



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



**ENREJADO DE VETILLAS Y SU RELACIÓN CON
PROPIEDADES DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN
DE LA ROCA HUESPED DE LA MINERALIZACIÓN, EN
MINA EL TENIENTE, VI REGIÓN DEL GENERAL
LIBERTADOR BERNANDO O'HIGGINS.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

José Manuel Cavieres Flores

Profesor Patrocinante: Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Profesional guía: Sr. José Edgardo Seguel Sepúlveda

Profesores Comisión: MsC. Abraham Elías González Martínez
Dr. Jorge Quezada Flory

Concepción, 2019

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCION	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	3
1.2. Ubicación y Accesos	3
1.3. Metodología de trabajo	5
1.3.1. Etapa de pre-terreno	5
1.3.2. Etapa de terreno	5
1.3.3. Etapa de gabinete	5
1.3.3.1. Etapa de gabinete 1	5
1.3.3.2. Etapa de gabinete 2	5
1.3.3.3. Etapa post-gabinete	8
1.4. Morfología clima y vegetación	8
1.4.1. Cordillera de los Andes	8
1.4.2. Valle central	9
1.4.3. Cordillera de la costa	9
1.4.4. Planicie litoral	10
1.5. Trabajo años anteriores	10
1.6. Agradecimientos	13
2. MARCO GEOLÓGICO	14
2.1. Marco geológico regional	14
2.1.1. Rocas estratificadas	15
2.1.2. Rocas intrusivas	17
2.1.3. Estructuras	18
2.1.4. Evolución tectónica	19
2.2. Geología distrital	22
2.2.1. Rocas estratificadas	23
2.2.2. Rocas intrusivas	24
2.2.2.1. Complejo Mafico El Teniente (CMET)	24
2.2.2.2. Complejo Félsico	25
2.2.2.3. Complejo Brecha Braden	27
2.2.2.4. Cuerpo de Brechas	28
2.2.2.5. Intrusivos menores	29
2.2.3. Estructuras	30
2.3. Alteración y mineralización	31

2.3.1. Etapa Tardimagmatica (TM)	32
2.3.2. Etapa Hidrotermal Principal (HP)	33
2.3.3. Etapa Hidrotermal Tardía (HT)	33
2.3.4. Etapa póstuma	34
3. CLASIFICACION DE VETILLAS MINA EL TENIENTE	35
3.1. Generalidades	35
3.2. Importancia de vetillas mina El Teniente	37
3.3. Características y clasificación de vetillas El Teniente	39
3.3.1. Elementos de una vetilla	39
3.3.2. Espesor de la vetilla	40
3.3.3. Según traza de la vetilla	40
3.4. Clasificación genética de las vetillas	41
3.4.1. Etapa Tardimagmatica (TM)	41
3.4.2. Etapa Hidrotermal Principal (HP)	44
3.4.3. Etapa Hidrotermal Tardía (HT)	45
4. PARAMETROS GEOMÉTRICOS Y MINERALÓGICOS	47
4.1. Generalidades	47
4.2. Tipo de vetilla	47
4.3. Relleno mineralógico	48
4.3.1. Dureza relativa	48
4.3.2. Halo	49
4.4. Geometría de la vetilla	50
4.4.1. Espesor	50
4.4.2. Contacto vetilla-roca vetilla-halo	51
4.4.3. Angulo de vetilla	52
4.4.4. Rugosidad	52
5. ENSAYOS GEOTÉCNICOS	55
5.1. Generalidades	55
5.2. Muestreo	57
5.2.1. Descripción de las muestras	58
5.3. Antecedentes históricos de ensayos geotécnicos	58
5.4. Ensayo a la resistencia a la compresión simple (UCS)	60
5.4.1. Preparación de la muestra	61
5.4.2. Procedimiento	61
5.5. Ensayo de compresión triaxial	63
5.5.1. Preparación de la muestra	64
5.5.2. Procedimiento	64
5.6. Tipo de ruptura en probetas	65
5.6.1. Tipo A: Ruptura por roca	65
5.6.2. Tipo B: Superficie mixta	66
5.6.2. Tipo C: Ruptura por varias vetillas	67
5.6.3. Tipo D: Ruptura por una vetilla	68
5.7. Ensayos de deformación	69

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS	73
6.1. Resistencia a la compresión simple (UCS)	74
6.1.2. Efecto del número de vetillas en la resistencia CUS	75
6.2. Tipo de ruptura	77
6.2.1. Resistencia por tipo de ruptura	79
6.3. Angulo de ruptura (α)	81
6.3.1. Angulo (α) por tipo de ruptura en probeta	82
6.4. Relleno mineralógico por ruptura	83
6.4.1. Influencia de la mineralogía en las rupturas	84
6.5. Rugosidad de las rupturas	85
6.6. Influencia de las vetillas en la resistencia	86
6.6.1. Generalidades	86
6.6.2. Curvas de Jaeger para los tipos de ruptura	88
6.7. Parámetros de deformación de las probetas	91
6.7.1. Módulo de Young tangente	91
6.7.2. Módulo de Young secante	92
6.7.3. Relación entre la deformación y el número de vetillas	93
6.7.4. Clasificación del esfuerzo y los módulos de deformación	95
6.7.5. Clasificación de probetas ensayadas	95
6.8. Relación esfuerzo-deformación en probetas	96
6.8.1. Ruptura tipo D1	98
6.8.2. Ruptura tipo B2	99
6.8.3. Ruptura tipo D2	100
6.8.4. Ruptura tipo C	101
6.9. Ensayos de compresión confinada	101
6.9.1. Generalidades	101
6.9.2. Círculo de Mohr	103
6.9.3. Tipos de ruptura por sector	104
6.9.4. Curvas de resistencia por ruptura	105
6.9.5. Influencia de las vetillas en las envolventes de ruptura	107
6.9.6. Envolvente de ruptura para CMET	110
6.9.7. Criterio bilineal de Patton	112
6.9.8. Comportamiento de rugosidades en rupturas	114
6.9.9. Criterio de Barton & Choubey	115
6.9.10. Relación entre la resistencia a la compresión y rugosidad	116
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
7.1. Conclusiones	117
7.1.1. Ensayos de compresión uniaxial	117
7.1.2. Tipos de ruptura en las probetas por sector	118
7.1.3. Influencia de la mineralogía en las rupturas	119
7.1.4. Ángulo de ruptura de las vetillas en probeta	120
7.1.5. Deformación de las probetas	121
7.2. Influencia de las vetillas en ensayos confinados	122
7.2.1. Ruptura en condiciones triaxiales	122

7.2.2. Influencia de las vetillas en envolventes de ruptura	123
7.2.3. Relación entre la resistencia y la rugosidad	124
7.3. Recomendaciones	125
8. REFERENCIAS	127
9. ANEXOS	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Esquema con los niveles actuales de producción de mina El Teniente.	2
1. 2. Ubicación geográfica de mina El Teniente y vías de acceso en la VI Región de O'Higgins.	4
1. 3. Sectores productivos estudiados y número de probetas por sector.	6
1. 4. Reporte proporcionado por la empresa SGS mecánica de rocas para una probeta, con la determinación de las constantes Elásticas-Estáticas.	7
1. 5. Mapa con las unidades morfoestructurales principales de la VI Región	9
1. 6. Frecuencia de vetillas en mapeos de sondajes para distintas litologías.	11
2. 1. Mapa geológico regional de la franja cordillerana de Chile Central.	13
2. 2. Modelo de estructuras tipo Riedel para una zona de transurrencia sinistral de rumbo N50°W.	17
2. 3. Ubicación del segmento Zona Volcánica Central (ZVC). Zona de flat slab y la porción norte de la Zona Volcánica Sur (ZVS).	19
2. 4. Marco geotectónico.	21
2. 5. Mapa geológico simplificado del nivel Teniente 6 a 2165 m s.n.m.	23
2. 6. Zona de Falla El Teniente	30
2. 8. Esquema de los distintos niveles geológicos, en base a mapeos históricos realizados en la mina.	31
3. 1. Ejemplo de una vetilla HT con varios minerales de relleno.	34
3. 2. Influencia de las estructuras en la roca primaria en los procesos de extracción de mina El Teniente.	36
3. 3. Elementos que componen una vetilla.	38
4. 1. Estimación del índice de rugosidad JRC.	52
5. 1. Esquema de roca intacta y su relación con el macizo rocoso.	55
5. 2. Gráfico 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 mina.	59
5. 3. Esquema de ensayo de compresión uniaxial simple (UCS) y parámetros que intervienen.	59
5. 4. Máquina para efectuar ensayos de compresión simple.	61
5. 5. Círculo de Mohr-Columb.	62

5. 6.	Máquina para efectuar ensayos de compresión triaxial.	63
5. 7.	Esquema ruptura tipo A.	65
5. 8.	Esquema ruptura tipo B1.	65
5. 9.	Esquema ruptura tipo B2.	66
5.10.	Esquema ruptura tipo C.	66
5.11.	Esquema ruptura tipo D1.	67
5.12.	Esquema ruptura D2.	67
5.13.	Zona de deformación elástica y plástica en grafico stress v/s strain.	68
5.14.	Ensayo para medir la deformación en probeta.	69
5.15.	Arreglo eléctrico en el cual se basa la medición de deformación con <i>Strain Gauges</i> .	70
5.16.	Gráfico <i>stress/strain</i> .	71
5.17.	Gráfico deformación v/s resistencia para una probeta del sector La Huifa.	71
6. 1.	Diagrama <i>Box-Plot</i> para la Resistencia CUS en los 4 sectores.	74
6. 2.	Gráfico Resistencia CUS v/s número de vetillas en probeta.	75
6. 3.	Gráfico Resistencia CUS v/s número de vetillas en probeta en los 4 sectores	75
6. 4.	Gráficos circulares con las frecuencias de los tipos de ruptura en cada sector.	77
6. 5.	Gráfico de frecuencia porcentual de las rupturas en cada litología.	78
6. 6.	Distribución de la resistencia CUS para cada tipo de ruptura.	79
6. 7.	Resistencia por tipo de ruptura en el estudio de Barahona 2013.	80
6. 8.	Diagrama <i>Box-Plot</i> para los ángulos de las rupturas de las vetillas para cada sector.	80
6. 9.	Gráficos de dispersión ángulo de ruptura v/s tipo de ruptura para cada sector.	81
6.10.	Gráficos de porcentaje acumulado de rellenos mineralógicos para los tipos de ruptura en cada sector.	82
6.11.	Resistencia de las vetillas para cada sector.	83
6.12.	Gráficos de dispersión con los índices de rugosidad (JRC) para cada tipo de ruptura por sector.	84
6.13.	Variación de la resistencia en relación con el ángulo de la discontinuidad.	85
6.14.	Criterio de Jaeger (1960) para la resistencia en rocas anisótropas.	86
6.15.	Curvas de resistencia para cada tipo de ruptura.	87
6.16.	Curva de Jaeger para las rupturas tipo A.	88
6.17.	Curva de Jaeger para las rupturas tipo B2.	88
6.18.	Curva de Jaeger para las rupturas tipo D1 y D2.	89
6.19.	Curva de Jaeger para las rupturas tipo C por dos vetillas.	90
6.20.	Diagrama <i>Box-Plot</i> para el módulo de Young Tangente de los 4 sectores.	90
6.21.	Diagrama <i>Box-Plot</i> para el módulo de Young Secante.	91
6.22.	Gráfico de dispersión modulo Tangente v/s número de vetillas en probeta de los 4 sectores.	92
6.23.	Gráfico de dispersión modulo Secante v/s número de vetillas en probeta.	93

6.24.	Gráfico de dispersión Modulo Tangente y Secante v/s N° de vetillas en probeta.	93
6.25.	Clasificación de la roca primaria en términos de su resistencia y módulo de deformación.	94
6.26.	Clasificación de probetas ensayadas según el ábaco de Deere & Miller (1966).	95
6.27.	Rangos del módulo relativo, según clasificación de Deere & Miller (1966).	95
6.28.	Curva deformación-esfuerzo.	96
6.29.	Esquema que ilustra la evolución del daño por agrietamiento en una probeta de roca.	97
6.30.	Curvas deformación-esfuerzo para 4 tipos de vetillas en ruptura D1.	97
6.31.	Curvas deformación-esfuerzo para los 4 tipos de vetillas en ruptura B2.	98
6.32.	Curvas deformación- esfuerzo para 3 tipos de vetillas en ruptura D2.	99
6.33.	Curvas deformación-esfuerzo para 3 tipos de vetillas en ruptura tipo C por 2 vetillas.	100
6.34.	Envolvente de Mohr-Columb.	101
6.35.	Círculo de Mohr. Esquema que representa el estado de esfuerzo al que está sometida una probeta en un ensayo de compresión triaxial.	102
6.36.	Gráficos porcentuales circulares de tipos de ruptura por sector.	103
6.37.	Curva de resistencia para rupturas tipo D1 y D2.	104
6.38.	Curva de resistencia para ruptura tipo B2.	105
6.39.	Curva de resistencia para ruptura tipo C.	105
6.40.	Envolventes de ruptura para en ruptura D1 y B2.	106
6.41.	Envolventes de ruptura para vetillas de anhidrita en rupturas D1 y B2.	107
6.42.	Envolventes Mohr-Columb para 3 tipos de vetillas en ruptura tipo C.	108
6.43.	Envolventes de ruptura para una vetilla (D) y roca intacta (C y B2) según esfuerzos normales y de corte.	110
6.44.	Envolventes de ruptura para una vetilla (D) y roca intacta (C y B2) según esfuerzos principales.	111
6.45.	Influencia del ángulo de rugosidad en la resistencia la corte.	112
6.46.	Estado de esfuerzos en una vetilla con rugosidad 8.	112
6.47.	Gráfico de dispersión con los valores de esfuerzos de corte para JRC de 4, 6,8 y 10 en ruptura tipo D1 y D2.	113
6.48.	Gráfico de dispersión con los valores de esfuerzos de corte para un JRC de 4, 6,8 y 10 en ruptura tipo D1 y D2.	114
6.49.	Gráficos JCS v/s JRC para vetillas de yeso, cuarzo y anhidrita	115
7. 1.	Esquema que ilustra la variación de la resistencia de las probetas de acuerdo con los tipos de ruptura y número de vetillas en probeta	118
7. 2.	Posición de los <i>strain gauges</i> propuesta para medir la deformación de las vetillas o la influencia de estas en la deformación de la matriz.	125

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Página
1. 1.	Vista desde la carretera Eduardo Frei Montalva hacia el NE. 4
2. 1.	Imágenes de las diferentes unidades petrográficas pertenecientes al Complejo Felsico El Teniente. 25
2. 2.	Imágenes de las diferentes unidades petrográficas pertenecientes al Complejo de Brechas El Teniente. 27
3. 1.	Enrejado de vetillas (Stockwork), compuesto por vetillas TM con relleno de cuarzo. 35
3. 2.	Vetillas Tardimagmáticas (TM). 41
3. 3.	Vetillas Tardimagmáticas (TM) Parte II. 41
3. 4.	Vetillas Etapa Hidrotermal Principal (HP). 43
3. 5.	Vetillas Hidrotermales Tardías (HT). 45
4. 1.	Determinación del espesor (e) de una vetilla. 49
4. 2.	Geoflex utilizado para medir el espesor de una vetilla y su ángulo. 50
4. 3.	Planaridades contacto de vetilla roca en probeta. 50
4. 4.	Angulo (α) de la vetilla. 51
4. 5.	Probetas post-ensayo 1. 53
4. 6.	Probetas post-ensayo 2. 53
6. 1.	Probetas de roca con vetillas para los 4 sectores. 76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. 1.	Numero de probetas ensayadas por sector en producción de mina El Teniente. 7
1. 2.	Formato Tabla para mapeo de probetas con los parámetros considerados en ensayos geotécnicos. 8
2. 1.	Cuadro resumen de las diferentes unidades petrográficas del Complejo Mafico El Teniente (CMET). 24
4. 1.	Clasificación de vetillas según Manual de Estándares y Metodologías para Geología de Minas El Teniente (2013). 48
4. 2.	Tabla de durezas relativas de minerales según escala de Mohs. 48
5. 1.	Tabla Excel con probetas descritas del sector La Huifa, se muestran los distintos parámetros considerados en el mapeo. 57
6. 1.	Valores de propiedades geotécnicas de roca intacta para mina El Teniente en 4 litologías. 73
6. 2.	Promedio de vetillas en probeta para cada sector estudiado. 76

6. 3.	Tabla comparativa con los porcentajes para cada ruptura, entre lo obtenido por Barahona 2013 y en este estudio.	78
6. 4.	Valores de ángulo de fricción (Φ) cohesión (C) y resistencia para la compresión simple en vetillas.	109
7. 1.	Tabla comparativa de valores de resistencia CUS y número de vetillas promedio por sector.	117
7. 2.	Resistencia por tipo de ruptura en cada sector.	119
7. 3.	Valores de ángulos de ruptura y resistencias máximas y mínimas, para cada tipo de ruptura en probetas.	120



RESUMEN

El Stockwork de vetillas de mina El Teniente ha sido ampliamente estudiado, debido a que contiene cerca del 80% de la mineralización de cobre del yacimiento y además juega un rol fundamental en las propiedades geotécnicas del macizo rocoso primario. Estas vetillas son clasificadas de acuerdo a su ambiente de formación en Tardimágnica (TM), Hidrotermal Principal (HP) e Hidrotermal Tardía (HT), cada una caracterizada por distintos rellenos mineralógicos de diferente dureza entre los cuales destacan el cuarzo, anhidrita, biotita, turmalina, pirita y yeso, así como también menas metálicas de calcopirita, bornita y molibdenita, lo anterior le otorga un comportamiento anisotrópico al macizo rocoso, es decir que las propiedades geotécnicas dependen del tipo y cantidad de vetillas presentes. Para comprender el comportamiento mecánico de las vetillas, se realizan ensayos geotécnicos de compresión uniaxial y triaxial aplicados a probetas de roca provenientes del Complejo Mafico El Teniente (CMET), estos estudios son de suma importancia ya que permiten el escalamiento de las propiedades mecánicas obtenidas en probeta al macizo rocoso y obtener los parámetros necesarios que permitan una adecuada fragmentación del macizo y explotación de la mina mediante el método *panel caving*. Los ensayos demuestran que la resistencia a la compresión simple (CUS) disminuye a medida que aumenta el número de vetillas en probeta, desde los 250 MPa hasta 100 MPa, debido a la resistencia aplicada se producen rupturas, que ocurren entre los 20° y 48° en vetillas y 20°- 35° para la matriz, según las curvas de Jaeger para vetillas con inclinaciones fuera de este rango las resistencias son mayores y por lo tanto no fallan. El estudio del tipo de ruptura muestra que a menor cantidad de vetillas hay una mayor participación de la matriz en la ruptura (tipo B) y las resistencias son más elevadas, en tanto que, si la cantidad de vetillas es mayor, las resistencias son menores y hay una mayor participación de estas en las rupturas (tipo D y C), en donde la resistencia depende más de la dureza del relleno mineralógico. Previo a que ocurra la ruptura las probetas se deforman, esto se mide a través del Módulo de Young (E), los resultados obtenidos indican que si los rellenos son más duros (cuarzo) los valores de E son mayores, es decir muestran un comportamiento rígido, en tanto cuando son más blandos (anhidrita, yeso) los módulos son menores, por lo que su deformación es mayor antes de fallar. El número de vetillas también juegan un rol en este parámetro, ya que los valores del módulo de Young (E) disminuyen desde 4 o 5 vetillas en probeta, fluctuando entre los 110 y 60 GPa. Los ensayos triaxiales, permiten observar el comportamiento de las probetas en condiciones de confinamiento, en cual se obtiene la resistencia al corte (T), ángulo de fricción (Φ) y compresión simple de estas (σ_c). La participación de la matriz es menor en las rupturas de estos ensayos y la de las vetillas aumenta en condiciones confinadas, por lo que hay una mayor influencia de las estructuras presentes en la probeta (vetillas). Las envolventes de Mohr-Columb, muestran una mayor resistencia al corte a medida que aumenta la dureza de los rellenos mineralógicos, lo anterior se cumple para rupturas en la que participa la matriz (B) y por una sola vetilla (D), siendo menos notorio en el tipo C, debido a la participación de vetillas de diferente relleno. Se ha demostrado que las vetillas fallan al corte por sobre los 22 MPa con un ángulo de fricción de 35°, similar al valor de roca intacta con 29 MPa y una fricción de 39°, la compresión simple es de 125 MPa y 143 MPa respectivamente. La rugosidad o JRC, es un parámetro importante que nos indica que tan lisas o rugosas son las estructuras, relacionado a la geometría de las vetillas. De los análisis se infiere que las vetillas que tienen una mayor rugosidad muestran una resistencia al corte mayor según el criterio bilineal de Patton en rupturas tipo D1, este efecto se pierde cuando participa la matriz (B2). Al relacionar la resistencia a la compresión simple con JRC, las mayores rugosidades son para el cuarzo y menores para el yeso en rupturas tipo D1, este efecto es menos marcado en el tipo B2, sin embargo, a medida que se aumenta la compresión simple, estas estructuras se “alisan” por lo que el valor de JRC disminuye, independiente de la dureza de los rellenos mineralógicos, para ambos tipos de ruptura.

1. INTRODUCCION

El megayacimiento de tipo pórfido Cobre-Molibdeno El Teniente, considerado uno de los más grandes del mundo (Skewes *et al.*, 2002), se ubica en la Cordillera de Los Andes centrales, en la VI región del país y forma parte del arco magmático del Mioceno-Plioceno Temprano, en donde la intrusión sucesiva de cuerpos félsicos y sus procesos de alteración hidrotermal emplazados en rocas volcánicas del Mioceno correspondiente a la Formación Farellones, dieron lugar al yacimiento (Maksaev *et al.*, 2004).

Las reservas actuales estimadas son del orden de 12 billones de toneladas con una ley promedio de 0,65% de Cu y 0,017% de Mo. La mineralización metálica del yacimiento consiste en calcopirita, bornita y molibdenita, rellenado vetillas que forman un enrejado polidireccional o *stockwork*, las cuales son clasificadas en 3 categorías según su etapa de formación y 15 clases según su relleno mineralógico y halo de alteración. Estas estructuras están relacionadas con diferentes grados de alteración y también influyen en el comportamiento mecánico del macizo rocoso bajo diferentes grados de stress, así como también en los procesos de producción de mina El Teniente, por lo que las vetillas son consideradas fundamentales para comprender la mecánica de rocas del yacimiento.

El presente estudio considera datos y muestras de 4 sectores en producción de la mina; La Huifa, Recursos Norte, Esmeralda y Pacifico Superior (Figura 1.1) en donde la litología dominante corresponde al Complejo Mafico El Teniente (CMET), que es el cuerpo litológico de mayor extensión en el yacimiento y que alberga alrededor del 75 % de la mineralización de Cu. Un aspecto de gran importancia para la eficiente explotación de la mina, como se mencionó anteriormente, corresponde a la geotecnia que influye tanto en el proceso de fragmentación de la roca como en la estabilidad de las labores. El escalamiento de las propiedades del cuerpo rocoso constituye uno de los objetivos más importantes en este tema, debido a que actualmente los métodos utilizados en forma estándar para evaluar las propiedades geomecánicas solo son aplicables en macizos rocosos fracturados, con una cantidad de sistemas estructurales tal que se tiene un comportamiento isotrópico y con orientaciones tales que no influyen en la cinemática de las rupturas, lo que no se

cumple en el caso del macizo rocoso primario de Mina El Teniente (Karzulovic, 1997). Las unidades litológicas; Complejo Mafico El Teniente, Diorita y Pórfido

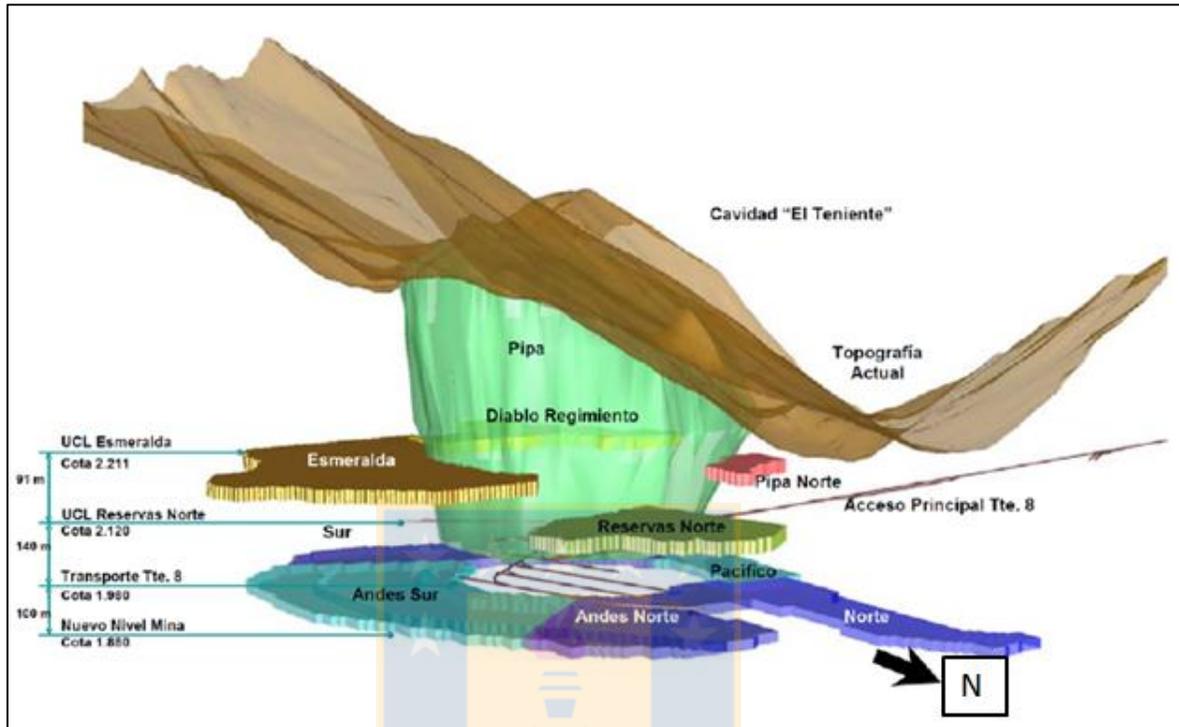


Figura 1.1: Esquema con los niveles de producción actual de mina El Teniente. (Tomado de Harrison, 2009).

Dacítico muestran un stockwork polidireccional con distintos tipos de vetillas selladas con diferentes espesores y rellenos mineralógicos, que le otorga un comportamiento anisótropo al macizo rocoso, es decir, que las propiedades geotécnicas dependen de las orientaciones y resistencia mecánica de los distintos tipos vetillas que interceptan el cuerpo rocoso. Este estudio, tiene como objetivo general establecer una correlación entre la intensidad de vetillas contenidas en las probetas (y sus características geométricas) con los resultados de ensayos de laboratorio con la finalidad de ser un aporte a la caracterización del macizo rocoso de Mina El Teniente y que permita generar un modelo geotécnico para poder estimar el comportamiento ante diferentes estados de stress.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Comprender el rol de las vetillas y su influencia en el comportamiento geotécnico de la roca huésped Complejo Mafico El Teniente (CMET) en la mineralización de mina El Teniente.

1.1.2. Objetivos específicos

Establecer una correlación entre la intensidad de las vetillas contenidas en las probetas y sus características geométricas con los resultados de ensayos geotécnicos de las mismas.

Relacionar la cantidad y tipo de vetillas con las propiedades geotécnicas de la roca huésped Complejo Mafico El Teniente (CMET).

Observar la respuesta de las probetas a ensayos de compresión uniaxial y de deformación, incluyendo también ensayos de compresión confinada (triaxial).

Encontrar relaciones entre los parámetros geométricos de las vetillas y su relleno mineralógico con los resultados de ensayos de deformación y resistencia.

Comprender la influencia de las vetillas en los diferentes parámetros geotécnicos de mina El Teniente.

1.2. Ubicación y accesos

El pórfido cuprífero El Teniente se ubica en la VI Región del General Libertado Bernardo O'Higgins en la Provincia del Cachapoal cuyas coordenadas UTM son 6.230.064 – 6.220.582 N y 373.651 – 377.597 E.

Este yacimiento se encuentra a 37 km hacia el NE de la ciudad de Rancagua (Figura 1.2.), emplazado en la parte central de la Cordillera de los Andes a una altitud que varía entre los 2.000 y 3.200 m s.n.m. Para acceder al yacimiento se debe tomar la carretera El Cobre desde la ciudad

de Rancagua siguiendo la ruta H-29 y H-25, la cual conecta esta ciudad con la localidad de Colon Alto en el kilómetro 46 ubicado a una altitud de 1.983 m s.n.m. (Fotografía 1.1). Para acceder a la fundición Caletones se debe tomar un desvío hacia el SE desde la carretera El Cobre hacia la fundición y a 3 km al W se ubica el campamento minero de Sewell, a partir de allí existe un túnel que conecta el campamento con el nivel TEN-5 (2.284 m s.n.m.) y varios caminos asfaltados que llegan a otros niveles de la mina.

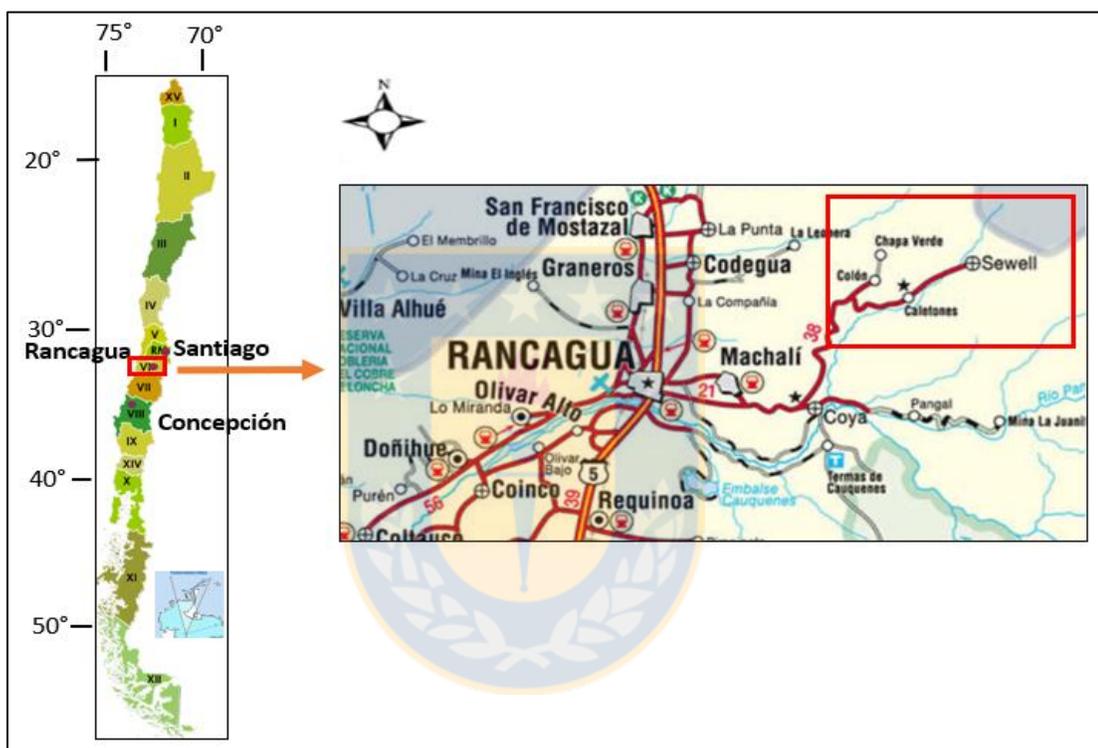


Figura 1.2: Ubicación geográfica de mina El Teniente y vías de acceso en la VI Región de O'Higgins. (Modificado de Padilla, 1994).



Fotografía 1.1: Vista desde la carretera Eduardo Frei Montalva hacia el NE, indicando donde se ubica el sector de Colon en el cual están las oficinas e instalaciones que procesan el mineral y Caletones donde se sitúa la planta de Fundición del Cobre. (Tomada de Cannell, 2004).

1.3. Metodología de trabajo

1.3.1. Etapa pre- terreno

Comprendió una visita a las instalaciones de mina El Teniente ubicadas en la avenida Millán 1020 en la ciudad de Rancagua, que albergan las oficinas de logística y la Superintendencia de Geología además se ubican las bodegas donde se almacenan parte de los sondajes de los diferentes proyectos del yacimiento. Durante esta etapa también se participó y desarrolló un curso de inducción en salud y seguridad minera de carácter obligatorio, como también uno de minería subterránea con la finalidad de conocer los accesos y reglamentos internos del yacimiento.

1.3.2. Etapa de terreno

Se realizaron visitas a la mina y las oficinas ubicadas en Colon Alto con la finalidad de conocer las instalaciones y funcionamiento de la mina así como también un reconocimiento de los accesos principales de esta. También la adquisición de los implementos de seguridad; bototos, chaqueta mapera, gafas de seguridad y guantes, además de lupa, rallador y *geoflex*. Implementos que fueron exigidos y utilizados para el mapeo de las probetas.

1.3.3. Etapa de gabinete

Para efectos de organización esta fue dividida en dos etapas:

1.3.3.1. Etapa de gabinete 1

Contempló la revisión de material bibliográfico y antecedentes de mina El Teniente como memorias de título de años anteriores, publicaciones científicas e informes de trabajo de la mina además se estudió los Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas de El Teniente (2003). En esta etapa se elaboró una carta *Gant* con la finalidad de organizar las diferentes actividades realizadas durante 6 meses además de solicitar los permisos respectivos para acceder a la plataforma corporativa.

1.3.3.2. Etapa de gabinete 2

Durante esta fase se procedido a la descripción y análisis de probetas de roca, además de revisar la base de datos de ensayos geotécnicos en del año 2015 - 2016 y los informes de actualización de los antecedentes geológicos – geotécnicos de la mina. Las probetas de roca estudiadas provienen de 4 sectores de mina El Teniente que corresponden a:

- La Huifa
- Pacifico Superior
- Recursos Norte
- Esmeralda

Los sectores corresponden a niveles actuales de producción de mina El Teniente (Figura 1.3). La Huifa y Esmeralda están ubicados hacia el SW de la mina, en tanto Recursos Norte y Pacifico Superior en el sector NW.

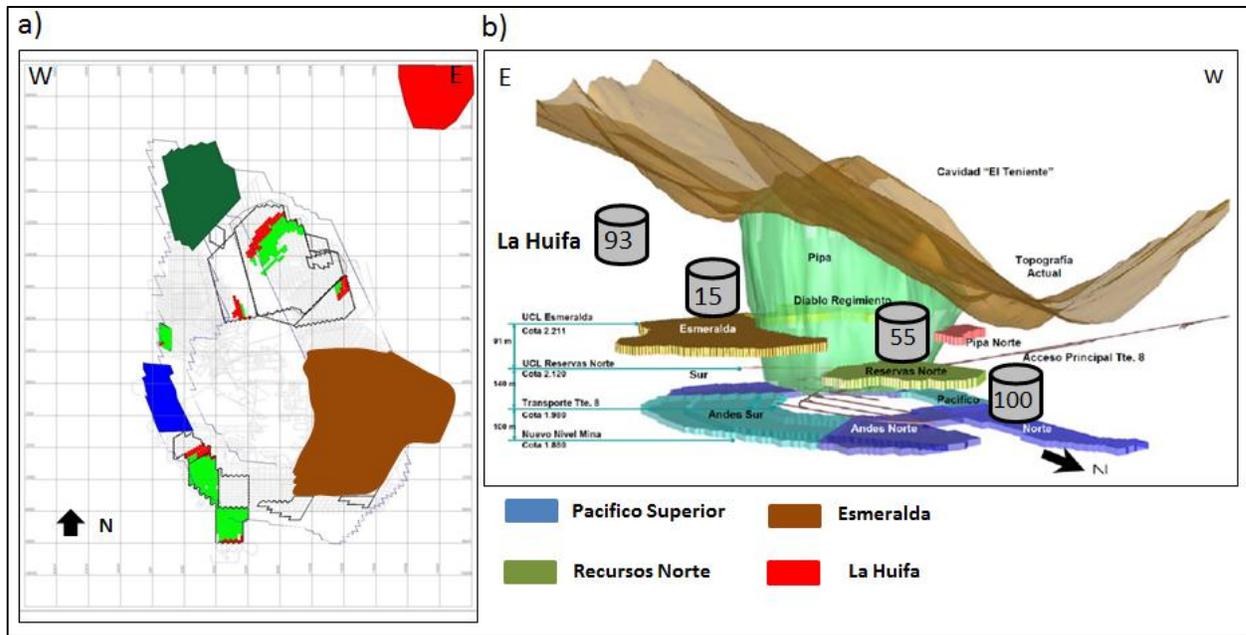


Figura 1.3: Sectores productivos estudiados y número de probetas por sector. a) vista en planta de los sectores. b) esquema 3D con la cantidad de probetas por cada sector.

Primeramente, se procedió a la descripción de probetas en ensayos de compresión simple y luego en condiciones confinadas (triaxial), considerando aspectos como relleno mineralógico de las vetillas, ángulo, rugosidad etc. que se detallan en los capítulos siguientes, el número de probetas estudiadas de los distintos sectores se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Numero de probetas ensayadas por sector en producción.

Tipo Ensayo	Pacífico Superior	Recursos Norte	Esmeralda	La Huifa
Compresión uniaxial y deformación	28	29	9	31
Compresión triaxial	72	26	6	62

También fueron considerados los registros de valores de resistencia a la compresión simple (UCS) y de deformación (E) del año 2006 para el sector Esmeralda, 2016 para sector La Huifa y 2016 para el sector Recursos Norte. Los resultados de los diferentes tipos de ensayos fueron proporcionados por la empresa SGS mecánica de rocas, mediante reportes de cada probeta ensayada (Figura 1.4), la cual se rige por estándares internacionales que se detallan en los capítulos posteriores.

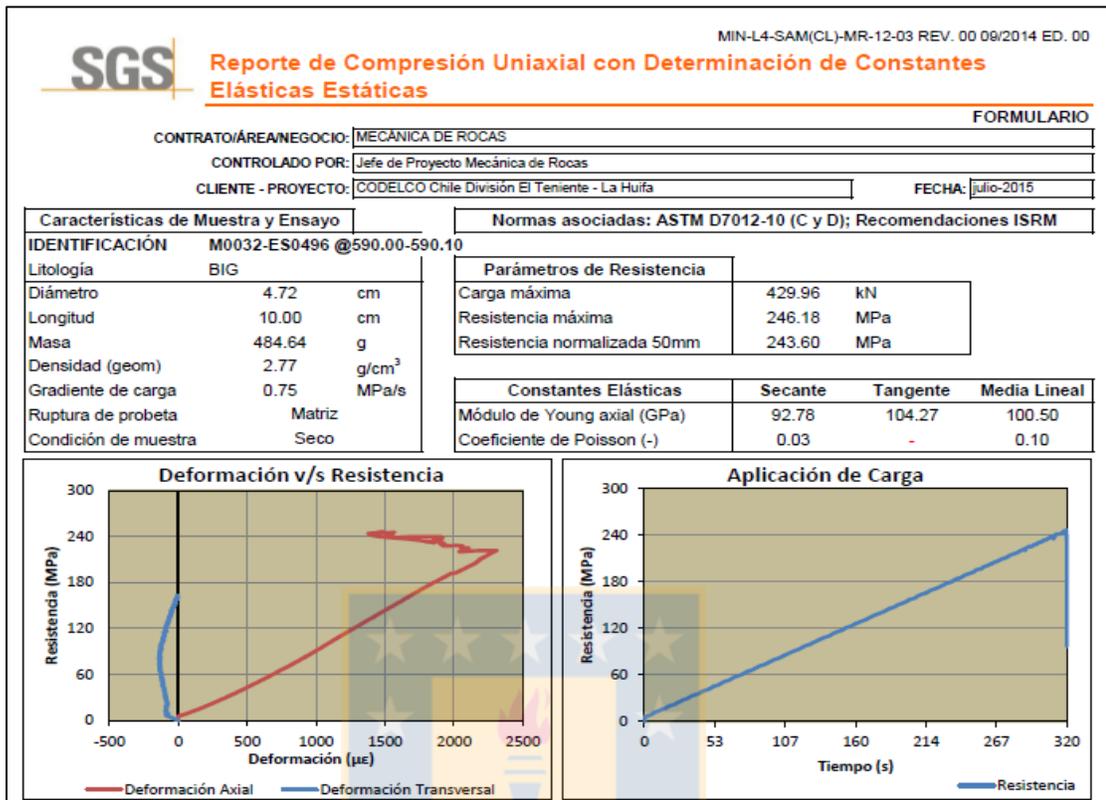


Figura 1.4: Reporte proporcionado por la empresa SGS mecánica de rocas para una probeta con la determinación de las constantes Elásticas- Estáticas. Se muestra además el comportamiento de la probeta durante el ensayo. (Tomado del informe de resultados a ensayos geotécnicos para el proyecto La Huifa Codelco División El Teniente).

1.3.3.3. Etapa post-gabinete

En este periodo se hizo una recopilación y tabulación de los datos tomados en la descripción de las probetas utilizando el software Microsoft EXCEL 2010 (Tabla 1.2), posterior a esto se elaboraron esquemas de las probetas antes y después de ser sometidos a los diferentes ensayos geotécnicos. Una vez realizada esta tarea, se confeccionaron gráficos que permitieron observar y establecer relaciones entre las características de las vetillas (Numero por probeta, ángulo inclinación, rugosidad, espesor etc.) versus los resultados de ensayos de laboratorio.

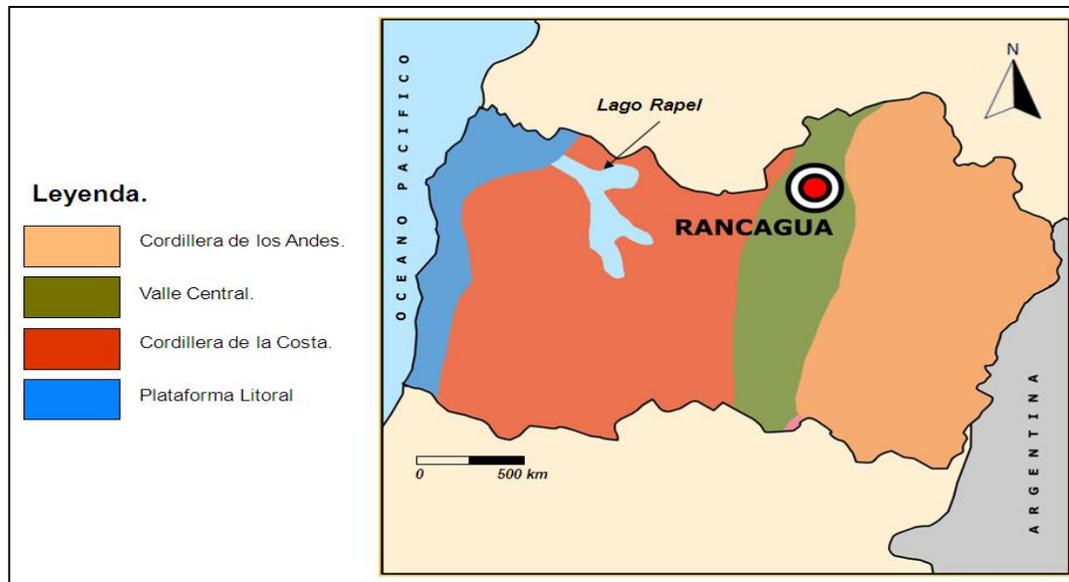


Figura 1.5: Mapa con las unidades morfoestructurales principales de la VI Región (Atlas de la República de Chile, IGM 1982).

1.4.2. Valle Central

Corresponde a una depresión tectónica ubicada paralelamente a la Cordillera de los Andes. El valle está relleno con material proveniente de la Precordillera y Cordillera de los Andes, dando origen a depósitos cuaternarios. En Pelequen morfológicamente es una fosa tectónica de 500 m de altitud promedio, producida por el basculamiento de la zona comprendida entre la Cordillera de la Costa y de los Andes. Su vegetación está formada por boldos, peumos, arrayanes, canelos y maquis. Sin embargo en las planicies abiertas predominan los espinos y algarrobos (Fuenzalida, 1967).

1.4.3. Cordillera de la Costa

La Cordillera de la Costa se sitúa próxima al mar, hacia el W de las unidades anteriores presenta un ancho variable de unos 40 a 60 km, con altitudes que llegan a los 2.000 m s.n.m. frente a Santiago y Rancagua. Una característica importante es su alto grado de meteorización y una disminución de altura desde la región de Valparaíso hasta el S del Lago Rapel, donde se deprime bruscamente mostrando un aspecto con suaves ondulaciones con características más de colina que a una montaña. Sus flancos muestran evidentes escarpes de falla cuyo desplazamiento de bloques alcanzan 100 m o más en la vertical.

1.4.4. Planicie Litoral

Consiste en una plataforma de 110 km de largo por 18 a 4 km de ancho que baja desde los 140 m de altitud desde la Cordillera de la Costa, hasta los 80 m en el borde del acantilado costero (Valenzuela, 1990). Se formó por procesos de erosión marina y posteriormente cubierta con sedimentos marinos del Mioceno Medio a Superior. Hacia el interior, en el borde del acantilado costero se acumulan sedimentos de derrubio y abanicos de pie de monte que sobreyacen al relleno fluvio-glacial proveniente de la depresión intermedia.

El clima de la región es de tipo templado a cálido con lluvia invernal y estación seca prolongada. Las temperaturas mínimas llegan a los -6°C y en verano alcanza, en promedio máximas de 28°C . Durante los meses de Mayo y Septiembre se registran las mayores precipitaciones en el Valle Longitudinal y nevazones en la Cordillera Principal (Fuenzalida, 1967). El “clima de hielo por efecto de la altura”, está condicionado por el desarrollo de las nieves eternas. En el caso de El Teniente existen nieves eternas solo sobre los 3.000 m s.n.m. (Olla Blanca) y extensiones muy reducidas (menos de 1 km^2).

1.5. Trabajos años anteriores

El concepto de que las vetillas influyen en el comportamiento del macizo rocoso surge en la década de los 90, en donde se realizaron los primeros trabajos fueron realizados por (Zuñiga, 1979) que predice el tamaño de las colpas durante la fragmentación de la mena primaria, afirmando que el 78% de las caras de los fragmentos de roca eran originadas por estructuras previas como fallas, vetillas o diaclasas. Posteriormente Pereira en 1995 indica que los rellenos mineralógicos más frecuentes son yeso y sulfuros con una menor incidencia del cuarzo en el proceso de fragmentación, propone que las rugosidades de estas discontinuidades son en su mayoría lisas o rugosas. Los primeros ensayos geotécnicos en probetas fueron sometidos por Marambio en 1999, en los cuales observaron que el 80% de las muestras presentan algún tipo de ruptura en la que hay participación de vetillas del *stockwork*, a su vez (Rodrigo, 1999) describe probetas de roca del sector Teniente 4

Regimiento sometidas a ensayos de compresión uniaxial y triaxial estableciendo que la composición mineralógica de las vetillas es en su mayoría anhidrita, cuarzo, calcopirita y turmalina, considerándolo un factor importante en la ruptura de las probetas. A partir del año 2000 comienzan a aparecer estudios más profundos sobre el comportamiento geotécnico de las vetillas, (Brzovic, 2000) establece una escala de resistencia de las vetillas basada índice de dureza de los minerales, en el cual establece que el 61% de las muestras observadas la ruptura se produce por completo a través del relleno mineralógico, independiente del ambiente geológico, a se vez junto con (Quezada, 2001) considerando la frecuencia de cada tipo de vetillas en las unidades litológicas del yacimiento, estiman la resistencia relativa de cada tipo de vetilla (Figura 1.6).

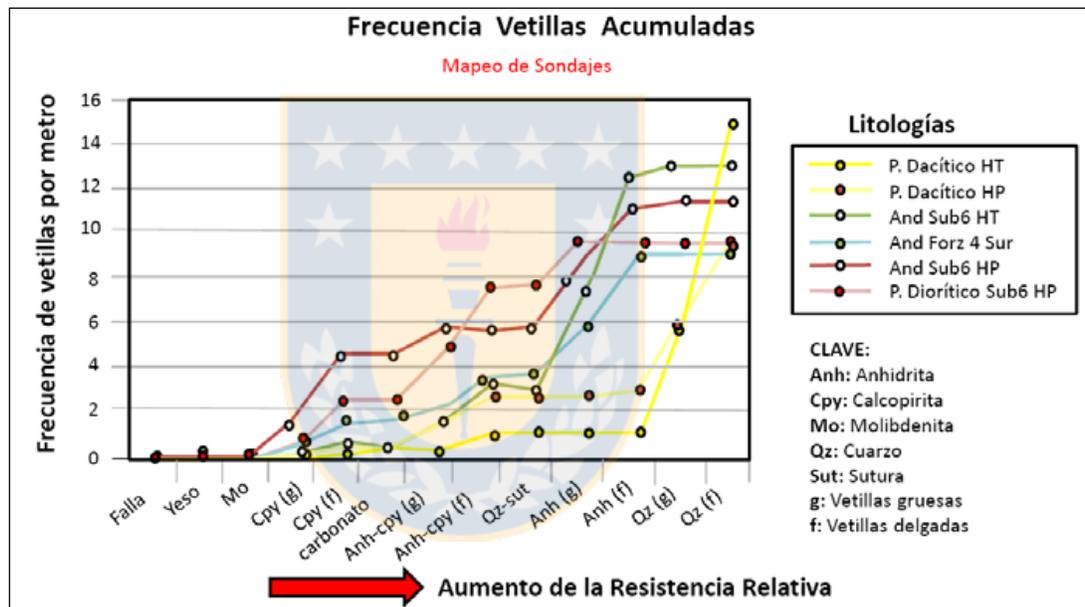


Figura 1.6: Frecuencia de vetillas en mapeos de sondajes para distintas litologías (Tomado de Brzovic y Quezada, 2000).

(Brzovic, 2001) Analiza el sistema de clasificación geotécnica del macizo rocoso primario de mina El Teniente. En el estudio aborda las propiedades de resistencia de las estructuras y propone una escala de resistencia relativa de las vetillas sellada basada en el índice de dureza en la escala de Mohs de los minerales que constituyen el relleno de la vetilla. Introduce el concepto de vetillas blandas, que corresponde a vetillas gruesas (espesor mayor a 2 mm), en que las proporciones de minerales duros es inferior al tercio del total de constituyentes de la vetilla, entendiéndose como mineral duro aquellos en que en la escala de Mohs (H) es mayor a 4.

A partir del año 2004 se consideran ensayos geotécnicos para evaluar la resistencia al corte de las vetillas, en donde (Padilla, 2004) evalúa la resistencia a la tracción de las vetillas que forman *stockwork* mediante ensayos geotécnicos de carga diametral y determinó las características geológicas que determinan la resistencia a la tracción de las vetillas. (Gavia, 2005) En base a una recopilación de ensayos geotécnicos triaxiales y de Celda Mirve4 realizados en la mina, determina la resistencia al corte de una serie de vetillas presentes en El Teniente. Desestimando en sus resultados el efecto geométrico de estas estructuras como el espesor, rugosidad y hábito cristalino. De sus resultados se desprende que los valores de cohesión son distintos según el tipo de ensayos, pero los valores de ángulo de fricción similares (Tabla 1.2).

Tabla 1.2: Resultados ensayos geotécnicos de compresión triaxial y celda Mirve (Tomado de Gavia 2005)

Vetilla			Tipo de ensayo	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción (°)
Tipo	Subtipo	Relleno			
TM	V5	Cuarzo	Mirve	8	39
			Triaxial	34	41
	V6	Anhidrita	Mirve	8	42
			Triaxial	39	42
	V7	Sulfuros	Mirve	9	-
			Triaxial	25	45
HP	V10	Calcopirita y/o pirita	Mirve	11	-
	V12	Calcopirita y/o pirita	Triaxial	27	44
	V13	Sulfuros	Triaxial	41	42
HT	V14	Carbonatos	Mirve	8	-
			Triaxial	47	14
	V15	Turmalina	Mirve	12	37

Brzovic & Villaescusa (2007) ahondan a un más en el concepto de vetillas blandas, ya que, caracterizan estas estructuras que participan en el desarme del macizo rocoso producto de la explotación minera, y estiman las vetillas por donde debería falla el macizo rocoso masivo y competente. Finalmente, (De Los Santos, 2011) en su memoria de título, Establece que a menor espesor de las vetillas, menor sería su resistencia y que vetillas con menos de un 40% de minerales duros ($H > 4$) resultan falladas en ensayos de compresión y corte directo.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. Marco geológico regional

El yacimiento El Teniente está ubicado en los Andes Centrales, comprendida entre los 33°45'-34°45' latitud S y los 70°00'-71°00' longitud W (Figura 2.1), donde mayoritariamente afloran potentes secuencias estratificadas de rocas volcánicas intercaladas con secuencias sedimentarias (marinas y continentales) depositadas desde el Triásico Superior. Estas unidades han sido intruidas por cuerpos hipabisales y plutónicos Cenozoicos que en conjunto forman parte del Ciclo Orogénico Andino (Klöhn, 1960).

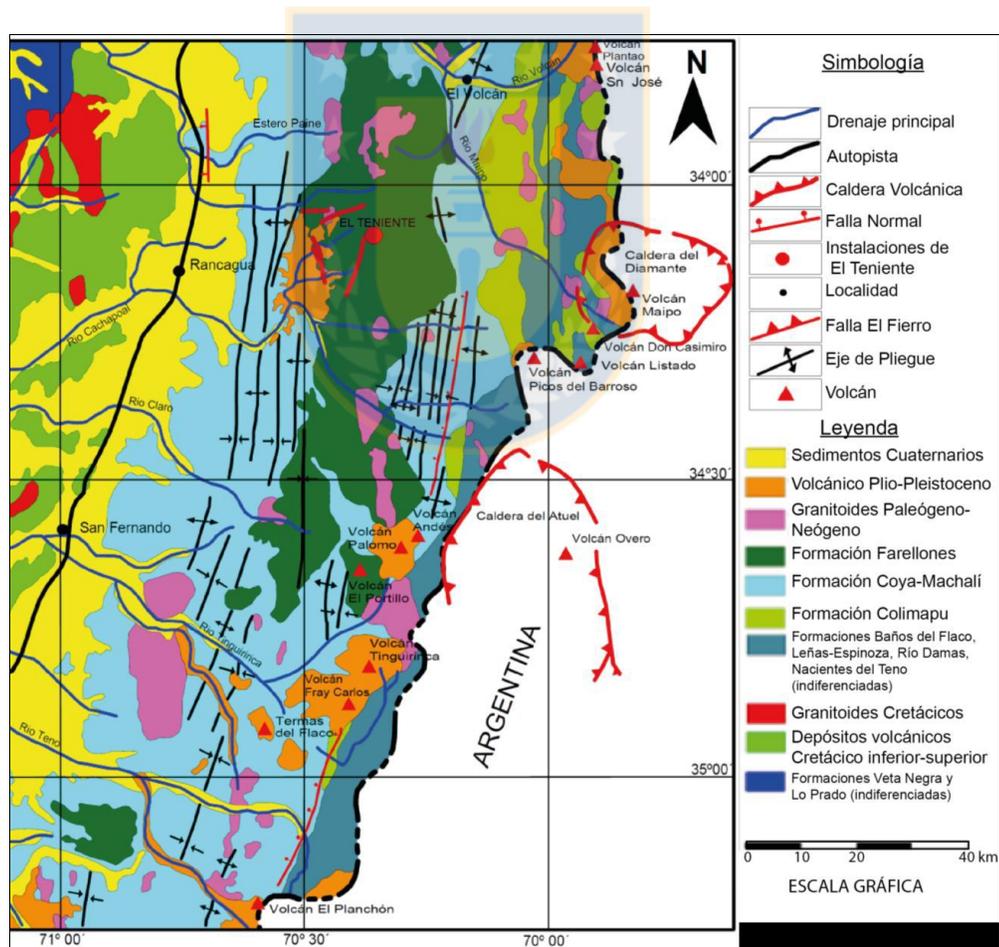


Figura 2.1: Mapa geológico regional de la franja cordillerana de Chile Central. (Imagen modificada de Charrier *et al*, 1996).

2.1.1. Rocas Estratificadas

Formación Nacientes del Teno: (*Bajociano-Kimmeridgiano inferior*). Unidad estratigráfica más antigua. Posee poca manifestación en el sector donde está ubicado el yacimiento y corresponde a pequeños depósitos sedimentarios clásticos depositados durante un ciclo marino. Esta formación consta de un miembro evaporítico de 500 a 600 m de potencia. Subyace concordantemente con la Formación Río Damas.

Formación Río Damas: (*Kimmeridgiano superior-Titoniano inferior*). Se reconoce en la parte oriental de la región. Está compuesta por potentes depósitos sedimentarios y volcánicos, depositados en un ambiente continental alcanzando una potencia de 1.000 m. Forma una franja de 3 km de ancho en promedio con un sentido NS. La Formación Río Damas sobreyace a la Formación Nacientes del Teno y subyace a la Formación Baños del Flaco de forma concordante y a su vez se encuentra en contacto por falla con la Formación Leñas Espinoza (Charrier, 1973).

Formación Leñas-Espinoza: (*Kimmeridgiano superior*). Contemporánea y en contacto por falla con la Formación Río Damas. Sus depósitos consisten en brechas y arenitas piroclásticas con material epiclástico subordinado e intercalaciones pelíticas que presentan frecuentes laminaciones de piroclastos. Su límite inferior es desconocido, hacia el techo presenta una transición gradual a la Formación Baños del Flaco y una discordancia con la Formación Coya-Machalí.

Formación Baños del Flaco: (*Titoniana-Neocomiana*). Klöhn (1960), secuencia de 1.000 m de rocas sedimentarias marinas con intercalaciones detríticas y volcánicas que corresponden al segundo ciclo de transgresión-regresión que cubrió parte de la Cordillera Principal. Se reconoce en el sector E de la región y con espesor promedio de 1 km. Infrayace concordantemente y con paso gradual sobre las Formaciones Río Damas y Leñas-Espinoza que yace concordantemente sobre la Formación Colimapu. En algunas áreas, su límite superior se encuentra erosionado y se presenta cubierto de manera discordante por la Formación Coya- Machalí.

Formación Colimapu: (*Barremiano-Albiano*). Conjunto de rocas estratificadas continentales que se compone de un miembro inferior sedimentario de 1500 m de areniscas finas y calizas micríticas y un miembro superior volcánico, compuesto de toba lítico-cristalinas, rocas de lapilli e ignimbritas

de 1.600 m de potencia. Esta formación sobreyace a la Formación Baños del Flaco de manera concordante y en el techo presenta una discordancia erosiva con la Formación Coya-Machalí. Su origen se remonta al segundo ciclo sedimentario continental, durante el Barremiano-Albiano (Charrier, 1973).

Formación Coya-Machalí: (*Eoceno Superior-Mioceno Inferior*). Rocas volcánicas continentales de potencia aproximada de 3.200 m, efusivas y piroclásticas, con algunas intercalaciones de sedimentos lacustres. Esta unidad se distribuye en dos franjas una Oriental y la otra Occidental, de un ancho promedio de 13 y 20 km respectivamente, las cuales se encuentran separadas por la Formación Farellones (Charrier *et al.*, 1994). La franja Occidental está compuesta por rocas continentales principalmente volcánicas de unos 1.900 m de espesor, correspondientes a lavas afaníticas y la Oriental está formada por rocas piroclásticas con importantes intercalaciones de sedimentitas finas cuyo espesor alcanza los 1.300 m de potencia. Las características bio y cronoestratigráficas de la Formación Coya-Machalí apuntan que los depósitos de la franja Oriental tienen una edad Eoceno-Mioceno inferior, mientras que el límite inferior de los estratos de la franja Occidental no se reconoce en la región. Aparentemente ambas franjas subyacen en discordancia angular a la Formación Farellones.

Formación Farellones: (*Mioceno Superior*). Consiste en aproximadamente 2.400 m de lavas intermedias a ácidas y rocas piroclásticas intercaladas con areniscas, lutitas, tufitas y capas finas de caliza. Se encuentra levemente plegada a subhorizontal (Charrier, 1983) y sobreyace en discordancia angular a la Formación Coya-Machalí, que la limita hacia el E y W. La Formación Farellones se reconoce por afloramientos en franja de unos 24 km de ancho de orientación NS que separa a las dos franjas de la Formación Coya-Machali. Dataciones radiométricas revelaron edades K-Ar de 8,3-9,2 y 14,1 Ma para esta formación (Charrier & Munizaga, 1979).

Formación Colon-Coya: (*Plioceno-Pleistoceno*). Son depósitos de unos 150 m de potencia que consisten en lahares de granulometría heterogénea y matriz arcillosa, intercalados localmente por niveles de ceniza, coladas andesíticas y lavas fluviales. Su contacto basal corresponde a una disconformidad con las Formaciones Coya-Machalí y Farellones, su techo corresponde a la

superficie de erosión actual. Su edad según dataciones radiométricas K/Ar en lavas, indican una edad Plioceno-Pleistoceno (Charrier & Munizaga, 1979).

Depósitos no consolidados: (*Plioceno-Pleistoceno*). Consisten en depósitos aluviales, fluviales, lacustres y glaciofluviales (Charrier, 1983). Estos depósitos rellenan los valles y están relacionados a los ríos Cachapoal, Maipo, Teno y Blanco.

2.1.2. Rocas Intrusivas

Los intrusivos presentes en el sector central de la Cordillera de los Andes, en donde se encuentra emplazado el yacimiento El Teniente, son agrupados en al menos 5 franjas de complejos ígneos del Paleógeno-Neógeno (Oligoceno Superior al Mioceno Superior), con edades que varían entre los 34,3 y 5,59 Ma (Falcón & Rivera, 1998). Estos cuerpos corresponden a intrusivos de carácter plutónico e hipabisal, en donde las litologías más comunes son granodioritas de hornblenda y biotita, pórfidos dioríticos y andesíticos, monzonitas, monzodioritas y pórfidos dacíticos. Estos cuerpos cortan a las rocas de las Formaciones Coya-Machalí y Farellones (Skewes *et al.*, 2002). De acuerdo con las dataciones de los plutones existentes estos se clasifican en:

- **Complejo Plutónico Antiguo (Mioceno Inferior):** Datado en $21,6 \pm 4,9$ y $16,2 \pm 1,2$ Ma.
- **Complejo Plutónico Teniente (Mioceno Medio - Mioceno Superior):** Con una primera sub-unidad de edad $12,4 \pm 2,5$ Ma y $11,3 \pm 0,3$ Ma y una segunda de $8,8 \pm 0,1$ y $7,7 \pm 0,1$ Ma.
- **Complejo Plutónico Joven (Mioceno Superior):** Datado en $6,6 \pm 0,1$ Ma y $5,5 \pm 0,2$ Ma.

Los Cuerpos reconocidos en la región corresponden principalmente a stocks, apófisis, diques y filones compuestos de rocas de textura fanerítica, entre los que destacan granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas. En general se trata de cuerpos relativamente pequeños y asilados, estos se distribuyen según una alineación de dirección aproximada NS, y como se mencionó anteriormente cortan a las Formaciones Coya-Machali y Farellones (Charrier, 1981).

(Rivera & Cembrano, 2000). La Formación Coya-Machali es afectada por fallas inversas y fallas normales con desplazamientos verticales, asociadas a la tectónica de bloques Plio-Cuaternaria resultante del alzamiento andino (Charrier, 1981). También pueden mencionarse las fallas descritas por (Charrier, 1981) quien identifica fallas inversas en la franja oriental de la Formación Coya-Machalí, las que se verían favorecidas por la presencia de intercalaciones de roca incompetente y por la presencia de fallas normales con desplazamientos verticales, asociadas a la tectónica de bloques Plio-Cuaternaria resultante del alzamiento andino.

Pliegues: La deformación dúctil está caracterizada por pliegues anticlinales y sinclinales (Klöhn, 1960). Los flancos presentan una inclinación de unos 30° , afectando a rocas de la Formación Farellones y cuyos ejes se orientan con rumbo N-S, manteniendo levemente el S. Su continuidad longitudinal sólo se extiende entre los segmentos acotados por sistemas de fallas con orientación $N30^\circ W$ (Rivera & Falcón, 2000). En el área en el que se encuentra emplazado el yacimiento El Teniente se manifiesta un estilo de plegamiento suave, representado por anticlinales y sinclinales con flancos cuyas inclinaciones no superan los 30° (en promedio $10^\circ - 15^\circ$) con ejes de rumbo NNW-SSE a N-S, un buzamiento leve hacia el S y planos de vergencia suave hacia el E (Gómez, 2001) afectando principalmente a rocas de la Formación Farellones.

Discordancias: Tres fases compresivas son reconocidas en la región, que se manifiestan a través de tres discordancias orogénicas de plegamiento y de erosión (Klöhn, 1960). Una fase compresiva del Cretácico Superior pondría en discordancia las unidades de la Formación Farellones con las rocas volcánicas terciarias y cuaternarias. La segunda fase compresiva sería la responsable de la depositación de la Formación Coya-Machalí, que se encuentra en discordancia sobre la Formación Colimapu. La edad de esta fase no es clara, pues algunos autores la asignan al Oligoceno Inferior y otros al Mioceno Inferior (Charrier *et al.*, 1996). Finalmente, en el Mioceno-Plioceno tomó lugar una fase compresiva que generó un suave plegamiento de la Formación Farellones, depositándose en discordancia angular la Formación Colón-Coya.

2.1.4. Evolución Tectónica

Los Andes Centrales se caracterizan por marcar el límite entre dos segmentos, específicamente a la latitud 33°S. Al N de los 33°S se ubica la zona con ausencia de volcanismo activo o “flat-slab” y al S la zona volcánica activa de los Andes del S (ZVS: 33°-46°S). Cabe destacar que 3 de los pórfidos cupríferos clasificados como *world class*, incluido El Teniente se ubican en el extremo N de la ZVS (Figura 2.3).

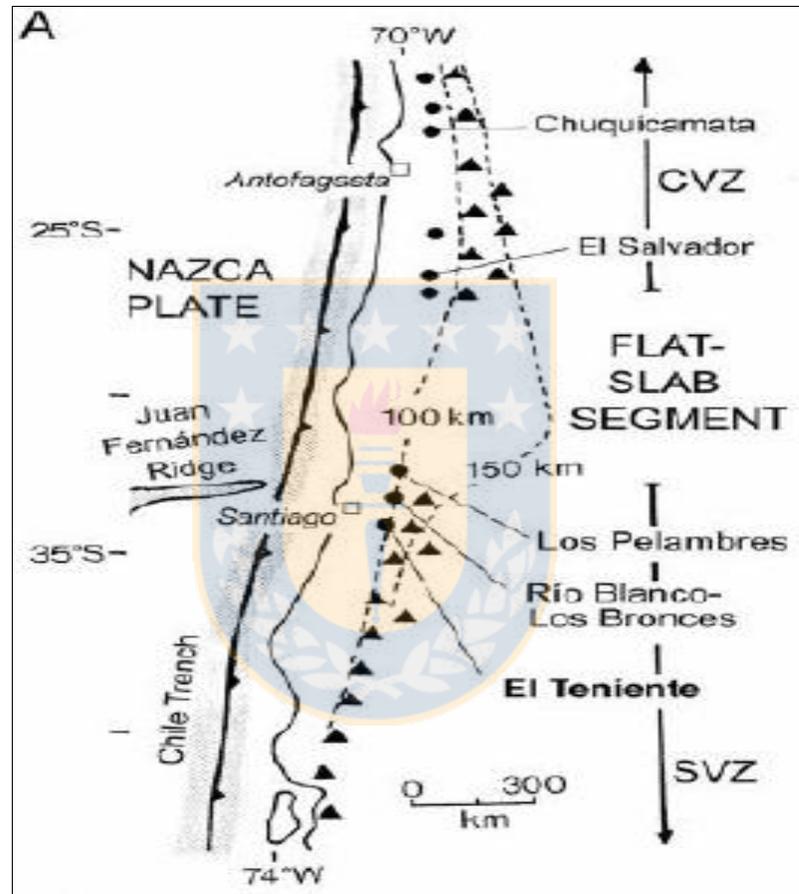


Figura 2.3: Ubicación del segmento Zona Volcánica Central (CVZ). Zona de *flat slab* y la porción norte de la Zona Volcánica Sur (SVZ). (Stern *et al.*, 2011).

Dentro de la evolución de Los Andes se destacan dos grandes ciclos orogénicos, el ciclo Pre-Andino (fin del Paleozoico, 230 Ma) y el ciclo Andino (Meso-Cenozoico). El ciclo Andino se divide en cinco intervalos principales, que representan condiciones tectónicas y paleogeográficas diferentes (Charrier *et al.*, 1996).

Triásico Superior-Jurásico Inferior: (205 a 100 Ma). Periodo en el cual se desarrolla un sistema de grabens de orientación NNW.

Jurásico Inferior – Jurásico: (180 a 135 Ma). Se forma el arco volcánico en el lugar donde actualmente se encuentra la Cordillera de la Costa, parte de la Cordillera Principal y una cuenca de trasarco al E de ella.

Jurásico Superior-Cretácico Inferior: (135 a 95 Ma). Está marcado por la aparición de una cuenca de intra-arco en la actual Cordillera de la Costa y la parte occidental de la cordillera principal, ocurre a su vez la formación de una cuenca de tras-arco hacia el E.

Cretácico Superior-Terciario Inferior: (95 a 24 Ma). Se desarrollan depósitos sedimentarios continentales y marinos, seguidos de un episodio de fuerte erosión.

Neógeno-Presente: (a partir de los 24 Ma). Predominan los dominios volcánicos y plutónicos en diferentes condiciones paleogeográficas.

En el Mioceno inferior, la corteza continental era delgada con un espesor menor a los 45 km y se encontraba en una zona de subducción con una inclinación de unos 25°. A partir del Mioceno medio – Plioceno temprano, disminuye el ángulo de subducción rápidamente provocando deformación, engrosamiento y alzamiento de la corteza continental al N de los 33°S, en tanto al S de los 33°S la disminución fue lenta y menos extendida.

Los yacimientos tipo pórfido cuprífero El Teniente, Rio Blanco-Los Bronces y Los Pelambres se consideran entre los más importantes del país y están ubicados en la zona central, en el límite del segmento de *flat slab* y la Zona Volcánica Sur (ZVS) (Figura 2.4). La génesis de estos depósitos estaría asociado al engrosamiento cortical y solevantamiento provocado por la progresiva disminución del ángulo de subducción de la Placa de Nazca, entre el Mioceno y el Reciente (Figura 2.4). El rápido alzamiento y la exhumación de los sistemas plutónicos emplazados en profundidad generaron la exsolución de fluidos magmáticos ricos en cobre, que serían los responsables de la mineralización del tipo pórfido cuprífero en la región.

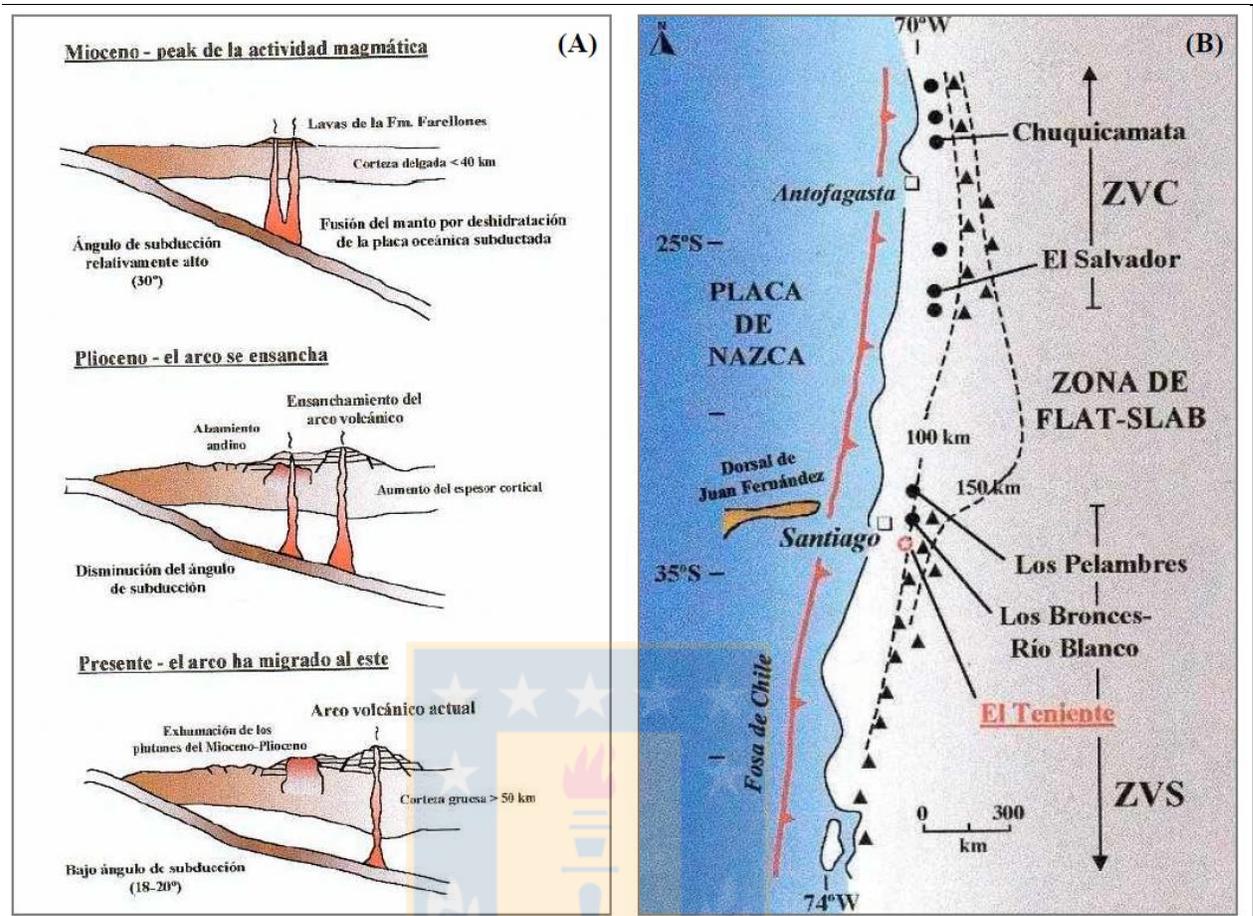


Figura 2.4: Marco geotectónico. En a) perfiles transversales magmato-tectónica de los Andes Centrales a los 34° S entre el Mioceno al presente. En b) ubicación de la Zona Volcánica Central (ZVC). Los triángulos representan el actual frente volcánico y los círculos los tres yacimientos denominados como “gigantes” del Mio-Plioceno. (Tomado y modificado de Stern y Skewes, 1997).

2.2. Geología distrital

En el área donde se ubica el yacimiento El Teniente, las rocas más antiguas corresponden a las de la Formación Coya-Machalí (Oligoceno-Mioceno) sobre las cuales se disponen extensas secuencias de rocas volcánicas, volcano-sedimentarias y piroclásticas asignadas a la Formación Farellones estas son intruidas por rocas del Complejo Mafico El Teniente (CMET) y posteriormente por cuerpos félsicos (Ossandon, 1974; Camus, 1975; Skewes, 2000). Se reconocen cuerpos de brecha magmático-hidrotermales en los contactos de los cuerpos félsicos con las rocas maficas. El Complejo de Brecha Braden, forma una pipa, intruyendo a las unidades anteriores

(Camus, 1975). Finalmente, las unidades anteriores son cortadas por diques de lamprofido y marcan el fin de los eventos de mineralización (Cuadra, 1986; Skewes & otros, 2002).

2.2.1. Rocas estratificadas

Las rocas estratificadas que afloran en la zona pertenecen a la Formación Farellones de edad Mioceno superior (Charrier & Munizaga, 1979). Esta presenta 3 miembros con características distintivas (Howell & Molloy, 1960):

Miembro inferior: Es el que aloja la mayor parte de la mineralización, se reconoce en las laderas de las quebradas Coya y Teniente. Litológicamente está formada por flujos de carácter volcánico andesítico macizos, de color gris oscuro y textura porfídica con intercalaciones de capas brechosas y estratos andesíticos vesiculares. Su potencia es de aproximadamente 2.200 m. El límite inferior no ha sido reconocido en la zona.

Miembro medio: Aflora hacia la cabecera del Río Teniente, compuesto por una alternancia de capas volcánicas andesíticas epidotizadas de color verde e intercalaciones de sedimentos lacustres de color pardo-rojizo. Su espesor es de uno 800 m. La base está marcada por una discordancia angular con el miembro inferior y presenta un manteo que no excede los 30°.

Miembro superior: Reconocido en la ladera W de la quebrada Coya, en el cordón de los cerros que separan a los ríos Coya y Teniente. Su litología consiste en flujos andesíticos y basálticos con intercalaciones de piroclastos y aglomerados volcánicos con 800 m de potencia y con manteos que varían entre los 8° y 12° al S, Sobreyaciendo al miembro medio de esta formación.

2.2.2. Rocas intrusivas

2.2.2.1. Complejo Mafico El Teniente (CMET)

Corresponde a la roca caja del yacimiento, cuya edad es Mioceno Superior. A gran escala conforma un lacolito que intruye a la Formación Farellones (Skewes *et al.*, 2002; Stern *et al.*, 1995). Se trata de un complejo subvolcánico de composición básica y color pardo oscuro a negro, cuyas

dimensiones son de aproximadamente 2 km de alto, 2,4 km de ancho y 1,2 km de largo, siendo el de mayor extensión en el yacimiento (Figura 2.5) donde se agrupan gabros, diabasas, basaltos, pórfidos basálticos y andesitas basálticas (Burgos, 2002). La mineralogía consiste en plagioclasas, relictos de piroxenos y presenta una fuerte alteración potásica - biotítica que le otorga una coloración gris-pardo a negro que es característica de estas rocas (Tabla 2.1) (Burgos, 2002; Villalobos, 1975). La textura en tanto es afanítica a porfídica con fenocristales de plagioclasa (Cuadra, 1986).

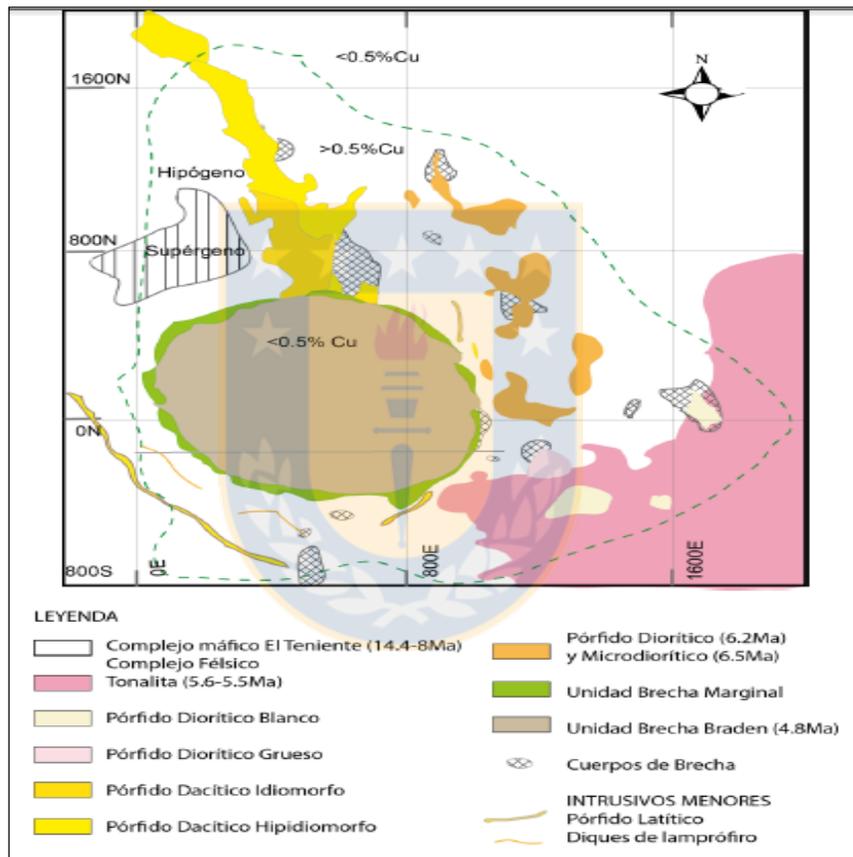
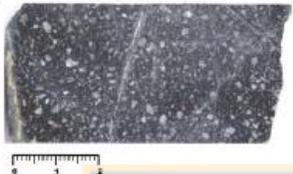
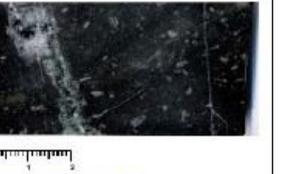


Figura 2.5: Mapa geológico simplificado del nivel Teniente 6 a 2165 m s.n.m. Se muestra la distribución de las unidades intrusivas del yacimiento. Imagen modificada de la base de datos de El Teniente.

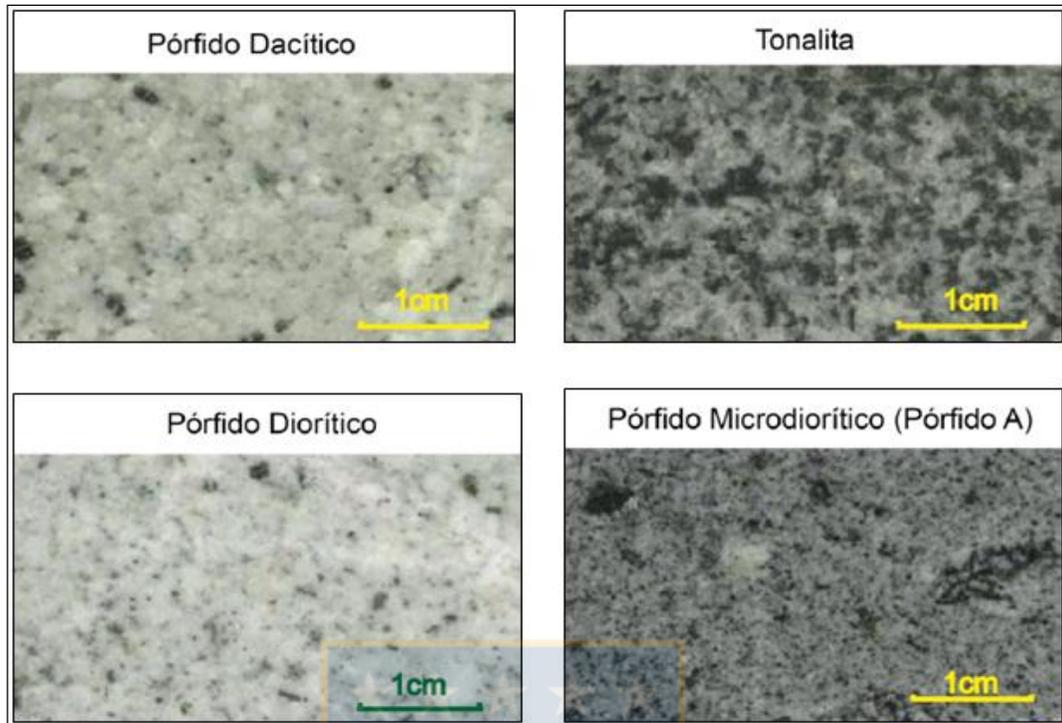
Tabla 2.1: Cuadro resumen de las diferentes unidades petrográficas del Complejo Máfico El Teniente (CMET). (Tomado de De Los Santos, 2011).

COMPLEJO MÁFICO EL TENIENTE				
Características generales	Litologías	DIABASA	GABRO	PORFIDO BASÁLTICO
<p>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 sobreimpresión 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.</p>	Características Macroscópica	<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 (< 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>Variaciones Texturales: Microgabro: Textura fina con cristales menores a 1mm de largo. Gabro: Cristales mayores a 1mm.</p> <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>Variaciones Texturales: Pórfido Basáltico fino: Fenocristales tabulares a aciculares de plagioclasa de 1 a 2mm de largo. Pórfido Basáltico Grueso: Fenocristales de plagioclasa con forma más cuadrada ("equant"), mayores a 2mm de largo.</p> <p>Rasgos Característicos: Su textura Porfídica. La masa fundamental afanítica la que le otorga una apariencia "aterciopelada".</p>
	Características Microscópicas	<p>Roca de textura <i>porfídica</i>, 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.</p>	<p>Roca de textura <i>equigranular</i>, con cristales de plagioclasa de 1mm de largo y piroxenos en forma subordinada. También puede presentar biotita secundaria, anhidrita, clorita y turmalina.</p>	<p>Roca de textura <i>porfídica</i>, también glomeroporfídica; con fenocristales de plagioclasa mayores a 2 mm de largo. Puede presentar fenocristales de piroxeno o bien relictos de ellos en la masa fundamental.</p>
	Fotografía			
	Microfotografía			

El tamaño de grano varía desde grano fino en los márgenes del intrusivo hasta de grano grueso en el centro de este. Las etapas de mineralización y alteración modifican las características originales de la roca, evidencia de esto es la presencia de minerales como biotita, anhidrita, cuarzo, clorita, sericita, actinolita y turmalina (Skewes, 2002). Las alteraciones son producto de los procesos de mineralización y alteración que generan minerales característicos, entre los cuales destacan la biotita, anhidrita, cuarzo, clorita, sericita, actinolita, y turmalina (Skewes, 2002).

2.2.2.2. Complejo Félsico

Consiste en un conjunto de cuerpos intrusivos subverticales de edad Mioceno-Plioceno, manifestándose en forma de stocks, apofisis tabulares y diques, que presentan una afinidad calcoalcalina y contenidos de sílice mayores al 56%. Son clasificados de acuerdo con los Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas en El Teniente 2003 de la siguiente manera (Fotografía 2.1).



Fotografía 2.1: Imágenes de las diferentes unidades petrográficas pertenecientes al Complejo Felsico El Teniente. (Referencia Interna SGL-I-123/2003).

Pórfido dacítico: Definido por (Ossandón, 1974), (Cuadra, 1986), (Skewes *et al.*, 2002) y (Rojas, 2002). Consiste en un cuerpo intrusivo de orientación N-S a NW con un manteo subvertical, se denomina también Dacita, Pórfido Teniente y Dacita Porfídica. Se ubica en el sector N del yacimiento presentando una longitud de 1500 m y una potencia que varía de 50 m en superficie a 300 m en profundidad. Intruye al Complejo Máfico El Teniente, presentando contactos nítidos irregulares y brechosos. En su extensión S es intruido por la Brecha Braden, en donde se desarrolla una brecha con matriz de turmalina y cristales del pórfido. Las rocas presentan un color gris-claro a blanco con fenocristales de oligoclasa, biotita y cuarzo en menor medida (Cuadra, 1986). Se distinguen dos variedades texturales: la porfídica idiomorfa, que ocurre cerca de la zona de contacto; y la porfídica hipidiomorfa, que ocurre en la parte central del intrusivo. El emplazamiento de esta unidad se considera asociado al evento mineralizador principal del depósito (Ojeda *et al.*, 1980), (Cuadra, 1986) le asigna una edad de 4,6 a 4,7 Ma a esta unidad mediante edades U/Pb en circon, indicando que el emplazamiento del intrusivo ocurrió hace $5,28 \pm 0,10$ Ma.

Tonalita: Es también denominada Diorita Sewell. Las rocas de este cuerpo presentan un color gris-claro, con una textura porfídica en las zonas marginales y fenocristales de plagioclasa, biotita y

relictos de anfibola, esta unidad corta al CMET. La parte central del intrusivo muestra una textura fanerítica, la alteración cuarzo-serítica-clorita es fuerte y característica de ambas zonas (Cuadra, 1986). Su composición química es de carácter calcoalcalino, con contenidos de sílice variable entre el 63,6% y 64,2% (Rabbia *et al.*, 2000; Reich, 2001), (Cuadra, 1986) le asignó una edad a este intrusivo de $7,1 \pm 1,0$ Ma, mediante dataciones radiométricas K/Ar. Por otro lado, (Maksaev *et al.*, 2004) indicaron una edad de $5,47 \pm 0,12$ Ma a $5,63 \pm 0,12$ Ma.

Pórfido Diorítico: Consiste en una serie de stocks y diques menores, de gran extensión en la vertical con una orientación N30°W en la parte N y central del yacimiento (Diorita Central era la antigua denominación de estos cuerpos). Dataciones radiométricas U/Pb en zircones indican una edad de cristalización de $6,11 \pm 0,13$ Ma a $6,28 \pm 0,16$ Ma (Maksaev *et al.*, 2004).

Porfido Microdiorítico: Antiguamente llamado Porfido A, corresponde a una diorita de grano fino con abundantes xenolitos de andesita y cúmulos de biotita (Arredondo, 1994). Se emplaza en el sector E del yacimiento, presentando contactos por intrusión con la Tonalita y CMET. Dataciones U/Pb en zircón indican una edad de cristalización de $6,46 \pm 0,11$ Ma (Maksaev *et al.* otros 2004).

2.2.2.3. Complejo Brecha Braden

También llamado “Pipa Braden”, corresponde a una chimenea volcánica o “pipa” producida por la salida explosiva de volátiles que han fragmentado y roto la roca caja, relleno con fragmentos angulosos. Tiene forma de tronco de un cono con la base mayor en la parte superior, y sección casi circular en planta, con un diámetro de 1.200 m y extensión vertical reconocida de 3.150 m (Floody, 1998). Su flanco oriental es subvertical, mientras que el resto posee una inclinación de entre 60° y 70° hacia el centro del cuerpo (Cuadra, 1986). Se encuentra emplazado en la parte central del yacimiento, cortando a la mayoría de las unidades litológicas. Su edad se estima en 4,7 a 4,5 Ma (Cuadra, 1986). Se divide en 2 unidades geológicas, las cuales son:

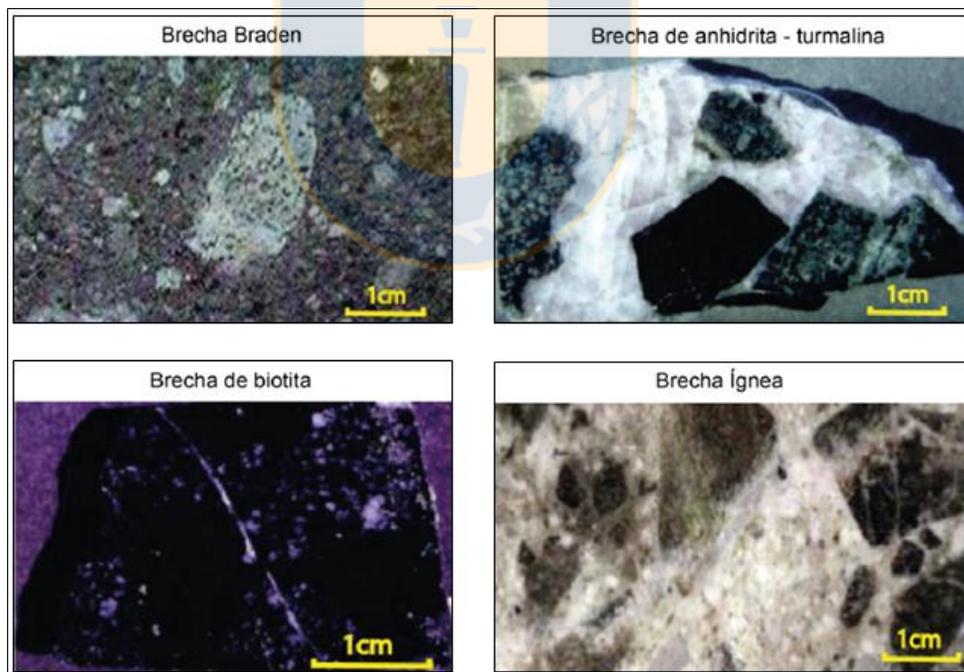
Unidad Brecha Braden: Conformada por brechas con fragmentos redondeados a subangulosos, mal seleccionados cuya composición es andesítica, diorítica, dacítica y latítica con alteración

hipogena propia, en una matriz de polvo de roca y cemento sericitico con cantidades menores de turmalina, calcita y sulfuros en su mayoría pirita.

Unidad Brecha marginal: Presenta una forma de anillo que rodea a la Unidad de Brecha Braden, de 50 a 60 m de espesor el cual disminuye en profundidad, hasta llegar a los 10 m (Cuadra, 1986). El contacto entre ambas unidades es de forma gradacional con un porcentaje variable de turmalina (Ojeda *et al.*, 1980). Sus fragmentos son angulosos a sub-angulosos polimicticos. Muestra una alteración cuarzo-sericita-clorita en diferentes grados y cantidades menores de anhidrita, yeso, sulfuros y tenantita-tetraedrita. Su cemento es de turmalina y cuarzo, con cantidades menores de anhidrita, yeso y carbonatos.

2.2.2.4. Cuerpo de brechas

Reconocidos por (Arredondo, 1994) como una agrupación de cristales monolíticos y/o heterolíticos, clasificados según la composición de la matriz (Figura 2.2) en:



Fotografía 2.2: Imágenes de las diferentes unidades petrográficas pertenecientes al Complejo de Brechas El Teniente. (Referencia interna SGL-I-123/2003; Skewes, 2004).

Brechas de anhidrita: Compuesta de fragmentos polimicticos de naturaleza mafica y félsica alteradas, el cemento en tanto consiste en anhidrita con menores cantidades de cuarzo, calcopirita, pirita y molibdenita. Se distribuye en el sector NE y SE del yacimiento.

Brechas de Turmalina: Corresponde a una brecha polimictica, cuyo cemento está formado principalmente de turmalina acompañada de anhidrita, cuarzo, calcopirita, bornita y pirita. Los fragmentos son de rocas maficas y félsicas alteradas. Los cuerpos de brecha de turmalina están concentrados preferentemente en el sector N de la chimenea de Brechas Braden. La brechización se habría producido entre las etapas de mineralización tardimagmatica e hidrotermal principal. Mientras que las brechas de turmalina y cuarzo, solo contiene fragmentos de roca maficas cuya formación se asocia a la etapa de hidrotermal tardía.

Brechas de biotita: El cemento es de biotita y en forma subordinada se compone por plagioclasa, cuarzo, bornita, calcopirita, anhidrita y yeso. Los fragmentos de rocas intrusivas maficas y félsicas están fuertemente biotitizados, en tanto que los minerales maficos han sido reemplazados totalmente por biotita. La biotización está asociada con la infiltración de numerosas vetillas de biotita (Skewes, 2000).

2.2.2.5. Intrusivos menores

Corresponden a diques y cuerpos filonianos de ocurrencia restringida y de menor extensión, con un carácter parcialmente estéril. Representan los últimos eventos magmáticos del yacimiento.

Porfido latítico: Definida por (Howell & Molloy, 1960), como cuerpos irregulares discontinuos autobrechizados, con fragmentos redondeados y subredondeados en una matriz de la misma composición. Se distribuye en los sectores aledaños de la Brecha Braden, cuya potencia varía entre 2 a 5 m. La roca muestra una textura porfídica, con un 40 % de fenocristales de plagioclasa y en menor proporción fenocristales de biotita, anfíbolos y cuarzo, contenidos en una masa fundamental de cuarzo y feldespato (Skewes *et al.*, 2002). Su emplazamiento sería anterior a la formación de la Brecha Braden, según la edad K/Ar de $4,96 \pm 0,25$ Ma (Riveros, 1991).

Diques de Lamprófidio: Cuerpos tabulares de color gris verdoso, de textura porfídica fina con fenocristales aciculares de hornblenda, en una masa fundamental traquítica compuesta por microlitos de augita y labradorita. Se ubican al S de la chimenea de Brechas Braden, con una potencia variable de 1 a 2 m. Muestran una alta continuidad en su rumbo y un manteo subvertical. Sus contactos son nítidos y regulares, cortando a las unidades CMET, Tonalita, Brecha Braden y Brecha Marginal. Los lamprófidios representan las últimas etapas de la actividad ígnea en la zona. Dataciones K-Ar en roca total arrojan una edad de 3,8 a 2,9 Ma (Cuadra, 1986).

2.2.3. Estructuras

El yacimiento El teniente se encuentra emplazado en una compleja zona de cizalle, de características propias y con una orientación aproximada de N65°E que se extiende en un área de 14 km de largo y 3 km de ancho, denominada Zona de Falla El Teniente (ZFT) (Garrido, 1992). Esta se caracteriza por presentar 3 dominios estructurales: Dominio N60°E; Dominio N50°W y Dominio N20°E, que corresponden a zonas de mayor frecuencia relativa de fallas, constituidos en su mayoría por fallas de rumbo con manteo subvertical.

En el interior de la mina se aprecian como un conjunto de fallas paralelas, con un espesor variable entre 20 y 400 m. Estas fallas de rumbo muestran un desplazamiento de algunos centímetros y una geometría anastomosada. La Zona de Falla El Teniente (ZFT) es definida por (Garrido, 1995), entre la quebrada El Teniente y la Falla Agua Amarga (Figura 2.6). Esta muestra una extensión de 14 km y un ancho de 3 km. Dentro de la zona de falla el arreglo estructural es notoriamente distinto al reconocido en el entorno, independiente de la litología, definiendo un eje de acortamiento de dirección $N48^\circ \pm 11^\circ W$ (Garrido, 1995; Diagramas de Rosetas, Figura 2.6) debido a que las fallas se disponen en zonas. Su origen se relaciona al movimiento por cizalle, producto de la deformación distrital. Estos sistemas habrían estado activos antes, durante y después de la formación del yacimiento y serían controlados por el emplazamiento de la chimenea Braden (Garrido, 1992). Así mismo, (Mayne-Nicholls *et al.*, 1996) reconocen un juego de fallas maestras de rumbo NE subverticales y a nivel distrital (Falcon & Rivera, 1998), confirman el predominio estructural de fallas de tendencia NE y de centros volcánicos alineados. Fallas normales de rumbo NNW a NS se encuentran afectando a

los estratos de la Formación Farellones, las cuales son interpretadas como el producto de la reactivación de antiguas fallas inversas paralelas al plegamiento.

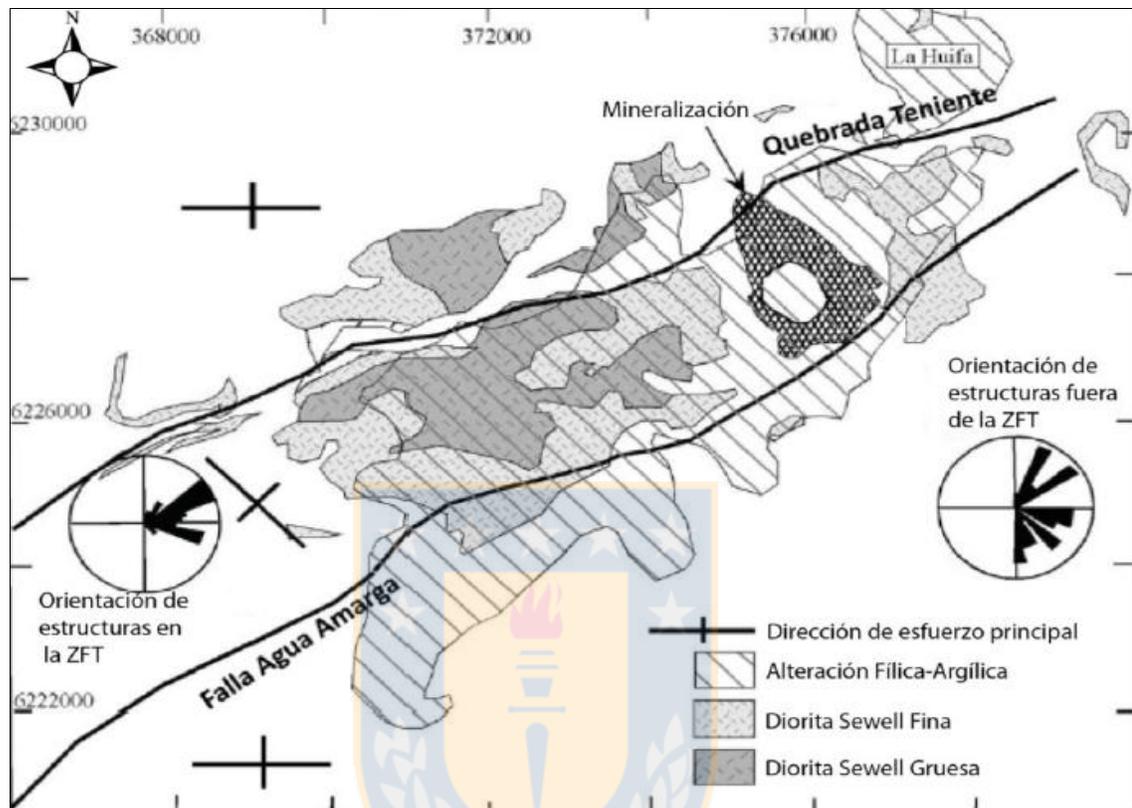


Figura 2.6: Zona de Falla El Teniente. (ZFT limitada al NW por la quebrada Teniente y al SE por la Falla Agua Amarga, se muestra su relación con la alteración y mineralización del yacimiento. Imagen modificada de Garrido (1995).

2.3. Alteración y Mineralización

Los procesos de mineralización del yacimiento El Teniente están relacionados a la superposición de diferentes eventos de alteración y mineralización, los cuales se distinguen en 3 etapas hipógenas, denominadas Tardimagmática (TM), Hidrotermal Principal (HP) e Hidrotermal Tardía (HT), además de un enriquecimiento supergeno. Estos procesos están relacionados al emplazamiento de los intrusivos félsicos dacíticos y dioríticos, además de la génesis de la brecha hidrotermal de turmalina y Brecha Braden, en las rocas maficas intrusivas y volcánicas del miembro inferior de la Formación Farellones (Howell & Molloy, 1960). La Figura 2.7 muestra distintos niveles

geológicos, basado en mapeos históricos de la mina según el tipo de mineral encontrado, su origen y tipo de mena. En ella se observa la ubicación relativa de la mineralización hipógena y supergena.

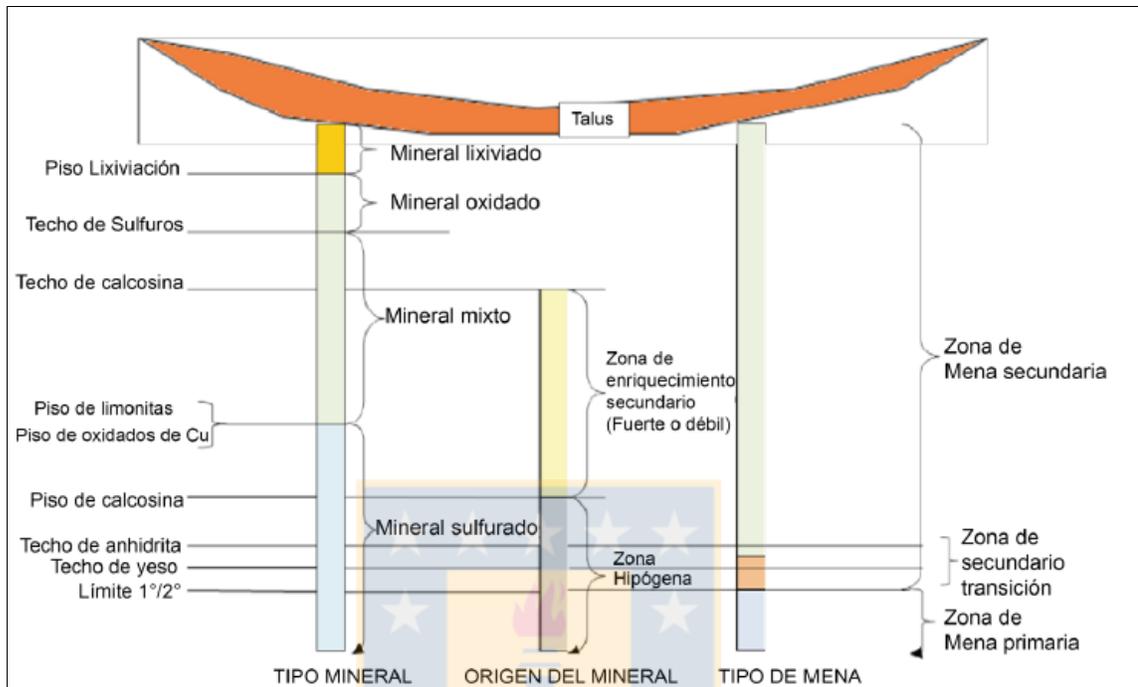


Figura 2.7: Esquema de los distintos niveles geológicos, en base a mapeos históricos realizados en la mina. (Tomado de SGL-I-123/2003).

2.3.1. Etapa Tardimagnética (TM)

Corresponde a la primera etapa de alteración–mineralización del yacimiento. La mineralogía consta principalmente de biotita, con cantidades menores de anhidrita, cuarzo, clorita, albita, turmalina y sericita. La mineralización asociada a esta etapa ocurre en vetillas sin halo de alteración y en menor proporción en forma diseminada con una marcada zonación en torno al Pórfido Dacítico que consiste en un núcleo rico en bornita, una zona intermedia con predominio de calcopirita y una zona periférica rica en piritita con abundante magnetita diseminada (Zúñiga, 1982). En los intrusivos félsicos es característica la pseudopertización de las plagioclasas y la formación de cúmulos irregulares de biotita. Se le asocia a las últimas fases de consolidación del porfido diorítico y del porfido dacítico. La distribución de esta etapa en el yacimiento define claramente dos sectores; El primero se ubica en la mitad N del yacimiento y está aparentemente relacionado con el emplazamiento del Pórfido Dacítico (Arévalo & Floody, 1995), caracterizado por presentar una alteración potásica en el centro de la zona

gradando a asociaciones propiliticas hacia los márgenes del yacimiento. El segundo sector ubicado al S del depósito se encuentra afectado por sucesivas etapas de alteración sobreimpuestas, aunque se reconoce una franja de elongación NE que se dispone en forma simétrica con el eje mayor del pórfido Dacítico. En el Pórfido Dacítico, la alteración potásica provoca la pseudo-pertización de las plagioclasas y la formación de cúmulos irregulares de biotita secundaria y vetillas de cuarzo. En el CMET, se manifiesta por la presencia de biotita, albita y cuarzo, destruyendo parcial o totalmente la textura original de la roca (Arredondo, 1994).

2.3.2. Etapa Hidrotermal Principal (HP)

Esta etapa se caracteriza por el desarrollo de vetillas con halo de alteración de ancho variable que obliteran la textura y mineralogía de la etapa tardimágnica (Arévalo *et al.*, 1998). Hay una sobreimposición de franjas con alteración filica, ubicadas simétricamente con respecto al pórfido dacítico. Su intensidad está dominada por vetillas de cuarzo anhidrita y sulfuros, que alteran la textura y mineralogía de la etapa tardimágnica (Ojeda *et al.*, 1980). La mineralización está conformada por calcopirita, pirita y molibdenita subordinada, principalmente en vetillas y escasamente diseminada en los halos de alteración (Zuñiga, 1982). Las vetillas son de cuarzo, anhidrita y calcopirita con mica blanca, digenita y molibdenita. La asociación cuarzo-sericita está presente en esta etapa, con una menor proporción de anhidrita y clorita, la cual se desarrolla a expensas de la biotita tardimágnica y de los feldespatos de las rocas mágnicas y del Pórfido Dacítico, respectivamente.

2.3.3. Etapa Hidrotermal Tardía (HP)

Manifestada por una fuerte alteración cuarzo-sericita-clorítica, la cual está relacionada genéticamente a la unidad Brecha Marginal (Villalobos, 1975). La alteración se presenta en los fragmentos de la brecha, así como por vetas y vetillas. El relleno de las vetas corresponde a anhidrita, yeso, turmalina, siderita y cuarzo, con halos de alteración cuarzo-sericita-clorita-calcitas. Las vetillas en tanto presentan rellenos de cuarzo, turmalina, anhidrita, sericita, clorita, yeso, carbonatos y menas de cobre, hierro y molibdeno (Zuñiga, 1982). Según (Arevalo *et al.*, 1998), dividen a esta etapa en dos fases; una temprana y una tardía asociada a la brecha de turmalina y que

constituye los valores máximos de penetrabilidad de la etapa original. La Tabla 2.2 resume la mineralogía y evento asociado a las 3 etapas de alteración hidrotermal mencionadas.

Tabla 2.2: Cuadro resumen con las principales etapas de alteración hidrotermal de El Teniente.

Etapa Tardimagnética		
Características Generales	Mineralogía Principal	Relacionado a
Alteración potásica en vetillas (cuarzo, biotita, feldespato potásico y anhidrita) y en forma masiva (perlitización en intrusivos y biotización en andesitas) y biotización de Complejo Máfico.	Cuarzo, anhidrita, feldespato potásico (perita), biotita, clorita. Calcopirita, bornita, pirita, molibdenita.	Consolidación de los intrusivos.
Etapa Hidrotermal Principal		
Características Generales	Mineralogía Principal	Relacionado a
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 Tardimagnéticos con las aguas meteóricas
Etapa Hidrotermal Tardía		
Características Generales	Mineralogía Principal	Relacionado a
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. Se incluye en esta etapa la denominada 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 desarrollo del Complejo de Brechas Braden.

2.3.4. Etapa Póstuma

Representa el último evento hidrotermal ocurrido en el yacimiento y forma parte del evento hidrotermal tardío. Corresponde a una turmalinización localizada en el contacto de la unidad Brecha Braden con la roca caja e invade a las Brecha Braden (Floody, 2000). La mineralización hipogena se presenta en vetas y vetillas de pirita, calcopirita, tenantita-tetrahedrita, molibdenita y gelena-esfalerita con anhidrita como mineral de ganga predominante y de manera subordinada cuarzo, turmalina, yeso y carbonatos. Sericita, clorita y calcita se presentan como minerales secundarios junto con diseminaciones de pirita y calcopirita (Floody, 2000).

3. CLASIFICACIÓN DE VETILLAS MINA EL TENIENTE

3.1. Generalidades

Las discontinuidades geológicas son estructuras que pueden ser definidas como planos de debilidad, estas pueden ser fracturas y fallas. Dentro de esta clasificación también se encuentran las vetillas, que corresponden a estructuras geológicas rellenas y selladas por minerales que son producto de la acción de fluidos hidrotermales los cuales además alteran la roca caja generando halos alrededor de las vetillas (Figura 3.1).



Figura 3.1: Ejemplo de una vetilla HT. Con varios minerales de relleno y un halo de alteración cuarzo-sericitica, además se muestra la interface o plano de contacto entre la roca caja y la vetilla. (Tomado de Karzulovic, 2001).

En mina El Teniente se presenta un denso enrejado polidireccional de vetillas (*Stockwork*) (Fotografía 3.1) selladas con rellenos competentes, impermeable y apegados a la roca caja con alta

cohesión, en comparación con vetillas presentes en superficies como las encontradas en minas a rajo abierto, que pueden presentar rellenos de baja cohesión.



Fotografía 3.1: Enrejado de vetillas (*Stockwork*). Compuesto por vetillas TM con relleno de cuarzo. La separación de los pernos es de 1 m. Imagen tomada de Karzulovic (2001).

Estas vetillas alojan más del 70% de la mineralización de cobre del yacimiento (Brzovic & Benado, 2003). La mineralogía de la vetilla puede consistir en un mineral único o en grupos de minerales con proporciones variables entre los que destacan anhidrita, bornita, calcopirita, carbonato, cuarzo, yeso, molibdenita, pirita, etc. Estas estructuras selladas muestran características distintivas dependiendo en las condiciones reológicas en que se forman. Evidencia de lo anterior son las vetillas formadas en un ambiente Tardimagmatico (TM), en la cual la roca está sometida a altas temperaturas en un régimen dúctil por lo que serán características las vetillas con bordes sinuosos e irregulares. En tanto que desde la etapa Hidrotermal Tardía (HT) hacia la Hidrotermal Principal (HP), existe un descenso de la temperatura y un cambio desde condiciones de presión litostática e hidrostática, en un régimen frágil de la roca en donde las vetillas presentan bordes rectos y los halos pasan de alteración potásica a filica.

Finalmente, estas discontinuidades han sido clasificadas según sus características mineralógicas, halo y su origen genético, lo que permite comprender la evolución del yacimiento y el ambiente de formación de las vetillas. En el presente capítulo se describen la importancia y los tipos de vetillas presentes en mina El Teniente según la clasificación propuesta por (Brzovic & Benado, 2003).

3.2. Importancia de las vetillas en mina El Teniente

El enrejado de vetillas de mina El Teniente, tiene una gran importancia en los eventos que afectan al macizo rocoso durante la extracción del mineral. Las vetillas participan en los procesos de fragmentación y hundimiento de la roca primaria (Figura 3.2), ya que en la fragmentación de la roca primaria las vetillas dominan el 80% de las caras de las colpas (Pereira, 1995), así mismo las vetillas abiertas en los procesos de hundimiento tienen una participación mayor al 88 % (Brzovic, 2009). Lo anterior influye en la degradación del macizo rocoso, que se define como la disminución o pérdida de la calidad geotécnica original (in situ) de la masa de roca, en el caso de El Teniente la causa es la minería subterránea.

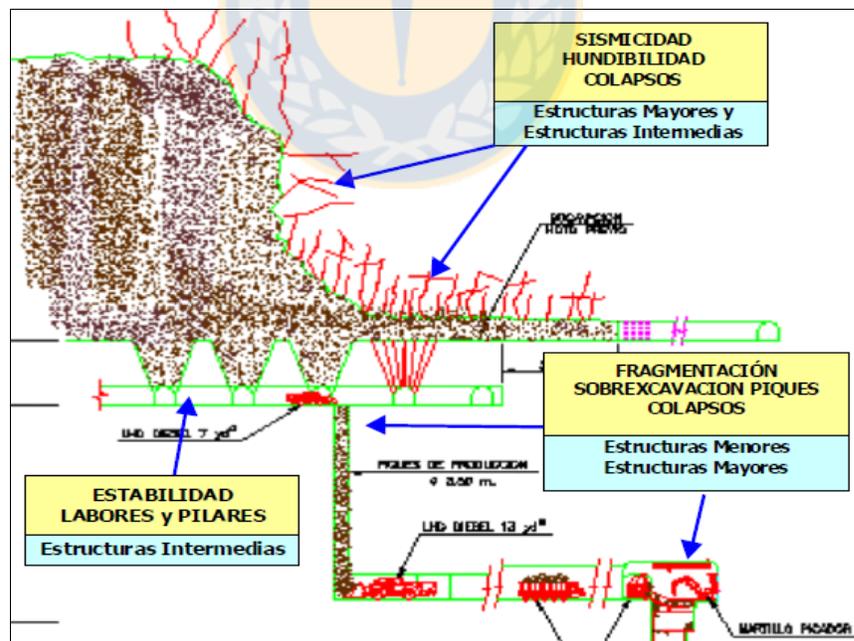


Figura 3.2: Influencia de las estructuras en la roca primaria en los procesos de mina El Teniente. (Manual de Estándares para El Trabajo de Geología de Minas El Teniente, 2003).

La roca primaria de mina El Teniente es masiva y/o escasamente fracturada, la degradación o pérdida de la calidad geotécnica ocurre principalmente cuando esta se fractura. Este fracturamiento se produce por la apertura de vetillas selladas preexistentes o por la generación de nuevas fracturas a través de la matriz de roca. La experiencia de El Teniente indica que ocurre principalmente la primera (apertura de vetillas preexistentes), ejemplos de este fenómeno son muchos, algunos de los cuales se definen a continuación:

- El caving y la fragmentación ocurren principalmente por fallas y vetillas del tipo stockwork, ha sido demostrado por (Zuñiga, 1979), (Pereira, 1995) y (Brzovic & Benado, 2003).
- La roca primaria es impermeable, salvo en las cercanías del frente de hundimiento donde la acción del *abument stress* produce la apertura de estructuras mayores e intermedias.
- El estudio de los daños producidos por estallido de roca (en la roca primaria) ha demostrado que inmediatamente después ocurrido estos, aparecen las filtraciones de agua.
- Estudios de los pilares en los niveles de producción de las minas Teniente Sub-6 y Esmeralda, han demostrado que aquellos que tienen una mejor calidad geotécnica no presentan estructuras abiertas en su interior. Cuando por acción de la minería se produce la apertura de estructuras en el centro o en la periferia del pilar, este pierde o disminuye su calidad geotécnica.
- Otros ejemplos menores de la degradación del macizo rocoso primario son la sobrecavación y la formación de cuñas durante las labores de la mina, las que tienen un claro control estructural.

Entonces, se concluye que la degradación o la pérdida de la calidad geotécnica de la roca primaria de El Teniente es mayoritariamente a través de estructuras geológicas, como fallas y vetillas del tipo *stockwork*.

3.3. Características y clasificación de vetillas El Teniente

3.3.1. Elementos de una vetilla

Las vetillas de mina El Teniente son agrupadas en función de su espesor o potencia, extensión, composición, alteración y relaciones de contacto entre ellas. Las características más relevantes son (Figura 3.3):

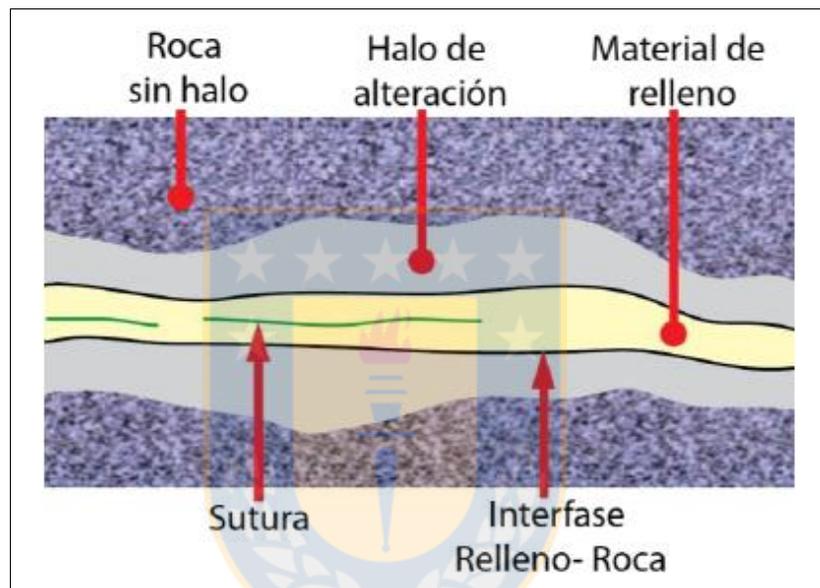


Figura 3.3: Elementos que componen una vetilla.

Material de relleno: Conjunto de minerales que sellan la estructura. Estos definen el espesor y resistencia relativa de la vetilla. El espesor puede variar desde menos de 1 mm a varios centímetros (Karzulovic, 2001).

Sutura: Forma parte del relleno de la vetilla, generalmente minerales más blandos que el resto del relleno. Corresponde a una heterogeneidad orientada dentro de la vetilla y no se presenta en todas estas.

Interface: Corresponde a la zona de contacto entre el relleno de la vetilla y la roca caja, ya sea fresca o alterada.

Traza de la vetilla: Superficie imaginaria que pasa por el centro de la vetilla, la cual puede ser recta o sinuosa.

Halo de alteración: Zona de la roca caja próxima al relleno, la cual ha sido alterada debido a cambios químicos durante la acción de los fluidos hidrotermales que formaron la vetilla. Su potencia puede variar a lo largo de la vetilla.

3.3.2. Espesor de la vetilla

En el manual de Estándares y Metodología de Trabajo para Geología de Minas 2003, elaborado por la Superintendencia de Geología de División El Teniente (SGL-I-123/03,2013), en función del espesor de la vetilla se distinguen los siguientes tipos:

Microvetillas: Presentan una longitud variable y ancho inferior a 1 mm, con trazado por lo general rectilíneo y relleno discontinuo. Son solo visibles en rocas de grano muy fino y aspecto muy afanítico.

Vetillas: Estructuras de forma lineal, cuyo espesor comprende entre los 1 a 3 mm, y longitud igual a mayor a los 2,5 cm, con relleno en toda su longitud.

Vetas: Son estructuras rectilíneas de 4,5 cm de longitud y un ancho superior a los 3 mm. Rellenas con minerales metálicos o no metálicos, y a veces pueden corresponder a planos de falla que desplazan a otras estructuras.

3.2.3. Según traza de la vetilla

Según la longitud de la traza de la vetilla Brzovic (2001) las clasifica en 3 clases:

- **Vetillas Mayores:** Muestran una extensión de al menos 5 m de largo (ancho de 2 labores), usualmente corresponden a vetillas HT o HP, pueden presentar potencias de hasta 200 mm, pero su espesor típico varía de 5 a 25 mm de potencia.
- **Vetillas Intermedias:** Caracterizadas por cruzar una labor (equivalente a 2,5 m de ancho aproximadamente) y pueden corresponder a vetillas tipo HT, HP o TM. Su potencia puede alcanzar los 50 mm, aunque los espesores más frecuentes varían de 1 a 10 mm.

- **Vetillas Menores:** Su extensión no alcanza a cruzar la labor, pudiendo ser del tipo HT, HP o TM. Por lo general sus potencias son menores a 10 mm.

3.4. Clasificación genética de las vetillas

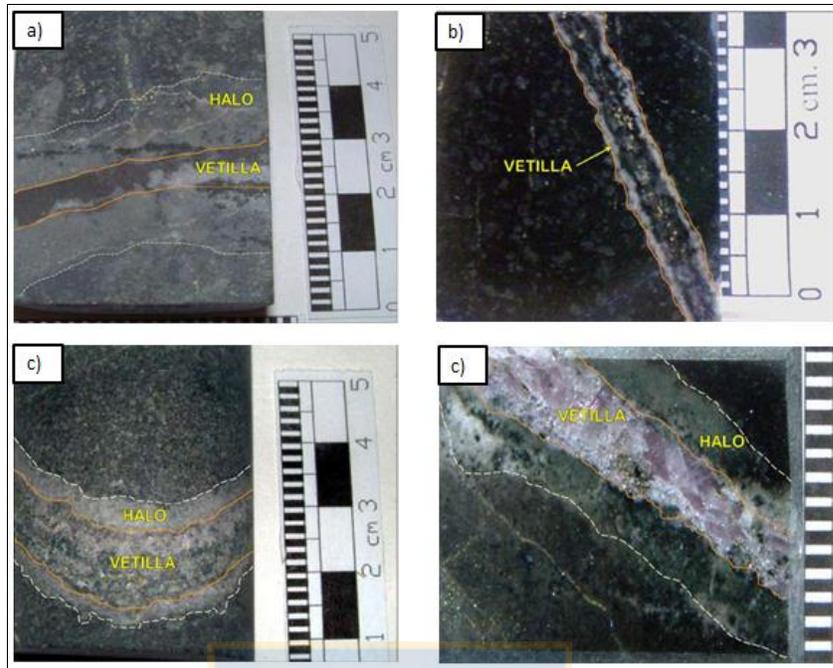
Según los rasgos característicos de los procesos de alteración y mineralización de las vetillas, tales como las relaciones de contacto entre ellas, su mineralogía metálica y no metálica y los halos de alteración, se les ha clasificado en los siguientes tipos:

- Etapa Tardimagnética (TM)
- Etapa Hidrotermal Principal (HP)
- Etapa Hidrotermal Tardía (HT)

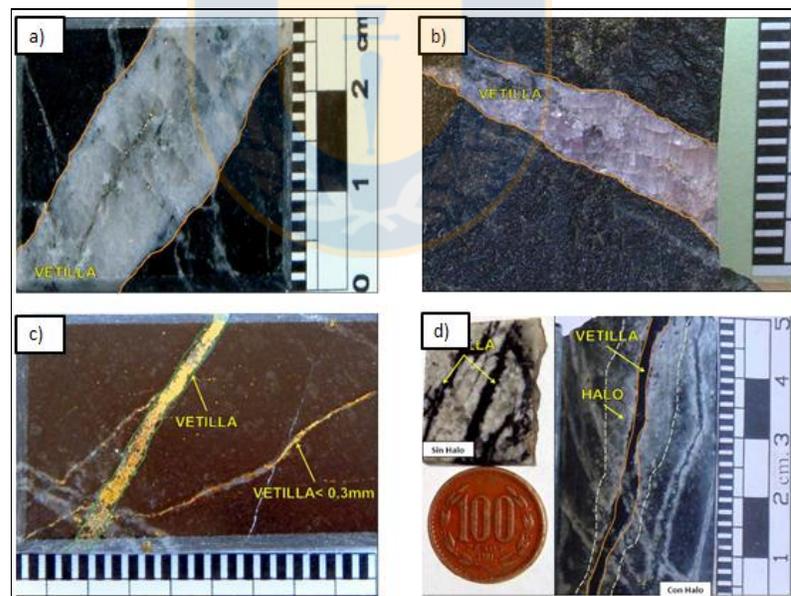
Esta clasificación con fines geotécnicos nace de la necesidad de recolectar más antecedentes geológicos para ser considerados dentro de las distintas variables geomecánicas que se manejan en el yacimiento a la hora de caracterizar el macizo rocoso.

3.4.1. Etapa Tardimagnética

Relacionada a la consolidación del intrusivo, presentándose en las zonas de alteración potásica. Se estima que su emplazamiento fue en un ambiente semi-ductil, lo que se evidencia en la forma sinuosa de la mayoría de las vetillas. Asociada a la alteración potásica, debido a la presencia de cuarzo, biotita, feldespatos potásicos y anhídrita en las vetillas y en los halos de alteración de estas, los feldespatos y minerales maficos de la roca caja son afectados por peritización y biotización respectivamente. La mineralogía metálica destaca la presencia de calcopirita, bornita, pirita y molibdenita. Las vetillas TM son divididas en 8 subtipos (Fotografía 3.3 y Fotografía 3.4), las cuales pueden ser sin halo silíceo o biotítico con mineralización metálica en sutura o en forma disseminada, los subtipos de vetillas son los siguientes:



Fotografía 3.2: Vetillas Tardimagnéticas (TM): a) vetilla de magnetita con halo (V1). b) vetilla de cuarzo y biotita. c) vetilla de cuarzo y biotita (V3) y d) vetilla de anhidrita (V4).



Fotografía 3.3: Vetillas Tardimagnéticas (TM) Parte II: a) vetilla de cuarzo mayoritario (V5). b) vetilla de anhidrita (V6). c) vetilla de calcopirita (V7) con diseminaciones de cuarzo y anhidrita. d) (V8). (Escala: ancho barras de 1mm).

V1: Vetillas de magnetita, con halo. Presenta bordes nítidos de magnetita, puede tener también cuarzo, biotita en cantidades bajas, trazas de anhidrita, calcopirita y clorita. Muestran un halo difuso en el interfaz halo-roca.

V2: Vetillas de cuarzo-biotita, sin halo. Puede contener anhidrita y clorita minoritaria. La mineralización de sulfuros es de forma diseminada y conformada por calcopirita, pirita, bornita y molibdenita subordinada.

V3: Vetillas de cuarzo- biotita, con halo. Anhidrita, calcopirita y clorita aparecen en forma minoritaria. Puede presentar trazas de bornita y molibdenita. La sutura está conformada por biotita y sulfuros. El halo es difuso, generalmente siliceo y a veces biotítico pudiendo presentar algunas trazas de sulfuros diseminados. Si es siliceo, tiene un aspecto sinuoso que destaca por su color claro, si es biotítico es difuso debido al contraste de color con la roca huésped (CMET).

V4: Vetillas de anhidrita, con halo. Rellenas mayoritariamente con anhidrita, biotita y sulfuros diseminados en menor proporción. Su halo es siliceo-biotítico, la biotita esta diseminada en el halo siliceo. El interfaz vetilla-halo es nítido, en tanto el interfaz halo-roca es difuso.

V5: Vetillas de cuarzo. El cuarzo es mayoritario respecto a lo demás minerales. Los metálicos son calcopirita, pirita, bornita y molibdenita dispuestas en forma diseminada. En la sutura suelen aparecer calcopirita y molibdenita, estas vetillas no presentan halo.

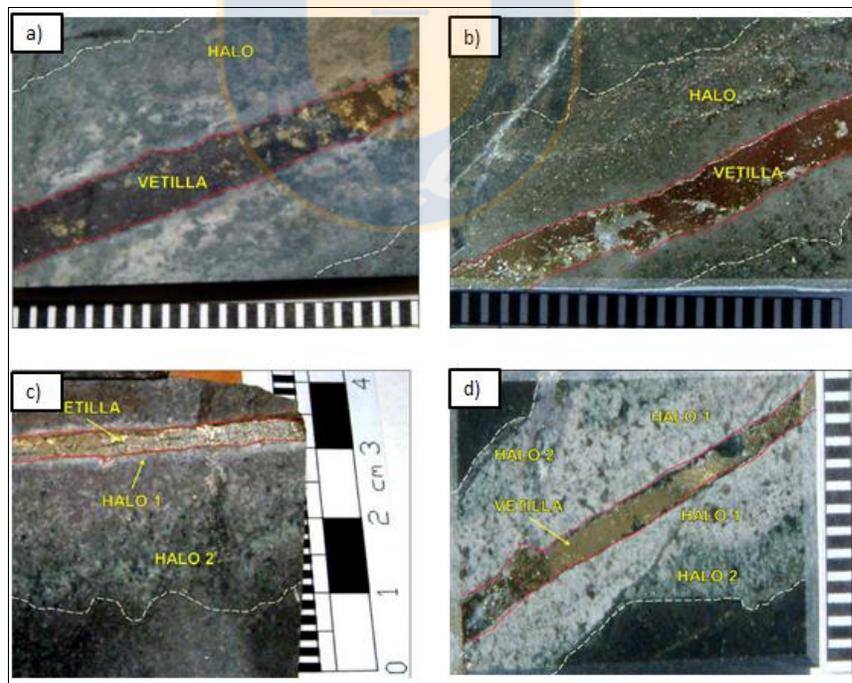
V6: Vetillas de anhidrita mayoritaria, sin halo. Predomina la anhidrita por sobre los minerales metálicos (calcopirita, bornita y molibdenita), pueden contener cuarzo.

V7: Vetillas de sulfuros mayoritarios, sin halo. Los sulfuros se presentan en mayores cantidades, principalmente calcopirita masiva y en menor proporción pirita, bornita y molibdenita. Pueden presentar una traza discontinua si son vetillas delgadas (0,1-0,3 mm), ya que los sulfuros pueden alternar con los no metálicos, principalmente biotita.

V8: Vetillas de turmalina. Rellenas principalmente con turmalina, con presencia de anhidrita, cuarzo y sulfuros subordinados. De bordes nítidos, pueden o no presentar halo. Estas vetillas se encuentran generalmente alrededor de la Brecha Braden, en el Porfido Dacitico y en los cuerpos de Porfido Dioritico del sector N del yacimiento.

3.4.2. Etapa Hidrotermal Principal

En esta etapa, las vetillas se forman en condiciones de roca frágil, en donde la hidrólisis es el principal responsable de la transformación mineralógica. La acción de fluidos tardimagmaticos y aguas meteóricas producen una alteración filica a través de vetillas de sulfuros, generando halos de alteración simétrica o asimétrica de espesor variable, compuestos de cuarzo, sericita y clorita. La mineralogía predominante en las vetillas consta de sulfuros como la calcopirita, piritita y molibdenita, además se advierte la presencia de cuarzo, sericita, clorita y anhidrita. Las vetillas son de forma planar y con caras paralelas. Se distinguen 4 clases de vetillas que se diferencian de la anterior por presentar uno o más halos (Fotografía 3.4).



Fotografía 3.4: Vetillas Etapa Hidrotermal Principal (HP): a) vetilla de magnetita y calcopirita con halo de sericita-cuarzo (V9). b) Vetilla masiva de calcopirita (V10) con diseminaciones de cuarzo. c) Vetilla de calcopirita (V11). d) vetilla de calcopirita con halo doble (V12).

V9: Vetilla de magnetita mayoritaria, con halo simple. Su mineralogía dominante es magnetita, en menores cantidades posee calcopirita y pirita. Son vetillas cuyo espesor es mayor a 2 mm. El halo es simple y por lo general asimétrico, en donde predomina la sericita, la presencia de clorita y cúmulos de biotita le da un aspecto moteado. La interfaz halo-roca es sinuosa.

V10: Vetilla de sulfuros mayoritarios, con halo simple. Caracterizada por una mineralización masiva de calcopirita y/o pirita con o sin cuarzo. El halo es bandeado o simple, en donde predomina la sericita con calcopirita y/o pirita diseminada.

V11: Veta o vetilla de sulfuros mayoritarios con halo semi-complejo. Transicional entre V10 y V12, debido a que presenta una leve tendencia a la formación de un segundo halo de alteración. Presenta un sector central con mineralización masiva de calcopirita y/o pirita en la veta. La mineralización del halo escasa y diseminada.

V12: Vetilla de sulfuros mayoritarios, con halo complejo. Vetas o vetillas con calcopirita y/o pirita masiva. El halo es doble, el primer halo en contacto con la veta es cuarzo-sericitico y puede presentar sulfuros (calcopirita y pirita) diseminados. El segundo halo es clorítico-sericitico, con escasa o ausente mineralización de sulfuros diseminados.

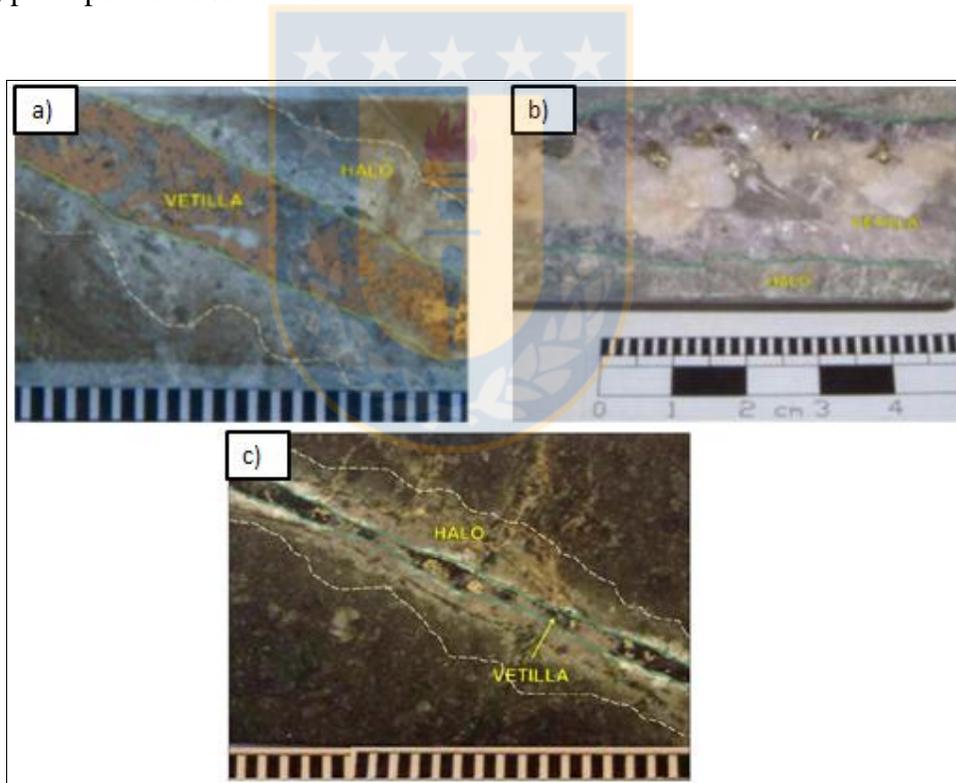
3.4.3. Etapa Hidrotermal Tardía (HT)

Las vetillas formadas en esta fase se relacionan con fluidos hidrotermales asociados al desarrollo del Complejo de Brechas Braden, estas se extienden a unos 100 o 150 m en forma concéntrica a las Brechas. En esta etapa las vetillas muestran una mayor complejidad y variabilidad mineralógica que consta de carbonatos, yeso, anhidrita y turmalina, con o sin sulfuros. Destaca la aparición de vetillas de tenantita y tetraedrita. Las texturas son masivas, con espesores irregulares y halos marcados o difusos de composición sericitica o cuarzo- sericitica. Se diferencian de las anteriores por la aparición de nuevos minerales no metálicos (carbonato, yeso y turmalina) y metálicos (tenantita, tetraedrita). Se subdividen en 3 categorías:

V13: Vetillas de sulfuros mayoritarios. Corresponden a vetas o vetillas de sulfuros masivos (bornita, tenantita-tetraedrita y trazas de galena y blenda), con cuarzo, anhidrita y carbonatos subordinados. El halo es bien desarrollado, con bordes difusos.

V14: Vetillas de carbonatos y sulfatos mayoritarios. Carbonatos como calcita, ankerita, siderita y/o sulfatos (yeso y anhidrita) de textura masiva. Los sulfuros asociados son minoritarios. El halo es marcado y difuso, de composición sericitica y cloritica.

V15: Vetillas de turmalina mayoritaria. Es característica su mineralogía no metálica, correspondiente a turmalina y anhidrita subordinada (Figura 3.5). La epidota está presente en algunos casos, como en el sector S del yacimiento, pero en baja proporción. El halo es difuso o indefinido, principalmente sericitico.



Fotografía 3.5: Vetillas hidrotermales tardías (HT). a) vetilla de bornita y calcopirita con halo cuarzo sericitico. b) vetilla de anhidrita y calcita con halo cuarzo-sericitico. c) vetilla de turmalina junto a cuarzo y calcopirita diseminada. (Escala ancho barras 1mm).

4. PARAMETROS GEOMÉTRICOS Y MINERALÓGICOS

4.1. Generalidades

En mina El Teniente la descripción y caracterización de las vetillas es de suma importancia, a la hora de calificar geotécnicamente el macizo rocoso. Dentro de las características geológicas más relevantes se reconocen; el relleno mineralógico, la textura de disposición de los minerales en el plano de la estructura y el porcentaje de ocurrencia de cada especie mineral, también tiene relevancia el tipo y subtipo genético al cual pertenece la vetilla. Dentro de las características geométricas se consideran el espesor de la vetilla y halo, la rugosidad y planaridad asociada a esta, así como también el ángulo de inclinación de la vetilla con respecto al eje de la probeta (α). Las características geométricas de las discontinuidades geológicas son parámetros claves para 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 mina El Teniente, pues se ha observado que las vetillas que componen el yacimiento juegan un rol relevante en el control de la fragmentación del macizo rocoso (Brzovic & Villaescusa, 2007; Brzovic, 2009).

4.2. Tipo de vetilla

Clasificadas de acuerdo con su origen genético en: TM, HP y HT, que refiere a las categorías Tardimágnica, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardía (Tabla 4.1), y los 15 Subtipos o Clases, de acuerdo con las características de cada etapa hidrotermal identificando la clase de vetilla, se obtiene la categoría correspondiente que muestran las siguientes características:

Tardimágnica (TM): Vetillas formadas en un ambiente semi-ductil, evidenciado por la forma sinuosa de la vetilla. Es característica la alteración potásica con presencia de cuarzo, biotita, feldespato potásico y anhidrita en las vetillas y en los halos de alteración. Se les asocia un color anaranjado en el mapeo.

Hidrotermal Principal (HP): Predominan los sulfuros como la calcopirita, pirita y molibdenita, con cantidades menores de cuarzo, sericita, clorita y anhidrita. Los bordes son continuos y rectos, debido a su formación en roca frágil. Los halos de alteración son simples o complejos, afectados por alteración filica con cuarzo, sericita y clorita. Se destacan con un color rojo.

Hidrotermal Tardía (HT): Muestran una mayor complejidad y variabilidad mineralógica, con una textura masiva, espesores irregulares y con halos desarrollados y difusos de composición sericitica o cuarzo-sericitica. Rellenas con carbonatos y sulfatos, entre los que destacan, calcita, yeso, anhidrita y turmalina, con o sin sulfuros (tenantita y tetraedrita). En el mapeo geológico les corresponde un color verde.

4.3. Relleno Mineralógico

La mineralogía de las vetillas juega un rol fundamental en el comportamiento mecánico de estas, de ahí su importancia en considerar el tipo de relleno mineral, en El Teniente los minerales no metálicos más comunes corresponden a cuarzo, anhidrita, turmalina, clorita, biotita, carbonatos y yeso, en tanto que los metálicos destacan la calcopirita, pirita, bornita, molibdenita y magnetita. En la tabla de descripción se debe identificar los minerales presentes en la vetilla y determinar su proporción en porcentaje de volumen en cada uno de ellos. Se distinguen 2 tipos de mineralogía:

- **Mineralogía Típica:** La mineralogía típica corresponde a los minerales encontrados, en mayor o menor proporción, en las vetillas del Subtipo o Clase correspondiente. Es fundamental tener en cuenta que estas descripciones son macroscópicas. Si bien coinciden mucho a la mineralogía neta de las vetillas, el trabajo con cortes transparentes y pulidos pueden aportar muchos detalles que no son distinguibles a simple vista.
- **Mineralogía distintiva:** Se refiere a la mineralogía más común encontrada en la Clase o Subtipo de vetillas. En la mayoría de los casos, es el criterio que permite discriminar entre un Subtipo y otro.

4.3.1. Dureza relativa

Un factor importante en los rellenos de las vetillas es la dureza de los minerales que la componen, ya que según sea el porcentaje de minerales duros o blandos presentes, definirán si las vetillas son duras o blandas. La dureza relativa de los minerales más comúnmente encontrados se basa en la escala de Mohs (Tabla 4.2). El porcentaje de minerales duros corresponde a la suma de porcentajes en volumen de los minerales cuya dureza Mohs es igual o mayor a 4,5, de acuerdo con esto la turmalina, cuarzo, pirita y magnetita cumplen con esta condición. Sin embargo, debido a los planos de clivaje de la pirita, se le considera un mineral blando en mina El Teniente.

Tabla 4.2: Tabla de durezas relativas de minerales según escala de Mohs, (Tomado de Barahona, 2011).

Mineral	Nomenclatura	Dureza Mohs
Turmalina	Tur	7 - 7,5
Cuarzo	Qz	7
Pirita	Py	6,5
Magnetita	Mt	5,5-6
Calcopirita	Cpy	3,5 - 4
Anhidrita	Anh	3,5
Calcita	Cb	3
Bornita	Bo	3
Sericita	Ser	2,5
Biotita	Bio	2,5 - 3
Yeso	Y	2
Clorita	Chl	2
Molibdenita	Mo	1

4.3.2. Halo

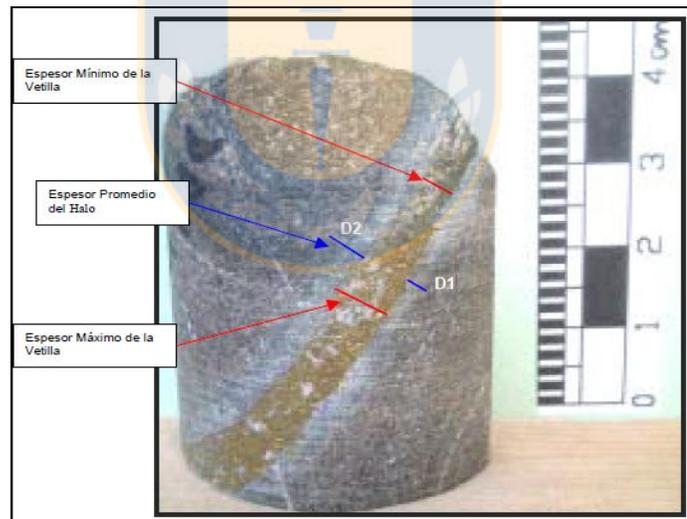
El halo de alteración corresponde a la interface vetilla-roca, debido a los cambios mineralógicos producidos en la roca producto de la circulación de fluidos hidrotermales que formaron la vetilla,

estas pueden o no presentar halo. Su composición mineralógica puede ser silíceo, sericitico, cloritico y biotítico, también presentar minerales metálicos diseminados como pirita, calcopirita y otros. Según el número de halos desarrollados en una vetilla, se clasifican en simples o dobles.

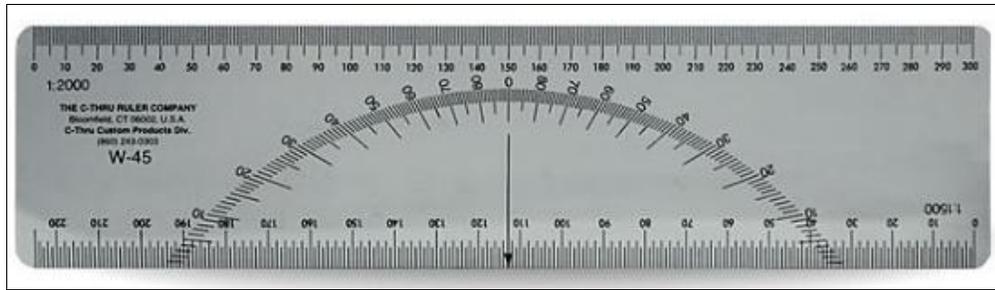
4.4. Geometría de la vetilla

4.4.1. Espesor

Corresponde a la potencia de la vetilla, considerando que las vetillas presentan variaciones de espesor a lo largo de la traza, se mide el espesor tipo, mínimo y máximo de la vetilla (Fotografía 4.1), con un *geoflex* (Fotografía 4.2) o regla. La unidad de medida del espesor es milímetros (mm). Es importante al momento de realizar la medición, cerciorarse que el espesor corresponda al real y no aparente, realizando la medida perpendicular al contacto vetilla- roca o vetilla- halo.



Fotografía 4.1 Determinación del espesor real (e) de una vetilla. (Tomado de Manual de Estándares y Metodologías para Geología de Minas, 2013).

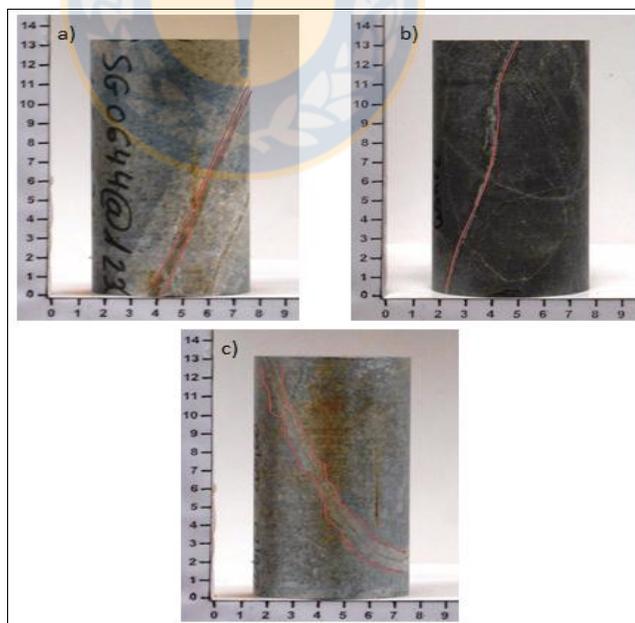


Fotografía 4.2: *Geoflex*. Utilizado para medir el espesor de una vetilla y su ángulo.

4.4.2. Contacto vetilla-roca y vetilla-halo

Relacionado a los aspectos geométricos de la interface vetilla-roca o vetilla-halo, considerando dos aspectos:

- **Planaridad:** Considera la forma de la línea definida por el contacto vetilla-roca o vetilla-halo, diferenciando si es una línea recta, o una línea sinuosa. En el caso si es discontinuo se identifica como irregular.



Fotografía 4.3: Planaridades contacto vetilla roca. a) recta. b) sinuosa. c) irregular

- **Nitidez:** Si la relación de contacto vetilla-roca o vetilla-halo, se aprecia con claridad se identifica como nítida y si hay dificultad para distinguir el contacto es difusa.

4.4.3. Angulo de vetilla

Corresponde a la inclinación de la vetilla, con respecto a un eje, en este trabajo es el eje de la probeta ensayada. Para la descripción se le asigna la letra griega α , este ángulo se debe medir desde el eje de la probeta hacia la inclinación de la vetilla (Fotografía 4.4) con un *geoflex*. Es una de las propiedades geométricas más influyente, ya que incide en propiedades de ruptura y resistencia de las vetillas, como se verá en los capítulos posteriores.



Fotografía 4.4: Angulo (α) de la vetilla respecto al eje de probeta. (Elaboración propia).

4.4.4. Rugosidad

El índice de rugosidad de la vetilla, cuya sigla es JRC (*Joint Roughness Coefficient*) es una medida de la aspereza de las discontinuidades de la roca, en este caso de las vetillas, siendo un parámetro

importante en la caracterización de estas. Una discontinuidad rugosa tendrá una resistencia al corte mayor que una lisa en la misma roca. La determinación del JRC, se hace mediante la comparación visual de la vetilla con los perfiles de rugosidad (Figura 4.1) obtenidos por (Barton & Choubey, 1977), los que además incluyen los parámetros descriptivos obtenidos por (Barton, 1987).

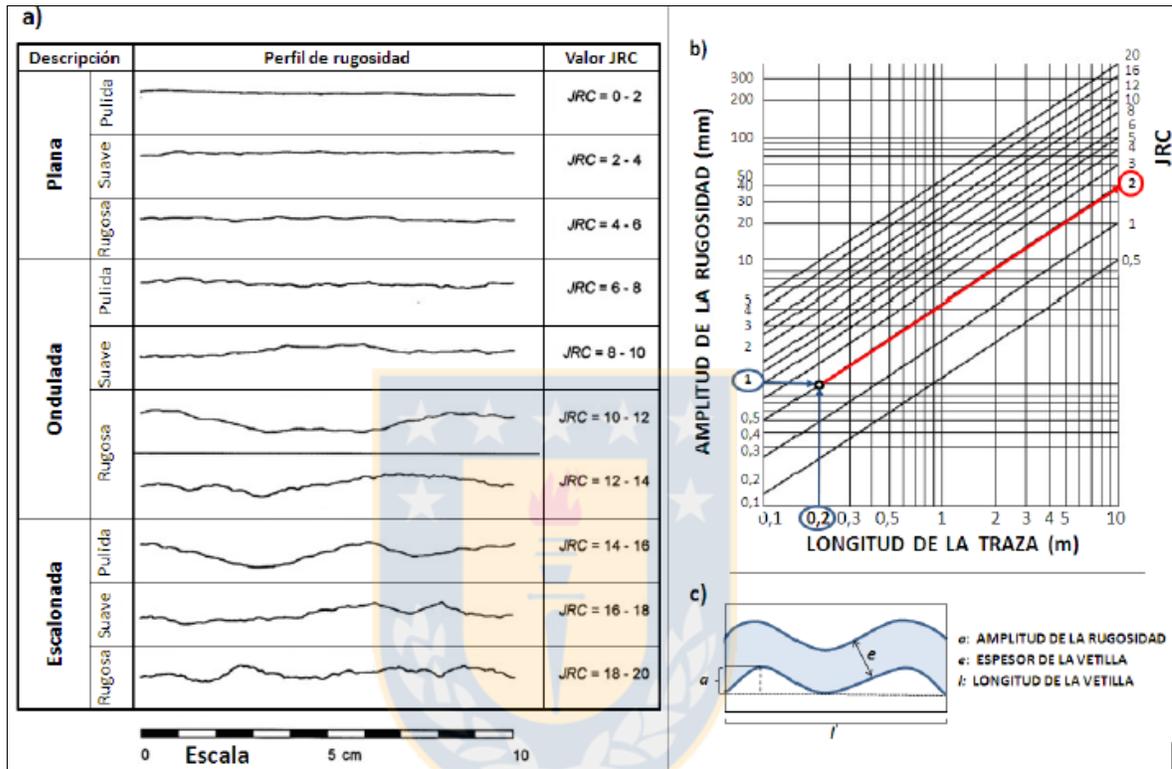
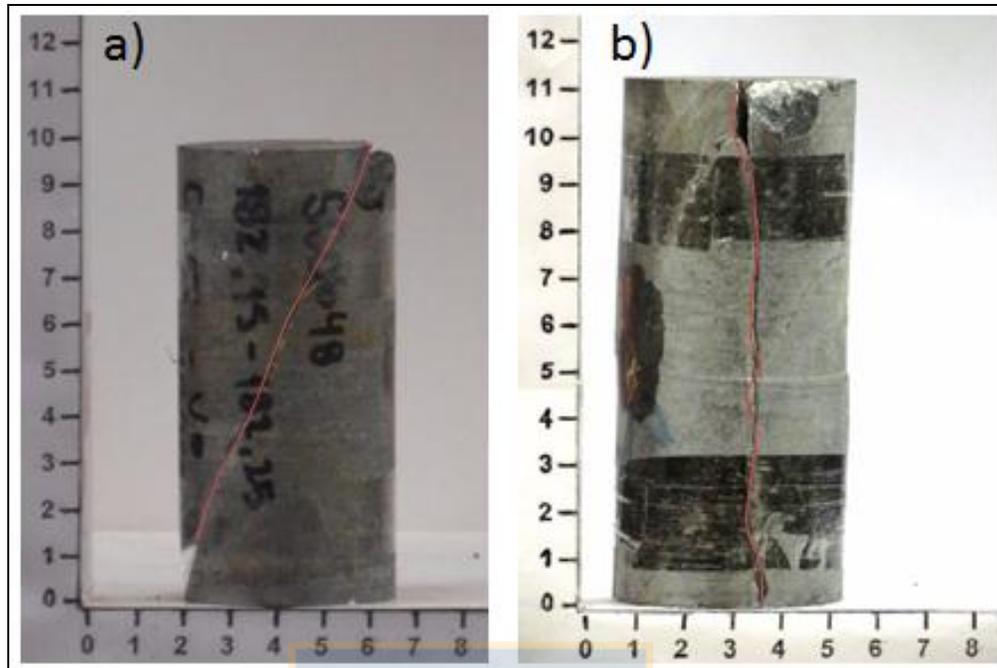
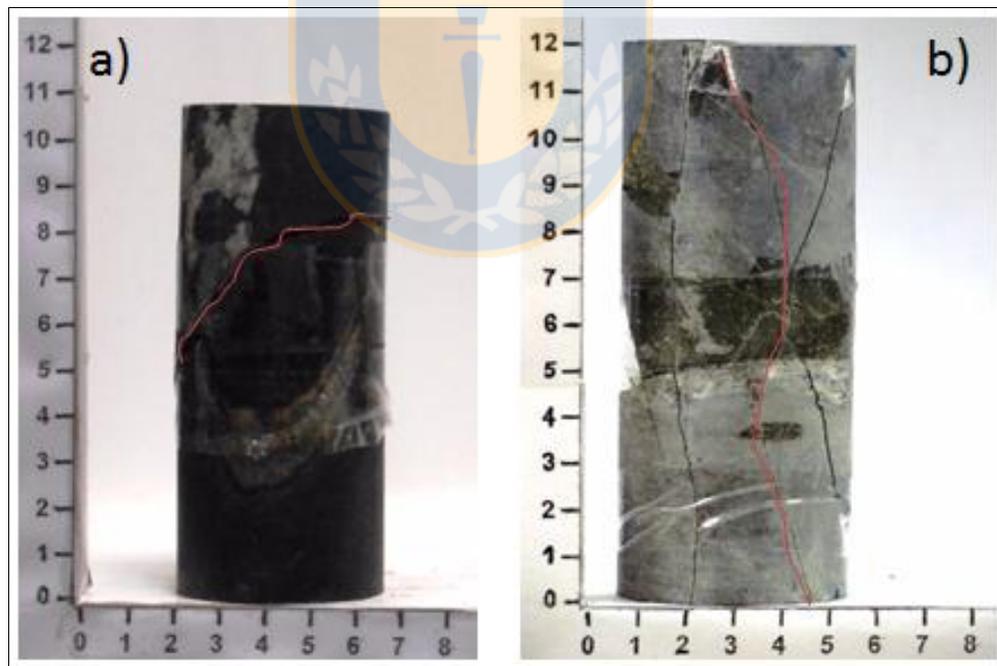


Figura 4.1: Estimación del índice de rugosidad *JRC*. En a) perfiles de rugosidad para el *JRC*, a una escala de 10 cm tomada de Barton y Choubey (1977), se incluyen también parámetros descriptivos obtenidos de Barton (1987). En b) grafica para estimar la rugosidad a partir de su amplitud y la longitud de la traza de la estructura. En c) esquema de una vetilla indicando su espesor, longitud y amplitud de la rugosidad.

Otra forma de estimar la rugosidad de la vetilla es proyectando el valor de la longitud de la traza de la vetilla y la amplitud de la rugosidad. Este método, indica que, a una escala de 10 cm, el valor de *JRC* varía de un mínimo de 0, en el caso de estructuras planas y lisas (Fotografía 4.5), hasta onduladas y escalonadas (Fotografía 4.6).



Fotografía 4.5: Probetas post-ensayo 1. a) ruptura con rugosidad 4. b) ruptura con rugosidad 6.



Fotografía 4.6: Probetas post-ensayo 2. a) ruptura con rugosidad 8. b) ruptura con rugosidad 10.

5. ENSAYOS GEOTÉCNICOS

5.1. Generalidades

En mina El Teniente el proceso de explotación es mediante el método *Panel Caving*, en el cual ocurre una fragmentación del macizo rocoso. Las características geométricas y propiedades geotécnicas de las discontinuidades son relevantes en el yacimiento, ya que se ha observado que las vetillas minerales juegan un rol relevante en el control de la fragmentación y la sismicidad durante la propagación del *Caving* (Brzovic & Villaescusa, 2007; Brzovic, 2009). Para entender el comportamiento mecánico de las vetillas y del macizo rocoso se deben tener en cuenta los siguientes conceptos:

- **Vetilla:** Es una discontinuidad geológica sellada por rellenos minerales, cuya resistencia varía desde muy alta (cuarzo) a muy baja (yeso), estos se generan por la acción de fluidos hidrotermales de alta temperatura los que además generan un halo de alteración de la roca caja.
- **Roca Primaria:** Corresponde a una roca mineralizada que ha permanecido sin cambios desde su formación. En mina El Teniente en concepto de roca primaria, define a una roca dura que presenta mineralógicamente sulfuros de Cu, Fe y Mo, que se expresa como el relleno de vetillas o diseminada, que no ha sido afectada por procesos de enriquecimiento secundario o lixiviación, es una roca heterogénea debido a la presencia de un enrejado de vetillas selladas y/o a causa de una textura brechosa.
- **Roca Intacta:** Volumen de roca “pequeño”, que contiene todos los componentes de la roca que se pretende estudiar, en este caso corresponde a las vetillas mineralizadas, el tamaño corresponde al de las probetas utilizada en los ensayos de mecánica de rocas.
- **Macizo Rocos:** En mina El Teniente es definido como un volumen “grande” de roca que se desea analizar, corresponde al volumen representativo de la condición estudiada, por lo que varía en un amplio rango, desde un pilar de producción hasta un nivel de escala mina (Karzulovic, 2006).

En el manual de Estándares y Metodologías para el trabajo de Geología de Minas 2013 (SGL-I-123/03,2003), previo a la estimación de las propiedades del macizo rocoso, se deben estimar las propiedades de la roca intacta (Figura 5.1). Con estos valores, más factores de operación y condición del entorno se efectúa el escalamiento de las propiedades de roca intacta a las del macizo rocoso.

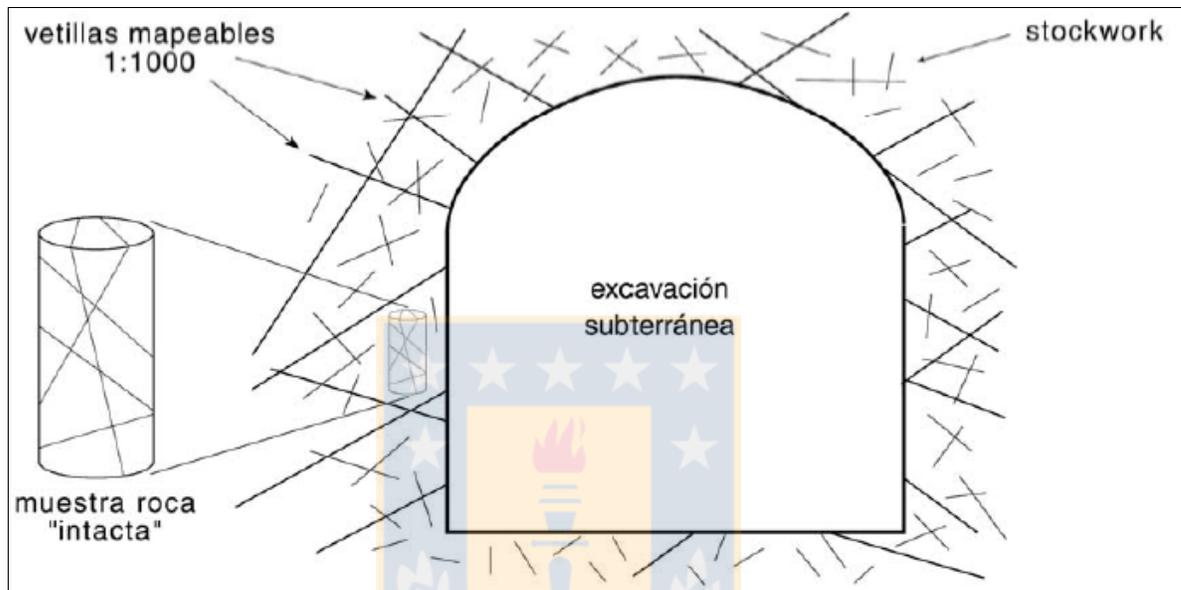


Figura 5.1: Esquema de roca intacta y su relación con el macizo rocoso. Tomado de Manual de Estándares y Metodologías para el trabajo de Geología de Minas, 2013.

Las propiedades geotécnicas de las vetillas que deben ser estimadas en la caracterización de la roca intacta, se obtienen a partir de ensayos geotécnicos en laboratorios de mecánica de rocas. En Chile existen en el sector privado, tres laboratorios los cuales son; CIMM T&S (Santiago), mecánica de Rocas Ltda. (Calama) y MR & G Ltda. (Santiago). También cuentan con laboratorios los departamentos de minas de las Universidades de Chile, Santiago y La Serena, también el departamento de Ingeniería Estructural de la Pontificia Universidad Católica. Las pruebas de laboratorio se realizan sobre muestras obtenidas en terreno con una descripción geológica acuciosa previa, y deben seguir ciertas normas propuestas por estándares internacionales para una adecuada caracterización geotécnica. Las probetas estudiadas en esta memoria de título siguen los estándares establecidos por las instituciones *American Society for Testing Materials (ASTM)* e *International*

Society for Rock Mechanics (ISRM). Los ensayos geotécnicos en probetas de rocas, considerados en este trabajo son los siguientes:

Ensayos de resistencia

- UCS: Resistencia a la compresión simple, medida (MPa)
- TS: Resistencia al corte de la roca intacta (MPa)

Ensayos a la compresión triaxial

- Estos ensayos permiten definir los parámetros del criterio de falla de Hoek & Brown:
- C: Cohesión de la roca intacta, medida en MPa o KPa
- Φ : Angulo de fricción interna, medido en grados
- σ_{ci} : Resistencia en compresión no confinada de la roca intacta (MPa)

Evaluación de la deformabilidad

- $E_{e,d}$: Modulo de Young estático, dinámico (GPa)

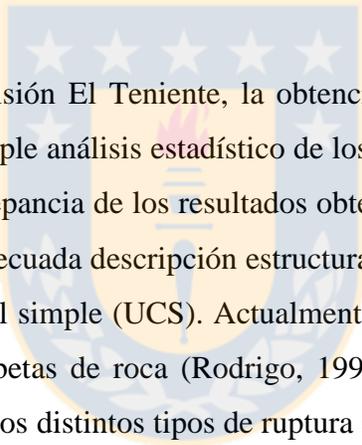
5.2. Muestreo

Las muestras fueron obtenidas de sondajes diamantino HQ (65,3 mm de diámetro), consiguiendo probetas cilíndricas de rocas con el diámetro antes mencionado, para ensayos de compresión uniaxial y triaxial. En el muestro se buscó, caracterizar la misma litología, pero para diferentes sectores en producción de mina El Teniente los cuales son:

- La Huifa
- Pacifico Superior
- Recursos Norte
- Esmeralda

Para el envío de muestras al laboratorio se les asigna un código respectivo para cada sector, seguido de un numero de correlación (Anexo I). Posteriormente una descripción de los parámetros mencionados en los capítulos anteriores.

El Teniente plantea una interesante conclusión “... *Por lo tanto puede concluirse que los medios actualmente utilizados en forma “estándar” para evaluar las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, solo son aplicables en el caso de rocas fracturadas, con una cantidad de sistemas estructurales tal que se tiene un comportamiento isotrópico del macizo. Desgraciadamente, este no es el caso del macizo rocoso primario de El Teniente.*”. Tomando en cuenta lo anterior, solo la unidad de Brecha Braden es la única que presenta un comportamiento isotrópico y homogéneo en sus propiedades. Sin embargo, las unidades restantes (CMET, Porfido Dacítico, Porfido Diorítico y Tonalita) presentan un *Stockwork* polidireccional de vetillas selladas con diferente composición mineralógica, lo que hace que el escalamiento de las propiedades geotécnicas sea en un medio anisotrópico, es decir considerando las orientaciones y resistencia de los distintos tipos de vetillas y fallas mayores que interceptan el macizo rocoso considerado.



En décadas pasadas en la División El Teniente, la obtención de los parámetros y propiedades geotécnicas se basaba en el simple análisis estadístico de los resultados de los diferentes ensayos. Sin embargo, debido a la discrepancia de los resultados obtenidos, varios autores manifestaron la necesidad de contar con una adecuada descripción estructural de las probetas que son sometidas a ensayos de compresión uniaxial simple (UCS). Actualmente, se realiza una descripción previa y posterior al ensayo de las probetas de roca (Rodrigo, 1999). Este procedimiento ha permitido cuantificar de manera objetiva los distintos tipos de ruptura asociados a las probetas ensayadas de mina El Teniente. Una estadística relativa al modo de ruptura en rocas andesíticas (Figura 5.2), muestra que entre el 70% y el 87% de las probetas presentan tipos de ruptura en las cuales hay participación de vetillas (Rodrigo, 1999; Marambio et al, 1999). Observaciones en los puntos de extracción indican que el 95% de los bloques de andesita (colpas), tienen sus caras definidas mayoritariamente por vetillas. La participación de estas últimas constituye alrededor del 95% de las superficies que delimitan los bloques de roca. Lo anterior genera una marcada anisotropía estructural, por lo que la obtención de los parámetros geotécnicos es compleja, de ahí la importancia de contar con una metodología objetiva y reproducible, para seleccionar y analizar los resultados de ensayos de resistencia de compresión simple, confinada (triaxial) y deformación.

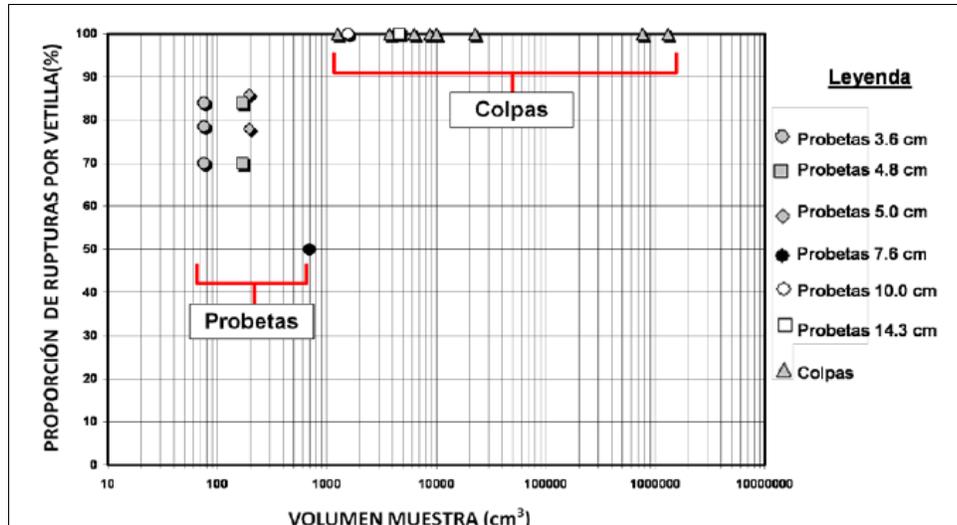


Figura 5.2: Gráfico log-normal entre porcentajes de ruptura por vetillas en probetas de distinta longitud y colpas contra volumen de la muestra en la unidad CMET en mina El Teniente. Tomado de Pereira y Russo, 2000.

5.4. Ensayo de resistencia a la compresión simple UCS

La resistencia a la compresión simple (UCS) es un ensayo mecánico que se aplica sobre materiales, en este caso para el estudio de roca (Figura 5.3) en el cual se busca determinar su resistencia a la compresión y en algunos casos la deformación que sufre la roca durante el test.

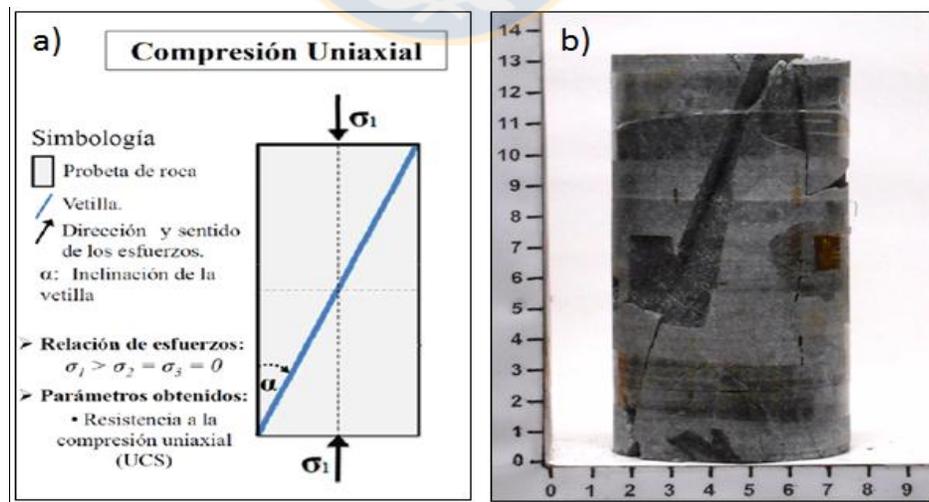


Figura 5.3: a) Esquema de ensayo de compresión uniaxial simple (UCS) y parámetros que intervienen. b) Probeta de roca post- ensayo de compresión.

Consiste en someter una probeta cilíndrica estandarizada a un *stress* compresivo (σ_1) y aumentarlo de forma progresiva hasta que se consiga la ruptura. El esfuerzo máximo soportado por la roca antes de romper corresponde a su resistencia a la compresión simple medido en MegaPascales (MPa). La relación entre los esfuerzos aplicados es:

$$\sigma_1 \neq 0; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

5.4.1. Preparación de la muestra

La ASTM en Farmer (1983), establece una serie de requerimiento respecto a los especímenes que serán testeados mediante ensayo de compresión simple:

- Deben considerarse probetas cilíndricas de rocas no inferiores al diámetro de perforación NQ (44 mm). Los ensayos estudiados en este trabajo consideran un diámetro de 63,5 mm para las probetas que son obtenidas de sondajes con barras de perforación HQ y 44 mm para las NQ.
- El diámetro D de las probetas debe ser al menos 10 veces mayor que el tamaño del grano más grande de la roca.
- La relación largo/diámetro (L/D) debe ser lo suficientemente grande para evitar interferencias en los planos potenciales de falla a 45° y con un largo que evite que actúe como una columna; para satisfacer ambos criterios, se recomienda una relación L/D comprendida entre 2 y 3. En esta memoria de título se consideró una relación L/D igual a 2 lo que se traduce en una longitud aproximada de 127 mm, con un diámetro de 63,5 mm.
- Las bases de la probeta deben ser planas y paralelas entre sí, y perpendiculares al eje longitudinal de la probeta, así se asegura que la carga de compresión axial aplicada se distribuya uniformemente entre las caras.
- Se requieren al menos 5 ensayos de la misma roca, en este trabajo de las mismas vetillas, para asegurar la confiabilidad de los datos obtenidos.

5.4.2. Procedimiento

El ensayo se realiza sobre una probeta cilíndrica de roca que contiene una o más vetillas, de espesores menores a 2 mm, la fuerza debe ser aplicada gradualmente hasta el momento en que se produce la ruptura, la variable de control en la máquina de ensayo es la fuerza, los parámetros a controlar son la magnitud y velocidad de carga. En los ensayos de laboratorio influyen factores, que están relacionados a la naturaleza de la roca intacta, respecto a esto los más importantes son:

- Forma y volumen de la probeta.
- Preparación y tallado de la probeta.
- Dirección de aplicación de la carga, en rocas con anisotropía causada por la presencia de una vetilla, por ejemplo.
- Velocidad de aplicación de la carga.

Con el fin de minimizar la influencia de la velocidad de aplicación de la carga, la ISRM (1979) recomienda rangos de carga de 0,5 a 1 Mpa/s, asociado a un tiempo de 5 a 10 minutos hasta alcanzar la resistencia *peak* de la probeta de roca, una aplicación rápida de fuerza puede producir rupturas violentas y una sobrevaloración de la resistencia de la probeta. La máquina utilizada para los ensayos de compresión simple (Figura 5.4), corresponde a una desarrollada por la Escuela de minas de Kalgoorlie, en Australia (WASAM).

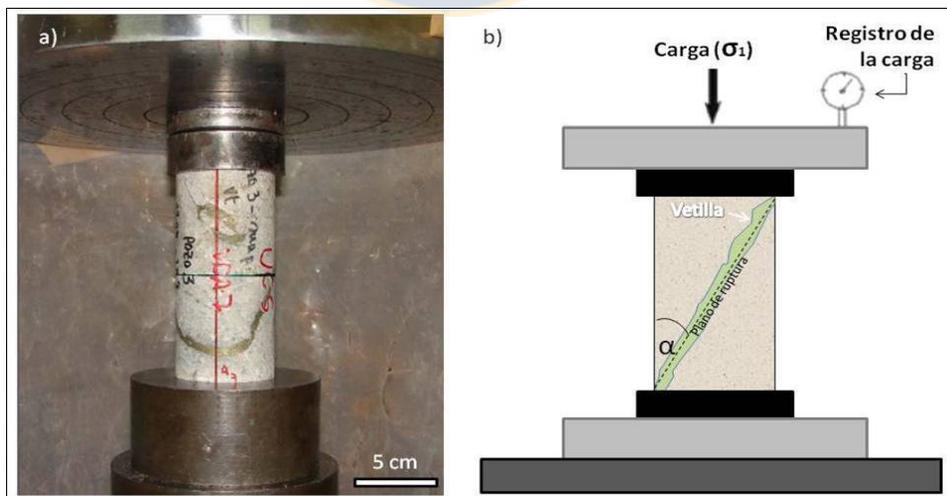


Figura 5.4: Máquina para efectuar ensayos de compresión simple. a) prensa desarrollada por WASM. En b) esquema del ensayo que incluye los parámetros de la probeta que intervienen (Tomado de De los Santos, 2011).

Del ensayo obtendremos la carga axial de ruptura Q (kg), y la resistencia a la compresión uniaxial estará dada por:

$$\text{UCS: } Q/A \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Siendo A , el área en que se aplica la carga axial (cm^2). Además, se debe considerar que 1kg/cm^2 equivale 0.098066 MPa .

5.5. Ensayo de compresión triaxial

El ensayo busca recrear las condiciones de la roca *in situ*, sometiéndolas a condiciones de esfuerzos confinantes (σ_3), mediante la aplicación de presión hidráulica uniforme alrededor de la probeta. La relación entre los esfuerzos aplicados en el ensayo es:

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

El ensayo es realizado en base a la norma ASTM D-2664-95 que concuerdan con los estándares de la ISRM. Al igual que los ensayos de compresión uniaxial, la relación largo/diámetro (L/D) debe ser igual. A partir de una serie de ensayos se puede determinar la envolvente de resistencia de las probetas estudiadas, de donde se obtienen los valores de sus parámetros resistentes de cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ), correspondientes al criterio de falla de Mohr-Columb (Figura 5.5).

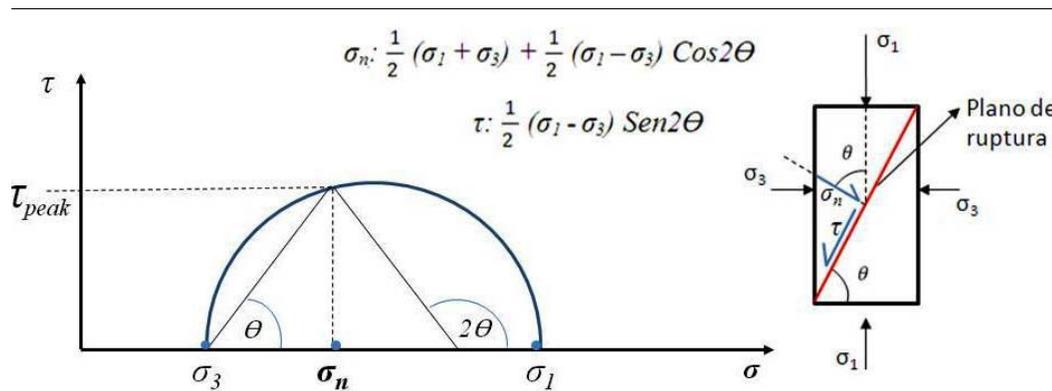


Figura 5.5: Círculo de Mohr-Columb. Esquema para representar el estado de los esfuerzos al que es sometido una probeta en un ensayo de compresión confinada, se indica además la fórmula para obtener los esfuerzos de corte y normal.

5.5.1. Preparación de la muestra

El ensayo de compresión confinada es realizado en base a la norma ASTM-D-2664-95a, que concuerdan con los estándares ISRM. La relación L/D debe ser igual a 2, como se mencionó anteriormente, con sus caras paralelas y con inclinaciones de las vetillas entre 25° y 45° preferencialmente. Las muestras analizadas fueron obtenidas de sondajes HQ, que corresponden a probetas de un diámetro aproximado de 65,5 mm y un largo de 127 mm aproximadamente.

5.5.2. Procedimiento

Para evaluar la resistencia en condiciones confinantes, el procedimiento consiste en aplicar una carga de compresión axial sobre la probeta, la que es sometida en forma simultánea a una presión de confinamiento hidráulica lateral constante, hasta que se produce la ruptura en la probeta. El ensayo se realiza sobre probetas cilíndricas introducidas en cilindros de acero (Figura 5.6 a) en cuyo interior le es aplicada una presión hidráulica, que incide en las paredes de la probeta (Figura 5.6 b).

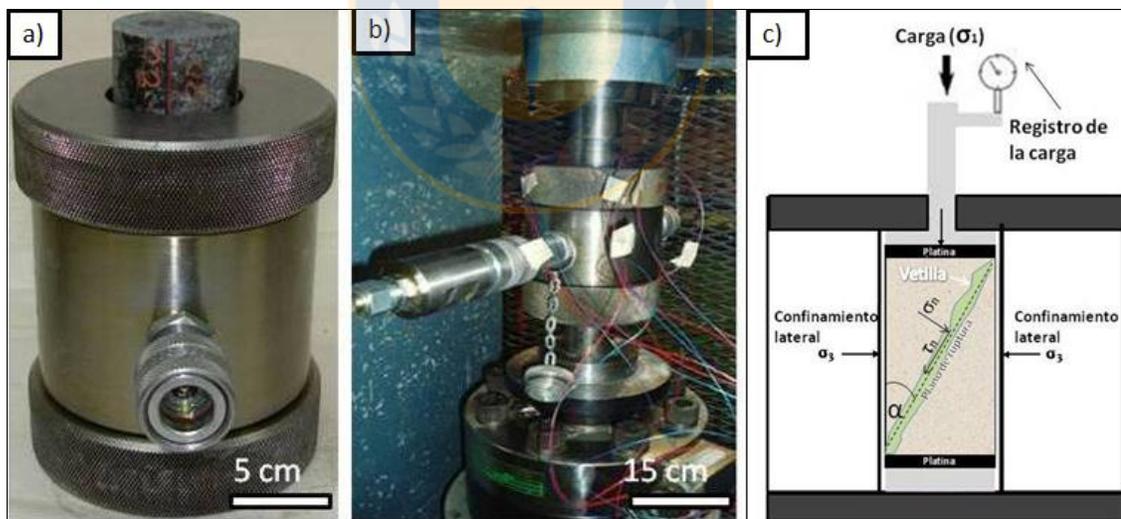


Figura 5.6: Máquina para efectuar ensayos de compresión triaxial. En a) fotografía de la cámara, desarrollada por la WASM, esta le confiere confinamiento a la probeta. En b) fotografía del equipo montado conformado por la prensa, la cámara triaxial y la muestra dentro de esta última. En c) esquema del ensayo en el que se incluyen los parámetros que intervienen

Al inicio del procedimiento se le aplica la carga axial σ_1 y la presión confinante σ_3 , de tal forma que sean aproximadamente iguales a los rangos de ambos esfuerzos. Una vez alcanzado el nivel de

presión confinante (σ_3) deseado, se aplica la carga axial hasta conseguir el fallamiento de la probeta (esfuerzo máximo). La presión confinante debe mantenerse constante a lo largo de todo el ensayo. Los datos a registrar durante el experimento son el esfuerzo axial σ_1 , el ángulo de los planos de ruptura (α) y el confinamiento aplicado (σ_3). Los resultados de ensayos de compresión triaxial dependerán, además de las características de la roca, de la presión confinante aplicada de tal forma que la resistencia máxima aumenta mientras más alto sea el valor del confinamiento. El valor de la resistencia compresiva para un determinado valor de σ_3 , se obtiene dividiendo la fuerza por el área de la sección de la probeta en donde:

$$\sigma_1 = Q/A$$

σ_1 = Esfuerzo máximo o resistencia a la compresión triaxial (Mpa)

Q= Carga de ruptura en compresión triaxial (kg/cm²)

A: Área en que se aplica la carga axial (cm²)

1 kg/cm² = 0,098066 Mpa

5.6. Tipos de ruptura en probetas

Los ensayos de compresión uniaxial simple y compresión confinada provocan fallamiento en las probetas, manifestándose en distintos tipos de rupturas, que consisten en espacios abiertos o fracturas generadas en la probeta como respuesta a los ensayos geotécnicos, en mina El Teniente estas rupturas están dominadas en su mayoría por vetillas. Debido a la gran importancia de estas, como ya se ha señalado anteriormente, se ha hecho una revisión de las probetas ensayadas durante los últimos años, agrupándolas en 5 tipos de rupturas basadas a la clasificación hecha por Marambio y otros (1999), que se describen a continuación:

5.6.1. Tipo A: Ruptura por roca

Esta ruptura está definida por una o más superficies irregulares, que cruzan de manera indiferenciada tanto a la roca como a las vetillas (Figura 5.7), sin canalizarse por estas últimas, el resultado es una probeta fracturada en múltiples fragmentos.

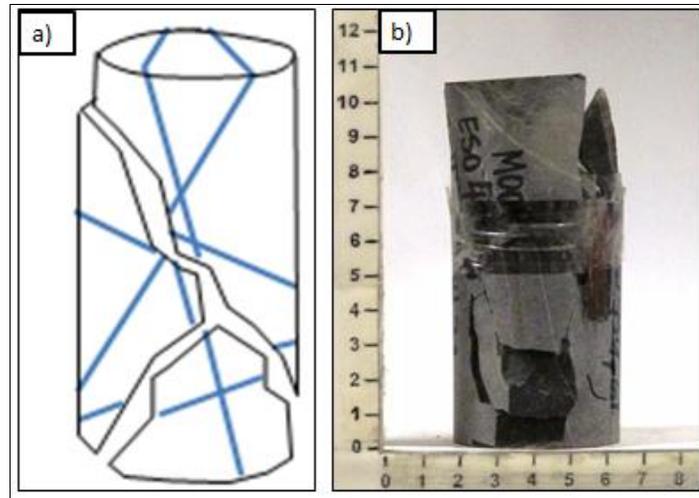


Figura 5.7: a) Esquema ruptura tipo A, b) Probeta post-ensayo con ruptura A.

5.6.2. Tipo B: Superficie mixta

La fractura ocurre simultáneamente por roca y vetillas. Este tipo de ruptura puede dividirse en dos subtipos:

B1: Superficie única mixta

La superficie de ruptura es una sola, la cual se propaga en parte por roca y en parte por vetilla. Dividiendo la probeta en dos trozos (Figura 5.8).

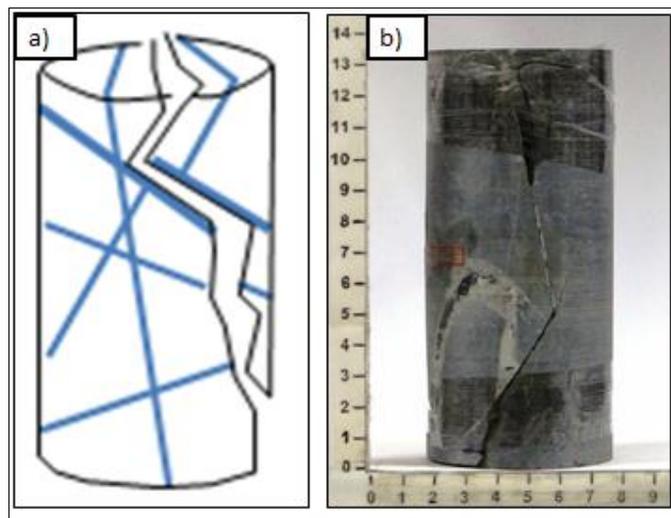


Figura 5.8: a) Esquema ruptura tipo B1, b) Probeta post-ensayo con ruptura B1.

B2: Mixto múltiple

Presenta varias superficies de fractura simultáneas propagándose por roca y vetillas (Figura 5.10), rompiendo la probeta en varios fragmentos.

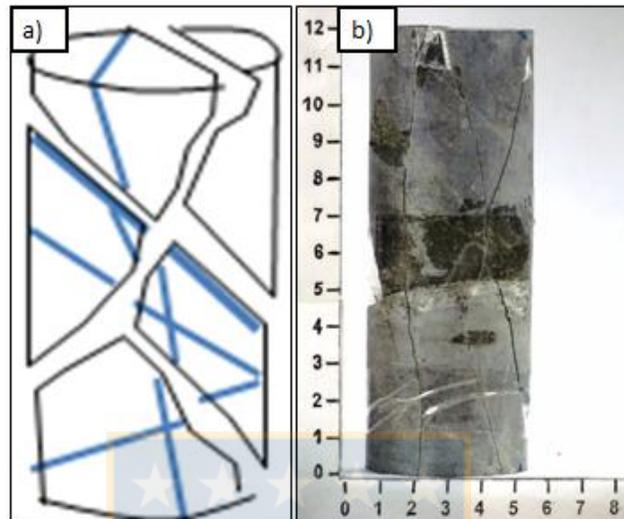


Figura 5.9: a) Esquema ruptura tipo B2, b) Probeta con ruptura B2.

5.6.3. Tipo C: Ruptura por varias vetillas

Este tipo de ruptura describe a aquellas probetas que rompieron, a lo menos a través de dos vetillas simultáneamente (Figura 5.10), sin afectar la roca

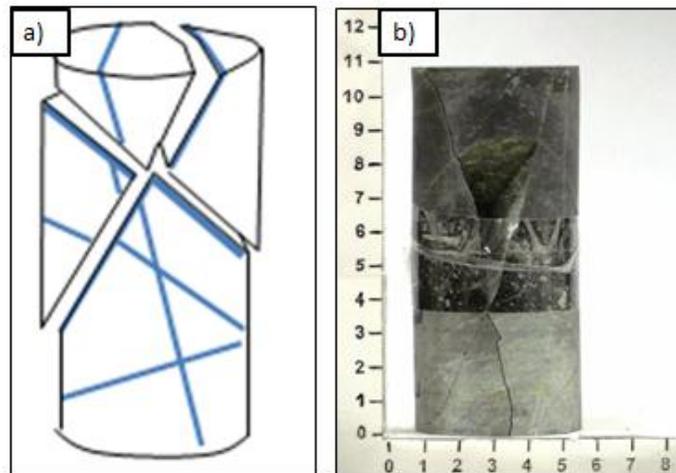


Figura 5.10: a) Esquema ruptura tipo C, b) Probeta post-ensayo con ruptura C.

5.6.4. Tipo D: Ruptura por una vetilla

La probeta falla solo por una vetilla. Se distinguen dos subtipos:

D1: Superficie única

Ocurre solo una superficie de ruptura, en respuesta a los ensayos. La probeta se divide en dos trozos (Figura 5.11).

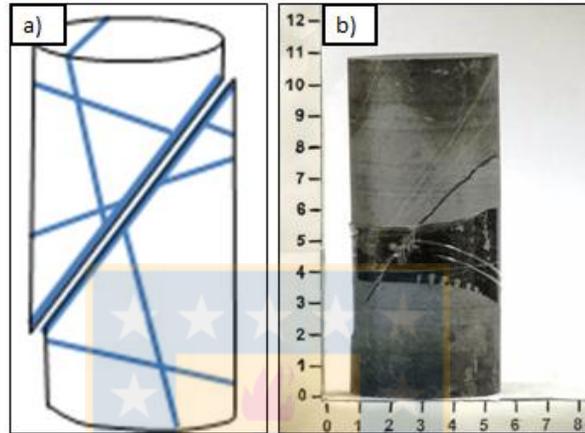


Figura 5.11: a) Esquema ruptura tipo D1, b) Probeta post-ensayo con ruptura D1.

D2: Superficie múltiple

Presentan varias superficies de fractura, una desarrollada en la vetilla y los demás planos de ruptura se propagan desde la vetilla hacia la roca (Figura 5.12).

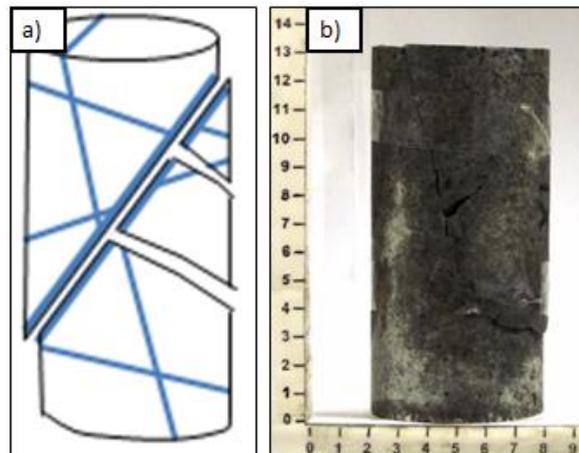


Figura 5.12: a) Esquema ruptura D2, b) Probeta post-ensayo con ruptura D2.

5.7. Ensayos de deformación

También denominado Modulo Elástico Estático, este ensayo se realiza sobre la base de la norma ASTM D-2938-95. La forma de la probeta debe cumplir con una relación L/D igual a 2, y debe tener sus dos caras basales paralelas entre sí, a fin de que la carga de compresión axial se distribuya de manera uniforme. Los valores de los módulos son obtenidos a partir de los ensayos de compresión uniaxial simple, en los cuales también se ha medido la deformación axial y radial.

La deformación medida en las probetas queda registrada mediante el uso de *strain gauges*, que permiten la obtención de una curva *stress* versus *strain* (Figura 5.13). En la interpretación de la curva es posible destacar dos zonas:

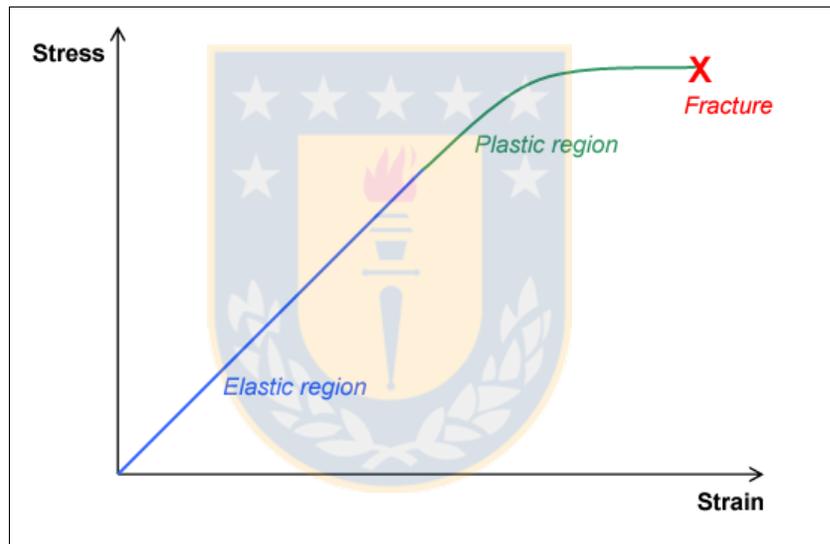


Figura 5.13: Zona de deformación elástica y plástica en grafico *stress* v/s *strain*. (Tomado de Barahona 2011).

Zona elástica: Es la región a bajas deformaciones, al principio de la curva, donde se cumple la ley de Hooke.

$$\sigma = E\varepsilon$$

Donde σ es el esfuerzo de compresión aplicado, ε el *strain* o deformación y E la constante de proporcionalidad, que corresponde al módulo de elasticidad de Young. La pendiente de este

segmento lineal es el módulo de elasticidad E . Este parámetro puede ser interpretado como la rigidez de un material a ser deformado elásticamente. Un material elástico pierde las deformaciones causadas por la aplicación de una fuerza, cuando esta termina, vuelve a su forma original.

Zona plástica: Marcada por el fin del comportamiento lineal de la curva, es decir, la deformación cambia de elástica a plástica. La tensión necesaria para continuar la deformación aumenta hasta un máximo, en donde si es mantenido este esfuerzo se producirá la ruptura. En esta zona la deformación es permanente.

Para la obtención de los Módulos Elásticos Estáticos (Módulos de Young y Razón de Poisson), se utilizan estampillas para medir la deformación mediante un arreglo eléctrico en la probeta, este sistema se denomina *Strain Gauge* (Figura 5.14) y se define según el “Punto de *Wheatstone*”, que es un circuito que se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente (Figura 5.15), obteniendo fácilmente las lecturas que luego son procesadas para obtener las deformaciones transversales y longitudinales en función de los intervalos de la carga aplicada.

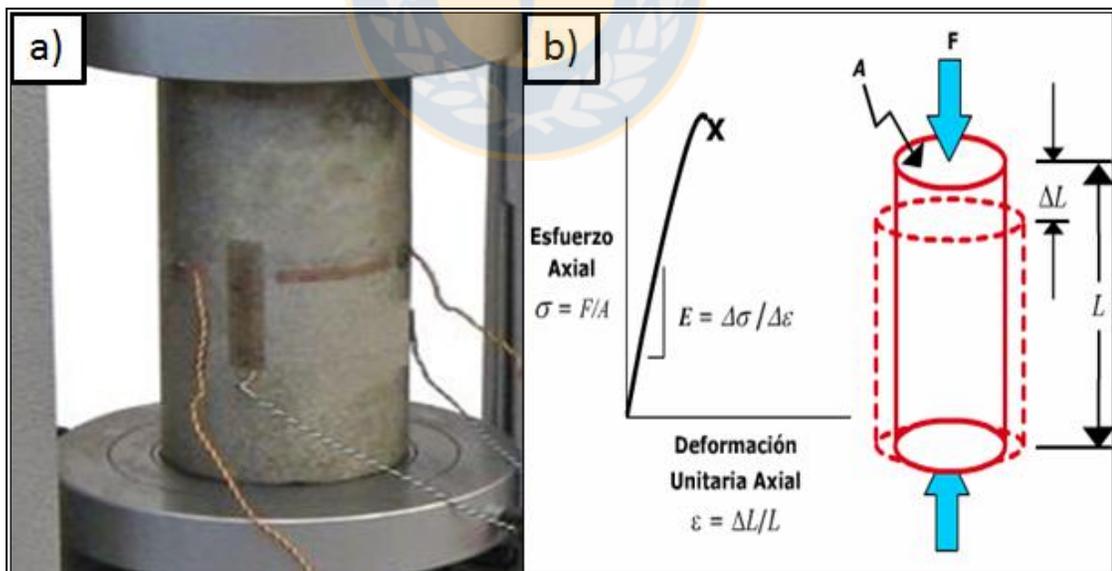


Figura 5.14: Ensayo para medir la deformación en probeta. En a) Sistema *Strain Gauge* y su ubicación en la probeta. En b) Relación entre la compresión uniaxial simple y la deformación que sufre la probeta durante el ensayo.

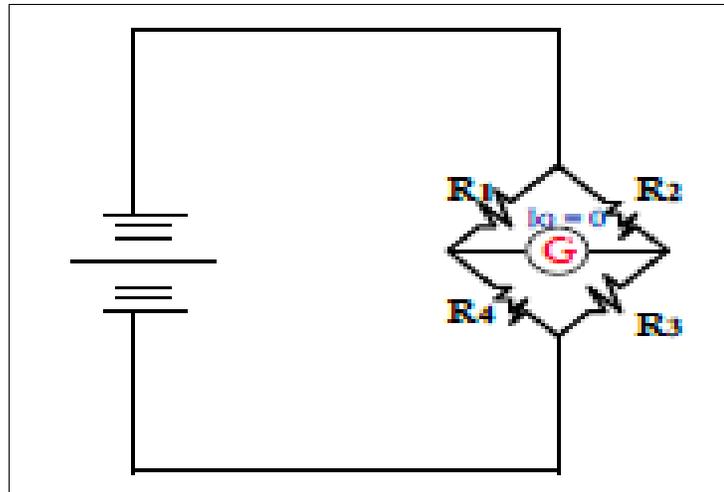


Figura 5.15: Arreglo eléctrico en el cual se basa la medición de deformación con Strain Gauges. (Tomado de Informe resultados de ensayos geotécnicos para el proyecto La Huifa, El Teniente 2005.

Los parámetros considerados para calcular Modulo de elasticidad o Modulo de Young son los siguientes:

- **Modulo Tangente de Young (E_{tan}):** El modulo Tangente de Young se mide a un determinado nivel de tensión, que es un porcentaje fijado de la resistencia final. Es conveniente que se considere a un nivel de 50% de la resistencia a la compresión uniaxial final. La unidad de medida es Gigapascales (Gpa).
- **Modulo Secante de Young (E_{sec}):** Medido desde una tensión cero hasta un porcentaje prefijado de la resistencia final, el cual equivale al 50% de esta. Se mide en Gpa.
- **Modulo Medio de Young (E_{med}):** Determinado a partir de la pendiente media de la porción aproximadamente recta de la curva de tensión axial, medido en Gpa.

El producto de la medición de deformación durante el ensayo es un gráfico de deformación versus el esfuerzo aplicado (Figura 5.16). A partir de los cuales, como se mencionó anteriormente, se obtiene un módulo de elasticidad de Young (E). Los valores considerados se calculan como la pendiente en el punto del 50% del esfuerzo máximo (línea roja) o como la pendiente de la tangente en el punto de 50% del esfuerzo máximo (línea amarilla). El ensayo en probetas origina un gráfico como el de la Figura 5.17 en donde se aprecia la deformación axial y transversal.

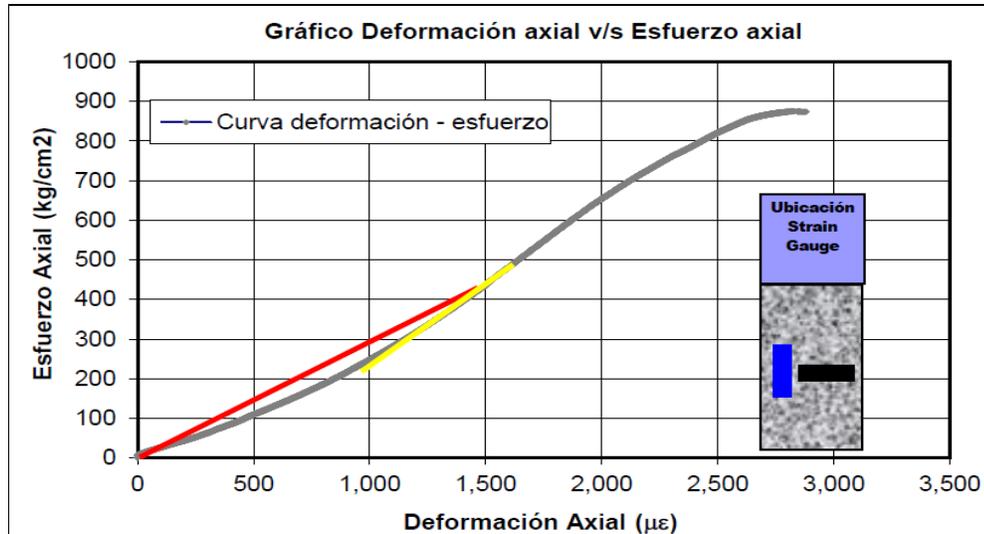


Figura 5.16: Grafico stress/strain. Se destaca en rojo la línea secante en el 50% de la resistencia, cuya pendiente será el módulo de Young secante. En amarillo la recta tangente, su pendiente es el módulo de Young tangente.

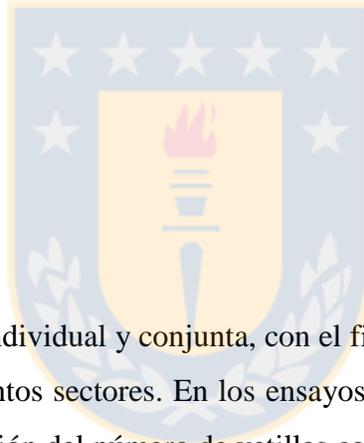


Figura 5.17: Grafico deformación v/s resistencia para una probeta del sector La Huifa.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Los resultados de los ensayos de compresión simple, compresión confinada y deformación están representados por medio de gráficos de dispersión, circulares, *Box-Plot* y de tendencia. Primeramente, se analizan las características de las vetillas en probetas, para cada tipo de ensayo geotécnico, entre las cuales destacan la rugosidad, relleno mineral de la vetilla, tipo de ruptura, ángulo de vetilla y valores de resistencia. Una vez estudiados estos parámetros, se confeccionaron los gráficos correspondientes a la relación entre los valores de resistencia y deformación de los ensayos versus la mineralogía, abundancia, ángulo y geometría de las vetillas. Estas relaciones se aplican para 4 los sectores de producción de mina El Teniente, los cuales son:

- La Huifa
- Pacífico Superior
- Esmeralda
- Recursos Norte



Estos se analizaron en forma individual y conjunta, con el fin establecer el comportamiento de las probetas y vetillas en los distintos sectores. En los ensayos de compresión simple, se elaboraron gráficos de resistencia, en función del número de vetillas contenidas en las probetas y sus ángulos de ruptura. También curvas de Jaeger que permiten comprender el comportamiento de las rupturas con relación a sus ángulos y valores de resistencia. Se evaluó la deformación de las probetas, para cada uno de los sectores en estudio y la influencia de algunos tipos de vetillas en la deformación de estas. Posteriormente en los ensayos de compresión confinada se elaboraron envolventes de resistencia para distintos tipos de vetillas, en función de los esfuerzos principales, normales y de corte, con la finalidad de observar la influencia de las vetillas en las envolventes de falla. La relación entre las rugosidades y los valores de compresión simple se estudiaron para 3 tipos de vetillas principales y para las rupturas D1 y B2. Las curvas de resistencia se elaboraron para estos ensayos, con la finalidad de poder establecer comparaciones en relación con los ensayos de compresión simple. Los resultados se compararon con los valores estándares del CMET de mina El Teniente (Tabla 6.1).

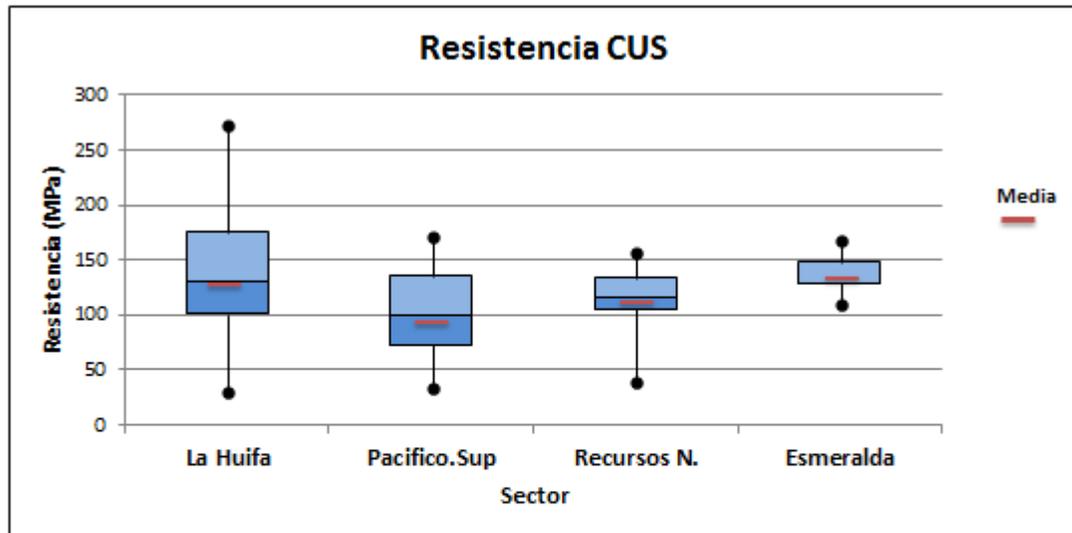
Tabla 6.1: Valores de propiedades geotécnicas de roca intacta para mina El Teniente en 4 litologías; CMET, Pórfido Dacítico, Diorita y Brecha Braden. En rojo se destaca la unidad CMET y en azul los valores de estándar de las propiedades analizadas en este estudio. (Tomado de Manual de Estándares y Metodologías 2013).

TABLA 8.1: PROPIEDADES GEOTÉCNICAS ROCA INTACTA MINA EL TENIENTE								
Parámetros	CMET primario	coef. var. (%)	Pórfido Dacítico	coef. var. (%)	Diorita	coef. var. (%)	Brecha Braden Concreto	coef. var. (%)
E [GPa]	60	20	30	30	45	20	25	25
ν	0.16	40	0.18	40	0.21	30	0.23	30
B [GPa]	29.4	30	15.6	35	25.9	25	15.4	27
G [GPa]	25.9	30	12.7	35	18.6	25	10.2	27
γ [ton/m ³]	2.80	2	2.62	4	2.73	3	2.61	1
η [%]	4.40	32	3.00	17	4.70	49	7.70	9
UCS [MPa]	120	30	110	30	140	3	90	30
T_i [MPa]	14	25	12	20	15	30	6	20
E/UCS	500	25	273	30	321	25	278	27
UCS/ T_i	8.6	27	9.2	25	9.3	30	15	25
V_p [m/s]	6000	8	4800	6	5300	8	4300	8
V_s [m/s]	3200	9	2900	7	3000	10	2600	10
m_i	9.1	23	20.2	-	9.2	-	11.6	-
σ_{ci} [MPa]	118	10	112	-	125	-	72	-
σ_{ti} [MPa]	13	30	6	-	13	-	6	-
c [MPa]	23	15	19	-	23	-	10	-
Φ [°]	38	8	48	-	38	-	39	-

E: Módulo de Young. ν : Razón de Poisson. B: Módulo de deformación volumétrica G: Módulo de corte γ : Densidad η : Porosidad
 UCS: Resistencia a la compresión T_i : Resistencia a la tracción V_p : Velocidad de onda P V_s : Velocidad de onda S m_i : Parámetro del criterio de falla de Hoek-Brown. σ_{ci} : Resistencia a la compresión según el criterio de falla de Hoek-Brown. σ_{ti} : Resistencia a la tracción según el criterio de falla de Hoek-Brown. c: Cohesión. Φ : Ángulo de fricción interna.

6.1. Resistencia la compresión simple (UCS)

La Figura 6.1 muestra un diagrama *Box-Plot*, para los resultados a ensayos de compresión simple de los distintos sectores, en el cual La Huifa muestra la resistencia promedio más alta, con un valor de 137,7 MPa, en tanto que Pacifico Superior tiene una resistencia promedio de 103,4 MPa la menor de todos los sectores. La Huifa muestra una mayor variabilidad de los datos, cuyos valores varían entre los 30 MPa y 272 MPa, además el 50% de los análisis caen en resistencias entre los 100 MPa y 175 MPa, esta variabilidad del 50% de los datos es menor en Pacifico Superior con un rango de 75-135 MPa.



Sector	La Huifa	Pacifico.Sup	Recursos N.	Esmeralda
Máximo (MPa)	272	172,6	157,3	165,7
Media (MPa)	137,7	103,4	114,4	121,8
Mediana (MPa)	130,9	99,5	115,3	128,4
Mínimo (MPa)	30	34,3	40,2	109,8

Figura 6.1: Diagrama *Box-Plot*, para la resistencia CUS en los 4 sectores. La tabla muestra los valores máximos, mínimos, media y mediana para cada sector.

Recursos Norte es más acotado, desde los 110 MPa hasta los 130 MPa con una media de 114,4 MPa y Esmeralda es mucho menor solo de 130 MPa a 150 MPa y un promedio de 121,8 MPa, debido a que se dispone de una cantidad menor de datos en comparación con los demás sectores.

6.1.2. Efectos del número de vetillas en la resistencia UCS

Antecedentes pre-eliminarios de mina El Teniente muestran una relación para diferentes litologías, la resistencia a la compresión simple disminuye a medida que aumentan el número de vetillas en la probeta (Figura 6.2). En este trabajo se considera solo una litología (CMET), pero en diferentes sectores de la mina (Figura 6.3), podemos apreciar que los valores de resistencia máxima llegan en promedio a los 250 MPa, para probetas sin vetillas, a medida que estas aumentan los valores se sitúan por debajo de los 180 MPa. La tendencia observada indica una disminución de la resistencia a la compresión simple a medida que aumentan la cantidad de vetillas. Cuando las probetas no presentan vetillas, las resistencias van desde los 120 MPa a 280 MPa, el valor máximo es similar

cuando las probetas tienen 1 o 2 vetillas. A medida que la cantidad de vetillas aumenta en las probetas los valores máximos se sitúan por debajo de los 200 MPa, cuando contienen 5 a 7 vetillas el valor es de 150 MPa, por lo que hay una diferencia de 50 MPa en probetas con menos de 3 vetillas.

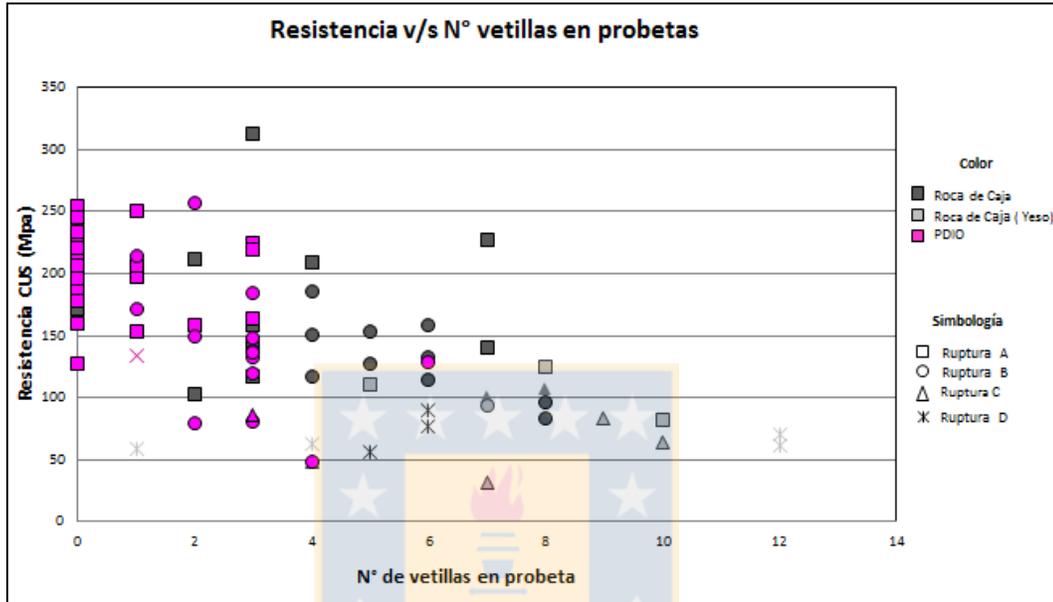


Figura 6.2: Grafico resistencia CUS v/s número de vetillas en probeta. Se aprecia que para los 3 tipos de litologías los valores de resistencia disminuyen al aumentar el número de vetillas.

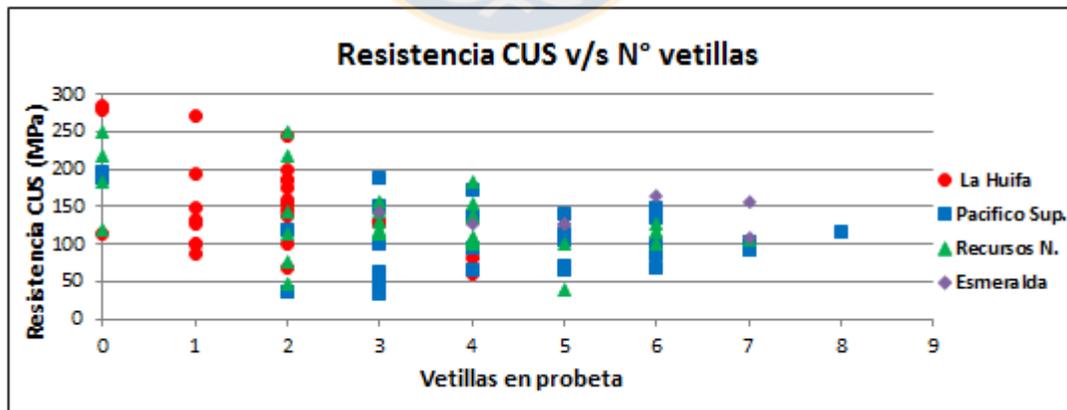
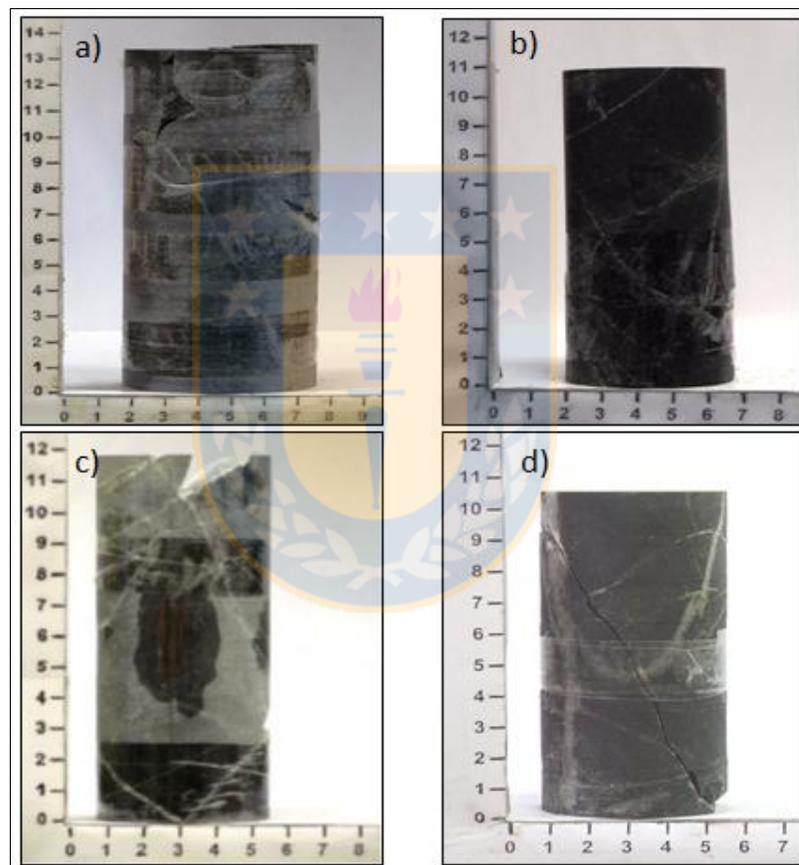


Figura 6.3: Gráfico resistencia CUS v/s número de vetillas. La Tendencia para los 4 sectores es que a medida que aumenta el número de vetillas la resistencia disminuye.

La tabla 6.2 muestra el numero promedio de vetillas por sector. La huifa tiene una media de 2,1 vetillas, su vez es el sector que presenta la mayor resistencia, en tanto que Pacifico Superior tiene un promedio de 4,7 vetillas (Fotografía 6.1) con el valor de CUS menor de los 4 sectores.

Tabla 6.2: Promedio de vetillas por sector estudiado.

Sector	La Huifa	Pacifico Superior	Recursos Norte	Esmerlada
Promedio de vetillas por probeta	2,1	4,7	3,8	5,3



Fotografía 6.1: Probetas de rocas con vetillas para los 4 sectores: a) La Huifa. b) Recursos Norte. c) Pacifico Superior. d) Esmeralda. Obsérvese la menor cantidad de vetillas en La Huifa.

6.2. Tipos de Ruptura

Al comparar los tipos de ruptura de los diferentes sectores (Figura 6.4), observamos que el tipo B2 (matriz y vetilla) es el de mayor frecuencia, presente en 3 de los 4 sectores. Las rupturas solo por

matriz (Tipo A), están en menor proporción, ya que en ningún sector sobrepasan el 15%. La ruptura solo por una vetilla (D1) ocurre en un porcentaje mayor en Recursos Norte con un 37%, pero en La Huifa solo alcanzan un 6%, por lo que en este sector la influencia de la matriz es mayor en comparación con los demás. Pacífico Superior y Esmeralda tiene un 11% de rupturas tipo D1, cabe destacar que si bien en estos sectores las rupturas dominantes son por una vetilla (Tipo D1), es el sub-tipo D2, es decir una es decir una superficie mixta (matriz y vetilla), las que dominan con un 45% y 25% respectivamente. Las fracturas que ocurren por varias vetillas (Tipo C), solo muestran un porcentaje significativo en Pacífico Superior con un 21%.

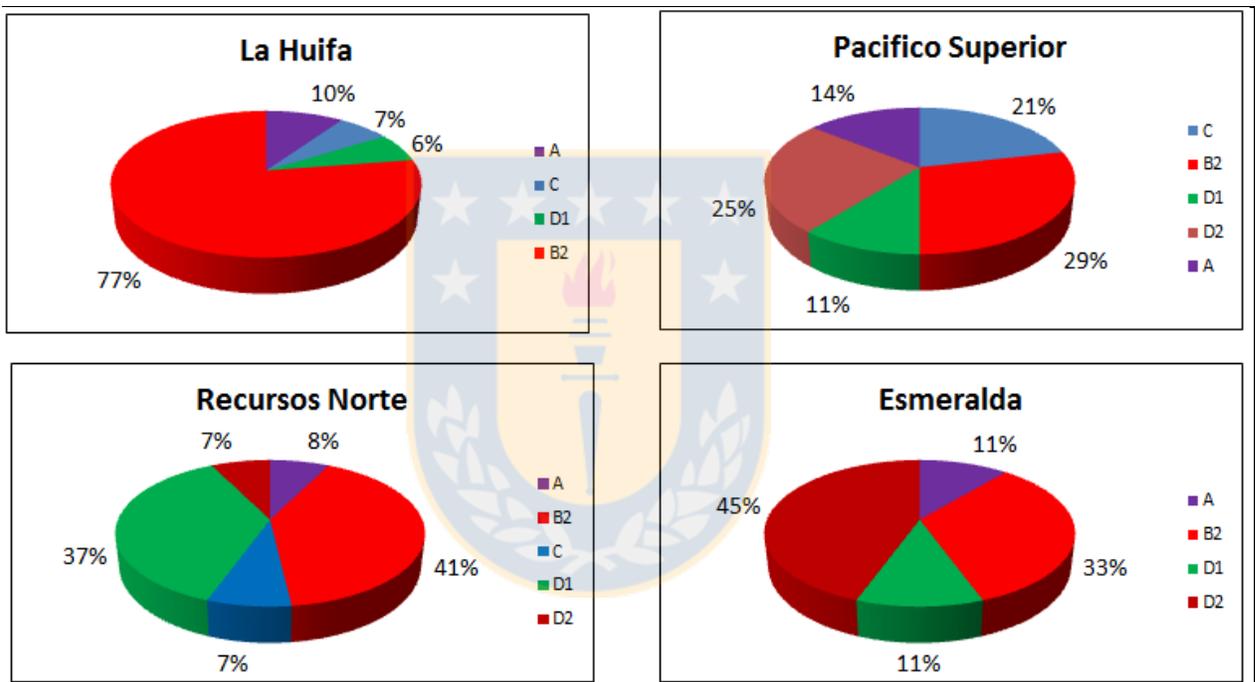


Figura 6.4: Gráficos circulares con las frecuencias de los tipos de ruptura, para cada sector.

La Huifa muestra el valor más alto de rupturas B2 con un 77%, seguido de Recursos Norte con 41% y Esmeralda con un 33%, en tanto que Pacífico superior tiene el menor porcentaje con un 29%. Al contrastar los promedios de las rupturas para los 4 sectores (Tabla 6.3) con los obtenidos por Barahona 2013 (Figura 6.5) en su informe “Análisis de resistencia UCS y tipo de ruptura en muestras de gran diámetro”, observamos que para la litología CMET un 52,4% de las rupturas son del tipo B2, es decir hay un predominio de estas, lo que concuerda con lo obtenido en este estudio.

Tabla 6.3: Tabla comparativa con los porcentajes para cada ruptura, entre lo obtenido por Barahona 2013 y en este estudio.

Tipo Ruptura	Barahona,2013 (%)	Este trabajo (%)	Diferencia
A	0	10,7	10,7
B2	52,4	45	7,4
D1	14,3	16,3	2
D2	2,4	19,2	16,8
C	26,2	8,7	17,5

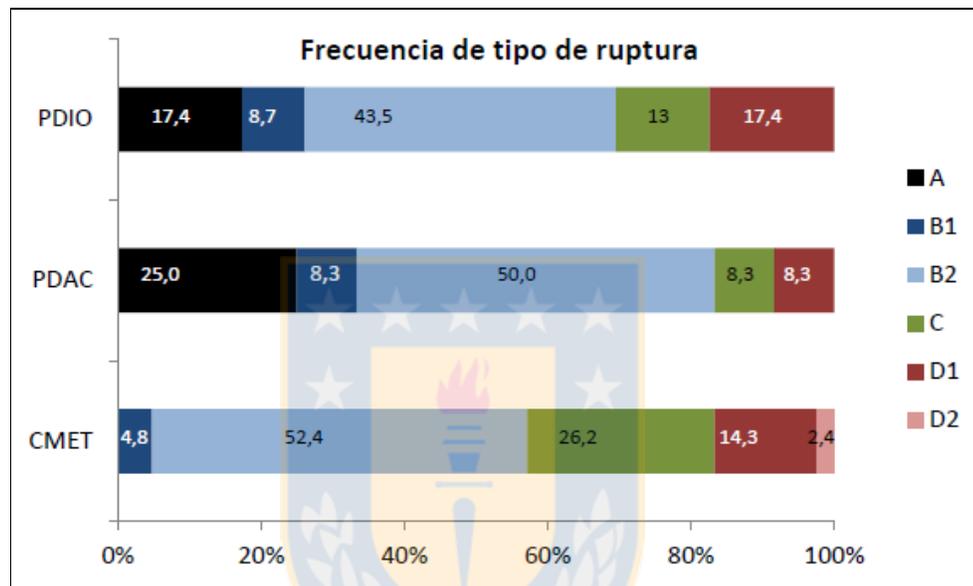


Figura 6.5: Gráfico de frecuencia porcentual para los tipos de ruptura en cada litología. Tomado de Barahona 2013.

Las que ocurren por una sola vetilla (D1) dan un total de 16,3 %, en el estudio de Barahona llega a un 14,3 %, pero hay una marcada diferencia de 16,8% en el tipo D2. Las rupturas solo por matriz están ausentes en el estudio de Barahona, en tanto que este trabajo no es superior al 15%. La mayor diferencia se da en las que ocurren por varias vetillas (tipo C), con un 17,5 % de discrepancia entre ambos estudios.

6.2.1. Resistencia por tipo de ruptura

Los valores de resistencia CUS por ruptura (Figura 6.6), indican que las fracturas del tipo B2 muestran los mayores valores de resistencia llegando a los 210 MPa ya que para los otros tipos de ruptura sus valores máximos de resistencia rodean los 150 MPa. Para los tipos D2 y C, los rangos

de resistencias son muy similares con valores mínimos de 67,8 MPa y 65,7 MPa, en tanto que los máximos llegan a 157,3 MPa y 151,6 MPa.

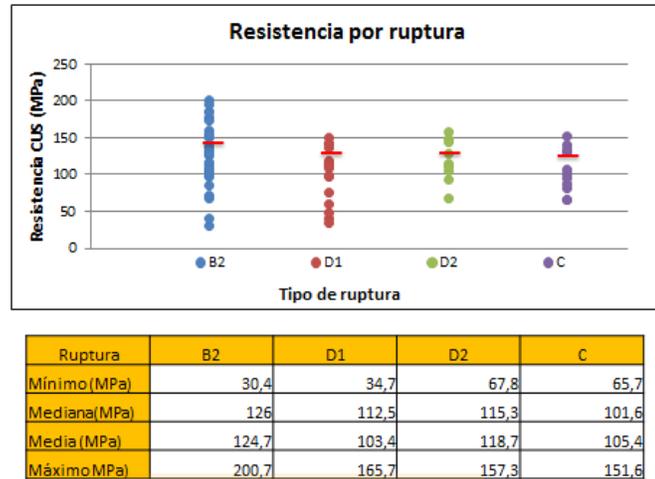


Figura 6.6: Distribución de la resistencia UCS para cada tipo de ruptura. En línea roja se muestra el promedio de resistencia para cada ruptura

Los valores obtenidos en el informe de Barahona, 2013 (Figura 6.7) indican que las mayores resistencias promedios son en las rupturas B2, que concuerda con los resultados de este estudio, es decir cuando hay una participación de la matriz en la ruptura las probetas tienen mayores resistencias.

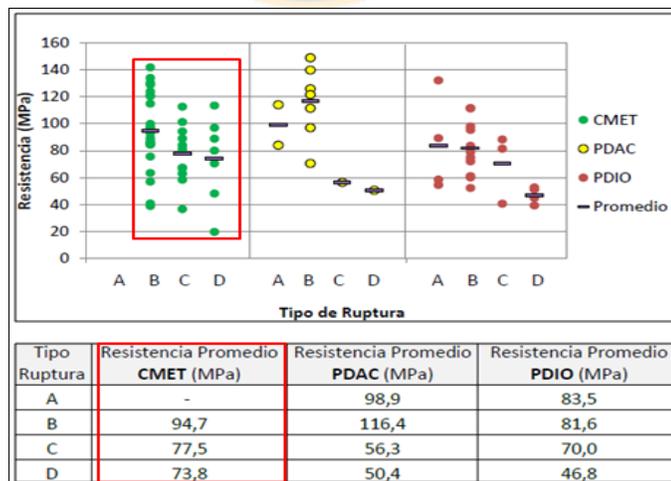


Figura 6.7: Resistencia por tipo de ruptura en el estudio de Barahona 2013. En rojo se destacan los valores para el CMET.

6.3. Angulo de ruptura (α)

El ángulo de ruptura, como se mencionó en el capítulo 3 corresponde al ángulo de inclinación de la vetilla con respecto el eje axial de la probeta. La figura 6.8 muestra los ángulos de ruptura para las vetillas de los 4 sectores.

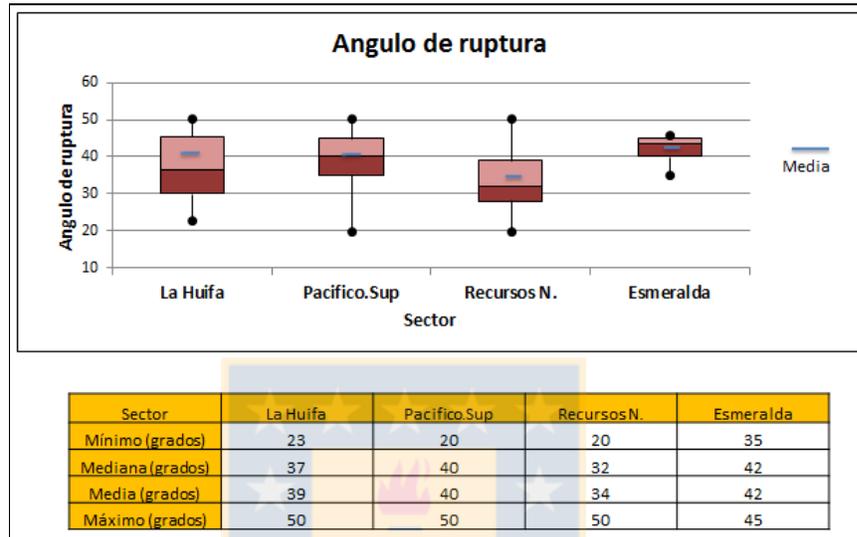


Figura 6.8: Diagrama *Box-Plot* para los ángulos de las rupturas de las vetillas para cada sector.

El valor mínimo de ángulo de ruptura de las vetillas es de 20° , siendo levemente mayor en los sectores Pacífico Superior y Recursos Norte, no así en Esmeralda cuyo ángulo mínimo es de 35° . Como se aprecia la dispersión de los ángulos de ruptura es similar en 3 de los 4 sectores, en donde el segundo cuartil (50% de los datos) muestra variaciones entre los 28° y 45° aproximadamente, en Esmeralda este cuartil es más restringido (40° - 45°) debido a la menor cantidad de datos. El promedio de los ángulos de ruptura para todos los sectores varía entre los 34° y 42° .

6.3.1. Angulo α por tipo de ruptura en probeta

La Figura 6.8 muestra los ángulos de rupturas de las vetillas para los diferentes tipos de ruptura. En el caso del tipo B2, los ángulos varían desde 20° hasta un poco más de 55° con una mayor variabilidad en sus valores. Los demás tipos de ruptura muestran un comportamiento similar a excepción de Recursos Norte, donde los ángulos en las fracturas C y D1 llegan hasta un máximo de 40° . En Esmeralda los ángulos mínimos tienen un valor de 35° , mayor en comparación para las

mismas rupturas en los otros sectores. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos en los diagramas de caja, por lo que independiente de ruptura en las cual participan vetillas, los ángulos tienen una variación entre 20° y 55°.

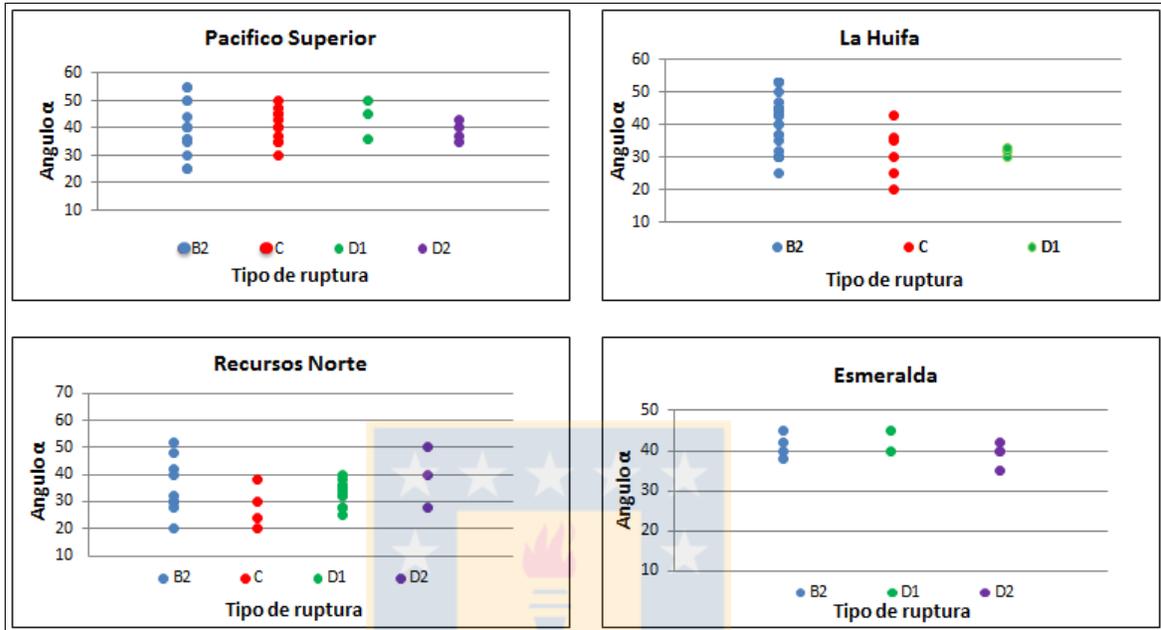


Figura 6.9: Gráficos de dispersión ángulo de ruptura v/s tipo de ruptura para cada sector.

Al relacionar las rupturas de las probetas con los ángulos de las vetillas, se infiere que la mayoría de las vetillas rompen entre los 25° y 48° aproximadamente independiente del tipo de ruptura, es decir que una vetilla de 30° puede darse en rupturas tipo D1, D2 y C.

6.4. Relleno mineralógico por ruptura

Al analizar los rellenos mineralógicos para los distintos sectores (Figura 6.10), observamos que para La Huifa los 3 tipos de rupturas B2, C Y D1 muestran una mineralogía muy similar con predominio de minerales muy blandos como el yeso y la clorita que conforman más del 50% de los rellenos, los minerales duros como el cuarzo y la turmalina son más bien escasos ya que no sobrepasan el 15 % en las fracturas C y B2. En los metálicos se advierte la presencia de calcopirita con una proporción similar en las 3 rupturas. La anhidrita y carbonatos muestran porcentajes entre un 10% y 20%, aproximadamente.

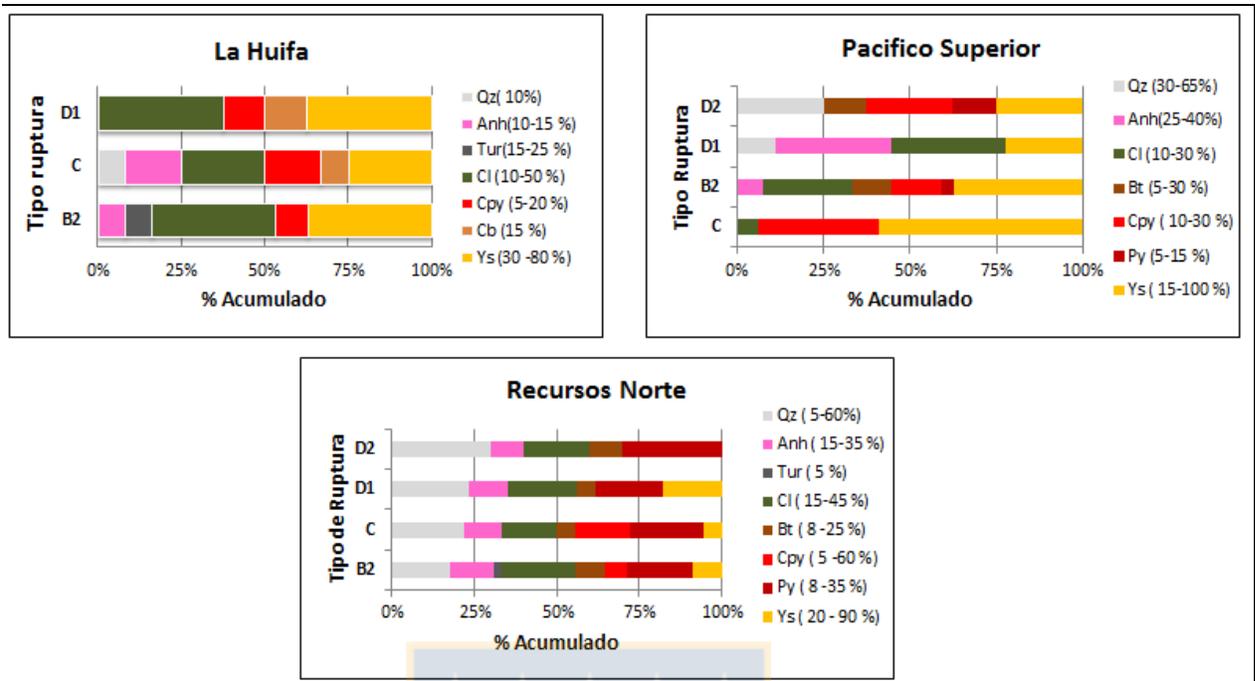


Figura 6.10: Gráficos de porcentaje acumulado de rellenos mineralógicos para los tipos de ruptura en cada sector. Cada mineral tiene un color respectivo en la barra de frecuencias.

En Pacifico Superior, el yeso y la clorita siguen estando presentes con una proporción significativa de alrededor del 50% en las rupturas B2, C y D. Las rupturas D1 y D2 destacan por la presencia de cuarzo, llegando al 25% en el caso de las D2. La calcopirita se concentra en las fracturas C, B2 y C entre un 15 % y 20%, las B2 y D2 están acompañadas por pirita en una fracción no mayor al 15%. La anhidrita solo se presenta en D1 y B2, no sobrepasando el 20% en los rellenos. A diferencia con los dos sectores anteriores Recurso Norte presenta un porcentaje menor de yeso y clorita, en las rupturas B2, C y D1 la cantidad de yeso no sobrepasa el 20%, similar para la clorita. Cabe destacar la mayor presencia de cuarzo como mineral duro en comparación con los otros sectores, con porcentajes que varían entre un 20% y 25% para las 4 rupturas. La cantidad de minerales de metálicos también es mayor destacándose la mayor presencia de pirita, en un 25% en las fracturas B2, C y D1 llegando a un 30% en las D2.

6.4.1. Influencia de la mineralogía en las rupturas

Como se vio anteriormente, los rellenos mineralógicos de las vetillas varían en los 3 sectores, esto influye en la resistencia a la compresión simple de las probetas. Para estudiar esta relación, se

consideró una razón entre los rellenos minerales con una dureza menor a 3 y mayor a 3,5 en la escala de Mohs, las que varían entre 0,7 y 2,3 a menor valor de esta proporción mayor es el porcentaje de minerales duros en las vetillas (Figura 6.11).

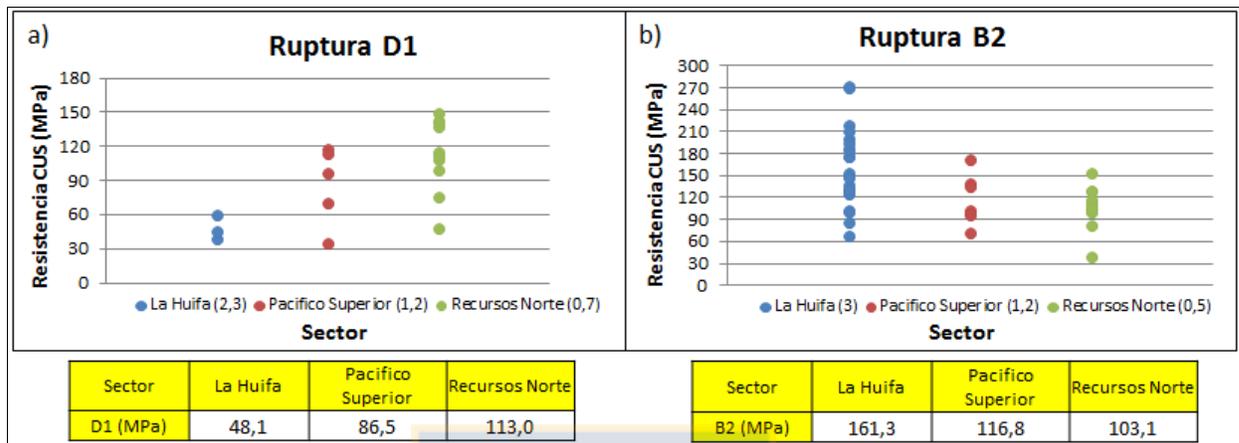


Figura 6.11: Resistencia de las vetillas para cada sector. a) en rupturas tipo D1. b) en rupturas tipo B2.

En las rupturas tipo D1 (Figura 6.11a) la Huifa muestra el promedio más bajo de resistencia con 48,1 MPa este valor se incrementa un 33% en Pacífico Superior llegando a los 113 MPa en Recursos Norte, en donde la proporción de minerales blandos es menor que los otros dos sectores, es decir cuando la ruptura ocurre por una sola vetilla la resistencia se incrementa a medida que la proporción de minerales blandos disminuye. Cuando en la ruptura participa la matriz (Tipo B2) el efecto del relleno de las vetillas es inverso al anterior (Figura 6.11b), es decir el promedio de resistencia es mayor en La Huifa y menor en Recursos Norte con valores de 161, MPa y 103,1 MPa, por lo que la resistencia en las probetas en este tipo de ruptura depende de las características de la matriz o del número de vetillas en la probeta.

6.5. Rugosidad de las rupturas

El índice de rugosidad (JRC), indica que tan lisas o rugosas son las estructuras siendo un parámetro importante a la hora de caracterizar las rupturas por vetilla. Este índice varía en una escala que va de 0-20, en donde mientras menor sea el valor de JRC mas lisas son las fracturas y si es mayor serán más rugosas.

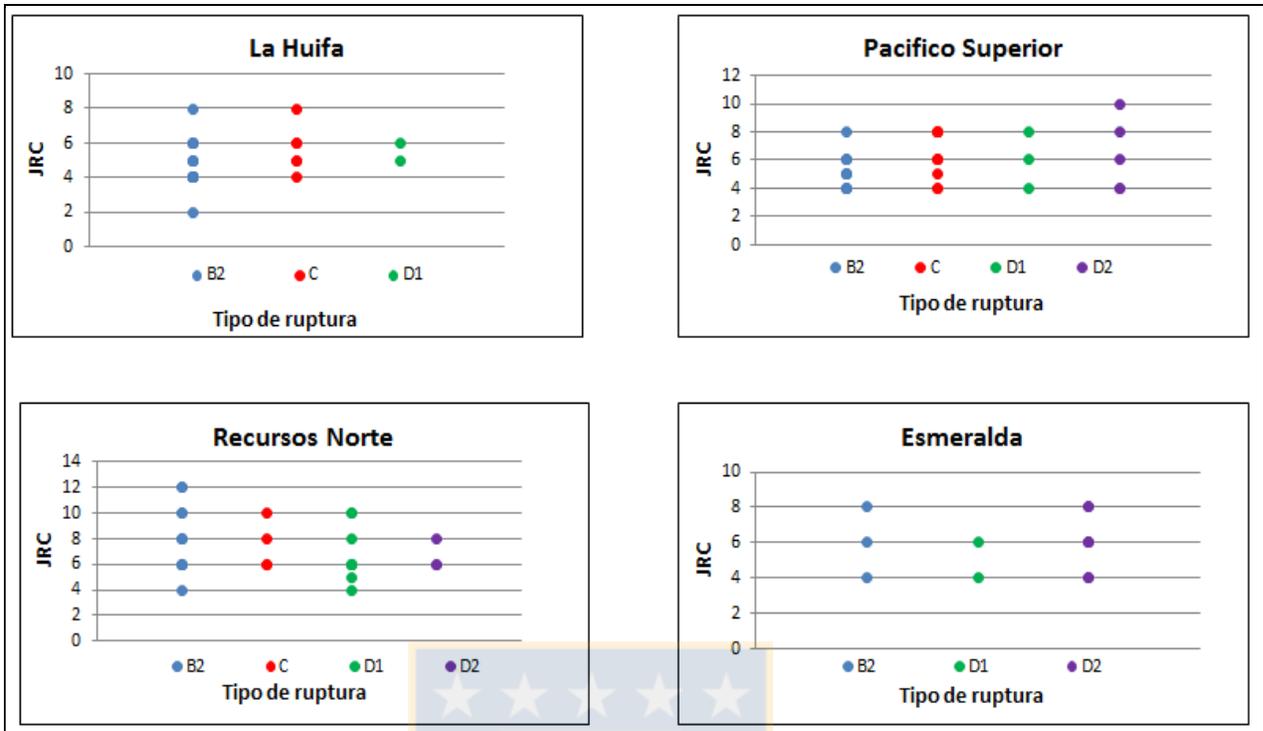


Figura 6.12: Gráficos de dispersión con los índices de rugosidad (JRC) para cada tipo de ruptura por sector.

En la figura 6.12 se muestra la rugosidad por tipo de ruptura para los sectores estudiados, La Huifa presenta valores mínimos de JRC entre 2 y 4, y con máximos entre 6 y 8, por lo que se puede considerar que para los 3 tipos de ruptura son estructuras planas y levemente rugosas en algunos casos levemente onduladas para los valores de rugosidad 8. El sector Pacifico Superior los valores son más elevados, con rugosidades que van desde 4 para los 4 tipos de ruptura hasta 8 para los tipos B2, C y D1 llegando a 10 para las fracturas D2. En este caso las rupturas van desde planas con una leve rugosidad, hasta onduladas rugosas ya que el valor de JRC llega hasta 10.

Recursos Norte es el que muestra las rupturas más rugosas, con valores mínimos de 4 y 6 llegando a 12 para las fracturas B2, en tanto los tipos C, D1 y D2 varían de 8 a 10. En base a lo anterior las rupturas varían desde planas con rugosidad media a onduladas rugosas en estos 3 sectores. En Esmeralda el valor de JRC, es más bien homogéneo para las 3 rupturas con un mínimo de 4, llegando hasta rugosidades entre los 6-8 las estructuras se pueden considerar planas-rugosas a superficies onduladas-planas.

6.6. Influencia de las vetillas en la resistencia

6.6.1. Generalidades

La idea básica cuando se trata la resistencia de las rocas anisótropas es que la variación de la resistencia depende del ángulo de la aplicación del esfuerzo en relación con los planos de discontinuidad, en este caso las vetillas. Esta variación puede ser supuesta analizando la Figura 6.13.

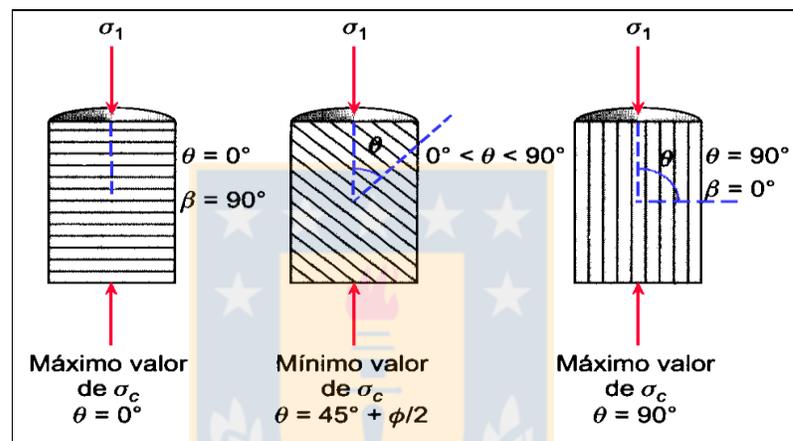


Figura 6.13: Variación de la resistencia en relación al ángulo de la discontinuidad. Tomado de Vallejo, 2002.

En este caso el ángulo β de la figura corresponde al ángulo de inclinación α de la vetilla en la probeta, podemos apreciar que los máximos valores de resistencia a la compresión (σ_c) se alcanzan cuando las vetillas tienen una inclinación de 90° y cuando están paralelas al eje de la probeta, es decir cuando α toma un valor de 0° . El valor de resistencia mínima se alcanza cuando la inclinación de la discontinuidad alcanza un valor de:

$$\alpha = 45^\circ + \phi/2$$

Es decir, cuando es igual a la mitad del ángulo de fricción (ϕ) más 45° . Entonces al elaborar los gráficos de la resistencia de las probetas en un medio anisótropo, haciendo depender el esfuerzo de compresión con la aplicación de los esfuerzos resulta una gráfica como la representada en la Figura 6.14.

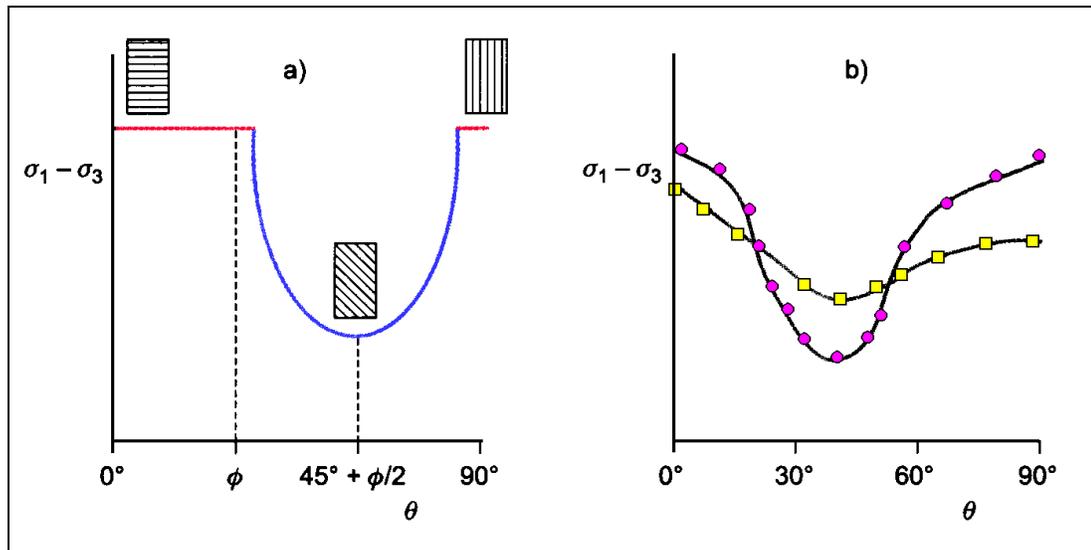


Figura 6.14: Criterio de Jaeger (1960) para la resistencia en rocas anisótropas. En a) relación entre el esfuerzo máximo y mínimo con la inclinación de la discontinuidad. En b) curvas de Jaeger para dos tipos de discontinuidad.

Este modelo con dos mecanismos potenciales de ruptura por la matriz o por las discontinuidades, fue propuesto por Jaeger en 1960. Da lugar a que cuando α es inferior al α -mínimo y superior al α -máximo, la resistencia es la de la probeta.

Los diferentes tipos de ruptura de las probetas muestran comportamientos diferentes en sus curvas de resistencia, dependiendo en parte de la cantidad de vetillas que rompen durante los ensayos de compresión, para esto se definen 3 tipos de curvas basados en sus resistencias:

- Resistencia de roca isótropa (Ruptura Tipo A)
- Resistencia de roca con discontinuidades múltiples (Ruptura tipo B1, B2 y C)
- Resistencia de roca anisótropa (Ruptura tipo D1 y D2)

Las curvas de resistencia muestran un comportamiento diferente cuando hay solo una discontinuidad (D1 y D2) y en dos o más familias de discontinuidades (B1, B2 y C) (Figura 6.15), lo que se reafirma con los resultados obtenidos a continuación para las rupturas.

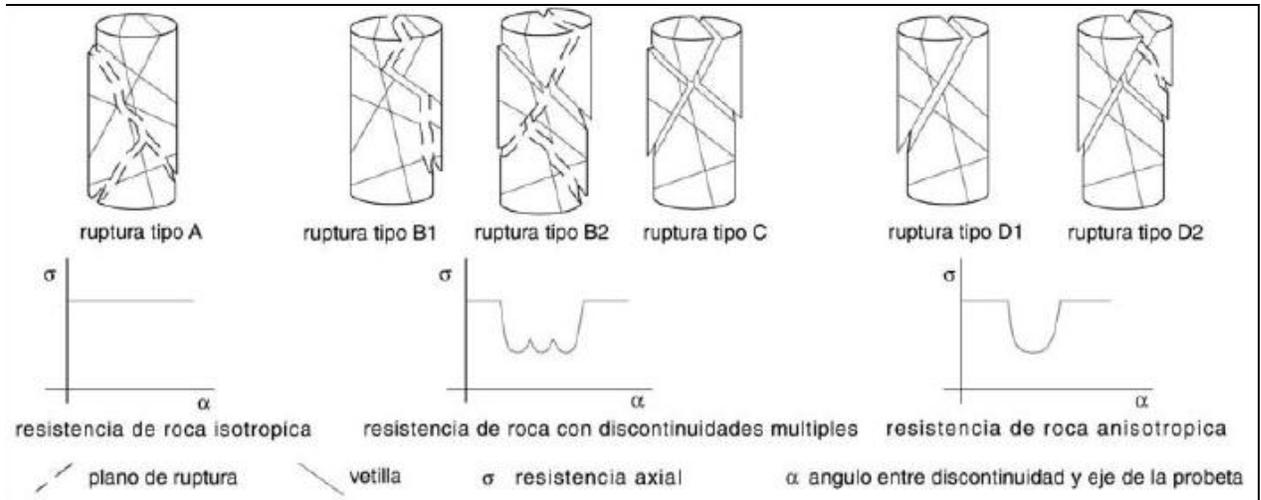
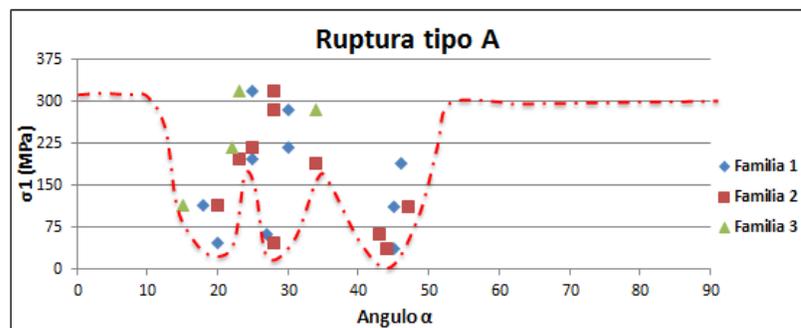


Figura 6.15: Curvas de resistencia para cada tipo de ruptura. Tomado de Manual de Estándares y Metodologías para el Trabajo de Geología de Minas de El Teniente, 2003.

6.6.2. Curvas de Jaeger para los tipos de ruptura

Ruptura tipo A

La curva de Jaeger para la ruptura tipo A (Figura 6.16), nos muestra 3 familias de discontinuidades con ángulos mínimos de 20°, 28° y 45°, con un valor de resistencia mínima de 36,9 MPa. Las resistencias máximas en tanto alcanzan valores máximos de 318,9 MPa, cuando los ángulos de las discontinuidades son mayores a 50° y menores a 15°, es decir la probeta no romperá en esos ángulos.



Parámetro	Resistencia (MPa)	Familia 1 (α)	Familia 2 (α)	Familia 3 (α)
Máximo	318,9	46	47	34
Media	158,0	31	32	23
Mínimo	36,9	18	20	15

Figura 6.16: Curva de Jaeger para las rupturas tipo A. La tabla adjunta muestra los rangos de los valores y su media.

Ruptura tipo B2

Para las rupturas Tipo B2 (Figura 6.17), el ángulo α mínimo para la matriz corresponde a 25° en tanto que para las vetillas es de 45° , con una resistencia mínima asociada de 30,4 MPa. La resistencia máxima es de 200,7 MPa y no hay ruptura a partir de los 55° para las vetillas.

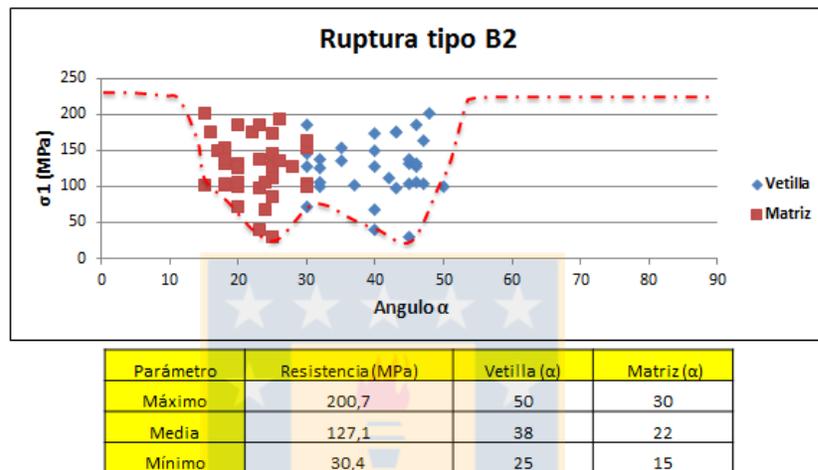


Figura 6.17: Curva de Jaeger para las rupturas tipo B2. La tabla adjunta muestra los rangos de los valores y su media.

Ruptura tipo D1 y D2

La curva de resistencia para las fracturas D1 y D2 (Figura 6.18), consideran solo una familia de discontinuidad a diferencia de las demás rupturas. El ángulo mínimo es de 25° aproximadamente con un valor de 40 MPa de resistencia, a partir de los 48° no se produce ruptura.

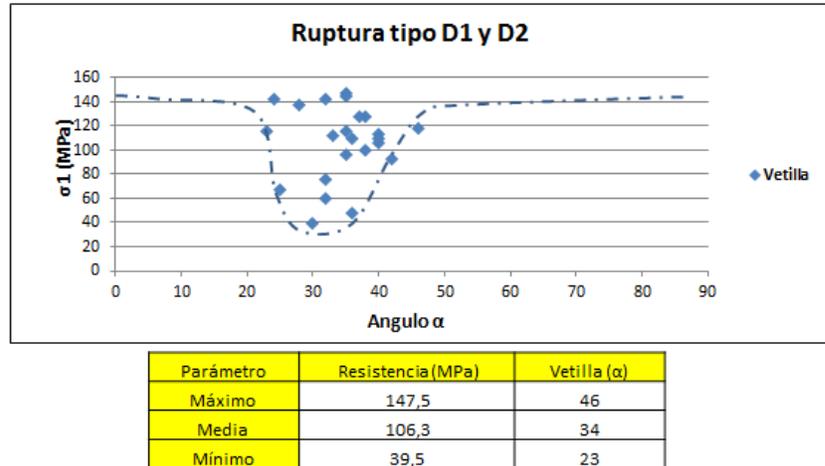


Figura 6.18: Curva de Jaeger para las rupturas tipo D1 y D2. La tabla adjunta muestra los valores máximos, mínimos y su media.

Ruptura tipo C

Las probetas que rompieron por dos vetillas (Figura 6.19), muestran una curva de resistencia con dos familias de discontinuidades en donde las resistencias mínimas tienen un valor de 65,3 MPa, y se alcanzan a los 27° para la familia 1 y a los 43° en la familia 2. Desde los 47° no se producen rupturas y menos de 20° tampoco.

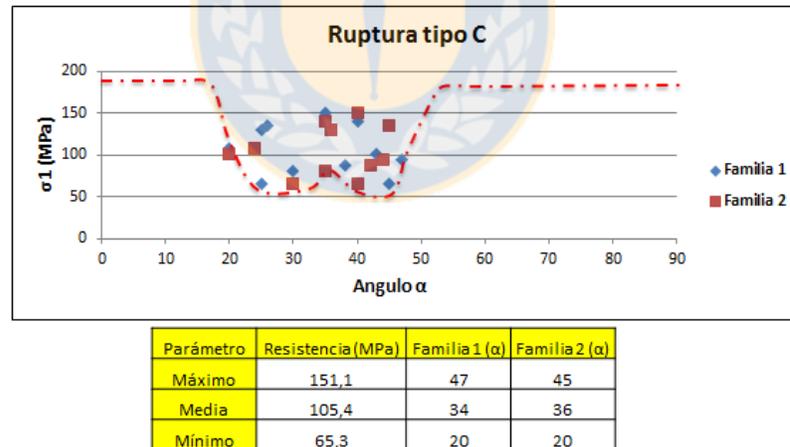


Figura 6.19: Curva de Jaeger para las rupturas tipo C por dos vetillas. Se indican los valores máximos, mínimos y media en la tabla adjunta.

6.7. Parámetros de deformación de las probetas

6.7.1. Módulo de Young Tangente

Para medir la deformación de las probetas, se analizaron los módulos de Young obtenidos de los ensayos de deformación. La Figura 6.20 muestra los resultados de los valores del módulo de Young Tangente (E_{tan}) para los 4 sectores. Para 3 de los 4 sectores la distribución de los valores es similar, siendo un poco más dispersa en Pacífico Superior y menos en Esmeralda, ya que la cantidad de datos es menor comparada con los demás. La Huifa presenta el valor más alto de E_{tan} llegando a los 150,4 GPa, el mínimo en tanto es de 22,4 GPa similar a lo obtenido en Pacífico Superior. Recursos Norte y Esmeralda tiene un mínimo en torno a los 47 GPa, pero difieren en sus valores máximos siendo mayor en Recursos Norte con 107,8 GPa, aproximadamente un 40% más alto que Esmeralda. El rango de los promedios varía entre 55,8 GPa-75,6 GPa para todos los sectores.

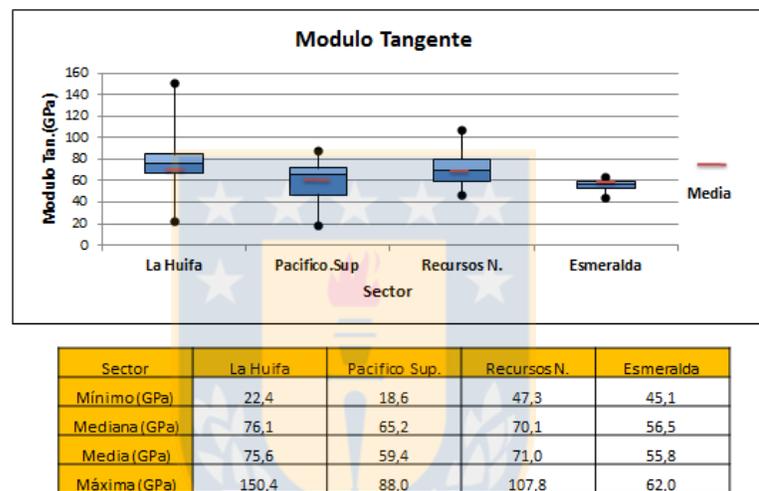
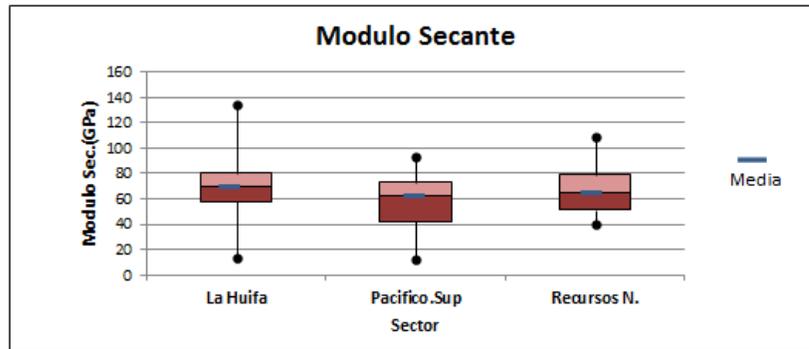


Figura 6.20: Diagrama *Box-Plot* para el módulo de Young Tangente de los 4 sectores.

6.7.2. Módulo de Young Secante

Los valores del módulo de Young Secante se obtuvieron para 3 de los 4 sectores (Figura 6.21), ya que no se dispuso de datos de Esmeralda. La Huifa muestra una mayor variación de los datos con valores máximos y mínimos de 133,6 GPa y 14,1 GPa similar a Pacífico Superior. La distribución del 50% de los datos en los 3 sectores tiene poca variación. El promedio del módulo Secante se mueve entre los 69,8 GPa para La Huifa y 67,9 GPa en Recursos Norte.



Sector	La Huifa	Pacifico Sup.	Recursos N.
Mínimo (GPa)	14,1	12,5	40,4
Mediana (GPa)	69,7	62,5	64,4
Media (GPa)	69,8	58,4	67,9
Máxima (GPa)	133,6	92,5	108,9

Figura 6.21: Diagrama *Box-Plot* para el módulo de Young Secante. La tabla adjunta muestra los parámetros estadísticos para cada sector.

6.7.3. Relación entre la deformación y el número de vetillas

Al igual que para los resultados de ensayos de compresión simple, se estudió la relación entre los módulos de deformación y el número de vetillas contenidas en las probetas (Figura 6.22). Al analizar el gráfico, La Huifa muestra los valores más acotados para probetas con 1 o 2 vetillas. Pacifico Superior tiene una distribución similar de los valores máximos, cuando las probetas contienen desde 4 a 7 vetillas, sin embargo, los mínimos tienen un leve aumento con el número de vetillas. En Esmeralda no se contó con valores del módulo de Young Secante. En Recursos Norte no parece haber una relación con el aumento del número de vetillas, los valores del módulo Tangente se concentran en probetas con 2 a 4 vetillas. La poca cantidad de datos en Esmeralda no permite concluir una tendencia. En general se observa que a partir de 4 vetillas en la probeta los módulos Tangente disminuyen.

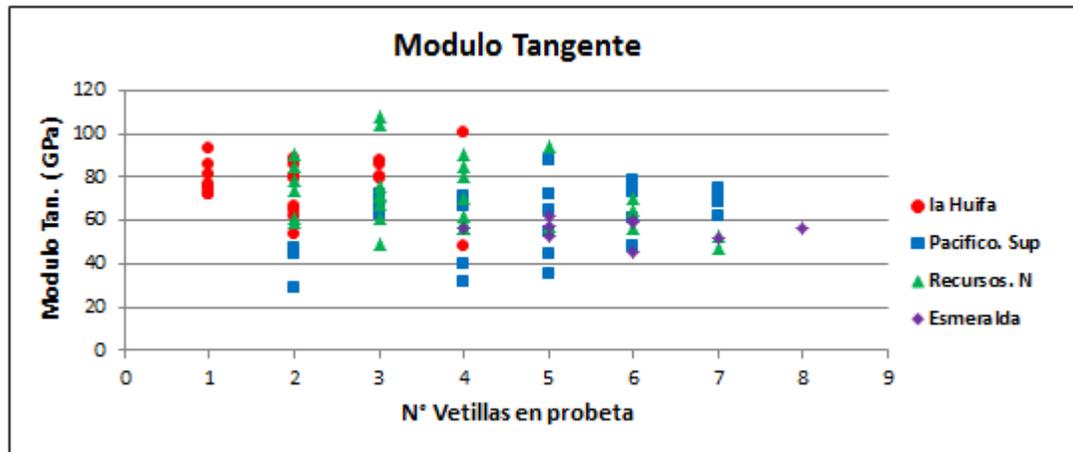


Figura 6.22: Gráfico de dispersión modulo Tangente v/s número de vetillas en probeta de los 4 sectores. A partir de las probetas con 4 vetillas el modulo Tangente disminuye con el número de vetilla.

Para el módulo de Young Secante (Figura 6.23), no parece haber una tendencia entre el número de vetillas en la probeta y el módulo Secante a diferencia del módulo Tangente que si se observa una relación. Los módulos Secantes de Recursos Norte son similares desde 2 a 5 vetillas, en tanto que para La Huífa los valores se concentran para 1 y 2 vetillas presentado la menor variabilidad de datos en los 3 sectores.

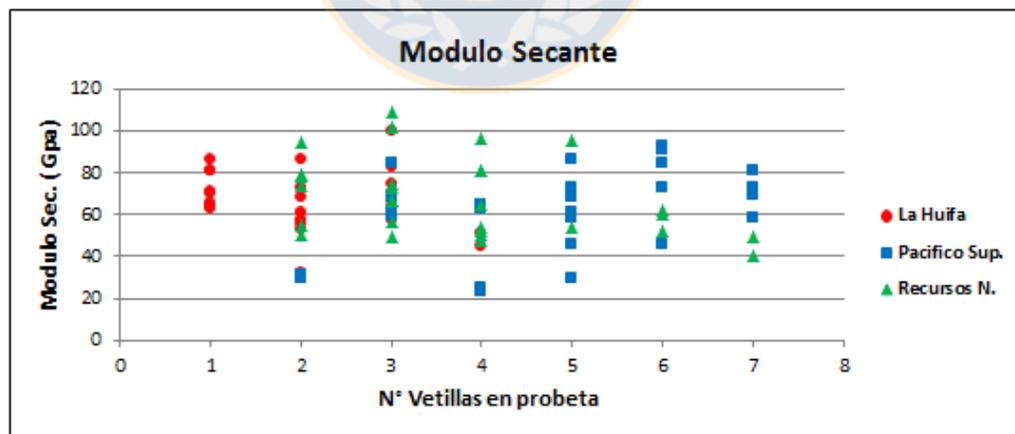


Figura 6.23: Gráfico de dispersión modulo Secante v/s número de vetillas en probeta. No se observa una tendencia muy clara a medida que aumenta el número de vetillas para cada sector.

Al comparar los resultados con los obtenidos por Barahona, 2013 (Figura 6.24), observamos que existe una relación entre el número de vetillas en probeta y módulo de Young Tangente (E_{tan}) ya

que desde las 9 vetillas el valor de este parámetro disminuye a medida que aumentan la cantidad de vetillas en probeta, no así con el módulo de Young Secante en el cual no parece haber una relación con el número de vetillas, lo que concuerda con lo obtenido en este estudio.

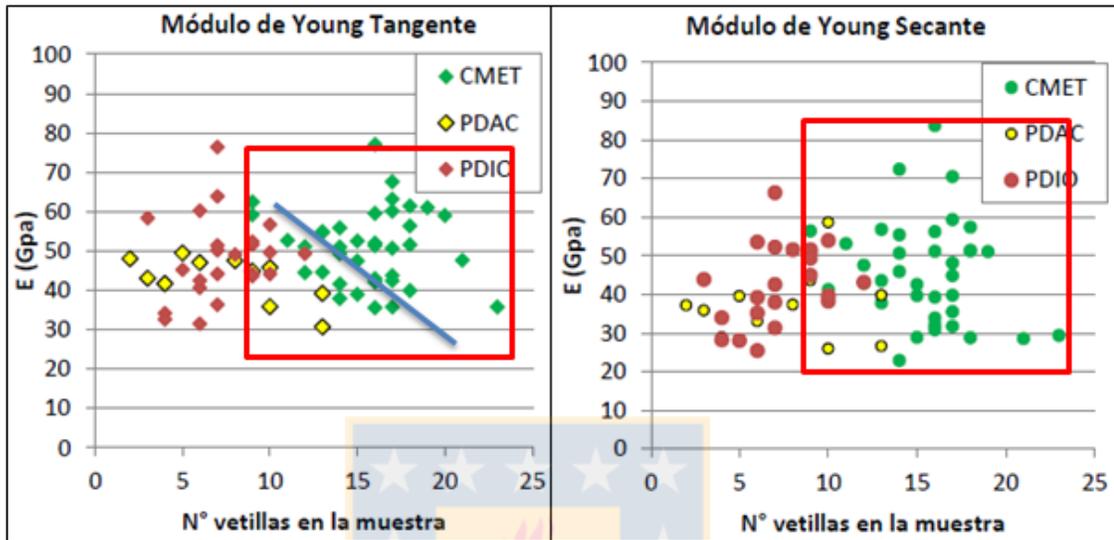


Figura 6.24: Gráfico de dispersión Modulo Tangente y Secante v/s N° de vetillas en probeta, se aprecia que el módulo E_{Tan} disminuye de 9 a 20 vetillas en probeta, en tanto que para E_{Sec} no hay una tendencia clara. (Tomado de Barahona, 2013).

6.7.4. Clasificación del esfuerzo y módulos de deformación

El stockwork de vetillas selladas puede ser muy conspicuo (numerosas vetillas con notoriedad) o muy poco evidente (pocas vetillas y se nota poco), esto provoca que las vetillas puedan afectar la forma de ruptura de una probeta de roca, pero este efecto y su importancia cambiara de una probeta a otra (Kazulovic, 2006). En términos de clasificación de (Deere & Miller, 1966), la roca primaria de mina El Teniente puede ser considerada como roca de clase A o B (Figura 6.25) con un módulo de deformación relativo de medio a alto.

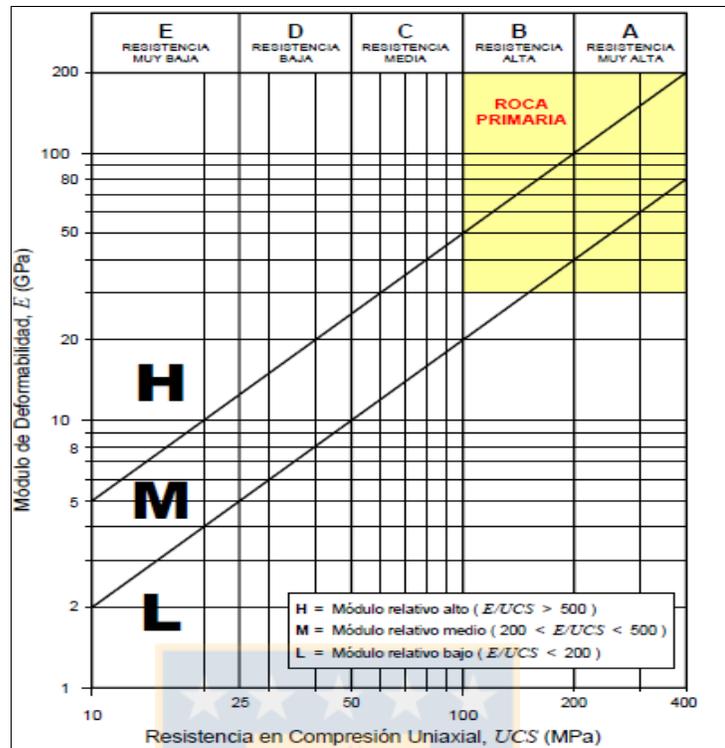


Figura 6.25: Clasificación de la roca primaria en términos de su resistencia y módulo de deformación. De acuerdo con el ábaco de Deere & Miller (1966). La zona amarilla corresponde a la zona de rocas primarias.

6.7.4.2. Clasificación de probetas ensayadas

El ploteo de los valores de compresión uniaxial simple y módulo Tangente de deformación en el abaco de Deere & Miller (Figura 6.26), indica que la mayoría de los datos caen en el campo de las rocas clase C y B, es decir con una resistencia media a alta, solo algunas probetas del sector La Huifa y Recursos Norte se clasifican tipo A, es decir como roca primaria. Solo algunas probetas caen en el sector D de resistencia baja.

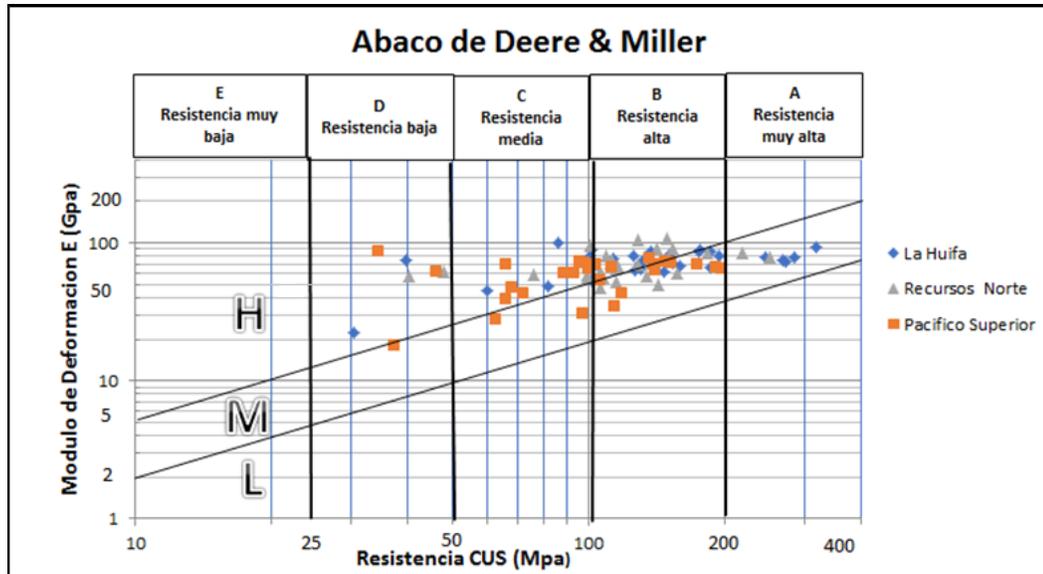


Figura 6.26: Clasificación de probetas ensayadas según el abaco de Deere & Miller (1966). Se observa que la resistencia varía desde media a alta a alta con un módulo de deformación medio a alto.

En el módulo relativo E/CUS (Figura 6.28), los rangos varían desde 300 hasta 900 aproximadamente para las probetas de los 4 sectores, por lo que se clasifican con un módulo de medio a alto según los rangos propuestos por Deere & Miller (Figura 6.27).

H = Módulo relativo alto ($E/UCS > 500$)
M = Módulo relativo medio ($200 < E/UCS < 500$)
L = Módulo relativo bajo ($E/UCS < 200$)

Figura 6.27: Rangos del módulo relativo, según clasificación de Deere & Miller (1966).

6.8. Relación Esfuerzo y Deformación en probetas

La curva Deformación – Esfuerzo (Figura 6.28), relaciona el comportamiento de las probetas durante el ensayo de compresión simple. Al inicio ocurre deformación permanente con un comportamiento elástico (Ley de Hooke), que se traduce en una línea recta en la curva a medida que aumenta el esfuerzo la deformación pasa a ser plástica (punto a), hasta que comienza la

microfracturación (punto c) en donde el esfuerzo llega hasta un valor *peak* (punto d) que es donde ocurre la ruptura en la probeta.

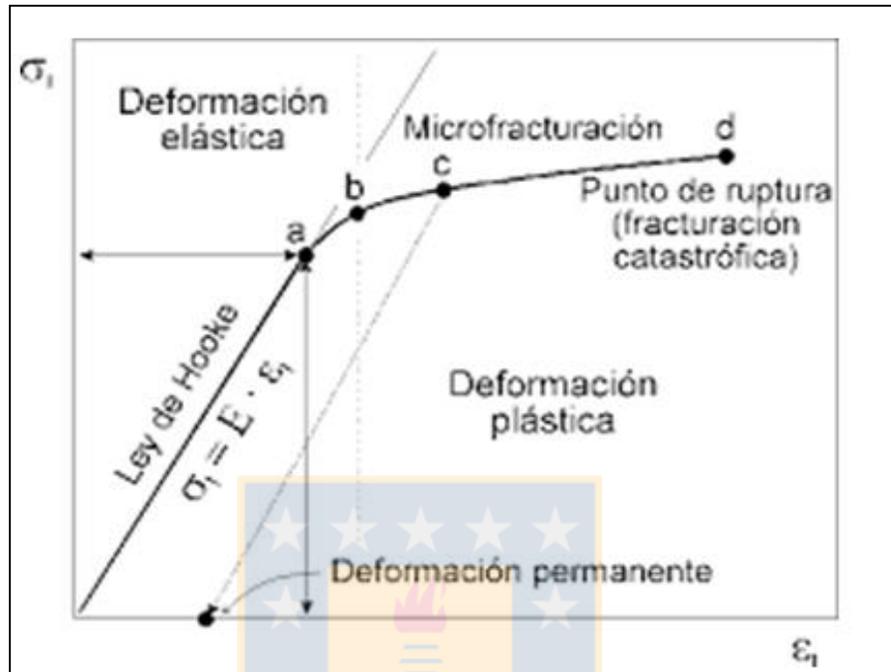


Figura 6.28: Curva deformación-esfuerzo. Obsérvese el comportamiento de una probeta desde un estado elástico hasta que ocurre el fracturamineto.

Después del inicio de las grietas se produce un periodo de agrietación uniforme, pero sin interacción entre grietas (Figura 6.29), ya que el inicio de la interacción entre grietas es lo que define el comienzo del verdadero daño o desviación respecto al comportamiento carga-deformación del tipo lineal. Lo anterior se aplica en este trabajo para distinguir el comportamiento dúctil y frágil de las vetillas en los diferentes tipos de ruptura. A continuación, se analiza el comportamiento para vetillas que contienen porcentajes significativos (> 25%) de yeso, anhidrita, pirita y cuarzo para los tipos de ruptura D1 D2, B2, y C.

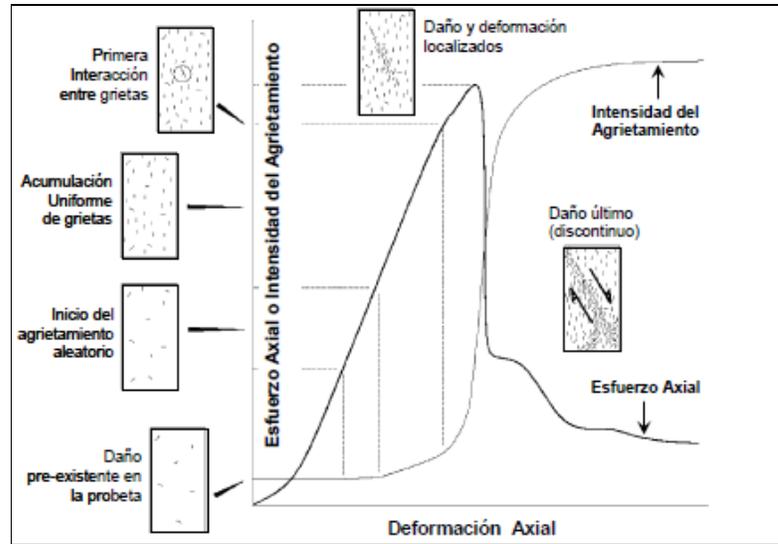


Figura 6.29: Esquema que ilustra la evolución del daño por agrietamiento en una probeta de roca. (Tomado de Karzulovic, 2006).

6.8.1. Ruptura tipo D1

La Figura 6.30 muestra la curva deformación-esfuerzo de la ruptura D1, para las diferentes vetillas. La de yeso muestran una mayor deformación con un límite elástico de 100 MPa, y un esfuerzo peak de 118 MPa en donde se produce la ruptura. La vetilla de anhidrita tiene un valor similar de deformación del orden de los 2800 $\mu\epsilon$ con un esfuerzo de 143 MPa.

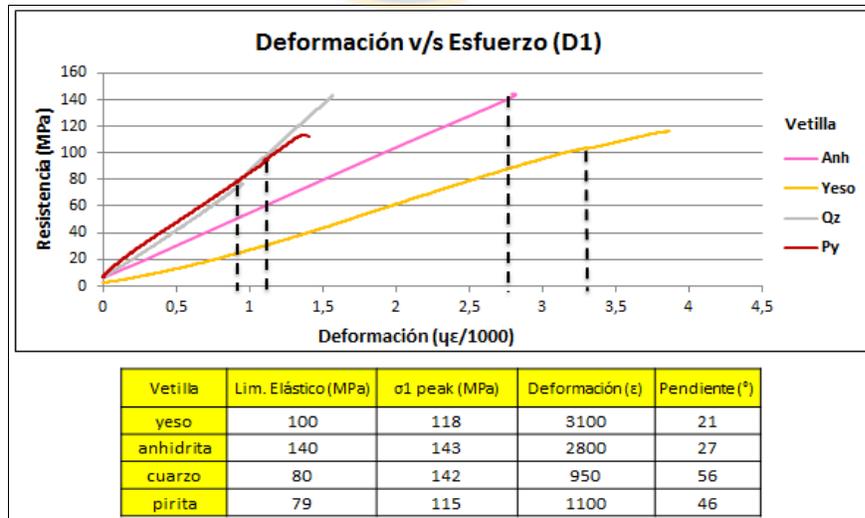


Figura 6.30: Curvas deformación-esfuerzo para 4 tipos de vetillas en ruptura D1. La línea segmentada corresponde al límite elástico.

Los rellenos minerales más duros como la pirita y el cuarzo influyen de manera significativa en este tipo de ruptura, la pirita tiene un límite elástico de 79 MPa con una deformación de 1100 ϵ , más bajo en comparación con los minerales anteriores, su esfuerzo máximo rodea los 115 MPa. La vetilla con cuarzo tiene un comportamiento parecido a la anterior con una deformación de 950 ϵ asociado a un valor de compresión de 80 MPa, la ruptura se produce a los 115 MPa, el valor más bajo de las 4 vetillas. Las pendientes de las curvas son más altas para la pirita y anhidrita, con un rango de 46°-56° y menores para el yeso y anhidrita, con 21° y 27° respectivamente.

6.8.2. Ruptura tipo B2

En la ruptura que ocurre por vetilla y matriz, las deformaciones son similares para las vetillas de yeso, anhidrita y cuarzo, fluctuando entre los 1200 $\mu\epsilon$ y 1600 $\mu\epsilon$ así mismo sus resistencias *peaks* varían entre los 115 MPa y 150 MPa (Figura 6.31). La vetilla de pirita tiene un valor de resistencia máxima de 100 MPa ligeramente inferior al mínimo del rango de las vetillas anteriores, la deformación en tanto es de 1000 $\mu\epsilon$. La anhidrita, cuarzo y pirita tienen prácticamente el mismo valor de pendiente (45°), la vetilla de yeso muestra una diferencia de 7° respecto a las anteriores.

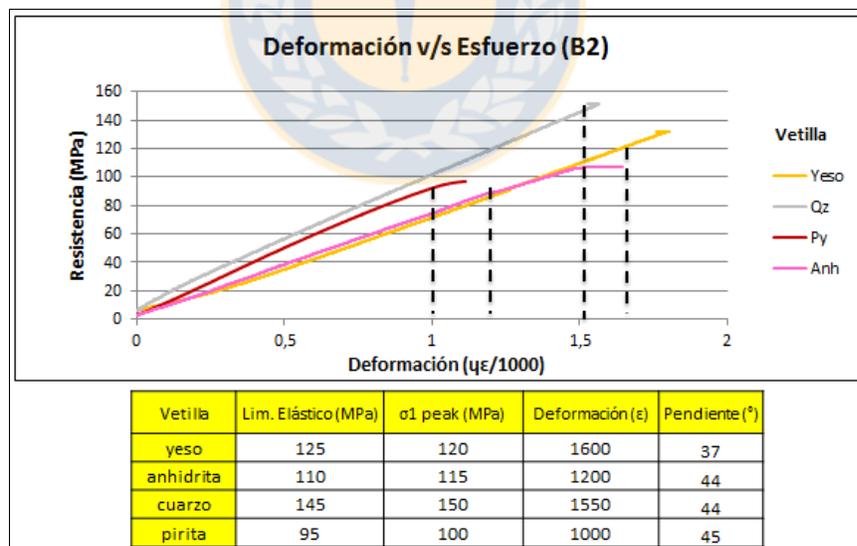


Figura 6.31: Curvas deformación-esfuerzo para los 4 tipos de vetillas en ruptura B2. La línea segmentada indica el límite elástico.

6.8.3. Ruptura tipo D2

Para este tipo de ruptura solo se analizaron 3 tipos de vetillas (Figura 6.32). Las deformaciones varían entre los 1400 $\mu\epsilon$ y 1600 $\mu\epsilon$, correspondiente al yeso y pirita, el cuarzo tiene un valor intermedio de 1550 $\mu\epsilon$. El límite elástico de las 3 vetillas esta entre los 80 MPa y 90 MPa. Sus esfuerzos máximos en tanto van desde los 85 MPa a 115 MPa. La vetilla de cuarzo tiene una pendiente de 37° la mayor de las 3 vetillas, no con mucha diferencia de las demás, en donde las vetillas de yeso y pirita tienen valores de 31° y 35°.

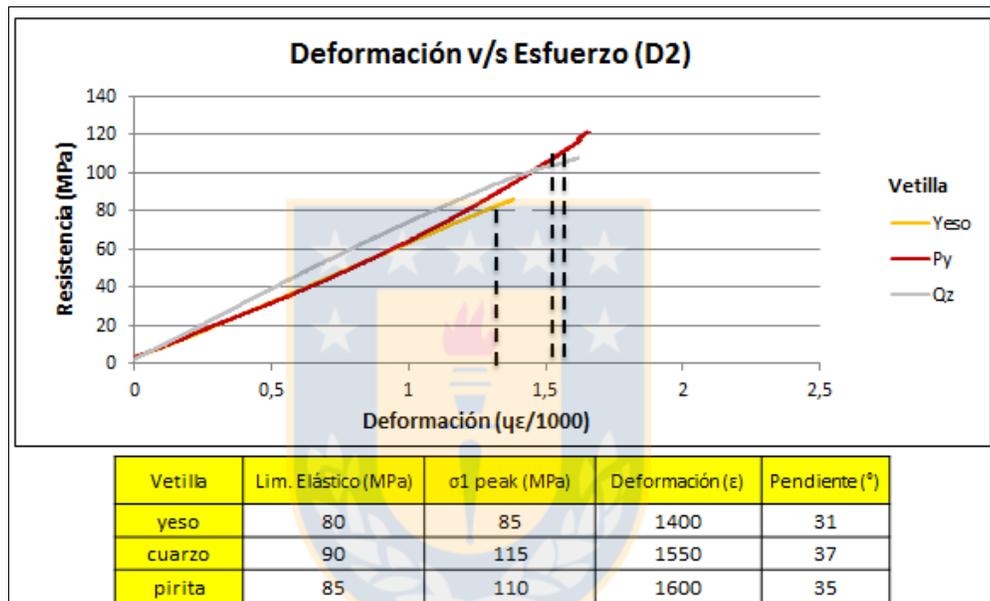


Figura 6.32: Curvas deformación- esfuerzo para 3 tipos de vetillas en ruptura D2. La línea segmentada corresponde al límite elástico de la curva.

Al comparar las rupturas por una vetilla (tipo D1), con la D2 en donde la ruptura se propaga a la matriz, observamos que las diferencias de pendientes son más notorias en D1. Lo anterior es debido a que en D1 la influencia de la vetilla en la deformación de la probeta es mayor, ya que los esfuerzos se van concentrando en la estructura antes de romper y dependen del relleno de estas. Al participar la matriz este efecto se pierde, ya la deformación depende también de las características de la matriz, en este caso la roca caja CMET.

6.8.4. Ruptura tipo C

El gráfico deformación-esfuerzo (Figura 6.33) para la fractura tipo C, muestra una pendiente del orden de los 30° para las vetillas, de yeso, cuarzo y pirita. El límite elástico, en tanto, varía entre los 90 MPa y 120 MPa. El máximo valor de esfuerzo *peak* lo alcanza la vetilla de cuarzo con 130 MPa seguido de la pirita (105 MPa) y el yeso (90 MPa). La deformación menor es de 1650 $\mu\epsilon$ correspondiente al yeso y la mayor lo alcanza el cuarzo con un valor de 2300 $\mu\epsilon$. El comportamiento es prácticamente similar para los 3 tipos de vetilla.

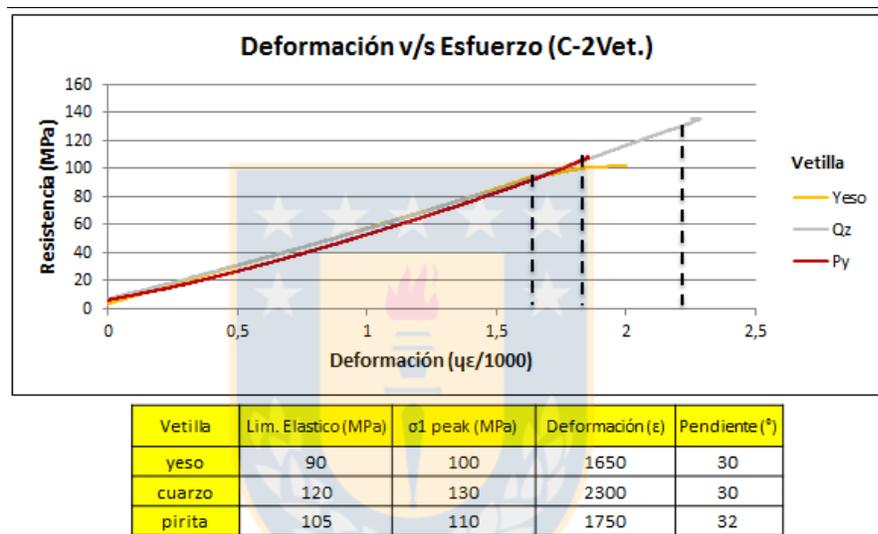


Figura 6.33: Curvas deformación-esfuerzo para 3 tipos de vetillas en ruptura tipo C por 2 vetillas. La línea segmentada indica el límite elástico para cada curva.

6.9. Ensayos de compresión confinada

6.9.1. Generalidades

Para definir la resistencia de las estructuras geológicas es preciso determinar su envolvente de ruptura, la cual corresponde al límite en que el material puede fallar. En geotecnia se suele asumir que dicha envolvente corresponde a la relacionada al criterio de resistencia de Mohr-Columb, este define la resistencia al corte en términos de la inclinación de la recta, conocido como ángulo de fricción (ϕ) y de su intersección con el eje vertical o esfuerzo de corte (C). De acuerdo con este criterio, Hoek y Bray (1981) indican que la resistencia al corte de las estructuras (τ) está dado por

una recta en el espacio, definida por un esfuerzo normal (σ_n) y un esfuerzo de corte (τ), relacionadas según el criterio de falla de Mohr-Columb. Dado esto Hoek y Bray (1981) indican que la resistencia al corte de las estructuras (τ_{max}), considerado la resistencia máxima está dada por la ecuación:

$$\tau_{max} = C_{peak} + \sigma_n \tan(\phi_{peak}) \quad (1)$$

Donde C_{peak} y ϕ_{peak} , corresponde a la cohesión y ángulo de fricción para el estado *peak* y σ_n es el esfuerzo normal efectivo en el plano de ruptura. En la condición residual, es decir cuando la resistencia *peak* ya se ha alcanzado y han ocurrido desplazamientos importantes en el plano de la estructura, la resistencia al corte queda dada por:

$$\tau_{max} = C_{res} + \sigma_n \tan(\phi_{res}) \quad (2)$$

Siendo C_{res} y ϕ_{res} la cohesión y el ángulo de fricción en condiciones residuales. La cohesión de una vetilla es la fuerza de unión entre las partículas minerales y puede definirse como la intersección de la envolvente de falla con el eje τ . El ángulo de fricción corresponde al ángulo que forma la envolvente con la horizontal, siendo $\tan(\phi)$ en la ecuación (1) y (2) el coeficiente de roce, que expresa la oposición al movimiento que ofrece la vetilla. Las ecuaciones (1) y (2) definen una recta correspondiente a la envolvente de falla de Mohr-Columb (Figura 6.34), bajo la envolvente el material ensayado es estable y sobre esta falla.

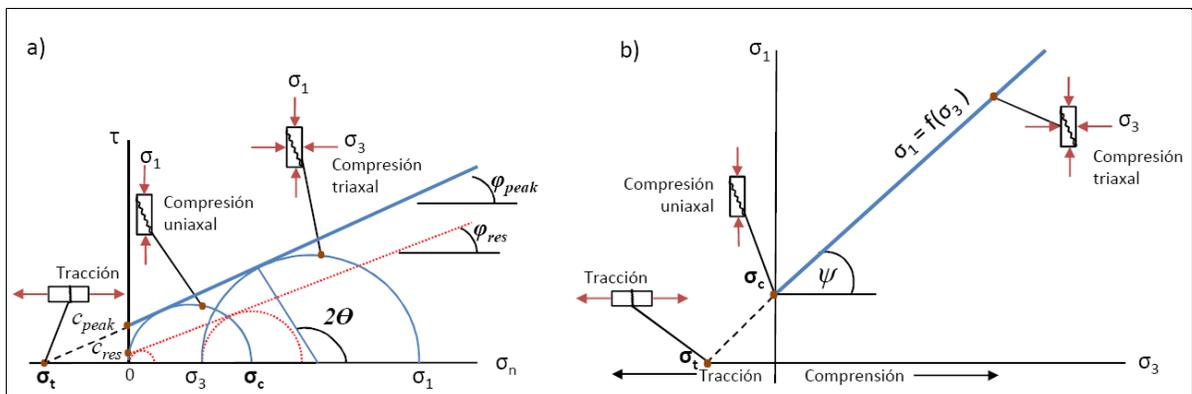


Figura 6.34: Envolvente de Mohr-Columb. En a) en términos de esfuerzos tangenciales y normales, se incluye la envolvente de resistencia *peak* y residual. En b) de acuerdo con los esfuerzos

principales. Se representan las diferentes condiciones de esfuerzo para la ruptura del material. Para un estado de esfuerzo situado por debajo de la envolvente no se producirá la rotura.

La envolvente de Mohr-Columb además de expresarse en términos de los esfuerzos de corte y normal puede hacerse en función de los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 , perpendiculares y paralelos a las caras basales del eje de la probeta y así obtener la resistencia a la compresión no confinada σ_c .

6.9.2. Círculo de Mohr

Para estructuras predefinidas, como el caso de una vetilla la determinación de los parámetros que definen el criterio de Mohr-Columb se hace en base a los resultados de ensayos de compresión confinada, en testigos que contengan la estructura determinando la envolvente de ruptura, considerando que esta pasa por el punto definido por la intersección de la línea entre la inclinación de la vetilla (α) con el círculo de Mohr mediante el ángulo 2θ ($2\theta=2*(90-\alpha)$), obteniendo el esfuerzo tangencial y normal a la estructura. La expresión gráfica del estado de esfuerzo recibe el nombre de Círculo de Mohr (Figura 6.35).

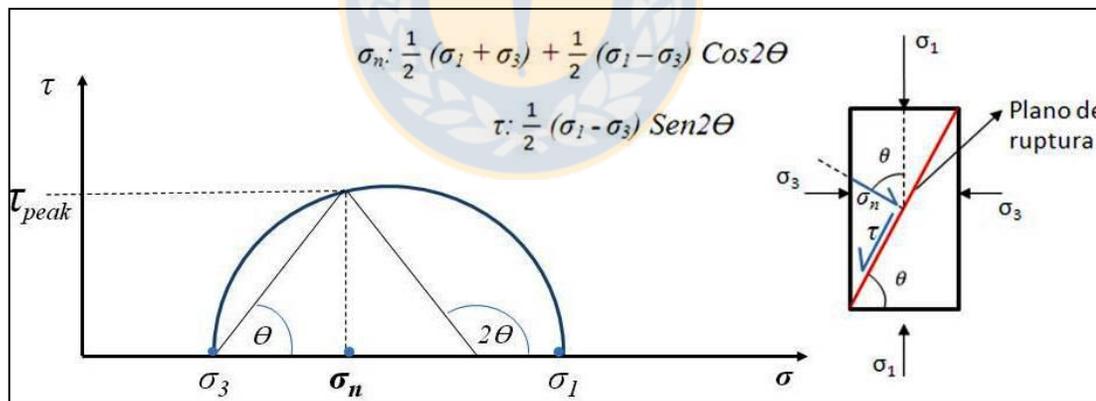


Figura 6.35: Círculo de Mohr-Columb. Se muestran las fórmulas para obtener los esfuerzos normales y de corte y los estados de esfuerzo en una probeta en condiciones triaxiales.

Conocida la magnitud y dirección de los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 , se puede calcular el esfuerzo normal y de corte para un plano conocida su orientación, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_n = 0,5 * (\sigma_1 + \sigma_3) + 0,5 * (\sigma_1 - \sigma_3) \text{ Cos } (2\theta)$$

$$\tau = 0,5 * (\sigma_1 - \sigma_3) \text{ Sen } (2\theta)$$

Las ecuaciones anteriores proporcionan una descripción completa del estado de esfuerzos sobre un plano con una inclinación θ , formado entre la normal al plano respecto al esfuerzo principal σ_1 respecto al ángulo α de la vetilla. La intersección del círculo con el eje de esfuerzo normal indica los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 , obtenidos de las pruebas de laboratorio. El esfuerzo de corte queda representado a partir del radio de la circunferencia y su valor dependerá del ángulo θ . Mediante el círculo de Mohr se pueden representar los distintos estados de esfuerzos al que se puede someter una probeta de roca.

6.9.3. Tipos de ruptura por sector

Los tipos de ruptura de las probetas en ensayos triaxiales (Figura 6.36), muestran un predominio de ruptura en el que participan vetillas. En la Huifa los tipos D1 y D2 suman un total de 44% de las fracturas, similar a la ruptura tipo C con un 41%. La matriz participa en tan solo un 15% de las rupturas.

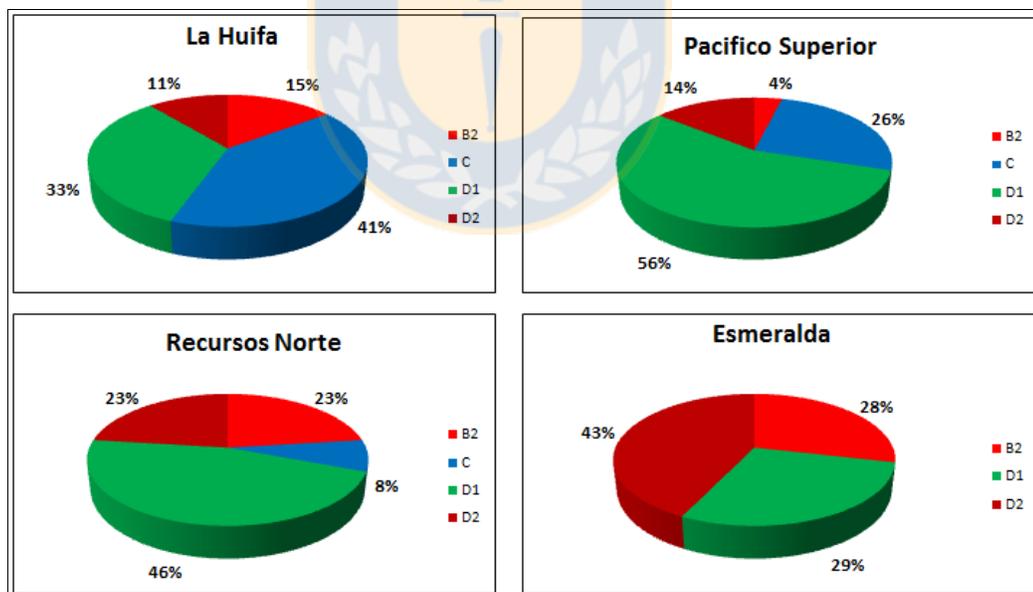


Figura 6.36: Graficos porcentuales circulares de tipos de ruptura por sector.

Pacifico Superior muestra un mayor porcentaje de rupturas tipo D1 con un 56%, seguido por las fracturas tipo C en un 26%, en tanto que las B2 solo se presentan en un 4%. El 46 % de rupturas por una sola vetilla en Recursos Norte indica un predominio de esta. La participación de las rupturas

en la matriz es de un 23%, mayor en comparación con los dos sectores anteriores y se observa una clara disminución del tipo C con tan solo un 8%.

6.9.4. Curvas de resistencia por ruptura

Ruptura tipo D1 y D2

Para las rupturas tipo D1 y D2 (Figura 6.37) la curva de resistencia muestra que los ángulos de ruptura van desde los 25° a 55°. La resistencia mínima es de 80,5 MPa y ocurre a un ángulo de 45°, las máximas en tanto ocurren en los 20° y 60° aproximadamente.

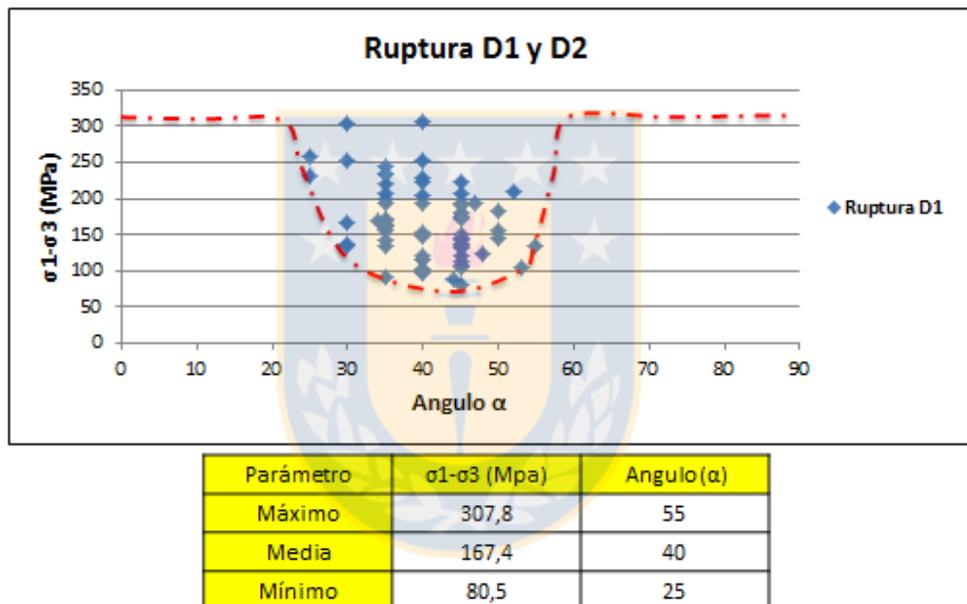
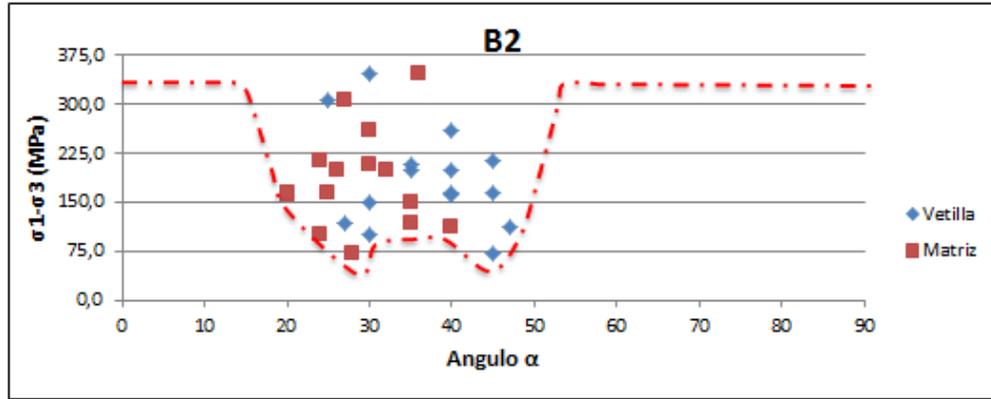


Figura 6.37: Curva de resistencia para rupturas tipo D1 y D2.

Ruptura tipo B2

La curva de resistencia (Figura 6.38) muestra un ángulo mínimo de 25° para las vetillas y de 20° para la matriz los máximos en tanto llegan a los 47° y 40° respectivamente. La resistencia mínima es de 70,7 MPa y se alcanza para los 28° en la matriz y a los 43° en las vetillas. Cuando los ángulos sean mayores a 55° y menores a 18° aproximadamente, no se produzcan rupturas.

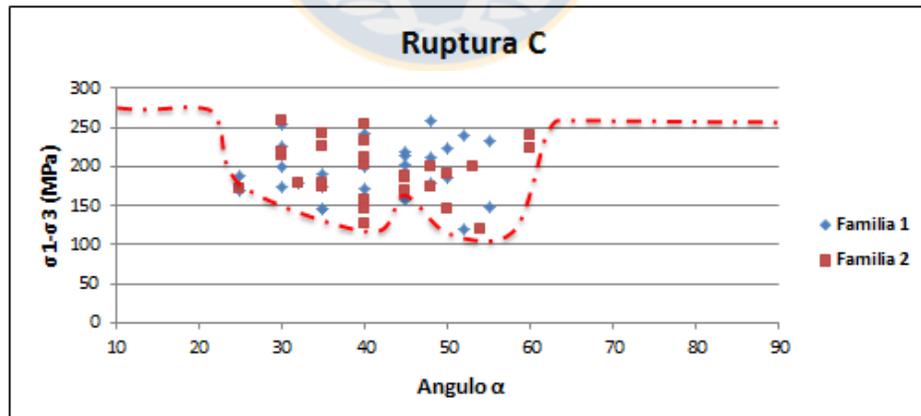


Parametro	$\sigma_1-\sigma_3$ (MPa)	Vetilla (°)	Matriz (°)
Maximo	348,4	47	40
Mínimo	185,1	37	29
Media	70,7	25	20

Figura 6.38: Curva de resistencia para ruptura tipo B2.

Ruptura tipo C

Se pueden apreciar dos familias de discontinuidades, la primera tiene angulos minimos y maximos de 25° y 55° (Figura 6.39) respectivamente,. La resistencia minima corresponde a 118,8 MPa y se alcanzan para angulos de 40° y 52° aproximadamente. Los limites en los cuales no se produziran ruptura son de 60° y 20° para los angulos de vetillas.



Parámetro	$\sigma_1-\sigma_3$ (MPa)	Familia 1 (α)	Familia 2 (α)
Maximo	258,3	55	60
Media	191,8	41	42
Mínimo	118,8	25	25

Figura 6.39: Curva de resistencia para ruptura tipo C.

6.9.5. Influencia de las vetillas en la envolvente de ruptura

Los siguientes gráficos muestran la relación entre las vetillas de yeso, anhidrita, calcopirita y cuarzo con las envolventes de Mohr- Columb para las rupturas tipo B2 y D2, D1 y D2.

Ruptura D2 y B2

La Figura 6.40 muestra las envolventes para 3 tipos de vetillas en estas rupturas (D2 y B2). La envolvente de Mohr-Columb según los esfuerzos principales para los 3 tipos de vetillas, muestra valores de compresión simple entre los 105,6 MPa y 173 MPa, siendo más bajo para el yeso y mayor para el cuarzo. Según los esfuerzos normales y de corte las envolventes tienen un ángulo de fricción para la vetilla con yeso de 37°, la anhidrita 33° y el mayor es el cuarzo con 40°. La menor cohesión la presenta el cuarzo con 19 MPa y el valor mayor la anhidrita con 22 MPa.

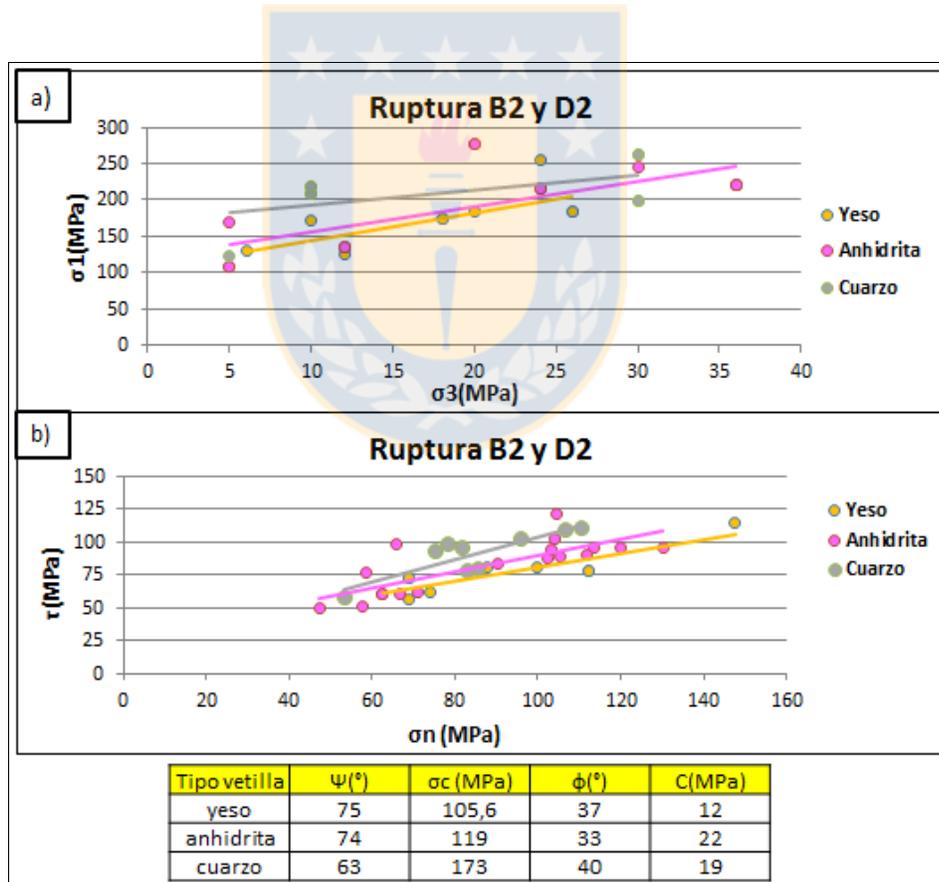


Figura 6.40: Envolventes de ruptura para en ruptura D1 y B2. En a) en función de esfuerzos principales. En b) según esfuerzos normal y de corte.

Ruptura tipo D1

Para las rupturas tipo D1 las envolventes de ruptura (Figura 6.41) entregan valores de resistencia a la compresión simple, con diferencias más marcadas que cuando participa la matriz en la ruptura. El valor máximo y mínimo corresponde a 136,8 MPa y 109 MPa para vetillas con cuarzo y yeso. Si consideramos las envolventes en función de los esfuerzos normales y de corte, los ángulos de fricción varían de 31° a 37°, para el yeso y cuarzo respectivamente, la anhidrita tiene un valor intermedio de 33°. La cohesión es similar para los rellenos con anhidrita y cuarzo, alrededor de los 22 MPa el yeso tanto presenta un valor de 17 MPa.

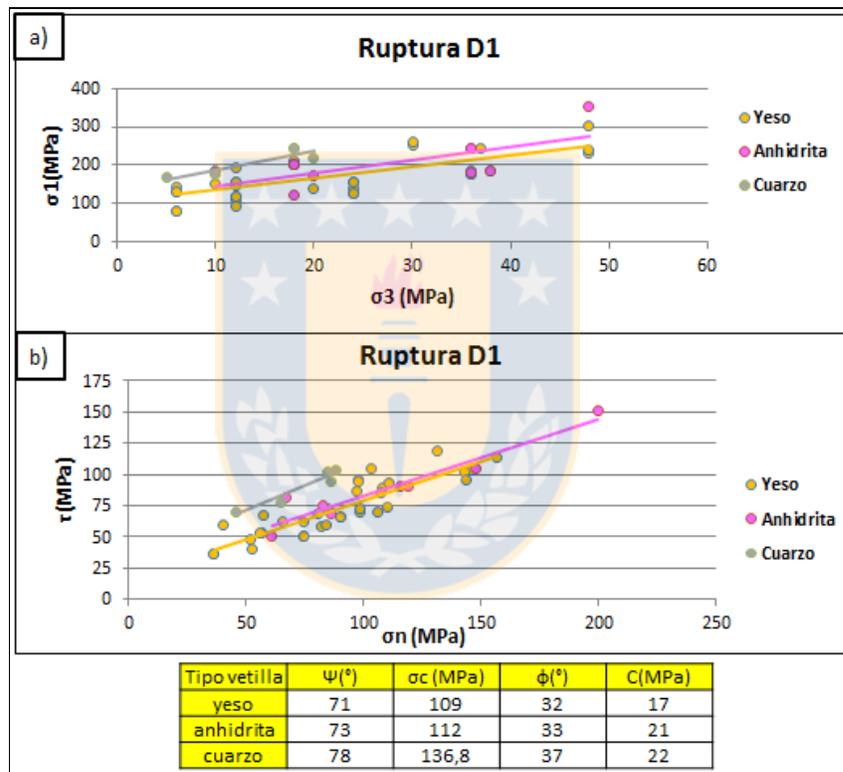


Figura 6.41: Envolventes de ruptura para vetillas de anhidrita en rupturas D1 y B2. En a) en función de esfuerzos principales. En b) según esfuerzos normal y de corte.

Ruptura tipo C

El comportamiento de las envolventes en la ruptura tipo C se muestra en la figura 6.42. Las envolventes en los esfuerzos principales tienen una inclinación de 72° a 75° para los 3 tipos de vetilla. La resistencia a la compresión simple tiene un rango más acotado, en comparación con las

rupturas anteriores variando entre los 120,4 MPa y los 131,9 MPa. Los ángulos de envolvente solo tienen una variación de 2° entre el valor máximo y mínimo.

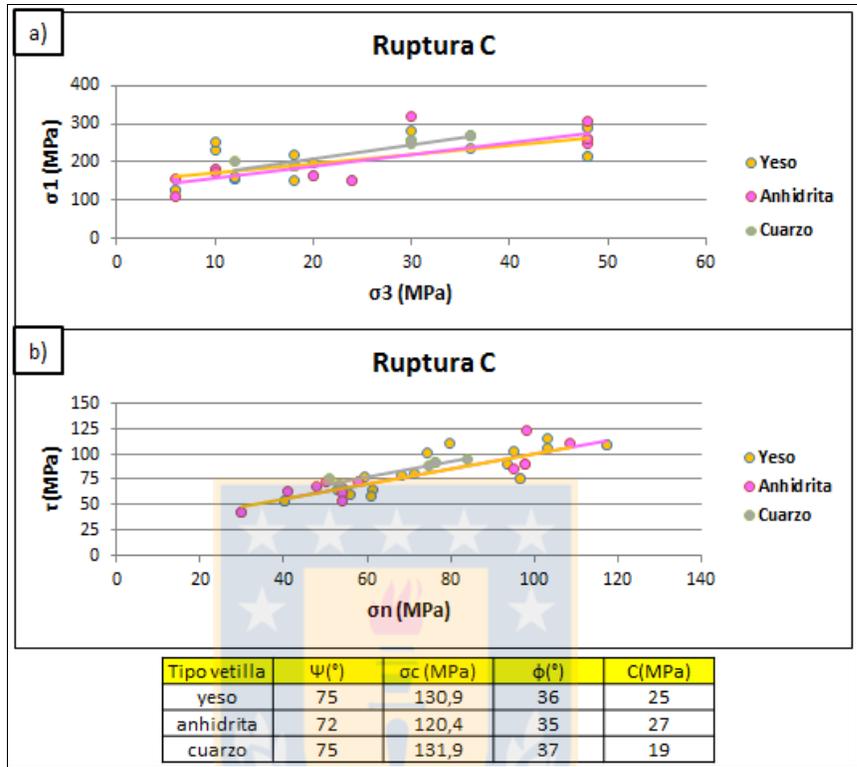


Figura 6.42: Envolventes Mohr-Columb para 3 tipos de vetillas en ruptura tipo C. En a) según esfuerzos principales. En b) en función de esfuerzos normal y de corte.

Las cohesiones en tanto se mueven entre los 19 MPa y 25 MPa en donde el menor valor corresponde a las vetillas con cuarzo y la mayor a los rellenos con anhidrita, eso sí con diferencias menos marcada en comparación cuando la ruptura ocurre por una vetilla (D1).

La tabla 6.4 entrega los resultados obtenidos por De Los Santos 2011 y los de esta memoria de título, para valores de ángulo fricción, cohesión y resistencia a la compresión simple en vetillas. Para efecto de este trabajo se consideró los valores de vetillas con yeso, anhidrita y cuarzo. Podemos apreciar una relación en los valores de σ_c ya que disminuye desde el ambiente Tardimagmatico (TM) al Hidrotermal Tardío (HT), es decir a medida que los rellenos son más blandos baja la resistencia a la compresión simple, lo que coincide con lo obtenido en este estudio ya que el yeso tiene la resistencia más baja y el cuarzo la más elevada. Las resistencias al corte (C),

son menores en vetillas con rellenos de yeso y mayores cuando contiene cuarzo o anhidrita (vetillas TM), es decir varía de la misma forma que la resistencia a la compresión simple (σ_c). El valor de la fricción para las vetillas TM (anhidrita y cuarzo) es de 34° y 39° , en tanto para las vetillas con cuarzo y anhidrita es de 37° y 33° . Para los rellenos con yeso el ángulo de fricción es de 32° para las vetillas HT llega a 39° , es decir no varía mucho con la dureza del mineral.

Tabla 6.4 Valores de ángulo de fricción (ϕ), Cohesión (C) y resistencia para a la compresión simple en vetillas. En a) Resultados obtenido por De Los Santos 2011, para vetillas en ruptura tipo D. En b) Resultados de este trabajo para vetillas con yeso, anhidrita y cuarzo en ruptura D1.

ENSAYOS AGRUPADOS SEGUN EL TIPO DE VETILLA							
Tipo	Subtipo	Mineralogía	Ruptura	ψ ($^\circ$)	σ_c (MPa)	ϕ ($^\circ$)	C (MPa)
	TM ₍₁₂₎		D (25°-40°)	71	157	36	30
TM ₍₁₎	V5	Oz > Anh	D (25°-40°)	73	174	34	42
TM ₍₁₂₎	V6	Anh > Oz	D (25°-40°)	76	133	39	26
TM ₍₁₇₎	V6	Anh > Cpy	D (25°-40°)	70	142	31	34
TM ₍₁₂₎	V6	Anh	D (25°-40°)	68	172	34	34
TM ₍₇₎	V7	Mo + Cpy	D (25°-40°)	-	-	42	10
	HP ₍₄₅₎		D (25°-40°)	72	128	38	20
HP ₍₂₆₎	V12	Cpy > Anh	D (25°-40°)	74	113	38	19
HP ₍₁₈₎	V12	Cpy	D (25°-40°)	75	117	43	11
	HT ₍₈₎		D (25°-40°)	77	82	39	12

Tipo vetilla	ψ ($^\circ$)	σ_c (MPa)	ϕ ($^\circ$)	C (MPa)
yeso	71	109	32	17
anhidrita	73	112	33	21
cuarzo	78	136,8	37	22

6.9.6. Envoltente de ruptura para CMET

A partir de las de la envoltente de ruptura de Mohr-Columb expresada en términos de los esfuerzos tangenciales y normales a la ruptura y esfuerzos principales obtenidos de la recopilación de ensayos triaxiales de los 4 sectores en estudio agrupados en función de la resistencia al corte de la roca intacta (Ruptura C y B2), y la de 1 vetilla (Ruptura D1 y D2), se obtuvo los valores de cohesión (C), ángulo de fricción (ϕ) y resistencia a la compresión simple (σ_c) para la unidad CMET.

La Figura 6.43 muestra la envoltente de ruptura según los esfuerzos normales y de corte, para los resultados obtenidos en este estudio y De Los Santos, 2011. Los valores de ángulos de fricción (ϕ)

muestran una diferencia de 4° para las vetillas (Ruptura D) y 4° para la roca intacta. La resistencia al corte (C) es de 25,4 MPa para las vetillas y 27,4 MPa en roca intacta, la diferencia con el estudio De Los Santos, 2011 es de 6,4 MPa y 4,7 MPa.

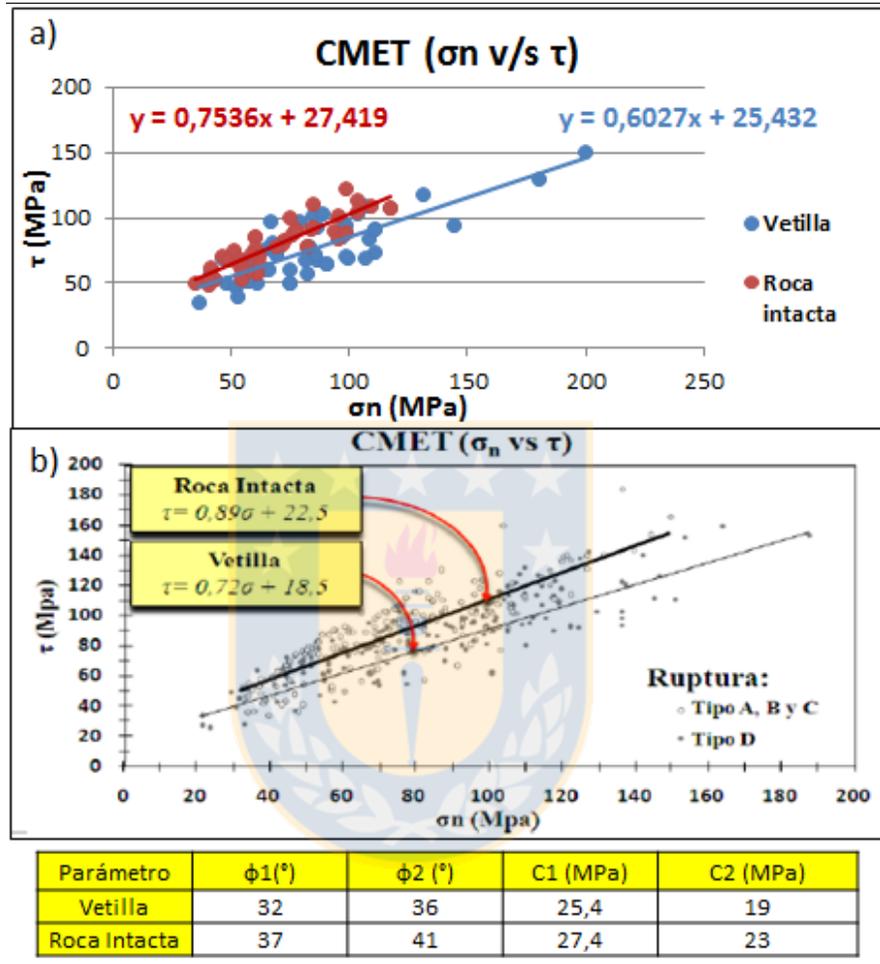


Figura 6.43: Envolventes de ruptura para una vetilla (D) y roca intacta (C y B2). a) según lo obtenido en este estudio. b) según De Los Santos, 2011.

Las envolventes según los esfuerzos principales (Figura 6.44) nos entregan valores de resistencia a la compresión simple de 119,3 MPa para las vetillas y 130,1 en roca intacta, los resultados obtenidos por De Los Santos, 2011 son de 134,2 MPa y 152,3 MPa, respectivamente. La inclinación de las envolventes (Ψ) no tiene diferencias significativas con un valor de 70° para las vetillas en ambos estudios y una diferencia de 4° para la roca intacta.

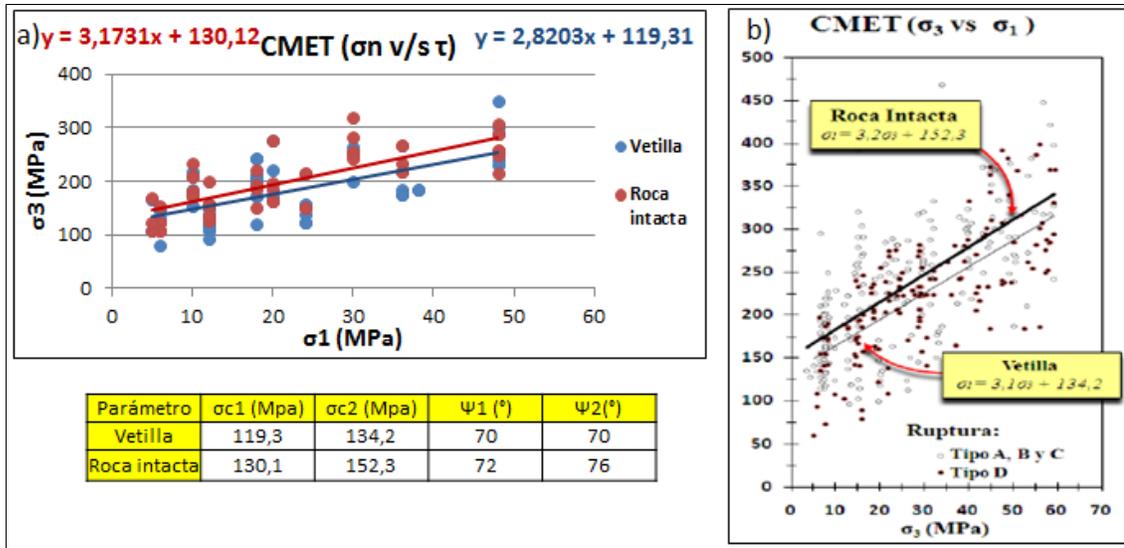


Figura 6.44: Envolventes de ruptura para una vetilla (D) y roca intacta (C y B2). a) según este estudio. b) según De Los Santos ,2011.

6.9.7. Criterio Bilineal de Patton

La resistencia al corte de las discontinuidades depende fundamentalmente de la fricción de los planos, y en menor grado de la cohesión. La rugosidad de las paredes de la discontinuidad es uno de los factores que más influyen en la resistencia friccional, sobretodo en discontinuidades sometidas a esfuerzos normales. Patton (1966) propuso un modelo de rotura bilineal basado en la influencia de las rugosidades. La irregularidad de una superficie puede ser definida por un ángulo de rugosidad i , que se suma al ángulo de fricción básico ϕ_b , el valor total de la superficie se obtiene por:

$$\Phi_p = \phi_b + i$$

El ángulo i de la discontinuidad tiene gran influencia en el comportamiento geomecánico de las discontinuidades, de hecho, la descripción y medida de la rugosidad tiene como principal finalidad la estimación de la resistencia al corte de los planos.

Según la Figura 6.45 si la discontinuidad no tiene cohesión, en donde es esfuerzo de corte es S y el esfuerzo normal es N , considerando la cohesión igual a 0 la resistencia al corte se puede estimar por:

$$\tau = \sigma_n * \tan(\phi_b + i)$$

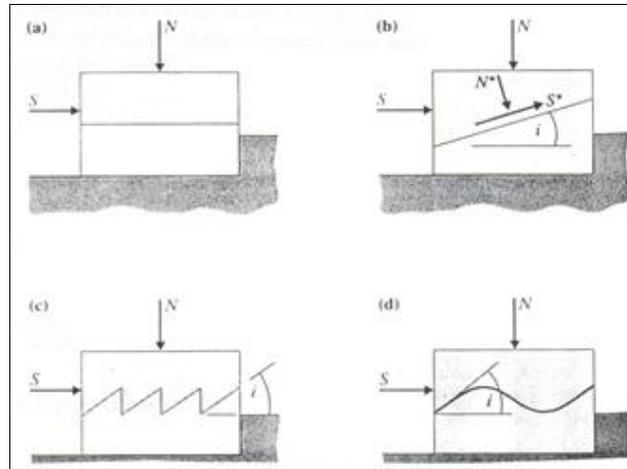


Figura 6.45: Influencia del ángulo de rugosidad en la resistencia la corte (S). Tomado de Vallejos, 2002.

La Figura 6.46 muestra el estado de esfuerzos en una vetilla post-ensayo con rugosidad 8, si se ejerce un esfuerzo tangencial sobre una discontinuidad sometida a esfuerzos normales.

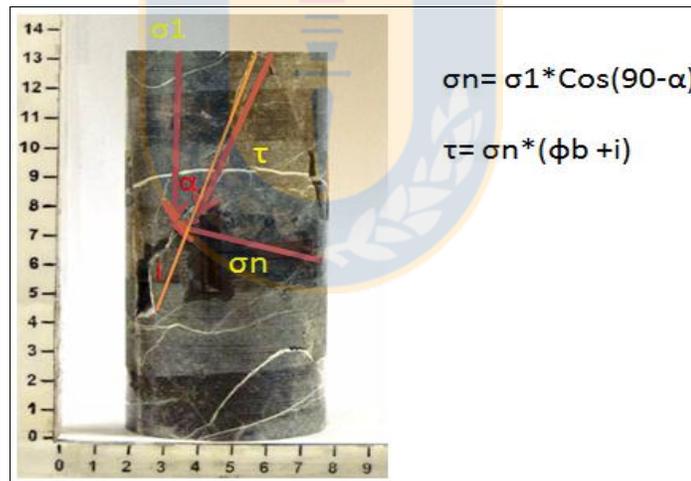


Figura 6.46: Estado de esfuerzos en una vetilla con rugosidad 8. Las ecuaciones permiten obtener los esfuerzos normales y de corte en la rugosidad.

Al producirse desplazamiento a favor del plano tiene lugar una dilatancia de las paredes de la discontinuidad, al tener que superar el ángulo i para que haya desplazamiento, por lo que opera el ángulo de fricción efectivo $(\phi_b + i)$. Si progresa el desplazamiento tangencial, se pueden romper los bordes más angulosos “suavizándose” las rugosidades, por lo que las dos superficies se ponen en contacto dominando el valor de ϕ_b .

6.9.8. Comportamiento de rugosidades en rupturas

Ruptura tipo D1 y D2

La Figura 6.48 muestra los esfuerzos de corte para rugosidades entre 4 y 10, podemos apreciar un aumento del valor de τ a medida que aumentan el valor de la rugosidad. Las vetillas con rugosidades 4 tienen la media más baja con 50,8 MPa, hay un aumento notorio cuando JRC es 8 que promedia 64,2 MPa, el valor promedio máximo es de 75,9 MPa y corresponde a un JRC de 10.

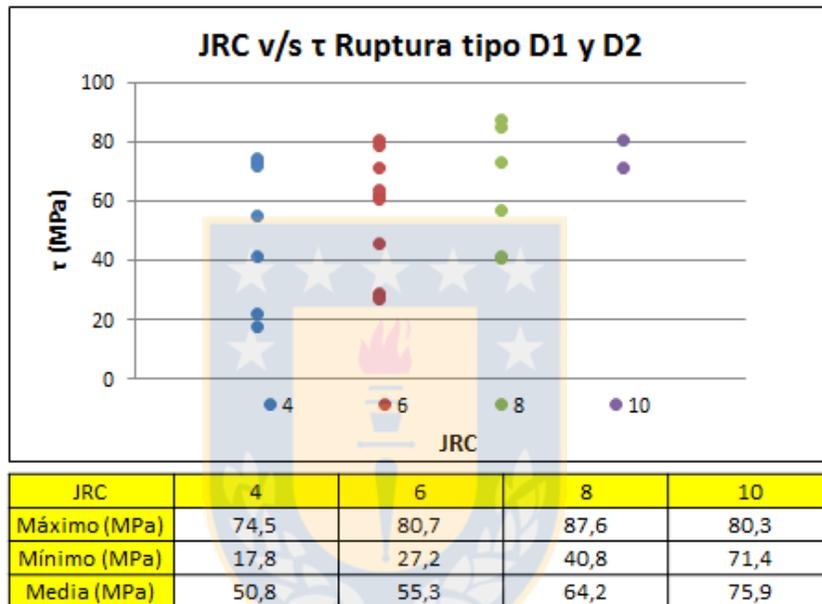


Figura 6.47: Gráfico de dispersión con los valores de esfuerzos de corte para un JRC de 4, 6, 8 y 10 en ruptura tipo D1 y D2.

Ruptura tipo B2

Para las rupturas tipo B2 (Figura 6.49) la tendencia anterior no se cumple, es decir no hay un aumento de los esfuerzos de corte con la rugosidad, en efecto un valor de rugosidad 4 muestra una media de 78,5 MPa levemente mayor que un JRC de 10 que promedia 75,8 MPa. Así mismos las rugosidades del orden 6 tienen un mínimo de 25 MPa menor en comparación con un JRC de 4 que es de 39,3 MPa, por lo que la matriz tiene influencia en los esfuerzos de corte en las rugosidades.

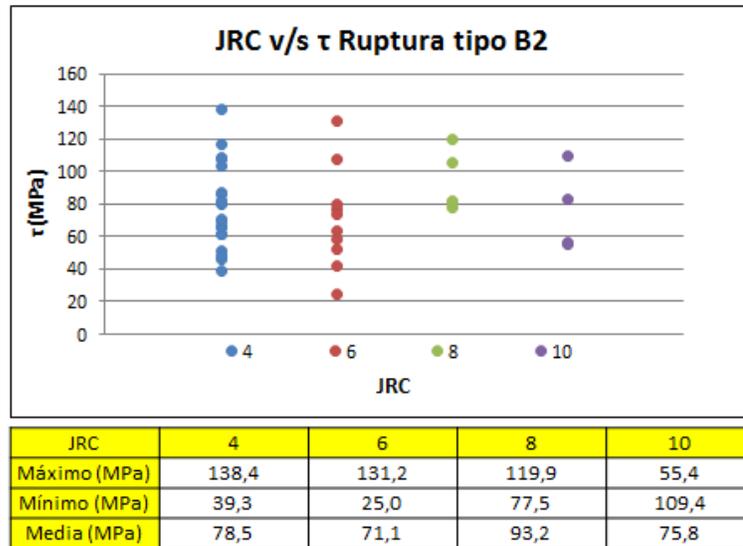


Figura 6.48: Gráfico de dispersión con los valores de esfuerzos de corte para un JRC de 4, 6, 8 y 10 en ruptura tipo D1 y D2.

6.9.9. Criterio de Barton & Choubey (1976)

Se trata de un criterio empírico, deducido a partir del análisis del comportamiento de las discontinuidades en ensayos de laboratorio, que permite estimar la resistencia al corte de las discontinuidades de la siguiente manera:

$$\tau = \sigma_n * \tan (JRC * \text{Log}_{10} (JCS / \sigma_n) + \phi_r)$$

De donde:

τ : Esfuerzo de corte (MPa)

σ_n : Esfuerzo normal (MPa)

JRC: Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad

JCS: Resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad

ϕ_r : Angulo de fricción residual

El modelo considera cambios en la resistencia con el esfuerzo normal y la rugosidad. La ecuación sugiere que el esfuerzo de corte en una discontinuidad está controlado por una componente friccional, ϕ_r , una componente geométrica dado por el parámetros JRC, y un factor de aspereza controlado por la relación “ JCS/σ_n ”.

6.9.10. Relación entre la resistencia a la compresión simple y rugosidad

Para estimar esta relación, en la fórmula, se dejó la rugosidad en función de las demás variantes, como muestra la fórmula:

$$JRC = (\tan(\tau/\sigma_n) - \phi_r) / (JCS/\sigma_n)$$

En el cual se consideraron ángulos de fricción residual entre 37° y 39° , para las vetillas. La Figura 6.50, muestra la relación entre las vetillas que contienen yeso, anhidrita y cuarzo. En a) las rupturas tipo D1, las vetillas que contienen cuarzo tienen teóricamente los valores más altos de rugosidad, variando entre 6 y 12, con un JCS entre 110 MPa y 220 MPa, en la práctica el índice JRC va desde 6 a 10. La anhidrita tiene rugosidades de 4 a 10, coincidiendo con los valores medidos en probetas, con un rango de JCS entre los 120 MPa y 270 MPa. Las vetillas con yeso tienen las menores rugosidades, con un mínimo de 4, llegando hasta 8 y un JCS que varía de 60 MPa a 275 MPa. Las rupturas tipo B2, observamos que los valores teóricos difieren de manera significativa con los medidos en probeta, por lo que la influencia de la vetilla se pierde en el valor de JRC.

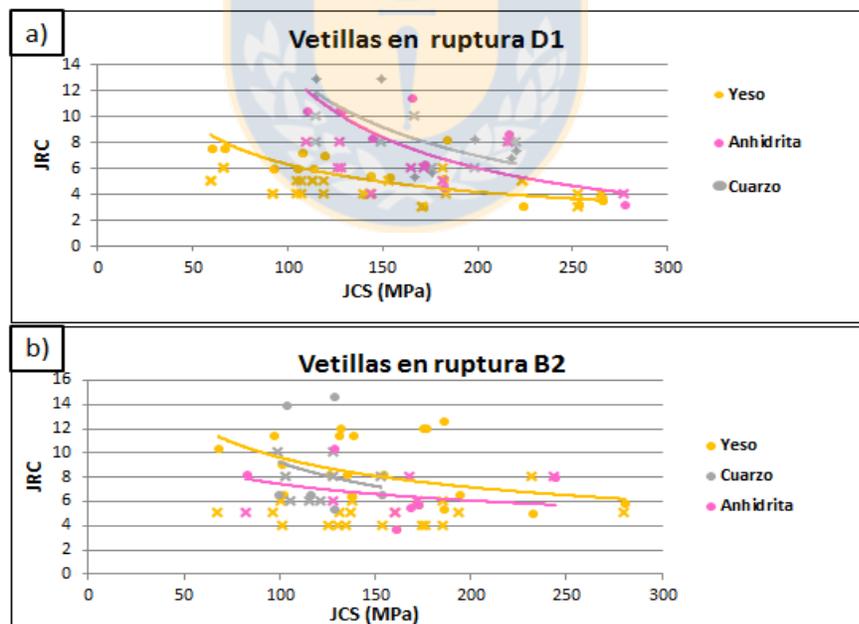


Figura 6.49: Gráficos JCS v/s JRC para vetillas de yeso, cuarzo y anhidrita. En a) vetillas en ruptura D1. En b) vetillas en ruptura B2. Los círculos corresponden a los valores teóricos de rugosidades. Las cruces los valores medidos en las probetas.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En relación con los resultados obtenidos en los ensayos de compresión uniaxial simple y confinada realizados en probetas de 4 sectores de producción de mina El Teniente se presentan un conjunto de conclusiones y recomendaciones relativas a las propiedades geotécnicas de las vetillas y su relación con los parámetros estudiados.

7.1. Conclusiones

7.1.1. Ensayos de compresión uniaxial

En el marco de esta memoria de título, se estudió el comportamiento de las vetillas del stockwork de mina El Teniente en ensayos geotécnicos de compresión uniaxial y de deformación. Según resultados históricos de mina El Teniente (Figura 6.2), la tendencia es que para distintos tipos de roca caja, la resistencia a la compresión simple disminuye a medida que aumenta el número de vetillas en las probetas, esto se confirma con los resultados de este trabajo (Figura 6.3) donde la resistencia de las probetas para los 4 sectores disminuye a medida que aumenta el número de vetillas. Esta tendencia es menos marcada en el sector La Huifa donde la cantidad de vetillas en probetas no supera las 4, por lo que las mayores resistencias se encuentran en este sector, llegando hasta los 280 Mpa.

La cantidad de vetillas aumenta en los sectores Recursos Norte y Pacifico Superior, llegando hasta 7 vetillas por probeta por ende se ve una clara disminución de la resistencia CUS en donde los valores máximos van bajando desde los 200 Mpa para 4 vetillas en probeta a un valor de 150 MPa con 6 vetillas. Cabe destacar que la cantidad de muestras analizadas del sector Esmeralda es menor en comparación con los demás, aun así, los valores de resistencia de 5 a 7 vetillas coinciden con los sectores Pacifico Superior y Recursos Norte que presentan la misma cantidad de vetillas.

La tabla 7.1 muestra los valores promedios de resistencia por sector y el número de vetillas promedios en probetas para cada uno, como se aprecia La Huifa tiene el menor promedio de vetillas y el mayor valor de resistencia CUS. El menor valor de resistencia esta en Pacifico Superior que a su vez presenta el mayor promedio de vetillas. El valor estándar de resistencia para el CMET es de 120 Mpa, la mayor diferencia se da en Pacifico Superior con 24,6% y la menor en Recursos Norte con un 5,7%.

Tabla 7.1: Tabla comparativa de valores de resistencia CUS y numero de vetillas promedio por sector.

Sector	Resistencia(MPa)	Resistencia CMET (MPa)	% Diferencia	N° Vetillas promedio
La Huifa	130.9	120	14.2	2.1
Pacifico Superior	99.5	120	24.6	4.7
Recursos Norte	115.3	120	5.7	3.8
Esmeralda	128.4	120	10.7	5.3

7.1.2. Tipos de ruptura en las probetas por sector

La respuesta de las probetas a ensayos de compresión uniaxial, como se ha mencionado anteriormente produce ciertos tipos de ruptura en estas (Capítulo 5, figuras 5.8 a 5.13). Al analizar el tipo de rupturas por sector (Figura 6.4) se puede concluir:

- En La Huifa la participación de rupturas tipo B2 es de un 77% mayor que los demás sectores, esto se explica por el menor número de vetillas en la probeta lo que provoca una mayor participación de la matriz en la forma en que fractura la probeta. Las ruptura por una vetilla, sea D1 o D2 son menos frecuentes solo con un 13%.
- Pacifico Superior y Recursos Norte, muestran un menor porcentaje de rupturas B2 no superior al 41%. La menor participación de la matriz en las rupturas, se explica por el mayor número de vetillas que presentan estos sectores, en comparación de La Huifa, en Pacifico Superior y Recursos Norte las rupturas que participan vetillas, es decir los tipos D1, D2 y C, dominan con más del 50% en las fracturas de las probetas. En Esmeralda la participación de vetillas en las rupturas también es considerable con un 56%, Por lo que a medida que aumentan la cantidad de vetillas en las probetas, la participación de la matriz, en las rupturas es menor.

- Es importante destacar, que las rupturas tipo A solo por matriz no sobrepasan el 14%, es decir la participación de las vetillas en las rupturas es del orden del 85% para los 4 sectores estudiados.
- En relación a la resistencia por tipo de rupturas (Figura 6.6), se puede concluir que el tipo B2 es el que presenta el rango más amplio y mayor de valores en comparación con los otros tipos de fractura, por lo tanto la resistencia de la probeta es mayor en B2 que cuando solo lo hace por una o dos vetillas (D1 y C) o se propaga la fractura desde la vetilla a la matriz (D2).
- Se concluye que cuando participa la matriz en la ruptura las resistencia es mayor (Ruptura tipo B2 y D2) y disminuye a medida que aumenta el número de vetillas en la probeta, debido a una menor participación de la matriz en donde la ruptura depende de las propiedades de las vetillas. (Figura 7.1).

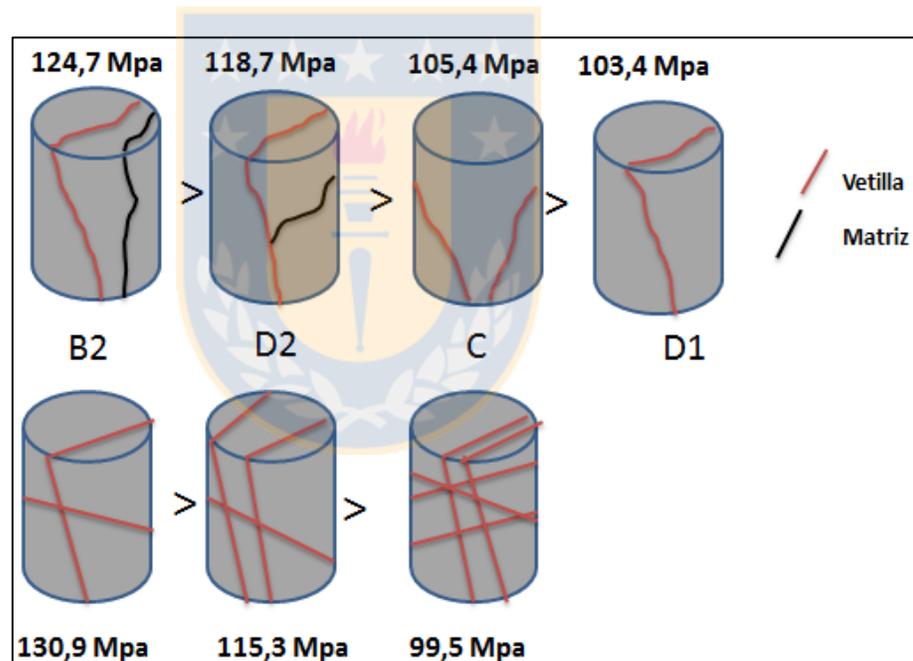


Figura 7.1: Esquema que ilustra la variación de la resistencia de las probetas de acuerdo a los tipos de ruptura y número de vetillas en probeta.

7.1.2. Influencia de la mineralogía en los tipos de ruptura

- Al analizar los tipos de rupturas por sector (Tabla 7.2), se concluye que para las rupturas tipo B2, los valores de resistencia disminuyen en el sector donde se encuentran las vetillas con rellenos más duros (Recursos Norte) y son mayores donde los rellenos son más blandos como

La Huifa, por lo que se concluye que las resistencias en este tipo de ruptura son dominadas más por las características de la matriz y el número de vetillas en la probeta que por la mineralogía de las vetillas.

Tabla 7.2: Resistencia por tipo de ruptura en cada sector.

Tipo de ruptura	La Huifa (Mpa)	Pacífico Superior (Mpa)	Recursos Norte (Mpa)
B2	138,4	116,8	115,4
D1	49,7	82,9	117,5
D2	-	104,9	130,3
C	104,6	97,5	110,7

- En las rupturas por una sola vetilla, La Huifa presenta un promedio de 49,7 MPa, el más bajo de los sectores, debido a que en las vetillas dominan los rellenos blandos de yeso y clorita. En Recursos Norte la media es de 117,5 MPa, aproximadamente un 50% más que en La Huifa, debido a que las vetillas presentan minerales duros como el cuarzo y la pirita, por lo tanto, en las rupturas D1 la resistencia está dominada por el relleno mineralógico. Lo mismo ocurre en las tipos D2, donde la resistencia promedio es mayor en Recursos Norte que en Pacífico Superior la cual contiene más yeso en sus vetillas.
- Cuando las rupturas es por más de una vetilla (Tipo C), las resistencias son similares en los 3 sectores pero continúa siendo mayor en Recursos Norte, donde las vetillas contienen minerales más duros.

7.1.3. Ángulo de ruptura de las vetillas en probetas

- Estadísticamente los ángulos de ruptura de las vetillas van desde los 20 ° hasta un valor máximo de 50°. En los 4 sectores estudiados las fracturas se presentan en ese rango de ángulos, independiente del número de vetillas que presente la probeta.
- No se observa una relación entre los tipos de ruptura en probeta con la inclinación de las vetillas rotas, es decir, que las vetillas rompen en ángulos de 18° a 50° independiente de la forma en que rompe la probeta.

- En la tabla 7.3, para las rupturas tipo A la matriz rompe en ángulos desde los 18° a 46°, según el estudio de la curva de resistencia, por lo cuando las probetas rompen solo por matriz, lo hacen en ese rango de ángulos con resistencias máximas de 318,9 MPa y mínimas de 36,9, MPa.

Tabla 7.3: Valores de ángulos de ruptura y resistencias máximas y mínimas, para cada tipo de ruptura en probetas.

Tipo de ruptura	Resistencia máxima (MPa)	Angulo máximo (°)	Resistencia Mínima (Mpa)	Angulo mínimo (°)
A	318.9	47	36.9	18
D1 y D2	147.5	43	39.5	23
B2	200.7	50	30.4	25
C	151.1	47	65.3	20

- Las rupturas que ocurren por una vetilla y por matriz (B2), tienen un rango de 23° a 43°, para las fracturas. La resistencia máxima es de 200,7 MPa, menor que en el tipo A, por lo que cuando participa la vetilla en la fractura de la probeta la resistencia de esta disminuye.
- Cuando en las probetas dominan las vetillas en las fracturas, las resistencias tienden a la baja en comparación cuando participa la matriz variando desde 147,5 MPa a 151,1 MPa, si se compara con las tipos A los valores máximos de UCS son casi el doble.
- Los ángulos mínimos de ruptura varían entre 18° y 25°, es decir que vetillas con menores ángulos no romperán en las probetas. El rango de ángulos máximos es de 43° a 47°, por lo que a vetillas con mayores inclinaciones que estas no fallaran independiente del esfuerzo aplicado a la probeta.

7.1.4. Deformación de las probetas

- Como en este estudio se consideró un tipo de roca caja (CMET), los valores de deformación no tienen grandes diferencias en los 4 sectores, lo que se evidencia en el diagrama *Box-Plot* de la Figura 6.18, en donde la distribución de los valores es muy similar en 3 de los 4 sectores.
- La Huifa muestra rango de valores de módulo de Young Tangente más amplio que los otros 3 sectores, que se debe al menor número de vetillas en las probetas. A partir de 4 vetillas en probeta los modulos disminuyen para Pacifico Superior y Recursos Norte, estos sectores

- contienen un promedio de vetillas más elevado que La Huifa, por lo que si el número de vetillas influye en la deformación debe ser en una cantidad considerable, en este caso 5, por lo que a una cantidad de vetillas menor a esta la deformación depende más de la matriz. Lo anterior se correlaciona con el estudio de Barahona 2013, en donde el módulo de Young Tangente disminuye a partir de 10 vetillas en los pobretones.
- Según la clasificación de Deere & Miller (1966), los resultados de compresión simple de las probetas, permiten clasificarlas como como rocas tipo C y B (Figura 6.23) mayoritariamente, es decir con una resistencia media a alta y un módulo relativo medio a alto, por lo que se acercan al comportamiento de la roca primaria de mina El Teniente (zona amarilla en Figura 6.24).
- Los rellenos de las vetillas, influyen en los valores de deformación de las probetas, solo cuando las rupturas son por una sola vetilla (D1), ya que los minerales más duros como el cuarzo y la pirita tienen pendientes mayores que la anhidrita y yeso que tienen menores durezas. De lo anterior se puede concluir que las vetillas con cuarzo y pirita tienen un comportamiento más rígido, es decir que las probetas se deforman menos antes de fallar por una vetillas.
- En el caso de los demás tipos de rupturas (B2, D2 y C), las pendientes de las curvas-deformación esfuerzo son similares para las vetillas con cuarzo, pirita, yeso y anhidrita, por lo que las deformaciones antes de producirse la ruptura ya no se concentrarían en las vetillas como el caso de las D1, sino más bien en la matriz de las probetas.

7.2. Influencia de las vetillas en ensayos de compresión confinada

7.2.1. Rupturas en condiciones triaxiales

- La ruptura de las probetas en ensayos de compresión confinada, difieren en comparación con los de compresión simple ya que hay una mayor participación de las vetillas en las rupturas. Para los 4 sectores, las rupturas tipo B2 no sobrepasan el 28% a diferencia en los ensayos de compresión simple en donde este tipo de ruptura llega al 77%.
- Cuando las probetas son sometidas en condiciones triaxiales, no se producen rupturas tipo A, es decir, rompen con participación de vetillas en los planos de fractura.

- Las rupturas por una sola vetilla, son las que predominan en los 4 sectores, con porcentajes superiores al 30%. En La Huifa los tipos C llegan a un 41% y en Pacifico Superior un 26%, son justos estos sectores los que presentan las vetillas más blandas, a diferencia de Recursos Norte que llegan a un 8%. Lo anterior se explica debido al haber una mayor cantidad de vetillas blandas y en condiciones de confinamiento, la ruptura se propagara por los planos de mayor debilidad en este caso las vetillas que tengan los rellenos más blandos.
- La curva de resistencia para las rupturas D1 y D2, tiene una mayor diferencia de los esfuerzos principales, debido que en condiciones uniaxial $\sigma_3=0$, por lo que en condiciones triaxiales se requiere un mayor esfuerzo vertical σ_1 para provocar el fallamiento en la probeta. Los ángulos de ruptura varían en torno a los 25° - 55° , es decir no varían en condiciones de confinamiento.
- Para las rupturas B2 las resistencias máximas bordean los 350 Mpa las rupturas en las vetillas ocurren en ángulos entre 20° y 40° .
- Las rupturas por varias vetillas en condiciones triaxiales llegan a resistencias del orden de los 258,3 MPa, más bajo que los dos sectores anteriores. Lo anterior es debido a una mayor participación de vetillas con rellenos mineralógicos blandos en este tipo de ruptura.

7.2.3. Influencia de las vetillas en las envolventes de ruptura

- La influencia de las vetilla en las envolventes de Mohr-Columb, es más dominante cuando la ruptura ocurre por una vetilla (D1) ya que para la resistencia a la compresión simple, ángulo de fricción y cohesión, aumentan desde el yeso al cuarzo (Tabla 6.4), es decir a medida que participan minerales más duros en los rellenos.
- Cuando participa la matriz en la ruptura (B2 y D2), la influencia de la vetilla es menor, ya que las envolventes de ruptura están más cerca una de otra, en comparación con la ruptura D1. La diferencia de σ_c es menor entre el yeso y la anhidrita, pero para el cuarzo sigue siendo mayor debido a su dureza.
- En la ruptura por 2 vetillas, las envolventes muestran una similitud para el yeso y la anhidrita, con una diferencia menor si se considera una sola vetilla. Lo anterior se debe a que en las probetas con varias vetilla de yeso, algunas de estas contienen anhidrita, pero al ser el yeso el mineral de relleno predominante, fallaran aunque tengan un porcentaje considerable de mineral con una dureza intermedia como la anhidrita.

- Se demuestra que para los minerales con dureza baja a intermedia (yeso y anhidrita), la influencia en las propiedades de cohesión, fricción y resistencia a la compresión simple, es mayor cuando la ruptura es por solo una vetilla (D1) y menor en las demás rupturas ya que el comportamiento de los rellenos con yeso y anhidrita no difieren mucho. En tanto cuando participa el cuarzo en los rellenos, el ángulo de fricción y σ_c son mayores a las vetillas de yeso y anhidrita independiente del tipo de ruptura en el cual participan, por lo que cuando las vetillas contienen minerales duros, influyen de manera notoria en las propiedades de resistencia y corte de la probeta aunque haya participación de la matriz en la ruptura.

7.2.4. Relación entre la resistencia y rugosidad

- Los valores de rugosidad tienen diferencias en los 4 sectores estudiados. La Huifa tiene los rangos de rugosidad más bajos, desde 4 a 8 para sus rupturas, en Pacífico Superior el rango es el mismo aumentando hasta 10 solo en las rupturas D2, esta poca variación se debe a que en este sector las vetillas contienen un contenido considerable de yeso al igual que en La Huifa.
- En Recursos norte y Esmeralda el valor mínimo de JRC es de 4, alcanzado un máximo de 12 en algunas vetillas en ruptura B2 para Recursos Norte, aunque este sector tiene minerales duros (cuarzo y piritita) en mayor proporción que los dos sectores anteriores, el aumento de la rugosidad no es tan significativo.
- Al relacionar la resistencia con la rugosidad de las vetillas en las rupturas D1 (Figura 6.47 a)), las menores rugosidades se dan en vetillas con rellenos de yeso y son más elevadas para el cuarzo, es decir las rugosidades se presentan más lisas cuando están rellenas por minerales blandos, y más ondulosa o rugosas cuando en su composición hay minerales duros como el cuarzo.
- Cuando las vetillas presentan asperezas en las rupturas D1, están tienden a romperse o disminuir a medida que aumenta el esfuerzo ejercido en la probeta, debido a que las rugosidades disminuye. Lo anterior se cumple cuando las vetillas contienen rellenos de yeso, anhidrita y cuarzo, es decir independiente de la mineralogía, las asperezas disminuyen al aumentar la resistencia.
- Si en la ruptura de la probeta, participa la matriz el efecto anterior no se cumple teóricamente, es decir se pierde la influencia del relleno mineralógico de las vetillas en las rugosidades (Figura 6.47 b). Lo anterior se deduce por las curvas teóricas de resistencia versus JRC, en donde a

diferencia de la ruptura D1, la curva del yeso se ubica con mayores rugosidades que el cuarzo. En la práctica, los valores de JRC, siguen siendo, bajos para los rellenos blandos y un poco más elevado para las vetillas con minerales duros.

- Las vetillas que presentan una geometría mas ondulosa, tienen mayores rugosidades que las planares, esto se aprecia en las vetillas con rellenos donde domina el cuarzo, la anhidrita o ambos, estas pertenecen a la categoría Tardimagneticas (TM) ,en donde las vetillas son semi-ductiles por lo que la forma sinuosa de estas vetillas le otorga una mayor rugosidad.
- Los esfuerzos de corte de las rugosidades son mayores a medida que el valor de JRC aumenta de 4 a 10, esto se cumple en las rupturas donde solo participa una vetilla, es decir los tipos D2 y D1. Cuando en la fractura de la probeta participa la matriz el efecto anterior se pierde, ya que no necesariamente un JRC de 4 o 6 mostrara los menores valores de τ , en comparación con rugosidades de 8 y 10.

7.3. Recomendaciones

A raíz de los análisis y resultados obtenidos en esta memoria de título, se recomienda en trabajos futuros:

- Considerar una mayor cantidad de probetas del sector Esmeralda, ya que debido a la menor cantidad de datos en comparación con los demás sectores no fue posible hacer una buena comparación en la mayoría de los parámetros estudiados. Lo obtenido para este sector, es solo una reseña de su comportamiento por lo que los resultados deben apoyarse con más datos.
- Realizar un estudio de frecuencia de vetillas y ensayos geotécnicos, para otras litologías que estén presentes en los sectores productivos ya que como se concluyó en este estudio, las propiedades geotécnicas de la roca caja varían en función de su frecuencia y tipo de vetillas.
- Replicar los ensayos de compresión simple y confinada para vetillas con un mayor porcentaje de rellenos metálicos como calcopirita o pirita, y contrastarlo con los resultados obtenidos.
- Para los ensayos de deformación, se propone colocar *strain gauges* en las proximidades de las vetillas (Figura 7.2), para así poder determinar la deformación de estas o si tienen o no alguna influencia en la deformación de la matriz.

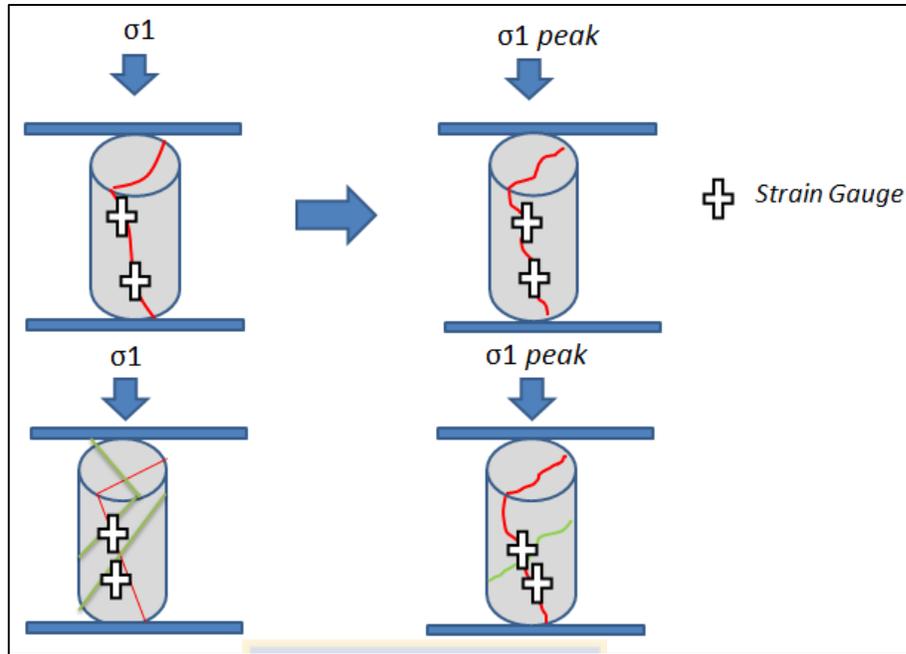


Figura 7.2: Posición de los strain gauges propuesta para medir la deformación de las vetilla o la influencia de estas en la deformación de la matriz.

- Estudiar las curvas de resistencia para otro tipo de rellenos y con vetillas que tengan como roca caja otras unidades de mina El Teniente.
- Estudiar el comportamiento en condiciones triaxiales, para vetillas con un espesor mayor a 2mm ya que en este estudio se consideraron vetillas con un espesor menor a este.
- Realizar un estudio considerando el número y tipo de vetillas presentes en las probetas, enfocándose en las alteraciones hidrotermales de la roca caja para poder ver si existe una influencia en los valores de resistencia en las rupturas que participa la matriz.
- En las vetillas que presenten un halo de alteración considerable, estudiar su composición y establecer su comportamiento en los diferentes ensayos geotécnicos estudiados en este trabajo.
- Considerar el tipo litológico para las próximas descripciones de probetas en CMET, ya que como se demostró en las rupturas que participa la matriz (B2) las resistencias dependen más de la matriz que de la composición mineralógica de la vetilla que acompaña a la ruptura.
- Realizar un análisis más detallado a ensayos de corte directo, para vetillas con espesores mayores a los considerados en esta memoria de título.

8. REFERENCIAS

Álvarez, L. 1990. Perfil de alteración & mineralización supérgena en el Yacimiento El Teniente, Rancagua, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería & Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias Geológicas (Inédito).: 138 pp. Antofagasta.

Arredondo, C. 1994. Distribución, caracterización & génesis de los cuerpos de brecha en el sector central-este del yacimiento El Teniente. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología, (Inédito): 99 pp. Santiago.

Arévalo, A. & Floddy, R. 1995. Modelo global de alteración & mineralización. Estudio geometalúrgico del mineral a explotar a mediano & largo plazo. Informe inédito. CODELCO-Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología. 158 pp.

Arevalo, A.; Floddy, R. & Olivares, A. 1998. Modelo geometalúrgico. Estudio geometalúrgico del mineral a explotar a mediano y largo plazo. Informe inédito (GL-133/98), Codelco-Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología, Alto Colón, Chile. 110 pp.

Barahona, K. 2013. Comportamiento de vetillas de la mina El Teniente sometida a ensayos de tracción directa. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología: Santiago. 147pp.

Barton, N. & Choubey, Y. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics 12, 1-54.

Barton, N. 1987. Predicting the Behavior of Underground Openings in Rock, Manuel Rocha Memorial Lecture, Norwegian Geotechnical Institute.

Brady, B. & Brown, E. 1985. Rock mechanics. editorial Allen & Unwin.:527 pp. Londres.

Brzovic, A. & Quezada, O. 2000. Estandarización Líneas de Detalle. *Superintendencia de Geología. Codelco, El Teniente, Inédito. GI-121/00.* Rancagua.

Brzovic, A. 2001. Fundamentos Geológicos Para un Sistema De Clasificación Geotécnica Del Macizo Rocoso Primario, Mina El Teniente. *Hundibilidad Fase I, API-T01m101 – G1187 / 01*. Rancagua.

Brzovic, A. & Benado, D. 2003. Sistema de Clasificación Geotécnico Roca Primaria Mina El Teniente. Superintendencia de Geología. CODELCO, El Teniente. Informe Inédito. SGL-I-05/2003. 119pp.

Brzovic, A. & Villaescusa, E. 2007. Rock mass characterization and assessment of block-forming geological discontinuities during caving of primary copper ore at the El Teniente mine, Chile. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, Abstr.*

Brzovic, A. 2009. Rock mass strength and seismicity during caving propagation at the El Teniente Mine, Chile. In C.A Tan (ed), 7th International Symposium Rockbursts and Seismicity in Mines (RaSim7). Dalian, China, Rinton Press, New York : 838-852.

Brzovic, A.; Seguel, J. & Benado, D. 2009. Enrejado de vetillas & calidad geotécnica de roca de Mena Primaria en Mina El Teniente, Chile. Seminario Internacional de Geología para la industria minera GEOMIN N° 1, 2009. Resumen N°25. Antofagasta.

Burgos, L. 2002. Caracterización de las Andesitas de la Mina El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento Ciencias de la Tierra. Concepción, Chile. 108 pp.

Camus, F. 1974. Nuevos antecedentes sobre la geología del yacimiento El Teniente con énfasis en la alteración de las rocas. Departamento de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente.

Charrier, R. 1973. Geología Regional de la provincia de O'Higgins & Colchagua. Publicación inedita, N°7, 1-69. Santiago, Chile.

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: 41-51. Santiago.

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*,: 344-355. Stuttgart.

Charrier, R. 1983. Informe geológico de la Hoja El Teniente, escala 1:250.000. Convenio Departamento de Geología, Universidad de Chile - SERNAGEOMIN, Santiago.

Charrier, R.; Wyss, A.; Flynn, J.; Swisher I, C.; Spichiger, S. & Zapatta, F. 1994. Nuevos antecedentes estratigráficos & estructurales para las formaciones Coya- Machalí & Abanico, entre los 33°50' & 35° S, Cordillera Principal Chilena. In Congreso Geológico Chileno, No. 7, Actas 2, 1316-1319. Concepción.

Charrier, R.; Wyss, A. Flynn, J. Swisher III, C, Mark. N, Zapatta. F, Mckenna. 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*, Vol. 9, N° 5, Departamento de Geología Universidad de Chile, 393-422.

Cuadra, P. 1986. Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente & áreas adyacentes. *Revista Geológica de Chile*, N°27, p. 3-26.

De Los Santos, C. 2011. Efecto de la mineralogía, alteración y geometría en la resistencia mecánica de las vetillas, mina El Teniente, Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Geología, 165 pp. Concepción.

Díaz, J.; Moreno, F. & Riveros. (1996). Caracterización Roca Primaria Intacta. Fase I: Análisis & Evaluación De La Información Existente: Andesita, Diorita, Dacita. Informe GL-227/96, Superintendencia Geología, División El Teniente CODELCO Chile.89 pp. Rancagua.

Falcón, M. & Rivera, O. 1998. Estudio geológico distrital de la División El Teniente de CODELCO-Chile, escala 1:25.000. Informe inédito, 108 p. Vicepresidencia de exploraciones & asociaciones mineras, CODELCO Chile.: 108 pp. Santiago, Chile.

Farmer, 1983. Engeneering Behaviour of Rocks. 180 p. Segunda Edición

Floody, R. & Huete, C, 1998. Potencial Distrito Teniente. Informe Inédito. Gerencia de Exploraciones, CODELCO-Chile. 49 pp.Rancagua.

Floody, R. 2000. Estudio de vulnerabilidad geológica-geotécnica de la Chimenea de Brechas Braden. Fase 1, Geología de Brechas Braden. Informe inédito (GL-044/00).Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología, Alto Colón, Chile. 90p.

Fuenzalida, H. 1967. Clima. Corporación de Fomento de la Producción, Geografía Económica de Chile.: 99-151pp. Santiago.

Garrido, I. 1992. Resumen nuevo modelo geológico-estructural & geotécnico yacimiento El Teniente (inédito), p. 99-151. CODELCO-Chile. Santiago.

Garrido, I. 1995. Geología estructural del distrito & la mina El Teniente & situación geodinámica regional. Proyecto Geodinámico Mina El Teniente, Proyecto API-1-1689. Reporte interno, Vol.1, 61 p. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente.

Godoy, E. & Lara, L. 1994. Segmentación estructural andina a los 33°-34° S. Nuevos Datos en la Cordillera Principal. 7° Congreso Geológico Chileno, Actas, Vol. 2, 1344-1346pp.

Howell, F. & Molloy, J. 1960. Geology of the Braden Orebody, Chile. Economic Geology, Vol. 55, 863-905p.

Karzulovic, A. 1997. Modelo geomecánico del Macizo Rocosó Primario. Mina El Teniente. Conceptos Fundamentales. CODELCO Chile, División El Teniente. Superintendencia de Planificación Minco. Informe Interno.

Karzulovic, A. 1999. Geometría de la socavación, aspectos geotécnicos. Informe técnico de AKL para División El Teniente de CODELCO. 120 pp.Rancagua.

Karzulovic, A. 2001. Propiedades geomecánicas de estructuras en roca primaria. Codelco, División El Teniente, Inédito. DT-CG-01-003. Rancagua

Karzulovic, A. 2006. Criterios de Homologación para una Minería en Roca Primaria. Codelco, División El Teniente, Inédito. DT-CG-2006-002. Rancagua

Klöhn, C. 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central. Instituto de Investigaciones Geológicas. Boletín N°8, 95 pp. Santiago.

Maksaev, V.; Munizaga, F. Mc Williams, M. Thiele, K. Arévalo, A. Zúñiga, P. & Floody, R. 2001. 40Ar/ 39Ar Geochronology of the El Teniente Porphyry Copper Deposit. III Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Pucón, Chile. Extended Abstracts (CD-ROM) p. 496- 499.

Maksaev, V.; Munizaga, F. McWilliams, M. Fanning, M, Mathur. R, Ruiz, J. & Zentilli, M. 2004. New Chronology for El Teniente, Chilean Andes, from UPb, 40Ar/39Ar, Re-Os, and Fission-Track Dating. Implications for the Evolution of a Supergiant Porphyry Cu-Mo Deposit. Society of Economic Geologists, Special Publication 11, 15-54.

Marambio, F.; Pereira & J. Russo, A. 1999. Estudio Propiedades Geotécnicas Proyecto Pipa Norte. Informe Superintendencia de Geología. Codelco, El Teniente, Inedito. GL-280/99. Rancagua.

Mayne-Nicholls, A., Reyes S. & Vicencio, S. 1996. Modelamiento geológico de El Teniente, Superintendencia Geología, División El Teniente, Codelco-Chile. Informe inédito. EGM Servicios Ltda. Alto Colón, Chile.

Moreno, F. (1993). Análisis & Recopilación De Información Propiedades De Roca Intacta & Macizo Rocosos Mina El Teniente. Informe Técnico, Departamento De Estudios & Métodos Operacionales, División El Teniente CODELCO Chile.

Ojeda, J.; Hernández, E. Ossandón, G. Enrione, A. & Mestre, A. 1980. El Pórfido Cuprífero El Teniente. Informe Inédito, 76 p. CODELCO-Chile, División El Teniente.

Ossandón, G. 1974. Petrología & alteración del Pórfido Dacítico, Yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas & Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile. 112pp.

Padilla, R. 2004. Aplicación de Conceptos Geológicos en la estimación de la Resistencia A la Tracción en Vetillas selladas del Stockwork del Yacimiento El Teniente. Memoria Para Optar al Título de Geólogo. Universidad De Concepción, Departamento De Ciencias De La Tierra (Inédito): 150 pp. Concepción.

Pereira, J. 1995. Caracterización de la Fase Inicial del Proceso de Fragmentación de la Zona de Mineral Primario Inducida por la Minería Masiva. Sector Teniente 4 Sur – Yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento De Geología & Geofísica (Inédito): 105 pp., Santiago.

Rabbia, O.; Reich, M. Hernandez, L. King, R. & Lopez-Escobar. 2000. High-Al TTG-Like suite at the El Teniente porphyry copper deposit Chile. *Actas del IX Congreso Geológico Chileno*, Vol. 1, 326 - 330. Puerto Varas, Chile.

Reich, M. 2000. Estudio petrográfico, mineraloquímico y geoquímico de los cuerpos intrusivos de Sewell y La Huifa en el sector del yacimiento El Teniente, *Memoria para optar al título de Geólogo. 119 p.* Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Ciencias de la Tierra. Concepción, Chile.

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). *Actas IX Congreso Geológico Chileno. 31 de Julio - 4 de Agosto. Puerto Varas. Chile, v. 1, p. 631-636.*

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, Puerto Varas, v.1, 819-823.*

Riveros, M. 1991. Geología del Pórfido Latítico del sector sur del yacimiento El Teniente. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 164 p.

Rodrigo, J. 1999. Influencia De las Estructuras en la Ruptura de las Probetas sometidas a Compresión Uniaxial. Andesita, Teniente 4, Yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad De Chile, Departamento de Geología y Geofísica. Santiago.

Rojas, A. 2002. Petrografía & geoquímica del Pórfido Teniente, ubicado en el sector norte del yacimiento El Teniente, Provincia de Cachapoal, VI Región, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, 133 pp. Concepción.

Skewes, M. 2000. Rocas ígneas del depósito de cobre El Teniente, Chile Informe Inédito. Departamento de Geología, Superintendencia de Geología, División El Teniente, CODELCO-Chile. 94 p. Rancagua.

Skewes, M.; Arévalo, A. Floody, R. Zúñiga, & Stern, Ch. 2002. The Giant El Teniente breccia deposit: Hypogene Copper distribution and emplacement. Society of Economic Geologist. Special publication 9: 299-332. Colorado.

Stern, Ch. & Skewes, M. 1995. Miocene to present magmatic evolution at the Northern end of the Andean Southern Volcanic Zone, Central Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 22, 261-272. Santiago

Stern, Ch. & 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 Chileno*, Vol. 3, p. 1724-1728. Antofagasta.

Valenzuela, E. 1990. Numerical ages of Miocene unconformities along Central Chile Coastal Zone. Simposio sobre el Terciario de Chile N°2, *Actas*, 325-334. Concepción.

Villalobos, J. 1975. Alteración hidrotermal de las andesitas del yacimiento El Teniente, Chile. Tesis de Doctorado. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas & matemáticas. Departamento de Geología. 125 pp.

Zúñiga, P. 1979. Estudio de Colpas & Sondajes IG-11, Block 11-101 Ten-4 Central. Informe Técnico. *Departamento de Geología División El Teniente CODELCO Chile*, Inédito: 20 p. Rancagua.

Zúñiga, P. 1982. Alteración & mineralización hipógenas en el sector oeste del yacimiento El Teniente. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología. 104 pp.