, con suave buzamiento hacia el sur y variaciones locales entre N30°W y N30°E (Figura 2.2). Estos pliegues presentan continuidad entre segmentos limitados por fallas N30°W (Rivera & Falcón, 2000). En el área de la mina predominan pliegues suaves que afectan a la Formación Farellones, con flancos de inclinación promedio de 10°–15° y ejes de rumbo NNW–SSE (Gómez, 2001).
- Fallas: Rivera y Falcón (2000) identifican siete zonas de falla N30°W, visibles en la Cordillera de la Costa y en los Andes, aunque obliteradas en parte en la Depresión Intermedia. En el entorno de la mina destacan las fallas Piuquencillo, El Azufre y Juanita (Rivera & Cembrano, 2000), que truncan los pliegues de la Formación Farellones. Charrier (1981) describió fallas inversas en la franja oriental de la Formación Coya-Machalí, favorecidas por intercalaciones incompetentes, así como fallas normales asociadas al alzamiento Plio-Cuaternario.

- Discordancias: Se reconocen tres fases compresivas expresadas en discordancias de plegamiento y erosión (Klöhn, 1960). La primera, en el Cretácico superior, afecta a las formaciones Farellones y volcánicas terciarias–cuaternarias. La segunda, atribuida al Oligoceno–Mioceno inferior, genera la depositación discordante de la Formación Coya–Machalí sobre Colimapu (Charrier et al., 1996). La tercera, en el Mioceno–Plioceno, plegó suavemente la Formación Farellones y fue seguida por la depositación discordante de la Formación Colón–Coya (Tabla 2.1).

#### 2.1.4 Marco Geotectónico

La actual Cordillera de los Andes se configura por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Mina El Teniente se ubica en el flanco occidental de la Cordillera Principal (véase Figura 1.2, Capítulo I), compuesta por rocas volcánicas y volcanoclásticas intercaladas con secuencias marinas y continentales, depositadas desde el Paleozoico tardío hasta el Cenozoico. Estas secuencias han sido intruidas por cuerpos plutónicos e hipabisales de edad cenozoica, constituyendo unidades meso–cenozoicas asociadas al Ciclo Orogénico Andino (Klöhn, 1960).

Un rasgo destacado de la Cordillera Principal es el acortamiento cortical, facilitado por el empuje y plegamiento. El Valle Central, una depresión de más de 1 000 km de longitud orientada de norte a sur y rellena con sedimentos cuaternarios, también evidencia un acortamiento significativo. Esta depresión, limitada al oeste por la Cordillera de la Costa (Figura 1.2), constituye un ejemplo relevante de la tectónica de placas en acción. La Cordillera de la Costa está compuesta por rocas sedimentarias y volcánicas del Paleozoico tardío, intruidas por batolitos y afectadas por una compleja historia de deformación.

La génesis de mina El Teniente se asocia a la evolución tectónica del margen continental sudamericano y, en particular, a la subducción de la Dorsal de Juan Fernández. El depósito se sitúa al este de la intersección entre la dorsal y la fosa chilena, en el límite



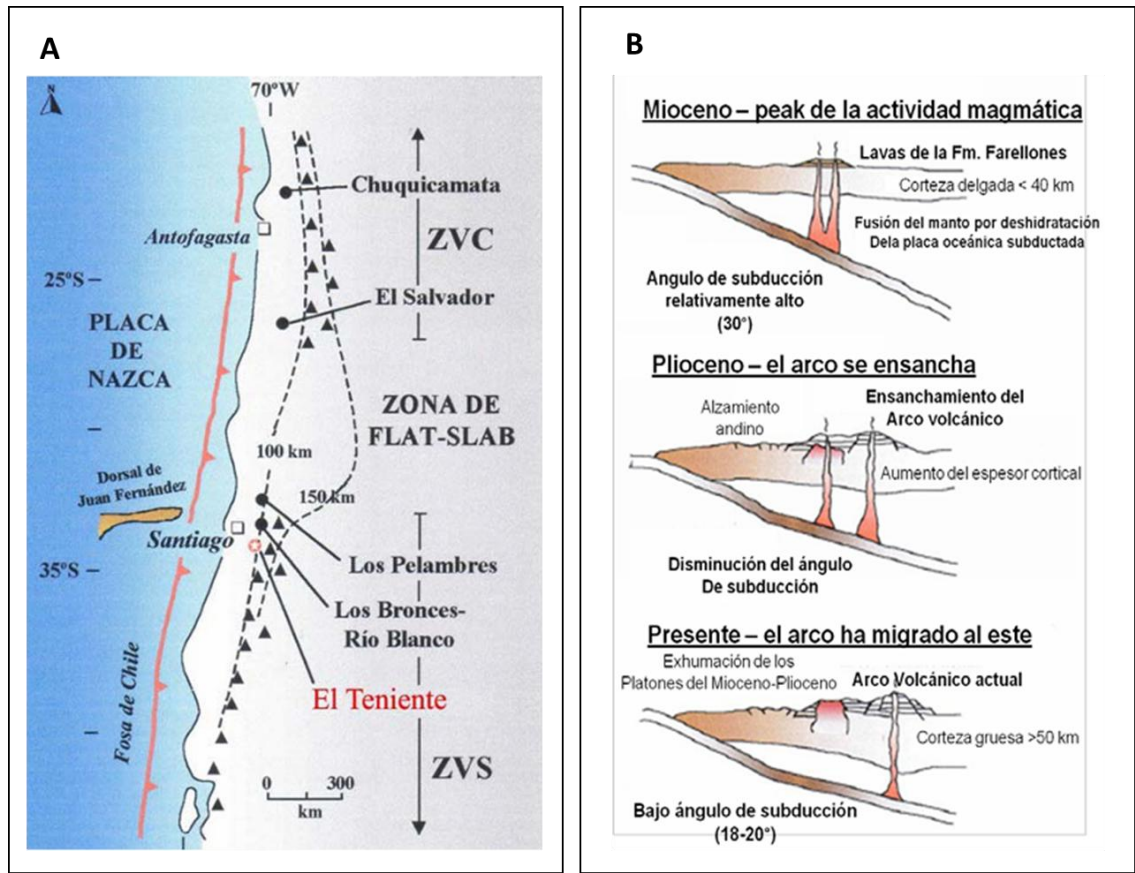
entre la Zona Volcánica Sur (ZVS) y el segmento andino de bajo ángulo o flat slab (Figura 2.3a), caracterizado por la ausencia de volcanismo moderno (Kurtz et al., 1997).

La segmentación del arco andino en Chile central se inició en el Mioceno medio, producto de la disminución del ángulo de subducción al norte de los 33°S, asociada a la subducción activa de la Dorsal de Juan Fernández (Pilger, 1981). Este proceso provocó un ensanchamiento del arco magmático y la migración del frente volcánico hacia el este en el Mioceno tardío, con la consiguiente extinción de la actividad magmática durante el Plioceno (Kay & Kurtz, 1995; Figura 2.3b). A su vez, se produjo un alzamiento ligado a la deformación y al engrosamiento cortical bajo la cadena volcánica al norte de los 33°S (Kay et al., 1991).

Al sur de los 33°S, el ángulo de subducción disminuyó de manera contemporánea al desarrollo del segmento flat slab, aunque en menor magnitud, lo que también ocasionó la migración del frente volcánico hacia el este y su establecimiento en la actual Cordillera de los Andes. En esta latitud, el proceso estuvo acompañado de deformación, engrosamiento cortical y alzamiento de la cadena volcánica (Skewes & Stern, 1994; Figura 2.3b).

Tres de los yacimientos de pórfido cuprífero más importantes de Chile: El Teniente, Río Blanco, Los Bronces y Los Pelambres, se localizan en la zona central del país, en el límite entre el segmento flat slab y la Zona Volcánica Sur. Su génesis se vincula al engrosamiento cortical y al solevantamiento derivados de la disminución progresiva del ángulo de subducción de la placa de Nazca entre el Mioceno y el Reciente (Figura 2.3b). El rápido alzamiento y exhumación de los sistemas plutónicos profundos habría generado la exsolución de fluidos magmáticos ricos en cobre, responsables de la mineralización tipo pórfido cuprífero (Skewes & Stern, 1995).

Estos depósitos muestran una disminución en edad hacia el sur, lo que se interpreta como resultado de la migración hacia el sur del foco de subducción de la Dorsal de Juan Fernández (Stern & Skewes, 1997).



**Figura 2.3:** a) Ubicación del segmento de “flat slab” que separa la Zona Volcánica Central (ZVC) de la Zona Volcánica Sur (ZVS). Los triángulos indican el frente volcánico activo en la actualidad y los círculos la ubicación de los grandes yacimientos de pórfidos cupríferos del Mioceno Tardío (Los Pelambres, Río Blanco- Los Bronces y El Teniente), y otros más antiguos (Paleógeno), ubicados en el norte de Chile. Las líneas segmentadas indican la profundidad de la Zona de Benioff. (Tomados de Hitschfeld, 2006). b) Perfiles transversales que muestran la evolución tecto-magmática de los Andes de Chile Central entre el Mioceno y el Presente, a la latitud de la porción septentrional de la Zona Volcánica Sur (34°S) (Tomado de Skewes y Stern, 1994).

## 2.2 Geología Distrital.

El distrito geológico está dominado por rocas volcánicas del Mioceno, correspondientes a la Formación Farellones, localmente intruidas por rocas ígneas de composición intermedia (Kay et al., 1991). En el área del yacimiento, la Formación Farellones fue intruida primero por las rocas del Complejo Máfico El Teniente y posteriormente por cuerpos félsicos relativamente pequeños (Ossandón, 1974; Camus, 1975; Skewes, 2000; Figura 2.4). En los contactos entre estos intrusivos y las rocas

máficas se desarrollan cuerpos discretos de brechas ígneas y brechas magmático–hidrotermales de amplia distribución. A su vez, las rocas del Complejo de Brecha Braden, que forman una pipa, intruyen a las unidades anteriores, modificando totalmente sus rasgos primarios y secundarios (Camus, 1975). Finalmente, diques de lamprófido cortan a todas las rocas previas, marcando el término de los eventos de mineralización sulfurada de cobre y molibdeno (Cuadra, 1986; Skewes et al., 2002).

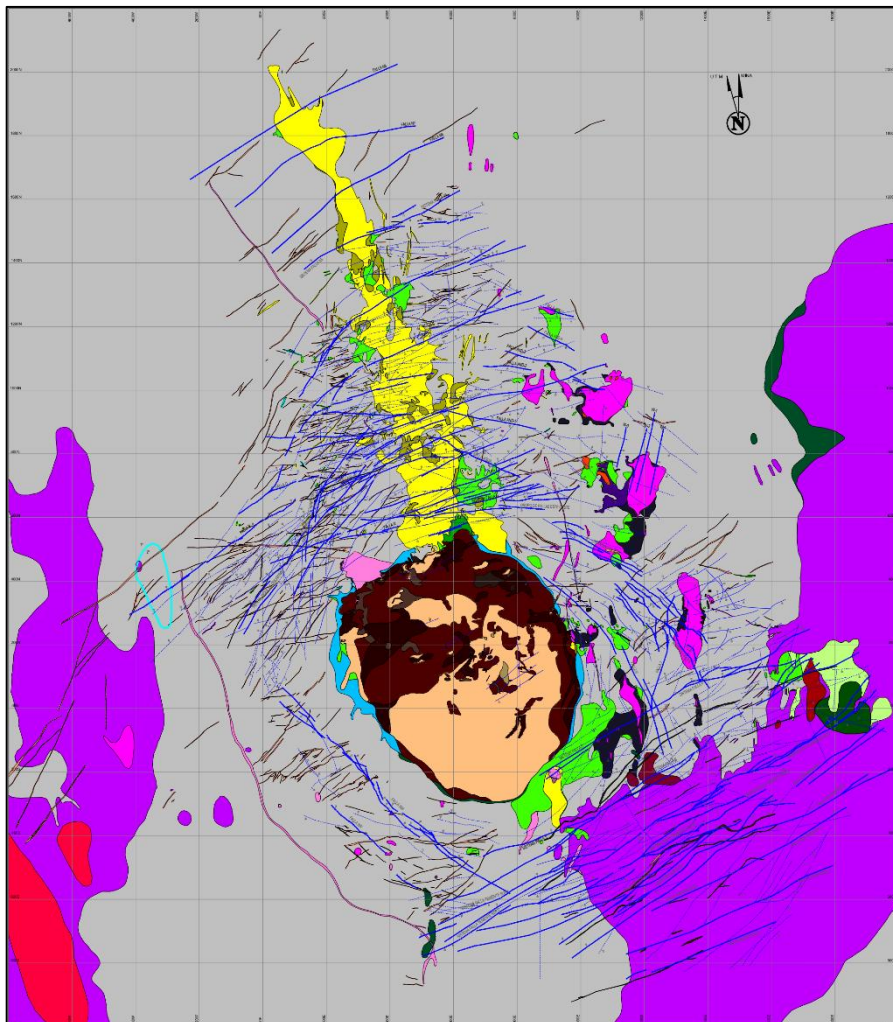
El Teniente corresponde a un megayacimiento hipógeno de cobre y molibdeno. El sector actualmente explotado se localiza dentro de la isolínea de 0,5% de Cu (Figura 2.2.1), con una producción histórica de 12 500 Mt, leyes promedio de 0,63% Cu y 0,02% Mo, constituyendo la mayor concentración de cobre en un único depósito de la corteza terrestre (Sillitoe & Perelló, 2005). La mineralización se aloja principalmente en sulfuros hipógenos, como calcopirita, bornita y molibdenita. En la zona de enriquecimiento secundario, se reconocen calcosina como mineral característico, y subordinadamente covelina, cobre nativo y cuprita (Cuadra, 1986).

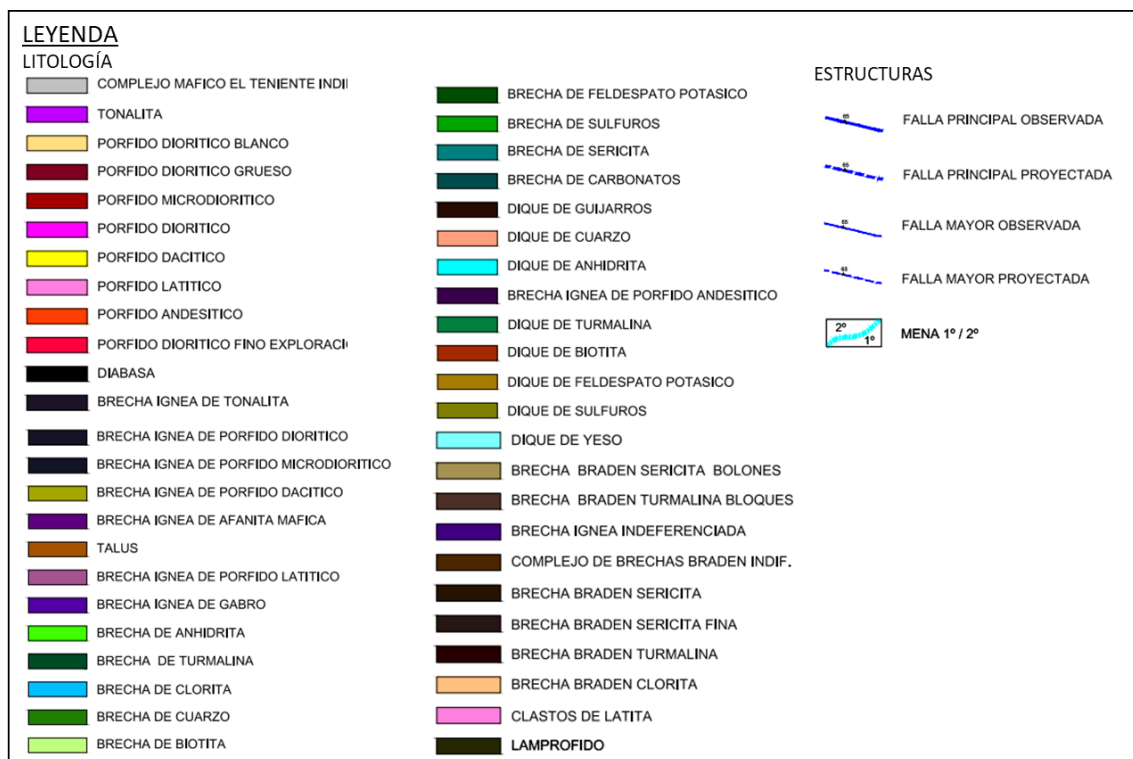
El depósito se formó a partir de sucesivos eventos de deformación, intrusión, mineralización y alteración, superpuestos a lo largo de al menos 5,3 Ma, concentrándose los recursos en un período de 1,2 Ma (Maksaev, 2002; Maksaev et al., 2004; Cannell, 2004). Tradicionalmente, El Teniente se clasifica como un yacimiento de tipo pórfido cuprífero, caracterizado por al menos cinco episodios intrusivos félsicos genéticamente relacionados, cada uno acompañado de alteración hidrotermal (Maksaev et al., 2004). Sin embargo, Skewes et al. (2002) propusieron una hipótesis alternativa, interpretándolo como un depósito de megabrecha generado por la exsolución de fluidos magmáticos en plutones en enfriamiento. La formación de vetas tardías, asociada al emplazamiento de brechas más jóvenes e intrusivos félsicos, habría producido alteración sericítica, que en algunos casos adicionó cobre y en otros redistribuyó o eliminó la mineralización preexistente (Skewes et al., 2002).

La mineralización de cobre y molibdeno ocurre principalmente en vetillas (70%), formadas por relleno y sellado de grietas producto de la deformación, alojadas

principalmente en rocas subvolcánicas máficas. El 30% restante se concentra en el cemento de brechas magmático–hidrotermales, compuestas por biotita, anhidrita, cuarzo y turmalina, y en menor proporción en disseminaciones en la matriz de intrusivos félsicos (Cuadra, 1986).

En el área del yacimiento se reconocen tres sistemas estructurales preferenciales: NS, NE y NNW (este último con continuidad distrital). Estos sistemas se manifiestan en la traza de los contactos entre unidades, en fallas y zonas de cizalle, y en la geometría y distribución de vetas y vetillas. Su conjugación, junto con las características del macizo rocoso y la explotación minera, condiciona el fracturamiento primario y la estabilidad de las labores subterráneas.





**Figura 2.4:** Geología simplificada mostrada a través del Nivel Teniente 7 (2042 m cota mina.) del mina El Teniente modificada de la base de datos del yacimiento.

### 2.3.1 Unidades Litológicas.

Dentro del distrito, la Formación Farellones es intruída y seccionada por las siguientes unidades litológicas:

#### 2.3.1.1 Complejo Máfico El Teniente (CMET)

El término Complejo Máfico El Teniente (CMET) se aplica a un conjunto de rocas melanocráticas del Mioceno tardío (Munizaga et al., 2002; Charrier et al., 2002). Corresponde a un complejo subvolcánico de composición básica y afinidad toleítica (Skewes, 1997), compuesto por gabros, diabasas y pórfidos gabroides, además de brechas de biotita (Burgos, 2002; Skewes et al., 2002). En el pasado estas litologías fueron denominadas erróneamente “Andesitas de la Mina” (Camus, 1975; Ojeda et al., 1980; Cuadra, 1986). El concepto de Complejo Máfico fue introducido por Skewes et al. (2002).

El CMET alcanza una extensión vertical de más de 2 km, emplazándose en forma de lacolito dentro de la Formación Farellones (Skewes & Arévalo, 1997; Munizaga et al., 2002). Es la unidad litológica más ampliamente distribuida en el yacimiento (Figura 2.4) y aloja aproximadamente el 80% de la mineralización (Camus, 1975). Se caracteriza por su color gris–pardo a negro, producto de una intensa alteración potásica, en la que la biotita constituye el mineral predominante (Villalobos, 1975). Estas rocas presentan texturas afaníticas a porfídicas, con fenocristales de plagioclasa (Cuadra, 1986).

Estudios petrográficos realizados por Burgos (2002) confirmaron que parte del complejo corresponde a diabasas de textura porfídica, con variaciones en el tamaño de fenocristales de plagioclasa. Las texturas de grano fino se asocian a los márgenes del intrusivo, mientras que las de grano grueso se concentran hacia el núcleo. En general, el CMET está constituido por plagioclasa, relictos de piroxeno y una fuerte alteración biotítica (Burgos, 2002).

La intensa alteración hidrotermal, la mineralización de cobre–molibdeno y la brechización obliteran en gran medida las características texturales originales de las rocas. Los principales minerales de alteración son biotita, anhidrita, cuarzo, clorita, sericita, actinolita y turmalina (Skewes, 2002).

Las diabasas y diques gabroides, que conforman (CMET), habrían sido emplazadas durante el Mioceno. En este período una cuenca volcano-tectónica fue generada en el Arco Andino, por la extensión a partir de un sistema de fallas de orientación NNW, cerrándose en el Mioceno Tardío (Godoy, 1993; Falcón y Rivera, 1998).

#### *2.3.1.2 Complejo Félsico*

Define a un conjunto de intrusivos subverticales de edad Mioceno a Plioceno que se presentan formas apófisis relativamente tabulares y diques. Con afinidad calcoalcalina y contenidos mayores al 56% de SiO<sub>2</sub> (Rabía y otros, 2001). De acuerdo a “Estándares y

Metodologías de Trabajo para Geología de Minas Actualización Año 2003” (referencia interna SGL-I-123/2003), las litologías definidas se resumen en la Tabla 2.3 (Anexo I), y estas son:

- Microgranodiorita Porfídica: Antiguamente denominado Pórfido Teniente, Dacita Pórfídica o Dacita (Cuadra, 1986; Rojas, 2002; Skewes y otros, 2002). Corresponde a un cuerpo intrusivo tabular, subvertical y de orientación general norte-sur, que se ubica en la parte norte del yacimiento (Figura 2.4). Intruye al Complejo Máfico El Teniente, presentando contactos nítidos e irregulares, brechosos o bien transicionales. Hacia el sur, el cuerpo se encuentra truncado por la Chimenea Braden, en cuyo contacto se desarrolla una brecha con fragmentos del pórfido y matriz de turmalina.

La micro granodiorita porfídica es de color gris claro a blanco y se distinguen dos variedades texturales: la porfídica idiomorfa y la porfídica hipidiomorfa (Ossandón, 1974; Rojas, 2002), con fenocristales de oligoclasa, biotita y cuarzo (Cuadra, 1986). Edades U/Pb en circón, indican que la cristalización del intrusivo ocurrió hace  $5,28 \pm 0,10$  Ma (Maksaev y otros, 2004).

- Tonalita: También conocida como Diorita Sewell (Skewes y otros, 2002), se presenta en el sector SE del yacimiento (Figura 2.4) como un gran cuerpo intrusivo que se encuentra intruyendo al Complejo Máfico El Teniente. Corresponde a un stock de 200 m<sup>2</sup> ubicado en el sector SE de la pipa Braden y presenta un núcleo fanerítico que grada a porfídico hacia el exterior del intrusivo (Faunes, 1981).

Adicionalmente, como parte de la alteración cuarzo-sericítica de la Tonalita en el yacimiento se han definido los “Pórfido Diorítico Blanco” y “Pórfido Diorítico Grueso”, los que se ubican en el sector sur de la mina y corresponden a facies de Muestran una textura porfídica que varía de grano medio a grueso característico. Dataciones <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar en biotita, indican una edad de  $5,47 \pm 0,12$  Ma a  $5,63 \pm 0,12$  Ma (Maksaev y otros, 2004).

- **Pórfido Diorítico:** Se manifiesta como una serie de stocks y diques menores, alineados en una dirección N30°W en la parte norte y central del yacimiento, estos últimos antiguamente denominados Diorita Central (Figura 2.4), poseen una gran extensión en la vertical. Dataciones radiométricas U/Pb en circón, indican una edad de cristalización del intrusivo de  $6,11 \pm 0,13$  Ma a  $6,28 \pm 0,16$  Ma (Maksaev y otros, 2004).
- **Pórfido Microdiorítico:** Corresponde a una diorita de grano fino, con abundantes xenolitos de “andesita” y cúmulos de biotita (Arredondo, 1994). Antiguamente conocido como Pórfido “A” (Spröhnle, 1990).
- Posee contactos con la Tonalita y con el Complejo Máfico El Teniente (Figura 2.4), y genera un volumen importante de brechas ígneas e hidrotermales que muestran altas leyes de cobre. Edades U/Pb en circón, indican que la cristalización de este cuerpo ocurrió hace  $6,46 \pm 0,11$  Ma (Maksaev y otros, 2004).

### 2.3.1.3 Complejo Brecha Braden

Es una chimenea volcánica (pipa) producida por la salida explosiva de gases que fragmentan y quiebran la roca de caja rellenando el conducto con fragmentos angulosos. La forma de esta chimenea es la de un cono invertido subcircular de 1.200 m de diámetro y una extensión en profundidad reconocida de más de 2.150 m, desde la superficie (3.140 m s.n.m.).

La edad para la Chimenea se estima cercana a la fase tardimagmática del yacimiento (4,7 a 4,5 Ma) (Cuadra, 1986). Su flanco este, es prácticamente vertical pero los restantes sectores se inclinan 60° a 70° hacia el centro de la misma. Dentro del complejo de brechas se encuentran dos grandes unidades geológicas:

- *Unidad Brecha Braden:* Denominada también “concreto” (Cuadra, 1986), está constituida por brechas con fragmentos redondeados a subangulosos de mala selección de composición principalmente andesítica, diorítica, dacítica y latítica de tamaños variables. Posee en general una baja ley mineral, pero presenta una mineralización y alteración hipógena propia, en una matriz de polvo de roca y un



cemento de sericita con cantidades menores de turmalina, calcita y sulfuros, principalmente pirita.

- *Unidad Brecha marginal*: Tiene forma de anillo y rodea a la unidad brecha Braden, con un espesor promedio de 50 m a 60 m, disminuyendo en profundidad, hasta unos 10 m (Cuadra, 1986) y el contacto con la unidad brecha Braden es gradacional, el cual se reconoce por la variación en porcentaje de turmalina (Ojeda y otros 1980). Está constituida por fragmentos angulosos a subangulosos de variada litología, con grados variables de alteración cuarzo-sericita-clorita y con cantidades menores de anhidrita, yeso, sulfuros y sulfosales de la serie tenantita-tetraedrita. El cemento corresponde a turmalina y cuarzo principalmente, y menores cantidades de anhidrita, yeso, carbonatos, sulfuros y minerales de la serie tenantita-tetraedrita. La mineralogía de mena corresponde a calcopirita, bornita, tenantita - tetraedrita y pirita.

#### *2.3.1.4 Cuerpos de Brechas*

Las brechas en El Teniente son clasificadas de acuerdo con los minerales que componen su matriz. De esta manera Arredondo (1994) reconoció varios cuerpos de brecha:

- Brechas de anhidrita: Se ubican en el sector NE y SE del yacimiento. Los fragmentos son polimícticos de rocas máficas y félsicas alteradas. El cemento es principalmente de anhidrita con menores cantidades de cuarzo, calcopirita, pirita y molibdenita. La formación de estos cuerpos sería sincrónica con la etapa de alteración y mineralización tardimagmática.
- Brechas de turmalina: Corresponde a una brecha polimíctica donde el componente más abundante en el cemento es la turmalina acompañada de anhidrita, cuarzo, calcopirita, bornita y pirita. Los fragmentos corresponden a rocas máficas y félsicas alteradas. Los cuerpos de brecha de turmalina, se concentran preferentemente en el sector norte de la Chimenea de Brechas Braden.

La brechización con cemento de turmalina y anhidrita se habría producido entre las etapas de alteración y mineralización tardimagmática e hidrotermal principal y

la adición de turmalina se asociaría a la etapa hidrotermal principal. Las brechas de turmalina y cuarzo, engloban solo fragmentos de rocas máficas, cuya formación se relaciona con la etapa de alteración y mineralización tardía.

- Brechas de biotita: El cemento es de biotita y en forma subordinada está compuesto por plagioclasa  $\pm$  cuarzo  $\pm$  bornita-calcopirita  $\pm$  anhidrita  $\pm$  yeso y también polvo de roca. Los fragmentos de las rocas intrusivas máficas o félsicas están fuertemente biotitizados y los minerales máficos han sido reemplazados totalmente por biotita. La biotitización está asociada con la infiltración de numerosas vetillas de biotita (Skewes, 1999 y Skewes, 2000).
- Brechas Ígneas: Se ubican preferentemente en los contactos entre el CMET y los pórfidos del Complejo Félsico que lo intruyen, desarrollándose potencia desde centímetros hasta decenas de metros. Si en la matriz es dominante la biotita, son llamadas brechas ígneas andesíticas, en cambio si la matriz es de color más claro, porque contiene menos biotita y más anhidrita, feldespato y cuarzo, entonces son llamadas brechas ígneas dacíticas o dioríticos en función del contenido de cuarzo y feldespato.

Las características principales de las brechas reconocidas en el yacimiento se indican en la Tabla 2.4 (Anexo I).

#### *2.3.1.5 Cuerpos Intrusivos Menores*

Corresponde a los últimos eventos intrusivos reconocidos en mina El Teniente, conforman cuerpos de ocurrencia restringida y de carácter parcialmente estéril:

- *Pórfido latítico*: Definido por Howell y Molloy (1960) como una latita porfídica, se presenta en forma de diques anulares de escasa potencia en sectores aledaños a la Chimenea de Brecha Braden (Figura 2.4). Se reconoce en cuerpos irregulares, discontinuos y autobrechizados. La roca muestra textura porfídica, con aproximadamente 40% de fenocristales de feldespato y biotita. Dataciones K/Ar entregan una edad de  $4,96 \pm 0,25$  Ma, indicando un emplazamiento anterior a la

Formación Brecha Braden (Riveros, 1991). En el sector sur del depósito, Riveros (1991) describió diques de latita con textura doblemente porfídica, caracterizada por fenocristales de plagioclasa, biotita y cuarzo en una matriz afanítica.

- *Diques de lamprófido*: Estos cuerpos tabulares se emplazan al sur de la Chimenea de Brecha Braden (Figura 2.4), con potencias entre 1 y 2 m y recorridos continuos en rumbo, con manteo subvertical. La roca, de color gris verdoso, exhibe textura porfídica fina, con fenocristales aciculares de hornblenda en una matriz microcristalina traquítica compuesta por microlitos de augita y labradorita. Los lamprófidos atraviesan las rocas máficas, la Diorita Sewell y la Chimenea de Brecha Braden, presentando contactos nítidos y bien definidos. Representan las últimas etapas de la actividad ígnea en la zona. Dataciones K–Ar en roca total arrojan edades de 3,8 a 2,9 Ma (Cuadra, 1986; Godoy, 1993). Químicamente corresponden a una andesita, con contenidos de 56,3–61% en peso de SiO<sub>2</sub> y 1,6–2% de K<sub>2</sub>O (Skewes, 2000).
- *Dique microdiorítico*: Este cuerpo atraviesa la Diorita Sewell en su sector sur. Se trata de una roca de color gris a negro, con textura porfídica. El dique es tabular, con espesores entre 0,52 y 1,0 m, rumbo N60°E y una corrida de aproximadamente 500 m.

### 2.3.2 Alteración y mineralización

El Teniente se habría formado a través de un proceso continuo de alteración y mineralización, asociado al emplazamiento de los pórfidos dacítico y diorítico, al anillo de brecha hidrotermal de turmalina y a la Brecha Braden (Howell & Molloy, 1960). Actualmente se reconocen tres etapas hipógenas: tardimagmática, hidrotermal principal e hidrotermal tardía, y una etapa supérgena.

Los diferentes grados de alteración dieron origen a vetillas tardimagmáticas, principales y tardías, que constituyen la evolución hipógena del yacimiento (Tabla 2.6). La génesis mineralógica se concentra en las etapas hipógenas, donde se observa la zonación característica de este tipo de depósitos: un núcleo rico en bornita o bornita–calcopirita, una zona envolvente con mayor proporción de calcopirita, un halo externo con calcopirita y, finalmente, un halo envolvente de pirita.

Se han identificado otros centros de mineralización hipógena asociados a los pórfidos diorítico y microdiorítico, que generan brechas hidrotermales de altas leyes en su entorno. Un evento terminal, denominado etapa póstuma, corresponde al emplazamiento de la Pipa Braden, que removió parte del depósito original, reemplazando el núcleo de bornita por pirita.

La alteración supérgena se produjo por la infiltración gradual de aguas meteóricas, generando lixiviación y enriquecimiento secundario en la parte superior de la columna mineralizada. Esto dio origen a una cuenca de escurrimiento subterráneo, limitada en su base por un techo de sulfatos, bajo el cual se ubica la mena primaria. En este proceso se desarrollaron minerales como sericita, arcillas y, en menor proporción, óxidos de cobre en niveles superiores. En profundidad se produjo enriquecimiento secundario, con formación de calcosina y covelina en pátinas sobre calcopirita, lo que incrementó las leyes de cobre (Cu). La Figura 2.6 muestra, a partir de mapeos históricos de la mina El Teniente, los niveles geológicos (pisos o techos) y sus características desde el punto de vista geotécnico, operacional, metalúrgico y de molienda.

### 2.3.3.1 Etapa tardimagmática

Corresponde a la primera etapa de alteración–mineralización reconocida en el yacimiento. Se caracteriza por la coexistencia de alteración biotítica pervasiva y un denso enrejado de vetillas rellenas con cuarzo, anhidrita y sulfuros, que alojan gran parte de la mineralización de cobre y molibdeno. La mineralización consiste en bornita, calcopirita, pirita y molibdenita, la cual se presenta principalmente diseminada y, en mayor proporción, en vetillas sin halo de alteración (Zúñiga, 1982).

En esta etapa se distinguen dos sectores en el yacimiento: En la mitad norte, la mineralización se relaciona al emplazamiento del pórfido dacítico y se caracteriza por una zonación con gradiente decreciente de intensidad alrededor de un centro de alteración potásica. Hacia los márgenes, las asociaciones potásicas gradan a asociaciones propilíticas (Arévalo & Floody, 1995).

En el sector sur, la zonación tardimagmática está parcialmente enmascarada por etapas posteriores de alteración, aunque se observa una elongación noroeste en la que los valores de mayor penetrabilidad coinciden con el eje mayor del pórfido dacítico.

Tabla 2.6: Caracterización de las diferentes vetillas de El Teniente.

| Etapa                      | Características Generales                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Mineralogía principal                                                                                                                                                                                                                                                         | Relación                                                                                                                                              |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tardimagmática (TM)        | Alteración potásica en vetillas (cuarzo, biotita, feldespato potásico y anhidrita) y en forma masiva (pertitización en intrusivos y biotización en andesitas) y biotización de Complejo Máfico.                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Cuarzo, anhidrita, feldespato potásico (pertita), biotita, clorita. Calcopirita, bornita, pirita, molibdenita.                                                                                                                                                                | Consolidación de los intrusivos.                                                                                                                      |
| Hidrotermal Principal (HP) | Alteración filica desarrollada a partir de vetillas de sulfuros, generando halos de alteración de cuarzo, sericita y clorita de ancho variable.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Cuarzo, sericita, clorita, anhidrita. Calcopirita, pirita, molibdenita.                                                                                                                                                                                                       | Reacción de los fluidos Tardimagmáticos con las aguas meteóricas.                                                                                     |
| Hidrotermal Tardía (HT)    | Alteración Filica que afecta a los clastos de la Brecha de Turmalina y como halos de vetillas, en forma similar a la anterior, pero con menos frecuencia. Se desarrolla a partir de la Brecha Braden, extendiéndose a unos 100 o 150 m en una zona concéntrica a esta. También se incluye en esta etapa la Alteración Póstuma con alteración a Sericita y calcita restringida a la Brecha Braden, en vetillas de baja frecuencia o afectando a la matriz y los clastos de esta. | Anhidrita, cuarzo, sericita, turmalina, yeso, carbonatos, clorita. Calcopirita, bornita, pirita, molibdenita, tenantita. Sericita, calcita, yeso, cuarzo, siderita, ankerita, baritina, anhidrita, turmalina. Pirita, calcopirita, molibdenita, esfalerita, galena, tenantita | Fluidos hidrotermales Asociados al emplazamiento de la Brecha Marginal. Fluidos hidrotermales asociados al desarrollo del Complejo de Brechas Braden. |

#### *2.3.3.2 Etapa hidrotermal principal*

Esta etapa se superpone a la tardimagmática y está relacionada con la interacción de fluidos magmáticos residuales con aguas meteóricas. Se desarrolla a partir de vetillas que generan halos de alteración de espesor variable, los cuales modifican la mineralogía y textura de la etapa anterior. En la roca de caja, la mineralogía es reemplazada por la asociación cuarzo-sericita, con menor proporción de anhidrita y clorita. En la diorita y en el pórfido dacítico, los feldespatos potásicos, plagioclasas y minerales ferromagnesianos se encuentran alterados de manera similar, y las texturas faneríticas y/o porfídicas son sustituidas por texturas sacaroidales finas. Según Zúñiga (1982), la mineralización está compuesta por calcopirita, pirita y molibdenita, acompañadas por cuarzo, anhidrita, sericita y clorita como minerales de ganga.

#### *2.3.3.3 Etapa hidrotermal tardía*

De acuerdo con Villalobos (1975), esta etapa se vincula al emplazamiento del anillo de brecha hidrotermal de turmalina, periférico a la Brecha Braden. La alteración está conformada por la asociación cuarzo-turmalina-sericita-clorita-yeso-carbonatos. La mineralogía metálica incluye calcopirita, bornita, pirita, molibdenita y tenantita/tetraedrita. Esta etapa se desarrolla en halos de vetas y vetillas que forman una franja concéntrica al anillo de brechas, en el cemento de la matriz de la brecha hidrotermal de turmalina y en la alteración de sus fragmentos. También se ha reconocido en el sector sur del yacimiento, en relación con un intrusivo diorítico.

#### *2.3.3.4 Etapa póstuma*

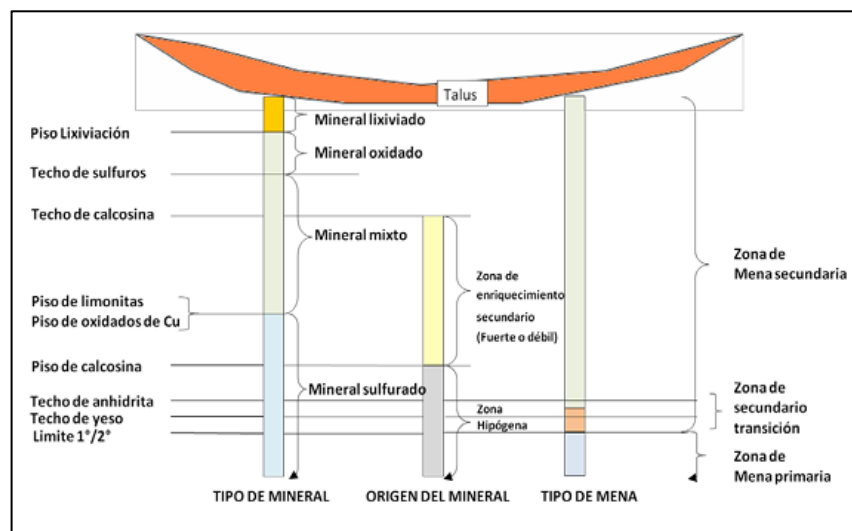
La etapa póstuma está relacionada con la consolidación de la Brecha Braden. Se caracteriza por una mineralogía constituida principalmente por sericita, calcita y pirita en el cemento, así como por la alteración sericítica de la fracción clástica. Asimismo, se reconocen rellenos en estructuras planares y cavidades con minerales de baja temperatura,

como yeso, siderita, ankerita, baritina, blenda, galena, cuarzo, anhidrita y turmalina (Ojeda et al., 1980).

### 2.3.3.5 Etapa supérgena

Los rasgos de la etapa supérgena se observan en las zonas superiores del yacimiento, en un área aproximada de 15 km<sup>2</sup> con forma elíptica y eje mayor orientado al noroeste (Camus, 1974; Ojeda et al., 1980). Esta etapa se caracteriza por la lixiviación completa de la anhidrita y la formación de caolinita, con menor proporción de montmorillonita, alunita y sericita. Según Álvarez (1990), las zonas de alteración supérgena coinciden con sectores de enriquecimiento secundario, cuyo espesor varía entre 300 y 500 m en la parte sur del yacimiento.

La mineralización asociada corresponde a calcosina gris, calcosina y covelina, que reemplazan a sulfuros preexistentes a partir de fracturas, bordes de grano y planos de clivaje. Esta mineralización se presenta tanto en vetillas como de manera diseminada, evidenciando un enriquecimiento selectivo de cobre: primero se reemplaza la bornita, luego la calcopirita, mientras que la piritita permanece inalterada. El desarrollo de esta etapa sigue el borde de la Brecha Braden y el pórfido dacítico hacia el norte, hasta la quebrada El Teniente (Floody & Huete, 1998).

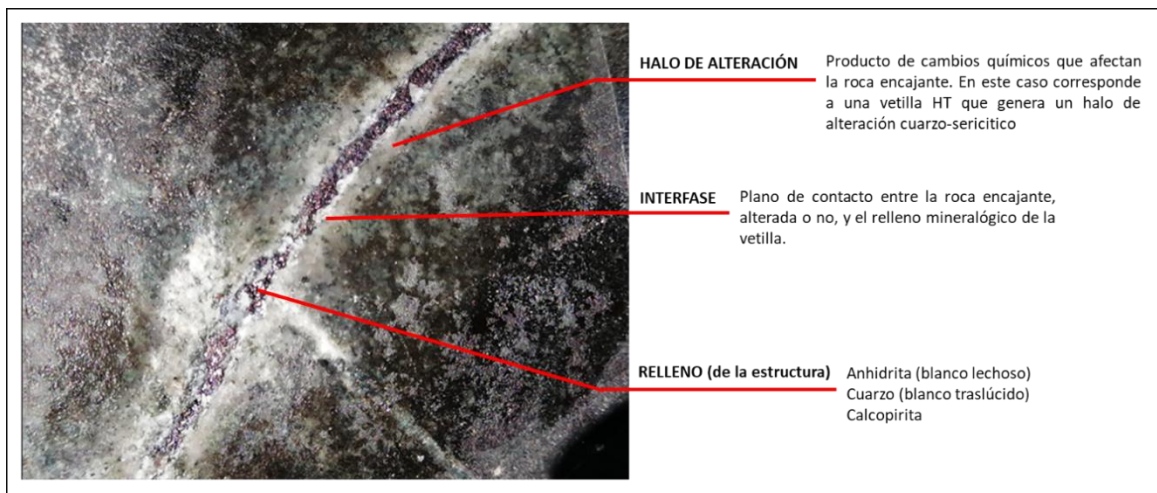


**Figura 2.6:** Serie general de niveles geológicos basados en mapeos históricos realizados en la Mina El Teniente (tomado de SGL-I-123/2003).

## CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN GENÉTICA DE VETILLAS DEL YACIMIENTO EL TENIENTE.

### 3.1 Generalidades.

Las vetillas constituyen discontinuidades geológicas comparables a fallas y fracturas, pero se diferencian de estas por encontrarse selladas con rellenos minerales. La resistencia de dichos rellenos varía en un rango amplio, desde muy alta —como en el caso del cuarzo— hasta muy baja, como ocurre con el yeso. Estos materiales de relleno se originan por la circulación de soluciones hidrotermales, las cuales, además, pueden inducir la formación de halos de alteración en la roca encajante (Figura 3.1).



**Figura 3.1:** Ejemplo de vetilla HT, con minerales de relleno de calcopirita oxidada, anhidrita y cuarzo, un halo de alteración cuarzo-sericitico, y además es posible distinguir la interfase o plano de contacto entre la roca encajante y el relleno.

El análisis de las vetillas permite clasificarlas en función de su origen genético, lo que a su vez contribuye a comprender la evolución geológica del yacimiento y el ambiente en que estas estructuras se generaron. En condiciones tardimagmáticas (TM), donde la roca conserva un comportamiento dúctil por efecto de altas temperaturas, predominan vetillas de bordes sinuosos e irregulares. En contraste, hacia los ambientes hidrotermales principales (HP) y tardíos (HT), el descenso de la temperatura y el cambio de un régimen de presión litostática a hidrostática generan un comportamiento frágil de la roca,



favoreciendo la formación de vetillas de bordes rectos y con halos de alteración que evolucionan desde alteraciones potásicas a filicas.

La identificación de vetillas en el yacimiento requiere ser contextualizada en relación con los procesos de alteración y mineralización, ya que la superposición de eventos y el metasomatismo intenso pueden dificultar su reconocimiento. En esta tesis se adopta la clasificación propuesta por Brzovic y Benado (2003), que vincula la tipología de vetillas con los principales ambientes de alteración y mineralización.

### **3.2 Caracterización de las vetillas selladas.**

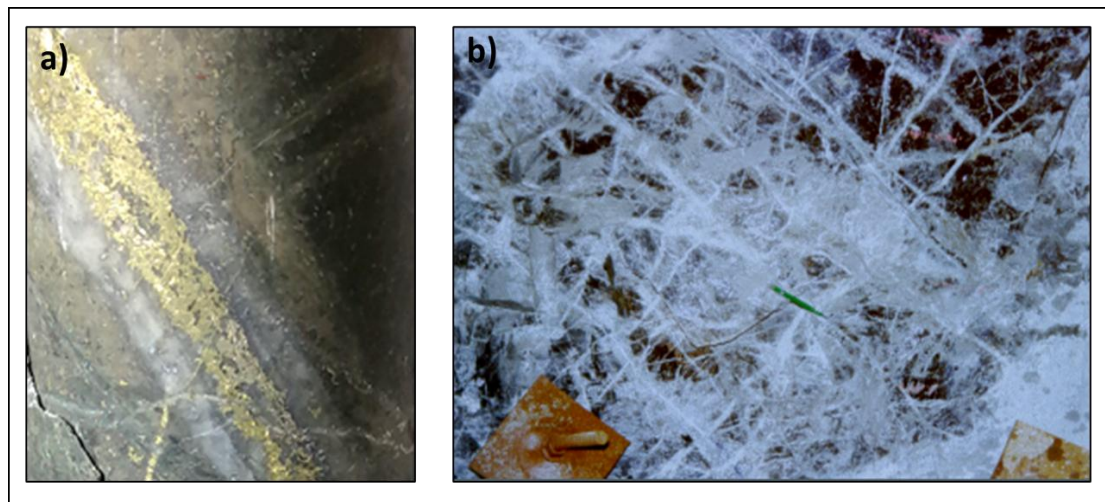
En el macizo rocoso primario de mina El Teniente se reconoce un denso entramado polidireccional de vetillas selladas (Figura 3.2), con frecuencias que alcanzan hasta 40 vetillas por metro lineal de sondaje. Estas estructuras suelen disponerse en arreglos tipo stockwork (Figura 3.2b), constituyendo el principal control de la mineralización, ya que alojan más del 70% del cobre presente en el yacimiento (Brzovic & Benado, 2003).

Los rellenos mineralógicos de estas vetillas son notablemente competentes en comparación con los observados en minas a rajo abierto. Están compuestos por anhidrita, bornita, calcopirita, carbonatos, cuarzo, molibdenita, sericita y tenantita, que pueden aparecer como fases únicas de relleno o en proporciones variables junto a otros minerales. La naturaleza del relleno condiciona la resistencia de la vetilla frente a los esfuerzos, otorgando al macizo rocoso un comportamiento heterogéneo.

De acuerdo con las Figuras 3.1 y 3.3, las principales partes que constituyen una vetilla son:

- Traza: superficie imaginaria que define el eje central de la estructura, pudiendo ser recta o sinuosa.

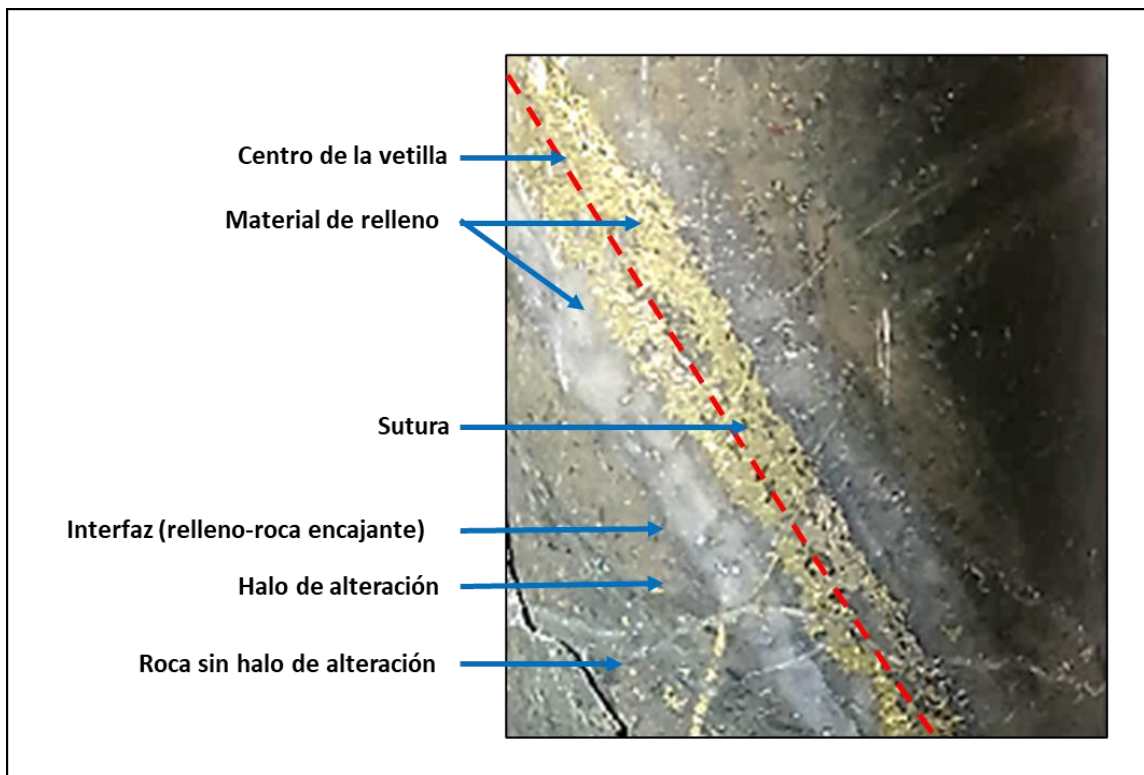
- Relleno: minerales que sellan la discontinuidad, determinando su espesor y resistencia relativa. El espesor varía desde menos de 1 mm hasta varios centímetros, aunque predominan valores entre 1 y 5 mm (Karzulovic, 2001).
- Sutura: representa una heterogeneidad orientada interna que forma parte del relleno y puede estar o no presente en la vetilla, compuesta generalmente por minerales más blandos, que representa una zona de debilidad preferencial para la fracturación.
- Interface: se define como el contacto entre el relleno y la roca encajante, usualmente la parte más débil del sistema, por donde suele iniciarse la ruptura.
- Halo de alteración: zona periférica a la vetilla, producto de la interacción de fluidos hidrotermales con la roca caja. Puede ser simple, doble o complejo, dependiendo del número de halos superpuestos, y reduce la resistencia de la roca encajante.



**Figura 3.2:** Ejemplos de vetillas en el Teniente. En a) vetilla HP con relleno de calcopirita y halo de alteración cuarzo-sericítica en la roca encajante (elaboración propia). En b) Stockwork que muestra principalmente vetillas TM de cuarzo, sin o con poco halo de alteración, la distancia entre pernos es de aproximadamente 1m (tomado de Karzulovic, 2001).

### 3.3 Clasificación de vetillas El Teniente

Las vetillas selladas del yacimiento El Teniente pueden clasificarse considerando tres criterios principales: espesor o potencia, extensión de la traza, características mineralógicas y relaciones de contacto entre ellas. Esta clasificación permite organizar la gran diversidad de vetillas observadas en el macizo y relacionarlas con los procesos de alteración y mineralización.



**Figura 3.3:** Esquema ilustrativo de los entes típicos de una vetilla sellada en roca primaria (Elaboración propia).

### 3.3.1 Espesor de las vetillas

De acuerdo con los estándares y metodología de trabajo para Geología de Minas de la División El Teniente (SGL-I-123/ 03, 2003), las vetillas se dividen en:

- Vetas: estructuras lineales con espesor superior a 3 mm y longitud mayor a 4,5 cm (equivalente al largo de una lámina delgada). Están rellenas con minerales metálicos o no metálicos, y en ocasiones corresponden a planos de falla cuando desplazan otras estructuras.
- Vetillas: estructuras de espesor entre 1 y 3 mm y longitud igual o superior a 2,5 cm. Su relleno es continuo a lo largo de toda la traza.
- Microvetillas: estructuras de menos de 1 mm de espesor y longitud variable, con relleno discontinuo. Se observan principalmente en rocas de grano muy fino o textura afanítica.

En este estudio, el término “vetilla” se emplea en su sentido general, sin discriminar estrictamente por espesor.

### 3.3.2 Extensión de la traza de vetillas.

Según Brzovic et al. (2001), las vetillas se clasifican en función de la extensión de su traza en:

Vetillas mayores: alcanzan a cruzar el ancho de dos labores mineras. Usualmente corresponden a vetillas hidrotermales principales (HP) o tardías (HT). Pueden alcanzar potencias de hasta 200 mm, aunque sus espesores más frecuentes varían entre 5 y 25 mm.

Vetillas intermedias: se extienden a través de una labor. Pueden corresponder a vetillas TM, HP o HT, con espesores de 1 a 10 mm y potencias máximas cercanas a 50 mm.

Vetillas menores: no alcanzan a cruzar una labor. Pueden presentarse en cualquier ambiente genético (TM, HP o HT), con espesores generalmente inferiores a 10 mm.

### 3.3.3 Mineralogía, alteración y relaciones de contacto.

Las rocas del yacimiento han experimentado múltiples eventos de deformación, alteración hidrotermal y mineralización, que han modificado su mineralogía original. Parte de los Estudios internos divisionales dan cuenta de al menos ocho eventos de deformación, siete etapas de mineralización sulfurada y siete de alteración (SGL-I-123/03, 2003; Cannel, 2004).

La clasificación genética de las vetillas en mina El Teniente se fundamenta en el esquema propuesto por Brzovic y Benado (2003), cuyo objetivo principal es integrar información estructural, mineralógica y de alteración en la caracterización geotécnica del macizo rocoso. Esta aproximación permite comprender cómo la evolución de los fluidos magmáticos e hidrotermales condicionó tanto la mineralización metálica como las propiedades mecánicas de la roca encajante.

En términos generales, se reconocen tres etapas de desarrollo de vetillas, cada una asociada a condiciones fisicoquímicas particulares:

- Etapla tardimagmática (TM): corresponde a vetillas formadas en condiciones de alta temperatura y régimen semi-dúctil de la roca. Se caracterizan por bordes sinuosos e irregulares, rellenos de cuarzo, anhidrita y sulfuros, y halos de alteración predominantemente potásicos. Estas vetillas constituyen el primer sistema de fracturamiento sellado del yacimiento.
- Etapla hidrotermal principal (HP): se desarrolla con el descenso de la temperatura y el cambio de presión litostática a hidrostática, lo que genera un régimen frágil en la roca. Las vetillas presentan bordes rectos, halos de alteración sericíticos y rellenos de cuarzo, anhidrita, calcopirita y molibdenita. Suelen conformar un

stockwork denso que concentra gran parte de la mineralización de cobre y molibdeno.

- Etapas hidrotermales tardías (HT): se vincula a fluidos de etapas avanzadas, en ambientes netamente frágiles. Sus vetillas se caracterizan por bordes bien definidos, rellenos de cuarzo, turmalina, sericita y carbonatos, y halos de alteración más amplios o complejos. Estas estructuras pueden reutilizar vetillas preexistentes, modificando la mineralización primaria y redistribuyendo el cobre en el macizo rocoso.

## **CAPÍTULO IV. GEOTECNIA DEL YACIMIENTO EL TENIENTE.**

### **4.1 Introducción.**

El comportamiento del macizo rocoso bajo condiciones mineras subterráneas está determinado por la interacción entre propiedades geológicas inherentes y condiciones operativas de diseño. En este sentido, diversos autores han distinguido entre parámetros predeterminados (no modificables) y controlables (modificables durante el diseño y operación) (Willoner, 2000).

Los parámetros predeterminados incluyen litología, grado de fracturación, orientación y persistencia de discontinuidades, calidad del material intacto y esfuerzos in situ actuantes. Mientras que los parámetros controlables se relacionan con el diseño y operación minera, como la geometría de excavación, la secuencia de minado, los métodos de fortificación, la tasa de hundimiento y la tasa de extracción.

La respuesta del macizo a estos factores condiciona la estabilidad de las excavaciones, la fragmentación generada, el tamaño de bloque resultante y los requerimientos de soporte. Comprender dicha respuesta demanda combinar análisis descriptivos con modelaciones mecánicas.

Las metodologías de clasificación geomecánica han sido tradicionalmente la base para la caracterización de macizos en minería subterránea. El sistema Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1976, 1989) y el Mining Rock Mass Rating (MRMR) de Laubscher (1990) se mantienen vigentes como referencias clásicas. Sin embargo, la propuesta del Rock Mass Index (RMi) de Palmström (1996) y el desarrollo del método Hoek–Brown para estimar resistencia y deformabilidad en macizos (Hoek & Brown, 1980; Hoek, Kaiser, & Bawden, 1995; Hoek, Kaiser, & Brown, 1997) supusieron un salto metodológico clave, al integrar discontinuidades, esfuerzos y condiciones de excavación en los cálculos de diseño.

En las últimas décadas, Hoek, Carranza-Torres y Corkum (2002) extendieron el criterio Hoek–Brown hacia el enfoque GSI (Geological Strength Index), que sigue siendo ampliamente utilizado para relacionar las características geológicas con la resistencia mecánica del macizo. Más recientemente, Hoek y Brown (2018) actualizaron este criterio, incorporando análisis más robustos de incertidumbre y su aplicación a excavaciones profundas.

Asimismo, investigaciones recientes enfatizan la necesidad de incorporar la heterogeneidad y variabilidad espacial del macizo en modelos predictivos. Van As, Jeffrey y Hamman (2020) resaltan la influencia de la distribución litológica y estructural en la respuesta a la explotación, mientras que Zhang, Chen y Li (2021) proponen enfoques probabilísticos para gestionar la incertidumbre en parámetros de resistencia y deformación.

En síntesis, la integración de enfoques cualitativos (descripción geológica y estructural) con enfoques cuantitativos (ensayos mecánicos, modelación numérica y análisis probabilísticos) constituye la base metodológica de la geotecnia moderna. Ello permite definir unidades geotécnicas representativas y fundamentar un diseño de excavaciones más seguro y eficiente en el contexto del yacimiento El Teniente.

#### 4.2.1 Caracterización de Roca Intacta

El modo de ruptura del macizo rocoso se determina mediante ensayos geotécnicos en roca intacta, siendo un aspecto relevante para comprender el comportamiento geomecánico de la roca primaria en El Teniente. La roca intacta se refiere a los bloques no fracturados entre las discontinuidades de un macizo rocoso típico. Estos bloques pueden tener un tamaño que varía desde unos pocos milímetros hasta varios metros (Hoek, 1994; Hudson y Harrison, 1997; Lianyang, 2017), por lo que se define como un volumen relativamente pequeño de roca homogénea e isótropa (aprox.  $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ), éste concepto ha sido matizado en el caso del yacimiento El Teniente debido a la presencia de un stockwork denso de vetillas mineralizadas selladas, cuya influencia condiciona la respuesta de las probetas ensayadas (Marambio et al., 2000; Vallejos & Pérez-Reyes, 2020; Lianyang, 2017)

La caracterización de la roca intacta se logra a partir del análisis de resultados de ensayos de laboratorio, con el fin de establecer valores de sus propiedades físicas características que sirvan como parámetros geomecánicos para representar adecuadamente las distintas litologías del macizo rocoso. Los ensayos más utilizados son los de Compresión Uniaxial Simple (UCS) y Compresión Triaxial (TX), a partir de los cuales se determinan los parámetros de resistencia cohesiva y friccionante, fundamentales para definir criterios de falla (Karzulovic, 2006; Hoek & Martin, 2014).

En condiciones triaxiales, la forma de ruptura puede variar entre frágil y dúctil según el nivel de confinamiento aplicado (Figura 4.6). Mogi (1966) demostró que esta transición puede expresarse como  $\sigma_1 = 3.4 \times \sigma_3$ , donde  $\sigma_3$  corresponde al esfuerzo menor (confinamiento) y  $\sigma_1$  al esfuerzo mayor. En consecuencia, el comportamiento será frágil cuando  $\sigma_1 > 3.4 \times \sigma_3$ , y dúctil en el caso contrario. Asimismo, la presión de confinamiento requerida para inducir ductilidad aumenta con la resistencia propia de la roca.



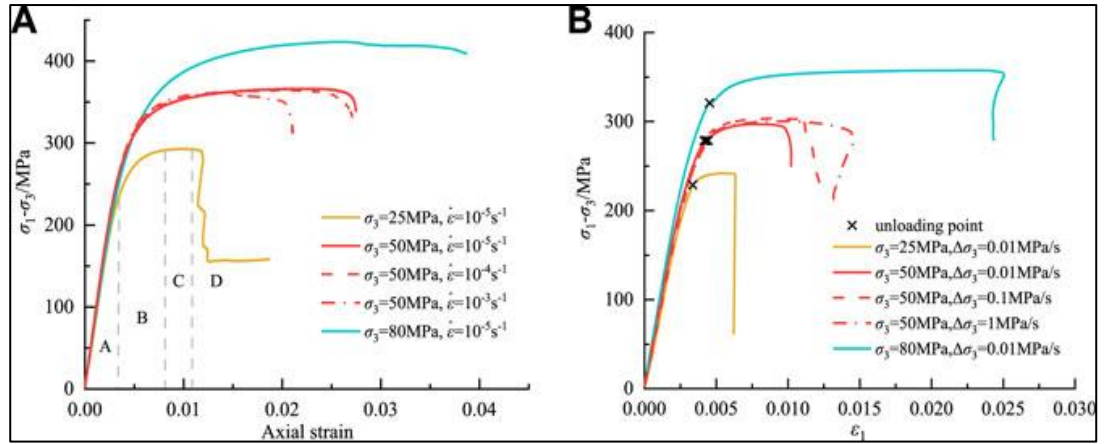


Figura 4.6: Curvas de esfuerzo-deformación axial de muestras de mármol: (A) condición de carga; (B) condición de descarga. (Liu, 2022)

En el caso específico de la roca primaria de El Teniente, caracterizada por su alta resistencia y compactación, se requieren presiones de confinamiento superiores a 100 MPa para alcanzar un comportamiento dúctil. Sin embargo, en el rango de esfuerzos típicos del método por hundimiento de bloques y paneles, la roca se comporta predominantemente de forma frágil (Karzulovic, 2006; Brzovic & Vásquez, 2010). En sintonía, existen estudios que referencian sobre la interacción entre vetillas de stockwork y esfuerzos inducidos por la minería podrían intensificar esta tendencia frágil, condicionando la propagación de la fragmentación en minería por hundimiento (Vallejos & Pérez-Reyes, 2020; Cai, 2021).

La ruptura de tipo frágil en la roca primaria de El Teniente, que incluye tanto fallas por corte como por tracción, se manifiesta frecuentemente mediante fracturas frescas que pueden interactuar, o no, con las vetillas selladas preexistentes. En consecuencia, la resistencia de la roca intacta puede disminuir de manera significativa debido a la presencia de estas estructuras. Un ejemplo se observa en la reducción de la resistencia a la compresión uniaxial simple (UCS) (Figura 4.7), donde el valor obtenido para una probeta depende directamente del arreglo estructural que presenta, más que de la matriz rocosa en sí misma (Marambio et al., 2000; Hoek & Martin, 2014).

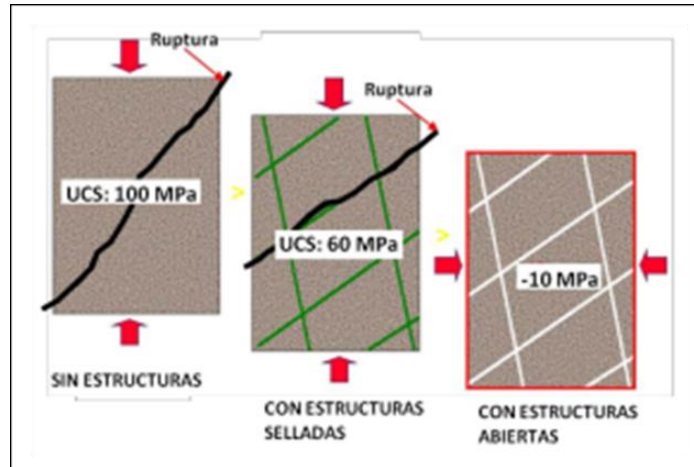


Figura 4.7: Efecto de la resistencia a la Compresión Uniaxial Simple en diferentes arreglos estructurales (Tomado de SGL-I-123/3, 2003).

En el caso del yacimiento El Teniente, la información disponible sobre el comportamiento mecánico y la forma de ruptura de las rocas primarias es aún limitada, particularmente en lo referente al inicio y la evolución de los procesos de fracturamiento, así como al comportamiento carga–deformación post-peak o lo que se conoce como comportamiento residual. Este último puede estar condicionado por la interacción con vetillas selladas y por el efecto del cierre progresivo de discontinuidades bajo confinamiento (Karzulovic, 2006; Vallejos & Pérez-Reyes, 2020).

#### 4.2.2 Degradación del Macizo Rocosó en Mina El Teniente.

La degradación geotécnica corresponde a la disminución o pérdida de la calidad mecánica y estructural de la roca primaria bajo condiciones in situ, producto de la explotación minera subterránea. En el caso de la mina El Teniente, la roca intacta, caracterizada originalmente por su condición masiva, baja permeabilidad y escaso fracturamiento, tiende a degradarse en su calidad geotécnica cuando se fractura. Este proceso se manifiesta por la apertura de vetillas selladas preexistentes o por la generación de nuevas fracturas a través de la matriz rocosa, lo que reduce progresivamente la competencia del macizo. Autores coinciden en que la abertura de vetillas es el mecanismo

dominante de deterioro (Brzovic & Duarte, 2002; Brzovic & Villaescusa, 2007; Bewick et al., 2018).

La evidencia empírica en El Teniente demuestra que la fragmentación inducida por el hundimiento (caving) se concentra en fallas y vetillas tipo stockwork, actuando estas como planos preferenciales de debilidad. Este comportamiento fue documentado tempranamente por Zúñiga (1979) y Pereira (1995), y posteriormente confirmado en estudios más recientes que vinculan la evolución de la fragmentación con la abertura progresiva de estructuras preexistentes (Brzovic & Benado, 2003; Susaeta et al., 2016; Vallejos et al., 2019).

En sectores cercanos al frente de hundimiento, el efecto del “*abutment stress*”, es decir, la concentración de esfuerzos en las zonas de roca adyacentes a excavaciones o frentes mineros, promueve la apertura de discontinuidades mayores e intermedias, condición observada en sectores como Recursos Norte, Esmeralda, Teniente Sub-6 y Teniente 4 Sur. Este fenómeno genera zonas de roca degradada en torno al avance del hundimiento, modificando localmente la permeabilidad y la estabilidad (Pardo et al., 2014; Castro et al., 2020, McKinnon, 2018; Brzovic & Villaescusa, 2006).

Los estudios realizados en pilares de producción en las minas Teniente Sub-6 y Esmeralda han demostrado que aquellos con mejor calidad geotécnica permanecen estables en tanto sus estructuras internas se mantienen selladas. No obstante, cuando por acción de la minería subterránea se provoca la apertura de fracturas en el centro o periferia de los pilares, éstos experimentan una pérdida significativa de calidad y resistencia, condicionando su estabilidad global (SGL-I-123/03, 2003; Pierce et al., 2010; Beck & Pfitzner, 2018).

#### 4.2.3 Efecto Escala en el Macizo Rocosó

Los resultados de ensayos de laboratorio, a nivel de “roca intacta”, están influidos por el efecto escala, ya que los parámetros de resistencia y deformabilidad dependen del

diámetro de la probeta ensayada. En general, al aumentar el tamaño de la probeta disminuye la resistencia y aumenta la deformabilidad, debido a la mayor probabilidad de encontrar heterogeneidades internas como vetillas selladas o microfracturas (Figura 4.8).

Este fenómeno se analiza habitualmente mediante el desarrollo de curvas de efecto de escala, que permiten evaluar cómo varían las propiedades geomecánicas en función del tamaño de la probeta ensayada. Dichas curvas se basan en los resultados experimentales y son fundamentales para la extrapolación de parámetros hacia dimensiones representativas del macizo rocoso (Hoek & Bray, 1981; Hoek & Brown, 1980; Cai, 2021).

$$\frac{PG_d}{PG_{50}} = \left(\frac{d}{50}\right)^b ; PG = UCS; TI; E$$

Donde  $PG_d$  es el parámetro geomecánico medido en una probeta de diámetro  $d$  (como el UCS o resistencia en compresión uniaxial, TI o resistencia a la tracción, y  $E$  o módulo de deformabilidad o Young),  $PG_{50}$  es el valor esperado de este parámetro para el caso de una probeta estándar, de 50 mm de diámetro, y  $b$  es un exponente que se obtiene de las curvas de escalamiento de forma  $y=x^b$  (Figura 4.8).

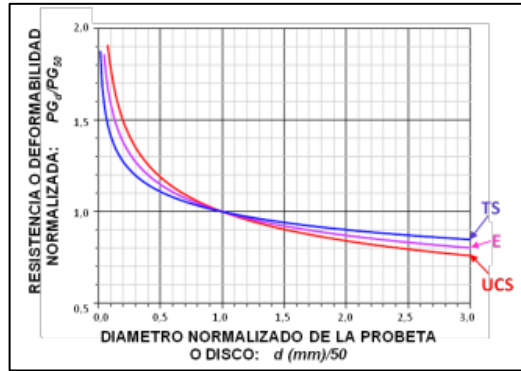


Figura 4.8: Efecto de escala en la resistencia y deformabilidad de las brechas de la Pipa Braden a nivel de “roca intacta” (tomado de Karzulovic, 2002).

A nivel de macizo rocoso, el efecto escala se relaciona con el volumen de macizo rocoso que se pretende analizar, el cual determina las propiedades mecánicas relevantes y los tipos de discontinuidades que deben considerarse (Figura 4.9). Por lo tanto, el

comportamiento del macizo no puede evaluarse únicamente a partir de ensayos en roca intacta, sino que debe incorporar las estructuras que lo componen en cada escala de estudio (Hoek & Brown, 1980; Palmström & Stille, 2010).

En minería de hundimiento, este concepto es particularmente crítico: el volumen involucrado en la propagación del caving es mucho mayor que el considerado en procesos posteriores como la fragmentación y la molienda. Como consecuencia, las propiedades geomecánicas efectivas del macizo rocoso dependerán del tamaño de la excavación o del proceso minero analizado (Cai, 2021). Así, la escala del problema define qué discontinuidades se deben modelar individualmente (por ejemplo, fallas mayores o zonas de cizalle) y cuáles pueden integrarse dentro de los parámetros globales del macizo (como el denso stockwork de vetillas selladas característico de la roca primaria de El Teniente). Aunque existe abundante literatura sobre la influencia de fracturas y fallas abiertas en la estabilidad, aún es limitada la investigación que aborda el impacto mecánico de vetillas selladas en el comportamiento del macizo en minería de hundimiento (Brzovic & Vásquez, 2010; Vallejos & Pérez-Reyes, 2020).

En este contexto, la Tabla 4.2 presenta una clasificación de escalas del macizo rocoso y los volúmenes representativos (REV) asociados, junto con los tipos de discontinuidades que influyen en cada nivel, constituyendo una base para la caracterización geotécnica en El Teniente.

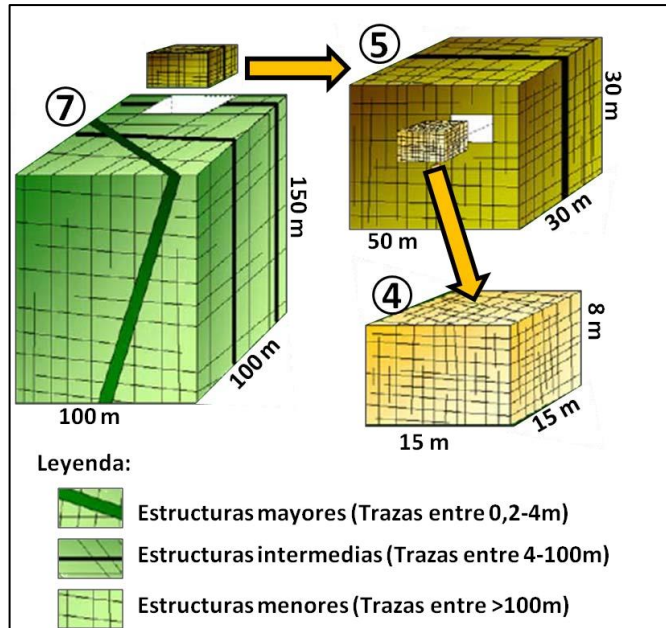


Figura 4.9: Efecto en la escala del macizo rocoso, se indican las estructuras presentes en cada volumen de material (Tomado De los Santos, 2003) considerando la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Escalas de macizo rocoso y volúmenes de material considerado (Modificada de SGL-I-123/03,2003)

| Estructuras en El Teniente                                                | Escala de macizo rocoso | Volumen de material ( $m^3$ ) | $V_{Macizo}/V_{Roca\ intacta}$ | Roca Intacta                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| -                                                                         | 0                       | $10^{-1} a 10^0$              | $2x10^1 a 8x10^3$              | Definición usual, equivalente a volumen de $10^{-4} a 5x10^{-3}m^3$ |
| -                                                                         | 1                       | $10^0 a 10^1$                 | $2x10^2 a 8x10^4$              |                                                                     |
| Estructuras Menores, con trazas inferiores a 4 m y superiores a 20 cm     | 2                       | $10^1 a 10^2$                 | $2x10^3 a 8x10^5$              |                                                                     |
| Estructuras Intermedias, con trazas superiores a 4 m e inferiores a 100 m | 3                       | $10^2 a 10^3$                 | $2x10^4 a 8x10^6$              |                                                                     |
|                                                                           | 4                       | $10^3 a 10^4$                 | $2x10^5 a 8x10^7$              |                                                                     |
|                                                                           | 5                       | $10^4 a 10^5$                 | $2x10^6 a 8x10^8$              | Posiblemente equivalente a un volumen de $1 a 10 m^3$               |
|                                                                           | 6                       | $10^5 a 10^6$                 | $2x10^4 a 8x10^6$              |                                                                     |
|                                                                           | 7                       | $10^6 a 10^7$                 | $2x10^5 a 8x10^7$              |                                                                     |
|                                                                           | 8                       | $10^7 a 10^8$                 | $2x10^6 a 8x10^8$              |                                                                     |

## CAPÍTULO V. ENSAYOS GEOTÉCNICOS.

### 5.1 Introducción.

Las características geométricas y las propiedades geotécnicas de las discontinuidades geológicas son parámetros claves a considerar en la fragmentación del macizo rocoso durante el proceso de explotación de una minería subterránea mediante el Método Panel Caving. Esto es particularmente relevante en la Mina El Teniente, pues se ha observado que las vetillas minerales que componen el yacimiento juegan un rol relevante en el control de la fragmentación y la sismicidad durante la propagación del Caving (Brzovic y Villaescusa, 2007; Brzovic, 2009).

Para la correcta estimación de las propiedades geotécnicas se debe comprender ciertos conceptos, los que han sido definidos considerado características implícitas del yacimiento en estudio:

- Vetilla: Discontinuidad geológica sellada por rellenos minerales cuya resistencia varía desde muy alta (cuarzo) a muy baja (yeso), este relleno es generado por la acción de soluciones hidrotermales la que además pueden generar un halo de alteración en la roca caja (ver Fotografía 3.1).
- Roca Primaria: Stokes (1955), en Karzulovic (2006), la define como una roca mineralizada que ha permanecido sin cambios desde su génesis o formación. En El Teniente el concepto de roca primaria precisa a una roca dura que presenta mineralógicamente una fuerte asociación de anhidrita y sulfuros de Cu, Fe y Mo, que se manifiesta como el relleno de vetillas o diseminada, que no ha sido afectada por mineralización secundaria o lixiviación, roca típicamente heterogénea debido a la presencia de un stockwork de vetillas selladas y/o a causa de una textura brechosa.
- Roca Intacta: Volumen de roca de tamaño “pequeño” y que incluye todos los componentes de la roca que se quiere estudiar, es decir volumen pequeño de la

roca que contenga vetillas mineralizadas en el caso de este estudio, el tamaño es el correspondiente al de las probetas utilizadas en los ensayos de mecánica de rocas.

- Macizo Rocoso: En la mina El Teniente se ha definido como un volumen “grande” de la roca que se quiere estudiar, correspondiente al volumen representativo de la condición que se analiza, por lo que puede variar en un amplio rango, por ejemplo, desde el análisis de un pilar del nivel de producción hasta un modelo a escala de mina (Karzulovic, 2006).

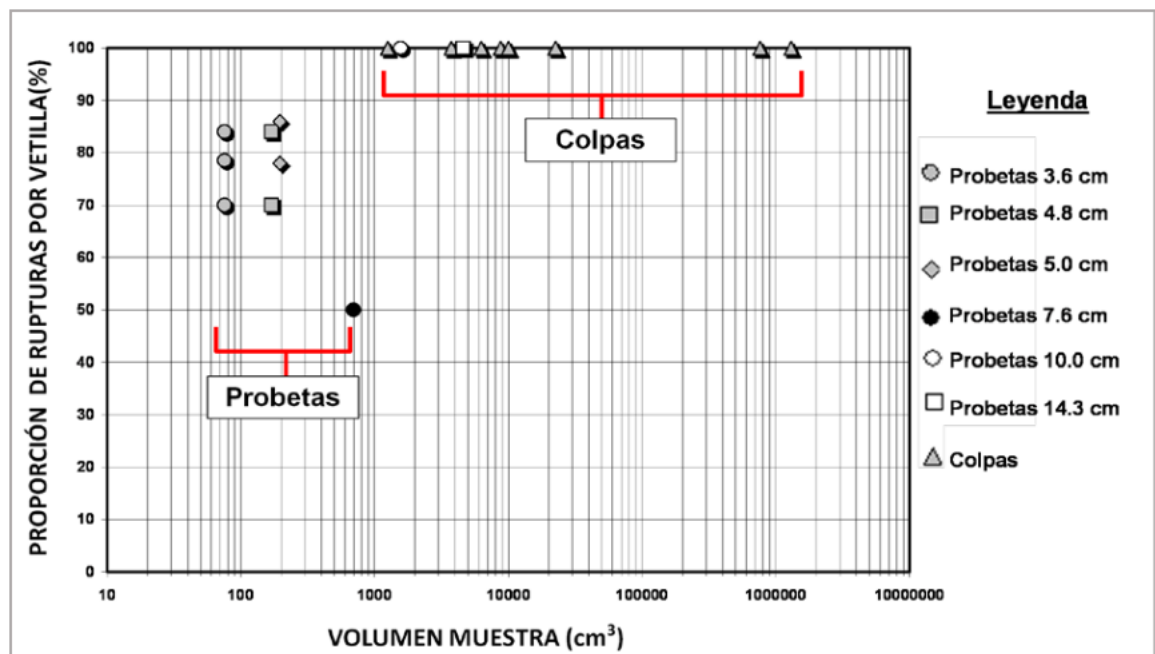
Tal como se establece en Estándares y Metodología de trabajo para Geología de Minas (SGLI-123/03,2003), previo a la estimación de las características del macizo rocoso, se deben estimar las propiedades geotécnicas de la “roca intacta”. Con estos valores, más factores de operación y condición del entorno, se efectúa el escalamiento desde la “roca intacta” a la del macizo rocoso. Los parámetros estimados en la caracterización geotécnica de la roca se obtienen a partir de ensayos geotécnicos en laboratorios de mecánica de rocas, estas pruebas se realizan sobre muestras obtenidas en terreno con una descripción geológica acuciosa previa, y deben seguir ciertas normas para la adecuada caracterización geotécnica, normas propuestas por estándares internacionales. En el caso de las pruebas realizadas como parte de esta memoria de título, se siguen los estándares establecidos por las instituciones American Society for Testing Materials (ASTM) e International Society for Rock Mechanics (ISRM).

En décadas pasadas, en la Mina El Teniente, la obtención de los parámetros geotécnicos se basaba en el simple análisis estadístico de los resultados de diferentes ensayos (Karzulovic, 1993; Moreno, 1993; Karzulovic, 1996; Díaz et al., 1996; (Karzulovic, 1997), sin embargo, análisis posteriores, han mostrado que entre el 70% y el 87% de las probetas de la unidad CMET ensayadas (Figura 5.1), presentan tipos de rupturas en las que hay participación de vetillas (Rodrigo, 1999; Marambio y otros, 1999). Además, observaciones en los puntos de extracción del mineral, indican que estas estructuras constituyen alrededor del 95% de las superficies que delimitan los bloques o colpas de



roca (Figuroa, 2003). Estas discontinuidades generan una marcada anisotropía estructural que dificulta la obtención de parámetros geotécnicos, con esto se reconoce la necesidad de contar con una adecuada descripción estructural de las probetas antes y después de ser sometidas a ensayos geotécnicos, tal como lo han manifestado varios autores (Enrione, 1990; Karzulovic 1993; Karzulovic, 1996; Rodrigo, 1999; Padilla 2004; Gavia 2005).

Motivados por lo anterior, la División El Teniente de Codelco-Chile ha desarrollado una metodología objetiva y reproducible para seleccionar y analizar los resultados de ensayos de resistencia a la Compresión Triaxial (SGL-I-123/03,2003). Conforme con esto, el propósito de este capítulo es presentar parte de esta metodología, presentando además un programa de ensayos consignados a comprender el comportamiento resistente de los componentes del relleno mineral de vetillas y de fallas (Discontinuidades) presentes en el macizo primario de la Mina El Teniente, bajo ciertas condiciones geológicas y geométricas.



**Figura 5.1:** Grafico log-normal entre porcentajes de ruptura por vetillas en probetas de distinta longitud y colpas contra volumen de la muestra en la unidad CMET en la Mina El Teniente. Tomado de Pereira & Russo, 2000.

## 5.2 Descripción de las muestras sometidas a ensayos.

A partir de los antecedentes expuestos, se propone comprender el comportamiento resistente de las asociaciones minerales más presentes en el Yacimiento y que tienen injerencia en la susceptibilidad de estructuras, mediante el análisis e integración de la Base de Datos histórica completa de ensayos geotécnicos divisional de El Teniente (Tabla 5.1), además de ensayos de compresión triaxial en vetillas y de corte directo en fallas realizados en el contexto de esta memoria (Tabla 5.2), de muestras de distintos tipos de vetillas , categorizadas de acuerdo a la asociación mineral de su relleno, contenidas en probetas de roca intacta. Las estructuras ensayadas corresponden principalmente a vetillas hidrotermales de espesor superior a 2 mm; se exceptúa la muestra SG0740\_166.42\_166.55, de 0,5 mm de potencia.

Tabla 5.1: Resumen de la cantidad de ensayos geotécnicos con resultados de propiedades físicas en vetilla encontradas en la base de datos histórica de El Teniente y también las que a su vez cumplieron con ser de carácter grueso (>2mm) en alguna de las asociaciones objetivo de este estudio

| Tipo de ensayo geotécnico      | Nº Ensayos en vetillas de la BD Histórica | Nº Ensayos en vetillas gruesas de asociaciones minerales objetivo |
|--------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Tracción Indirecta (brasileño) | 90                                        | 69                                                                |
| Tracción Directa               | 36                                        | 36                                                                |
| Compresión Triaxial            | 40                                        | 19                                                                |
| Corte directo en Celda Hoek    | 28                                        | 24                                                                |

Estas vetillas presentan geometrías variadas, incluyendo morfologías rectas y sinuosas. Mediante análisis macroscópico (bajo lupa de aumento 20x) de las muestras se logró identificar y cuantificar los minerales presentes en cada vetilla, además se consideró medir la dureza relativa mediante rayador y el porcentaje modal de cada constituyente mineral del plano de ruptura, y otras características que podrían influir en las propiedades físicas de estas estructuras selladas, y que se indican más adelante.

Tabla 5.2: Resumen de la cantidad de ensayos geotécnicos realizados en el marco de esta memoria y los que efectivamente tuvieron ruptura por vetilla (Triaxiales) y cizallamiento por el plano de falla (Corte Directo)

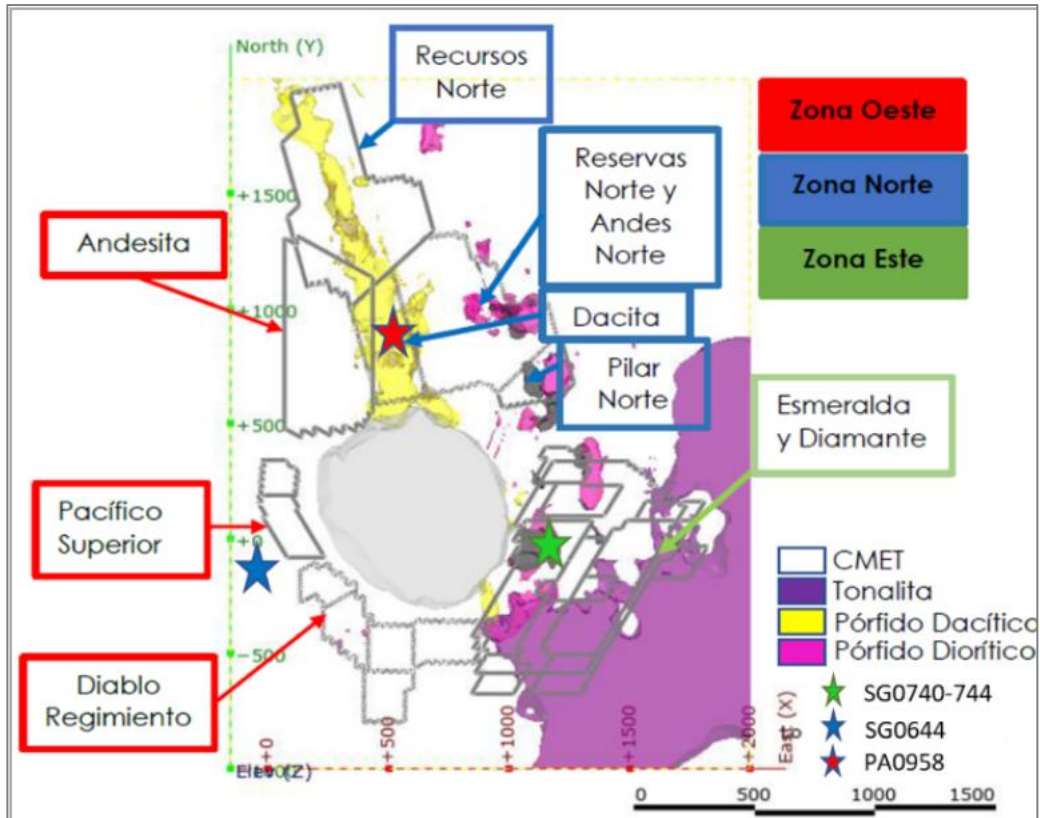
| Tipo de ensayo geotécnico             | N° de ensayos realizados | N° de ensayos efectivos |
|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Compresión Triaxial en vetillas       | 24                       | 14                      |
| Corte directo en celda Hoek en fallas | 5                        | 5                       |

### 5.2.1 Muestreo

Las muestras fueron obtenidas de sondajes diamantino HQ (63,5 cm de diámetro aproximadamente). En el muestreo, se buscó caracterizar distintos tipos de vetillas de acuerdo con las asociaciones mineralógicas más presentes en el yacimiento, abarcando tres sectores productivos del yacimiento como se indica en el mapa de ubicación de muestras (Figura 5.2), estos son:

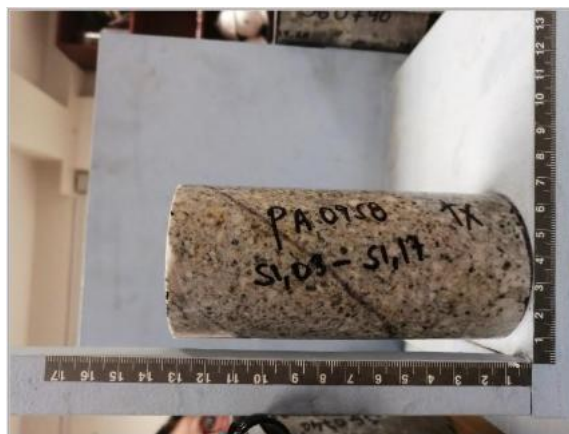
- Proyecto Diamante, cota mina 2162 m.
- Acceso Recursos Norte ADIT, cota mina 1946 m.
- Dacita, cota mina 2105 m.

Inicialmente, se identifican las muestras de acuerdo con el ID de sondaje, que corresponde a las iniciales SG (Sondaje Geotécnico) o PA (Preacondicionamiento) seguido por el desde- hasta del tramo de roca extraído como muestra para ensayo geotécnico (Figura 5.3), las muestras corresponden a 4 sondajes del yacimiento SG0740-SG0744-SG0644- PA0958, que en conjunto suman 1396 m de sondaje.



**Figura 5.2:** Ubicación de las muestras destinadas a ensayos geotécnicos.

En el Capítulo 6 se resumen las principales características de las vetillas ensayadas como; la asociación mineralógica, dimensiones, tipo de ruptura, así como los resultados proporcionados por los ensayos.



**Figura 5.3:** Rotulado de muestras destinadas a ensayos geotécnicos.

### 5.2.2 Descripción de vetillas selladas

Se efectuó, previo y posterior al ensayo, una descripción estructural y mineralógica a nivel macroscópico de las probetas de roca, con énfasis en las vetillas contenidas. Este procedimiento permite cuantificar de manera objetiva las características de las vetillas y los distintos tipos de rupturas en las probetas ensayadas.

Antes del ensayo la descripción macroscópica permitió la clasificación en tipos o clases de vetillas, luego estas estructuras han sido observadas y analizadas bajo aumento con lupa de mano (20 x) (Figura 5.4). Las muestras se describen principalmente en la mineralogía presente en el plano de ruptura donde pueden observarse las propiedades físicas de las vetillas y sus características mineralógicas. Mientras que la litología de la probeta corresponde a la roca de la cual se extrajo la muestra característica que, para efectos prácticos, se divide en tres unidades litológicas: CMET (Complejo Máfico El Teniente), PDAC (Pórfido Dacítico) y PDIO (Pórfido Diorítico) (véase Capítulo 3).

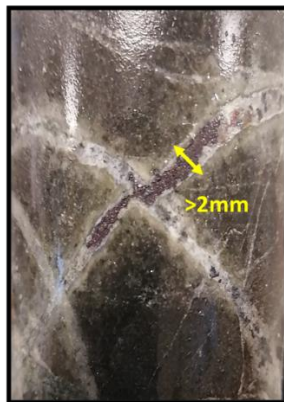


**Figura 5.4:** Vetilla Hidrotermal Principal (HP) característica de El Teniente con relleno mineral blando de calcopirita mayoritaria, pirita y anhidrita de forma minoritaria, con bordes sinuosos y sutura discontinua.

La caracterización geológica de cada vetilla permite su clasificación, esta clasificación con connotaciones genéticas, considera aspectos como su textura, mineralización y alteración (Capítulo 3, sección 3.3.3). Se diferencian en tres categorías TM, HP y HT, que se subdividen en 15 clases o subtipos (notas interna SGL-1-050/03, 2003).

Para efectos de este trabajo, no se categorizaron de acuerdo con los tipos genéticos, puesto que el objetivo de la memoria fue profundizar en el estudio del control que tiene la mineralogía del relleno de las estructuras geológicas intrabloque en el desarme y comportamiento mecánico del macizo rocoso (Figueroa,2003; Brzovic y Villaescusa, 2007; Brzovic, 2009; Brzovic y Figueroa, 2009; De los Santos, 2011; Bustos, 2011). Por lo anterior es que se propuso formar nuevas categorías de vetillas de acuerdo con la asociación mineralógica de su relleno, y que a su vez fuesen las más presentes dentro del yacimiento (Capítulo 6).

Una característica geométrica relevante para el análisis de las propiedades fue medir el espesor de la vetilla o potencia de la vetilla, considerando que esta última presenta variaciones de espesor a lo largo de su traza, se registró el valor modal, máximo y mínimo. La medición se efectuó con calibrador (geoflex) de precisión  $\pm 0,1$  mm., al momento de realizar la medición es importante cerciorarse de que la medida corresponda al espesor real y no al aparente, realizando la medida perpendicular al contacto vetilla-roca o vetilla-halo (Figura 5.5).



**Figura 5.5:** Vetilla de espesor mayor a 2 mm con relleno mineral blando (calcopirita oxidada) asegura participación de la vetilla en la ruptura durante ensayo geotécnico Triaxial.

### 5.2.2.1 Mineralogía de la vetilla

Consiste además de la identificación de los minerales, así como la proporción de cada especie mineral presente en la vetilla, en distinguir las propiedades de los minerales que componen la vetilla en el que:

- Mineral: Corresponde al contenido mineralógico.
- Variedad: Orden de formación del mineral.
- Porcentaje: Cantidad de mineral presente en la vetilla con respecto a un total de 100% (Figura 5.7).
- Forma: aspecto del mineral, este puede ser euhedral cuando las caras del cristal están bien definidas, subhedral en el que solo algunas caras son bien definidas y anhedral en este caso ninguna de las caras es bien definida.
- Textura: la terminología usada es la similar que en la sección textura de la vetilla, pero aquí es aplicado para cada especie mineral y se han agregado otros términos.
- Tamaño: se aplica al promedio de no menos de ocho mediciones del diámetro del cristal de un mineral determinado.

### 5.2.2.2 Registro Fotográfico

Incluyen fotografías de las vetillas analizadas en la que se incluye una escala graduada en centímetros, de acuerdo con el aumento se indican en la Figura 5.6.

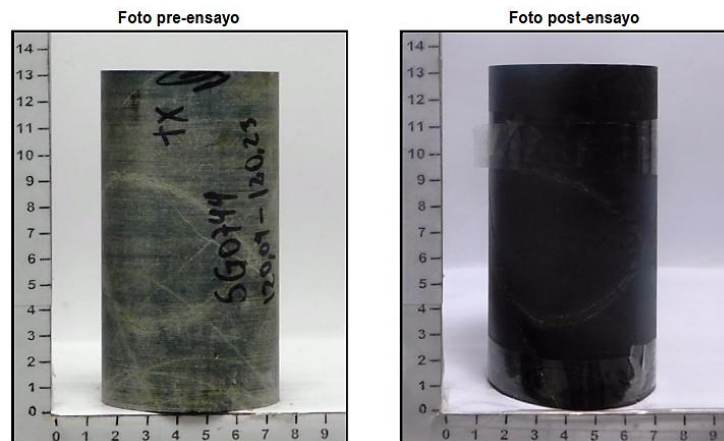
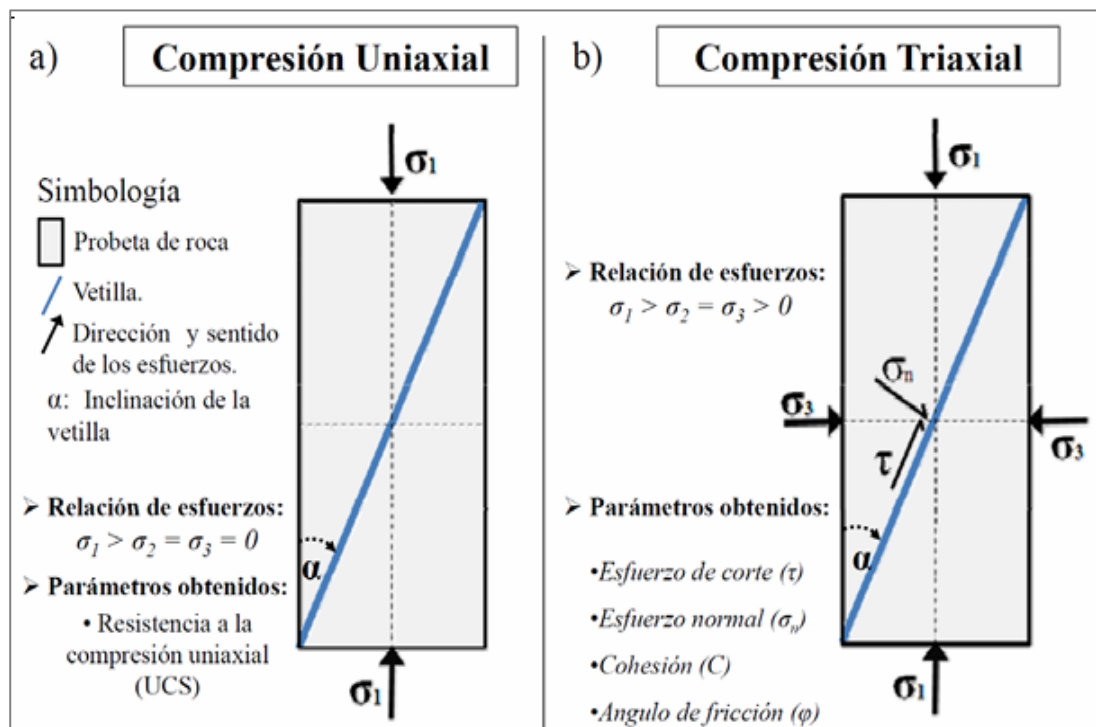


Figura 5.6: Registro fotográfico del momento previo al ensayo y el post ensayo de un Triaxial en CMET.

### 5.3 Ensayos de Compresión.

El ensayo de compresión es un ensayo mecánico que se ejecuta sobre materiales o rocas, para determinar su resistencia a la compresión y en algunos casos permite registrar la deformación que sufre la roca durante la prueba. Consiste en someter una probeta cilíndrica estandarizada de roca a una compresión axial,  $\sigma_1$ , hasta conseguir su ruptura. De esta manera se obtiene el máximo esfuerzo que resiste la roca o esfuerzo peak, esfuerzo que se traduce en el valor de la resistencia de la roca. En función de las condiciones de confinamiento en que se realiza el ensayo o relación de esfuerzos al que está sometida la roca, ver Figura 5.7, se distingue el ensayo de Compresión Uniaxial y el ensayo de Compresión Triaxial.



**Figura 5.7:** Ensayos de compresión. Se muestran esquemas de los ensayos indicando la relación de esfuerzo que participan y los parámetros que se pueden obtener. En a) Ensayo de Compresión Uniaxial y en b) Ensayo de Compresión Simple (Tomado de De los Santos, 2011).

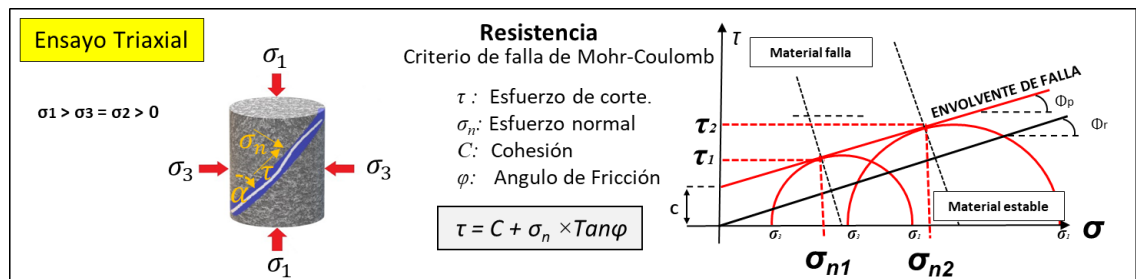


### 5.3.1 Ensayos de Compresión Triaxial.

El ensayo busca recrear las condiciones de la roca in situ, sometiéndolas a condiciones de esfuerzos confinantes (Figura 5.8), mediante la aplicación de presión hidráulica uniforme alrededor de la probeta ( $\sigma_3$ ). La relación entre los esfuerzos aplicados a la probeta es:

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$$

Permite determinar la envolvente de resistencia del material ensayado, a partir de la que se obtienen los valores de sus parámetros resistentes como la cohesión, C y ángulo de fricción  $\phi$ .



**Figura 5.8:** Disposición de los esfuerzos en un ensayo Triaxial, la configuración geométrica para asegurar ruptura por probeta, donde  $\alpha$  de estar entre 20-40° con respecto al eje axial de probeta, las propiedades físicas obtenidas a partir del criterio de Mohr-Coulomb (Elaboración propia).

Si el objetivo es lograr ruptura por estructura, la configuración geométrica de la estructura debe tener una inclinación entre 25 y 40° con respecto al eje axial de probeta, denominado ángulo alfa ( $\alpha$ ) (De los Santos, 2011).

#### 5.3.1.1 Preparación la muestra

El ensayo se realiza en base a la norma ASTM D-2664-95a que concuerdan con estándares de la ISRM. Al igual que los ensayos de Compresión Uniaxial, la relación

largo/diámetro debe ser igual a 2, debe tener sus caras basales paralelas y la vetilla debe tener una inclinación respecto al eje axial de la probeta, entre 25° y 40° (Figura 5.8). Las muestras seleccionadas fueron obtenidas de sondajes HQ, por lo que las dimensiones aproximadas de la probeta fueron de 127 mm de largo y 63,5 mm de diámetro aproximadamente

### 5.3.1.2 Procedimiento

El ensayo se realiza sobre probetas de casi 13 cm, éstas se introducen en cilindros de acero en cuyo interior se aplica la presión hidráulica sobre las paredes de la probeta. Ésta se rodea de una membrana impermeable para aislarla del líquido a presión.



**Figura 5.9:** Prensa servoasistida marca Matest, con cámara para ensayos triaxiales y monitor que registra los parámetros de entrada para la ejecución.

Al inicio del ensayo se aplica la carga axial  $\sigma_1$  y la presión confinante,  $\sigma_3$  de tal forma que sean aproximadamente iguales los rangos de ambos esfuerzos, con ayuda de una prensa servoasistida. Una vez alcanzado el nivel de presión confinante deseado  $\sigma_3$ , se aplica carga axial hasta conseguir la ruptura de la probeta. La presión confinante debe mantenerse constante a lo largo de todo el ensayo, los valores de confinamiento  $\sigma_3$ , y los valores  $\sigma_3$  obtenidos al momento de la ruptura en los ensayos se indican en la Tabla 5.2.

Tabla 5.3: Datos obtenidos de los ensayos de compresión triaxial en el marco de esta memoria, realizados en Laboratorio SGS Minerals, Chile.

| Id. Muestra           | Tipo vetilla | Tipo de ruptura | Litología | Espesor vetilla (mm) | Confinamiento (Mpa) | Esfuerzo principal $\sigma_1$ | Ángulo de ruptura $\alpha$ | JRC plano de ruptura |            |       |
|-----------------------|--------------|-----------------|-----------|----------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------|------------|-------|
|                       |              |                 |           |                      |                     |                               |                            | Ampl (mm)            | largo (mm) | valor |
| SG0740_166.42_166.55  | HP           | D1              | CMET      | 0,5                  | 10,1                | 217,3                         | 30                         | 1                    | 10         | 6     |
| SG0740_167.46_167.65  | HT           | B1              | CMET      | 3                    | 5,49                | 103,74                        | 43                         | 2                    | 5          | 10    |
| SG0740_271.19_271.33  | TM           | B1              | CMET      | 2                    | 15,4                | 247,7                         | 35                         | 2                    | 7          | 10    |
| SG0740_273.14_273.3   | TM           | D1              | CMET      | 2                    | 5,4                 | 131,32                        | 30                         | 2                    | 10         | 8     |
| SG0740_273.99_274.13  | TM           | B1              | CMET      | 1                    | 15,2                | 151                           | 35                         | 0,5                  | 5          | 4     |
| SG0740_274.31_274.45  | TM           | B1              | CMET      | 1                    | 5,2                 | 111,3                         | 15                         | 0,2                  | 5          | 4     |
| SG0740_275.49_275.62  | HT           | D1              | CMET      | 2                    | 10,3                | 140,3                         | 30                         | 3                    | 12         | 14    |
| SG0740_304.7_304.86   | TM           | D1              | CMET      | 10                   | 5,3                 | 114,6                         | 23                         | 0,5                  | 10         | 4     |
| SG0740_308.63_308.77  | HT           | B1              | CMET      | 0,5                  | 15,3                | 136,8                         | 42                         | 1                    | 5          | 4     |
| SG0740_378.72_378.86  | TM           | D1              | CMET      | 2                    | 20,6                | 250,3                         | 12                         | 0,5                  | 12         | 4     |
| SG0744_96.21_96.36    | TM           | B1              | CMET      | 1                    | 10,2                | 186,2                         | 35                         | 0,5                  | 4          | 4     |
| SG0744_96.98_97.1     | HP           | C               | CMET      | 2                    | 15,3                | 170,5                         | 25                         | 0,5                  | 5          | 2     |
| SG0744_96.98_97.1     | TM           | C               | CMET      | 2                    | 15,3                | 170,5                         | 33                         | 0,2                  | 9          | 4     |
| SG0744_98.78_98.92    | HP           | B1              | CMET      | 3                    | 10,1                | 166,3                         | 35                         | 1                    | 5          | 6     |
| SG0744_120.09_120.23  | HP           | D1              | CMET      | 2                    | 5,24                | 74,08                         | 27                         | 0,2                  | 13         | 4     |
| SG0744_157.51_157.66  | HP           | B2              | CMET      | 2                    | 16,9                | 108,7                         | 35                         | 1                    | 10         | 10    |
| SG0644_223.65_223.725 | TM           | C               | Tonalita  | 2                    | 6,03                | 86,15                         | 15                         | 2                    | 10         | 12    |
| SG0644_223.725_223.8  | HT           | C               | Tonalita  | 35                   | 6,03                | 86,15                         | 34                         | 2                    | 9          | 14    |
| PA0958_50.04_50.18    | TM           | D2              | Dacita    | 2                    | 10,2                | 189,1                         | 23                         | 1                    | 11         | 8     |
| PA0958_51.03_51.17    | TM           | D1              | PDAC      | 2                    | 20,1                | 249,2                         | 24                         | 1                    | 8          | 6     |
| PA0958_51.34_51.48    | TM           | D2              | PDAC      | 2                    | 15                  | 247,4                         | 22                         | 2                    | 10         | 8     |
| PA0958_51.49_51.68    | TM           | D1              | PDAC      | 2                    | 10,2                | 221                           | 25                         | 1                    | 12         | 6     |

Los datos para registrar durante el experimento son la carga o el esfuerzo axial  $\sigma_1$ , la deformación axial en el caso de disponer de bandas extensométricas (strenght gauge), el ángulo del plano de fractura y el ángulo que forman los planos de anisotropía (vetillas), con respecto a la dirección de la carga axial.

La prensa utilizada para la ejecución de los ensayos fue servo-asistida, la que permite programar el rango de velocidad de aplicación de alguna de las variables del ensayo, como el esfuerzo o deformación, para que sea ésta la que controle el proceso de ruptura de la roca. A lo largo del ensayo, se va comparando instantánea y electrónicamente la medida de la variable seleccionada con los valores programados, de tal forma que el sistema reacciona y una servo-válvula va aplicando o retirando presión hasta ajustarse la carga a los valores preestablecidos, los que se indican en la Tabla 5.3.

La prensa descrita permite registrar el comportamiento post peak obteniendo los valores de resistencia residual, es decir cuando la ruptura ya ha ocurrido. Los resultados de los ensayos de Compresión Triaxial dependerán, además de las características de la roca, de la presión confinante aplicada de manera tal que la resistencia peak aumenta con

el aumento de  $\sigma_3$ . El valor de la resistencia compresiva para un determinado valor de  $\sigma_3$  se obtiene dividiendo la fuerza aplicada por la sección de la probeta.

Los datos fueron procesados mediante diagramas de Mohr para obtener envolventes de resistencia y parámetros de Mohr–Coulomb.

#### 5.4. Ensayos de Tensión.

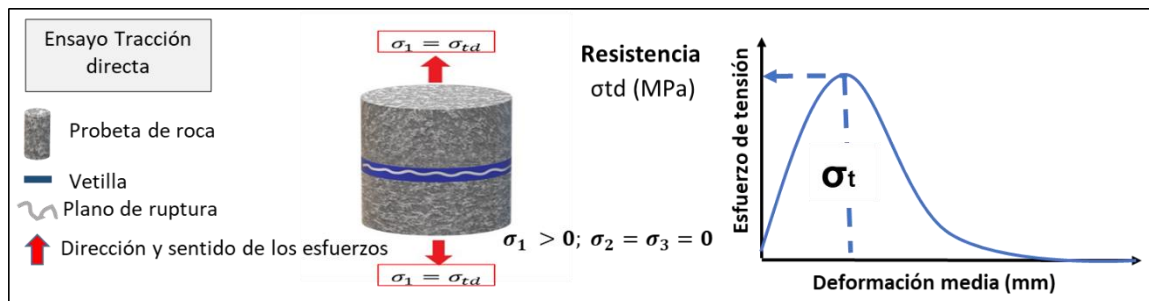
Consiste en medir de manera directa o indirecta la resistencia a la tensión o tracción de un material. El esquema del método utilizado y la relación de esfuerzo se observan en la Figura 5.10. La prensa descrita permite registrando el comportamiento post peak obteniendo los valores de resistencia residual, es decir cuando la ruptura ya ha ocurrido.

##### 5.4.1 Ensayos de Tracción Directa

A partir de este ensayo se puede obtener una medida directa de la resistencia uniaxial de un cilindro de roca (figura 5.10). La relación de esfuerzos involucrados es:

$$\sigma_3 < 0 \text{ y } \sigma_1 = \sigma_2$$

El ensayo consiste en aplicar a la muestra una fuerza de tensión uniaxial en la dirección de mayor longitud de la probeta, hasta conseguir la ruptura. En el caso de una vetilla ubicada en el centro de la probeta y perpendicular a la acción de los esfuerzos de tensión, si la ruptura es a través de la vetilla obtendremos valores de la resistencia a la tensión de la vetilla.



**Figura 5.10:** Esquemas de los ensayos indicando la relación de esfuerzo que participan y los parámetros que se pueden obtener (Elaboración propia).

En el contexto de esta memoria no se realizaron ensayos de tracción directa, pero se analizaron los resultados encontrados en la Base de Datos de ensayos geotécnicos.

#### 5.4.2 Ensayos de Tensión Indirecta

Aunque no se realizaron ensayos de este tipo, serán descritas sus principales características, ya que como parte de los análisis en el Capítulo 6 los datos proporcionados por las 100 pruebas de Tensión Directa son comparadas con aquellos que se han realizados por métodos indirectos en estudios previos en el yacimiento.



**Figura 5.11:** Esquemas de los ensayos de tracción indirecta indicando la relación de esfuerzo que participan y los parámetros que se pueden obtener (Elaboración propia).

Los métodos indirectos de la medida de la tensión son conocidos como Ensayo tipo Brasileño. Este consiste en medir la resistencia a la tensión uniaxial de un disco de roca de manera indirecta, asumiendo que la ruptura se producirá por la tensión generada en un estado de esfuerzo biaxial al que se somete la roca, compuesta por un esfuerzo de tensión y otro compresivo de magnitud no superior a 3 veces el esfuerzo de tensión (figura 5.11). La relación de esfuerzo es:

$$\sigma_1 > 0; \sigma_3 < 0 \text{ y } \sigma_2$$

##### 5.4.2.1 Procedimiento

Se aplica una carga vertical compresiva sobre un disco de roca, colocado horizontalmente entre dos placas a través de las cuales se transmite la fuerza, hasta conseguir la ruptura (figura 5.11). La resistencia a la tensión se obtiene mediante la fórmula:

$$\sigma_{ti} = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

Donde P es la carga que produce la ruptura, d diámetro del disco y l la longitud de la probeta. En el caso que la vetilla se ubique diametralmente en el disco de roca (Figura 5.11), y la ruptura se produzca en esta estructura, se obtendrá de forma indirecta el valor de resistencia a la tracción de la vetilla.

## **5.5 Ensayos de Corte Directo.**

### **5.5.1 Preparación de la muestra**

Las estructuras ensayadas, en el contexto de esta memoria serían las Fallas, se disponían de distintas formas en la probeta de roca, con una inclinación variable respecto al eje longitudinal de la probeta. Por esta razón, las muestras fueron cortadas con una sierra circular con hoja de diamante, de tal manera que el plano de falla a ensayar quede posicionado en el centro de la muestra y que permita el agarre de ésta en la máquina del ensayo. El corte de la probeta de roca, en algunos casos permitió definir más de una muestra para la misma vetilla (Fotografía 5.12).

Las dimensiones de las muestras deben permitir que la discontinuidad, en este caso la falla, definan un área mínima de 25 cm<sup>2</sup> como recomienda la ISRM (Brown 1981), específicamente la longitud de la muestra varía de 45 a 110 cm lo que implica que los planos de ruptura generados por las fallas definen formas elípticas y trapezoidales con áreas de 29 a 68,1 cm<sup>2</sup>

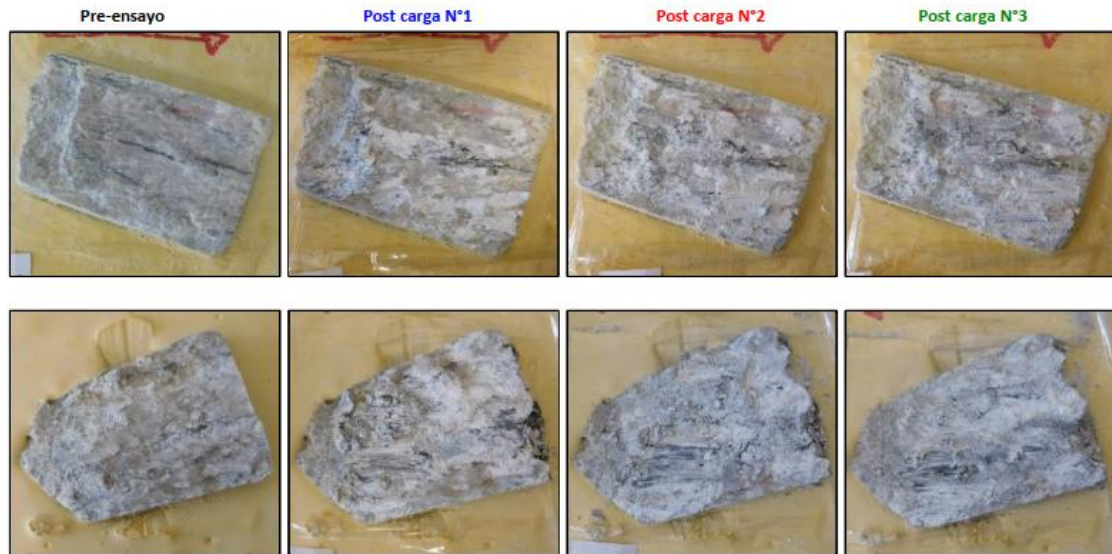


Figura 5.12: Secuencia de ensayo de corte directo en fallas en que el plano de ruptura configura una forma trapezoidal, en 3 fases de carga. Se puede observar que a medida de cada carga, la superficie de contacto efectiva aumenta, lo que a su vez disminuye la resistencia al corte (ver Capítulo 6) (Elaboración propia).

La posición de la falla en la muestra define una mitad superior y otra inferior, cada una de las mitades, sin que la muestra se fracture, es fijada a un bloque de yeso (Figura 5.12), que actúa como soporte rígido reteniendo la muestra en una posición fija, procurando que el bloque superior e inferior coincidan con el movimiento relativo del plano de cizallamiento, vale decir, que las estrías concuerden con el sentido de movimiento original de la estructura.

Para la selección de muestras destinadas a este ensayo se considera los siguientes criterios:

- Selección de fallas abiertas, las fallas deben tener un espesor mayor a 2 mm.
- Las fallas deben cortar a la muestra en forma diametral, o ser perpendiculares al eje longitudinal de la probeta de manera tal que asegure el agarre de la muestra en los bloques de yeso.
- Las muestras se seleccionaron a partir de sondajes de diámetro HQ obteniendo muestras de diámetro de 63,5 mm.

### 5.5.2 Procedimiento.

Un total de 5 muestras fueron seleccionadas para someterla a este tipo de ensayos (Tabla 5.4).

| Fallas ensayadas        | Espesor (mm) | Relación E/A | $\sigma_n$ (Mpa) (Nominal) | $\sigma_n$ (Mpa) (Efectivo) | $\tau$ residual (Mpa) (efectivo) | $\tau$ residual (Mpa) (nominal) | $\phi_r$ (°) | Cohesión (Mpa) C |
|-------------------------|--------------|--------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------|------------------|
| Diamante 1 (Anh-Ys-Cb)  | 2            | 1            | 2,5                        | 8,7                         | 5,07                             | 1,45                            | 29,8         | 0                |
|                         |              |              | 1,5                        | 3,7                         | 1,99                             | 0,81                            |              |                  |
|                         |              |              | 0,5                        | 1,1                         | 0,57                             | 0,25                            |              |                  |
| Diamante 2 (Ys-Anh-Chl) | 3            | 1            | 2                          | 4,7                         | 3,39                             | 1,47                            | 35,1         | 0                |
|                         |              |              | 1                          | 2,1                         | 1,29                             | 0,61                            |              |                  |
|                         |              |              | 0,5                        | 0,8                         | 0,33                             | 0,23                            |              |                  |
| RRN 1 (Anh-Cb-Ys-Chl)   | 12           | 4            | 2,5                        | 7,4                         | 5,81                             | 1,97                            | 41,34        | 0                |
|                         |              |              | 2                          | 4,0                         | 3,03                             | 1,53                            |              |                  |
|                         |              |              | 1,5                        | 2,9                         | 1,98                             | 1,04                            |              |                  |
| RRN 1' (Anh-Cb-Ys-Chl)  | 12           | 8            | 1,5                        | 10,2                        | 10,40                            | 1,54                            |              |                  |
|                         |              |              | 1,0                        | 3,0                         | 0,73                             | 0,24                            |              |                  |
|                         |              |              | 0,5                        | 1,4                         | 0,78                             | 0,29                            |              |                  |
| RRN2 (Anh-Ys-Py)        | 2            | 0,7          | 2,5                        | 7,8                         | 4,99                             | 1,59                            | 33           | 0                |
|                         |              |              | 1,5                        | 2,9                         | 2,06                             | 1,07                            |              |                  |
|                         |              |              | 0,5                        | 0,8                         | 0,46                             | 0,30                            |              |                  |
| Promedio                |              |              | 1,4                        | 4,1                         | 2,86                             | 0,96                            | 34,81        | 0,0626           |

Tabla 5.4: Resultados de ensayos de corte directo en fallas realizadas en el contexto de la presente memoria.

La máquina de corte directo utilizada es el modelo GCTS (Figura 5.13), fue confeccionada por el Instituto Nacional de Investigaciones y Ensayos SP, de Suecia. Entre las características técnicas del equipo se cuentan:

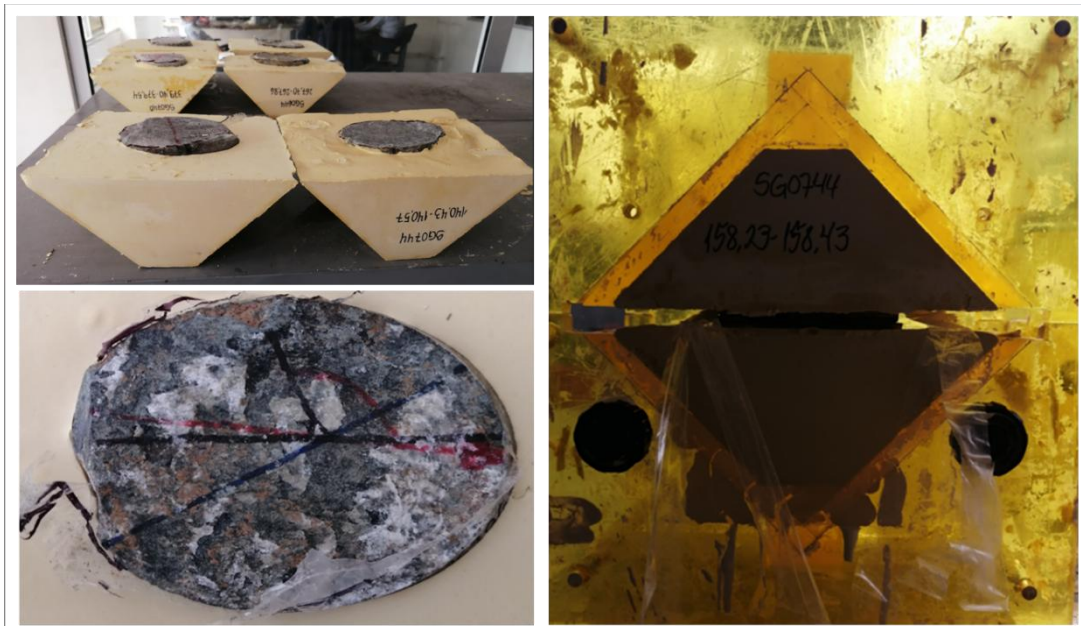
- Corresponde a una Máquina servo hidráulica, diseñada para ensayos de corte directo manteniendo una carga normal constante o CLN en la literatura especializada.
- Posee dos cajas de corte cilíndricas, una superior y otra inferior (Figura 5.13). La caja superior puede ser movida verticalmente y la inferior horizontalmente. Dentro de estas cajas se ubican bloques de concreto donde las muestras son empotradas (Figura 5.13). El desplazamiento vertical es medido por cuatro transductores LVDT1.
- La máxima carga normal y la carga horizontal aplicada puede alcanzar los 300 kN. Celdas de carga son usadas para medir la fuerza en ambas direcciones y al ser



dividida por el área de la sección central de la muestra puede entregar valores del esfuerzo normal a la estructura  $\sigma$  ubicados en los extremos de la muestra, estos corresponden a transformadores eléctricos utilizados para medir desplazamientos lineales. En tanto el desplazamiento horizontal es medido por un LVDT (Linear Variable Differential Transducer: Transformador eléctrico utilizado para medir desplazamientos lineales, y el esfuerzo de corte  $\tau$ ).



**Figura 5.13:** Celda hoek para ensayos de corte directo insitu (Elaboración propia).



**Figura 5.14:** a la izquierda arriba se encuentran las probetas empotradas en proceso de secado. Luego se miden los ángulos para regularizar zonas (Elaboración propia).

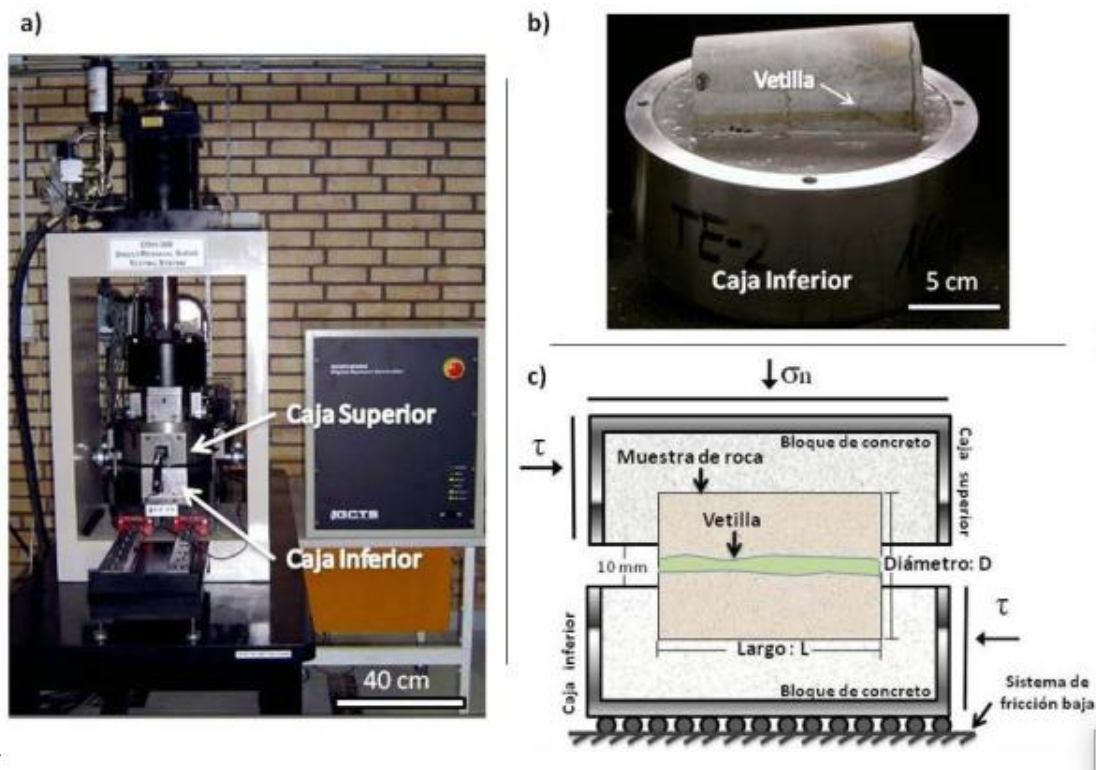
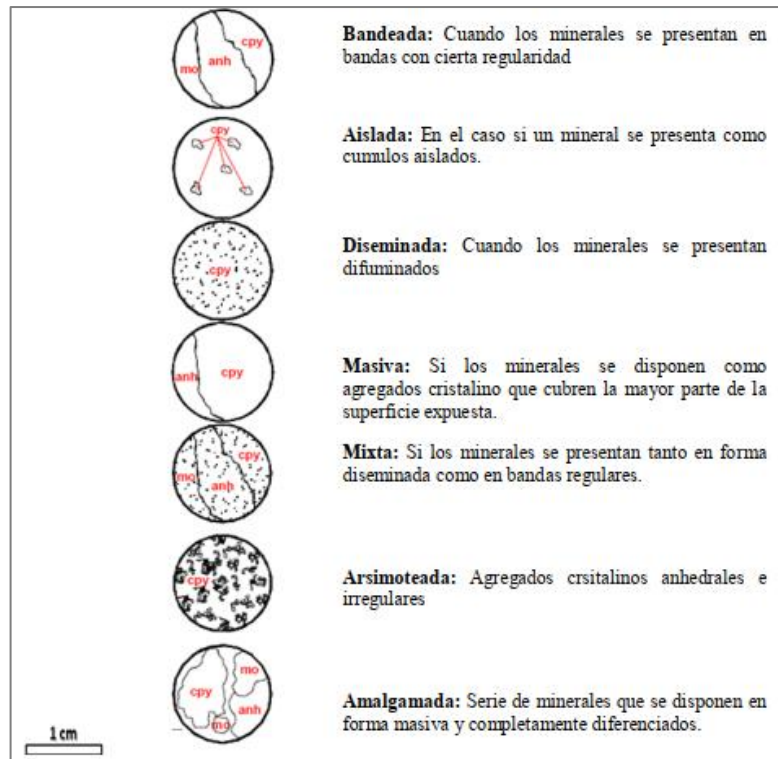


Figura 5.15: Máquina para efectuar ensayo de corte directo. En b) fotografía de la Caja inferior que contiene el Bloque de yeso que sostiene la muestra con la falla a analizar. c) Esquema del ensayo en el que se incluye los parámetros que intervienen como el esfuerzo normal  $\sigma_n$  y el esfuerzo de corte  $\tau$  (Tomado y modificado de De los Santos, 2011).

## 5.6 Ruptura

Se emplea el término ruptura al referirse al espacio abierto o fractura generada en la probeta de roca como resultado de los ensayos geotécnicos, estos planos de discontinuidad tienden a desarrollarse en las vetillas contenidas en la roca, en función de las características de la ruptura se realiza una clasificación en Tipos de Ruptura.

Los planos de ruptura son descritos considerando tanto aspectos geométricos como; su forma, la presencia de estrías, escalones o fracturas secundaria. Además, se estima su rugosidad en base a parámetros descriptivos y el valor del índice *JRC* La proporción y contenido mineralógico en el plano de discontinuidad, también es considerado y la descripción de la distribución de éstos se hace considerando las texturas descritas en la Figura 5.16.

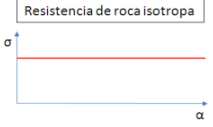
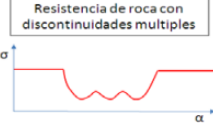
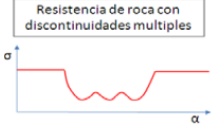


**Figura 5.16:** Distribución de la Mineralogía. Hábito del agregado mineral, observado en las vetillas y en las superficies expuestas por la ruptura de las probetas ensayadas (tomada de SGL-I-123/03, 2003).

### 5.6.1 Tipos de Ruptura.

Debido a la gran importancia que entrega la presencia de vetillas mineralizadas en la resistencia de las probetas, se sometieron a una revisión probetas ensayadas en los últimos años, agrupándolas en 5 tipos de rupturas basadas en la clasificación hecha por Marambio y otros (1999). Se ha confeccionado una tabla que resume las principales características de esta clasificación (Tabla 5.5).

Tabla 5.5: Resumen de las características de los tipos y subtipos de ruptura basada en la clasificación propuesta por Marambio y otros (1999), también se incluye un esquema de estas rupturas y la curva de resistencia asociada a la compresión vertical de la probeta y la inclinación del plano de ruptura.

| Tipo   | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |                                                                                                                                                                                                           | Esquema                                                                              | Curva de Resistencia                                                                 |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo A | <b>Ruptura por roca:</b> Se caracteriza por definir una o más superficies irregulares que atraviesan indistintamente tanto la roca como las vetillas, sin desarrollarse a través de éstas, es decir no existe efecto de las vetillas en esta ruptura. Como resultado se genera una probeta fracturada en múltiples fragmentos. |    |                                                                                                                                                                                                           |   |   |
| Tipo B | <b>Ruptura Mixta:</b> la ruptura es propagada simultáneamente a través de la roca y la vetilla, reconociéndose 2 subtipos                                                                                                                                                                                                      | B1 | <b>Superficie única mixta:</b> Con solo una superficie de ruptura. La roca se propaga por la roca y en parte por la vetilla, generando dos fragmentos en la probeta.                                      |   |   |
|        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | B2 | <b>Superficie múltiple mixta:</b> Desarrolla varias superficies de ruptura, que se propagan por la roca y la vetilla, rompiendo la probeta en varios fragmentos.                                          |   |                                                                                      |
| Tipo C | <b>Ruptura por varias vetillas:</b> La ruptura se propaga por más de una vetilla en forma simultánea, generando varios trozos de roca                                                                                                                                                                                          |    |                                                                                                                                                                                                           |   |   |
| Tipo D | <b>Ruptura por una vetilla:</b> Probeta que falla por una única estructura. Se reconocen dos subtipos                                                                                                                                                                                                                          | D1 | <b>Superficie Única:</b> Se genera solo una superficie de ruptura desarrollada por una vetilla dividiéndola la probeta en dos trozos.                                                                     |  |  |
|        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | D2 | <b>Superficie múltiple:</b> Presenta varias superficies de ruptura, desarrolladas a través de una vetilla o los demás planos se ubican a un solo lado de la vetilla fallada interrumpiéndose contra ella. |  |                                                                                      |
| Tipo E | <b>Agrupar las rupturas anormales:</b> causada por defecto del ensayo y/o defecto en la preparación de la probeta. Puede deberse también a problemas intrínsecos del material ensayado por lo tanto los valores de resistencia obtenidos serán anómalos.                                                                       |    |                                                                                                                                                                                                           |                                                                                      |                                                                                      |

Pereira y Russo (2000), según el tipo de ruptura, estima que las probetas cuya ruptura correspondan a los tipos A y B serán representativas de la roca intacta y las considera válidas para el cálculo de sus propiedades físicas. En el caso de la ruptura tipo C representan la resistencia de la roca con stockwork típica de El Teniente. Finalmente, en el caso de rupturas tipo D, el esfuerzo medido representaría la resistencia ofrecida por la vetilla fallada con las consideraciones respecto a la inclinación de la vetilla contenida en la probeta discutidas en la sección 5.3, en este tipo de ruptura se concentrarán nuestro análisis.

## **5.7 Análisis de Datos y Estadística.**

Los parámetros de resistencia, tanto las ejecutadas en el contexto de esta memoria como las recopiladas del registro divisional, se compilaron en bases de datos estructuradas por asociación mineralógica. Se calcularon estadísticas descriptivas para cada población, mediante software Excel y Roc Data. Se efectuaron análisis de regresión lineal para obtener envolventes de resistencia, reportándose coeficientes de correlación ( $R^2$ ) como medida de incertidumbre. Se evaluó el efecto de escala (espesor de estructura) mediante análisis de covarianza.

## **CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **6.1 Introducción.**

El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir de los ensayos geotécnicos, recopilados de la Base de Datos divisional (Tabla 5.1 Capítulo 5) como los realizados en el contexto de esta memoria (Tabla 5.2 Capítulo 5), realizados sobre vetillas y fallas del yacimiento El Teniente, organizados según el tipo de prueba ejecutada. Los ensayos se clasifican en:

- Ensayos de resistencia a la tracción indirecta (TI) mediante el método brasileño
- Ensayos de resistencia a la tracción directa (TD)
- Ensayos de resistencia a la compresión triaxial (Tx)
- Ensayos de resistencia al corte directo (CD) en vetillas
- Ensayos de resistencia al corte directo (CD) en fallas.

Para cada tipo de ensayo, se analiza la influencia de las asociaciones mineralógicas, el espesor de las estructuras y/o vetillas y otros parámetros geométricos sobre los parámetros de resistencia obtenidos. Los resultados presentados se comparan con estudios previos realizados en el yacimiento (Willoner, 2000; Padilla, 2004; Gavia, 2005; Bustos, 2011; De los Santos, 2011; Baraona, 2015) y se discuten las implicaciones geotécnicas para la estabilidad del macizo rocoso.

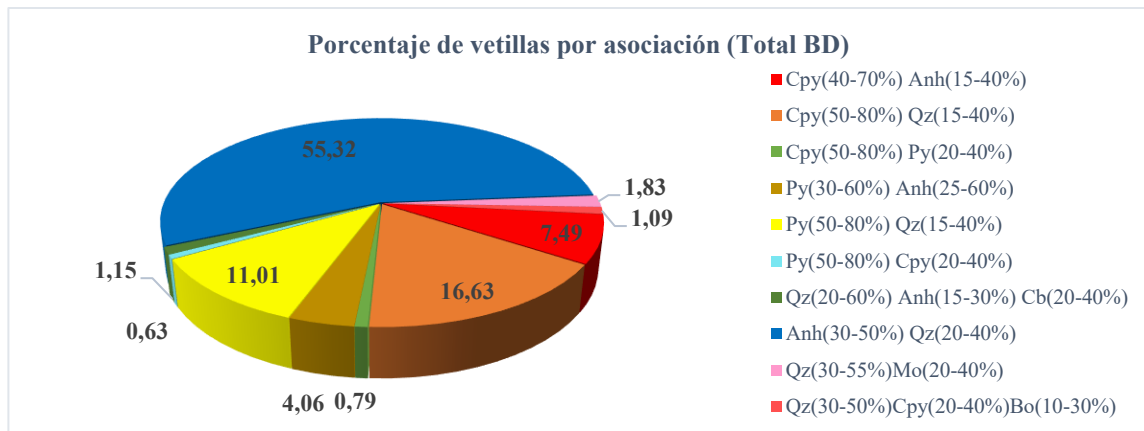
### **6.2. Determinación de las Asociaciones Minerales del Stockwork**

Como punto de partida en el análisis para determinar las asociaciones minerales, más presentes en el yacimiento El Teniente, se comenzó con el manejo de la Base de Datos de línea de detalle de sondajes, con el mapeo de vetillas blandas (VB) (Tabla 6.1), las que tienen injerencia en el desarme del macizo rocoso (Figuerola, 2003; Brzovic y Villaescusa, 2007), para establecer en base al porcentaje modal de cada mineral las asociaciones más presentes en el yacimiento.

**Tabla 6.1:** Minerales presentes en las vetillas destinados a ensayos geotécnicos, ordenados crecientemente según la dureza la escala de Mohs y clasificadas según dureza relativa (basada en Figueroa, 2003 y Brzovic y Villaescusa, 2007).

| Minerales de la cartilla de Mapeo VB (Nomenclatura) | Dureza relativa (Mohs) | Fórmula Química                            | Categoría según Figueroa, 2003; Brzovic y Villaescusa, 2007 |
|-----------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Molibdenita (Mo)                                    | 1                      | $MoS_2$                                    | Minerales Blandos ( $H < 3$ )                               |
| Yeso (Ys)                                           | 2                      | $(Mg, Fe, Al)_6(Al, Si)_4(OH)_8$           |                                                             |
| Clorita (Clo)                                       | 2                      | $CaSO_4 \cdot 2H_2O$                       |                                                             |
| Biotita (Bt)                                        | 2.5                    | $K(Mg, Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$          |                                                             |
| Bornita (Bo)                                        | 3                      | $Cu_5FeS_4$                                | Minerales Intermedio ( $3 \leq H \leq 4$ )                  |
| Carbonato (Cb)                                      | 3                      | $CaCO_3$                                   |                                                             |
| Anhidrita (Anh)                                     | 3.5                    | $CaSO_4$                                   |                                                             |
| Calcopirita (Cpy)                                   | 4                      | $CuFeS_2$                                  |                                                             |
| Magnetita (Mgt)                                     | 4-6.5                  | $Fe_3O_4$                                  | Minerales Duros ( $H > 4$ )                                 |
| Pirita (Py)                                         | 6.5                    | $FeS_2$                                    |                                                             |
| Cuarzo (Qz)                                         | 7                      | $SiO_2$                                    |                                                             |
| Turmalina (Tur)                                     | 7.5                    | $Na(Fe, Mg)Al_6(Bo_3)_3(Si_6O_{18})(OH)_4$ |                                                             |

Durante el manejo de la base de datos de línea de detalle de sondajes se procesaron 11.384 datos de vetillas blandas presentes en el yacimiento (Figura 6.1), a partir de ellos se estableció que la mayoría de las estructuras contiene Anhidrita (Anh) mayoritaria, entre 30 y 50 %, con una menor proporción de cuarzo (Qz, entre 20 y 40%, representando un 55,32% de la base de datos. Luego se logró establecer la asociación mineral de calcopirita mayoritaria, entre un 50 a 80% y cuarzo entre 15 a 40%, y esta asociación es coherente con el modelo de Mineralogía Relativa de El Teniente (Tabla 6.2) que tiene una unidad de estimación de 100% de calcopirita. Al igual que la asociación de pirita entre un 50 a 80% mayoritario y cuarzo entre 15 a 40%, que representaría la unidad de estimación de pirita 100%.

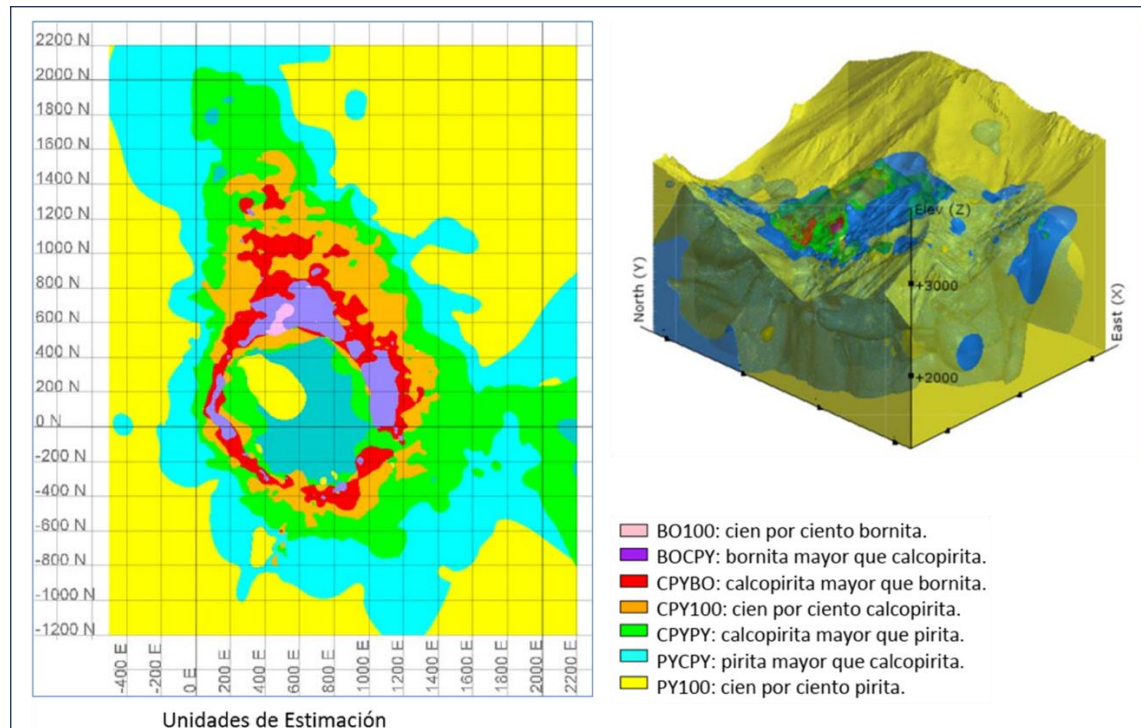


**Figura 6.1:** Porcentaje de vetillas según asociación mineral a partir de la base de datos total (Histórica más datos generados en esta memoria)



Como una forma de validar la definición de las asociaciones mineralógicas más representativas del yacimiento, se consultó el Modelo de Mineralogía Relativa de El Teniente (Burgos, 2016) con el objetivo de establecer asociaciones que contuvieran un relleno mineral objetivo como lo es la mena principal (Figura 6.2)

La complejidad de la mineralización hipógena de Cu radica mayormente en la cantidad de pulsos ígneos e hidrotermales reconocidos a la fecha, en gran parte sobreimpuestos consecutivamente en el área del depósito (Ojeda et al 1980, Cuadra 1986, Skewes et al 2002, Makshev et al 2004, Cannell et al 2005, Vry et al 2010; en Morel et al 2013). El modelamiento e interpretación de zonas realizado, es coherente con los modelos empíricos de pórfidos cupríferos, considerando las zonas de bornita como núcleos apicales y las zonas de calcopirita y pirita como volúmenes que surgen desde zonas profundas (Burgos, 2016).



**Figura 6.2:** A la izquierda planta 2210 con dominios correspondientes a las unidades de estimación y a la derecha el isométrico de dichas unidades de estimación en Leapfrog Geo. Tomado de Burgos (2016).

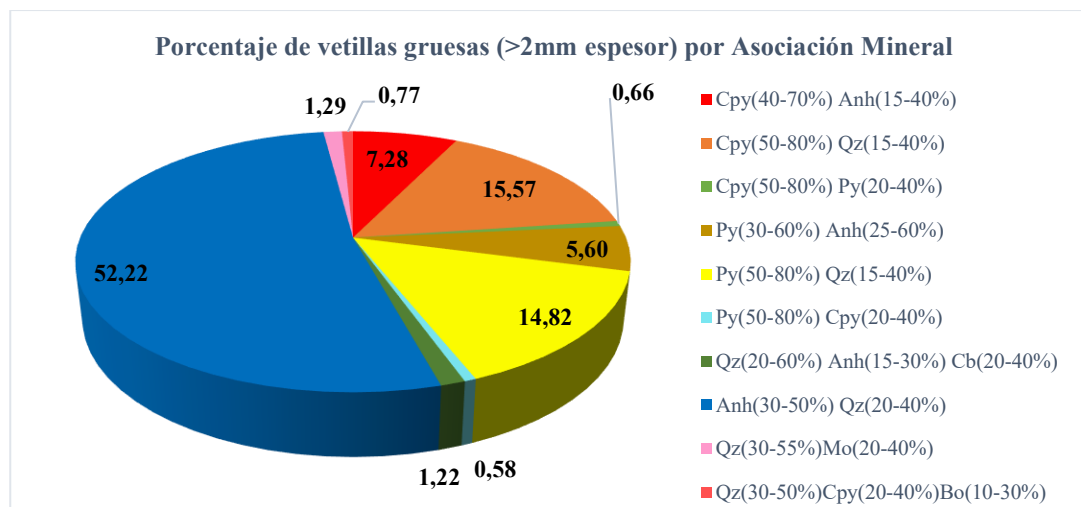


De acuerdo con lo anterior coincidiendo aproximadamente en cinco asociaciones del Modelo de Mineralogía Relativa con los establecidos en esta memoria (Tabla 6.2)

**Tabla 6.2:** Cuadro comparativo de asociaciones minerales consideradas en este estudio y las representativas de las unidades de estimación para el Modelo de Mineralogía Relativa de El Teniente.

| Asociación mineral en este estudio | Asociación mineral Modelo de Mineralogía El Teniente |
|------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Cpy(40-70%) Anh(15-40%)            | CPYBO= Calcopirita mayor que Bornita                 |
| Cpy(50-80%) Qz(15-40%)             | CPY100= cien por ciento Calcopirita                  |
| Cpy(50-80%) Py(20-40%)             | CPYPY= Calcopirita mayor que Pirita                  |
| Py(30-60%) Anh(25-60%)             |                                                      |
| Py(50-80%) Cpy(20-40%)             | PYCPY= Pirita mayor que Calcopirita                  |
| Py(50-80%) Qz(15-40%)              | PY100= Pirita cien por ciento                        |
| Qz(30-55%)Mo(20-40%)               |                                                      |
| Qz(20-60%) Anh(15-30%) Cb(20-40%)  |                                                      |
| Qz(30-50%)Cpy(20-40%)Bo(10-30%)    |                                                      |
| Anh(30-50%) Qz(20-40%)             |                                                      |

Por último, se establece de la base de datos aquellas asociaciones mayoritarias que solo representan aquellas vetillas con espesor mayor a 2 mm, para asegurar que las asociaciones sean representativas de vetillas relativamente gruesas dentro del enrejado poli direccional del stockwork de El Teniente (Figura 6.3). Esta restricción se basa en que las estructuras a mayor espesor de vetilla presentan menor resistencia (De los Santos, 2011), y de esa forma no estamos sobreestimando la resistencia de estructuras a poca escala. Aunque la mayoría de las proporciones se mantienen con este filtro, el número de datos disminuye a 4.824.



**Figura 6.3:** Porcentaje de vetillas mayor a 2 mm de espesor dentro de la base de datos de línea de detalle de sondajes por asociación mineral considerada en esta memoria.

## 6.3 Caracterización Mineralógica y Dureza Relativa en la Escala de Mohs.

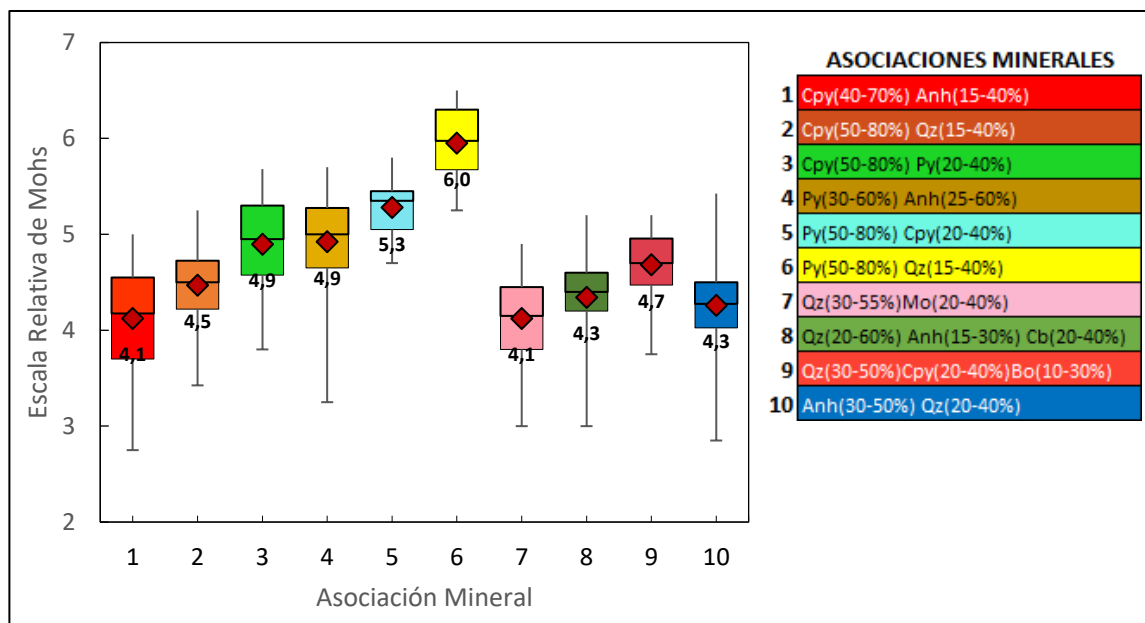
### 6.3.1 Dureza Relativa Ponderada de Asociaciones Minerales.

Para cuantificar la dureza relativa de cada asociación mineral identificada en las vetillas del stockwork, se calculó la dureza relativa ponderada mediante la sumatoria porcentual de las durezas individuales de cada mineral constituyente en cada vetilla. Este método permite asignar un valor único de dureza a cada asociación, facilitando el análisis comparativo entre diferentes tipos de vetillas.

Los resultados obtenidos revelan que las asociaciones minerales del yacimiento presentan durezas relativas ponderadas que oscilan entre 4.1 y 6.0 en la escala de Mohs (Figura 6.4). La asociación Py (50-80%) Qz (15-40%) exhibe la mayor dureza relativa ( $H = 6.0$ ), lo cual es consistente con la presencia mayoritaria de piritita y cuarzo, ambos minerales duros. En contraste, la asociación Qz (30-55%) Mo (20-40%) presenta la menor dureza relativa ( $H = 4.1$ ), lo que se atribuye a la presencia significativa de molibdenita, el mineral más blando identificado en el yacimiento.

Las asociaciones con calcopirita mayoritaria presentan valores intermedios de dureza. La asociación Cpy(40-70%) Anh (15-40%) exhibe  $H = 4.5$ , mientras que Cpy(50-80%) Py (20-40%) alcanza  $H = 4.9$ . Este incremento en la dureza se explica por la mayor proporción de pirita en la segunda asociación. De manera similar, las asociaciones con pirita mayoritaria muestran un aumento progresivo en la dureza a medida que se asocian con minerales más duros: Py (50-80%) Cpy(20-40%) presenta  $H = 5.3$ , un valor superior al de asociaciones con minerales blandos.

Un resultado particularmente relevante lo constituye la asociación Anh(30-50%) Qz(20-40%), que exhibe una dureza relativa de 4.3, inferior a lo esperado considerando la presencia de cuarzo. Este comportamiento anómalo sugiere que la disposición geométrica y la proporción relativa de los minerales pueden influir en las propiedades mecánicas de manera no lineal, aspecto que requiere investigación petrográfica complementaria.



**Figura 6.4:** Asociaciones minerales y su dureza relativa en la escala de Mohs.

### 6.2.2 Implicaciones Geotécnicas de la Dureza Mineral.

La caracterización de la dureza relativa de las asociaciones minerales constituye un parámetro fundamental para la evaluación preliminar de la calidad geotécnica de las estructuras del stockwork. Los resultados obtenidos permiten establecer que:

1. Las vetillas con minerales duros mayoritarios ( $H > 5$ ) tienden a presentar mayor resistencia mecánica y menor susceptibilidad a la degradación durante los procesos de excavación y manejo del mineral.
2. Las asociaciones con minerales blandos significativos ( $> 40\%$ ) pueden exhibir comportamientos mecánicos deficientes, requiriendo consideraciones especiales en el diseño de fortificación y en los planes de extracción.
3. La presencia de molibdenita masiva en vetillas de cuarzo reduce sustancialmente la dureza esperada, lo que podría asociarse a planos de debilidad preferencial durante los procesos de fracturamiento.
4. La dureza relativa ponderada constituye un indicador útil pero no suficiente para predecir el comportamiento mecánico de las vetillas, dado que factores geométricos y microestructurales pueden modificar significativamente las propiedades de resistencia.

## 6.3 Ensayos de Resistencia a la Tracción Indirecta (Método Brasileño)

### 6.3.1 Distribución de Asociaciones Minerales en ensayos de Tracción

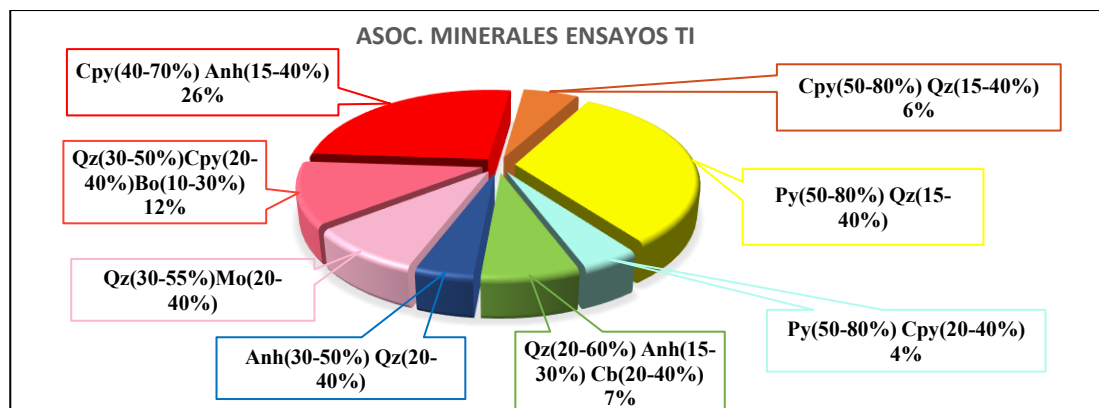
Los ensayos de resistencia a la tracción indirecta considerados fueron ejecutados mediante el método brasileño sobre un total de 69 muestras provenientes de estudios precedentes (Padilla, 2004; Bustos, 2011), todas con espesores de vetilla superiores a 2 mm (Tabla.6.3). Este criterio de selección asegura que la ruptura ocurra preferentemente

a través del relleno de la vetilla y no por la roca adyacente a la estructura, garantizando así la representatividad de los resultados.

Tabla.6.3: Resultados promedios de resistencia a la tracción de la base de datos de ensayos históricos.

| Autor          | Mineral mayoritario | Promedio Resistencia a la Tracción (Mpa) |
|----------------|---------------------|------------------------------------------|
| Willoner(2000) | Calcopirita         | 5,5                                      |
| Padilla (2004) | Calcopirita         | 6,2                                      |
| Gavia (2005)   | Calcopirita         | 5.5                                      |
| Bustos (2011)  | Calcopirita (Anh)   | 4,5                                      |
| Willoner(2000) | Anhidrita           | 4,4                                      |
| Padilla (2004) | Anhidrita           | 5,5                                      |
| Gavia (2005)   | Anhidrita           | 4,4                                      |
| Bustos (2011)  | Cuarzo (Cpy)        | 6,2                                      |

Una vez filtrada la Base de Datos histórica, de acuerdo con espesor de vetilla, contamos con los resultados de Padilla (2004) y Bustos (2011) y su distribución (Figura 6.5) da cuenta que la asociación Py (50-80%) Qz (15-40%) representa el 32% de los ensayos realizados (22 muestras), constituyendo el grupo más numeroso. Le sigue la asociación Cpy (40-70%) Anh (15-40%) con 26% (18 muestras), y Qz (30-50%) Cpy (20-40%) Bo (10-30%) con 12% (8 muestras). Otras asociaciones como Qz (30-55%) Mo (20-40%) con 9%, Qz (20-60%) Anh (15-30%) Cb (20-40%) con 7%, Cpy (50-80%) Qz (15-40%) con 6%, Py (50-80%) Cpy (20-40%) con 4% y Anh (30-50%) Qz (20-40%) con 4%, tienen una representación minoritaria pero significativa.



**Figura 6.5:** Asociaciones Mineralógicas en ensayos de Tracción Indirecta por método brasileño.

### 6.3.2 Resultados de Resistencia a la Tracción Indirecta por Asociación mineral.

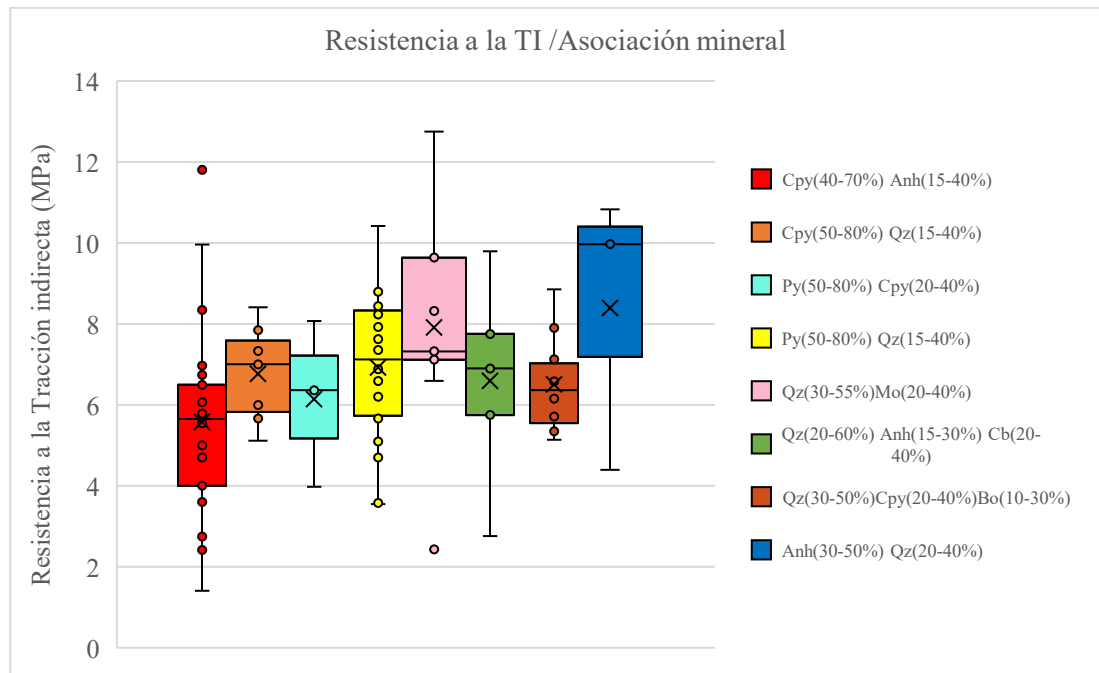
El análisis de los resultados de resistencia a la tracción indirecta revela una variabilidad considerable entre las diferentes asociaciones minerales, con valores que oscilan entre 1.4 MPa y 12.5 MPa. Esta dispersión refleja tanto la heterogeneidad composicional de las vetillas como la influencia de factores geométricos y microestructurales sobre la resistencia mecánica (Figura 6.6).

La asociación Qz(30-55%) Mo (20-40%) exhibe los valores más elevados de resistencia a la tracción indirecta, con una mediana de 8.2 MPa y valores máximos que alcanzan los 12 MPa. Este resultado contrasta aparentemente con la baja dureza relativa de esta asociación ( $H = 4.1$ ), sugiriendo que la matriz de cuarzo proporciona una resistencia significativa a pesar de la presencia de molibdenita. Sin embargo, ensayos previos analizados mediante tracción directa revelan que esta resistencia puede estar sobreestimada por el método indirecto, aspecto que se discute en la sección 6.4.

Las asociaciones con piritita mayoritaria presentan resistencias elevadas. Py (50-80%) Qz (15-40%) exhibe una mediana de 6.8 MPa, con un rango intercuartílico relativamente estrecho (5.2-8.4 MPa), indicando comportamiento mecánico consistente. La asociación Py (50-80%) Cpy (20-40%) muestra valores similares (mediana 6.5 MPa), corroborando la elevada resistencia de las vetillas con piritita predominante.

Las asociaciones con calcopirita mayoritaria presentan resistencias moderadas. Cpy (40-70%) Anh (15-40%) exhibe una mediana de 5.1 MPa, con dispersión considerable (3.2-7.3 MPa). La asociación Cpy (50-80%) Qz (15-40%) muestra resistencia ligeramente superior (mediana 5.8 MPa), atribuible a la mayor proporción de cuarzo. Qz (30-50%) Cpy (20-40%) Bo (10-30%) presenta valores intermedios (mediana 5.5 MPa), consistentes con su composición mixta de minerales duros e intermedios.

Las asociaciones con mayor proporción de minerales blandos exhiben las menores resistencias. Qz (20-60%) Anh (15-30%) Cb (20-40%) muestra una mediana de 4.2 MPa, mientras que Anh (30-50%) Qz (20-40%) presenta valores similares (4.5 MPa). Estos resultados confirman el efecto de susceptibilidad de minerales blandos como anhidrita y calcita sobre la resistencia a la tracción de las vetillas.

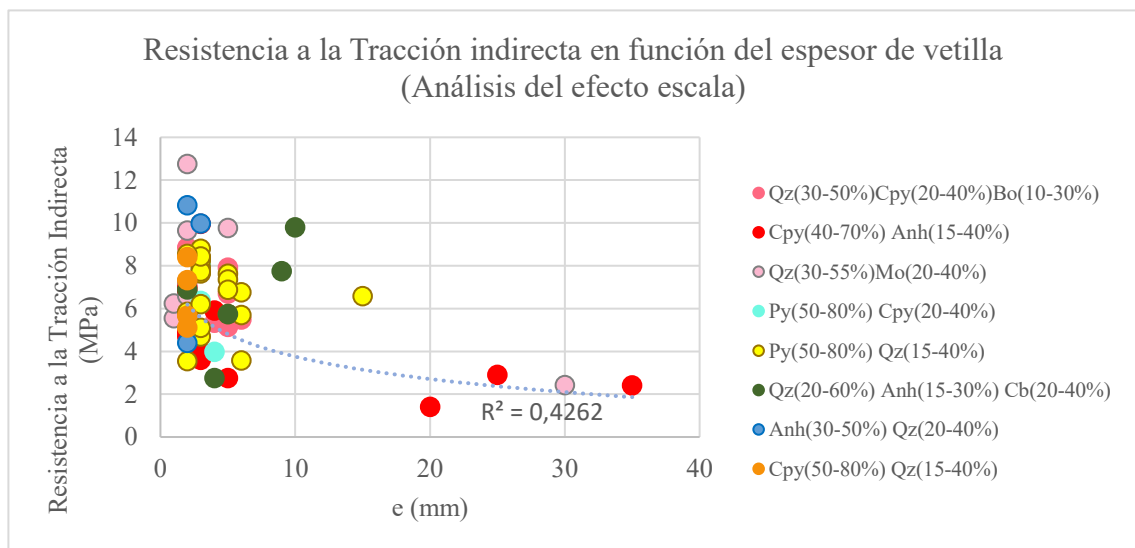


**Figura 6.6:** Resistencia a la Tracción Indirecta según Asociación mineral

### 6.3.3 Análisis del Efecto Escala: Influencia del espesor de Vetilla

Los resultados obtenidos revelan una tendencia general hacia la disminución de la resistencia a la tracción con el incremento del espesor de vetilla, aunque esta tendencia presenta dispersión considerable. Para espesores entre 2 y 10 mm, se observan resistencias que oscilan entre 3 y 12 MPa, con valores predominantemente superiores a 5 MPa. En el rango de 10 a 20 mm, las resistencias tienden a concentrarse entre 2 y 8 MPa, evidenciando una reducción progresiva. Para espesores superiores a 20 mm, los datos son escasos, pero sugieren resistencias generalmente inferiores a 4 MPa.

El ajuste logarítmico a los datos experimentales confirma la existencia de una tendencia negativa, aunque con coeficiente de determinación moderado ( $R^2 \approx 0.4$ ), indicando que el espesor de vetilla explica sólo parcialmente la variabilidad observada en la resistencia. Este resultado sugiere que otros factores, como la composición mineralógica específica, la textura del relleno, el grado de cementación y la presencia de micro discontinuidades, ejercen influencia significativa sobre la resistencia mecánica.



**Figura 6.7:** Resistencia a la Tracción Indirecta en función del espesor de vetilla para analizar el efecto escala.

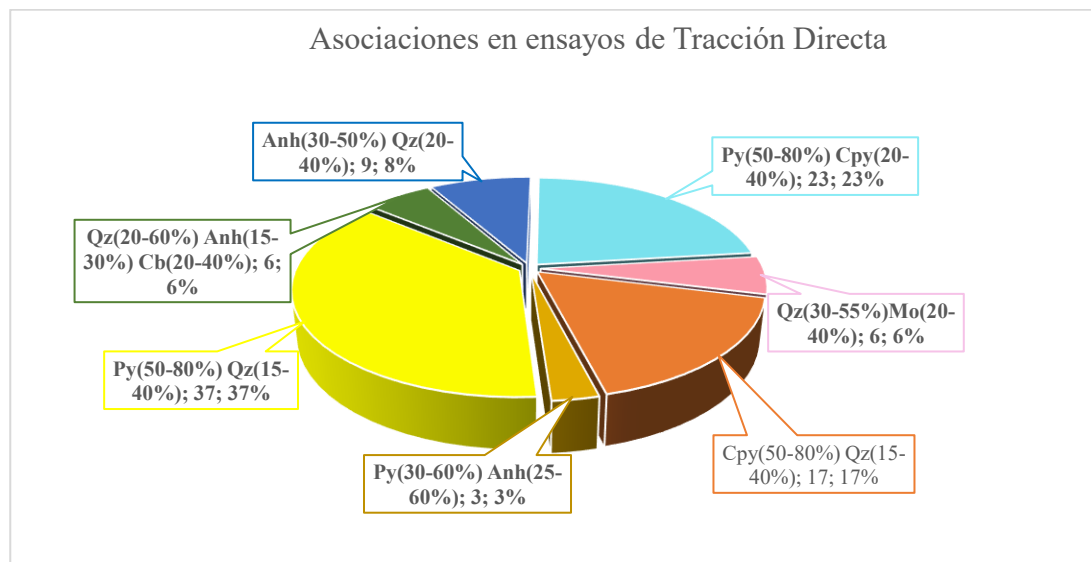


## 6.4 Ensayos de Resistencia a la Tracción Directa

### 6.4.1 Distribución de Asociaciones Minerales en Ensayos de Tracción Directa

Los ensayos de resistencia a la tracción directa fueron realizados sobre un total de 101 muestras, representando un conjunto de datos más extenso que el disponible para tracción indirecta. La distribución de asociaciones minerales en esta base de datos difiere de la observada en ensayos indirectos, reflejando la selectividad en el muestreo.

La asociación Py (50-80%) Qz (15-40%) representa el 37% de los ensayos de tracción directa (37 muestras), constituyendo nuevamente el grupo más numeroso. La asociación Py (50-80%) Cpy (20-40%) representa el 23% (23 muestras), mostrando mayor representatividad que en los ensayos indirectos. Cpy (50-80%) Qz (15-40%) constituye el 17% (17 muestras), mientras que asociaciones como Qz (20-60%) Anh (15-30%) Cb (20-40%) (6%), Qz (30-55%) Mo (20-40%) (6%), Anh (30-50%) Qz (20-40%) (8%) y Py (30-60%) Anh (25-60%) (3%) presentan menor representación.



**Figura 6.8:** Asociaciones en ensayos de Resistencia a la Tracción Indirecta

Esta distribución refleja tanto la frecuencia natural de las asociaciones en el yacimiento como las prioridades de caracterización establecidas en los estudios precedentes, con

énfasis en asociaciones con pirita y calcopirita debido a su relevancia metalúrgica y geotécnica.

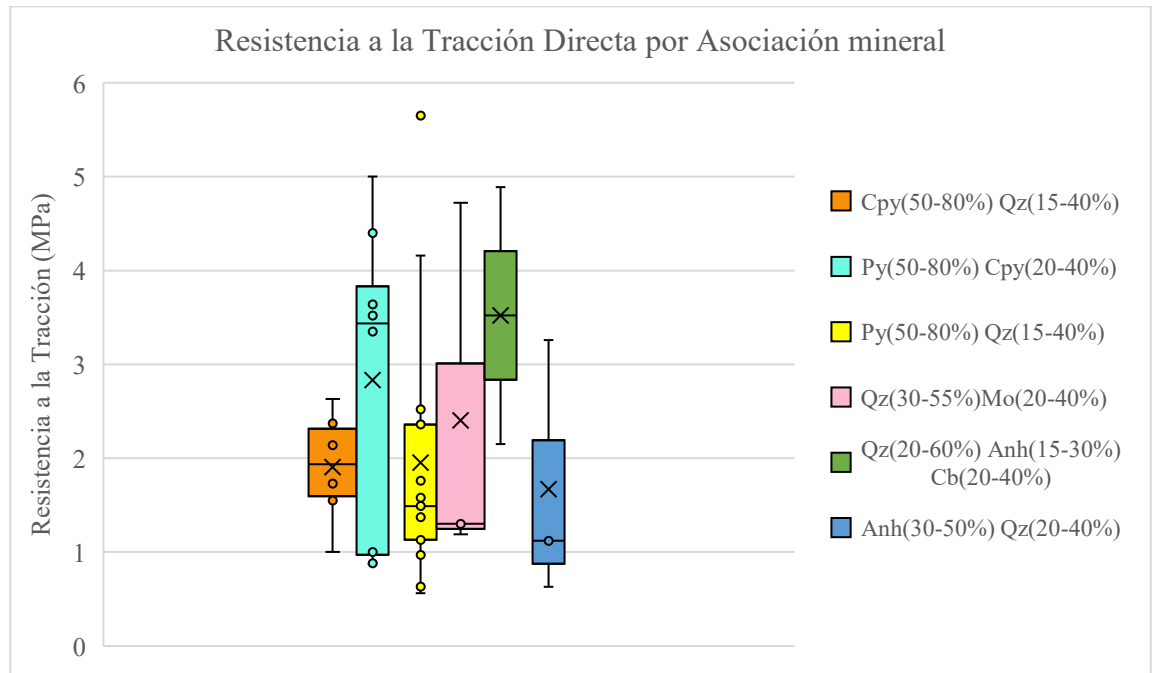
#### 6.4.2 Resultados de Resistencia a la Tracción Directa por Asociación mineral.

Los resultados de resistencia a la tracción directa exhiben valores sistemáticamente inferiores a aquellos obtenidos mediante el método indirecto (brasileño), confirmando la tendencia a la sobreestimación inherente a este último método. Los valores de resistencia oscilan entre 0.4 MPa y 5.5 MPa, con un rango significativamente más estrecho que el observado en ensayos indirectos.

La asociación Cpy (50-80%) Qz (15-40%) exhibe las mayores resistencias en tracción directa, con valores medianos de 2.8 MPa y máximos que alcanzan 4.5 MPa (Figura 6.9). Este resultado contrasta con el comportamiento observado en tracción indirecta, sugiriendo que la disposición geométrica del cuarzo en esta asociación favorece la resistencia bajo carga uniaxial directa.

Las asociaciones con pirita mayoritaria presentan resistencias moderadas. Py (50-80%) Qz (15-40%) exhibe una mediana de 1.8 MPa, significativamente inferior a la observada en tracción indirecta (6.8 MPa), confirmando la sobreestimación del método brasileño. Py (50-80%) Cpy (20-40%) muestra valores similares (mediana 1.9 MPa), con dispersión moderada.

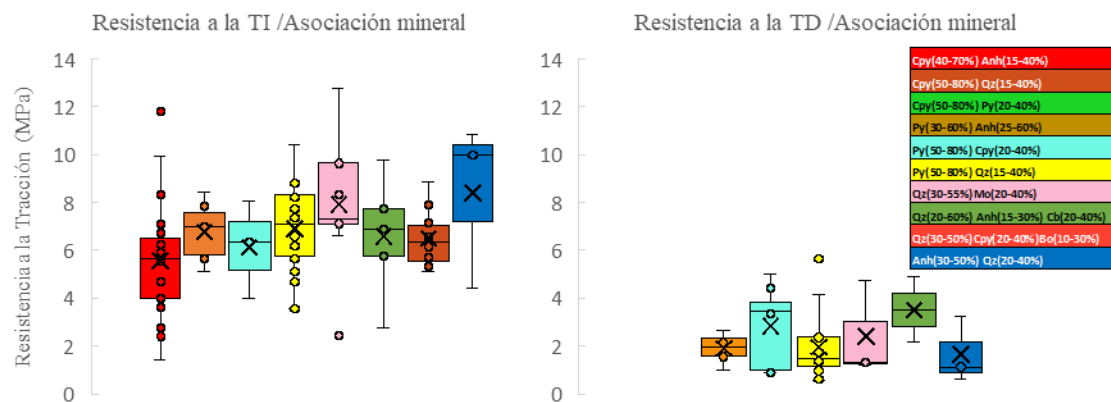
La asociación Qz (30-55%) Mo (20-40%) presenta un comportamiento particularmente interesante. Mientras que en tracción indirecta exhibía las mayores resistencias (mediana 8.2 MPa), en tracción directa muestra valores muy inferiores (mediana 1.5 MPa). Esta discrepancia sugiere fuertemente que el método indirecto sobreestima la resistencia de esta asociación, posiblemente debido a efectos de confinamiento lateral durante el ensayo brasileño que no reflejan el comportamiento bajo tracción uniaxial pura. La presencia de molibdenita en suturas o planos de debilidad podría explicar la baja resistencia bajo tracción directa.



**Figura 6.9:** Resistencia a la tracción directa por asociación mineral

Las asociaciones con mayor proporción de minerales blandos presentan las menores resistencias. Py (30-60%) Anh (25-60%) exhibe valores mínimos (mediana 0.6 MPa), confirmando el efecto en la susceptibilidad de estructuras de la anhidrita cuando constituye una proporción significativa del relleno. Anh (30-50%) Qz (20-40%) muestra resistencias ligeramente superiores (mediana 1.2 MPa), pero aún muy inferiores a lo esperado considerando la presencia de cuarzo.

La comparación sistemática entre los resultados de tracción directa (TD) e indirecta (TI) para asociaciones minerales (Figura 6.10) comparables revela diferencias sustanciales que tienen implicaciones importantes para la selección de parámetros de diseño geotécnico.



**Figura 6.10:** Comparativa a igual escala del tipo de ensayo para medición de resistencia tractiva en el marco de este estudio.

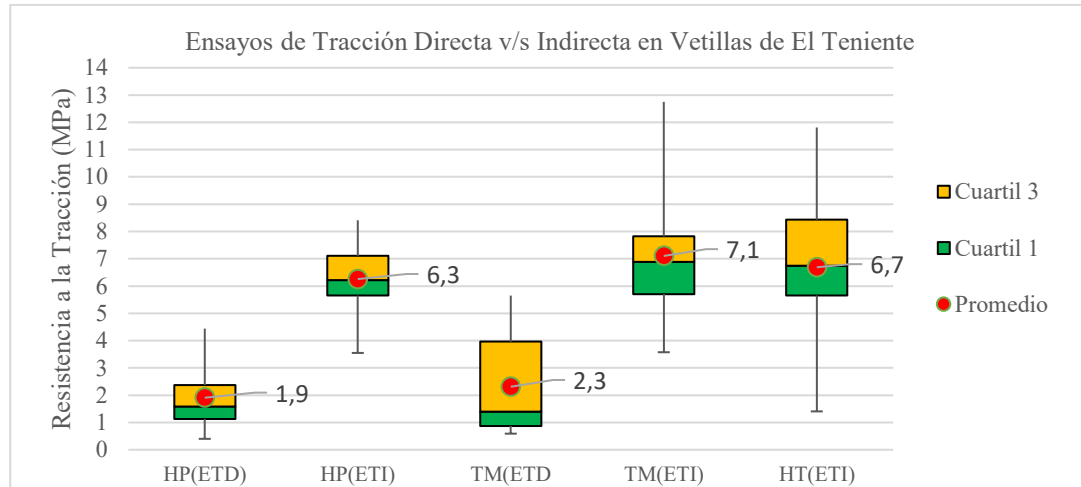
Para generalizar, en términos prácticos, el análisis comparativo entre ambas metodologías de ensayo se realizó en base a los tipos de vetillas (Tardimagmáticas, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardía) utilizados en el estándar de trabajo divisional con suficiente representación estadística obtenida de la base de datos histórica, con los resultados de los estudios de Barahona (2014) y De los Santos (2011) para ensayos de Tracción Directa, con 44 ensayos, y resultados de Padilla (2004) para ensayos de Tracción Indirecta, con 85 ensayos (Tabla 6.4).

Tabla 6.4: Estadística intercuartil para el análisis comparativo entre métodos para ensayos Tractivos

| Datos          | Resistencia a la Tracción (Mpa) |         |         |         |         |
|----------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                | HP(ETD)                         | HP(ETI) | TM(ETD) | TM(ETI) | HT(ETI) |
| Min            | 0,40                            | 3,55    | 0,59    | 3,58    | 1,41    |
| Primer Cuartil | 1,13                            | 5,65    | 0,88    | 5,70    | 5,65    |
| Mediana        | 1,58                            | 6,22    | 1,40    | 6,88    | 6,74    |
| Tercer Cuartil | 2,37                            | 7,11    | 3,96    | 7,82    | 8,43    |
| Max            | 4,44                            | 8,41    | 5,65    | 12,75   | 11,81   |
| Promedio       | 1,91                            | 6,25    | 2,31    | 7,10    | 6,69    |
| N° Datos       | 29                              | 28      | 15      | 27      | 30      |

Para vetillas tipo HP (Hidrotermales Principales), la relación promedio TD/TI es de aproximadamente 0.31, indicando que el método brasileño sobreestima la resistencia en un factor cercano a 3 (Figura 6.11). Para vetillas tipo TM (Tardimagmáticas), la relación

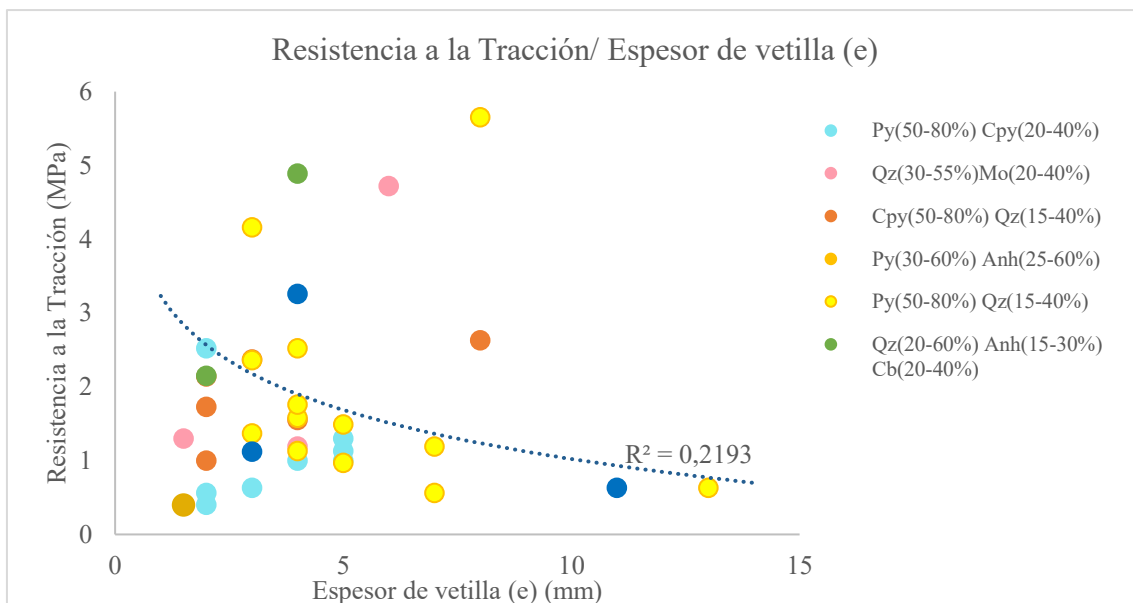
promedio TD/TI es de aproximadamente 0.32. Para vetillas tipo HT (Hidrotermal Tardía), esta relación no se obtuvo, puesto que no contamos con resultados para este tipo de vetillas en ensayos de tracción directa.



**Figura 6.11:** Gráfico comparativo para visualizar las diferencias cuantitativas entre ensayos de Tracción directa versus Indirecta.

#### 6.4.3 Análisis del Efecto Escala en los Ensayos de Tracción Directa

El análisis se realizó sobre ensayos con espesores de vetilla entre 1.5 mm y 13 mm. A diferencia de los ensayos indirectos, la base de datos de tracción directa incluye mayor proporción de muestras de espesores pequeños, reflejando las limitaciones técnicas para ejecutar ensayos directos sobre vetillas muy gruesas.



**Figura 6.12:** Resistencia a la Tracción Directa en función del espesor de vetilla para análisis del efecto escala.

Los resultados revelan una tendencia decreciente más pronunciada de la resistencia con el incremento del espesor en comparación con los ensayos indirectos (Figura 6.9 y Figura 6.12). Para espesores entre 1.5 y 3 mm, las resistencias oscilan entre 0.8 y 4.5 MPa, con valores predominantemente superiores a 1.5 MPa. En el rango de 3 a 7 mm, las resistencias tienden a concentrarse entre 0.6 y 3 MPa. Para espesores superiores a 7 mm, los datos son escasos, pero sugieren resistencias generalmente inferiores a 2 MPa.

El ajuste de regresión logarítmica a los datos experimentales confirma la existencia de una correlación negativa pero débil ( $R^2 \approx 0.2$ ), a la observada en ensayos indirectos.

## 6.5 Ensayos de Resistencia a la Compresión Triaxial

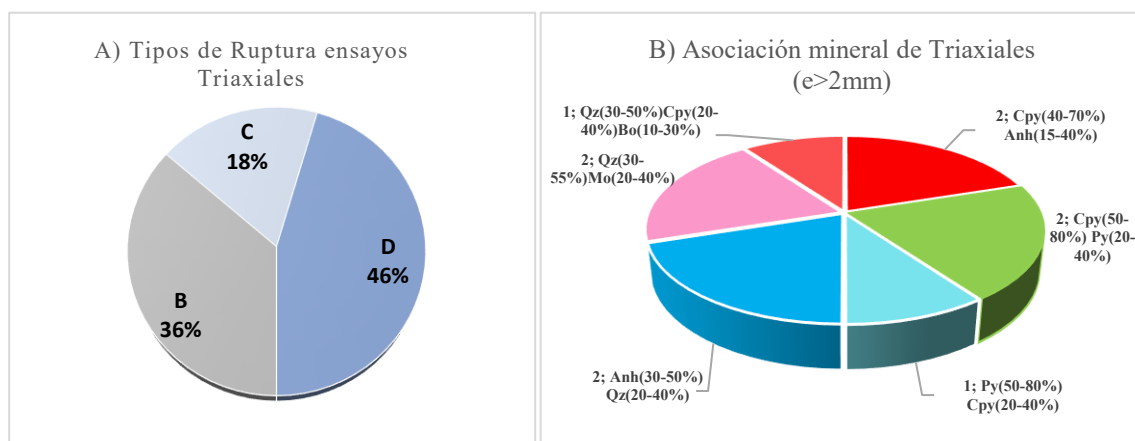
### 6.5.1 Caracterización de Muestras y tipos de Ruptura

Los ensayos de resistencia a la compresión triaxial fueron ejecutados sobre un total de 22 muestras obtenidas en el marco de este estudio, complementadas con datos históricos de De los Santos (2011) con 8 ensayos y Baraona (2014) con 10 ensayos. Las 22 muestras

ensayadas en el presente trabajo provienen de tres sectores principales del yacimiento: sondaje SG0740-SG0744 (sector Diamante, litología CMET, cota mina 2162 m), sondaje SG0644 (sector Recursos Norte ADIT 56, litología Tonalita, cota mina 1946 m) y sondaje PA0958 (sector Dacita, litología Pórfido Dacítico, cota mina 2105 m) (Tabla 6.5).

**Tabla 6.5:** Probetas para ensayos Triaxiales con rupturas por vetilla (s) ejecutadas en el marco de esta memoria.

| ID Probeta            | Sondaje | Tipo de ruptura | Sector   | Litología | Asociación Mx                   |
|-----------------------|---------|-----------------|----------|-----------|---------------------------------|
| SG0740_166.42_166.55  | SG0740  | D1              | Diamante | CMET      | Cpy(40-70%) Anh(15-40%)         |
| SG0740_273.14_273.3   | SG0740  | D1              | Diamante | CMET      | Cpy(40-70%) Anh(15-40%)         |
| SG0740_275.49_275.62  | SG0740  | D1              | Diamante | CMET      | Cpy(40-70%) Anh(15-40%)         |
| SG0740_304.7_304.86   | SG0740  | D1              | Diamante | CMET      | Anh(30-50%) Qz(20-40%)          |
| SG0740_378.72_378.86  | SG0740  | D1              | Diamante | CMET      | Qz(30-50%)Cpy(20-40%)Bo(10-30%) |
| SG0744_96.98_97.1     | SG0740  | C               | Diamante | CMET      | Cpy(50-80%) Py(20-40%)          |
| SG0744_96.98_97.1     | SG0744  | C               | Diamante | CMET      | Anh(30-50%) Qz(20-40%)          |
| SG0744_120.09_120.23  | SG0744  | D1              | Diamante | CMET      | Cpy(50-80%) Py(20-40%)          |
| SG0644_223.65_223.725 | SG0644  | C               | RRN      | Tonalita  | Py(50-80%) Cpy(20-40%)          |
| SG0644_223.725_223.8  | SG0644  | C               | RRN      | Tonalita  | Cpy(40-70%) Anh(15-40%)         |
| PA0958_50.04_50.18    | PA0958  | D2              | Dacita   | Dacita    | Qz(30-50%)Cpy(20-40%)Bo(10-30%) |
| PA0958_51.03_51.17    | PA0958  | D1              | Dacita   | PDAC      | Qz(30-55%)Mo(20-40%)            |
| PA0958_51.34_51.48    | PA0958  | D2              | Dacita   | PDAC      | Qz(30-55%)Mo(20-40%)            |
| PA0958_51.49_51.68    | PA0958  | D1              | Dacita   | PDAC      | Anh(30-50%) Qz(20-40%)          |



**Figura 6.13:** A) Tipos de ruptura en ensayos triaxiales donde el 64% corresponden a rupturas con grado de participación de la vetilla (C y D). B) Asociación mineral de ensayos triaxiales ejecutados en el marco de esta memoria.

La clasificación de los tipos de ruptura observados en los ensayos (Figura 6.13) se basó en la metodología propuesta por Marambio et al (1999), en la que se distinguen cuatro categorías principales:

- Tipo A: Ruptura a través de la roca intacta, sin afectación de la vetilla (0 ensayos)
- Tipo B: Ruptura mixta, con fracturamiento de vetilla y roca adyacente (8 de ensayos)

- Tipo C: Ruptura por varias vetillas, sin afectación de la roca adyacente (4 ensayos)
- Tipo D: Ruptura a través de la vetilla, sin afectación de la roca adyacente (10 ensayos).

El tipo D es el más frecuente e indica que la vetilla constituye el plano de debilidad preferencial, representativo del comportamiento del stockwork densamente vetilleado. Por su parte, el tipo C también considerado en el análisis, asumiendo que todas las vetillas participaron de la fractura de probeta. En resumen, se caracterizaron las vetillas provenientes de tipo de ruptura C y D que en conjunto representan el 50% de los ensayos triaxiales ejecutados por laboratorio SGS Ltda en el contexto de esta memoria.

#### 6.5.1 Envolventes de Resistencia Mohr-Coulomb

El análisis de los ensayos de compresión triaxial permite determinar los parámetros de resistencia al corte (cohesión  $c$  y ángulo de fricción interna  $\varphi$ ) mediante la construcción de envolventes de falla en el espacio de esfuerzos normales ( $\sigma_n$ ) y de corte ( $\tau$ ).

De acuerdo con el criterio de rotura de Mohr -Coulomb, la resistencia al corte se expresa como:

$$(1) \tau = c + \sigma_n \tan (\varphi)$$

Donde  $c$  es la cohesión y  $\varphi$  el ángulo de fricción interna (Coulomb, 1776), mientras que el esfuerzo a la Compresión Uniaxial teórica ( $\sigma_c$ ) en función del ángulo de fricción y la cohesión (Ecuación 3) se calcula incorporando el factor de capacidad portante asociado al ángulo de fricción interna del material descrita por (Bustos, 2011) como:

$$(2) N_\varphi = \tan \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right)^2$$

$$(3) \sigma_c = 2 * c * \sqrt{N_\varphi}$$

Donde  $N_\varphi$  es el factor de capacidad portante asociado al ángulo de fricción interna, y con el se obtuvo el esfuerzo a la Compresión Uniaxial de cada asociación mineral presente en el relleno de cada vetilla fracturada en ensayo de Compresión Triaxial.



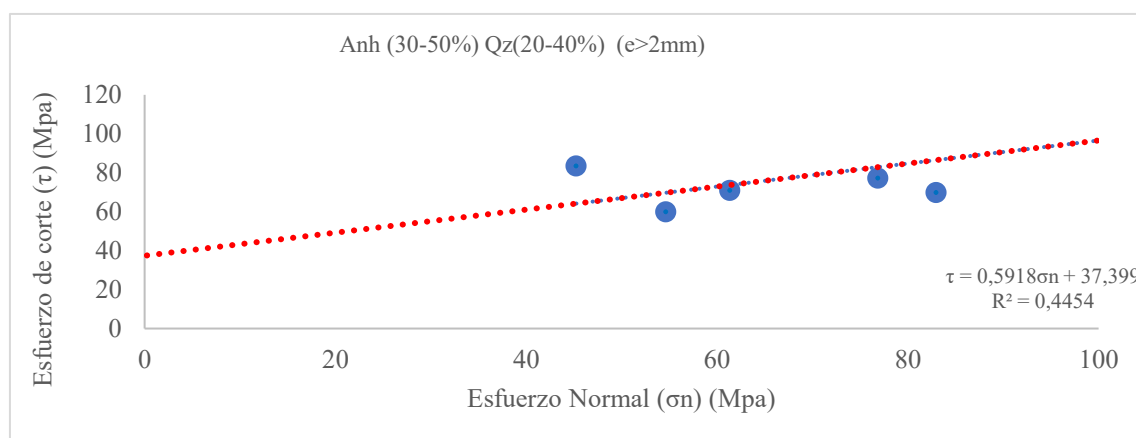
Los resultados obtenidos revelan comportamientos diferenciados según la composición mineralógica:

#### 6.5.1.1 Asociación Mineralógica Anhidrita (30-50 %) Cuarzo (20-40%)

En esta asociación se obtuvieron tres resultados favorables con espesor de vetilla mayor a 2 mm, complementando con tres resultados obtenidos por Baraona (2014) para esta asociación mineral (Tabla 6.6), logrando graficar una envolvente de Mohr-Coulomb en el ambiente de esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) y esfuerzo de corte o tangencial ( $\tau$ ) (Figura 6.14).

**Tabla 6.6:** Resultados ensayos triaxiales para asociación Anhidrita-Cuarzo.

| Asociación Anh(30-50%) Qz(20-40%) |                     |                                |                               |       |        |                       |                           |              |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------|--------|-----------------------|---------------------------|--------------|
| Autor Ensayo                      | ID Probeta          | Confinamiento $\sigma_3$ (Mpa) | Esfuerzo principal $\sigma_1$ | Radio | Centro | Esfuerzo Normal (Mpa) | Esfuerzo tangencial (Mpa) | espesor (mm) |
| Baraona 2014                      | Trx-07              | 5                              | 166                           | 80,5  | 85,5   | 83,00                 | 69,72                     | 2            |
| Baraona 2014                      | Trx-08              | 20                             | 189                           | 84,5  | 104,5  | 76,87                 | 77,19                     | 4            |
| Baraona 2014                      | Trx-14              | 15                             | 187                           | 86    | 101    | 45,24                 | 83,45                     | 2            |
| Olivo 2026                        | SG0740_304.7_304.86 | 5,3                            | 114,6                         | 54,65 | 59,95  | 54,65                 | 59,95                     | 10           |
| Olivo 2026                        | PA0958_51.49_51.68  | 10,2                           | 221                           | 105,4 | 115,6  | 105,4                 | 115,6                     | 2            |
| Olivo 2026                        | SG0744_96.98_97.1   | 15,3                           | 170,5                         | 77,6  | 92,9   | 61,3                  | 70,9                      | 2            |



**Figura 6.14:** Envolvente de Mohr-Coulomb para la asociación Anh(30-50%) Qz (20-40%)

La curva de fallamiento para la asociación mineral Anh (30-50%) Qz (20-40%) tiene un coeficiente de ajuste  $R^2 = 0.44$  lo que es débil, pero útil cuando la dispersión de los datos es alta, con una cohesión de  $c = 37$  MPa y un ángulo de fricción interna del material de  $\phi = 31^\circ$ . Valores elevados atribuibles a la presencia de cuarzo como componente

significativo en la resistencia a la Compresión Uniaxial teórico para esta asociación (Tabla 6.7).

Tabla 6.7: Propiedades de resistencia obtenidas para la asociación de Anhidrita-Cuarzo predominante

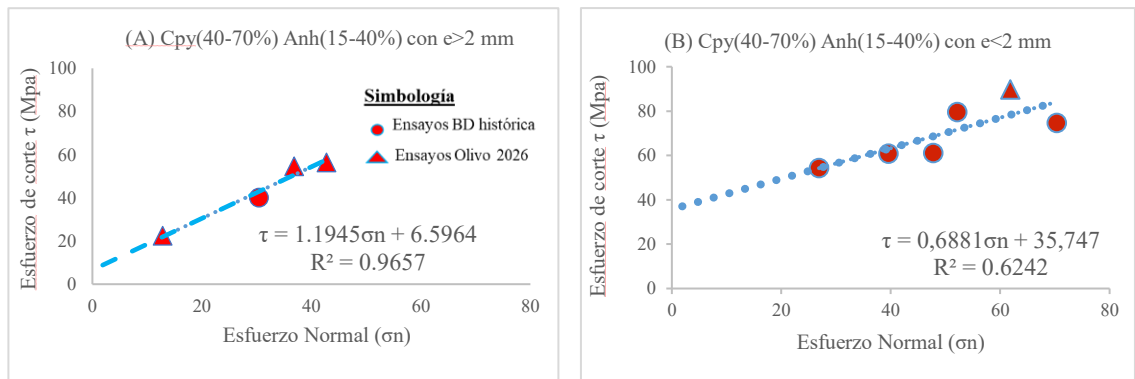
| Propiedades de resistencia para ensayos Triaxiales / Asociación Anh-Qz. |                      |                               |                |                               |                          |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|--------------------------|
| Asociación mineral                                                      | Dureza relativa mohs | Espesor de la estructura (mm) | Cohesión (Mpa) | Ángulo de fricción ( $\phi$ ) | $\sigma_c$ teórico (Mpa) |
| Anh (30-50%)<br>Qz(20-40%)                                              | 4,3                  | e>2                           | 37             | 31°                           | 132                      |

#### 6.5.1.2 Asociación Mineralógica Calcopirita (40-70 %) Anhidrita (15-40%)

Para esta asociación se obtuvieron tres resultados favorables para ruptura por vetilla mayor a 2 mm, y una para vetilla menor a 2 mm, por lo que se complementó con seis resultados de Barahona (2014) y De los Santos (2011) para ensayos triaxiales en esta asociación mineralógica tanto de vetillas con espesor mayor como menor a 2 mm (Tabla 6.8).

Tabla 6.8: Resultados ensayos triaxiales para asociación Calcopirita-Anhidrita.

| Asociación Cpy(40-70%) Anh(15-40%) |                      |                                |                               |       |        |                       |                           |              |
|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------|--------|-----------------------|---------------------------|--------------|
| Autor Ensayo                       | ID Probeta           | Confinamiento $\sigma_3$ (Mpa) | Esfuerzo principal $\sigma_1$ | Radio | Centro | Esfuerzo Normal (Mpa) | Esfuerzo tangencial (Mpa) | espesor (mm) |
| De los Santos 2011                 | VDA-14               | 10                             | 109                           | 49,5  | 59,5   | 30,40                 | 40,05                     | 2            |
| Baraona 2014                       | Trx-01               | 5                              | 161                           | 78    | 83     | 26,89                 | 54,18                     | 0,5          |
| Baraona 2014                       | Trx-03               | 15                             | 190                           | 87,5  | 102,5  | 39,56                 | 60,78                     | 0,5          |
| Baraona 2014                       | Trx-05               | 20                             | 249                           | 114,5 | 134,5  | 52,14                 | 79,54                     | 0,3          |
| Baraona 2014                       | Trx-09               | 20                             | 181                           | 80,5  | 100,5  | 70,34                 | 74,64                     | 1            |
| Baraona 2019                       | Trx-12               | 5                              | 135                           | 65    | 70     | 47,77                 | 61,08                     | 0,5          |
| Olivo 2026                         | SG0740_166.42_166.55 | 10,1                           | 217,3                         | 103,6 | 113,7  | 61,90                 | 89,72                     | 0,5          |
| Olivo 2026                         | SG0740_273.14_273.3  | 5,4                            | 131,32                        | 62,96 | 68,36  | 36,88                 | 54,52                     | 2            |
| Olivo 2026                         | SG0740_275.49_275.62 | 10,3                           | 140,3                         | 65    | 75,3   | 42,80                 | 56,29                     | 2            |
| Olivo 2026                         | SG0644_223.65_223.8  | 6,03                           | 86,15                         | 40,06 | 46,09  | 12,88                 | 22,40                     | 35           |



**Figura 6.15:** Envolvente de Mohr-Coulomb para la asociación Calcopirita (40-70%) Anhidrita (15-40%) para espesor de vetilla (A) mayor y (B) menor a 2 mm.

Para esta asociación se realizó un análisis separado por espesor de vetilla para ver el efecto escala en la resistencia al corte en esta asociación, resultando para  $e > 2$  mm:  $c = 7$  MPa,  $\phi = 50^\circ$ ,  $\sigma_c = 38,5$  MPa. Para  $e < 2$  mm:  $c = 36$  MPa,  $\phi = 35^\circ$ ,  $\sigma_c = 138$  MPa (Tabla 6.9). La cohesión se incrementa sustancialmente en vetillas más delgadas, reflejando mejor cementación y homogeneidad en sus minerales constituyentes, mientras que se evidencia el efecto escala negativo en la resistencia a la Compresión Uniaxial en función del espesor de vetilla, tal que a mayor espesor la resistencia máxima es menor a la necesaria para fallar una vetilla más delgada.

Tabla 6.9: Propiedades de resistencia obtenidas para la asociación de Calcopirita-Anhidrita predominante

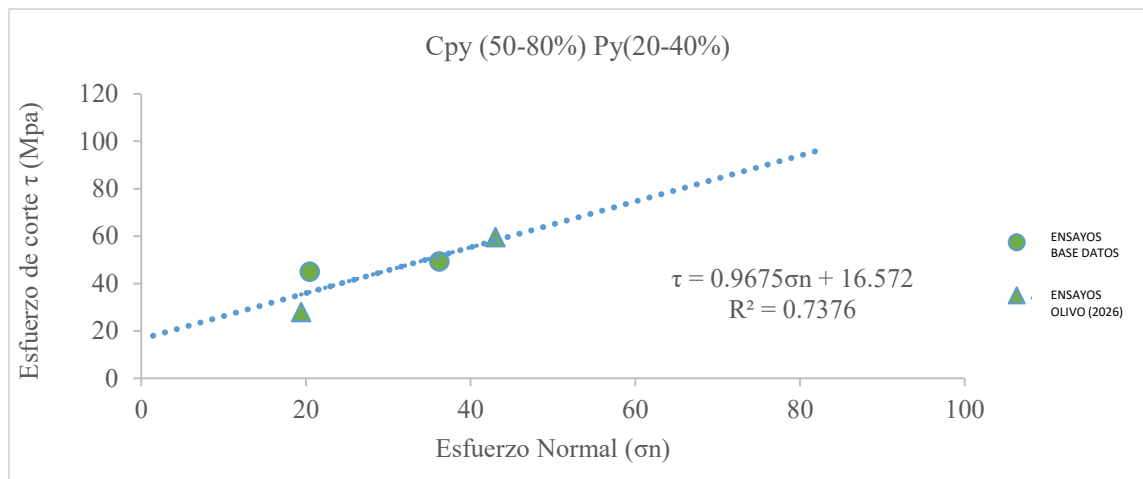
| Propiedades de resistencia para ensayos Triaxiales /Asociación Cpy-Anh. |                      |                               |                |                               |                  |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|------------------|
| Asociación mineral                                                      | Dureza relativa mohs | Espesor de la estructura (mm) | Cohesión (MPa) | Ángulo de fricción ( $\phi$ ) | $\sigma_c$ (Mpa) |
| Cpy (40-70%) Anh(15-40%)                                                | 4,1                  | $e > 2$                       | 7              | $50^\circ$                    | 38,5             |
| Cpy (40-70%) Anh(15-40%)                                                | 4,1                  | $e < 2$                       | 36             | $35^\circ$                    | 138,3            |

### 6.5.1.3 Asociación Mineralógica Calcopirita (50-80 %) Pirita (20-40%)

En el marco de esta memoria se obtuvieron dos resultados favorables para vetillas de la asociación mineralógica de Calcopirita (50-80%)- Pirita (20-40%) mayores a 2 mm, por lo que se complementó con dos resultados de De los Santos (2011) para obtener la envolvente de resistencia (Tabla 6.10).

Tabla 6.10: Resultados ensayos triaxiales para asociación Calcopirita-Pirita.

| Asociación Cpy(50-80%) Py(20-40%) |                      |                                |                               |       |        |                       |                           |              |
|-----------------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------|--------|-----------------------|---------------------------|--------------|
| Autor Ensayo                      | ID Probeta           | Confinamiento $\sigma_3$ (Mpa) | Esfuerzo principal $\sigma_1$ | Radio | Centro | Esfuerzo Normal (Mpa) | Esfuerzo tangencial (Mpa) | espesor (mm) |
| De los Santos 2011                | VDA-02               | 10                             | 129                           | 59,5  | 69,5   | 36,23                 | 49,33                     | 5            |
| De los Santos 2011                | VDA-05               | 5                              | 151                           | 73    | 78     | 20,48                 | 44,94                     | 3            |
| Olivo 2026                        | SG0744 96.98 97.1    | 15,3                           | 170,5                         | 77,6  | 92,9   | 43,02                 | 59,45                     | 2            |
| Olivo 2026                        | SG0744 120.09 120.23 | 5,24                           | 74,08                         | 34,42 | 39,66  | 19,43                 | 27,85                     | 2            |



**Gráfico 6.16:** Envolvente de Mohr-Coulomb para la asociación Calcopirita (50-80%) Pirita (20-40%) para espesor de vetilla mayor a 2 mm.

Esta asociación de Calcopirita (50-80%)- Pirita (20-40%) (Tabla 6.11), a diferencia de la anterior de Calcopirita (40-70%)- Anhidrita (15-40%) (Tabla 6.9), tiene dureza relativa más alta de 4.9, lo que demuestra la injerencia de la pirita en la dureza relativa de vetillas que presumiblemente son consideradas de comportamiento blando. De igual manera se observa que la Resistencia a la Compresión Uniaxial de  $\sigma_c = 80,2$  MPa (Tabla 6.11) es mayor que la asociación de Calcopirita (40-70%)- Anhidrita (15-40%) en casi el doble de

magnitud, reiterando el efecto en el comportamiento resistivo de la Pirita en vetillas con Calcopirita predominante.

Tabla 6.11: Propiedades de resistencia obtenidas para la asociación de Calcopirita-Pirita predominante

| Propiedades de resistencia para ensayos Triaxiales /Asociación Cpy-Py. |                      |                               |                |                               |                  |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|------------------|
| Asociación mineral                                                     | Dureza relativa mohs | Espesor de la estructura (mm) | Cohesión (MPa) | Ángulo de fricción ( $\phi$ ) | $\sigma_c$ (Mpa) |
| Cpy (50-80%) Py(20-40%)                                                | 4,9                  | e>2                           | 17             | 44°                           | 80,2             |

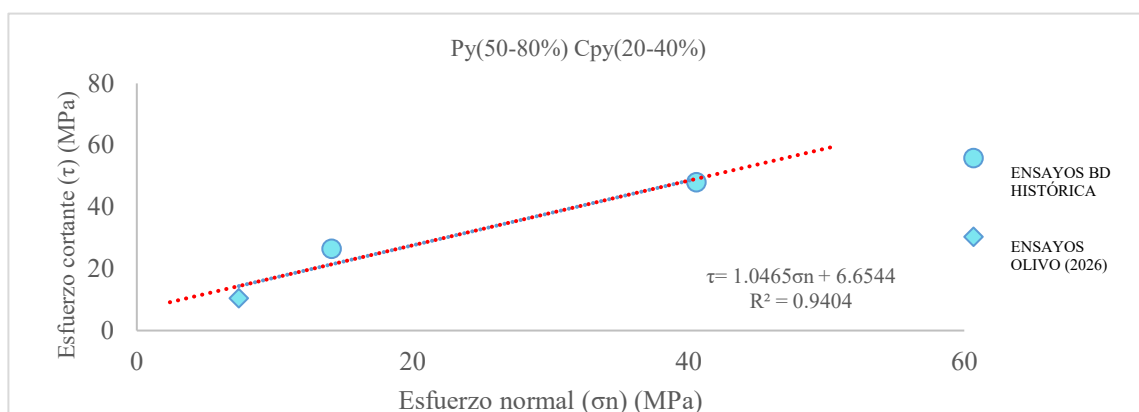
#### 6.5.1.4 Asociación Mineralógica Pirita (50-80 %) Calcopirita (20-40%)

En esta asociación se obtuvo un resultado favorable en el marco de esta memoria, y se complementó con dos resultados más de De los Santos (2011) para vetillas con espesor mayor a 2 mm (Tabla 6.12).

Tabla 6.12: Resultados ensayos triaxiales para asociación Pirita-Calcopirita.

| Asociación Py(50-80%) Cpy(20-40%) |                     |                                |                               |       |        |                       |                           |              |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------|--------|-----------------------|---------------------------|--------------|
| Autor Ensayo                      | ID Probeta          | Confinamiento $\sigma_3$ (Mpa) | Esfuerzo principal $\sigma_1$ | Radio | Centro | Esfuerzo Normal (Mpa) | Esfuerzo tangencial (Mpa) | espesor (mm) |
| De los Santos 2011                | VDA-04              | 5                              | 91                            | 43    | 48     | 14,1                  | 26,47                     | 2            |
| De los Santos 2011                | VDA-09              | 15                             | 131                           | 58    | 73     | 40,6                  | 48,08                     | 2            |
| Olivo 2026                        | SG0644 223.65 223.8 | 6,03                           | 86,15                         | 40,06 | 46,09  | 7,40                  | 10,37                     | 2            |

Con un coeficiente de ajuste  $R^2 = 0.94$  bueno, pero en base a tres ensayos, nos muestra una envolvente poco representativa, pero con valores iniciales para comprender el comportamiento de esta asociación, con  $c = 7$  MPa y  $\phi = 46^\circ$ . Ángulo de fricción elevado refleja comportamiento granular pese a alta dureza mineral (Tabla 6.13).



**Figura 6.14:** Envolvente de Mohr-Coulomb para la asociación Pirita (50-80%) Calcopirita (20-40%) para espesor de vetilla mayor a 2 mm.

Tabla 6.13: Propiedades de resistencia obtenidas para la asociación de Pirita-Calcopirita predominante.

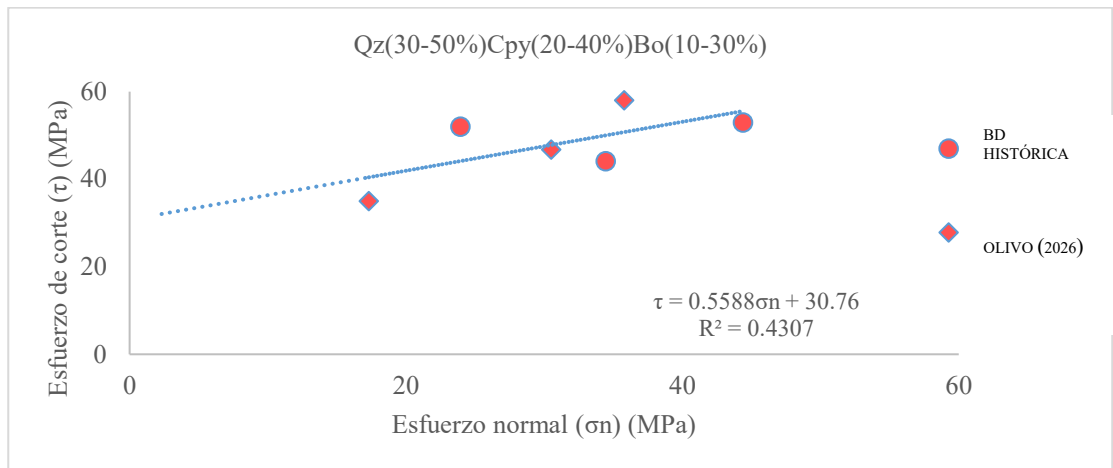
| Propiedades de resistencia para ensayos Triaxiales / Asociación Py-Cpy |                      |                         |                |                               |                  |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------|-------------------------------|------------------|
| Asociación mineral                                                     | Dureza relativa mohs | Espesor estructura (mm) | Cohesión (MPa) | Ángulo de fricción ( $\phi$ ) | $\sigma_c$ (Mpa) |
| Py(50-80%)Cpy(20-40%)                                                  | 5,3                  | e>2                     | 7              | 46°                           | 121,2            |

#### 6.5.1.5 Asociación Mineralógica Cuarzo (30-50 %)-Calcopirita (20-40%)-Bo (10-30%).

Para esta asociación se obtuvieron 2 resultados favorables en vetillas mayores a 2 mm, complementando con un resultado de Baraona (2014) y tres de De los Santos (2011) (Tabla 6.14) lo que resultó en una envolvente más representativa (Figura 6.15) obteniendo  $\tau = 0.5588\sigma_n + 30.76$  MPa, con un coeficiente de ajuste moderado de  $R^2 = 0.43$ , con  $c = 31$  MPa y  $\phi = 29^\circ$  (Tabla 6.16). En este caso la matriz de cuarzo proporciona cohesión moderada a este tipo de vetillas.

**Tabla 6.14:** Resultados ensayos triaxiales para asociación Cuarzo-Calcopirita-Bornita.

| Qz(30-50%)Cpy(20-40%)Bo(10-30%) |                      |                                |                               |        |        |                       |                           |              |
|---------------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------|--------|-----------------------|---------------------------|--------------|
| Autor Ensayo                    | ID Probeta           | Confinamiento $\sigma_3$ (Mpa) | Esfuerzo principal $\sigma_1$ | Radio  | Centro | Esfuerzo Normal (Mpa) | Esfuerzo tangencial (Mpa) | espesor (mm) |
| De los Santos 2011              | VDA-10               | 10                             | 218                           | 104    | 114    | 23,93                 | 52,00                     | 1,6          |
| De los Santos 2011              | VDA-11               | 10                             | 114                           | 52     | 62     | 34,44                 | 44,10                     | 3            |
| De los Santos 2011              | VDA-12               | 15                             | 140                           | 62,5   | 77,5   | 44,38                 | 53,00                     | 2            |
| Baraona 2014                    | Trx-13               | 10                             | 166                           | 78     | 88     | 35,81                 | 57,97                     | 4            |
| Olivo 2026                      | SG0740 378.72 378.86 | 20,6                           | 250,3                         | 114,85 | 135,45 | 30,53                 | 46,71                     | 2            |
| Olivo 2026                      | PA0958 50.04 50.18   | 10,2                           | 189,1                         | 89,45  | 99,65  | 17,31                 | 34,95                     | 2            |



**Figura 6.15:** Envolvente de Mohr-Coulomb para la asociación Cuarzo (30-50%) Calcopirita (20-40%) Bornita (10-30%) para espesor de vetilla mayor a 2 mm.

**Tabla 6.16:** Propiedades de resistencia obtenidas para la asociación Cuarzo-Calcopirita-Bornita predominante.

| Propiedades de resistencia para ensayos Triaxiales / Asociación Qz-Cpy-Bo |                      |                               |                |                               |                  |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|------------------|
| Asociación mineral.                                                       | Dureza relativa mohs | Espesor de la estructura (mm) | Cohesión (MPa) | Ángulo de fricción ( $\phi$ ) | $\sigma_c$ (MPa) |
| Qz(30-50%)Cpy(20-40%)Bo(10-30%)                                           | 4,7                  | e> 2                          | 31             | 29°                           | 105              |

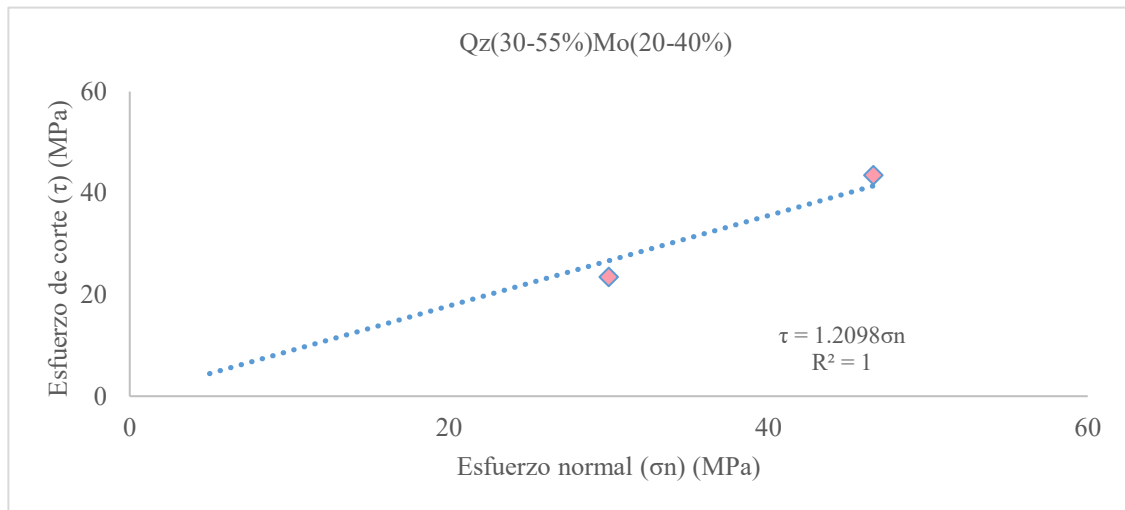
#### 6.5.1.6 Asociación Mineralógica Cuarzo (30-55 %)-Molibdenita (20-40%).

Una de las asociaciones mineralógicas más complejas de muestrear fueron vetillas de Cuarzo-Molibdenita predominante. Para esta asociación se obtuvieron dos resultados

favorables en vetillas mayores a 2 mm (Tabla 6.16) sin tener resultados para esta asociación mineral dentro de la base de datos histórica divisional.

**Tabla 6.16:** Resultados ensayos triaxiales para asociación Cuarzo-Molibdenita.

| Qz(30-55%)Mo(20-40%) |                    |                                |                               |        |        |                       |                           |              |
|----------------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------|--------|-----------------------|---------------------------|--------------|
| Autor Ensayo         | ID Probeta         | Confinamiento $\sigma_3$ (Mpa) | Esfuerzo principal $\sigma_1$ | Radio  | Centro | Esfuerzo Normal (Mpa) | Esfuerzo tangencial (Mpa) | espesor (mm) |
| Olivo 2021           | PA0958_51.03_51.17 | 20,1                           | 249,2                         | 114,55 | 134,65 | 30,00                 | 46,59                     | 2            |
| Olivo 2021           | PA0958_51.34_51.48 | 15                             | 247,4                         | 116,2  | 131,2  | 23,46                 | 43,53                     | 2            |



**Figura 6.16:** Envolvente de Mohr-Coulomb para la asociación Cuarzo (30-55%) Molibdenita (20-40%) para espesor de vetilla mayor a 2 mm.

En este caso no se obtuvieron los mínimos datos requeridos, debido a la complejidad en encontrar vetillas con la configuración geométrica necesaria para asegurar una ruptura por vetilla. Sin embargo, el mínimo teórico dice que con dos puntos ya se puede definir matemáticamente una recta, pero no permite evaluar dispersión ni ajustar por regresión y es sensible a datos experimentales. Considerando lo anterior es que con el propósito de sentar las bases de propiedades geotécnicas de vetillas Cuarzo-Molibdenita predominante es que se presentan a modo de referencia los resultados para ángulo de fricción en Tabla 6.17:



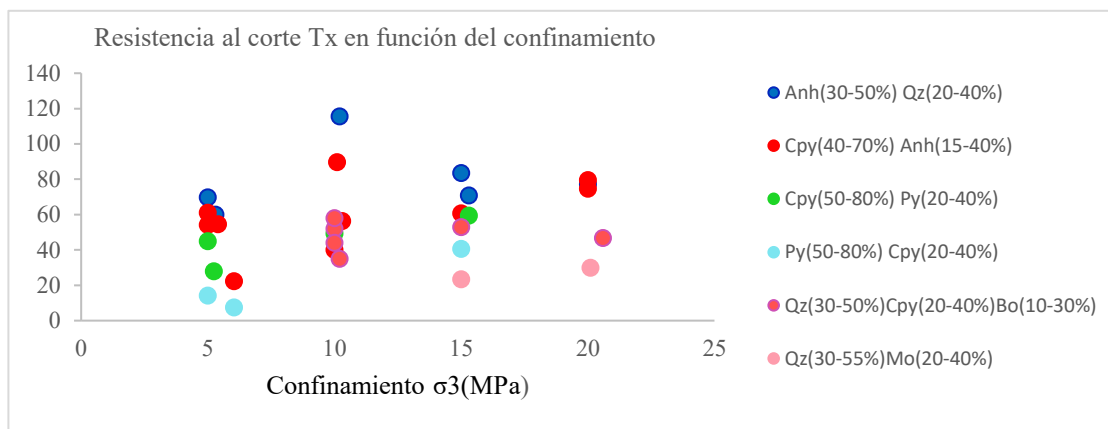
**Tabla 6.17:** Propiedades de resistencia obtenidas para la asociación Cuarzo-Molibdenita predominante

| Propiedades de resistencia para ensayos Triaxiales / Asociación Qz-Mo |                      |                               |                |                               |                  |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|------------------|
| Asociación mineral.                                                   | Dureza relativa mohs | Espesor de la estructura (mm) | Cohesión (MPa) | Ángulo de fricción ( $\phi$ ) | $\sigma_c$ (Mpa) |
| Qz(30-55%)Mo(20-40%)                                                  | 4,1                  | $e > 2$                       | -              | 50°                           | -                |

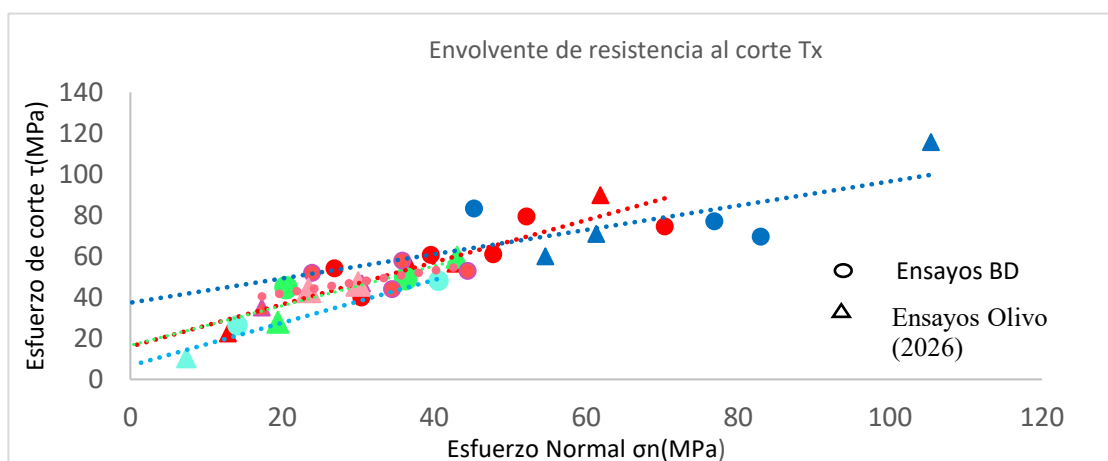
### 6.5.2 Análisis Comparativo y Tendencias Generales Ensayos Triaxiales

El análisis comparativo de los parámetros de resistencia obtenidos (Tabla 6.18), a partir de ensayos triaxiales, para las diferentes asociaciones minerales revela patrones consistentes con la mineralogía:

- **Influencia de la cohesión mineralógica:** Asociaciones con minerales duros (Anh-Qz, Qz-Cpy-Bo) exhiben cohesiones elevadas (31-37 MPa). Asociaciones con minerales blandos (Py-Cpy, Cpy-Anh e  $> 2$ ) presentan cohesiones reducidas (7 MPa).
- **Comportamiento friccional:** Asociaciones con minerales blandos tienden a exhibir ángulos de fricción más elevados (44-50°), reflejando comportamiento granular. Asociaciones con matriz de cuarzo presentan ángulos moderados (29-31°).
- **Efecto del espesor:** Observado particularmente en Cpy-Anh, vetillas más delgadas presentan cohesiones significativamente superiores, confirmando que el espesor controla la homogeneidad compositiva y cementación.
- **Anomalías geotécnicas:** Asociación Py-Cpy presenta cohesión muy reducida (7 MPa) a pesar de alta dureza, requiriendo una investigación microestructural complementaria.



**Figura 6.17:** Resistencia al corte triaxial en función del confinamiento aplicado a todas las asociaciones con resultados



**Figura 6.18:** Envoltentes de Resistencia al corte triaxial de todas las asociaciones estudiadas.

**Tabla 6.18:** Cuadro resumen de la dureza, cohesión y ángulo de fricción interna obtenida para todas las asociaciones con resultados.

| Asociación mineral              | Dureza<br>relativa Mohs | Cohesión<br>(Mpa) | Ángulo de<br>fricción ( $\phi$ ) |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------------|
| Anh (30-50%) Qz (20-40%)        | 4,3                     | 37                | 31°                              |
| Cpy (40-70%) Anh (15-40%)       | 4,1                     | 7                 | 50°                              |
| Cpy (50-80%) Py (20-40%)        | 4,9                     | 17                | 44°                              |
| Py (50-80%) Cpy (20-40%)        | 5,3                     | 7                 | 46°                              |
| Qz(30-50%)Cpy(20-40%)Bo(10-30%) | 4,7                     | 31                | 29°                              |

Las vetillas blandas de calcopirita al asociarse con minerales duros en la escala de Mohs (<40%) tiende a aumentar su resistencia al corte, también aumenta a mayores confinamientos (Figura 6.17).

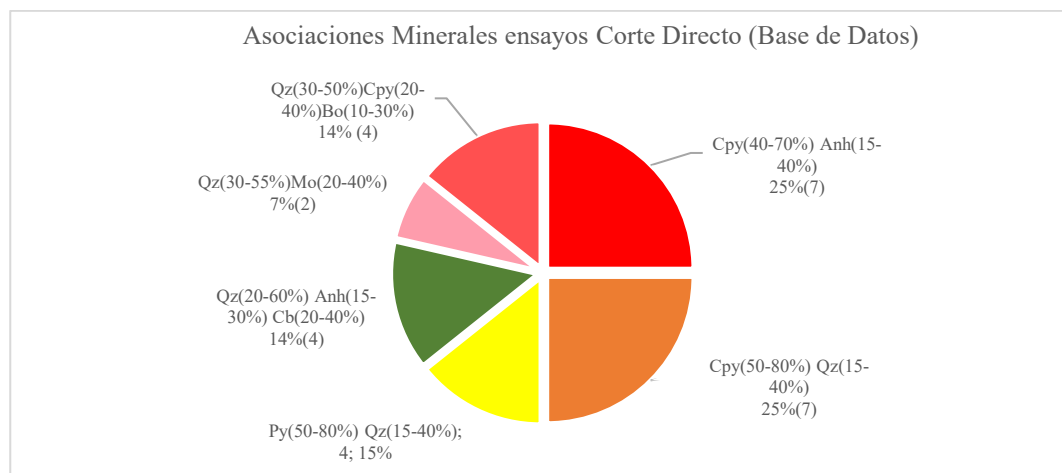
La anhidrita, un mineral blando, al asociarse con cuarzo aumenta considerablemente su resistencia al corte y ésta tiende a aumentar a mayores confinamientos.

Las envolventes de resistencia nos muestran que las asociaciones de Anh (30-50%) Cuarzo (20-40%) y Calcopirita (40-70%) Anhidrita (15-40%) son las mejor representadas en este estudio (Figura 6.18).

## 6.6 Ensayos de Resistencia al Corte Directo en Vetillas

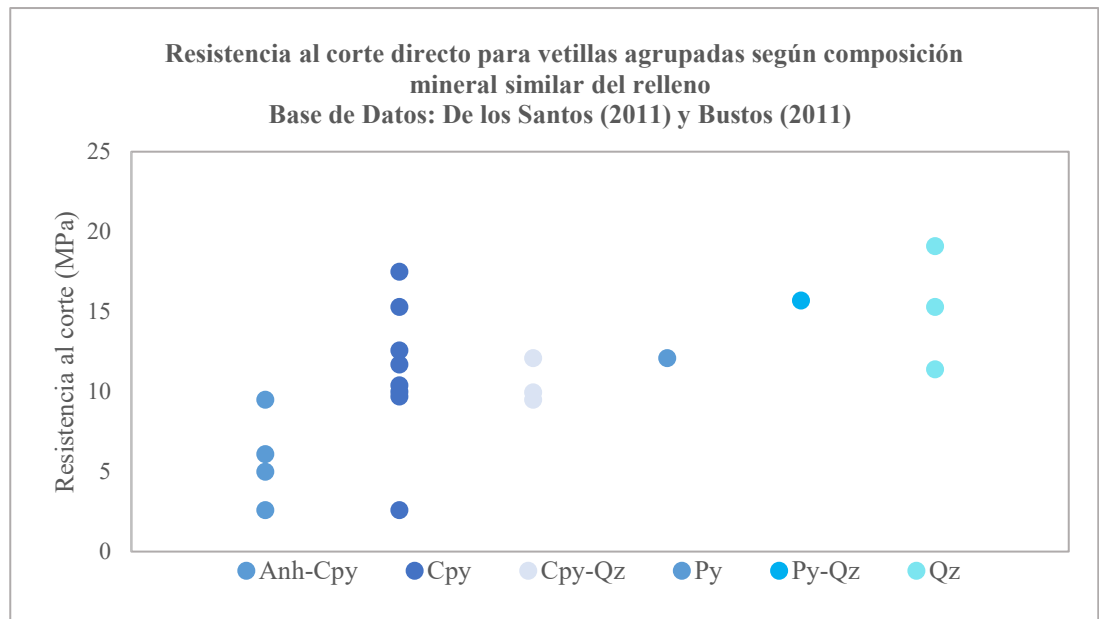
### 6.5.1. Caracterización de la Base de Datos Ensayos Corte Directo

Los ensayos de resistencia al corte directo en vetillas fueron compilados a partir de la base de datos divisional, encontrándose resultados de De los Santos (2011) y Bustos (2011), totalizando 28 ensayos sobre diferentes asociaciones minerales. Este tipo de ensayo es particularmente relevante para caracterizar el comportamiento de las vetillas bajo condiciones de corte puro.



**Figura 6.19:** Asociación mineral de ensayos de corte directo ejecutados en el marco de esta memoria.

Las asociaciones Calcopirita (40-70%) Anhidrita (15-40%) y Calcopirita (50-80%) Cuarzo (15-40%) representan cada una el 25% de los ensayos (7 muestras cada una). Asociaciones como Cuarzo (20-60%) Anhidrita (15-30%) Carbonato (20-40%) y Cuarzo (30-50%) Calcopirita (20-40%) Bornita (10-30%) representan el 14% cada una. Todos los ensayos fueron ejecutados sobre muestras con espesores de vetilla superiores a 2 mm, siguiendo protocolos ASTM D5607 e ISRM.



**Figura 6.20:** Resistencia al corte para vetillas agrupadas según composición mineral similar del relleno de vetilla, basado en resultados de la base de datos divisional.

De acuerdo con resultados de la base de datos divisional es posible distinguir que las vetillas con calcopirita predominante tienden a tener resistencias al corte más altas que aquellas con Anhidrita-Calcopirita en primer orden, y preliminarmente vetillas en asociación con cuarzo en cualquier orden de magnitud también tienden a aumentar la resistencia al corte, aspecto esperable por la dureza máxima en escala de Mohs que aporta este mineral (Figura 6.20).

## 6.5.2. Envolventes de Resistencia Mohr-Coulomb para Corte Directo.

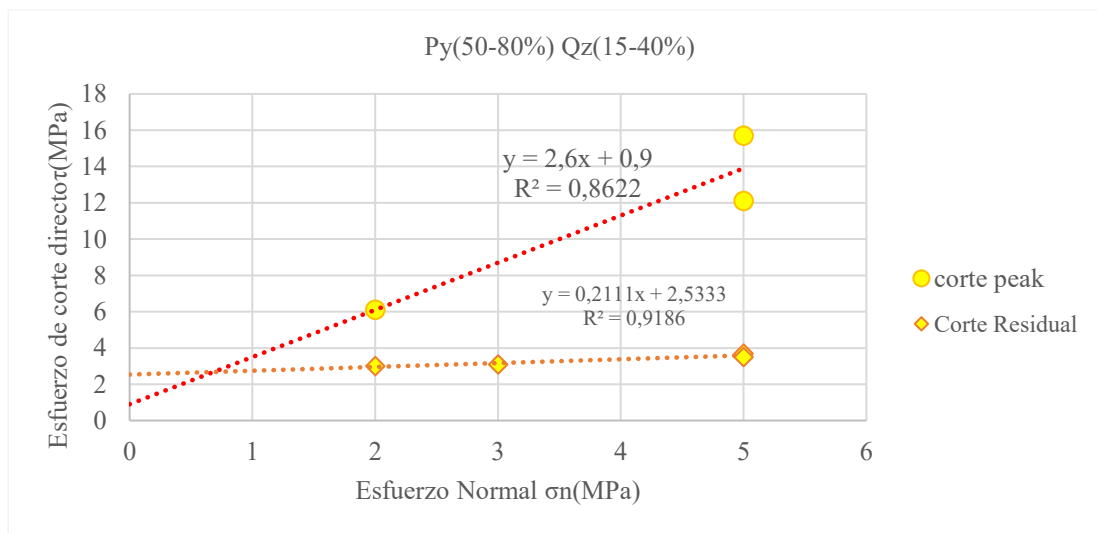
### 6.5.2.1 Asociación Mineralógica Pirita (50-80 %)-Cuarzo (15-40%).

Para la obtención de la curva de Mohr-Coulomb para esta asociación se encontraron resultados favorables en la base de datos, con dos resultados de De los Santos (2011) y dos de Bustos (2011) (Tabla 6.19).

**Tabla 6.19:** Resultados ensayos de corte directo para asociación Pirita-Cuarzo.

| Py (50-80%) Qz (15-40%) |             |                    |                           |                               |
|-------------------------|-------------|--------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Autor                   | Id. Muestra | Carga Normal (Mpa) | Carga de corte peak (Mpa) | Carga de corte residual (Mpa) |
| De los Santos           | TE 2        | 5                  | 12,1                      | 3,7                           |
| De los Santos           | DAC 21      | 5                  | 15,7                      | 3,5                           |
| Bustos                  | Muestra 1   | 2                  | 6,1                       | 3                             |
| Bustos                  | Muestra 7   | 3                  | 6,3                       | 3,1                           |

Para la asociación Pirita (50-80%) Cuarzo (15-40%), la envolvente de resistencia peak resultante es  $\tau_{\text{peak}} = 2.6\sigma_n + 0.9$  MPa con cohesión  $c_{\text{peak}} = 0.9$  MPa y ángulo de fricción  $\phi_{\text{peak}} = 69^\circ$  (Figura 6.21 y Tabla 6.20). El ángulo de fricción excepcional se atribuye a la elevada rugosidad generada por la fractura de cristales de alta dureza.



**Figura 6.21:** Envolvente de Mohr-Coulomb para la asociación Pirita (50-80%) Cuarzo (15-40%) para espesor de vetilla mayor a 2 mm.

Los resultados muestran un valor de cohesión residual ( $c_{res}$ ) superior al valor peak ( $c_{peak}$ ), lo cual contradice el comportamiento esperado según el criterio Mohr–Coulomb clásico, donde  $c_{res} \leq c_{peak}$  y típicamente  $c_{res}$  debe ser cercano a 0 tras la destrucción de los enlaces intercrystalinos (Hoek, 2007). Este resultado anómalo puede atribuirse a: (1) el reducido tamaño de muestra ( $n = 4$  ensayos), que incrementa la incertidumbre del ajuste lineal; (2) la extrapolación de la envolvente fuera del rango de esfuerzos normales ensayados (Thiel, 2001); y/o (3) el comportamiento mecánico particular de las vetillas de pirita, que presentan mayor rugosidad superficial y modos de falla mixtos, pudiendo generar trabazón de fragmentos angulosos durante el corte residual (Vásquez, 2025).

Tabla 6.20: Propiedades de resistencia al corte directo obtenidas para la asociación Pirita-Cuarzo predominante

| Propiedades de resistencia ensayos Corte Directo /Asociación Py-Qz |                      |                               |              |                               |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|
| Asociación mineral                                                 | Dureza relativa mohs | Espesor de la estructura (mm) | Cohesión (C) | Ángulo de fricción ( $\phi$ ) |
| Py(50-80%)Qz(15-40%)<br>(Peak)                                     | 6                    | $e > 2$                       | 0,9          | 69                            |
| Py(50-80%)Qz(15-40%)<br>(Residual)                                 | 6                    | $e > 2$                       | 2,5          | 12°                           |

#### 6.5.2.2 Asociación Mineralógica Calcopirita (40-70 %)-Anhidrita (15-40%)

Dentro de la base de datos divisional, fue posible encontrar siete resultados favorables para esta asociación mineral con vetillas mayores a 2 mm, de ellas cuatro fueron realizadas en el trabajo de De los Santos (2011) y tres por Bustos (2011) (Tabla 6.21).

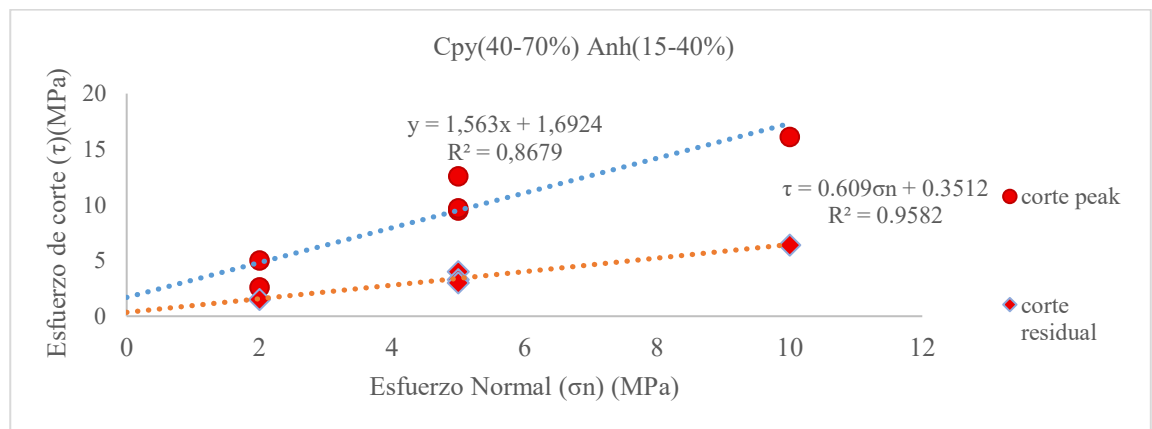
Tabla 6.21: Resultados ensayos de corte directo para asociación Calcopirita- Anhidrita.

| Cpy(40-70%) Anh(15-40%) |             |                    |                           |                               |
|-------------------------|-------------|--------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Autor                   | Id. Muestra | Carga Normal (Mpa) | Carga de corte peak (Mpa) | Carga de corte residual (Mpa) |
| De los Santos           | TE 5        | 5                  | 9,5                       | 4                             |
| De los Santos           | TE 10       | 5                  | 9,7                       | 3,3                           |
| De los Santos           | DAC 2       | 5                  | 12,58                     | 3                             |
| De los Santos           | DAC 3       | 10                 | 16,1                      | 6,4                           |
| Bustos                  | Muestra 11  | 2                  | 2,6                       | 0,76                          |
| Bustos                  | Muestra 12  | 5                  | 2,6                       | 1                             |
| Bustos                  | Muestra 5   | 2                  | 5                         | 1,5                           |

Para la asociación Calcopirita (40-70%) Anhidrita (15-40%), se obtuvieron las envolventes, tanto para corte peak como corte residual, siendo (Figura 6.22):

- Peak:  $\tau_{\text{peak}} = 1.563\sigma_n + 1.6924 \text{ MPa}$  ( $R^2 = 0.87$ ), con  $c_{\text{peak}} = 0.82 \text{ MPa}$  y  $\phi_{\text{peak}} = 57^\circ$
- Residual:  $\tau_{\text{residual}} = 0.609\sigma_n + 0.3512 \text{ MPa}$  ( $R^2 = 0.96$ ), con  $c_{\text{res}} = 0.35 \text{ MPa}$  y  $\phi_{\text{res}} = 31^\circ$ .

La reducción sustancial entre resultados peak y residual (57% en cohesión, 46% en ángulo de fricción en Tabla 6.20, refleja la degradación de la rugosidad durante el cizallamiento de la estructura.



**Figura 6.22:** Envolvente de Mohr-Coulomb para la asociación Calcopirita (40-70%) Anhidrita (15-40%) para espesor de vetilla mayor a 2 mm.

**Tabla 6.22:** Propiedades de resistencia al corte directo obtenidas para asociación Calcopirita- Anhidrita.

| Propiedades de resistencia ensayos Corte Directo/Asociación Cpy-Anh |                      |                               |              |                               |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|
| Asociación mineral                                                  | Dureza relativa mohs | Espesor de la estructura (mm) | Cohesión (C) | Ángulo de fricción ( $\phi$ ) |
| Cpy(40-70%)Anh(15-40%) (Peak)                                       | 4,5                  | e>2                           | 0,82         | 57°                           |
| Cpy(40-70%)Anh(15-40%) (Residual)                                   | 4,5                  | e>2                           | 0,35         | 31°                           |

### 6.5.3. Comparativa entre ensayos de Corte Directo y Triaxiales.

La única asociación mineral comparable es la de Calcopirita (40-70%) Anhidrita (15-40%), los ensayos triaxiales resultan en términos de cohesión  $c = 7$  MPa y ángulo de fricción  $\phi = 50^\circ$ , mientras que en corte directo peak exhibe una cohesión  $c_{peak} = 0.82$  MPa y ángulo de fricción  $\phi_{peak} = 57^\circ$ . La cohesión triaxial es 8.5 veces superior, mientras que el ángulo de fricción es 14% mayor en corte directo (Tabla 6.23).

**Tabla 6.23:** Parámetros de resistencia Triaxial y corte directo.

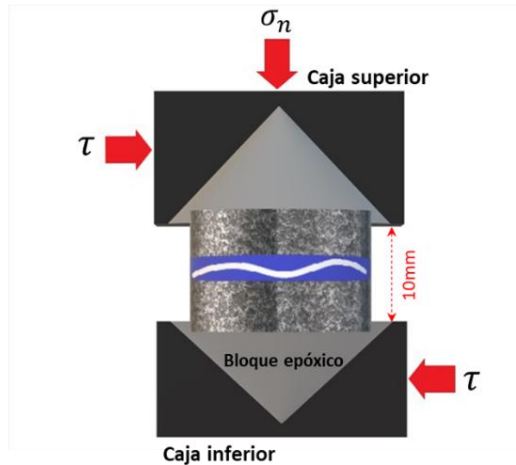
| Propiedades de resistencia para ensayos geotécnicos / Asociaciones Mineralógicas consideradas |                                      |                      |                               |              |                               |                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|------------------|
| Tipo de ensayo                                                                                | Asociación mineral                   | Dureza relativa mohs | Espesor de la estructura (mm) | Cohesión (C) | Ángulo de fricción ( $\phi$ ) | $\sigma_c$ (Mpa) |
| Triaxial                                                                                      | Anh (30-50%) Qz (20-40%)             | 4,3                  | $e > 2$                       | 37           | $31^\circ$                    | 132,2            |
| Triaxial                                                                                      | Cpy (40-70%) Anh (15-40%)            | 4,5                  | $e > 2$                       | 7            | $50^\circ$                    | 38,5             |
| Triaxial                                                                                      | Cpy (40-70%) Anh (15-40%)            | 4,5                  | $e < 2$                       | 36           | $35^\circ$                    | 72,9             |
| Triaxial                                                                                      | Cpy (50-80%) Py (20-40%)             | 4,9                  | $e > 2$                       | 17           | $44^\circ$                    | 80,2             |
| Triaxial                                                                                      | Py (50-80%) Cpy (20-40%)             | 5,3                  | $e > 2$                       | 7            | $46^\circ$                    | 121,2            |
| Triaxial                                                                                      | Qz (30-50%) Cpy (20-40%) Bo(10-30%)  | 4,7                  | $e > 2$                       | 31           | $29^\circ$                    | 105              |
| Corte Directo                                                                                 | Cpy (40-70%) Anh(15-40%) (Peak)      | 4,5                  | $e > 2$                       | 0,82         | $57^\circ$                    |                  |
| Corte Directo                                                                                 | Cpy (40-70%) Anh (15-40%) (Residual) | 4,5                  | $e > 2$                       | 0,35         | $31^\circ$                    |                  |
| Corte Directo                                                                                 | Py (50-80%) Qz (15-40%) (Peak)       | 6                    | $e > 2$                       | 0,9          | $69^\circ$                    |                  |
| Corte Directo                                                                                 | Py (50-80%) Qz (15-40%) (Residual)   | 6                    | $e > 2$                       | 2,5          | $12^\circ$                    |                  |

## 6.7 Ensayos de Resistencia al Corte Directo en Fallas

### 6.7.1 Metodología corte directo en Fallas.

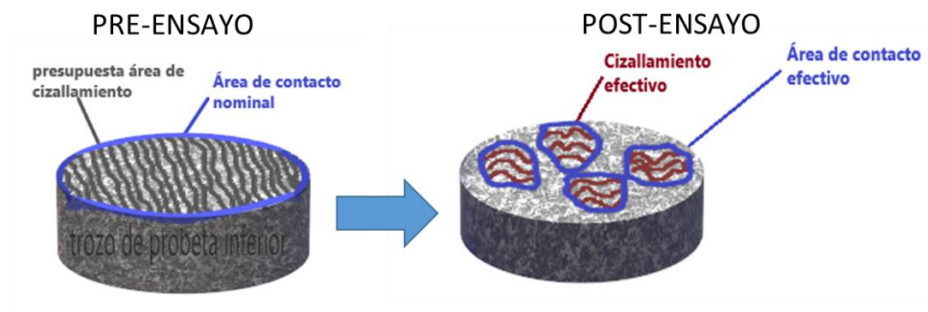
Para establecer parámetros geotécnicos en discontinuidades abiertas (Fallas) se utilizó la máquina de corte directo en Celda Hoek (Figura 6.24), la que garantiza mayor probabilidad de ruptura por estructura debido a que permite la disposición de vetilla en la dirección del eje donde se ejerce el esfuerzo cortante.





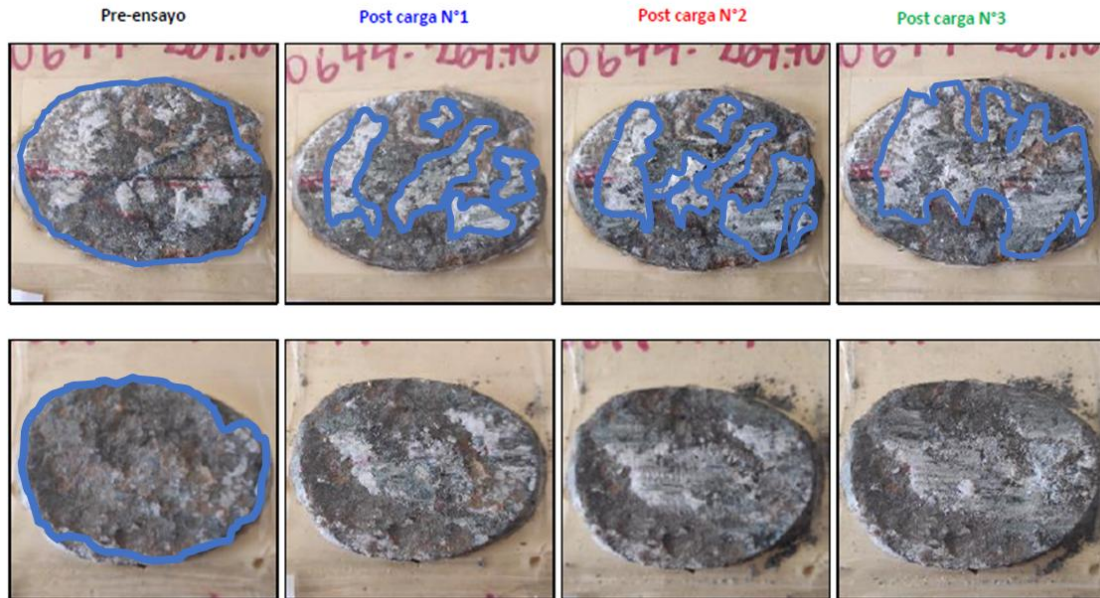
**Figura 6.24:** Esquema de un ensayo de corte directo en Celda Hoek para una estructura.

Previamente en el pre-ensayo se mide el área nominal, vale decir, donde se espera que exista deslizamiento del plano de falla. Luego, en cada post-ensayo se mide el área de contacto efectivo (Figura 6.25), vale decir, aquellas zonas donde se evidencia cizallamiento del plano de falla.



**Figura 6.25:** Esquema de el plano de cizallamiento y el reconocimiento del área de contacto nominal versus efectivo.

El área de contacto nominal siempre va a contener el área de contacto efectivo.

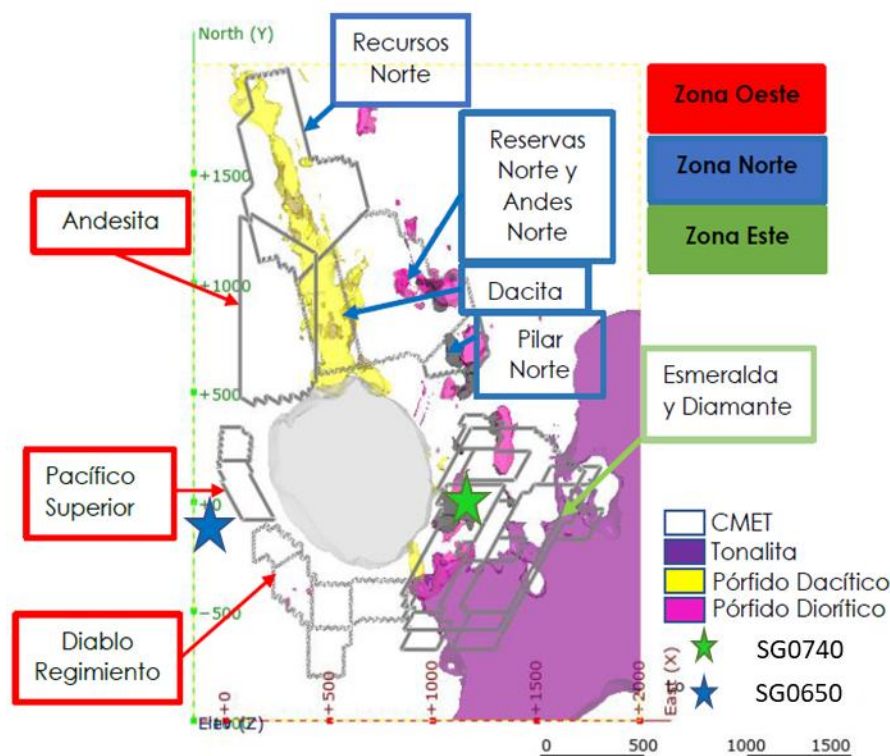


**Figura 6.26:** Área de contacto nominal y efectivo luego de 3 etapas de carga/descarga del esfuerzo cortante en muestra de falla de RRNN Adit 56.

Las Fallas se ensayan en tres ciclos de carga y descarga de esfuerzo cortante, con la finalidad de obtener tres resultados para una misma estructura (plano de falla). Debido a lo anterior es que durante estos ensayos fue posible observar una pérdida paulatina del relleno mineral del plano de falla, lo que genera que el área de cizallamiento efectivo sea mayor en el último ciclo con respecto al primero (Figura 6.26).

#### 6.7.1. Caracterización de Fallas Ensayadas

Los ensayos de resistencia al corte directo en fallas representan una contribución novedosa de la presente memoria, al no tener suficientes referencias en la bibliografía divisional. Las fallas ensayadas fueron seleccionadas en los sectores de Diamante, desde los sondajes SG0740 y SG0744, con litología CMET, a cota mina 2.162 m; y del acceso a Recursos Norte por “ADIT 56” que se encuentra en la zona oeste del yacimiento, a partir de los sondajes SG0650 y SG0644, a cota mina 2.107.m (Figura 6.27).



**Figura 6.27:** Ubicación de las muestras destinadas a ensayos geotécnicos.

Las fallas analizadas corresponden a estructuras de tipo "menor" e "intermedia" de acuerdo a la clasificación de estructuras de El Teniente (Tabla 6.24) con espesores de relleno entre 2 y 12 mm. El relleno está constituido predominantemente por minerales blandos: anhidrita (Anh), yeso (Ys), clorita (Chl), calcita (Cb) y, en menor proporción, pirita (Py). Esta composición es característica de fallas de alteración hidrotermal en yacimientos tipo pórfido cuprífero. Las fallas ensayadas se detallan en Tabla 6.25.

Tabla 6.24: Clasificación estructuras geológicas El Teniente. Tomado de GRMD-SGL-INF-93-2013

| Tipo de estructura | Continuidad | Espesor típico  |
|--------------------|-------------|-----------------|
| Distrital          | > 1 km      | >1m             |
| Maestra            | >500 m      | Entre 5 y 100cm |
| Mayor              | >100 m      | 2 a 10cm        |
| Intermedia         | >4 y <100 m | <0.5cm          |
| Menor              | <4 m        | <0.2cm          |

Tabla 6.25: Características de las fallas ensayadas por corte directo en Celda Hoek.

| Ensayos de Resistencia al Corte Directo en Fallas |             |               |                        |             |                         |                           |
|---------------------------------------------------|-------------|---------------|------------------------|-------------|-------------------------|---------------------------|
| Sondaje                                           | Sector      | Cota mina (m) | Litología Roca de caja | espesor(mm) | Mineralogía del relleno | Clasificación estructuras |
| SG0740                                            | Diamante    | 2.162         | CMET                   | 2           | Anh(65)-Ys(20)-Cb       | menor                     |
| SG0740                                            | Diamante    | 2.162         | CMET                   | 3           | Ys(45)-Anh(35)Chl(20)   | intermedia                |
| SG0650                                            | RRN ADIT 56 | 2.107         | CMET                   | 12          | Anh-Cb-Ys-Chl           | intermedia                |
| SG0650                                            | RRN ADIT 56 | 2.107         | CMET                   | 12          | Anh-Cb-Ys-Chl           | intermedia                |
| SG0644                                            | RRN ADIT 56 | 2.107         | Tonalita               | 2           | Anh-Ys-Py(15)           | menor                     |

## 6.7.2. Envoltentes de Resistencia al Corte Directo en Fallas.

### 6.7.2.1 Fallas sector Diamante

La Falla Diamante 1, de asociación mineral Anhidrita-Yeso-Carbonato se obtuvo el criterio de falla  $\tau_r = 0.5741\sigma_n$  (Figura 6.27), con un factor de ajuste  $R^2 = 0.999$ , develando comportamiento puramente friccional con ángulo de fricción interna  $\phi_r = 29.8^\circ$  y Cohesión = 0 (Tabla 6.26).

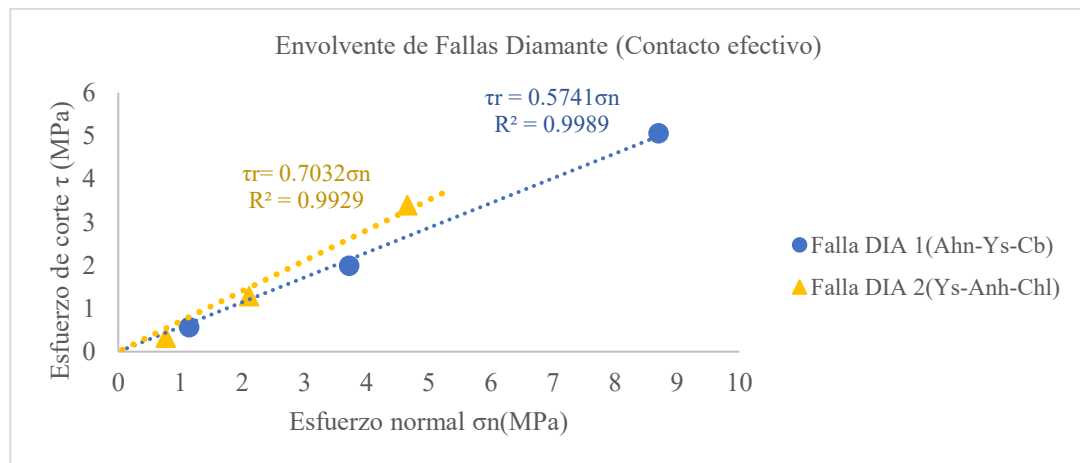


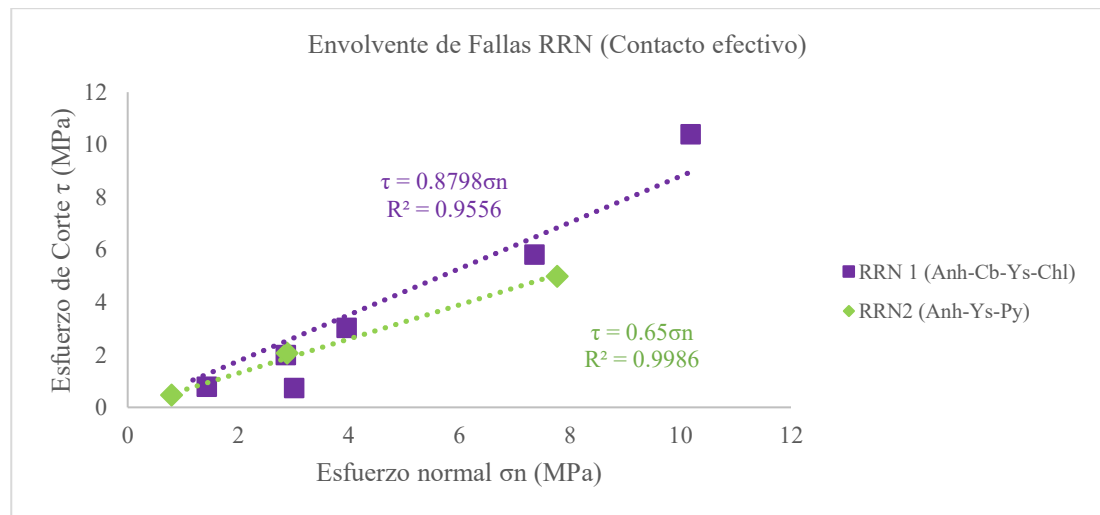
Figura 6.27: Envolvente de Mohr-Coulomb para Fallas de sector Diamante.

Para la Falla Diamante 2, de asociación mineral Yeso-Anhidrita-Clorita se obtuvo  $\tau_r = 0.7032\sigma$  (Figura 6.27), con un factor de ajuste  $R^2 = 0.993$ , ángulo de fricción residual  $\phi_r = 35.1^\circ$  y Cohesión = 0 (Tabla 6.26). En ella se observa un mayor ángulo de fricción,

atribuible a la presencia de clorita, un filosilicato laminar que en vetillas hidrotermales y zonas de falla suele aparecer como agregados cristalinos escamosos, irregulares y poco orientados, que generan micro-asperidades y contactos angulosos, aumentando la trabazón mecánica entre las paredes de la discontinuidad. Esto incrementa el componente de resistencia asociado a la geometría (rugosidad + dilatancia), lo que se traduce en un  $\phi_r$  más alto aun cuando la cohesión sea prácticamente nula.

#### 6.7.2.2 Fallas sector Acceso ADIT 56 RRNN (Recursos Norte)

Para la Falla RRN 1 de asociación mineral Anhidrita-Carbonato-Yeso-Clorita se obtuvo  $\tau_r = 0.8798\sigma_n$  (Figura 6.28), con factor de ajuste  $R^2 = 0.956$ , ángulo de fricción residual  $\phi_r = 41.34^\circ$ , siendo este último el más elevado. La mayor rugosidad es generada por el espesor significativo de la discontinuidad y, por tanto, múltiples minerales del relleno.



**Figura 6.28:** Envolvente de Mohr-Coulomb para Fallas de sector acceso ADIT 56 Recursos Norte.

La Falla RRN 2 con asociación mineral en su relleno de Anhidrita-Yeso-Pirita, obtuvo una resistencia la corte definida por  $\tau_r = 0.65\sigma_n$ , con un factor de ajuste  $R^2 = 0.999$ , y un

ángulo de fricción residual de  $\phi_r = 33^\circ$ . La presencia de pirita minoritaria (15%) incrementa ligeramente el ángulo de fricción debido a su hábito cúbico.

**Tabla 6.26:** Parámetros de resistencia al corte directo en Fallas de El Teniente.

| Fallas ensayadas        | $\sigma_n$ Nominal (Mpa) | $\sigma_n$ Efectivo (Mpa) | $\tau$ Residual Efectivo (Mpa) | $\tau$ Residual Nominal (Mpa) | Ángulo fricción residual $\phi_r$ (°) | Cohesión (Mpa) |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| Diamante 1 (Anh-Ys-Cb)  | 2.5                      | 8.7                       | 5.07                           | 1.45                          | 29.8                                  | 0              |
|                         | 1.5                      | 3.7                       | 1.99                           | 0.81                          |                                       |                |
|                         | 0.5                      | 1.1                       | 0.57                           | 0.25                          |                                       |                |
| Diamante 2 (Ys-Anh-Chl) | 2                        | 4.7                       | 3.39                           | 1.47                          | 35.1                                  | 0              |
|                         | 1                        | 2.1                       | 1.29                           | 0.61                          |                                       |                |
|                         | 0.5                      | 0.8                       | 0.33                           | 0.23                          |                                       |                |
| RRNN 1 (Anh-Cb-Ys-Chl)  | 2.5                      | 7.4                       | 5.81                           | 1.97                          | 41.34                                 | 0              |
|                         | 2                        | 4.0                       | 3.03                           | 1.53                          |                                       |                |
|                         | 1.5                      | 2.9                       | 1.98                           | 1.04                          |                                       |                |
|                         | 1.5                      | 10.2                      | 10.40                          | 1.54                          |                                       |                |
|                         | 1.0                      | 3.0                       | 0.73                           | 0.24                          |                                       |                |
|                         | 0.5                      | 1.4                       | 0.78                           | 0.29                          |                                       |                |
| RRNN 2 (Anh-Ys-Py)      | 2.5                      | 7.8                       | 4.99                           | 1.59                          | 33                                    | 0              |
|                         | 1.5                      | 2.9                       | 2.06                           | 1.07                          |                                       |                |
|                         | 0.5                      | 0.8                       | 0.46                           | 0.30                          |                                       |                |

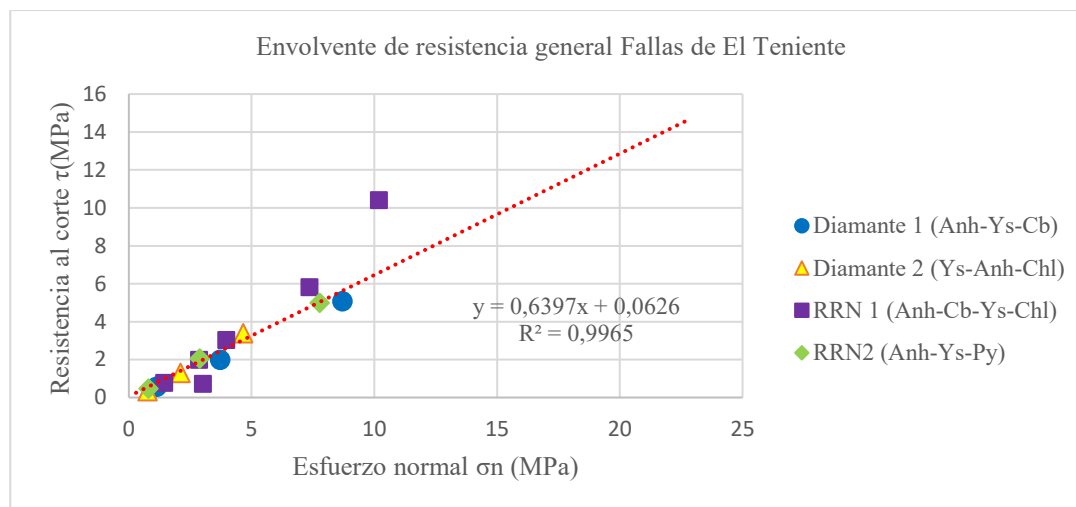
Todos los parámetros exhiben cohesión prácticamente nula, confirmando que, en estructuras con relleno no consolidado, la resistencia está controlada exclusivamente por fricción.

### 6.7.3. Envolvente General de Resistencia al Corte para Fallas

La consolidación de todos los datos experimentales de las cuatro fallas ensayadas (Tabla 6.24) permite establecer una envolvente general de resistencia definida por (Figura 6.29):

$$\tau = 0.6397\sigma_n + 0.0626 \text{ MPa} (R^2 = 0.997)$$

Los parámetros de resistencia promedio resultantes son: cohesión prácticamente nula ( $C = 0.06$  MPa, esencialmente despreciable) y ángulo de fricción residual  $\phi_r = 32.6^\circ$ .



**Figura 6.29:** Envolvente General de Mohr-Coulomb para Fallas de Diamante y RRNN.

Estos valores constituyen los primeros parámetros de resistencia experimentales establecidos para fallas del yacimiento El Teniente, representando un aporte fundamental para calibración de modelos geomecánicos. La cohesión prácticamente nula confirma que en estructuras abiertas o con relleno no consolidado, la resistencia al corte está controlada exclusivamente por fricción, sin contribución de fuerzas cohesivas.

Los resultados experimentales de la presente memoria ( $C = 0.06$  MPa,  $\phi = 34.8^\circ$ ) son notablemente inferiores a los valores modelados, particularmente en resistencia residual efectiva. Bajo esfuerzo normal de 5 MPa, el modelo de Pardo (2013). predice 4 MPa, mientras que datos experimentales resultan a 4.1 MPa de esfuerzo normal en 2.8 MPa (Tabla 6.27).

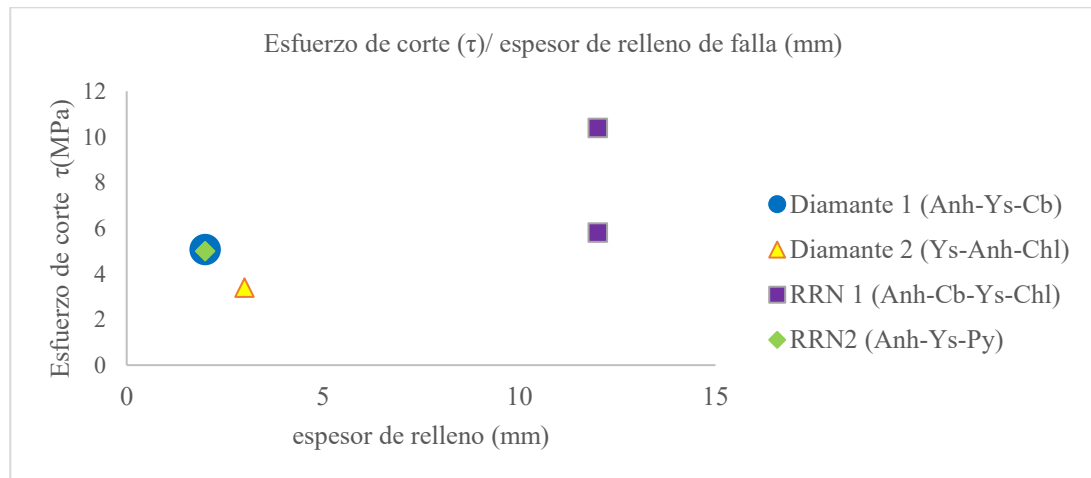
Tabla 6.27: Parámetros de resistencia al corte directo en Fallas de El Teniente.

| Fallas ensayadas          | $\sigma_n$ Nominal (Mpa) | $\sigma_n$ Efectivo (Mpa) | $\tau$ Residual Efectivo (Mpa) | $\tau$ Residual Nominal (Mpa) | Ángulo fricción residual $\phi_r$ (°) | Cohesión (Mpa) |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| Envolvente General Fallas | 1.4                      | 4.1                       | 2.86                           | 0.96                          | 34.81                                 | 0.0626         |

#### 6.7.4. Parámetros Críticos de Resistencia en Fallas Diamante/ RRNN

Tras los resultados obtenidos de los ensayos geotécnicos de corte directo en Fallas de El Teniente, se determinaron parámetros que estarían afectando los valores obtenidos. Las características de estos parámetros se describen a continuación:

- Efecto del espesor: a medida que la discontinuidad aumenta su espesor, también aumenta la probabilidad de que su rugosidad aumente por la presencia de minerales con una configuración geométrica que propicie la trabazón del plano de ruptura, y junto con ello aumente la resistencia residual necesaria para su cizallamiento (Figura 6.30).



**Figura 6.30:** Relación entre el esfuerzo de corte y el espesor del relleno de falla.

- Efecto de la Rugosidad (JRC): Al aumentar el valor del JRC (índice de rugosidad) junto con la disminución de la razón espesor/ amplitud de la rugosidad ( $e/a$ ) aumenta la resistencia al corte. Seguel, (2003) y De Los Santos (2011) establecen que una relación  $e/a \geq 1$  indica que la resistencia al corte de la estructura geológica estará gobernada por el relleno de ésta, mientras que, para valores menores, la resistencia al corte estará condicionada por la resistencia de la roca hospedante de la estructura.



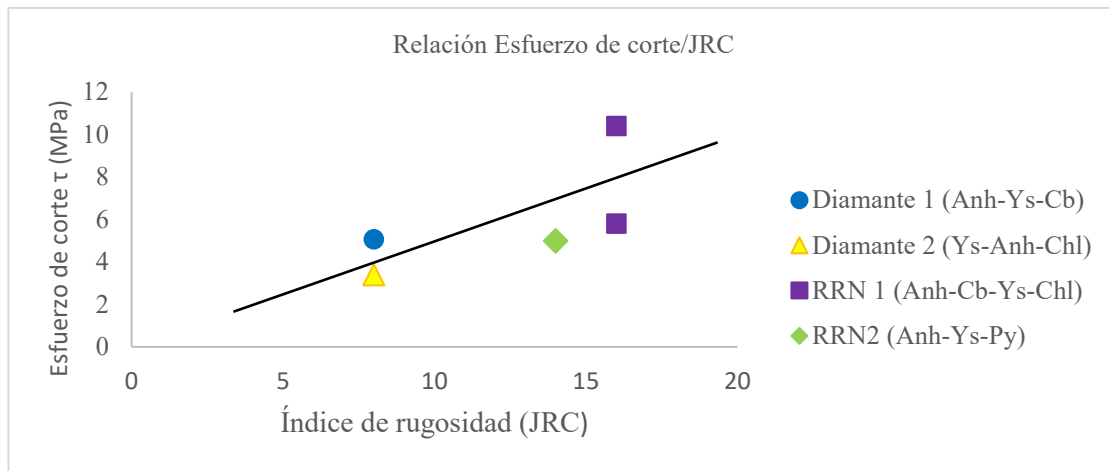


Figura 6.31: Relación entre el esfuerzo de corte y el índice de rugosidad (JRC)

Tabla 6.28: Relación Espesor/Amplitud del JRC ( $e/a$ )

| Fallas ensayadas  | Relación<br>Espesor/Amplitud JRC |
|-------------------|----------------------------------|
| 1(Anh-Ys-Cb)      | 1                                |
| 2 (Ys-Anh-Chl)    | 1.5                              |
| 3 (Anh-Cb-Ys-Chl) | 4                                |
| 3 (Anh-Cb-Ys-Chl) | 8                                |
| 4 (Anh-Ys-Py)     | 0.7                              |

En el caso de las fallas estudiadas, es posible distinguir que la mayoría está gobernada por el comportamiento del relleno mineral de la discontinuidad, salvo la Falla 4, que en este caso corresponde a la Falla RRN 2, que presenta un  $e/a = 0.7$ , lo que es coherente si observamos que es una de las estructuras con menor espesor (Tabla.6.28).

## CAPÍTULO VII. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

A partir de los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas en probetas de roca se presentan una serie de conclusiones relativas a las propiedades geotécnicas de las vetillas y fallas analizadas.

Las vetillas de Calcopirita mayoritaria en asociación con Pirita tienen una dureza relativa (H:4,9) mayor que en asociación con Cuarzo (H:4,5). A su vez que vetillas de

Pirita mayoritaria aumentan su dureza a medida que se asocian con minerales progresivamente más “duros” en la escala de Mohs.

La presencia de Molibdenita masiva en el relleno de una vetilla de Cuarzo mayoritario (a veces mayor al 40%) es un factor que disminuye considerablemente la dureza relativa de la vetilla (H:4,1).

La Anhidrita en asociación con cuarzo muestra una baja considerable en la propiedad de dureza esperada para esta asociación (H:4,3).

Se corrobora en base al análisis de la recopilación de datos históricos, que los ensayos de tracción indirecta tienden a sobreestimar los valores de resistencia a la tracción en comparación a los valores arrojados por método directo, lo que debe ser tomado en cuenta a la hora de establecer parámetros de estabilidad. (De los Santos, 2011; Bustos 2011)

El comportamiento de vetillas de cuarzo mayoritario al asociarse con minerales de dureza relativa baja (Ej: Molibdenita) aumentan su resistencia a la tracción por método indirecto (8MPa), no así por método directo (1,5 Mpa) en el que eventualmente pueda influir la disposición del mineral blando en la estructura (Ej: Sutura).

Las vetillas de Calcopirita y Pirita mayoritaria aumentan su resistencia a la tracción en función de su asociación con minerales progresivamente más “duros” en la escala relativa de Mohs.

La comparación de los resultados obtenidos con estudios previos realizados en el yacimiento permite validar la consistencia de los datos y evaluar la evolución de las metodologías de caracterización geotécnica. Willoner (2000) reportó valores de resistencia a la tracción entre 3.9 y 5.8 MPa para vetillas Py-Anh-Qz (4 ensayos), con un promedio de 4.8 MPa. Padilla (2004) obtuvo promedios de 6.2 MPa para vetillas con calcopirita mayoritaria y 5.5 MPa para vetillas con anhidrita predominante. Gavia (2005) reportó valores consistentes de 5.5 MPa para calcopirita y 4.4 MPa para anhidrita. Bustos (2011) obtuvo 4.5 MPa para vetillas Cpy-Anh y 6.2 MPa para vetillas Qz-Cpy.

Los resultados del presente estudio muestran concordancia general con estos valores históricos, con medianas que oscilan entre 4.2 y 8.2 MPa según la asociación mineral. Las discrepancias observadas se atribuyen a diferencias en la representatividad de las muestras, variabilidad natural de las vetillas y evolución de los protocolos de ensayo. La base de datos consolidada proporciona una caracterización estadísticamente más robusta de las propiedades mecánicas de las vetillas del yacimiento.

La influencia del espesor de vetilla sobre la resistencia a la tracción indirecta constituye un aspecto fundamental para comprender el comportamiento mecánico de las estructuras del stockwork y su escalamiento a las condiciones in situ. Los datos analizados, provenientes de Padilla (2004) y Bustos (2011), abarcan espesores de vetilla entre 2 mm y 35 mm, permitiendo evaluar el efecto escala en un rango representativo de las condiciones del yacimiento.

La interpretación física de este efecto escala se fundamenta en los principios de la mecánica de fractura. Vetillas de mayor espesor presentan mayor probabilidad de contener defectos internos (poros, microfracturas, heterogeneidades mineralógicas) que actúan como concentradores de esfuerzos, facilitando la nucleación y propagación de grietas durante el ensayo. Adicionalmente, vetillas más gruesas pueden exhibir mayor heterogeneidad composicional y textural, con zonas de debilidad preferenciales que reducen la resistencia efectiva.

Los resultados obtenidos concuerdan cualitativamente con observaciones previas de Bustos (2011) y De los Santos (2011), quienes reportaron efectos escala negativos en ensayos de tracción indirecta sobre vetillas del yacimiento. Sin embargo, la magnitud del efecto observado en el presente estudio es moderada, sugiriendo que para espesores dentro del rango estudiado (2-35 mm), la composición mineralógica constituye un factor más determinante que el espesor en la definición de la resistencia a la tracción.

En lo que respecta a la comparativa entre método de tracción directa (TD) versus tracción indirecta (TI), se puede mencionar que para vetillas tipo HP (Hidrotermales Principales), la relación promedio TD/TI es de aproximadamente 0.31, indicando que el método brasileño o TI sobreestima la resistencia en un factor cercano a 3, mientras que para vetillas tipo TM (Tardimagmáticas), la relación promedio TD/TI es de aproximadamente 0.32. Para vetillas tipo HT (Hidrotermal Tardía), esta relación no se obtuvo, puesto que no contamos con resultados para este tipo de vetillas en ensayos de tracción directa.

Desde una perspectiva de ingeniería geotécnica, estos resultados tienen implicaciones críticas. Los parámetros de resistencia a la tracción utilizados en modelos numéricos de estabilidad deben basarse preferentemente en ensayos de tracción directa para evitar sobrestimar la capacidad portante de las estructuras. Alternativamente, si se utilizan datos de ensayos brasileños, debe aplicarse un factor de corrección conservador (típicamente 0.35–0.40 MPa) para obtener estimaciones realistas de la resistencia bajo tracción uniaxial.

Los parámetros de resistencia al corte disminuyen en función del espesor de la estructura ensayada, siendo una característica geométrica que afecta la estabilidad del macizo rocoso eventualmente y es concordante con trabajos anteriores (De los Santos, 2011; Bustos, 2011).

En general, existe un control de la mineralogía en la disminución de los parámetros de resistencia al corte en vetillas:

- Asociaciones de vetillas “blandas” (<40% de minerales duros;  $H > 4$ ) en general, aumentan considerablemente, tanto su dureza relativa como sus parámetros de resistencia al corte, al asociarse con minerales progresivamente más duros en la escala de Mohs.
- Asociaciones de vetillas “duras”, como el caso de vetillas con cuarzo o piritita mayoritaria en su relleno, a veces >40% presentan una disminución en sus parámetros de resistencia al cizallamiento y su dureza en asociación con minerales

blandos. Por tanto, es necesario ahondar a este respecto con estudios petrográficos que puedan determinar una eventual influencia en la disposición geométrica del cuarzo en asociación con minerales blandos.

- Vetillas de Anhidrita mayoritaria tienen mayor resistencia a la compresión triaxial que vetillas de Pirita mayoritaria.

De los resultados de ensayos en Fallas, se establecen por primera vez valores experimentales en parámetros de resistencia al corte en fallas de mina El Teniente, que pueden servir para nutrir los modelos numéricos en que se ha trabajado en el último tiempo (Villaescusa et al.; 2013).

Las envolventes en este estudio arrojan valores de resistencia al corte menor (2,8 MPa) que las envolventes modeladas (4 MPa aprox), por lo tanto, la susceptibilidad de estas estructuras es mayor. La presencia de Pirita en fallas con Anhidrita-Yeso predominante aumenta ligeramente el ángulo de fricción de la estructura.

Fallas de Anhidrita mayoritaria aumentan sustantivamente el ángulo de fricción que una falla con Yeso mayoritario.

La rugosidad (JRC) en el plano de cizallamiento es un parámetro que afecta la resistencia al corte de las fallas.

Los valores casi nulos de cohesión (Promedio  $C=0,06$  Mpa) son resultado de la experimentación en estructuras abiertas, en los que se pierde la fuerza de unión entre los minerales constituyentes en el plano de cizallamiento, mientras que la cohesión aparente dada por la rugosidad (JRC) es prácticamente nula al considerar el efecto escala de esta.

Las correlaciones, no necesariamente establecen una condición de causalidad, por lo que es necesario complementar estos resultados con análisis petrográfico más acabado para intentar identificar aspectos geométricos-mineralógicos que pudiesen influir en los

resultados obtenidos para esas asociaciones minerales en vetillas representativas del yacimiento.

## **CAPÍTULO VIII. RECOMENDACIONES.**

Se recomienda realizar una campaña de ensayos más robusta con la finalidad de establecer con precisión los parámetros de resistencia de diferentes asociaciones minerales que tengan injerencia en la susceptibilidad de estructuras.

Establecer un estándar de metodología para selección de ensayos geotécnicos para disminuir el grado de subjetividad en la campaña de selección de muestras y de esa forma obtener, tanto disposiciones geométricas como mineralogías de vetillas más acordes a cada ensayo.

Realización de ensayos de corte en fallas de diferentes espesores y rellenos para seguir alimentando el conocimiento incipiente del comportamiento de estas estructuras.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, L. (1960). *Geología de Los Andes de Chile Central. Provincia de Aconcagua*. Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Burgos, L. (2016). *ACTUALIZACIÓN MODELO DE MINERALOGÍA RELATIVA IN SITU*. Rancagua: CODELCO CHILE, DIVISIÓN EL TENIENTE, GERENCIA RECURSOS MINEROS Y DESARROLLO.
- Bustos, N. (2011). *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería: "Propuesta de Falla para pilares de roca incluyendo el efecto del relleno de Vetillas"*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Cahaill, T. & Isaacs, B. (1992). Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *Journal Geophysical Research*, v. 97, p. 503-529.
- Camus, E. (1975). Geology of the El Teniente ore body with emphasis on wall-rock alteration. *Economic Geology*, V. 70, p. 1.341-1.372.
- Cannell, J. (2004). *El Teniente Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Central Chile*. Australia: Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania (Inédito).
- Charrier, R. (1973). Geología Regional de la provincia de O'Higgins & Colchagua. *Publicación INEN(N°7)*, p. 1-69.
- 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), pp. 344-355.
- Charrier, R., & Munizaga, F. (1979). Edades K-Ar de volcanitas cenozoicas del sector cordillerano del Río Cachapoal, Chile (34°15' L.S.). *Revista Geológica de Chile*, Vol 7, pp 41-51.
- Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher III, C., Mark, N., Zapatta, F., . . . 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(5/6), p. 393-422.
- Cuadra, P. (1986). Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente & áreas adyacentes. *Revista Geológica de Chile*(Num 27), p 3-26.

- Davidson, J., & Vicente, J. (1973). Características paleogeográficas & estructurales del área fronteriza de las Nacientes del Teno (Chile) & Santa Elena (Argentina) (Cordillera Principal, 35° a 35°15' latitud S). *Actas del Quinto Congreso Geológico Argentino. Vol.5*, págs. p. 11-55. Buenos Aires: Asociación Geológica Argentina.
- 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*. Departamento de Ciencias de la Tierra. Concepción: Universidad de Concepción.
- Drake, R., Charrier, R., Thiele, R., Munizaga, F., Padilla, H., & Vergara, M. (1982). Distribución & edades K-Ar de volcanitas post Neocomianas en la Cordillera Principal entre 32° & 36° Latitud Sur. Implicaciones estratigráficas & tectónicas para el Meso-Cenozoico de Chile Central. *Proceedings 3° Congreso Geológico Chileno, Vol 1*, págs. p D 42-D 78. Concepción.
- Enrione, A. (1972). *Estabilidad de los terrenos del área de Alto Colón. Sociedad Minera El Teniente*. Departamento de Geología. Rancagua: Inédito.
- Falcón, M., & Rivera, O. (1998). *Estudio geológico distrital de la División El Teniente de CODELCO-Chile, escala 1:25.000*. Vicepresidencia de exploraciones & asociaciones mineras. Santiago, Chile: CODELCO Chile.
- Falcón, M., & Rivera, O. (1998). *Estudio geológico distrital de la División El Teniente de CODELCO-Chile, escala 1:25.000*. Vicepresidencia de exploraciones & asociaciones mineras. Santiago, Chile: CODELCO Chile.
- Gana, P., & Wall, R. (1997). Evidencias geocronológicas Ar40/Ar39 & K-Ar de un hiatus Cretácico Superior-Eoceno en Chile Central (33°-33° 30' S). *Revista Geológica de Chile*(24), pp 145-163.
- Godoy, E. (1993). *Geología del Área entre los ríos Claro del Maipo & Cachapoal*. CODELCO & SERNAGEOMIN.
- Godoy, E., & Lara, L. (1994). Segmentación estructural andina a los 33°-34° S. Nuevos Datos en la Cordillera Principal. *7° Congreso Geológico chileno, Vol. 2*, págs. pp 1344-1346.



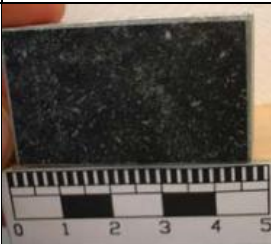
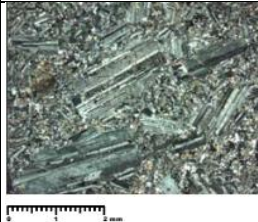
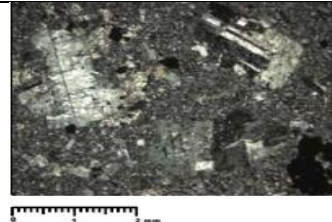
- Gómez, R. (2001). *Geología de las unidades volcanogénicas cenozoicas del área industrial de la mina El Teniente, entre Colón & Coya, Cordillera Principal de Rancagua, VI Región. El Teniente*. Santiago: Universidad de Chile.
- González, A. (2000). *Análisis estructural entre los valles del Río Tinguiririca y Teno, Cordillera Principal de Chile Central: Microsismicidad y Geología de superficie*. Departamento de Geología. Santiago: Universidad de Chile.
- Gutscher, M., Maury, R., Eissen, J., & Bourdon, E. (s.f.). Can slab melting cause flat slab? *Geology*, v.28, p. 535-538.
- Isaaks, B. (1988). Uplift of the Central Andean Plateau and bending of the Bolivian Orocline. *Journal of Geophysical Research*, v. 93, 3211-3231.
- Kay, S; Mpodozis, C; Ramos, V; Munizaga, F. (1991). Magma source variations for mid late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the Central Andes (22 to 33 latitude). En R. Harmon, & C. Rapela, *Andean magmatism and its tectonic setting* (págs. p 113-137). Boulder, Colorado: Geological Society of America.
- Klöhn, C. (1960). Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central. *Boletín N°8* (pág. 95 p.). Santiago, Chile.: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Kurtz, A., Kay, S., Charrier, R., & Farrar, E. (1997). Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, Central Chile (34°-35°). *Revista*, 16, p. 145-162.
- Kurtz, A., Kay, S., Charrier, R., & Farrar, E. (1997). Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, Central Chile (34°-35°). *Revista Geológica de Chile*, 16, p.145-162.
- Kurtz, A., Kay, S., Charrier, R., & Farrar, E. (1997). Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, Central Chile (34°-35°). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 16, p. 145-162.
- Labuz, J., & Zang, A. (2012). Mohr–Coulomb Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 975-979.
- Liu, X. (2022). Deformation and Failure Characteristics of Loading and Unloading Rock Based on Volume Crack Strain.

- Rivera, O., & Cembrano, J. (2000). Modelo de formación de cuencas volcanotectónicas en zonas de transferencia oblicuas a la cadena andina: El caso de las cuencas Oligo-Miocenas de Chile Central & su relación con estructuras NNW-NW (33° 00'-34° 30'S). *IX Congreso Geológico Chileno, Vol.1*, págs. p. 631-636. Puerto Varas, Chile.
- Rivera, O., & Falcón, F. (2000). Secuencias de relleno de cuencas volcano-tectónicas transversales Oligoceno-Miocenas en los alrededores del Yacimiento El Teniente (33° 45' - 34° 30' S). *IX° Congreso Geológico Chileno*, (págs. pp. 819-823). Puerto Varas.
- Skewes, A. (1997). *Informe petrológico preliminar del sector oriental del perfil 124 en El Teniente*. Codelco Chile, Departamento de Geología . Rancagua: Informe Inédito.
- Skewes, M; Arévalo, A; Floody, M; Zúñiga , P; Stern, Ch;. (2002). The Giant El Teniente breccia deposit: Hypogene Copper distribution and emplacement. *Society of Economic, Special Publication 9*, p.299-332.
- Stern, C. & Skewes, M.A. (1995). Miocene to present magmatic evolution at the northern end of the Andean Southern Volcanic Zone , central Chile. *Revista Geológica de Chile*, v. 22, p. 261-272.
- Stern, C., & Skewes, M. (1997). Subduction of the Juan Fernández Ridge below Central Chile: effects on subduction geometry, rates of subduction erosion, arc migration and magma chemistry, and genesis of copper deposits. *Actas del VIII Congreso Geológico, Vol. 3*, p. 1724-1728.
- Stewart, J., & Araya, R. (1972). *Programa de exploración minera SOMEX-IIG en la alta Cordillera de los Andes entre los paralelos 34°10' & 35°10' latitud sur*. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Thiel, R. (2001). Peak vs. residual shear strength for landfill bottom liner stability analyses. *Proceedings of the 15th GRI Conference*, (págs. 40-70).
- Thiele, R. (1980). *Carta Geológica de Chile N°39. Hoja Santiago, escala 1:25.000*. Santiago de Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas Chile.

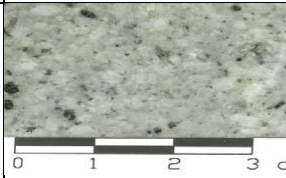
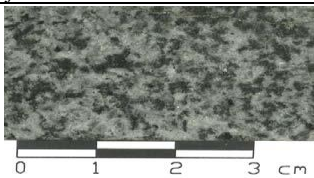
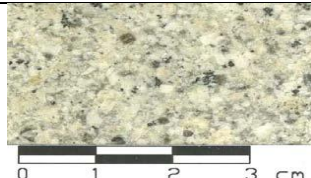
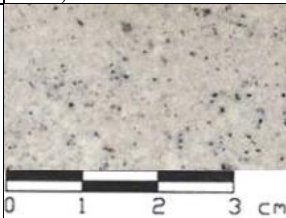
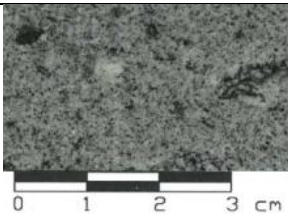
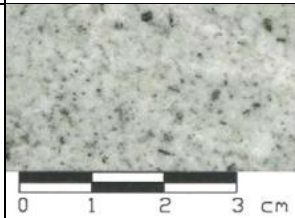
- Vásquez, D. P. (2025). Experimental model of direct tensile strength of pyrite and chalcopyrite veinlets. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 775–784.
- Wilkinson, J., Baker, M., Cooke, D., & Wilkinson, D. (2020). Exploration Targeting in Porphyry Cu Systems Using Propylitic Mineral Chemistry: A Case Study of the El Teniente Deposit, Chile. *Economic Geology*, 115(4), pp.771-791.
- Willoner, R. (2000). *Fundamentos de la geomecánica aplicada a minería subterránea*. Santiago: Editorial Universitaria.
- Yañez, G., Cembrano, J., Pardo, M., & Selles, D. (2002). The Challenger-Juan Fernandez-Maipo major tectonic transition of the Nazca-Andean subduction system at 33-34°S: geodynamic evidence and implications. *Journal of South American Earth Sciences*, v.15, p. 13-38.

## ANEXO I

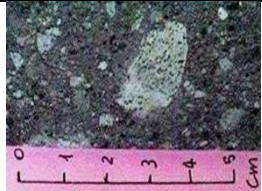
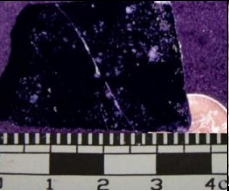
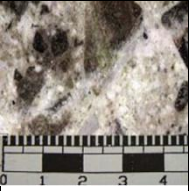
**Tabla 2.2:** Cuadro resumen de las diferentes unidades petrográficas del Complejo Máfico El Teniente. Confeccionado en base a la información obtenida de “Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas Actualización Año 2003” (referencia interna SGL-I-123/2003).

| COMPLEJO MÁFICO EL TENIENTE   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Litologías                    | DIABASA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | GABRO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | PÓRFIDO BASÁLTICO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Características generales     | Corresponden a rocas intrusivas a hipabisales de composición básica, que se diferencian por sus texturas tanto en muestra de mano como en sección transparente. La fuerte alteración que las afecta y la sobreimposición de eventos hidrotermales hace difícil observar las relaciones de contacto entre ellas; sin embargo, se ha reconocido que el pórfido basáltico intruye al gabro. La relación de contacto entre la diabasa y el gabro no es clara aún, se han observado contactos bruscos y también transicionales |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Características Macroscópicas | <p>Roca de color gris oscuro a negro, con textura porfídica, fenocristales de plagioclasa tabulares entre 5% a 40% aprox. Generalmente los fenocristales tienen un largo mayor a 2 mm, y la “masa fundamental” corresponde a cristales de plagioclasa de menor tamaño (&lt; 1mm).</p> <p>Rasgos Característicos: Su textura Porfídica, independiente del tamaño de sus fenocristales o la proporción de ellos. Los cristales de la masa fundamental se pueden observar con lupa de mano.</p>                              | <p>Roca de color gris oscuro a negro, con textura equigranular. Los cristales son tabulares a aciculares.</p> <p>Variedades Texturales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Microgabro: Textura fina con cristales menores a 1mm de largo.</li> <li>- Gabro: Cristales mayores a 1mm.</li> </ul> <p>Rasgos Característicos: Su textura equigranular, independiente del tamaño de sus cristales (Microgabro-Gabro).</p> | <p>Roca de color gris oscuro a negro, con textura porfídica. Presenta fenocristales tabulares de plagioclasa (5 a 20%), con largo mayor a 2mm.</p> <p>Variedades Texturales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pórfido Basáltico fino: Fenocristales tabulares a aciculares de plagioclasa de 1 a 2mm de largo.</li> <li>- Pórfido Basáltico Grueso: Fenocristales de plagioclasa con forma más cuadrada (“equant”), mayores a 2mm de largo.</li> </ul> <p>Rasgos Característicos: Su textura Porfídica. La masa fundamental afanítica la que le otorga una apariencia “aterciopelada”.</p> |
| Características Microscópicas | Roca de <b>textura porfídica</b> , con fenocristales de plagioclasa > a 2mm de largo y piroxenos en forma subordinada. La masa fundamental está constituida por cristales de plagioclasa menores a 1mm, biotita secundaria, anhidrita, clorita y turmalina.                                                                                                                                                                                                                                                               | Roca de <b>textura equigranular</b> , con cristales de plagioclasa de 1mm de largo y piroxenos en forma subordinada. También puede presentar Biotita secundaria, anhidrita, clorita y turmalina.                                                                                                                                                                                                                                | Roca de <b>textura porfídica</b> , también glomeroporfídica; con fenocristales de plagioclasa mayores de 2 mm de largo. Puede presentar fenocristales de piroxeno o bien relictos de ellos en la masa fundamental.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Fotografía                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Microfotografía               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

**Tabla 2.3:** Resumen de las diferentes unidades petrográficas del Complejo Félsico. Confeccionado en base a la información obtenida de “Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas Actualización Año 2003” (referencia interna SGL-I-123/2003).

| COMPLEJO FÉLSICO              |                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Litologías                    | GRANODIORITA PORFÍDICA                                                                                                                                                                                                                                  | TONALITA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | PÓRFIDO DIORÍTICO GRUESO                                                                                                                                                                                               |
| Características Macroscópicas | Roca generalmente de color blanco con plagioclasas, anfíbolos y "ojos de cuarzo".                                                                                                                                                                       | Formada por rocas con texturas que varían de equigranular (1 – 5 mm) a porfídico.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Son filones de poca potencia (2 a 6 m) conformando cuerpos de cierta magnitud en profundidad, en la parte sur del yacimiento, específicamente en el sector Regimiento, donde el espesor alcanza 15 m.                  |
| Características Microscópicas | Roca con proporciones variables de fenocristales de plagioclasa, oligoclasa-albita, biotitas, pequeñas cantidades de anfíbolos y con presencia de "ojos de cuarzo", rodeados de una masa fundamental con cuarzo, albita, feldespato potásico y biotita. | La zona equigranular está compuesta por plagioclasa, andesina a oligoclasa, anfíbolos alterados, biotita, cuarzo y menor cantidad de feldespato potásico. La parte porfídica de la Diorita Sewell contiene fenocristales de plagioclasa, biotita y relictos de anfíbolos inmersos en una masa fundamental de cuarzo, microlitos de plagioclasa y menor feldespato potásico, con ausencia de "ojos de cuarzo". | Presenta textura porfídica con 60% de fenocristales de plagioclasa y biotita, anfíbola alterada y "ojos de cuarzo" en una masa fundamental de cuarzo y feldespato.                                                     |
| Fotografía                    |                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                    |
| Litologías                    | PÓRFIDO DIORÍTICO BLANCO                                                                                                                                                                                                                                | PÓRFIDO MICRODIORÍTICO (PÓRFIDO A)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | PÓRFIDO DIORÍTICO                                                                                                                                                                                                      |
| Características generales     | Se ubican en el sector sur del yacimiento y corresponden a facies de alteración cuarzo-sericitica de la tonalita (Diorita Sewell)                                                                                                                       | Se ubica en el sector Fw del Teniente-4 LHD. Está en contacto con la Tonalita y con el Complejo Máfico El Teniente.                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Hacia la parte central y norte del yacimiento, en los sectores Esmeralda y Reservas Norte Estos presentan forma vertical, y es posible reconocerlos desde Teniente-1 hasta el nivel Teniente-8 (Skewes y otros, 2002). |
| Características Macroscópicas | Presenta una textura porfídica de grano medio a grueso.                                                                                                                                                                                                 | Genera un importante volumen de brechas ígneas e hidrotermales de anhidrita que son responsables de las altas leyes de cobre, constituyendo tal vez un centro de mineralización independiente (Skewes y otros, 2002).                                                                                                                                                                                         | Formado por una serie de stocks y diques menores alineados en una dirección N30°W.                                                                                                                                     |
| Características Microscópicas | Con un 40% de fenocristales de plagioclasa y masa fundamental biotitizada y sericitizada y masa fundamental biotitizada y sericitizada (Skewes y otros, 2002).                                                                                          | Corresponde a una micro diorita que se ubica en el sector centrestre del depósito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Presenta texturas porfídicas hipidiomorfas con un promedio de 50% de fenocristales, principalmente plagioclasa, perita de reemplazo y biotita subordinada                                                              |
| Fotografía                    |                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                   |

**Tabla 2.4:** Cuadro resumen de las diferentes unidades petrográficas del Complejo Félsico. Confeccionado en base a la información obtenida de “Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas Actualización Año 2003” (referencia interna SGL-I-123/2003).

| COMPLEJO DE BRECHAS           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Litologías                    | BRECHA BRADEN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | BRECHA<br>HIDROTHERMAL DE<br>ANHIDRITA Y<br>TURMALINA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | BRECHA BIOTITA                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | BRECHAS<br>ÍGNEAS                                                                                                                                                                                                                                            |
| Características generales     | La naturaleza de las Brechas y sus clastos depende de la zona donde este localizada la brecha. De esta manera, las brechas son clasificadas de acuerdo con su mineral más abundante o los minerales que componen sus matrices o roca. Podemos encontrar brechas de turmalina, anhidrita, biotita, yeso, magnetita e ígneas                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Características Macroscópicas | Tiene la forma de un cono invertido con un diámetro de 1200 m en superficie y una continuidad reconocida en Profundidad de 1800 m. Existen en su interior una diversidad de unidades definidas por variaciones en el tamaño, selección y abundancia relativa de los clastos, y por el contenido de turmalina en el cemento, estas son: BB Sericita, BB Sericita Fina, BB Sericita Bolones, BB Clorita, BB Turmalina, BB Turmalina Bloques. | Las Brechas Hidrotermales de Anhidrita Es habitual que presenten leyes de cobre más altas que su entorno. Brechas Hidrotermales de Turmalina. Usualmente son fáciles de reconocer y están ampliamente distribuidas en el yacimiento.                                                                                                                                                                   | Se encuentran asociadas a la Alteración Biotítica Tardimagmática. Se ubican en zonas de cobre hipógeno rodeando a la Pipa Braden y distantes del Pórfido Teniente (Skewes, 1999).                                                                                                                                            | Se ubican preferentemente en los contactos entre el CMET y los Pórfidos Félsicos que lo intruyen, desarrollando potencias desde centímetros hasta decenas de metros.                                                                                         |
| Características Microscópicas | Constituida por fragmentos redondeados a subangulosos polimícticos en una matriz de polvo de roca y cemento de sericita con cantidades menores de turmalina, calcita y sulfuros, como pirita, de variada composición y tamaño, provenientes de rocas preexistentes con mineralización y alteración hipógena propia.                                                                                                                        | Las brechas de Turmalina pueden ser mono y heterolíticas. Los clastos en estas brechas generalmente están silicificados y sericitizados, algunos completamente o solo en sus bordes presentan rastros de lixiviación. La turmalina es el mineral dominante, con presencia de anh, qz, cpy, bo y py, en las matrices de muchas brechas en El Teniente, incluyendo la Brecha Marginal de la Pipa Braden. | Usualmente son monolíticas con clastos máficos o félsicos. La presencia de biotita de color café es dominante en estas brechas con cantidades variables de turmalina, cuarzo, feldspatos, clorita, anhidrita, yeso, apatito, calcopirita, bornita, pirita, rutilo y magnetita. Estas brechas poseen un alto contenido de Cu. | Brechas Ígneas: Si en la matriz es dominante la biotita son llamadas brechas ígneas andesíticas, en cambio si la matriz es de color más claro, porque contiene menos bio y más anh, feld y qz, entonces, son llamadas brechas ígneas dacíticas o dioríticas. |
| Edad                          | 4.5 + 0.2 Ma (Cuadra, 1986; Maksaeve y otros, 2001)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Esta última fue datada en K / Ar en 4.7 Ma (Cuadra, 1986).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | No se ha determinado aún                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | No se ha determinado aún                                                                                                                                                                                                                                     |
| Fotografía                    | <br>Tomada de SGL-I-123/2003                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <br>Tomada de Skewes (2004)                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <br>Tomada de Skewes (2004)                                                                                                                                                                                                             | <br>Tomada de Cannell (2004)                                                                                                                                            |