



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

COMPORTAMIENTO DE VETILLAS DE LA MINA EL TENIENTE  
SOMETIDAS A ENSAYOS DE TRACCIÓN DIRECTA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

KAREN ROCÍO BARAONA LIOI

PROFESORA GUÍA:

SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

ANDRÉS BRZOVIC PÉREZ

SANTIAGO DE CHILE

ENERO 2013

## RESUMEN

El comportamiento mecánico del macizo rocoso de la mina El Teniente es determinado en gran medida por sus abundantes vetillas cuya resistencia menor a la de la roca intacta incide en la estabilidad y fragmentación de la roca. En este contexto se enmarca la presente memoria de título, en la cual se estudia el comportamiento de vetillas ante ensayos de tracción directa y la influencia que ejercen sus características sobre su resistencia y deformación.

Se analizó el resultado de 19 ensayos de tracción directa en vetillas realizado en IDIEM y de 2 ensayos previos del SP Technical Research Institute of Sweden. Las resistencias a la tracción y forma de ruptura fueron graficadas versus porcentaje de minerales duros, espesor, rugosidad y ángulo de vetilla con respecto al plano ortogonal a la dirección del esfuerzo aplicado. La deformación de las vetillas fue caracterizada por el strain total, el stress del punto de fluencia, el módulo de elasticidad y módulo secante en el punto de 50% de esfuerzo aplicado y módulo secante en el 50% de deformación. Estos parámetros fueron igualmente graficados en función de las características de la vetilla recién mencionados.

Los resultados del análisis muestran que las vetillas de calcopirita tienden a tener menor resistencia a la tracción directa que vetillas de pirita de 1-4 mm de espesor. Por otro lado, las vetillas de pirita de mayor espesor tienen menor resistencia, mientras que la situación de las de calcopirita según el espesor no es clara.

El JRC no mostró influencia en la resistencia, incluso en las vetillas más inclinadas. Por su parte, el ángulo de la vetilla con respecto al plano ortogonal a la dirección del esfuerzo tampoco muestra mayor incidencia en la resistencia a la tracción.

Las relaciones encontradas fueron comparadas con resultados de ensayos de tracción indirecta realizados anteriormente. Ambos ensayos coinciden en que la presencia de minerales duros tiende a aumentar la resistencia y en que la ruptura suele darse por el medio del relleno de la vetilla.

En cuanto a la deformación, se tiene que el comportamiento elástico en vetillas de calcopirita y pirita se mantiene hasta stress aplicado de 0,2-0,5 MPa. El módulo de elasticidad y módulos secantes presentan valores mayores en vetillas de calcopirita que en las de pirita, por lo que son más rígidas. La deformación total, es menor en vetillas de calcopirita y parece aumentar en vetillas de mayor espesor y menor ángulo.

Finalmente, se concluye que las características microscópicas de las vetillas, como el tamaño y forma de los cristales, también pueden influir en su comportamiento ante esfuerzos de tracción y que es necesario contar con datos de más ensayos para obtener mejor información de los parámetros estudiados.

## AGRADECIMIENTOS

Esta memoria representa el fin de estos seis años de aprendizaje y ha presentado desafíos y obstáculos los cuales he podido superar gracias al apoyo directo e indirecto de varias personas. Entre ellas debo mencionar a mi profesora guía, Sofía Rebolledo, quien confió y me dio la oportunidad de realizar este trabajo y me recibió con gran disposición en su oficina cada vez que llegué con novedades o dudas.

Los integrantes de mi comisión, Andrés Brzovic y Sergio Sepúlveda, contribuyeron de gran manera con sus críticas constructivas, las que ayudaron a mejorar mi trabajo.

Destacan, también, Rafael Otaiza y Carlos de Los Santos, quienes tuvieron la paciencia y una disposición inmensa de resolver mis numerosas dudas y de facilitar información.

También aquellos que ayudaron, de forma indirecta, son mis compañeros de curso y de la sala de memoristas, quienes brindaron un ambiente lleno de ánimo y buenas vibras al trabajo diario. Al igual que Vladimir, mi novio, y mi familia, con su permanente preocupación.

A todos les expreso mis infinitos agradecimientos por aportar en este importante proceso de mi vida.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	OBJETIVOS .....	2
1.1.1	Objetivo General.....	2
1.1.2	Objetivos Específicos.....	2
1.2	UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO .....	3
1.3	METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	4
1.4	TRABAJOS ANTERIORES.....	5
2.	MARCO GEOLÓGICO .....	6
2.1	LITOLOGÍAS .....	7
2.1.1	Rocas Estratificadas .....	7
2.1.2	Rocas Intrusivas .....	9
2.2	ESTRUCTURAS.....	11
2.3	MARCO GEOTECTÓNICO .....	11
2.4	GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO EL TENIENTE .....	12
2.4.1	Litología.....	13
2.4.2	Geología Estructural .....	20
2.4.3	Alteración y Mineralización .....	21
3.	VETILLAS DE EL TENIENTE.....	24
3.1	GENERALIDADES.....	24
3.2	CLASIFICACIÓN DE VETILLAS.....	26
3.2.1	Según espesor de la vetilla .....	26
3.2.2	Según traza de la vetilla .....	26
3.2.3	Clasificación genética .....	27
4.	ENSAYOS GEOTÉCNICOS DE TRACCIÓN .....	34
4.1	ENSAYO DE TRACCIÓN DIRECTA.....	34
4.1.1	Resistencia a la tracción directa.....	36
4.1.2	Medición de deformación en el ensayo de tracción directa.....	37
4.2	ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA .....	37
5.	DESCRIPCIÓN DE POST- ENSAYO DE VETILLAS .....	39
5.1	IDENTIFICACIÓN DE VETILLA.....	40
5.2	DESCRIPCIÓN MINERALOGÍA DEL RELLENO Y HALO.....	40

5.2.1	Relleno mineralógico.....	40
5.2.2	Porcentaje de minerales duros.....	41
5.2.3	Presencia de halo.....	41
5.3	DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS .....	41
5.3.1	Rugosidad.....	41
5.3.2	Espesor .....	43
5.3.3	Espesor halo.....	43
5.3.4	Ángulo .....	43
5.4	DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO.....	44
5.4.1	Modo de ruptura.....	46
5.4.2	Resistencia .....	49
5.4.3	Deformación .....	49
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	52
6.1	RESULTADOS INDIVIDUALES .....	52
6.2	ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE PARÁMETROS MINERALÓGICOS .....	55
6.2.1	Subtipo de vetillas .....	55
6.2.2	Presencia de halo.....	57
6.2.3	Porcentaje de minerales duros.....	58
6.3	ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS.....	61
6.3.1	Espesor .....	61
6.3.2	Rugosidad de la vetilla.....	66
6.3.3	Ángulo de vetilla.....	71
6.4	ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN SEGÚN PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y MINERALÓGICOS .....	74
6.4.1	Stress límite de comportamiento elástico .....	74
6.4.2	Módulo de Elasticidad.....	75
6.4.3	Módulo secante o pendiente de la secante en el 50% del stress aplicado .....	76
6.4.4	Módulo de deformación o pendiente de la secante en el 50% de la deformación..	77
6.4.5	Strain total.....	78
7.	DISCUSIONES .....	80
8.	CONCLUSIONES.....	88
9.	REFERENCIAS .....	90

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Unidades petrográficas del Complejo Máfico El Teniente.....	14
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de vetillas de El Teniente de tipo TM y HP. ....	32
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de vetillas de El Teniente de tipo HT.....	33
<b>Tabla 4.</b> Tabla de ejemplo descripción de vetillas.....	39
<b>Tabla 5.</b> Tabla de durezas relativas según las escala de Mohs.....	41
<b>Tabla 6.</b> Pauta de descripción del resultado del ensayo.....	45
<b>Tabla 7.</b> Clasificación de tipos de ruptura de Marambio y otros (1999) .....	47
<b>Tabla 8.</b> Subtipos de ruptura para los tipos A y D.....	48
<b>Tabla 9.</b> Resumen de resultados de ensayos de tracción realizados anteriormente en vetillas de El Teniente.....	80
<b>Tabla 10.</b> Tabla modificada de Jacobsson y Brzovic (2011) que recopila resultados de distintos trabajos de ensayos de tracción directa (DT) e indirecta (BT).....	81
<b>Tabla 11.</b> Resistencia a la tracción indirecta de la roca intacta para litologías del Teniente.....	81
<b>Tabla 12.</b> Módulo de elasticidad E de distintas litologías .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Vista en 3D de los niveles de producción de la mina El Teniente. ....	2
<b>Figura 2.</b> Ubicación de la mina El Teniente. ....	3
<b>Figura 3.</b> Imagen esquemática de las unidades Geomorfológicas de la VI región de Chile. ....	7
<b>Figura 4.</b> Mapa geológico regional de la franja cordillerana de Chile Central .....	10
<b>Figura 5.</b> Unidades petrográficas pertenecientes al Complejo Félsico de El Teniente.....	16
<b>Figura 6.</b> Unidades petrográficas pertenecientes al Complejo de Brechas de El Teniente.. ....	18
<b>Figura 7.</b> Geología simplificada del Nivel Teniente 6 a 2165 m.s.n.m.. .....	19
<b>Figura 8.</b> Figura esquemática de la Zona de Falla El Teniente (ZFT).....	21
<b>Figura 9.</b> Imagen esquemática de la serie de niveles geológicos.....	23
<b>Figura 10.</b> Stockwork compuesto por vetillas tipo TM de cuarzo con y sin halo de alteración..	25
<b>Figura 11.</b> Esquema de una vetilla y los respectivos elementos que la caracterizan. ....	26
<b>Figura 12.</b> Ejemplos de vetillas típicas del tipo tardimagmática (TM).. .....	28
<b>Figura 13.</b> Ejemplos de vetillas típicas del tipo Hidrotermal Principal (HP). ....	30
<b>Figura 14.</b> Ejemplos de vetillas típicas del tipo Hidrotermal Tardío (HT).....	31
<b>Figura 15.</b> Figura esquemática de ensayo de tracción directa.....	35
<b>Figura 16.</b> A) Máquina utilizada en los ensayos de tracción directa. B) Probeta de roca sometida a ensayo de tracción directa. ....	35
<b>Figura 17.</b> Área y fuerza normal aplicada sobre una vetilla inclinada en un ángulo $x$ . ....	36
<b>Figura 18.</b> Izquierda: medición y cálculo de strain. Derecha: strain gage adherido a una vetilla de cuarzo.....	37
<b>Figura 19.</b> A) Máquina de tracción indirecta o brasileño. B) Disco de roca sometido a ensayo.	38
<b>Figura 20.</b> Esquema de ensayo de tracción indirecta.....	38
<b>Figura 21.</b> Determinación de rugosidad para discontinuidades de longitud menor a 10 cm.....	42
<b>Figura 22.</b> Forma de medir el JRC. ....	42
<b>Figura 23.</b> Determinación del espesor real de una vetilla. ....	43
<b>Figura 24.</b> Esquema de medición del ángulo de vetilla considerado para este estudio. ....	44
<b>Figura 25.</b> Zona de deformación elástica y plástica en gráfico de stress vs strain.....	50
<b>Figura 26.</b> Parámetros a registrar en la curva de stress vs strain. ....	50
<b>Figura 27.</b> A la izquierda: esquema que diferencia entre el strain del strain gage y el de la vetilla. A la derecha: espesor utilizado para el cálculo del strain en vetillas inclinadas.....	51
<b>Figura 28.</b> Corte realizado en algunas muestras para que el cilindro de roca que será ensayado contenga la vetilla en estudio en su centro. ....	53
<b>Figura 29.</b> Resultados de la distribución de sub tipo de vetillas, porcentaje de minerales duros, presencia o ausencia de halo y espesor de vetillas. ....	53
<b>Figura 30.</b> Diagramas de resultados de rugosidad, ángulo de vetillas, resistencias y clase de ruptura obtenido en las muestras ensayadas.....	54
<b>Figura 31.</b> Resistencias a la tracción obtenidas en los ensayos en vetillas .....	55
<b>Figura 32.</b> Histograma de clase de ruptura obtenida para cada subtipo de vetillas.. ....	56
<b>Figura 33.</b> Esquemas de las muestras con ruptura mixta.....	57
<b>Figura 34.</b> Histograma de resistencias a la tracción en muestras de vetillas con y sin halo.....	57
<b>Figura 35.</b> Histograma de clase de ruptura para muestras de vetilla con halo.....	58
<b>Figura 36.</b> Resistencia a la tracción vs % de minerales duros.....	59
<b>Figura 37.</b> Resistencias agrupadas por rango de porcentaje de minerales duros.....	59

<b>Figura 38.</b> Diagrama porcentual de clase de ruptura para rangos de % minerales duros.....	60
<b>Figura 39.</b> Histograma de clase de ruptura para vetillas de Py y de Cpy.....	61
<b>Figura 40.</b> Diagrama de resistencia a la tracción para cada espesor típico. ....	62
<b>Figura 41.</b> Promedios de resistencia para los distintos espesores típicos observados. ....	62
<b>Figura 42.</b> Resistencia a la tracción versus espesor típico para vetillas de Cpy, Py y Cpy-Bo..	63
<b>Figura 43.</b> Resistencia a la tracción de vetillas de pirita es mayor a la de calcopirita 1-4 mm. .	64
<b>Figura 44.</b> Diagrama porcentual de clase de ruptura para cada rango de espesor de vetilla...	65
<b>Figura 45.</b> Histograma de clase de ruptura para distintos rangos de espesor de vetilla.. ....	65
<b>Figura 46.</b> Diagrama de resistencia para distintos JRC.....	66
<b>Figura 47.</b> Diagrama Resistencias promedios para cada JRC. ....	67
<b>Figura 48.</b> Gráfico de resistencia versus rugosidad para vetillas de Py, Cpy, Cpy-Bo.....	67
<b>Figura 49.</b> Resistencia versus JRC para distintos rangos de espesor y según ángulo. ....	69
<b>Figura 50.</b> Gráficos de resistencia a la tracción versus JRC de la superficie de ruptura según espesor y ángulo. ....	70
<b>Figura 51.</b> Diagramas de clase de ruptura para rangos de JRC de vetilla según el ángulo de la vetilla. ....	71
<b>Figura 52.</b> Resistencia a la tracción para cada ángulo de vetilla.. ....	72
<b>Figura 53.</b> Resistencia a la tracción versus ángulo, para vetillas de Py, Cpy y Cpy-Bo.....	72
<b>Figura 54.</b> Resistencia a la tracción versus ángulo de vetilla para distintos rangos de JRC. ...	73
<b>Figura 55.</b> Diagrama de clases de ruptura según el ángulo de vetilla.....	74
<b>Figura 56.</b> Gráfico de punto de fluencia versus porcentaje de minerales duros.....	75
<b>Figura 57.</b> Gráfico de módulo de elasticidad vs espesor, JRC y ángulo. ....	76
<b>Figura 58.</b> Gráficos de pendiente de la recta secante en el punto de 50% del stress aplicado vs parámetros geométricos. ....	77
<b>Figura 59.</b> Gráfico de pendiente de la recta secante en el punto de 50% de deformación versus espesor.....	78
<b>Figura 60.</b> Gráficos de strain total vs porcentaje de minerales duros, espesor, JRC y ángulo..	79
<b>Figura 61.</b> Muestras que resaltan por su mayor o menor resistencia. ....	84
<b>Figura 62.</b> Gráficos de módulo de elasticidad, secante (al 50% de stress) y de deformación (secante al 50% de deformación) versus el espesor de la vetilla. ....	86
<b>Figura 63.</b> Esquema de curva de stress/strain en vetilla de pirita y calcopirita .....	87

# 1. INTRODUCCIÓN

El mega yacimiento tipo pórfido de Cobre-Molibdeno El Teniente, considerado el más grande del mundo (Skewes y otros, 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 el extremo norte de la Zona Volcánica Sur, donde la intrusión sucesiva de cuerpos félsicos y sus procesos de alteración hidrotermal, emplazados en rocas volcánicas del Mioceno correspondientes a la Formación Farellones, dieron lugar a la formación del yacimiento (Maksaev y otros, 2004).

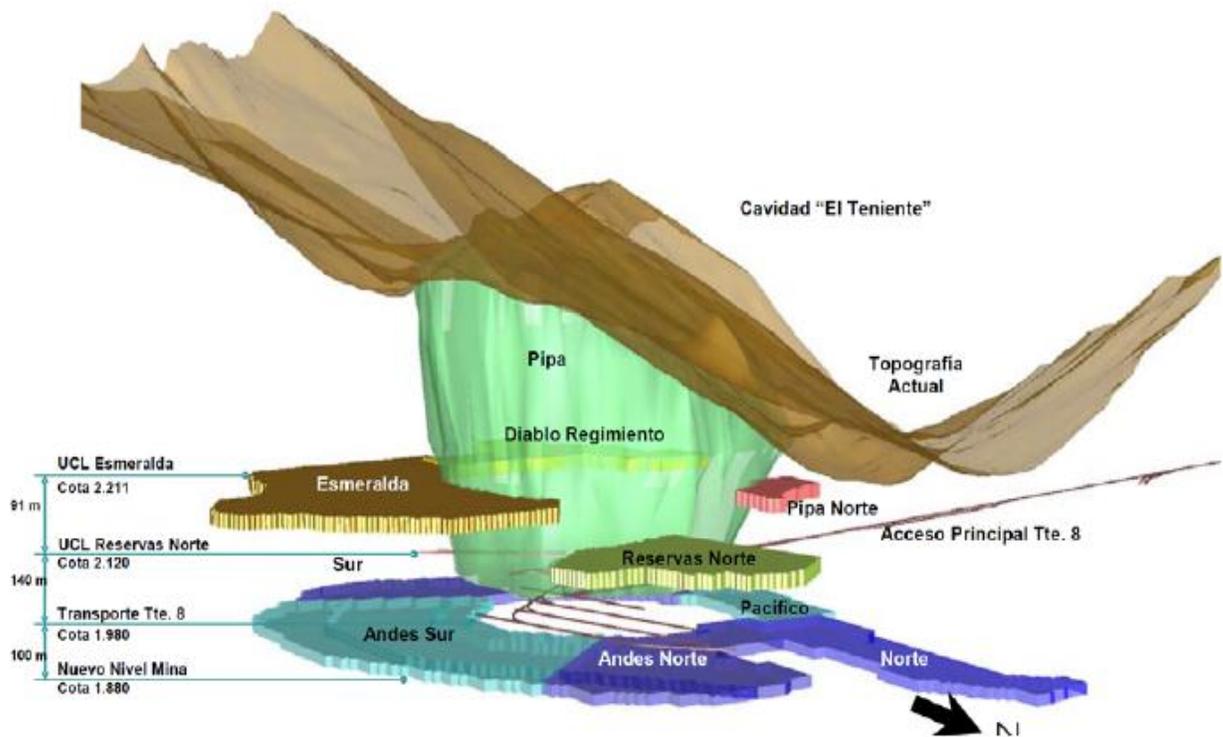
La mineralización metálica del yacimiento consiste principalmente en calcopirita, bornita y molibdenita, los que se encuentran en vetillas que forman un enrejado poli-direccional o stockwork, lo que además produce en la roca distintos grados de alteración.

La Mina El Teniente comenzó su explotación en 1906 y actualmente es la mayor mina subterránea en operación en el mundo, su extracción aproximada es de 140.000 toneladas por día y se realiza mediante los métodos de explotación de hundimiento de bloques y de paneles o block caving y panel caving, respectivamente (Rojas y otros, 2001). La Figura 1 muestra los distintos niveles de producción y los sectores de la mina ubicados alrededor de la Pipa Brecha Braden.

Un aspecto de gran importancia para la eficiente explotación de la mina corresponde a la geotecnia, que influye tanto en la fragmentación de la roca como en temas de estabilidad de labores. La mayoría de las operaciones en la Mina El Teniente se realizan en roca de mena primaria, la cual es masiva y competente, y al ser sometida a altos esfuerzos se falla de forma frágil (Rojas y otros, 2001).

En esta roca predomina la presencia de vetillas o fracturas selladas por rellenos minerales (Brzovic y Villaescusa, 2007), las que han sido clasificadas en 3 categorías, según su etapa de formación, y 15 clases según su mineralogía de relleno y halo. Estas estructuras geológicas son un factor importante que determina cómo se comporta el macizo rocoso bajo distintos regímenes de stress, pues el desarme de la roca se produce más fácilmente aprovechando las discontinuidades que generando nuevas fracturas, independientemente de la litología de la roca intacta. Las vetillas sobresalen en esta especial influencia, como lo muestran algunos estudios, tanto por su baja resistencia como por su abundancia.

El presente trabajo busca ser un aporte a la caracterización del macizo rocoso de la mina El Teniente para generar un modelo geotécnico que permita estimar su comportamiento ante diferentes estados de stress. En él, específicamente, se analizan los resultados de ensayos de tracción directa aplicados a distintos tipos de vetillas para encontrar cómo influyen los parámetros mineralógicos y geométricos de estas, tales como espesor y rugosidad, sobre la resistencia a la tracción presentada en cada caso.



**Figura 1.** Vista en 3D de los niveles de producción de la mina El Teniente. (Imagen tomada de Harrison, 2009)

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo General

Determinar la influencia de los parámetros geométricos, como espesor y rugosidad, y mineralógicos en la resistencia a la tracción de vetillas de la mina El Teniente de Codelco y su deformación.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar la resistencia a la tracción y gráficos de stress vs strain de vetillas de El Teniente mediante resultados de ensayos de tracción.
- Encontrar relaciones entre los parámetros geométricos y contenido mineralógico de las vetillas y los resultados de los ensayos, resistencia a la tracción y deformación.

## 1.2 UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El yacimiento El Teniente, se encuentra ubicado en la Cordillera de los Andes de Chile Central, en la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, como se observa en la Figura 2, en las coordenadas U.T.M. 6.230.064 – 6.220.582 Norte y 373.651 – 377.597 Este, o bien, en 70°21' longitud oeste y 34°05' latitud sur; a 2.000 y 3.200 m.s.n.m. A modo de referencia, se ubica a 37 km al NE de la ciudad de Rancagua, 73 km al SE de la ciudad de Santiago y a 3 km del campamento minero Sewell.



Figura 2. Ubicación de la mina El Teniente, en la VI región de Chile y carretera Frei Montalva como vía de acceso. Imagen inferior derecha es tomada de Padilla (2004). Imagen inferior izquierda es tomada de turismovirtual.cl.

La carretera Presidente Eduardo Frei Montalva, ex carretera El Cobre, que une Rancagua con la localidad de Coya, es el camino que guía al acceso de la mina. A la altura del kilómetro 46 se ubica Colón Alto, a 1983 m.s.n.m., que alberga los departamentos de Geología, Ingeniería y Planificación y la Planta de Extracción de Cobre por Solventes. Un túnel de 8 km de largo, permite el acceso al nivel Ten-8 de la mina, mediante un ferrocarril eléctrico. Para llegar a los niveles superiores se utiliza un sistema de jaulas o ascensores de gran capacidad, que conectan los diferentes niveles de explotación. Por otra parte, galerías y rampas permiten el tránsito de vehículos para llegar a los frentes de trabajo.

### **1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO**

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

**Recopilación y revisión de bibliografía** de todos los antecedentes de relacionados a ensayos geotécnicos en vetillas de El Teniente. Esto será un aporte a la discusión de resultados, además de contextualizar sobre la geología del yacimiento en estudio.

**Registro de resistencia a la tracción directa, modo de ruptura de la muestra y gráficos de stress/strain**, obtenidos de los resultados de los ensayos de tracción directa entregados por IDIEM y de la descripción post-ensayo de las muestras.

**Descripción post-ensayo de las muestras** que tiene por objetivo capturar de forma detallada toda la información útil que se desprende de la vetilla. Identificación de los minerales presentes y registro de espesor, rugosidad, etc. Este paso se detalla en las siguientes secciones.

**Análisis gráfico de datos** mediante el software Excel. A partir de la visualización, ordenamiento y resumen de estos, podrán encontrarse relaciones que permitan interpretar el comportamiento de las vetillas.

Finalmente, una etapa de interpretación y discusión de los resultados obtenidos.

## 1.4 TRABAJOS ANTERIORES

La idea de que las vetillas ejercen un rol especial en la forma de romperse de la roca de la mina El Teniente es apoyada por variados estudios. Entre estos trabajos se puede mencionar a **Zúñiga (1979)** que buscando predecir el tamaño de las colpas obtenidas en la fragmentación de la mena primaria, observó que el 78% de las caras de colpas analizadas eran originadas por estructuras previas, como fallas, vetillas o diaclasas. Luego de lo cual realizó los primeros ensayos geotécnicos en el Yacimiento (carga puntual). Otros autores tales como **Hevia (1984)**, quien realizó ensayos de carga puntual, y **Marambio y otros (1999)**, quien sometió a ensayos geotécnicos a probetas de la unidad CMET, han observado que sobre el 80% de las muestras presentan tipos de rupturas en las que hay participación de vetillas de stockwork. Por otro lado, **Rodrigo (1999)** describe probetas del sector Teniente 4 Regimiento sometidas a ensayos de compresión uniaxial y triaxial e indica que las vetillas compuestas principalmente por anhidrita, cuarzo, calcopirita y turmalina, tienen gran influencia en la ruptura de las probetas.

La determinación de la resistencia a la tracción de vetillas es abordada por primera vez por **Willoner (2000)**, quien establece resistencia a la tracción indirecta, luego de realizar diversos ensayos geotécnicos en la búsqueda de definir la calidad del macizo rocoso de la mina El Teniente.

**Padilla (2004)** y **Gavia (2005)** también evalúan la resistencia a la tracción de las vetillas que componen stockwork mediante ensayos de carga diametral y lo relacionan con sus características geológicas. **Gavia (2005)** indica los valores de resistencia a la tracción indirecta de vetillas según su categoría Tardimagmática, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardía y señala que la resistencia a la tracción es aproximadamente la mitad que el valor de cohesión de Mirve y reconoce la influencia de los minerales del relleno y el espesor de la vetilla.

**Pereira (1995)**, en su estudio sobre fragmentación de la roca primaria en la Mina Teniente 4 Sur en su fase inicial observa que las vetillas dominan en las caras que definen a las colpas (aprox. 80%). Indica que los rellenos más frecuentes en las estructuras analizadas son yeso y sulfuros y que el cuarzo tiene menor incidencia en el proceso de fragmentación. También se refiere a la rugosidad de estas discontinuidades, señalando que son principalmente lisas y levemente rugosas.

Por otro lado **Brzovic (2009)** caracterizó discontinuidades que definen las caras de las colpas que se encuentran en los puntos de extracción. Observó que el 93% de las caras de colpas corresponden a estructuras geológicas pre-existentes. De éstas, más del 88% son vetillas que fueron abiertas en el proceso de hundimiento y concluye que la resistencia de la vetilla depende de la combinación de minerales y de su espesor.

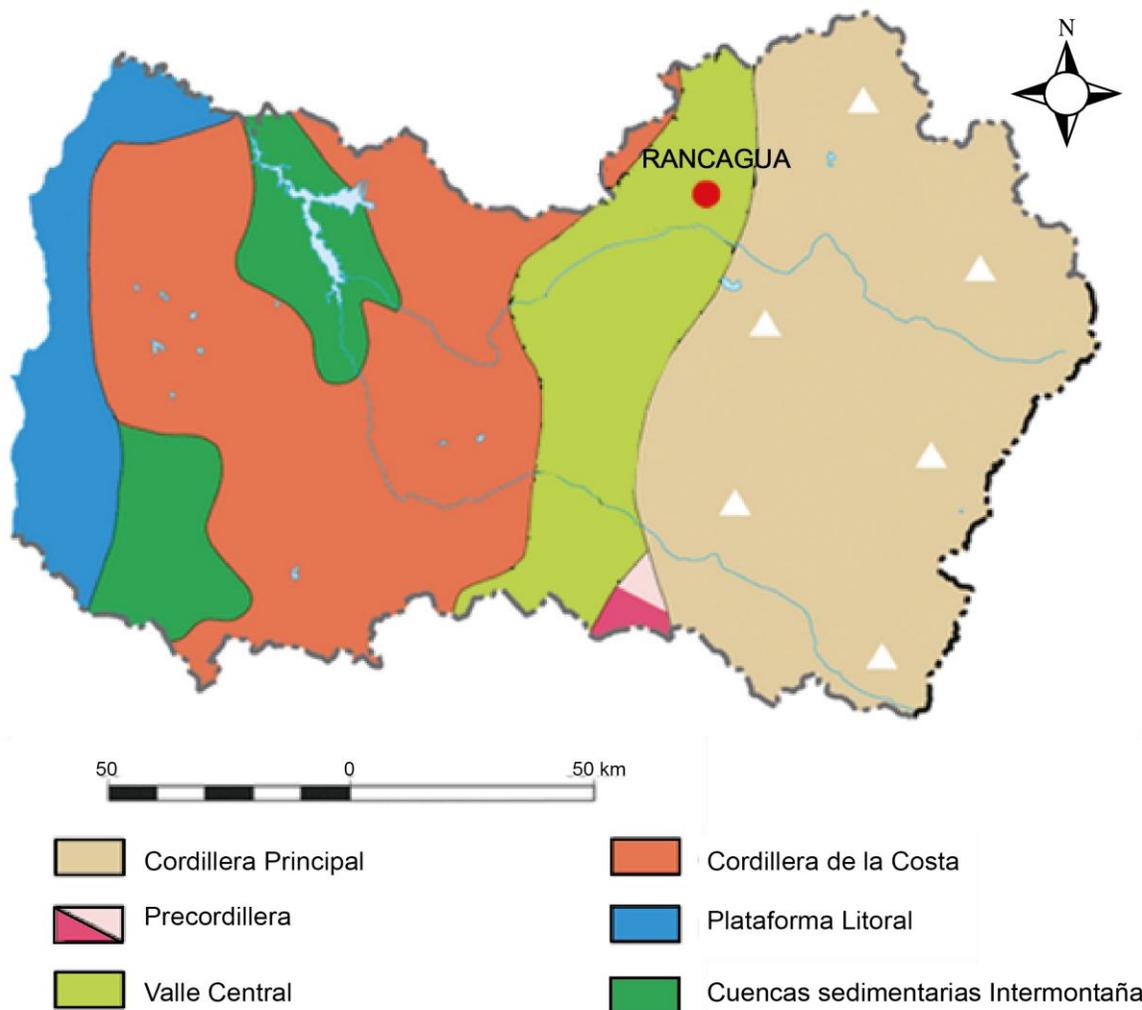
Con respecto al relleno mineralógico, se tiene que las caras de colpas corresponden a vetillas con menor proporción de cuarzo (menos de 1/3 de minerales duros) y mayor cantidad de minerales débiles, considerándose “débil” a aquellos de dureza menor a 4 en la escala de Mohs (e.g. calcopirita, anhidrita y clorita). **Brzovic (2001)** propo-

ne la escala de resistencia relativa de las vetillas sellada basada en el índice de dureza en la escala de Mohs. En este mismo trabajo se trata el tema del modo de falla de las vetillas, indicando que el 61% de las muestras observadas la rotura se produce por completo a través del relleno mineralógico, independientemente del ambiente geológico. En algunos casos la ruptura es por el contacto entre vetilla y roca. Además, el análisis de espesor de vetillas arroja que este parámetro es determinante. Se observa que las vetillas más propensas a fallas son las de espesor mayor a 2 mm.

Otro estudio, llevado a cabo por **Jacobsson y otros (2010)**, en que se sometió a ensayo de tracción directa a 6 muestras de El Teniente, indica que la resistencia a la tracción de las vetillas ensayadas, y que rompieron por la vetilla, varía entre 0,4 y 1,3 MPa, y que las dos muestras fracturadas fuera de la vetilla, a través de roca intacta, tienen resistencias que duplican o triplican al valor de la resistencia de las vetillas.

## 2. MARCO GEOLÓGICO

En la zona central de la Cordillera de Los Andes, a la altura de los 34° de latitud sur, se observan las unidades morfológicas definidas por Charrier (1981), entre ellas la Cordillera de la Costa se compone de rocas sedimentarias y volcánicas del Paleozoico Tardío, las que son intruidas por un batolito y han experimentado una compleja historia de deformación. Más al oriente, el Valle Central separa la Cordillera de la Costa de la Cordillera Principal (ver en la Figura 3) y consiste en una depresión de tendencia nortesur, rellena principalmente con sedimentos Cuaternarios. La Cordillera Principal, es formada por rocas estratificadas del Mesozoico al Terciario, las que son intruidas por rocas plutónicas e hipabisales del Terciario. Es en el flanco occidental de la Cordillera Principal de la VI región donde se sitúa el mega-yacimiento de cobre-molibdeno El Teniente, cuyo entorno geológico regional y distrital es descrito a continuación, junto a las características estructurales y la evolución tectónica.



**Figura 3.** Imagen esquemática de las unidades Geomorfológicas de la VI región de Chile. Modificado de Börgel, 1983.

## 2.1 LITOLOGÍAS

### 2.1.1 Rocas Estratificadas

Las formaciones que han sido definidas en la franja cordillerana se exponen, en orden cronológico, a continuación:

**Formación Nacientes del Teno (Bajociano-Kimmeridgiano Inferior):** Definida por Klöhn (1960), corresponde a rocas sedimentarias clásticas ubicadas en la zona oriental de la región. Esta formación consta de un Miembro Superior Evaporítico, de 500 a 600 m en la zona de mayor potencia, y un Miembro Inferior Detrítico y Calcáreo (Davidson y Vicente, 1973). Esta formación es sobreyacida de forma concordante por la Formación Río Damas.

**Formación Río Damas (Kimmeridgiano Superior-Titoniano Inferior):** Definida por Klöhn (1960). Correspondiente a rocas sedimentarias clásticas continentales y volcánicas de hasta 1000 m de potencia, estas últimas son representación del fin de un ciclo

regresivo. Forma una franja de orientación norte-sur al oriente de la región. Su potencia máxima es de 3000 m y se da en el Río Damas. Sobreyace a la Fm. Nacientes del Teno y subyace a la Fm. Baños del Flaco de forma concordante, y a su vez se encuentra en contacto por falla con la Fm. Leñas Espinoza (Charrier, 1973)

**Formación Leñas-Espinoza (Kimeridgiano Superior-Titoniano Inferior):** Definida por Klöhn (1960) y redefinida por Charrier (1981), corresponde a una secuencia de 1.200 m de rocas sedimentarias detríticas y calcáreas de carácter transgresivo, distribuidos en afloramientos de orientación norte-sur. Su límite inferior es desconocido, hacia el techo presenta una transición gradual a la Fm. Baños del Flaco y una discordancia con la Fm. Coya-Machalí, y como se menciona anteriormente, un contacto local por falla con la Fm. Río Damas.

**Formación Baños del Flaco (Titoniana-Neocomiana):** Klöhn (1960), secuencia de 1.000 m de rocas sedimentarias marinas con intercalaciones detríticas y volcánicas. Estas representan un segundo ciclo de trasgresión-regresión que cubrió la zona de la Cordillera Principal. Posteriormente, Charrier (1981), asigna a esta formación los Estratos Superiores de la Formación Leñas-Espinoza. Se distribuye en afloramientos restringidos de dirección norte-sur truncados por lavas de un complejo volcánico más nuevo por el norte. Esta formación sobreyace concordantemente a la Fm. Río Damas y subyace, también concordantemente, a la Fm. Colimapu. El techo se encuentra localmente erosionado y contacta discordantemente por la Fm. Coya-Machalí. Esta formación recibe el nombre de Fm. Lo Valdés en el sector metropolitano (Thiele, 1980), y Fm. San José (Aguirre, 1960), en el sector del Río Aconcagua.

**Formación Colimapu (Barremiano-Albiano):** Definida por Klöhn (1960). Correspondiente a un conjunto de rocas estratificadas continentales que se compone de un Miembro Inferior Sedimentario de 1500 m de areniscas finas epiclásticas y calizas de tipo micríticas, y de un Miembro Superior Volcánico de 1600m de potencia que contiene tobas lítico-cristalinas, lapilli e ignimbritas (Charrier, 1981). Esta formación sobreyace a la Fm. Baños del Flaco de manera concordante y en el techo presenta una discordancia erosiva con la Fm. Coya-Machalí. Su origen se remonta al segundo ciclo sedimentario continental, asociado a una fase de alzamiento durante el Barremiano-Albiano (Charrier, 1973).

**Formación Coya-Machalí (Eoceno Superior-Mioceno Inferior):** Definida por Klöhn (1960), consiste en una secuencia de rocas volcánicas continentales de potencia aproximada de 3.200 m, efusivas y piroclásticas, con algunas intercalaciones de sedimentos lacustres. Se distribuye en dos franjas norte-sur, la occidental contiene lavas afaníticas, porfídicas y microfaneríticas de composición andesítica, y la franja oriental se compone de rocas piroclásticas con intercalaciones importantes de sedimentitas finas (Charrier y otros, 1994; Charrier y Munizaga, 1979) La separación está dada por afloramientos de la Fm. Farellones (Charrier y otros, 1994). Los contactos consisten en: presencia de discordancia con las formaciones Baños del Flaco, Leñas-Espinoza, Río Damas y Nacientes del Teno; y en su techo presenta discordancia angular con la Fm. Farellones. Las dataciones disponibles ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) y la presencia de fósiles en niveles basales, indican edad Eoceno Superior a Mioceno Inferior de los niveles superiores (Charrier y otros, 1994). Esta formación es correlacionable con Fm. Abanico.

**Formación Farellones (Mioceno Superior):** Definida por Klöhn (1960). Corresponde a una secuencia de al menos 2.400 m, de lavas intermedias a ácidas y rocas piroclásticas intercaladas con areniscas, lutitas, tufitas y capas finas de caliza. Sus afloramientos se disponen de forma norte-sur. Se encuentra levemente plegada a subhorizontal (Charrier, 1983) y sobreyace en discordancia angular a la Fm. Coya-Machalí, misma formación que la limita hacia el este y oeste. Presenta una cubierta local por la Fm. Colorado-La Parva (Thiele, 1980).

Dataciones (K-Ar) indican un origen en el Mioceno Medio y Superior (Charrier, 1983) debido a una actividad volcánica intensa centrada a lo largo de la franja actual de afloramientos.

**Formación Colon-Coya (Plioceno-Pleistoceno):** Esta formación es reconocida por Enrione (1972) y luego definida por Gómez (2001). Consiste en depósitos de potencia variable entre centímetros y 150 m, de lahares de granulometría heterogénea y matriz arcillo-cinerítica, intercalados localmente por niveles de ceniza, coladas andesíticas y gravas fluviales. Su contacto basal corresponde a una disconformidad con las formaciones Coya-Machalí y Farellones. En el techo se tiene la superficie de erosión actual. Dataciones radiométricas K/Ar en lavas, indican una edad Plioceno - Pleistoceno (Charrier y Munizaga, 1979; Cuadra, 1986).

**Depósitos no consolidados (Plioceno-Pleistoceno):** depósitos aluviales, fluviales, lacustres y glaciofluviales, glaciales, de escombros y derrumbes (Charrier, 1983), que rellenan los valles, relacionados a los cursos de agua actuales (ríos Cachapoal, Maipo, Teno y Blanco)

Las formaciones anteriormente mencionadas y las que siguen a continuación, se observan en el mapa geológico presentado en la Figura 4.

### 2.1.2 Rocas Intrusivas

Las rocas intrusivas existentes en la zona en la que se emplaza el yacimiento El Teniente se presentan en una alineación norte-sur, intruyendo a las formaciones del Mioceno. Presentan gran variabilidad de texturas y composiciones (granodioritas de hornblenda y biotita, pórfidos diorítico-andesíticos, monzonitas, monzodioritas y pórfidos dacíticos), encontrándose tanto de carácter plutónico como hipabisal, como stocks, batolitos, grandes filones y cuerpos menores como diques, filones y apófisis (Charrier, 1981).

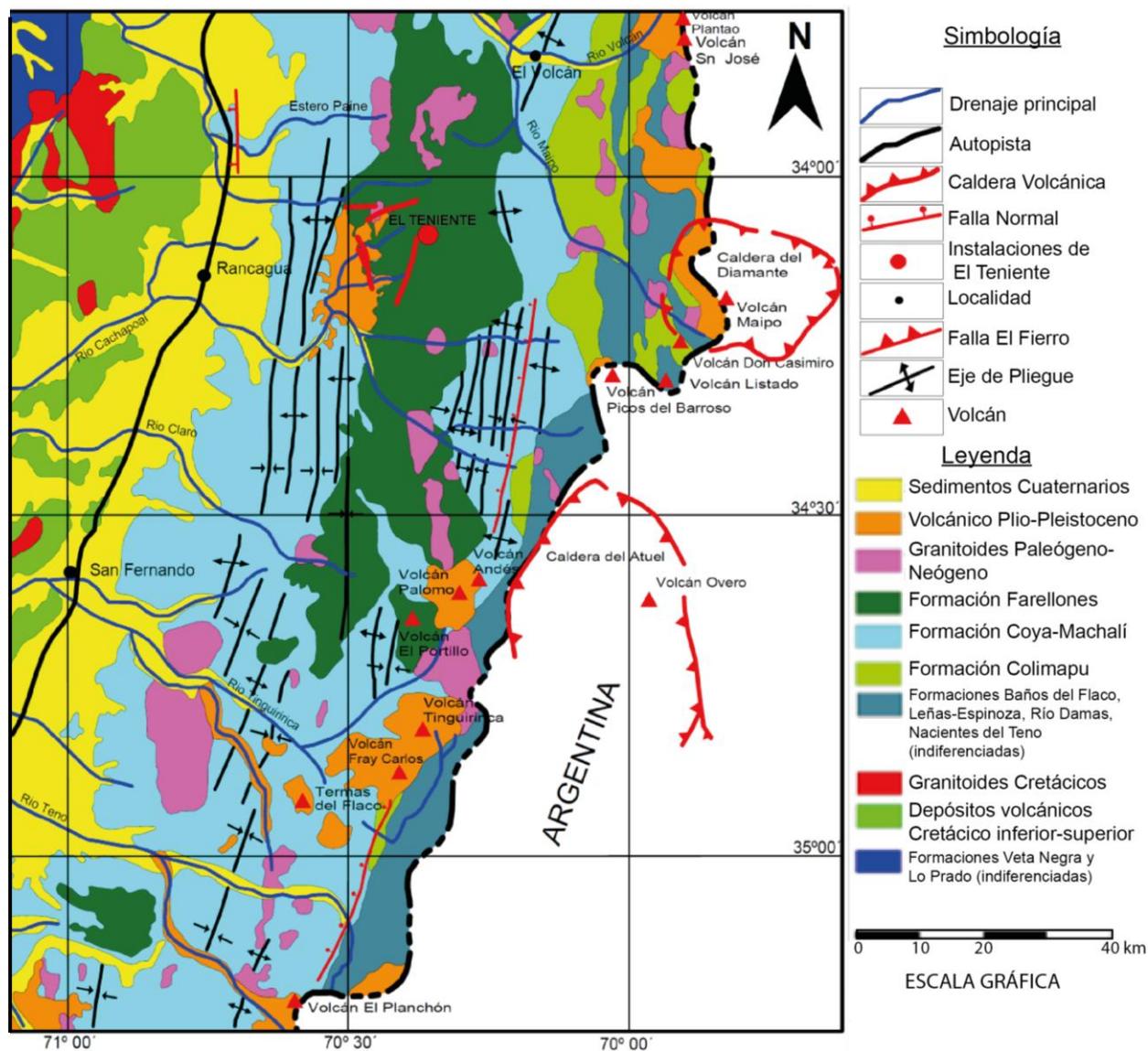
Según las relaciones de contacto observadas con sus rocas de caja se les ha asignado una edad relativa posterior a la Fm. Farellones (Stewart y Araya, 1972). También se le asigna una edad Miocena (Godoy, 1993). Se han realizado dataciones radiométricas ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ) las que indican una edad de 34,3 a 5,5 Ma (Drake y otros, 1982; Gana y Wall 1997; Kurtz y otros, 1997). Se diferencian los intrusivos del área en distintos grupos según las edades obtenidas en dataciones (Kurtz y otros, 1997): De acuerdo a las dataciones de los cuerpos intrusivos existentes se diferencian 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.

Se propone que la actividad magmática de la zona se extiende desde el Oligoceno Superior al Mioceno Superior, esto coincidente con los rangos de las formaciones Abanico y Farellones (Kurtz y otros, 1997; Falcón y Rivera, 1998).



**Figura 4.** Mapa geológico regional de la franja cordillerana de Chile Central (Imagen modificada de Charrier y otros, 1996, tomada de Harrison, 2010)

## 2.2 ESTRUCTURAS

Chile Central entre los 33°S y 39°S presenta a escala regional, estructuras NW y NNW producto de eventos tecto-magmáticos del Paleozoico-Mesozoico (Godoy y Lara, 1994). Estas delimitan los segmentos tectónicos que se disponen oblicuamente a la cordillera y son reactivadas reiteradamente en el Mesozoico-Cenozoico (Rivera y Cembrano, 2000), además, sus movimientos pueden explicar la distribución en franjas de centros volcánicos e intrusivos Miocenos (Falcón y Rivera, 1998). Los eventos tectónicos habrían sido controlados por una zona de transcurrencia sinistral N50°W que coincide con la Zona de Falla Río Blanco-Codegua, lo que produce, según un sistema Riedel, fracturas sintéticas-sinestrales (tipo R) de orientación N60°W y antitéticas-dextrales (tipo R') de orientación N50°E (Falcón y Rivera, 1998).

**Pliegues:** Se observan anticlinales y sinclinales (Klöhn, 1960; Charrier y otros, 1994) de flancos de menos de 30° de pendiente, afectando a rocas de la Fm. Farellones y cuyos ejes se orientan con rumbo norte-sur, con un leve buzamiento hacia el sur y de vergencia hacia el este (Gómez, 2001). También se encuentran pequeñas inflexiones del rumbo desde N30°W a N30°E. Su continuidad longitudinal solo se extiende entre los segmentos acotados por sistema de fallas N30°W (Rivera y Falcón, 2000).

**Fallas:** Sistemas de falla de orientación N30°W (Rivera y Falcón, 2000) son reconocibles en la Cordillera Principal y de la Costa. Se destacan las zonas de falla Piuquencillo, al norte, El Azufre al centro y Juanita al sur del yacimiento (Rivera y Cembrano, 2000). También se identifican fallas inversas en la franja oriental de la Formación Coya-Machalí, y fallas normales con desplazamientos verticales, asociadas a la tectónica de bloques Plio-Cuaternaria resultante del alzamiento andino (Charrier, 1981).

**Discordancia:** En la zona se reconocen tres fases compresivas las cuales se manifiestan como tres discordancias de plegamiento y de erosión (Klöhn, 1960). La primera, del Cretácico Superior causa la discordancia entre la Fm. Colimapu y rocas volcánicas terciarias y cuaternarias. La segunda fase compresiva será la responsable de la discordancia entre la Fm. Coya-Machalí y Fm. Colimapu, según algunos autores en el Oligoceno Inferior, y según otros durante el Mioceno Inferior (Charrier y otros, 1996). Luego, en el Mioceno-Plioceno, la fase compresiva genera la discordancia entre la Fm. Farellones y la Fm. Colón-Coya.

## 2.3 MARCO GEOTECTÓNICO

La zona centro de Chile hospeda a tres de los yacimientos tipo pórfido cuprífero más importantes del país, estos son El Teniente, Río Blanco-Los Bronces y Los Pelambres, ubicados en el límite del segmento de "flat-slab" y la Zona Volcánica Sur. Su génesis estaría relacionada a la evolución tectónica del margen continental sudamericano: a engrosamiento cortical y a la progresiva disminución del ángulo de subducción de la Placa de Nazca, desde el Mioceno, que produce solevantamiento. El rápido ascenso de los sistemas plutónicos emplazados en profundidad, genera la exsolución de fluidos magmáticos ricos en cobre que originan la mineralización (Skewes y Stern, 1995). La disminución de la edad de los depósitos hacia el sur indica un vínculo genético con la

migración al sur del foco de subducción de la Dorsal de Juan Fernández (Stern y Skewes, 1997).

Durante el Mioceno Medio, se desarrolla una disminución del ángulo de subducción bajo el segmento cortical al norte de los 33°S, debido a la anteriormente mencionada subducción activa de la Dorsal de Juan Fernández (Pilger, 1981), la cual produce una segmentación del arco andino en Chile Central. Este evento produjo un ensanchamiento del arco magmático y migración del frente volcánico hacia el este en el Mioceno Tardío y, luego, el término de la actividad magmática durante el Plioceno (Kay y Kurtz, 1995), por lo que el flat-slab se caracteriza por la ausencia de actividad volcánica moderna (Kurtz y otros, 1997). Este proceso además se asocia a un alzamiento, deformación y aumento del espesor de la corteza bajo la cadena volcánica al norte de los 33°S (Kay y otros, 1991).

Por otro lado, al sur de los 33°S, el ángulo de subducción también decrece, contemporáneamente al desarrollo del flat-slab, pero en menor magnitud. El frente volcánico migra hacia el este a su ubicación en los Andes en la actualidad. También se produce deformación y engrosamiento de la corteza, y el alzamiento de la cadena andina (Skewes y Stern, 1994).

## **2.4 GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO EL TENIENTE**

El Teniente es un mega-yacimiento de cobre y molibdeno cuya producción histórica es de 12.500 Mton, con leyes de Cu de 0,63% y 0,02% de Mo. Corresponde a la mayor concentración de Cu en la corteza terrestre (Sillitoe y Perelló, 2005), donde el Cu y el Mo se hospeda en mineralización sulfurada hipógena principalmente calcopirita, bornita y molibdenita. En la zona de enriquecimiento secundario, el mineral característico es la calcosina (Cuadra, 1986).

Los eventos que llevan a la formación del yacimiento ocurren de forma sucesiva e incluyen los procesos de deformación, intrusión, mineralización y alteración, los que toman un lapso de al menos 5,3 Ma y la mineralización económica se forma en 1,2 Ma (Maksaev, 2002; Maksaev y otros, 2004; Cannell, 2004).

El Teniente es considerado un yacimiento tipo pórfido cuprífero, formado a partir de distintos episodios intrusivos de magmas félsicos genéticamente relacionados, asociados a alteración hidrotermal (Maksaev y otros, 2004). También se ha propuesto considerarlo como depósito de megabrecha, producto de exsolución de fluidos magmáticos de plutones en enfriamiento (Skewes y otros, 2002).

La mineralización de cobre y molibdeno ocurre en un 70% en vetillas resultantes del relleno y sellado de grietas en rocas sub volcánicas de composición máfica, y el otro 30% se concentra en el cemento de diversas brechas magmático-hidrotermales de biotita, anhidrita, cuarzo y turmalina. También se encuentra diseminada en la matriz de los cuerpos intrusivos félsicos, pero en escasa proporción (Cuadra, 1986).

### **2.4.1 Litología**

El distrito es dominado por rocas volcánicas del Mioceno (Formación Farellones) las que son intruidas por rocas ígneas de composición intermedia (Kay y otros, 1999). En el área del yacimiento, es intruida por las rocas del Complejo Máfico El Teniente y, luego, por cuerpos félsicos (Ossandon, 1974; Camus, 1975; Skewes, 2000). Se reconocen cuerpos de brecha ígnea y brechas magmático-hidrotermales en los contactos de los cuerpos félsicos con las rocas máficas. El Complejo de Brecha Braden, forma una pipa, intruyendo a las unidades anteriores (Camus, 1975). Por último, las rocas mencionadas son cortadas por diques de lamprófido y marcan el fin de los eventos de mineralización (Cuadra, 1986; Skewes y otros, 2002).

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

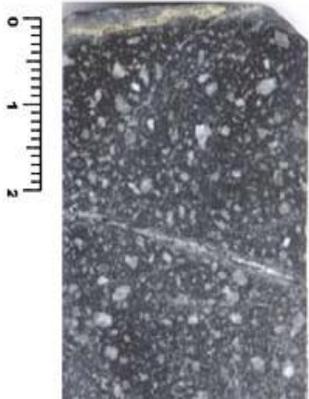
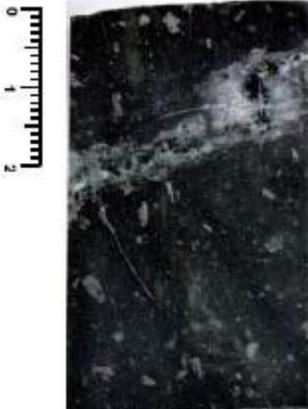
El concepto de Complejo Máfico es introducido por Skewes y otros (2002). El CMET es la unidad litológica más extensa y donde se aloja el 80% de la mineralización (Camus, 1975). Corresponde a un conjunto de rocas del Mioceno Superior (Munizaga y otros, 2002; Charrier y otros, 2002), sub-volcánicas de composición básica y afinidad toleítica (Skewes, 1997), entre los que se tiene gabros, diabasas, pórfidos basálticos. También incluyen brechas de biotita (Burgos, 2002; Skewes y otros, 2002). Se extiende verticalmente con forma de lacolito, de más de 2 km (Skewes y Arévalo, 1997; Munizaga y otros, 2002).

Las rocas de este complejo, contienen plagioclasa, relictos de piroxeno y presentan una fuerte alteración potásica biotítica que les da su característica coloración gris-pardo a negro (Burgos, 2002; Villalobos, 1975), presentan textura afanítica a porfídica con fenocristales de plagioclasa (Cuadra, 1986), los que varían en su tamaño. Las texturas de grano fino corresponderían a los márgenes del intrusivo y las de grano grueso a centro de éste.

Las características originales de la roca han sido obliteradas por la mineralización y alteración, de las cuales los minerales más comunes son biotita, anhidrita, cuarzo, clorita, sericita, actinolita, y turmalina (Skewes, 2002).

En la Tabla 1 se presenta una breve descripción de la diabasa, gabro y pórfido basáltico, correspondientes a las distintas unidades petrográficas que conforman el CMET.

**Tabla 1.** Diferentes unidades petrográficas pertenecientes al Complejo Máfico El Teniente. (Referencia interna SGL-I-123/2003).

Litologías	Características Macroscópicas	Fotografía
Diabasa	<p>Roca de color gris oscuro a negro, con textura porfídica, fenocristales de plagioclasa tabulares entre 5% a 40 % aprox. Generalmente los fenocristales tienen un largo mayor a 2 mm, y la “masa fundamental” corresponde a cristales de plagioclasa de menor tamaño (&lt; 1 mm).</p> <p><b>Rasgos Característicos:</b> 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>	
Gabro	<p>Roca de color gris oscuro a negro, con textura equigranular. Los cristales son tabulares a aciculares.</p> <p><b>Variedades Texturales:</b>  <u>Microgabro:</u> Textura fina con cristales menores a 1 mm de largo.  <u>Gabro:</u> Cristales mayores a 1 mm.</p> <p><b>Rasgos Característicos:</b> Su textura equigranular, independiente del tamaño de sus cristales (Microgabro-Gabro).</p>	
Pórfido Basáltico	<p>Roca de color gris oscuro a negro, con textura porfídica. Presenta fenocristales tabulares de plagioclasa (5 a 20%), con largo mayor a 2 mm.</p> <p><b>Variedades Texturales:</b>  <u>Pórfido Basáltico fino:</u> Fenocristales tabulares a aciculares de plagioclasa de 1 a 2 mm de largo.  <u>Pórfido Basáltico Grueso:</u> Fenocristales de plagioclasa con forma más cuadrada (“equant”), mayores a 2 mm de largo.</p> <p><b>Rasgos Característicos:</b> Su textura porfídica. La masa fundamental afanítica la que le otorga una apariencia aterciopelada.</p>	

## Complejo Félsico

Corresponden a un conjunto de intrusivos subverticales miocenos a pliocenos con afinidad calcoalcalina y contenidos mayores al 56% de SiO<sub>2</sub> (Rabbia y otros, 2001).

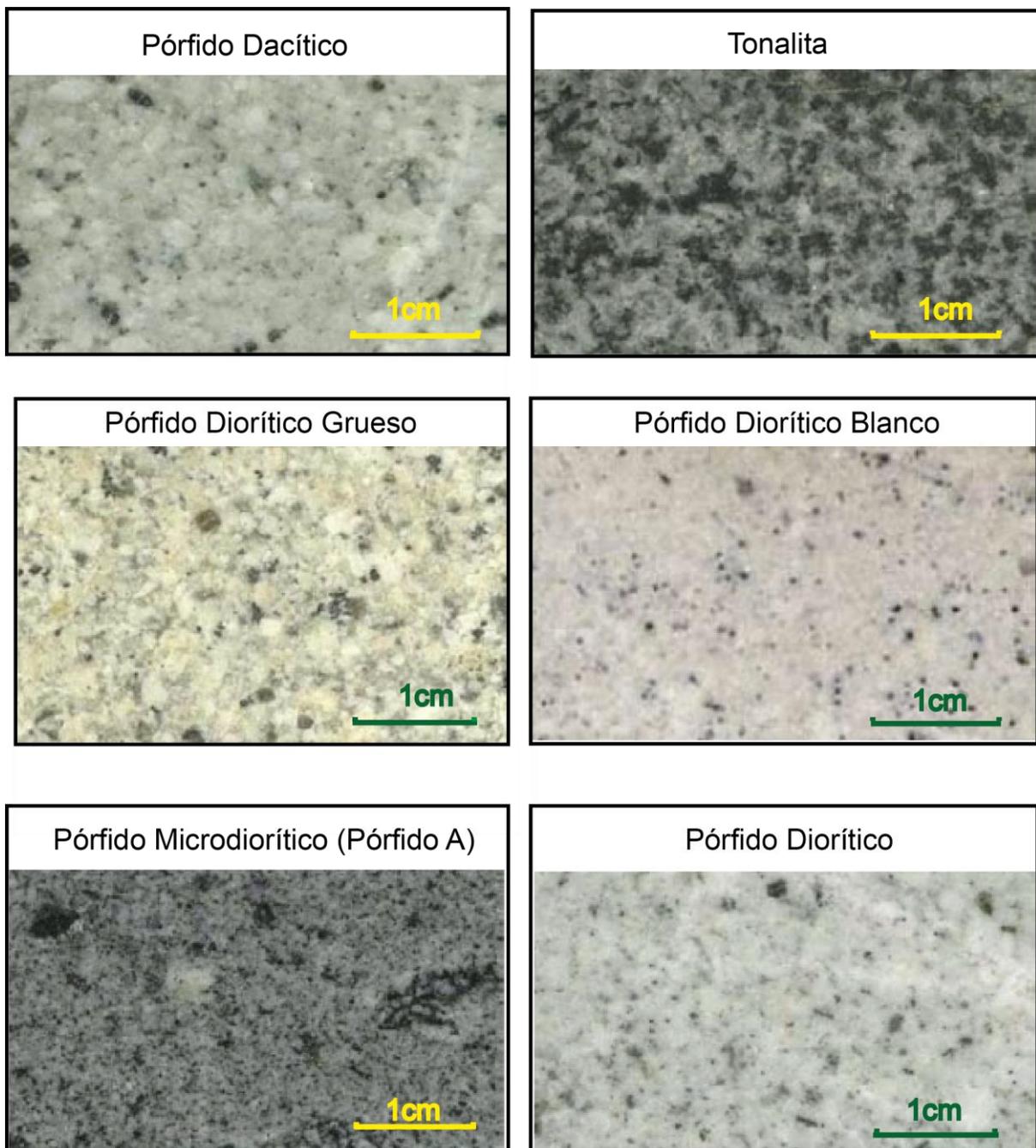
Las litologías que componen el Complejo Félsico son definidas en “Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas Actualización Año 2003” (referencia interna SGL-I-123/2003). Éstas se pueden observar en la Figura 5 y se describen a continuación:

**Pórfido Dacítico:** Antiguamente denominado Pórfido Teniente, Dacita Porfídica o Dacita (Cuadra, 1986; Rojas, 2002; Skewes y otros, 2002). Corresponde a un cuerpo tabular, subvertical que intruye al Complejo Máfico El Teniente, en orientación general nortesur, en la zona norte del yacimiento. Muestra contactos tanto nítidos como irregulares y brechosos. Hacia el sur, el cuerpo se encuentra truncado por la Chimenea Braden. Corresponde a una roca de color gris claro a blanco y su textura puede ser porfídica idiomorfa y porfídica hipidiomorfa (Ossandón, 1974; Rojas, 2002), con fenocristales de oligoclasa, biotita y cuarzo (Cuadra, 1986). Dataciones U/Pb en circón, indican edad de cristalización de  $5,28 \pm 0,10$  Ma (Maksaev y otros, 2004).

**Tonalita:** corresponde a un gran cuerpo que intruye al CMET al SE del yacimiento (SE de la pipa Braden) que también ha sido llamado Diorita Sewell (Skewes y otros, 2002). Es un stock de 200 m<sup>2</sup> cuyo núcleo es fanerítico y grada a porfídico hacia el exterior del intrusivo (Faunes, 1981).

**Pórfido Diorítico:** serie de stocks y diques menores, de gran extensión en la vertical, que se orientan en dirección N30°W en la parte norte y central del yacimiento (Diorita Central era la antigua denominación de estos últimos). Dataciones radiométricas U/Pb en circón, indican una edad de cristalización de  $6,11 \pm 0,13$  Ma a  $6,28 \pm 0,16$  Ma (Maksaev y otros, 2004).

**Pórfido Microdiorítico:** Anteriormente llamado Pórfido A (Spröhnle, 1990). Corresponde a una diorita de grano fino, con abundantes xenolitos de andesita y cúmulos de biotita (Arredondo, 1994). Está en contacto con la Tonalita y con el CMET. Dataciones U/Pb en circón, indican una edad de cristalización de  $6,46 \pm 0,11$  Ma (Maksaev y otros, 2004).



**Figura 5.** Imágenes de las diferentes unidades petrográficas pertenecientes al Complejo Félsico de El Teniente. (Referencia interna SGL-I-123/2003).

### **Complejo Brecha Braden**

Correspondiente a una chimenea volcánica originada por la expulsión de gases que fragmentan la roca de caja. Tiene forma de cono invertido sub circular de diámetro de 1.200 m y profundidad de más de 2.150 m, desde la superficie. Su edad se estima

en 4,7 a 4,5 Ma (Cuadra, 1986). Las dos grandes unidades geológicas que componen este complejo son las siguientes:

**Unidad Brecha Braden:** consiste en brechas con fragmentos redondeados a sub angulosos mal seleccionados y cuya composición es andesítica, diorítica, dacítica y latítica con alteración hipógena propia, en una matriz de polvo de roca y cemento de sericita con cantidades menores de turmalina, calcita y sulfuros, principalmente pirita lo que la hace una unidad de baja ley.

**Unidad Brecha marginal:** unidad que rodea a la Unidad Brecha Braden como un anillo, de 50 m a 60 m de espesor promedio el que disminuye en profundidad, hasta llegar a 10 m (Cuadra, 1986). El contacto entre ambas unidades de brecha es gradacional con un porcentaje variable de turmalina (Ojeda y otros, 1980). Sus fragmentos son angulosos a sub-angulosos polimícticos. Presenta alteración cuarzo-sericita-clorita en distintos grados y cantidades leves de anhidrita, yeso, sulfuros y tenantita-tetraedrita. Su cemento es de turmalina y cuarzo con cantidades menores de anhidrita, yeso, carbonatos, sulfuros y tenantita-tetraedrita. Los minerales de mena presentes son calcopirita, bornita, tenantita - tetraedrita y pirita.

### **Cuerpos de Brechas**

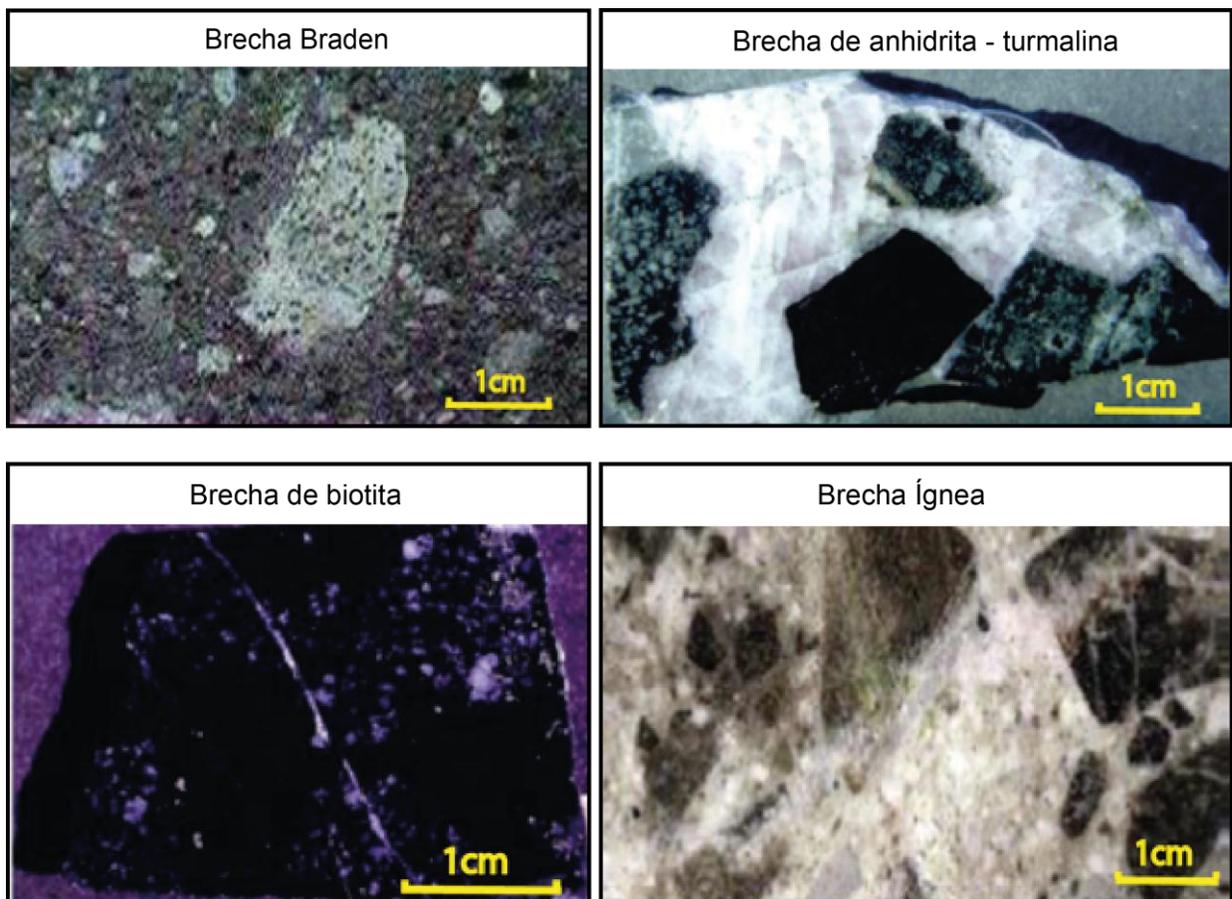
Arredondo (1994) distingue varios cuerpos de brecha según la composición de la matriz, estos se pueden ver en la Figura 6:

**Brechas de anhidrita:** de fragmentos de carácter polimíctico (de rocas máficas y félsicas alteradas). Su cemento consiste en anhidrita con menores cantidades de cuarzo, calcopirita, pirita y molibdenita. Se encuentra en el sector NE y SE del yacimiento. Habitualmente presenta leyes de cobre mayores a las de su entorno.

**Brechas de turmalina:** brechas de carácter polimíctico (rocas máficas y félsicas alteradas). En su cemento abunda la turmalina junto a anhidrita, cuarzo, calcopirita, bornita y pirita. Se encuentran preferentemente en el sector norte de la Chimenea de Brecha Braden. La brechización se habría producido entre las etapas de mineralización tardi-magmática e hidrotermal principal. Mientras que las brechas de turmalina y cuarzo, solo contienen fragmentos de rocas máficas y su formación se relaciona con la etapa hidrotermal tardía.

**Brechas de biotita:** ubicadas en zonas de cobre hipógeno, rodeando a la Pipa Braden. Contienen fragmentos polimícticos, tanto de rocas intrusivas máficas como félsicas, los que están fuertemente biotitizados y sus minerales máficos han sufrido un reemplazo total por biotita. La biotitización se asocia con la infiltración de numerosas vetillas de biotita (Skewes, 1999 y Skewes, 2000). Su cemento además contiene plagioclasa ± cuarzo ± bornita-calcopirita ± anhidrita ± yeso y también polvo de roca.

**Brechas Ígneas:** Pueden contener en la matriz biotita predominante, en tal caso son llamadas brechas ígneas andesíticas, o bien, tener más anhidrita, feldespato y cuarzo, y corresponder a brechas ígneas dacíticas o dioríticos según su contenido de cuarzo y feldespato. Se encuentran preferentemente en los contactos entre el CMET y los pórfidos del Complejo Félsico que lo intruyen.



**Figura 6.** Imágenes de las diferentes unidades petrográficas pertenecientes al Complejo de Brechas de El Teniente. (Referencia interna SGL-I-123/2003; Skewes, 2004; Cannell, 2004).

### **Intrusivos Menores**

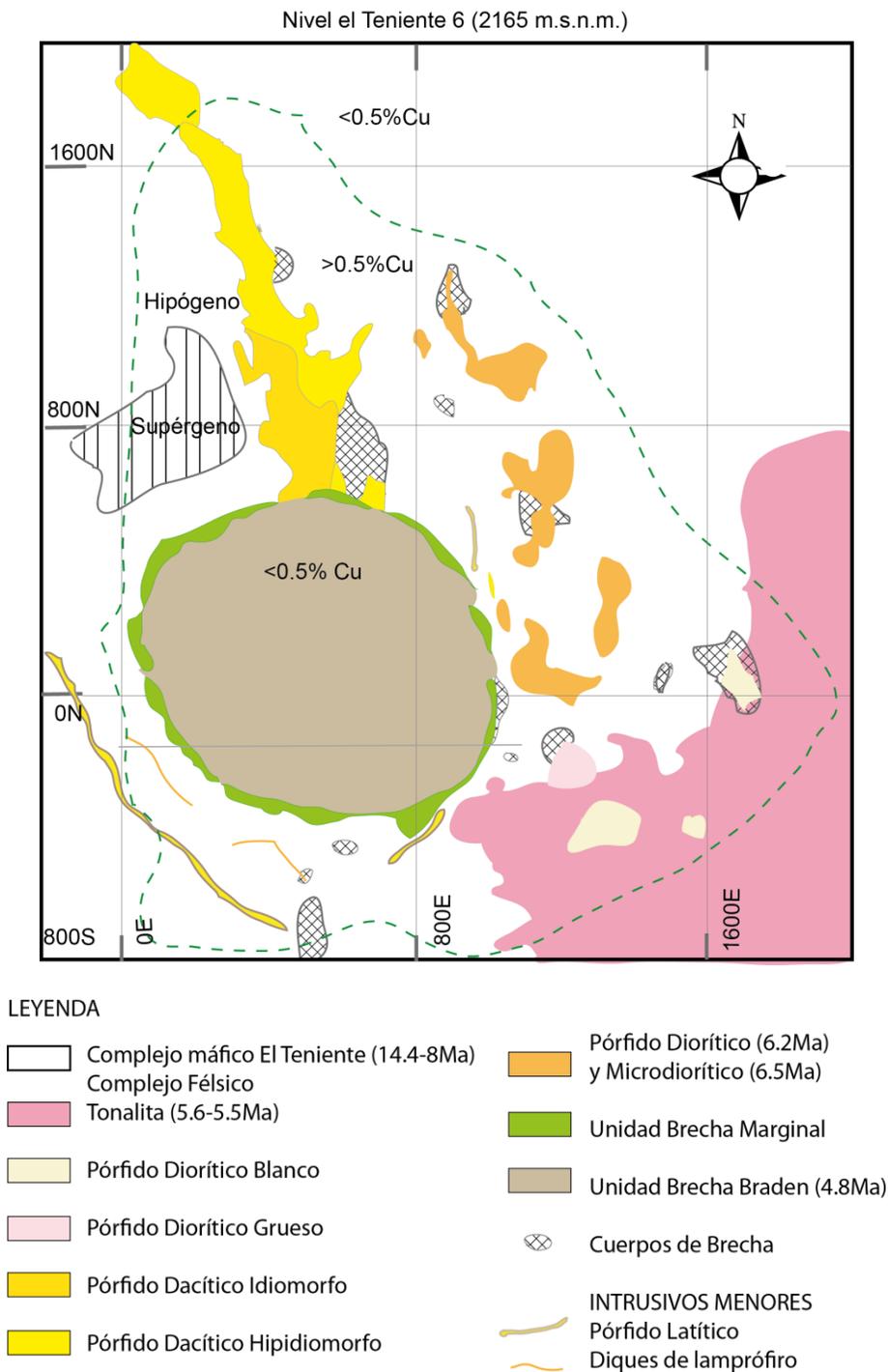
Los últimos eventos intrusivos reconocidos en el Yacimiento El Teniente corresponden a cuerpos de ocurrencia restringida y de carácter parcialmente estéril.

**Pórfido Latítico:** corresponde a diques anulares de poca potencia de latita porfídica (Howell y Molloy, 1960), aledaños a la Chimenea de Brecha Braden. Son cuerpos irregulares, discontinuos y autobrechizados. Contienen un 40% de fenocristales de feldespato y biotita. La edad K/Ar, de  $4,96 \pm 0,25$  Ma, indica que su existencia es previa a la Brecha Braden (Riveros, 1991).

**Diques de Lamprófico:** 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 sur de la Chimenea de Brechas Braden, con potencia variable de 1 a 2 m, manteo sub verticalmente y alta continuidad en el rumbo. Cortan las rocas máficas, diorita Sewell y a la Chimenea de Brechas Braden, con contactos son nítidos. Dataciones K-Ar en roca indican una edad de 3,8 a 2,9 Ma (Cuadra, 1986 y Godoy, 1993).

**Dique de andesita:** Cuerpo de forma tabular de potencia entre 0,5 y 1,0 m, con rumbo N60°E y continuidad de 500 m, de color gris negro y textura porfídica que corta a la Diorita Sewell en su sector sur.

En la Figura 7 se muestran las litologías descritas anteriormente en una imagen en planta del Nivel Teniente 6 a 2165 m.s.n.m.



**Figura 7.** Geología simplificada del Nivel Teniente 6 a 2165 m.s.n.m. Se indican las coordenadas locales mediana en metros. Imagen modificada de la base de datos de la mina y de De los Santos (2011).

## 2.4.2 Geología Estructural

En El Teniente es posible reconocer tres sistemas estructurales preferenciales: uno de continuidad distrital, de orientación NNW, que se manifiesta en la traza de los contactos, en fallas y zonas de cizalle y en la geometría de las vetas y vetillas. Los otros sistemas presentan orientación NS y NE.

La Zona de Falla El Teniente (ZFT) es definida por Garrido y otros (1994) entre la quebrada Teniente y la Falla Agua Amarga. Se extiende en un área de 14 km de largo y 3 km de ancho y corresponde a una zona de cizalle de dirección aproximada N65°E que define un eje de acortamiento de dirección N48°±11W (Garrido, 1995). El emplazamiento de la Tonalita Sewell y la principal zona de alteración hidrotermal del yacimiento estarían asociados a esta estructura. Garrido (1995) indica que el esfuerzo principal regional es de tendencia E-W, siendo este rotado a la dirección NW dentro de la ZFT, como se observa en la Figura 8.

Las clasificaciones de estructuras geológicas de El Teniente se realizan según su continuidad y tipo de relleno.

Según su continuidad las estructuras se clasifican en:

**Estructuras Distritales:** traza > 1 km. Espesor típico mayor a 1 m. Ejemplos: Falla Agua Amarga y la ZFT.

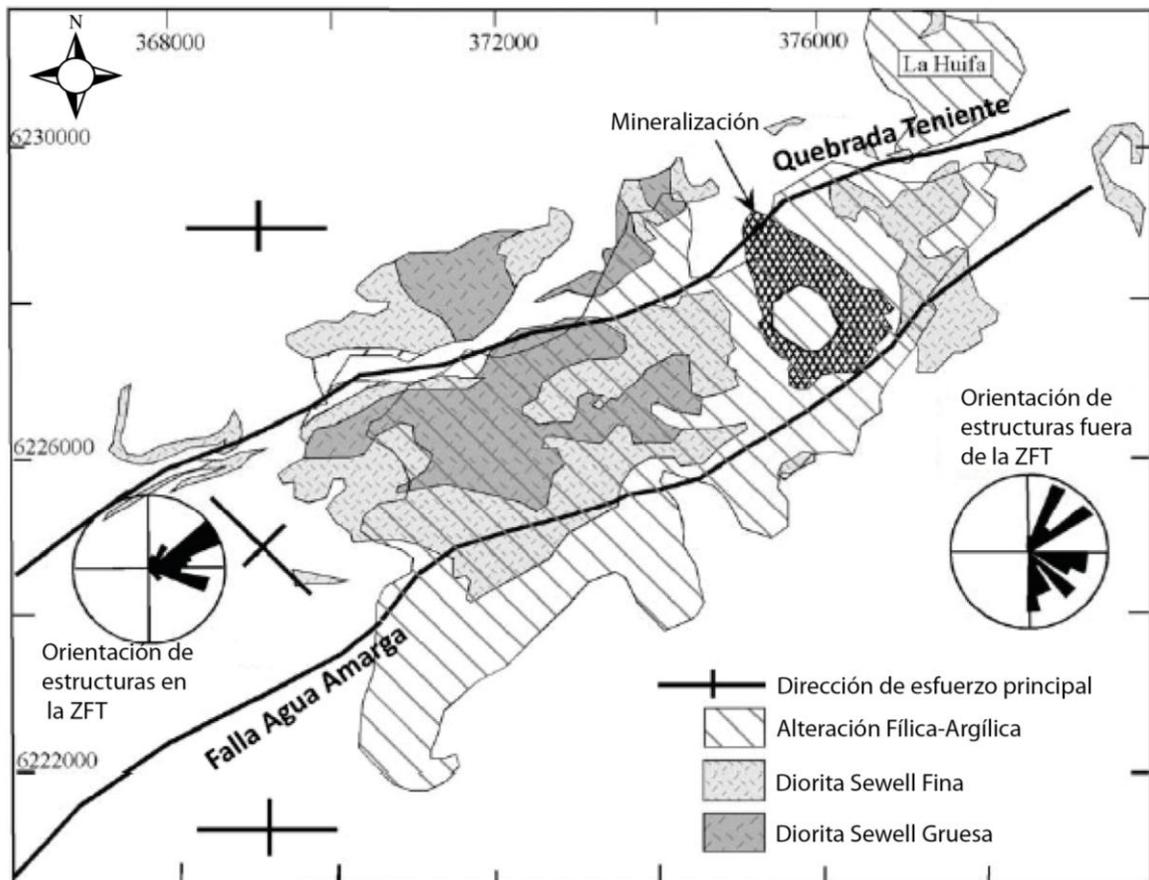
**Estructuras Maestras:** traza > 500 m. Espesor entre 5 y 120 cm. Corresponden a un conjunto de fracturas sub verticales de orientación NS, asociadas a la orientación del Pórfido Dacítico y en menor proporción a las apófisis de la Tonalita (Cuadra, 1986; Garrido, 1995).

**Estructuras Mayores:** traza entre 100 y 500 m. Espesor menor a 7 mm. Corresponden a estructuras de orientación NE que incluyen diques de lamprófido.

**Estructuras Intermedias:** traza entre 4 y 100 m. Espesor menor a 5 mm

**Estructuras Menores:** traza < 4 m. Espesor menor a 2 mm. Entre éstas se encuentran las vetillas que forman stockwork en el macizo rocoso primario del yacimiento y dominan sobre las estructuras intermedias y mayores, éstas se encuentran mayormente selladas con rellenos competentes, mientras que en la mena secundaria, el agua ha lixiviado algunos minerales modificando las propiedades de las estructuras.

Según su relleno se clasifican en Tardimagmáticas, Hidrotermales Principales e Hidrotermales Tardías.



**Figura 8.** Figura esquemática de la Zona de Falla El Teniente (ZFT) y su relación con la zona mineralizada del yacimiento. Imagen modificada de Garrido (1995), tomada de De los Santos (2011).

### 2.4.3 Alteración y Mineralización

Actualmente se distinguen tres etapas hipógenas de alteración y mineralización: la Tardimagmática, la Hidrotermal Principal y la etapa Hidrotermal Tardía. Adicionalmente se distingue una etapa Supérgena. Estas se habrían sucedido de manera continua para formar de la mineralización del yacimiento, cuyo origen se asocia al emplazamiento de los pórfidos dacítico y diorítico, Brecha Hidrotermal de turmalina y Brecha Braden (Howell y Molloy, 1960).

Durante las etapas hipógenas se desarrolló la zonación mineralógica consistente en un núcleo bornita-calcopirita, envuelto por una capa de calcopirita mayor que bornita, esta a su vez envuelta por una zona de calcopirita y un halo de pirita. Otros centros de mineralización hipógena se asocian a los Pórfidos Diorítico y Microdiorítico y al desarrollo de brechas hidrotermales de altas leyes. El emplazamiento de la Pipa Braden corresponde al evento terminal de la evolución de la mineralización, donde este elimina gran parte del núcleo de bornita y lo reemplaza por pirita.

La alteración supérgena se produce por una infiltración gradual de aguas desde la superficie que genera lixiviación y enriquecimiento secundario en la parte alta de la

mineralización. Aparecen nuevos minerales de alteración, como sericita, arcillas, minerales oxidados en los niveles superiores. En profundidad aumenta la ley de cobre debido a la aparición de calcosina sobre calcopirita y menor cantidad de covelina en pátinas.

La Figura 9 muestra distintos niveles geológicos, basados 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 supérgena.

### **Etapa tardimagmática**

La primera etapa de alteración-mineralización se caracteriza por la alteración biotítica pervasiva y por un enrejado intenso de vetillas rellenas con cuarzo, anhidrita y sulfuros, como bornita, calcopirita, pirita y molibdenita, diseminada y en mayor proporción en vetillas sin halo (Zúñiga, 1982). La etapa tardimagmática define dos sectores en su distribución. El primero, en la mitad norte del yacimiento, aparentemente asociado al emplazamiento del Pórfido Dacítico (Arévalo y Floody, 1995), contiene un centro de intensa alteración potásica que gradúa a intensidades menores hacia afuera y a asociaciones propilíticas. Esta zonación tardimagmática también se manifiesta en el sector sur del yacimiento, pero se encuentra parcialmente tapado por posteriores etapas de alteración.

### **Etapa hidrotermal principal**

Es producida por la reacción de los fluidos tardimagmáticos con aguas meteóricas y se superpone a la alteración de la etapa anterior, reemplazando la mineralogía por una asociación de cuarzo-sericita, con menor cantidad de anhidrita y clorita. La mineralización consiste en calcopirita, pirita y molibdenita (Zúñiga, 1982). Las vetillas de esta etapa generan halos de alteración de ancho variable.

### **Etapa hidrotermal tardía**

Etapa relacionada al emplazamiento de la brecha hidrotermal de turmalina, como anillo periférico a la Brecha Braden (Villalobos, 1975) y también se reconoce en la zona sur asociado a un intrusivo diorítico. La mineralogía característica consiste en la asociación cuarzo-turmalina-sericita-clorita-yeso-carbonatos, observándose además calcopirita-bornita-pirita-molibdenita-tenantita/tetraedrita. Su desarrollo se da a través de halos de vetas y vetillas, los cuales se distribuyen en una franja concéntrica al anillo de brechas y también se manifiesta como matriz de la brecha de turmalina y como parte de la alteración de sus fragmentos.

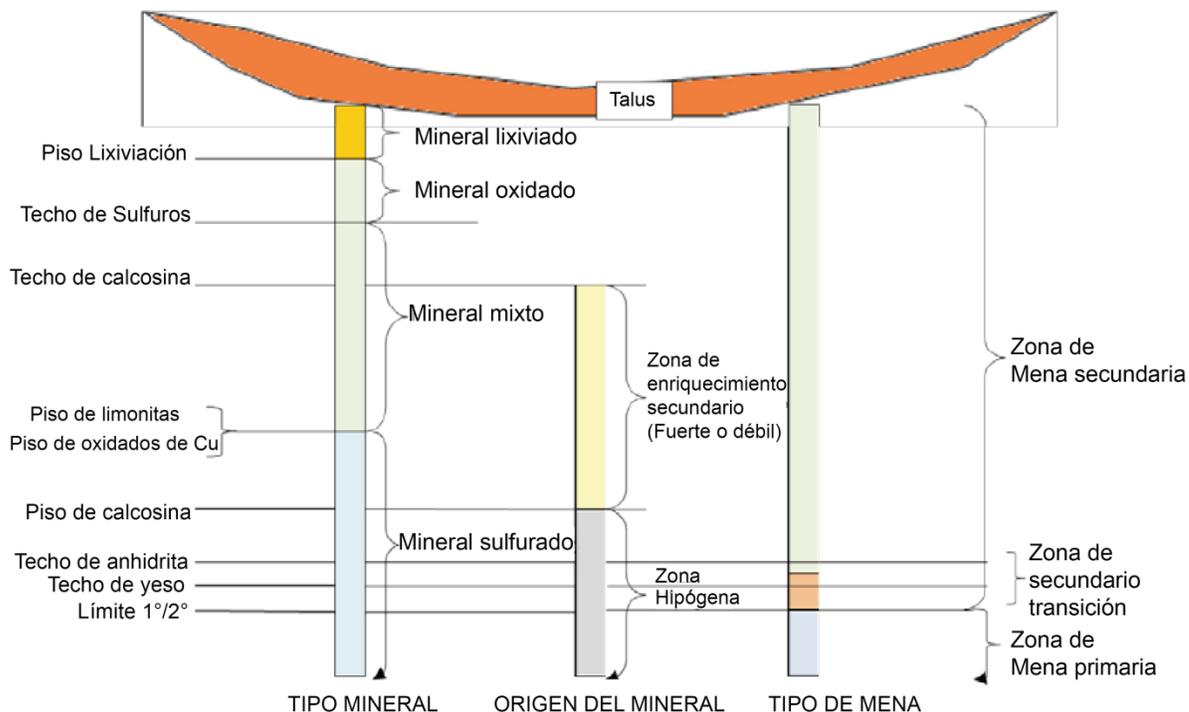
### **Etapa póstuma**

Última etapa de alteración hipógena, la cual se relaciona con la consolidación de la Brecha Braden. La asociación mineralógica característica para el cemento es sericita, calcita y pirita, y los fragmentos poseen alteración sericítica. También se manifiesta como relleno de estructuras planares y cavidades, con minerales de baja temperatura como yeso, siderita, ankerita, baritina, blenda, galena, cuarzo, anhidrita y turmalina (Ojeda y otros, 1980).

## Etapa Supérgena

Su presencia se distingue en las partes altas del yacimiento, en un área de 15 km<sup>2</sup> formando una elipse de eje mayor noroeste (Camus, 1974; Ojeda y otros, 1980) Los sectores en que se desarrolla la alteración supérgena coinciden con las zonas de enriquecimiento secundario del yacimiento, de espesor de entre 300 m y 500 m (Álvarez, 1990) y su desarrollo sigue el borde de la Brecha Braden y el Pórfido Dacítico hacia el norte, hasta desembocar en la Quebrada Teniente (Floody y Huete, 1998).

Es característica la presencia de caolinita y en menor proporción se encuentra montmorillonita, alunita y sericita. La mineralización corresponde a calcosina gris, calcosina celeste y covelina, en vetillas y diseminada, la cual reemplaza a los sulfuros pre-existentes a partir de fracturas, bordes de granos y clivaje.



**Figura 9.** Imagen esquemática de la serie de niveles geológicos, en base a mapeos históricos realizados en la mina. (SGL-I-123/2003)

### **3. VETILLAS DE EL TENIENTE**

#### **3.1 GENERALIDADES**

Entre los tipos de discontinuidades, tales como fracturas y fallas, también se ubican las vetillas. Estas corresponden a discontinuidades geológicas rellenas y selladas por minerales producto de la acción de fluidos hidrotermales los cuales además, alteran la roca caja generando halos en ella.

Las vetillas presentes en el yacimiento han sido ampliamente estudiadas, dado que contienen más del 70% de la mineralización de Cu del yacimiento (Brzovic y Benado, 2003) e influyen en la estabilidad del macizo rocoso. Según se ha observado en estudios de fragmentación del macizo rocoso, las caras de las colpas encontradas en los puntos de extracción son definidas en más de un 90% por vetillas del stockwork (Brzovic, 2001).

El Teniente presenta un denso enrejado polidireccional (stockwork) de vetillas selladas con rellenos competentes, impermeables y soldados a la roca (como el que se muestra en la Figura 10), en comparación con vetillas encontradas en minas a rajo abierto, que pueden presentar rellenos de baja cohesión. La mineralogía de la vetilla puede consistir en un mineral único o en grupos de minerales con proporciones variables, entre los que se encuentra anhidrita, bornita, calcopirita, carbonato, cuarzo, molibdenita, sericita, etc.

Según su ambiente de formación, cada vetilla adquiere características que permite distinguirlas. Así, por ejemplo, cuando la roca de caja se encuentra a altas temperaturas y por tanto tiene un comportamiento dúctil, como sucede en la etapa de alteración y mineralización tardimagmática, las vetillas tendrán bordes sinuosos e irregulares.

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



**Figura 10.** Stockwork compuesto por vetillas tipo TM de cuarzo con y sin halo de alteración. Como escala se tiene que la separación entre pernos es de 1 m. Imagen tomada de Karzulovic (2001).

Los elementos que caracterizan a la vetilla son su traza, relleno, sutura, interfase y halo (ver Figura 11). Éstos se definen a continuación:

**Material de relleno:** conjunto de minerales que sellan la estructura. Éste define el espesor y la resistencia relativa de la vetilla. El espesor puede variar de menos de 1 mm a varios centímetros (Karzulovic, 2001).

**Sutura:** parte del relleno, generalmente de minerales más blandos que el resto de la vetilla. Corresponde a una heterogeneidad orientada dentro de la vetilla y no todas las vetillas la poseen.

**Interfase:** corresponde a la zona de contacto entre el relleno y la roca caja, ya sea fresca o alterada.

**Halo de alteración:** zona de la roca caja próxima al relleno, la cual ha sido alterada debido a cambios químicos durante de la acción de los fluidos hidrotermales que generaron a la vetilla. Su potencia puede variar a lo largo de la vetilla. Según su geometría pueden ser simples y dobles o complejos.

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

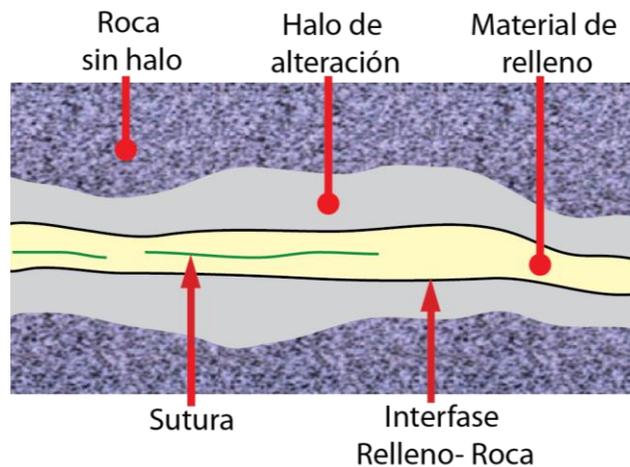


Figura 11. Esquema de una vetilla y los respectivos elementos que la caracterizan.

### 3.2 CLASIFICACIÓN DE VETILLAS

Las vetillas del yacimiento son agrupadas de acuerdo a su espesor o potencia, a su extensión y a su composición, alteración y relaciones de contacto entre ellas. Estos parámetros permiten realizar distintas clasificaciones, las cuales se exponen a continuación:

#### 3.2.1 Según espesor de la vetilla

La clasificación de vetillas según el espesor es desarrollada por la Superintendencia de Geología de la División EL Teniente y expuesto en Estándares y Metodología de Trabajo para Geología de Minas (SGL-I-123/03,2003):

- **Vetas:** estructuras rectilíneas de longitud mayor 4,5 cm (largo de la preparación microscópica), y espesor superior a los 3 mm.
- **Vetillas:** estructuras lineales, de espesor comprendido entre 1 a 3 mm, y longitud igual o mayor a los 2,5 cm, con relleno continuo en toda su longitud.
- **Microvetillas:** longitud variable y ancho inferior a 1 mm, con trazado generalmente rectilíneo y relleno discontinuo. Sólo visibles en rocas de grano muy fino y aspecto afanítico.

#### 3.2.2 Según traza de la vetilla

Las vetillas del yacimiento también pueden ser agrupadas según la extensión de su traza. Esta clasificación, extraída de Brzovic y otros (2001), contiene las 3 clases siguientes:

- **Mayores:** aquellas que se extienden por al menos 5 m de largo (el ancho de 2 labores).
- **Intermedias:** son aquellas mayores a 2,5 m (el ancho aproximado de una labor).
- **Menores:** aquellas que no alcanzan a cruzar la labor.

### 3.2.3 Clasificación genética

Según los rasgos que caracterizan la mineralización-alteración de las vetillas, tales como las relaciones de contacto entre ellas, su mineralogía metálica y no metálica y los halos de alteración, Brzovic y Benado (2003) realizan la clasificación genética, con el objetivo de caracterizar el macizo rocoso geotécnicamente.

#### Etapa Tardimagmática (TM)

Las estructuras de esta etapa, relacionada a la consolidación del intrusivo, se encuentran en las zonas de alteración potásica. Su formación se habría producido en un ambiente semi-dúctil, lo que se manifiesta en la forma sinuosa de la mayoría de las vetillas. La presencia de cuarzo, biotita, feldespato potásico y anhidrita en las vetillas y en sus halos de alteración, se asocia a la alteración potásica. Los feldespatos y minerales máficos de la roca caja sufren pertitización y biotización, respectivamente. Entre la mineralogía metálica destaca la presencia de calcopirita, bornita, pirita y molibdenita.

Las vetillas de categoría TM se dividen en 8 subtipos (ver ejemplos de cada uno en la Figura 12) que pueden ser sin halo o con halo silíceo o biotítico, generalmente simétrico, con un espesor variable, con mineralización metálica en sutura o diseminada. Los subtipos son los siguientes:

- **V1:** vetilla de magnetita, con halo. Bordes nítidos de magnetita de color oscuro. Puede tener también cuarzo, biotita en cantidades bajas, trazas de anhidrita, calcopirita y clorita. El halo es difuso.
- **V2:** vetillas de cuarzo - biotita, sin halo. Puede presentar anhidrita y clorita minoritaria, mineralización diseminada de sulfuros como la calcopirita, pirita y bornita y molibdenita subordinada.
- **V3:** vetillas de cuarzo - biotita, con halo. Presentan también anhidrita, calcopirita y clorita minoritaria. Puede presentar trazas de bornita y molibdenita. La biotita se puede presentar como una sutura junto a sulfuros. El halo es generalmente silíceo y difuso, a veces biotítico y puede tener trazas de sulfuros diseminados. Si es silíceo, tiene color claro. Si es biotítico, se ve difuso debido al contraste de color con la roca caja (CMET).
- **V4:** vetillas de anhidrita, con halo, biotita y sulfuros diseminados. El halo es silíceo-biotítico donde la biotita se encuentra diseminada en el halo silíceo. La interfaz vetilla-halo es nítida y la interfaz halo-roca es difusa.

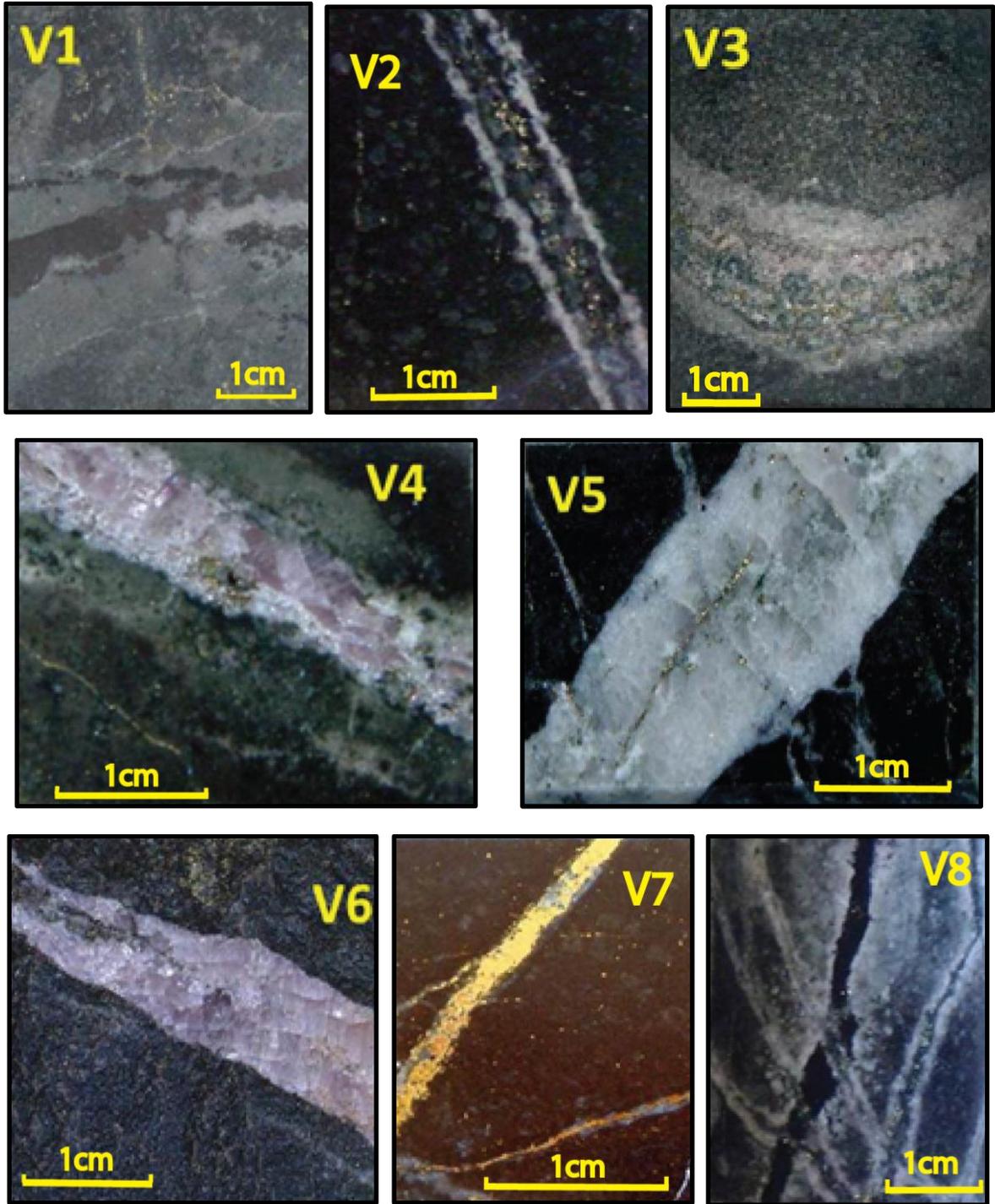


Figura 12. Ejemplos de vetillas típicas del tipo tardimagnética (TM). Imágenes modificadas de SGL-I-123/2003.

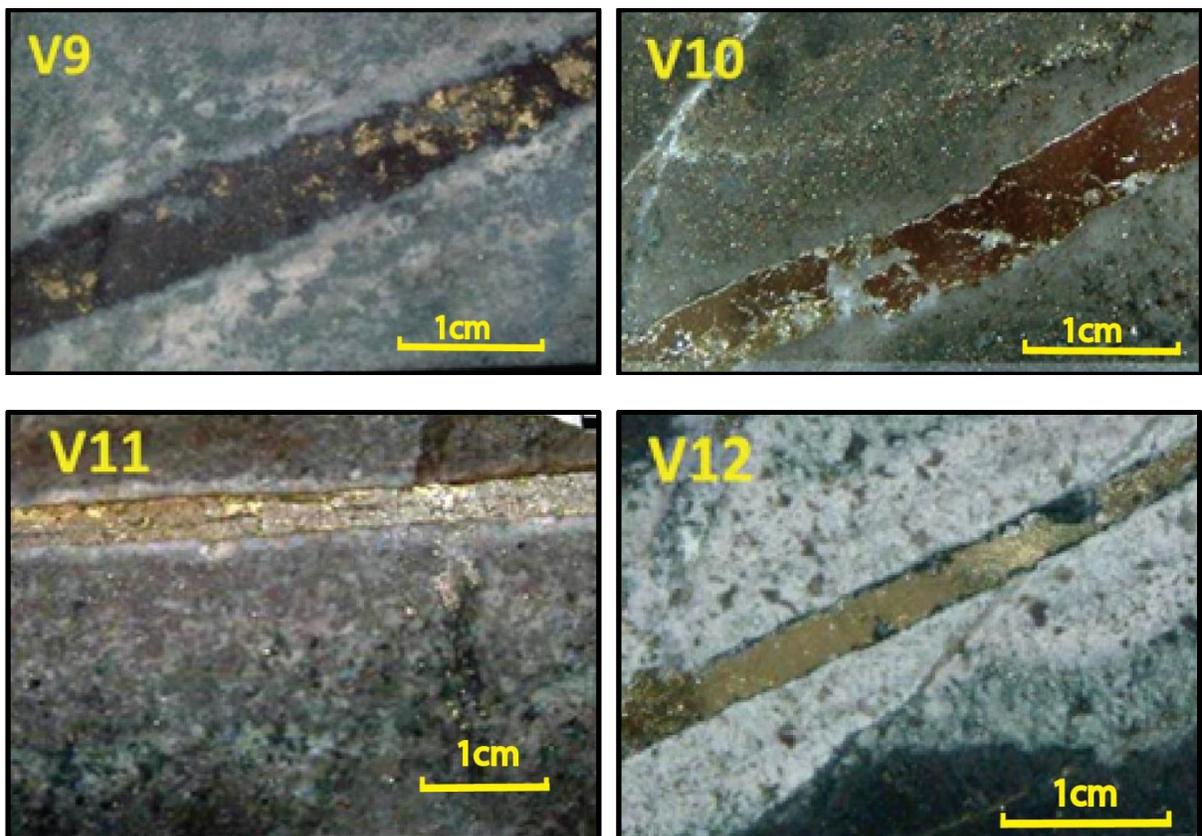
- **V5:** vetillas de cuarzo mayoritario, sin halo. Minerales metálicos diseminados (calcopirita, pirita, bornita, molibdenita).
- **V6:** vetillas de anhidrita mayoritaria, sin halo. Predomina la anhidrita por sobre los minerales metálicos (calcopirita, bornita y molibdenita) y el cuarzo.
- **V7:** vetillas de sulfuros mayoritarios, sin halo. Los sulfuros se presentan en cantidades mayoritarias (calcopirita - pirita - bornita - molibdenita). Principalmente, calcopirita masiva. 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. Generalmente de bordes nítidos.
- **V8:** vetillas de turmalina. Presencia de anhidrita, cuarzo y sulfuros subordinados. Sus bordes son nítidos y puede o no presentar halo.

### **Etapa Hidrotermal Principal (HP)**

En esta etapa la acción de fluidos tardimagmáticos y aguas meteóricas producen una alteración fílica a través de vetillas de sulfuros y de sus halos de alteración de diferentes espesores, los cuales agregan cuarzo, sericita y clorita a la roca caja, obliterándola. Las vetillas tienen bordes continuos y rectos, pues se forman en condiciones de roca frágil. En ellas predominan minerales metálicos como calcopirita, pirita y molibdenita, y pueden presentar cuarzo, sericita, clorita y anhidrita. Sus halos pueden ser simples o complejos, con o sin sulfuros diseminados, como se muestra en la Figura 13.

Esta categoría se divide en los siguientes cuatro subtipos:

- **V9:** vetilla de magnetita mayoritaria, con halo simple. Su mineralogía es principalmente magnetita, en menores cantidades posee calcopirita y pirita. En contacto sinuoso con el relleno se presenta un halo simple y generalmente asimétrico de sericita con calcopirita más pirita diseminada. La presencia de clorita y cúmulos de biotita en el halo le da un aspecto moteado. Estas vetillas suelen ser más gruesas que 2 mm.
- **V10:** vetilla de sulfuros mayoritarios, con halo simple. El relleno posee mineralización masiva de calcopirita y/o pirita sin o con cuarzo. El halo es bandeado o simple, predominantemente sericítico y contiene calcopirita y/o pirita diseminada.
- **V12:** vetilla de sulfuros mayoritarios, con halo complejo. Vetas o vetillas con calcopirita y/o pirita masiva. Su halo es doble, siendo el halo más cercano la veta cuarzo-sericítico con calcopirita y pirita diseminadas, mientras que el segundo halo es clorítico-sericítico con escasos sulfuros diseminados.
- **V11:** vetilla de sulfuros mayoritarios, con halo semi-complejo. Su halo tiene características transicionales entre V10 y V12. El halo es una transición gradual a la roca de caja con bordes externos que podrían interpretarse como un dudoso segundo halo. El relleno presenta un sector central con calcopirita y/o pirita masiva. La mineralización metálica en el halo es escasa y diseminada.



**Figura 13.** Ejemplos de vetillas típicas del tipo Hidrotermal Principal (HP). Imágenes modificadas de SGL-I-123/2003.

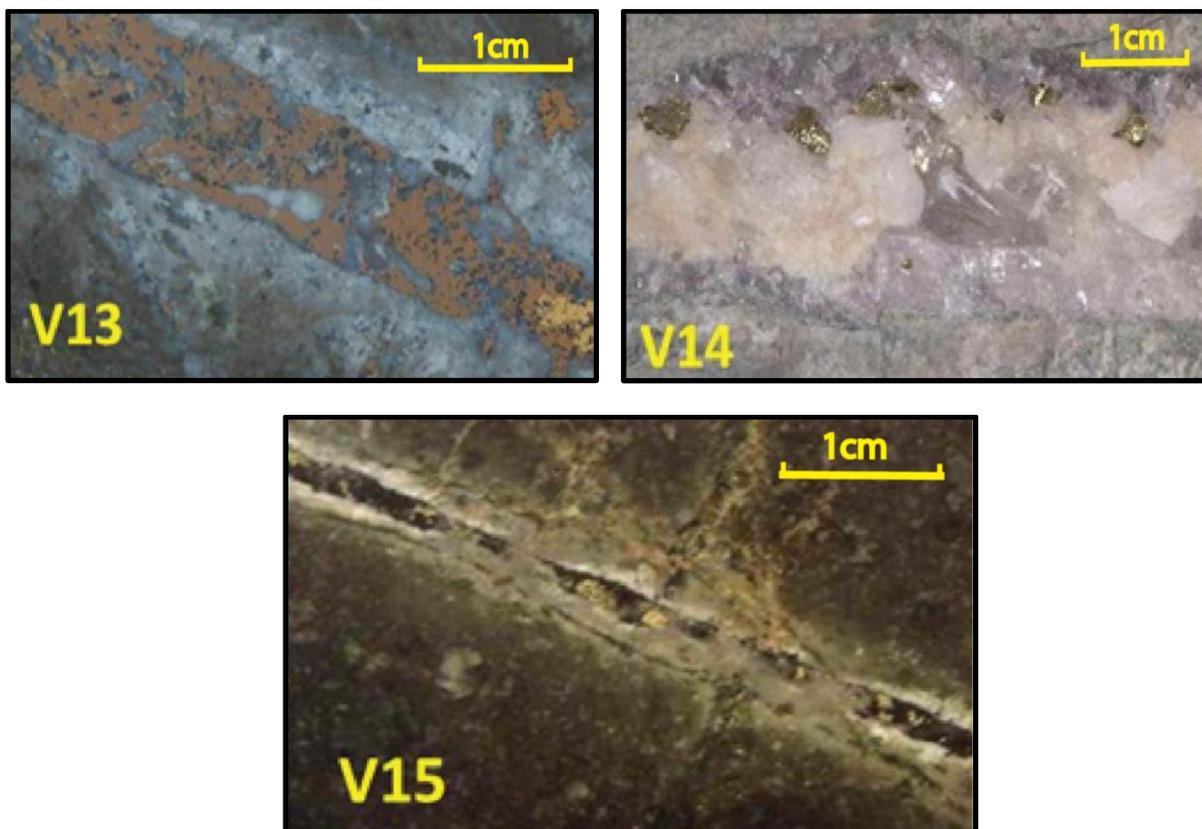
### **Etapa Hidrotermal Tardía (HT)**

Las estructuras producidas en esta etapa se relacionan con fluidos hidrotermales asociados al desarrollo del Complejo de Brechas Braden. Éstas se extienden en un radio de 100-150 m con las brechas en su centro. En la etapa HT surgen vetillas de mayor complejidad y variabilidad mineralógica que contienen carbonatos, yeso, anhidrita y turmalina, con o sin sulfuros. Aparecen las vetillas de tenantita y tetraedrita, pues se incorporan valores anómalos de Pb, Zn y As producto de la alta sulfidización del ambiente. Las vetillas presentan textura masiva, espesores irregulares, con halos desarrollados y difusos sericítico o cuarzo-sericítico.

A continuación se presentan los subtipos de vetillas HT, adicionalmente se muestra un ejemplo de cada uno de ellos en la Figura 14.

- **V13:** vetillas de sulfuros mayoritarios. Vetas o vetillas de sulfuros masivos (bornita y tenantita-tetraedrita y trazas de galena y blenda), con cuarzo, anhidrita y carbonatos subordinados. Presenta halos bien desarrollado de bordes indefinidos o difusos.
- **V14:** vetillas de carbonatos y sulfatos mayoritarios. Carbonatos como calcita, ankerita, siderita y/o sulfatos como yeso y anhidrita, de textura masiva. Se puede encontrar sulfuros en cantidades menores. Presenta halo sericítico-clorítico, desarrollado y difuso.

- **V15:** vetillas de turmalina mayoritaria. Contiene anhidrita subordinada. En el sector sur del yacimiento, en algunos casos existe epidota en baja proporción. Presenta halo sericítico, difuso o indefinido.



**Figura 14.** Ejemplos de vetillas típicas del tipo Hidrotermal Tardío (HT). Imágenes modificadas de SGL-I-123/2003.

A continuación, en la Tabla 2 y Tabla 3 se presenta un resumen, basado en información de SGL-I-123/2003, de cada vetilla según su categoría TM, HP o HT y su subtipo, en ella se describe la mineralogía típica y distintiva, mineralogía del halo y características diagnósticas que permiten su reconocimiento.

**Tabla 2.** Clasificación de vetillas de El Teniente (Superintendencia de Geología División El Teniente, 2003) de tipo TM y HP. La nomenclatura es: Anh anhidrita, Bio biotita, Bo bornita, Clo clorita, Cpy calcopirita, Moly molibdenita, Mt magnetita, Py pirita, Qz cuarzo, Tur turmalina.

Categoría	Clase	Mineralogía Típica	Mineralogía Distintiva	Halo	Características diagnósticas
TM	V1	<b>Mt</b> ± Qz ± Bio ± (Anh)± (Cpy)± (Clo)	Mt	Silíceo	Magnetita. Halo deslavado
	V2	<b>Qz- Bio</b> - Anh- Clo± Cpy± Py± Bo± (Moly)	Qz- Bio	Sin halo	Qz-Bio. Bordes nítidos. Sin halo
	V3	<b>Qz- Bio- Clo</b> - Anh± Cpy± Py± Bo± (Moly)	Qz-Bio-Clo	Silíceo o silíceo - clorítico con biotita diseminado	Halo difuso o sinuoso. Mineralogía típica Qz-Bio-Clo. Puede presentar Bio-Clo en sutura
	V4	<b>Anh</b> ± Bio± Cpy± (Moly)± (Bo)± (Qz)	Anh mayoritaria	Silíceo-biotítico	Anhidrita, halo característico
	V5	<b>Qz</b> ± Anh± Bio± Cpy± Moly± Bo± (Py)± (Clo)	Qz mayoritario	Sin halo	Bordes nítidos, sin halo. Stockwork denso. Sulfuros diseminados o en sutura central
	V6	<b>Anh</b> ± Qz± Bio± Cpy± Moly± Bo± (Py)± (Clo)	Anh mayoritaria	Sin halo	Bordes nítidos, sin halo. Stockwork denso. Sulfuros diseminados.
	V7	<b>Cpy y/o Bo y/o Py y/o Moly</b> ± Anh± Qz± Bio	Sulfuros mayoritarios	Sin halo	Bordes nítidos, sin halo. Stockwork denso. En microvetillas sulfuros alternan con Bio.
	V8	<b>Tur</b> ± Anh± Qz± (Cpy)± (Moly)± (Bo)± (Py)	Tur mayoritaria	Sin halo	Bordes nítidos, sin halo
HP	V9	<b>Mt</b> ± Cpy± Py± Moly± Qz± Anh	Mt mayoritaria	Sericítico-clorítico. Cpy y/o Py diseminada	Halo simple o asimétrico con o sin clorita diseminada
	V10	<b>Cpy y/o Py</b> ± Qz± Anh± Moly	Cpy y/o Py mayoritaria	Sericítico-clorítico, con Cpy y/o Py diseminada	Halo bandeado o simple con sulfuros diseminados
	V11	<b>Cpy y/o Py</b> ± Qz± Anh± Moly	Cpy y/o Py mayoritaria	Sericítico-clorítico	Halo bandeado, semi-complejo, con bordes difusos. Escasos sulfuros diseminados.
	V12	<b>Cpy y/o Py</b> ± Qz± Anh± Moly	Cpy y/o Py mayoritaria	Silíceo-sericítico-clorítico	Halo doble o complejo con mineralización diseminada

**Tabla 3.** Clasificación de vetillas de El Teniente (Superintendencia de Geología División El Teniente, 2003) de tipo HT. La nomenclatura es: Anh anhidrita, Bo bornita, Cb carbonatos, Clo clorita, Cpy calcopirita, Ep, epidota, Moly molibdenita, Qz cuarzo, Py pirita, Ten tenantita, Tur turmalina, Ys yeso.

Categoría	Clase	Mineralogía Típica	Mineralogía Distintiva	Halo	Características diagnósticas
HT	V13	<b>Cpy- Bo- Moly- Ten- Py</b> ± Qz± Anh± Cb± Tur± (Ys)± (Clo)	Sulfuros mayoritarios	Silíceo-sericítico-clorítico	Variedad mineralógica de sulfuros. Halo desarrollado y difuso
	V14	<b>Cb y/oYs t/o Anh</b> ± Cpy± Clo± Bo± Moly± (Ten)± (Qz)	Carbonatos y sulfatos	Silíceo-sericítico-clorítico	Halo desarrollado y difuso. Carbonatos y sulfatos
	V15	<b>Tur-Anh</b> ± Cpy± Cb± Ys± Qz± Py± Ep± (Bo)± (Moly)± (Ten)	Tur mayoritaria	Silíceo-sericítico-clorítico	Halo desarrollado y difuso. Turmalina en abundancia

## 4. ENSAYOS GEOTÉCNICOS DE TRACCIÓN

En general, los ensayos geotécnicos tienen tres objetivos principales. Entre ellos se encuentra el entregar información básica sobre las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, calificar la roca con un valor cuantitativo que permita compararla con otras y, finalmente, brindar la información necesaria para realizar el diseño de estructuras en la roca (Farmer, 1983).

Para la realización de ensayos geotécnicos es necesario la utilización de estándares, puesto que los resultados obtenidos dependen directamente de las condiciones en que se efectúe el ensayo (forma de la probeta, dirección de la carga, velocidad de aplicación y temperatura) y sin ellos la interpretación de resultados sería difícil (Merino, 1989).

Específicamente, para la determinación de la resistencia a la tracción de una muestra de roca es posible realizar dos tipos de ensayos, el de tracción directa y el de tracción indirecta (o ensayo brasileño), los que se comentan a continuación.

En esta oportunidad, los análisis se basan en resultados de ensayos de tracción directa de 19 muestras, realizados en el Centro de investigación, desarrollo, e innovación de estructuras y materiales IDIEM, de la Universidad de Chile, bajo la norma ASTM D2936, más 3 muestras cuyo ensayo se realizó en el instituto SP, en Suecia. Esta es la forma más básica de determinar la resistencia de la roca a este tipo de esfuerzo, aunque es más difícil y costoso que el ensayo de tracción indirecta.

El ensayo de tracción indirecta es descrito de forma general, pues existen trabajos previos que lo han usado y es posible realizar comparaciones con el resultado de este trabajo.

### 4.1 ENSAYO DE TRACCIÓN DIRECTA

Este ensayo consiste en aplicar una fuerza de tracción uniaxial a una muestra cilíndrica o probeta, en la dirección de su eje hasta que se produzca la ruptura. Cada muestra posee una vetilla ubicada en el centro de la probeta y aproximadamente perpendicular a la acción de los esfuerzos de tensión, como se muestra en la Figura 15. Si se produce ruptura a través de la vetilla, el ensayo indica la resistencia a la tensión de la vetilla. La relación de los esfuerzos aplicados es la siguiente:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0$$

El equipamiento requerido para el ensayo consiste en: Un dispositivo de carga, usado para aplicar y medir la carga axial sobre la muestra; dos cabezales, que corresponden a tapas metálicas de forma cilíndrica las que son adheridas a los extremos de la muestra y sirven como medio de traspaso de carga desde el dispositivo de carga a la muestra, estos deben transmitir la tracción sin aplicar torsión o flexión a la muestra (ASTM D2936, 2001). En este caso la máquina pertenece a IDIEM (Figura 16A), y aun-

que tiene una capacidad de tensión mayor, la máxima carga de tensión aplicable es dependiente de la resistencia del material adhesivo, en este caso de 24,8 MPa.

El procedimiento consiste en adherir cada borde de la probeta a un cabezal metálico mediante un pegamento especial (en este caso se utilizó el adhesivo SIKA 31 HMG), los cuales son posteriormente fijados a la Máquina de tensión. Luego, se aplica la carga a través de la máquina desde uno de los bordes de la muestra de forma continua y a una tasa de carga menor a 15 N/s. Finalmente se registra la máxima carga soportada por la muestra.



Figura 15. Figura esquemática de ensayo de tracción directa. Imagen extraída de De Los Santos (2011).

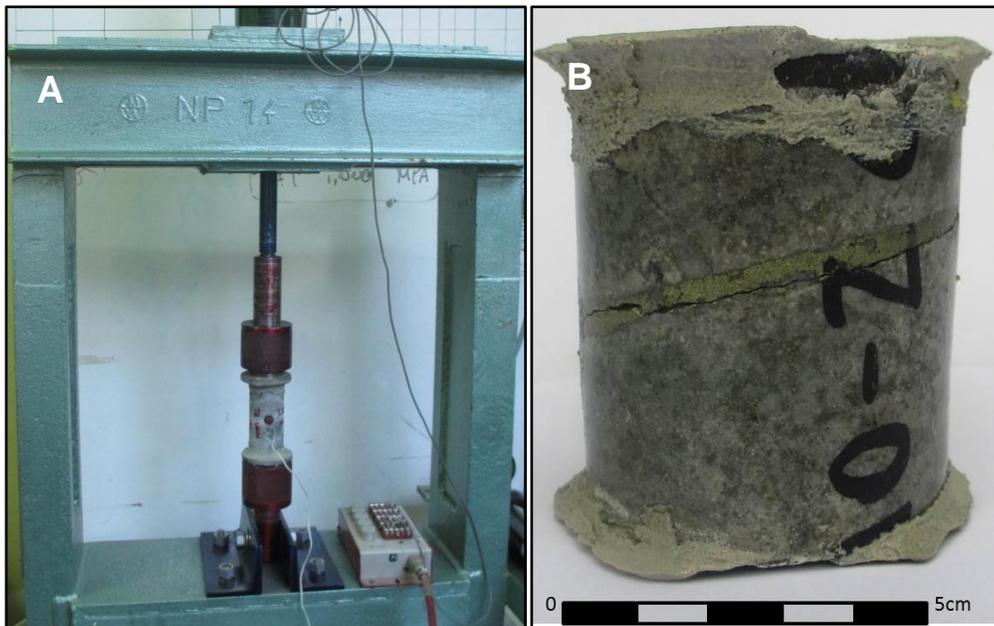


Figura 16. A) Máquina utilizada en los ensayos de tracción directa. B) Probeta de roca sometida a ensayo de tracción directa. En ella la vetilla se encuentra inclinada y en los extremos posee restos del pegamento especial utilizado para fijar la muestra a la máquina.

### 4.1.1 Resistencia a la tracción directa

La resistencia (R) a la tracción está dada por la carga máxima (F) soportada durante el ensayo dividido por el área (A) de la vetilla.

$$R = \frac{F}{A}$$

Lo ideal es que la vetilla se ubique de forma ortogonal al eje del cilindro, de modo que también sea ortogonal al stress de tracción aplicado. En este caso, el área (A) a considerar corresponde a la sección transversal del cilindro de roca. Sin embargo, en la práctica puede haber una inclinación (Figura 16B), la que va a influir en el cálculo de la resistencia al hacer variar tanto el área como la fuerza.

La Figura 17 muestra la forma de calcular el área de las vetillas inclinadas en un ángulo  $x$  utilizada en este trabajo, considerando que el área corresponde a una elipse de semieje menor igual al radio del cilindro. Esta área corresponde a una aproximación en la que no se considera la rugosidad de la vetilla y se asume que ésta se inclina en sólo una dirección.

Es necesario, también, calcular la fuerza de tracción sobre la vetilla, pues al existir una inclinación, la fuerza aplicada por la máquina se puede descomponer en una fuerza de corte y una de tracción, que es normal a la vetilla y dependen del ángulo.

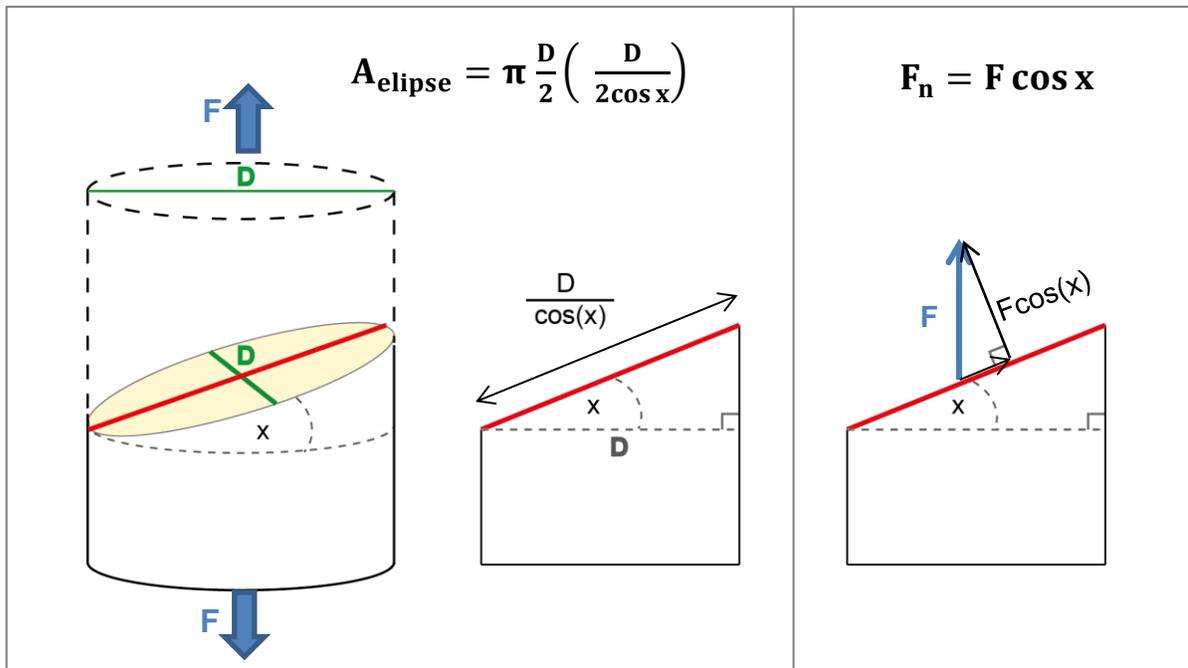
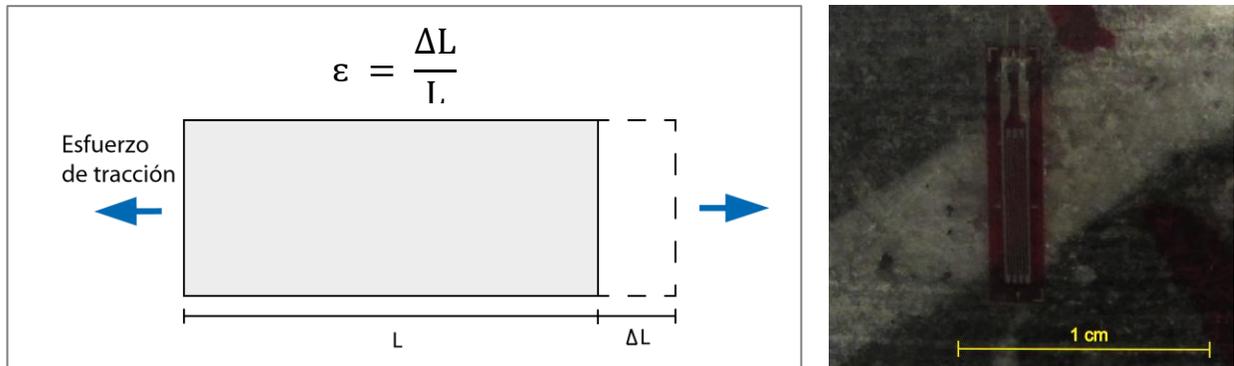


Figura 17. Forma de calcular el área y la fuerza normal aplicada sobre una vetilla inclinada en un ángulo  $x$ .

#### 4.1.2 Medición de deformación en el ensayo de tracción directa

La deformación o strain producida durante el ensayo puede ser medida mediante un strain gage, galga extensiométrica o extensómetro (Figura 18) que se adhiere a la vetilla a ensayar en la misma orientación del esfuerzo aplicado. Éste es un dispositivo utilizado para la medición electrónica de magnitudes mecánicas como la deformación.



**Figura 18.** Izquierda: medición y cálculo de strain. Derecha: strain gage adherido a una vetilla de cuarzo.

El strain ( $\epsilon$ ) queda definido como la razón entre la variación de longitud ( $\Delta L$ ) y la longitud inicial ( $L$ ), como se muestra en la Figura 18. El strain es positivo en el caso de tensión y es un valor adimensional y que, en la práctica, presenta una magnitud muy pequeña por lo que se puede expresar como microstrain ( $\mu\epsilon$ ), que es  $\epsilon \times 10^{-6}$ .

El uso de esta herramienta permite obtener una curva de stress vs strain.

#### 4.2 ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA

También conocido como ensayo brasileño. Consiste en medir la resistencia a la tracción de un disco de roca (como el que se muestra en la Figura 19), pero de forma indirecta, pues es sometido a compresión diametral de manera uniforme, la que provoca un esfuerzo de tracción en la dirección perpendicular al eje en que se ejerce la compresión, por lo que se produce rompimiento. El estado de esfuerzo biaxial al que se somete la muestra es el siguiente:

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

La vetilla a estudiar debe ubicarse de forma diametral al disco de roca, en la misma dirección de la aplicación de esfuerzo compresivo. Si la ruptura sucede por la vetilla, la resistencia a la tensión se obtiene usando la siguiente fórmula:

$$R = \frac{\pi P}{2dt}$$

Donde P corresponde a la carga que produce la ruptura, d diámetro del disco y t al espesor del disco.

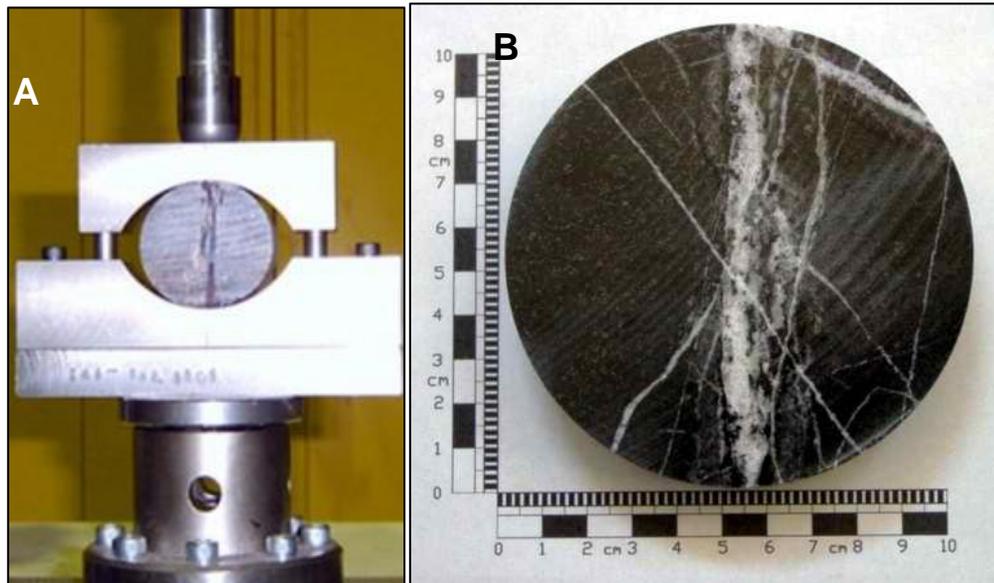


Figura 19. A) Máquina utilizada en el ensayo de tracción indirecta o brasileño. B) Disco de roca sometido a ensayo.

Este método se basa en el hecho experimental de que muchas rocas en un campo de stress biaxial fallan en tensión debido a un esfuerzo uniaxial extensivo cuando uno de los esfuerzos genera tensión y el otro compresión, cuya magnitud no excede tres veces al esfuerzo que genera tensión.

Se asume que el efecto de la compresión en puntos diametralmente opuestos de la muestra es equivalente al de aplicar tensión en la dirección perpendicular, sin embargo, la resistencia entregada por este tipo de ensayo es una aproximación, que puede perder precisión con las heterogeneidades de la muestra debido a la diferencia entre vetilla y roca intacta.

La Figura 20 corresponde a un esquema de un ensayo de tracción.

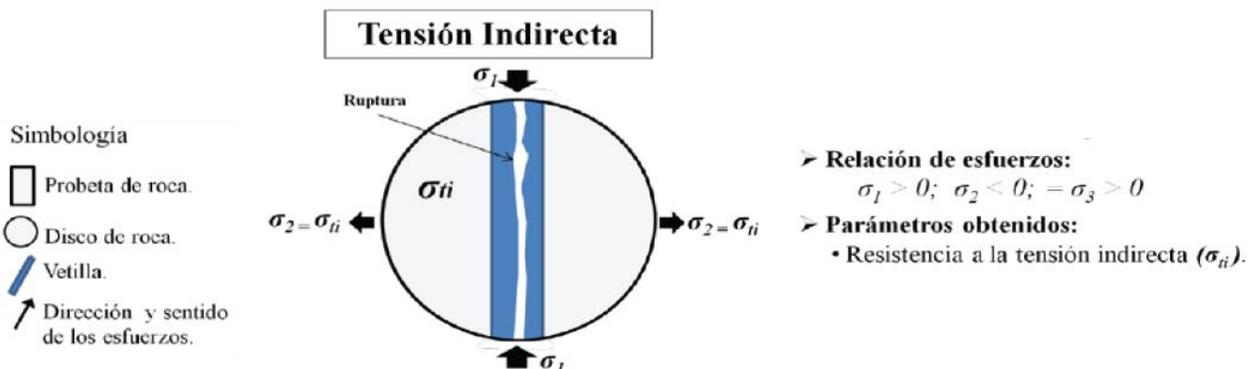


Figura 20. Figura esquemática de ensayo de tracción indirecta. Imagen extraída de De Los Santos (2011).

## 5. DESCRIPCIÓN DE POST- ENSAYO DE VETILLAS

La descripción de las muestras, luego de realizado el ensayo de tracción directa, tiene por objetivo capturar de forma detallada toda la información útil que se desprende de la vetilla y que permitirá luego relacionarla con la resistencia de la misma. En esta sección se consideraron las características recomendadas por la ISRM (Brown, 1981), como espesor y rugosidad, relleno mineralógico, y modo de falla.

La descripción se ha realizado llenando tablas como la que se expone en la Tabla 4, la cual muestra como ejemplo la caracterización de la muestra NNM-23. Cada parámetro se describe a continuación. Las descripciones realizadas se presentan en Anexos.

**Tabla 4.** Tabla de descripción de vetillas. En ella se consideran los aspectos de identificación de muestra, relleno mineralógico y geometría de la vetilla. Se toma como ejemplo la descripción de la muestra NNM-23.

Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>NNM-23</b>	HP	V12	CMET	50

Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	50	Silíceo-sericítico-clorítico. Cpy diseminada en el halo exterior
Anhidrita	30	
Cuarzo	15	
Clorita	5	
Observaciones		
Cúmulos de Cpy y anh y Qz. Cl diseminada. La vetilla principal corta una vetilla V5 de 1 mm de espesor y de ángulo de aprox. 70°.		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
20		16-18
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
1	2	1
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
4	8	6
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido e irregular		



## 5.1 IDENTIFICACIÓN DE VETILLA

**Id:** correspondiente al código de identificación de cada probeta.

**Litología:** corresponde a la litología de la roca caja en la que se emplaza la vetilla ensayada. En su mayoría corresponden a complejo máfico El Teniente CMET, pórfido diorítico PDIO y pórfido dacítico PDAC.

**Tipo:** en este ítem se ponen una de las siguientes opciones: TM, HP o HT que refiere a las categorías Tardimagmática, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardía y que corresponden al tipo genético de la vetilla dado por las características de esta en cada etapa hidrotermal. Para su registro primero se identifica la clase de vetilla y se obtiene la categoría correspondiente.

- TM: su formación se habría producido en un ambiente semi-dúctil, lo que se manifiesta en la forma sinuosa de la mayoría de la vetilla. La presencia de cuarzo, biotita, feldespato potásico y anhidrita en las vetillas y en sus halos de alteración, se asocia a la alteración potásica.
- HP: vetillas de bordes continuos y rectos, debido a su formación en roca frágil, que producen alteración fílica mediante sus halos de alteración de diferentes espesores, simples o complejos, los cuales obliteran la roca caja y les agregan cuarzo, sericita y clorítica. En estas vetillas predominan sulfuros como la calcopirita, pirita y la molibdenita, y pueden presentar cuarzo, sericita, clorita y anhidrita.
- HT: vetillas de mayor complejidad y variabilidad mineralógica, textura masiva, espesores irregulares, con halos desarrollados y difusos sericítico o cuarzo-sericítico. Presentan contenido de carbonatos, yeso, anhidrita y turmalina, con o sin sulfuros, entre ellos se puede tener tenantita y tetraedrita.

**S-Tip:** subtipo. Corresponde a 15 clases de vetilla definidas para la mina El Teniente, las que se definen mediante de la asociación mineral y sus proporciones características y se designan como V1, V2, V3,...V15 (notas interna SGL-1-050/03, 2003). Las características diagnósticas se presentan en la Tabla 2 y Tabla 3 del capítulo 3, Vetillas de El Teniente.

## 5.2 DESCRIPCIÓN MINERALOGÍA DEL RELLENO Y HALO

### 5.2.1 Relleno mineralógico

Los minerales más comunes en las vetillas de El Teniente corresponden a cuarzo, anhidrita, turmalina, clorita, biotita, calcopirita, pirita, bornita, molibdenita, carbonatos, yeso, magnetita u otros. En la tabla de descripción se debe identificar los minerales presentes en la muestra y determinar su proporción en porcentaje de volumen de cada uno de ellos.

## 5.2.2 Porcentaje de minerales duros

La dureza relativa de los minerales más comúnmente encontrados en las vetillas de El Teniente, según la escala de Mohs, se muestra en la Tabla 5. El porcentaje de minerales duros se define como la suma de los porcentajes en volumen de los minerales cuya dureza es mayor o igual a 4,5. Los minerales que cumplen esta condición son turmalina, cuarzo, pirita y magnetita.

**Tabla 5.** Tabla de durezas relativas según la escala de Mohs, obtenidas de webmineral.com

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

## 5.2.3 Presencia de halo

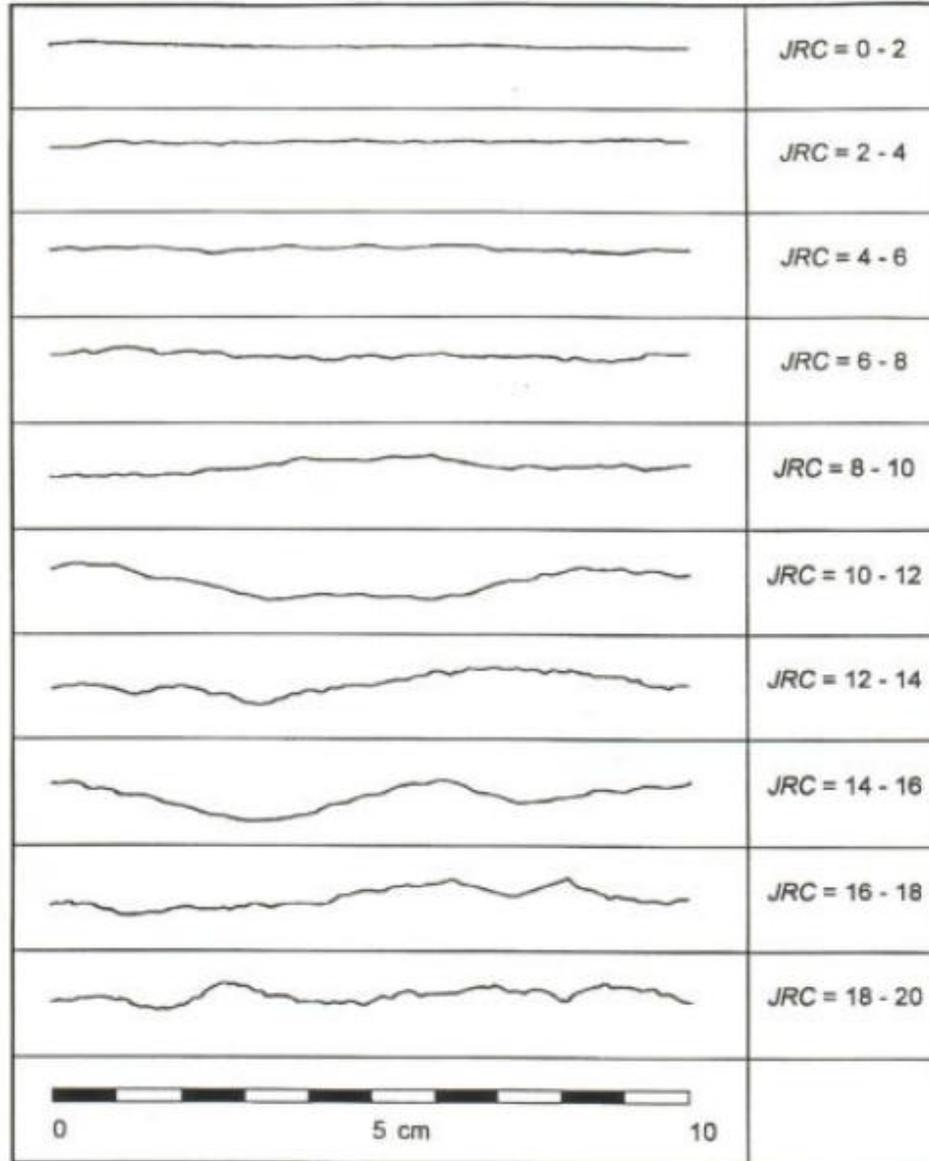
Correspondiente a los cambios mineralógicos producidos en la roca caja producto de la circulación de las soluciones hidrotermales que formaron la vetilla. Las vetillas pueden o no tener halo. Las que sí tienen pueden ser silíceos, sericíticos, cloríticos, biotíticos y presentar minerales diseminados, como pirita, calcopirita y otros. Según el número de halos desarrollados por una vetilla, se clasifican en simples o dobles.

En este campo se registra si hay o no halo de alteración entre la roca y la vetilla, en el caso de haber se indica la asociación mineral observada ordenadas según su abundancia.

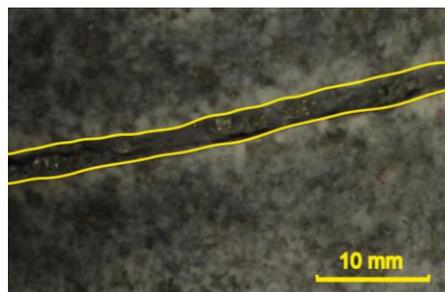
## 5.3 DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

### 5.3.1 Rugosidad

Para estimar la rugosidad de la vetilla se usa el índice JRC. Para ello se considera la forma de su traza pre-ensayo observada en la superficie de la probeta de roca, en los contactos vetilla/roca o vetilla/halo, como se muestra en la Figura 22. Luego, se determina el JRC por comparación visual con los perfiles de rugosidad de Barton y Choubey (1977) que sirve para estructuras cuya longitud es menor a 10 cm (Figura 21).



**Figura 21.** Diagramas para la obtención de rugosidad para discontinuidades de longitud menor a 10 cm (Barton y Choubey, 1977).



**Figura 22.** Forma de medir el JRC. Se observa en la forma de la traza de la vetilla pre-ensayo, principalmente en sus interfaces relleno/halo o relleno/roca, y se compara con los perfiles de Barton y Choubey (1977)

### 5.3.2 Espesor

La medida del espesor se realiza con una regla, de forma perpendicular a la vetilla, teniendo cuidado de estar midiendo el espesor real y no uno aparente (ver Figura 23). En este caso no habrá mayor dificultad puesto que cada vetilla se dispone de forma aproximadamente ortogonal al eje del sondaje. Es necesario juntar ambos trozos de la muestra ensayada. En muchas ocasiones se presentan vetillas poco regulares, por lo que se debe registrar el valor máximo, mínimo y típico.

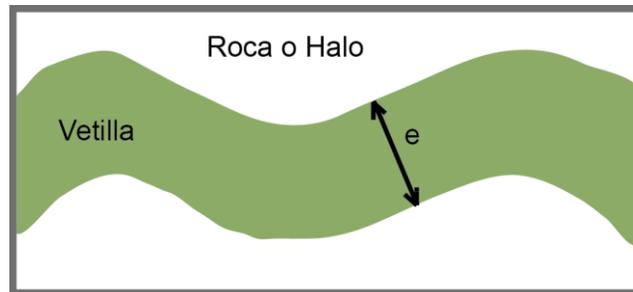


Figura 23. Determinación del espesor real de una vetilla.

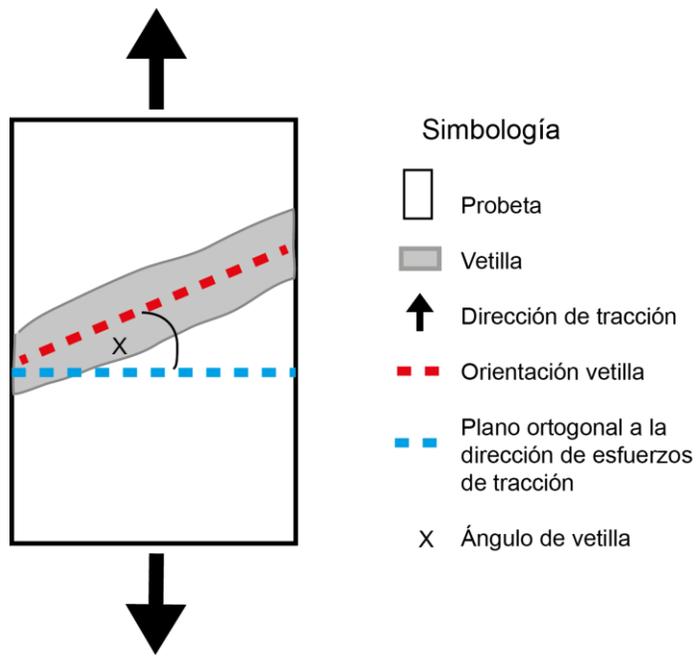
### 5.3.3 Espesor halo

De igual forma que en el relleno de la vetilla, se registra el valor del ancho del halo en caso de haberlo y en caso de que la probeta que contiene a la vetilla sea de largo suficiente para exponer el fin del halo.

### 5.3.4 Ángulo

Lo ideal es que las probetas de roca posean su vetilla orientada en forma ortogonal a la dirección de los esfuerzos de tracción, que para el ensayo de tracción directa coincide con el eje del sondaje. Pero no todos los casos cumplen con esta condición, es por esto que se debe registrar cuál es el ángulo para buscar posteriormente su influencia.

El ángulo a medir, es el que separa la traza de la vetilla con el plano ortogonal a la dirección del esfuerzo de tracción. En la Figura 24 corresponde al ángulo  $x$ . En el caso que la vetilla sea sinuosa se debe registrar el ángulo que mejor represente la posición de la vetilla.

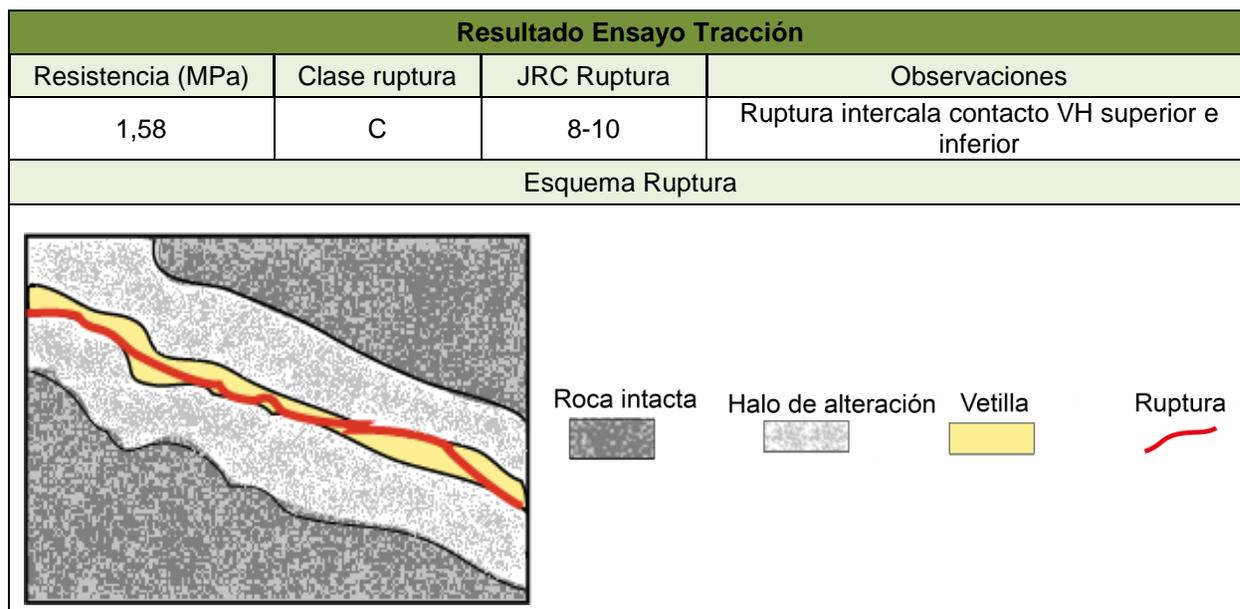


**Figura 24.** Esquema de medición del ángulo de vetilla considerado para este estudio.

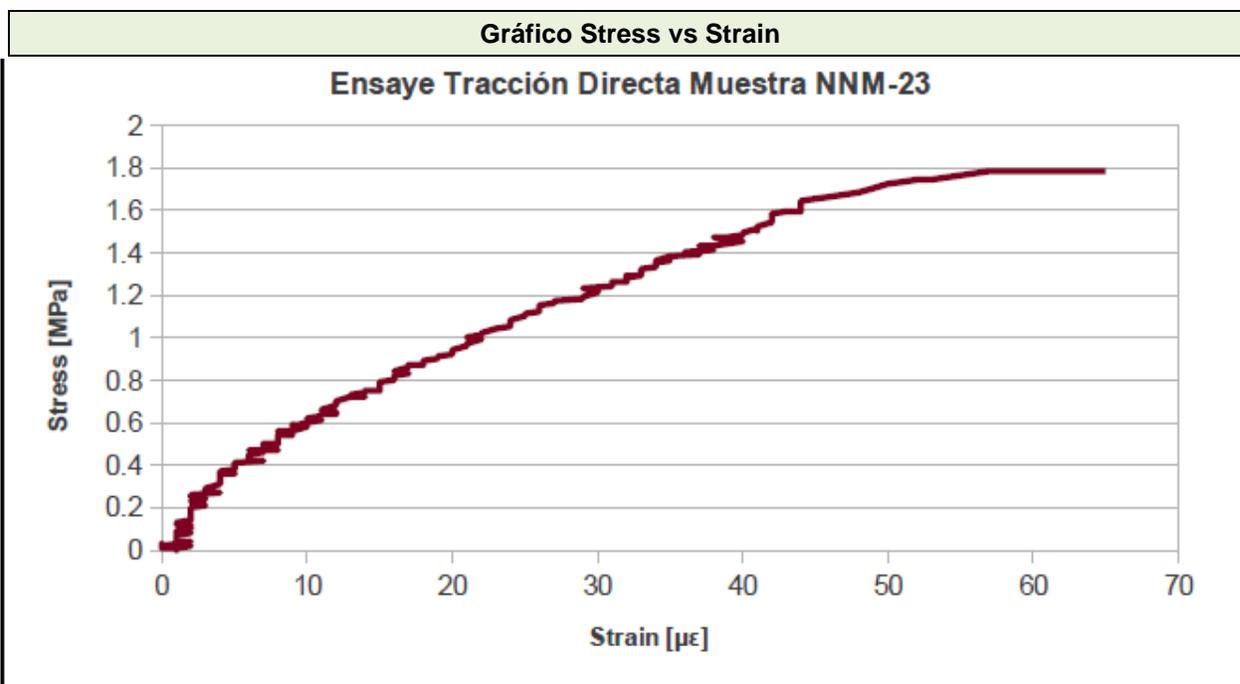
#### 5.4 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO

Los resultados del ensayo de tracción directa son registrados, al igual que la descripción mineralógica y geométrica de las vetillas, en una tabla como la que se muestra en el ejemplo de la muestra NNM-23 de la Tabla 6 y en ella se incluye la resistencia a la tracción directa, la clase de ruptura y los parámetros de deformación.

**Tabla 6.** Pauta de descripción del resultado del ensayo, en ella se incluyen los parámetros de resistencia a la tracción directa, las características de la ruptura y parámetros que describen la deformación presentada durante el ensayo. En este caso se muestra como ejemplo la descripción de la muestra NNM-23.



Deformación							
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	64,5	Módulo de elasticidad (GPa)	120	Stress Punto de Fluencia (Mpa)	0,3	Módulo secante (GPa)	49,6



Los parámetros que se han registrado en cada muestra son los siguientes:

### 5.4.1 Modo de ruptura

En base a la clasificación propuesta por Marambio y otros (1999), mostrada en la Tabla 7, se ha realizado una caracterización para la forma de romper que exhiben las muestras durante el ensayo de tracción directa. Su clasificación consiste en tipos y clases de ruptura según su ubicación relativa al relleno y halo de la vetilla.

Los tipos de ruptura son:

**Tipo A:** ruptura por roca. La ruptura define una o más superficies irregulares, las que atraviesan roca y vetillas de forma arbitraria, sin encausarse a través de vetillas. Lo que produce que la probeta se fracture en varios segmentos.

**Tipo B:** ruptura mixta. Se subdivide en los tipos B1 y B2.

- **B1:** superficie mixta única. La ruptura se desarrolla a través de roca y parcialmente por vetillas, pero generando solo una sola superficie.
- **B2:** ruptura se propaga por roca y vetillas, generando varias superficies que fractura la probeta en fragmentos.

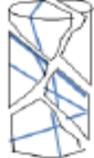
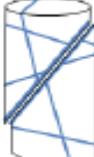
**Tipo C:** ruptura por varias vetillas. Ruptura genera varios trozos de roca definidos por superficies de varias vetillas.

**Tipo D:** ruptura por una sola vetilla. Se subdivide en D1 y D2.

- **D1:** ruptura por superficie única, correspondiente a la vetilla.
- **D2:** superficie múltiple. La ruptura principal se desarrolla por la vetilla, y presenta ramificaciones hacia un solo lado de esta.

**Tipo E:** rupturas anómalas. Producidas por ensayos defectuosos, probeta mal preparada.

**Tabla 7.** Clasificación de tipos de ruptura de Marambio y otros (1999)

Tipo	Descripción	Esquema
<b>A</b>	Ruptura por roca	
<b>B1</b>	Ruptura Mixta: superficie única	
<b>B2</b>	Ruptura Mixta: superficie múltiple	
<b>C</b>	Ruptura por vetillas	
<b>D1</b>	Ruptura por una vetilla: superficie única	
<b>D2</b>	Ruptura por una vetilla: superficie múltiple	
<b>E</b>	Rupturas anómalas	-
<p>Simbología  Probeta de roca  Vetillas</p>		

De estos tipos de rupturas, aquella por una vetilla única (D) se subdivide en las siguientes clases, las cuales son esquematizadas en la Tabla 8:

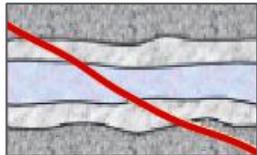
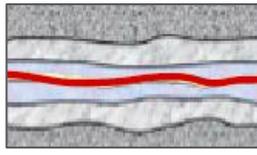
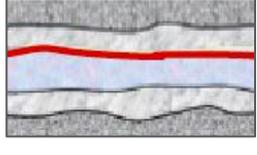
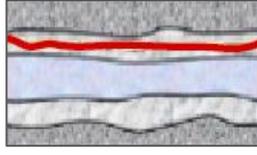
**Clase V:** ruptura por el interior del relleno de la vetilla.

**Clase C:** la superficie de ruptura se desarrolla por el contacto vetilla/halo.

**Clase H:** ruptura ocurre por el halo de alteración producido sobre la roca caja por la interacción con fluidos hidrotermales.

La ruptura de tipo A presenta la **clase R**: ruptura a través de roca, aquella que en su trazado no ha habido influencia de vetilla.

**Tabla 8.** Subtipos de ruptura para los tipos A y D, basados en la clasificación de Brzovic y Villaescusa (2007).

Tipo	Clase	Descripción	Esquema
A	R	Ruptura por roca	
D	V	Ruptura por relleno de vetilla	
	C	Ruptura por contacto vetilla/halo	
	H	Ruptura a través de halo	
<p>Simbología</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  Roca         </div> <div style="text-align: center;">  Vetilla         </div> <div style="text-align: center;">  Halo         </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 5px;">  Ruptura         </div>			

Para efectos del presente estudio se utiliza una simplificación de esta clasificación, en que se identifica la ruptura que fue a través de la roca intacta como **R**, la ruptura por el halo de alteración, como **H**; la ruptura a través del relleno mineralógico, como ruptura **V**. La situación en que la ruptura ocurre por el contacto de la vetilla/halo, al igual que el contacto vetilla/roca (para vetillas sin halo) se designa como ruptura **C**. Finalmente la ruptura tipo B, C y D múltiples son designadas en este trabajo como ruptura **M** (de mixta).

## 5.4.2 Resistencia

El valor del esfuerzo aplicado al cual la muestra se rompe corresponde a la resistencia a la tracción de cada vetilla siempre y cuando la ruptura se haya realizado a través del relleno de esta, o en el contacto vetilla/halo o vetilla/roca. Este valor es calculado ocupando la expresión ya mencionada en el capítulo 4, en la sección de ensayo de tracción directa:

$$R = \frac{F_n}{A} = \frac{F (\cos x)^2}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

Donde R es la resistencia a la tracción directa, F corresponde a la fuerza aplicada, D es el diámetro del cilindro de roca ensayado y x es el ángulo de la vetilla.

Es posible que durante el ensayo sea el pegamento especial que une la muestra a la máquina el que se fracture, en tal caso el ensayo no es válido y no es considerado (caso ruptura anómala o tipo E)

## 5.4.3 Deformación

La deformación queda registrada mediante el uso de strain gages los que finalmente permiten la obtención de una curva de stress vs strain como la que se muestra en la Figura 25. En la interpretación de la curva es posible identificar dos regiones:

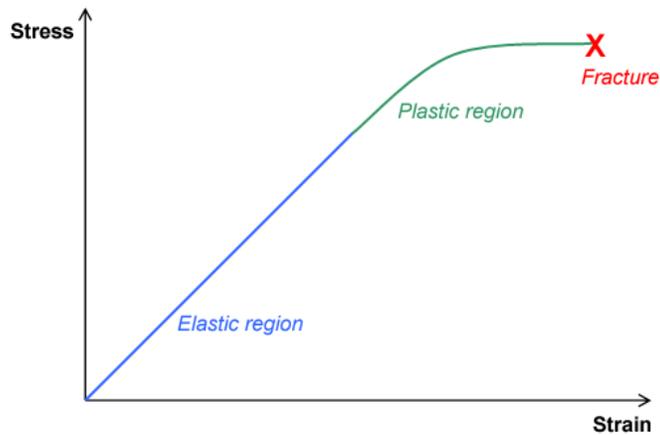
- **Zona elástica:** La región a bajas deformaciones, al principio de la curva, donde se cumple la Ley de Hooke.

$$\sigma = E\varepsilon$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo de tracción aplicado,  $\varepsilon$  el strain o deformación y E, la constante de proporcionalidad, corresponde a el módulo de elasticidad o de Young. La pendiente de este segmento lineal corresponde al módulo de elasticidad E. Este módulo puede ser interpretado como la rigidez o la resistencia de un material a ser deformado elásticamente.

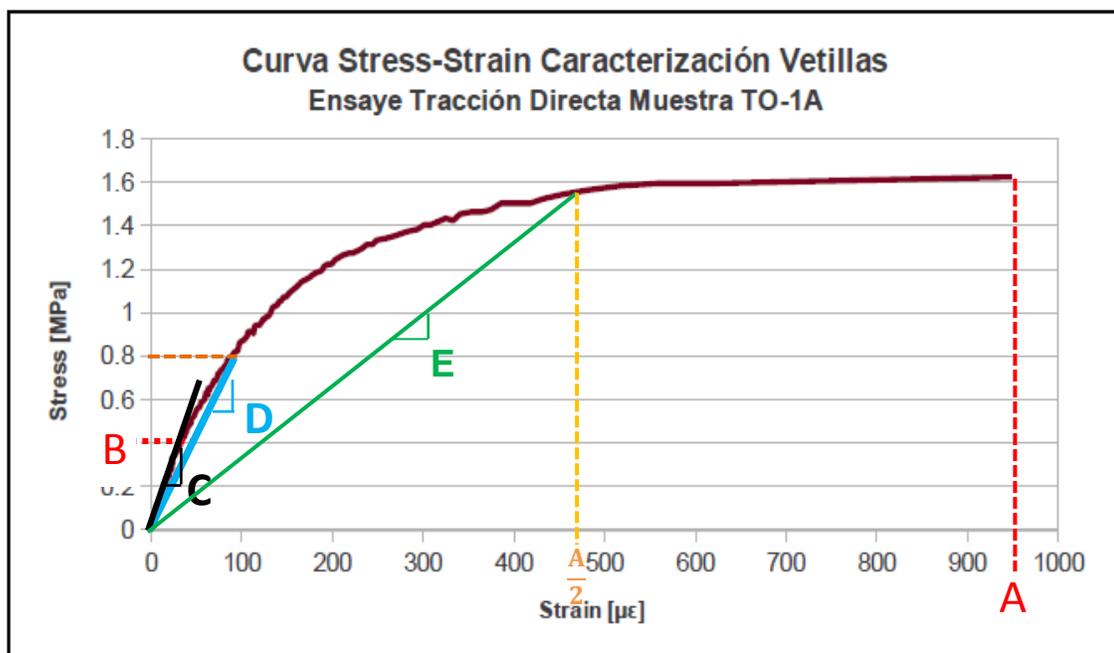
Un material que se comporta de manera elástica pierde las deformaciones causadas por la aplicación de una fuerza cuando cesa la acción de la fuerza, es decir, vuelve a su forma original.

- **Zona plástica:** luego de que se pierde el comportamiento lineal, se pasa de deformación elástica a plástica. La tensión necesaria para continuar la deformación en los metales aumenta hasta un máximo, la resistencia a tracción, la máxima tensión que puede ser soportada por una estructura a tracción; si esta tensión es mantenida, se producirá la ruptura. En esta zona la deformación es permanente.



**Figura 25.** Zona de deformación elástica y plástica en gráfico de stress vs strain.

Para poder describir y cuantificar la información que esta curva posee de modo de poder comparar la deformación de las distintas vetillas en cada uno de sus ensayos, se ha utilizado los siguientes valores: la deformación final (la deformación alcanzada al momento de la ruptura. Punto A en la Figura 26), el stress en el límite del comportamiento elástico o punto de fluencia (Punto B de la Figura 26), el módulo de elasticidad o la pendiente de la parte recta inicial de la curva de stress vs strain (Punto C), el módulo secante o la pendiente de la recta secante que une el origen con el punto de la curva en que se ha alcanzado el 50% del stress total aplicado (Punto D) y, finalmente, el módulo de deformación al 50% correspondiente a la pendiente de la recta secante en el punto de la mitad de deformación total. Estos parámetros son indicados en la Figura 26.



**Figura 26.** Parámetros a registrar en la curva de stress vs strain. A corresponde al stress en el límite del comportamiento elástico. B es el strain total. C es el módulo de elasticidad o pendiente de la recta al inicio de la curva de deformación. D es la pendiente de la secante que une el origen con la curva en el 50% de la deformación.

### 5.4.3.1 Normalización del strain según el espesor de cada vetilla

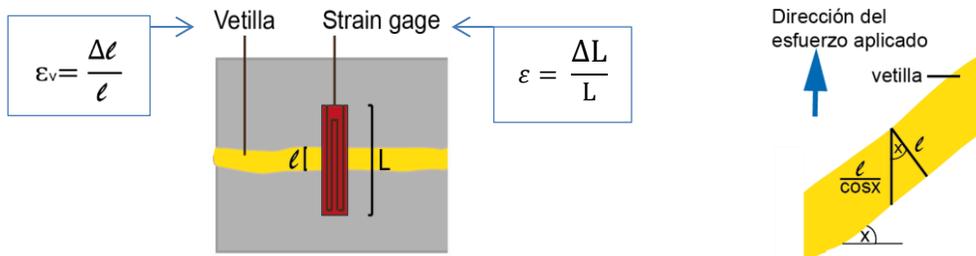
La deformación entregada por el strain gage corresponde, por definición, a la razón entre la variación de longitud y la longitud total ( $\varepsilon = \Delta L/L$ , Figura 27).

Los valores de strain reportados por IDIEM corresponden a la deformación experimentada a lo largo de la totalidad del strain gage de cada vetilla ensayada (de longitud  $L$ , como muestra la Figura 27), no solo la que ocurre por la vetilla, que es la que interesa en el análisis. Considerando que las vetillas ensayadas presentan diferentes espesores, mientras que el strain gage tiene un largo constante ( $L = 10$  mm) en todas las muestras, es necesario realizar una normalización del valor de la deformación de la vetilla según su espesor.

La expresión para el cálculo del strain de la vetilla, cuyo espesor inicial es  $\ell$ , es:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta \ell}{\ell}$$

Además, para cada ensayo, el strain gage es adherido en la vetilla en la misma dirección en la que se aplicará el esfuerzo de tracción, siendo este el eje en el cual se mide la deformación. Es decir, la fórmula presentada anteriormente es válida para vetillas ortogonales al eje del cilindro de roca. Para vetillas inclinadas se debe calcular el espesor de la misma en la dirección del esfuerzo de tracción, como muestra la Figura 27, a la izquierda, donde no se usa necesariamente el espesor real.



**Figura 27.** A la izquierda: esquema que diferencia entre el strain del strain gage y el de la vetilla. A la derecha: espesor utilizado para el cálculo del strain en vetillas inclinadas.

La variación de longitud registrada por el strain gage corresponde a la combinación de la deformación de la vetilla y de la zona de la roca o halo cubierto por el dispositivo. Como primera aproximación se puede suponer que la roca es mucho más rígida por lo que su longitud variará de forma despreciable en comparación con la vetilla, con lo que  $\Delta L \approx \Delta \ell$ . Con esto, el strain de la vetilla puede expresarse como:

$$\varepsilon_v = \varepsilon \frac{L}{\ell} \cos x$$

Los valores de módulo de elasticidad, módulo secante al 50% de stress y 50% deformación obtenidos de los gráficos de stress/strain entregado por IDIEM pueden ser convertidos al valor correspondiente a la vetilla mediante la división por la constante  $\frac{L}{\ell} \cos x$  de cada vetilla.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción directa y la posterior descripción de las muestras se presentan por medio de gráficos de dispersión y de columnas. En primer lugar se muestran las características obtenidas de forma individual (subtipo de vetillas estudiadas, porcentaje de minerales duros, presencia de halo, espesor de las vetillas, rugosidad, ángulo con respecto a la ortogonal al eje del sondaje, resistencia a la tracción directa y clase de ruptura) para obtener una visualización general de los resultados. Luego se presentan los diagramas correspondientes a la relación entre resistencia a la tracción y clase de ruptura versus parámetros mineralógicos y geométricos, de forma general y manteniendo fijos otros parámetros. Y finalmente se presentan los gráficos de deformación.

### 6.1 RESULTADOS INDIVIDUALES

**Subtipo de vetillas:** la mayoría de las vetillas descritas tienen relleno de sulfuros, principalmente pirita y calcopirita, y corresponden a los subtipos V7, V10, V11 y V12. Por otro lado, sólo se tiene una muestra de vetilla de cuarzo, clasificada como V5.

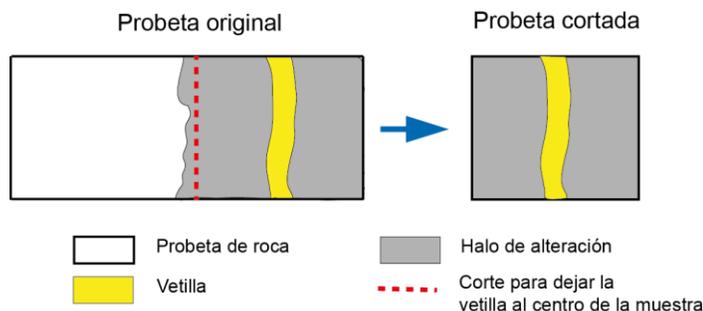
El subtipo de vetillas que más se repite es V10, correspondiente a predominancia de pirita o calcopirita, con halo sericítico-clorítico. Su abundancia permite realizar un análisis más detallado en conjunto a las vetillas V11 y V12, que poseen características similares en su relleno mineralógico y difieren en las características del halo (Ver Figura 29)

**Porcentaje de minerales duros:** se considera como mineral duro a aquel con dureza mayor a 4,5 en la escala de Mohs. Los minerales con esta característica encontrados en la descripción de muestras fueron cuarzo y pirita.

Se tiene dos grupos de datos, como se observa en la Figura 29, aquellos de 0-30% (vetillas en las que predomina calcopirita) y de 80-100% de minerales duros (predominancia de pirita o cuarzo).

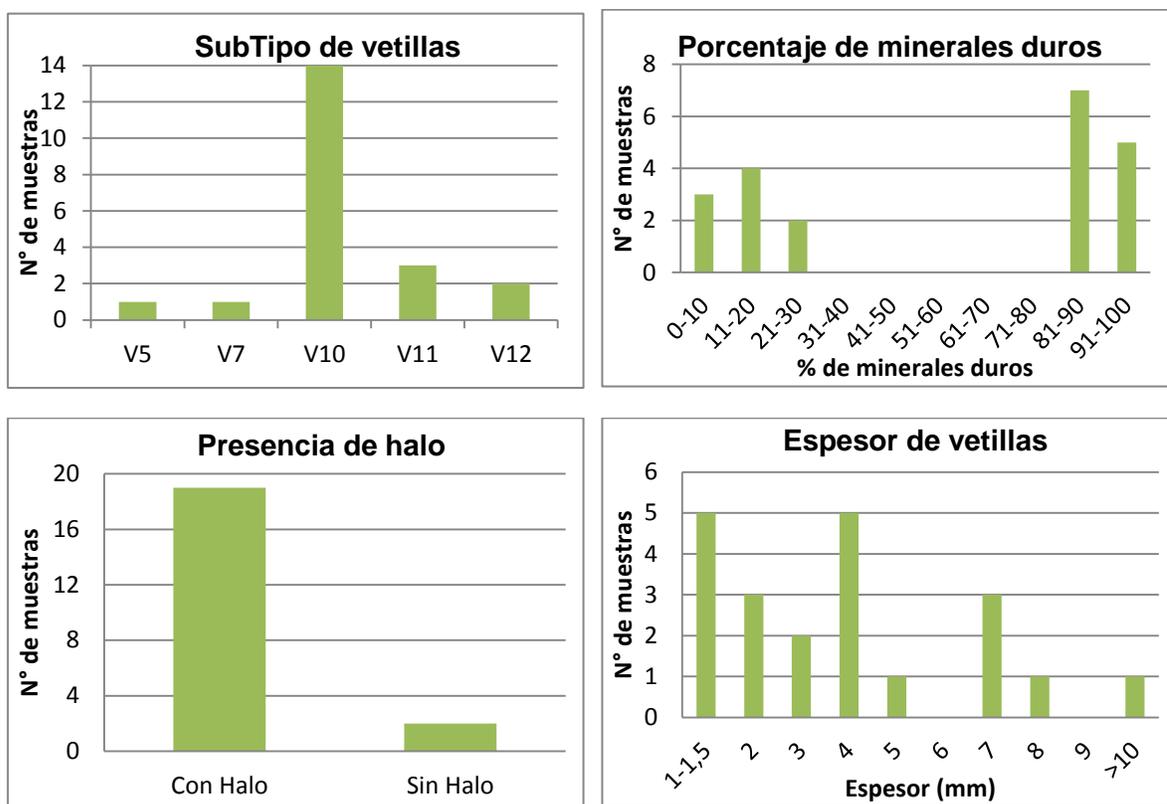
**Presencia de halo:** el halo es una característica presente en casi todas las vetillas estudiadas, como lo muestra la Figura 29. Solo dos vetillas, las de tipo V5 y V7, no lo poseen. Sin embargo, este parámetro no es estudiado en este trabajo, puesto que no se cuenta en todos los casos con su espesor.

La causa de que no se cuente con la totalidad del halo en algunas muestras es que la probeta inicial debe ser cortada para que la vetilla a estudiar quede al medio del cilindro de roca, para la correcta realización del ensayo, y si el halo es muy ancho o la vetilla está ubicada en la orilla de la probeta, parte del halo se pierde (esta situación es esquematizada en la Figura 28).



**Figura 28.** Esquema del corte que se realiza en algunas muestras para que el cilindro de roca que será ensayado contenga la vetilla en estudio en su centro.

**Espesor de vetillas:** la Figura 29 muestra un histograma con los espesores típicos de las vetillas en estudio. Estos van desde 1 mm hasta 13 mm y son mayormente menores a 5 mm.



**Figura 29.** Resultados de la distribución de sub tipo de vetillas, porcentaje de minerales duros, presencia o ausencia de halo y espesor de vetillas.

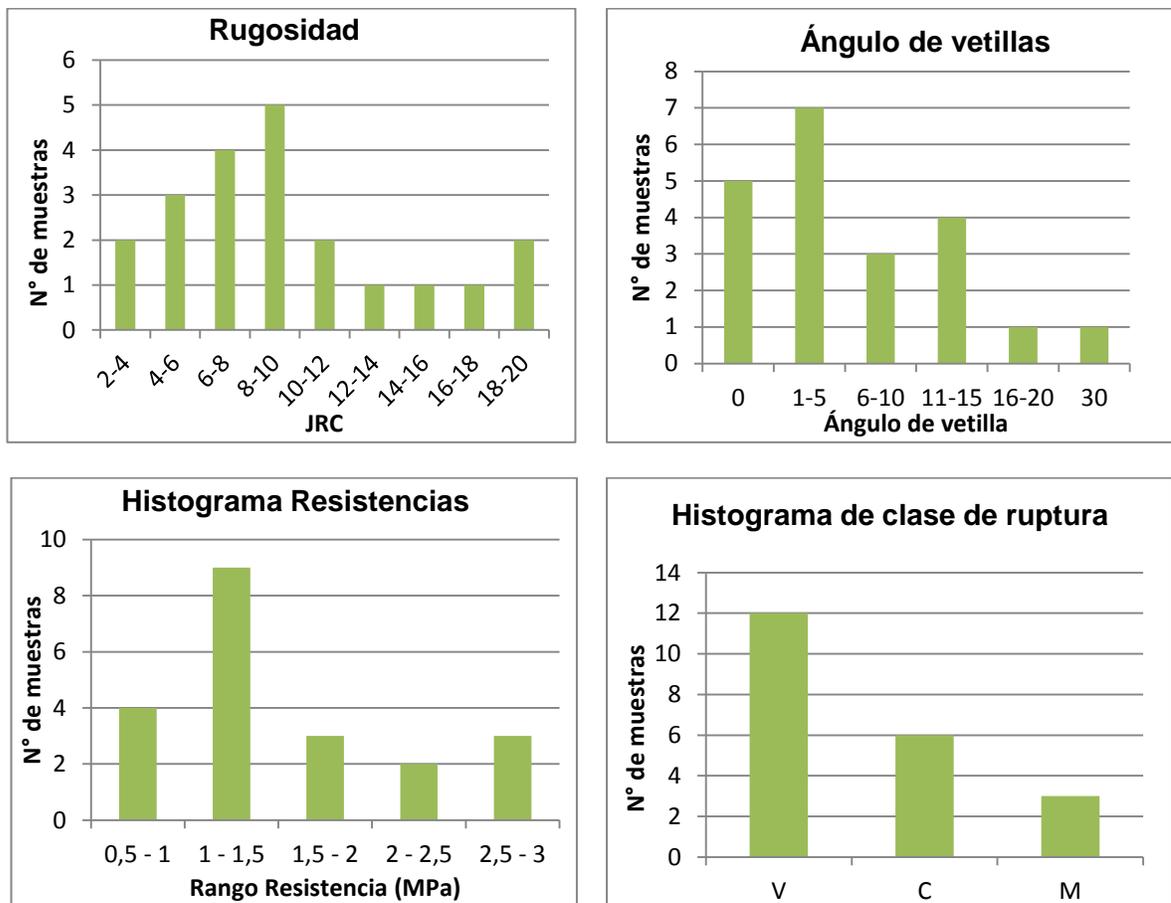
**Rugosidad:** Con respecto a la rugosidad, representada por el JRC, en la Figura 30 se observa que las muestras cubren todos los rangos de JRC y los que más se repiten son los valores 6-8 y 8-10.

**Ángulo de vetilla:** Idealmente, las vetillas sometidas a ensayo de tracción directa deben ser ortogonales al esfuerzo de tracción aplicado, o sea ortogonales al eje del sondaje. Sin embargo, en la práctica no es así. En la Figura 30 se tiene un histograma con los ángulos medidos desde el plano ortogonal al eje del sondaje. Los valores varían en-

tre 0 y 30°. Sólo 2 de las muestras presentan un ángulo mayor a 20° y el resto es menor o igual a 15°.

**Resistencia:** Los valores obtenidos son bajos, van desde 0,5 MPa a 2,6 MPa. Las muestras NNM-66D, TO-2B, NNM-73B, TO-1A(2), DIO-2C presentan una resistencia mayor a 2 MPa, más alta que las demás y sobresalen en graficar todos los resultados juntos (Ver Figura 31). Como se muestra en la Figura 30 la mayoría de las vetillas presenta resistencia menor a 1,5 MPa.

**Clase de ruptura:** En la Figura 30 se puede observar que la forma más común de ruptura para las muestras ensayadas es a través del relleno de la vetilla (V). Le sigue en importancia el contacto vetilla/halo (C). La ruptura mixta ocurre en tres muestras, esta combina ruptura por la vetilla y por roca u otras vetillas. Hay un ensayo que no es incluido en el análisis puesto que presenta una ruptura anómala en la que el pegamento fue el que cedió primero.



**Figura 30.** Diagramas de resultados de rugosidad, ángulo de vetillas, resistencias y clase de ruptura obtenido en las muestras ensayadas. Las clases de ruptura son: a través de relleno (V), a través de contacto vetilla/halo (C) y ruptura mixta (M).

## 6.2 ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE PARÁMETROS MINERALÓGICOS

### 6.2.1 Subtipo de vetillas

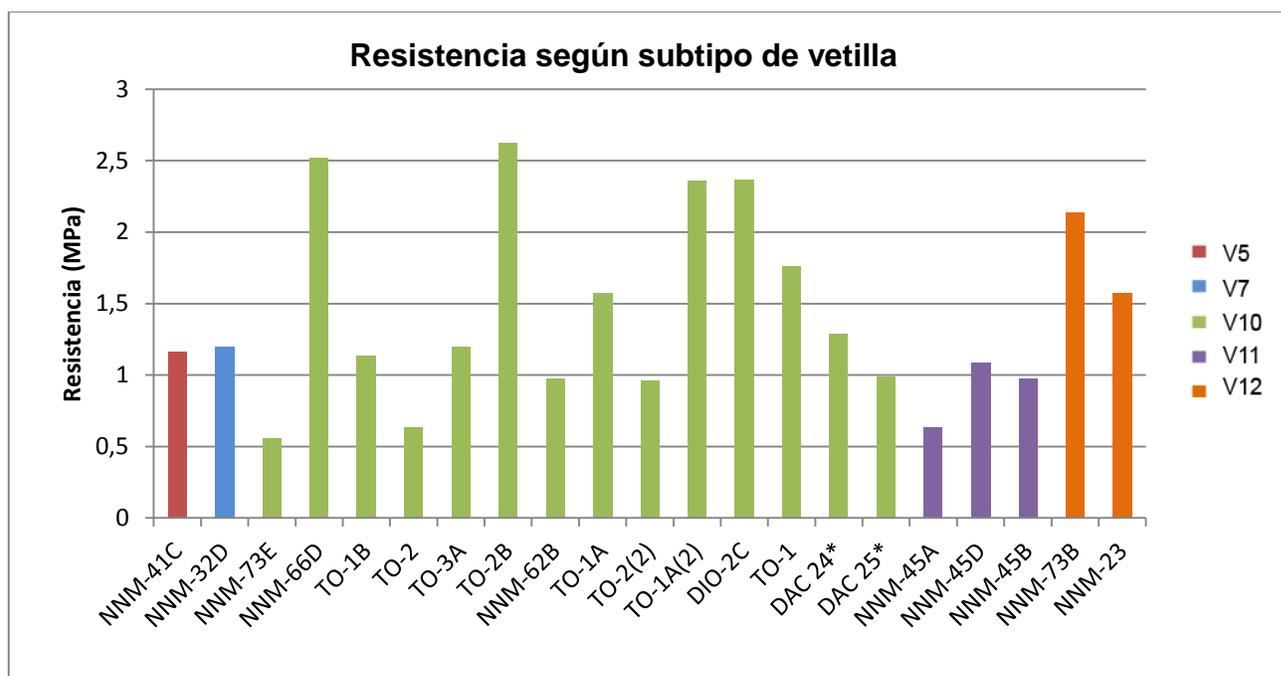
#### 6.2.1.1 Resistencia según subtipo de vetilla

Sólo una vetilla calcopirita-bornita sin halo (V7) fue ensayada, con una resistencia a la tracción directa de 1,2 MPa, y una de cuarzo (de tipo V5) la que presentó un resultado no válido para el análisis del presente trabajo, pues cedió primero el pegamento que fija la muestra a la máquina de tracción.

Las resistencias de las 14 muestras tipo V10 ensayadas varían desde los 0,6 MPa hasta los 2,6 MPa.

El subtipo de vetillas V11, tuvo 4 muestras representantes, sus resistencias a la tracción se acotan entre 0,8 MPa y 1,2 MPa. A su vez, las vetillas tipo V12 ensayadas fueron solo 2 y sus resistencias son 1,8 y 2,2 MPa.

En la Figura 31 se tiene un gráfico que presenta las resistencias de todas las muestras agrupadas según sus respectivos subtipos de vetilla. Las vetillas V11 tienen resistencias bajas (inferiores a 1,2 MPa) y las vetillas V12 presentan resistencia a la tracción mayor a las anteriores (superior a 1,7 MPa). Las vetillas V10, cuyo relleno consiste en pirita y/o calcopirita predominante (al igual que las vetillas V11 y V12), presentan resistencias que varían dentro del rango 0,5-2,6 MPa. En base a esto, se tiene que el sub tipo de vetilla no es determinante en la resistencia a la tracción.



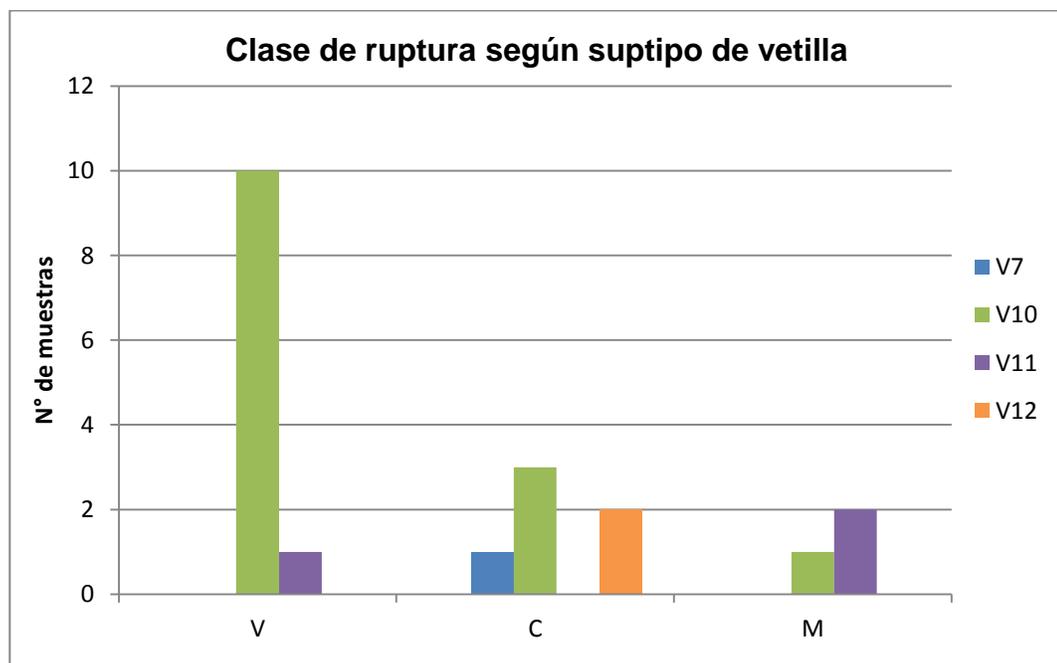
**Figura 31.** Resistencias a la tracción obtenidas en los ensayos en vetillas, se diferencian los subtipos de vetillas por color. \* Corresponde a vetillas cuyo ensayo fue realizado en el instituto SP de Suecia.

### 6.2.1.2 Clase de ruptura según subtipo de vetilla

La Figura 32 resume la clase de ruptura de las muestras dependiendo del subtipo. En ésta se observa en azul, que la vetilla de la muestra NNM-32D, de tipo V7 (predominancia de calcopirita-bornita), presentó una ruptura por el contacto vetilla/roca.

Las vetillas de tipo V10 son representadas en verde. Estas vetillas han roto predominantemente a través del relleno de la vetilla (ruptura clase V). Sólo 3 de ellas rompieron a través del contacto vetilla/halo y una rompió de forma mixta.

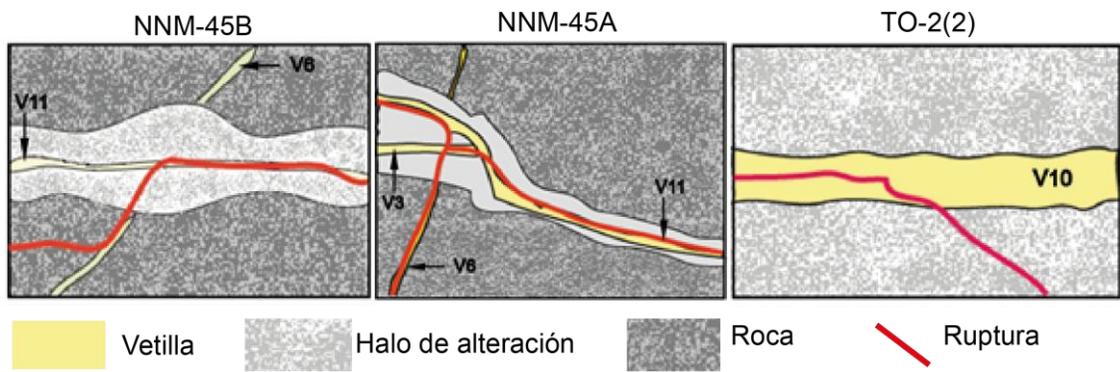
De las tres vetillas de clase V11 (morado), 1 presentó ruptura por el relleno (clase V) y las otras dos, ambas de calcopirita, presentan ruptura mixta. Las vetillas V12 presentaron una ruptura de clase C, es decir, a través del contacto vetilla/halo.



**Figura 32.** Histograma de clase de ruptura obtenida para cada subtipo de vetillas. V: por vetilla, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetilla y roca).

La Figura 33 presenta los esquemas de las muestras que tuvieron ruptura mixta. Entre ellas se tiene la muestra TO-2(2), correspondiente a una vetilla V10 con predominancia de pirita, donde la ruptura ocurrió principalmente por el halo silíceo sericítico con un ángulo de 35° y en menor medida rompió por el medio de la vetilla (V).

Las otras dos muestras corresponden a vetillas V11 de calcopirita. En la muestra NNM-45B, la ruptura ocurrió por la vetilla principal y por una vetilla V6 (anhidrita sin halo) de espesor menor a 1 mm y en menor medida por una superficie de roca con abundante calcopirita diseminada. Mientras que en la muestra NNM-45A, ocurre por el contacto vetilla/halo de la vetilla principal (1 mm) y por otras vetillas de menos de 1 mm de espesor de tipo V6 (anhidrita sin halo) y V3 (relleno de cuarzo-biotita-clorita).

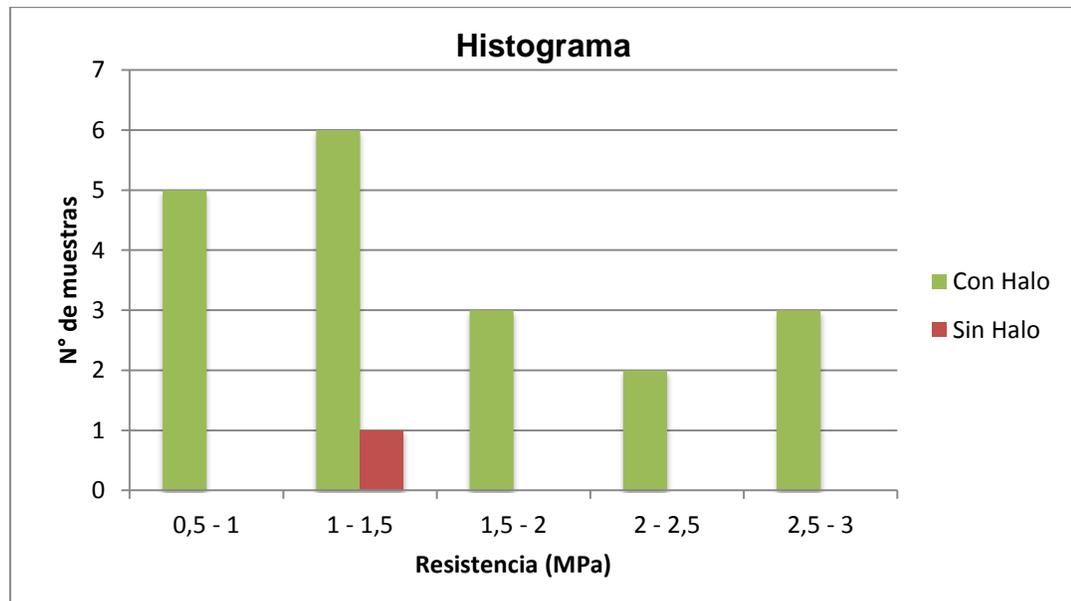


**Figura 33.** Esquemas de las muestras cuya ruptura resultó ser una combinación de superficies compuestas por distintas vetillas o roca de caja. Vetillas V10 y V11 corresponden a predominancia de pirita o calcopirita con halo sericitico-clorítico. Vetillas V6 tiene relleno de anhidrita sin halo.

## 6.2.2 Presencia de halo

### 6.2.2.1 Resistencia según presencia o ausencia de halo

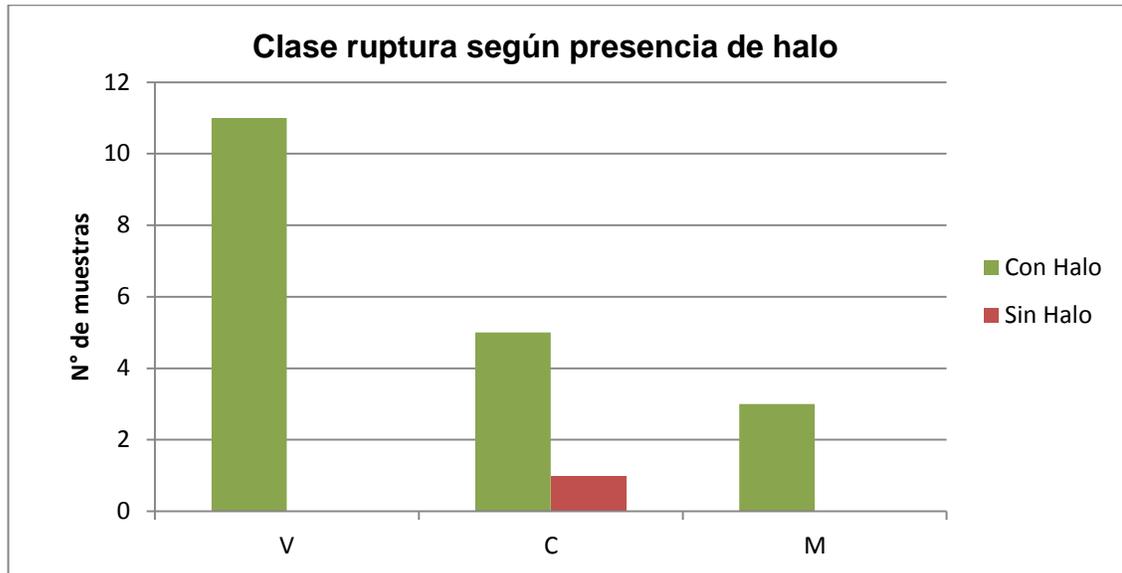
La mayoría de las vetillas estudiadas presentan halo y como se observa en la Figura 34, no se puede hacer gran comparación con la situación sin halo, dado que son solo dos muestras y una de ellas presentó una ruptura anómala (por lo que no se considera para este estudio).



**Figura 34.** Histograma de resistencias a la tracción obtenida en muestras de vetillas con y sin halo.

### 6.2.2.2 Clase de ruptura según presencia o ausencia de halo

La Figura 35 presenta el histograma de las clases de ruptura para vetillas con y sin halo. En el caso de vetillas con halo, predomina la ruptura clase V, le sigue la ruptura clase C y luego la mixta. La vetilla sin halo, con resultado válido, rompió por contacto vetilla/roca (C).



**Figura 35.** Histograma de clase de ruptura para muestras de vetilla con halo. V: ruptura por vetilla, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetillas y roca).

### 6.2.3 Porcentaje de minerales duros

#### 6.2.3.1 Resistencia versus porcentaje de minerales duros para vetillas de Py, Cpy o Cpy-Bo

El gráfico de resistencia a la tracción versus porcentaje de minerales duros (Figura 36) muestra dos familias de datos, una de porcentaje menor a 30% de minerales duros y otra de sobre 80% de minerales duros.

Al mirar las dos familias por separado no se encuentra ningún patrón. Para un mismo porcentaje, la resistencia toma varios valores dentro del rango 0,5-2,5 MPa.

Lo anteriormente mencionado es expresado en la Figura 37, donde se ha separado el porcentaje de minerales duros en rangos y graficado las resistencias obtenidas. Sólo en el rango de 0-10% minerales duros se tiene un valor acotado entre 1,1 MPa y 1,3 MPa, sin embargo en los demás rangos se encuentran grandes variaciones. Lo que indica que el porcentaje de minerales duros no controla por si solo a la resistencia.

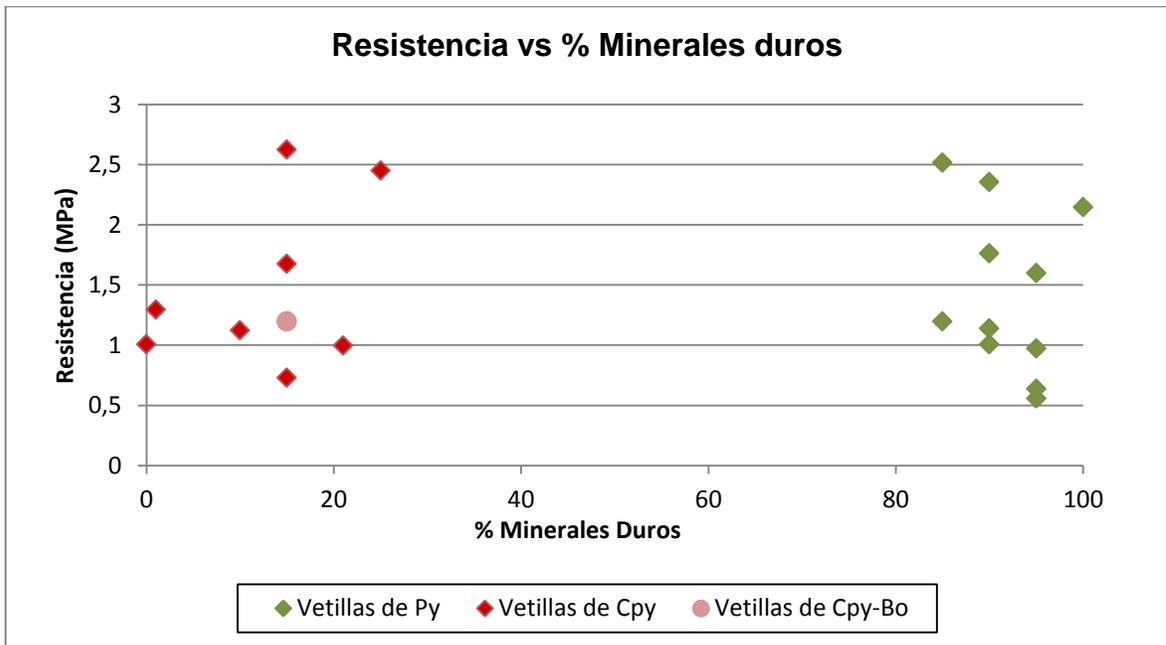


Figura 36. Resistencia a la tracción vs % de minerales duros diferenciando entre vetillas de pirita y calcopirita.

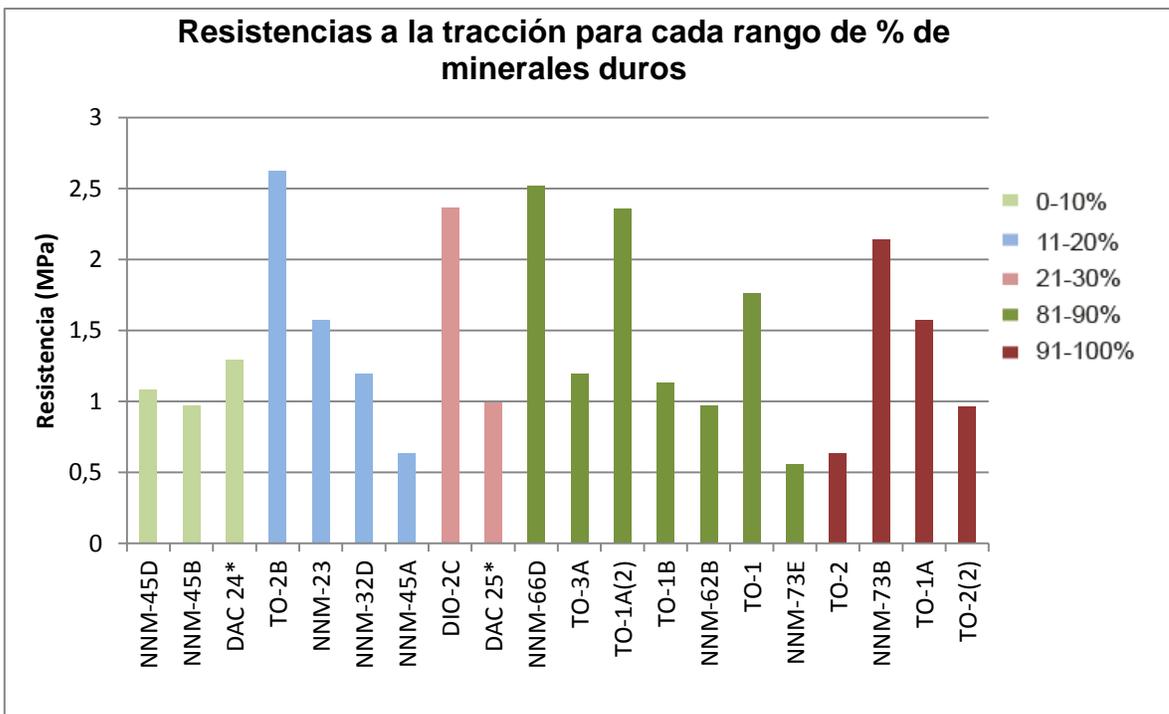


Figura 37. Resistencias agrupadas por rango de porcentaje de minerales duros.

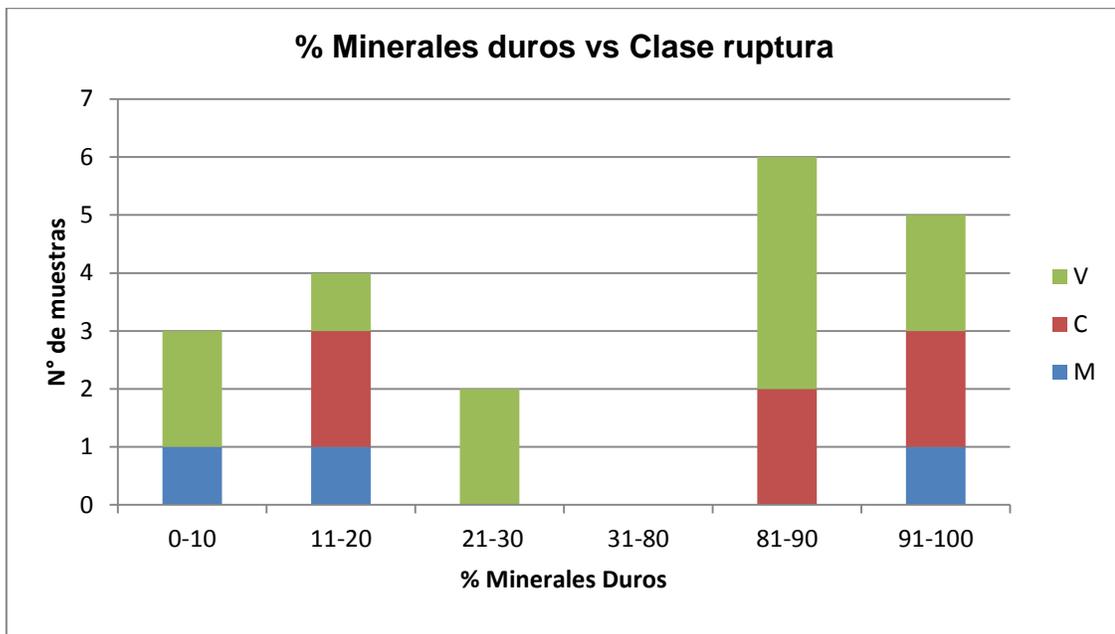
### 6.2.3.2 Clase de ruptura según porcentaje de minerales duros

En la Figura 38 se muestran en un diagrama de columnas porcentual, las clases de ruptura para distintos rangos de porcentajes de minerales duros. La Figura 39 presenta un histograma en que se separan las vetillas en aquellas con >80% de minerales duros, las que corresponden a predominancia de pirita, y las de <30%, de calcopirita. Se graficó las clases V, C, R y M.

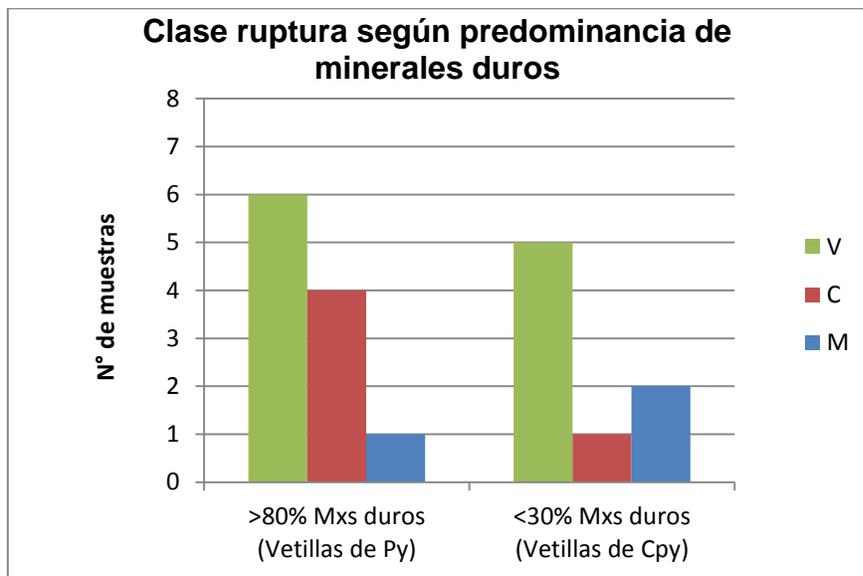
A partir de ellas se puede observar lo siguiente:

- En todos los rangos hay vetillas con ruptura por el medio del relleno (clase V) y en general, esta clase predomina (exceptuando el caso de 11-20%).
- La ruptura por contacto vetilla/halo y mixta ocurren en menor medida, tanto en vetillas con alto, como con bajo contenido de minerales duros.

No se encuentra en estos gráficos ningún patrón aparente que haga pensar que el porcentaje de minerales duros controla la forma de romper de la vetilla ante un esfuerzo de tracción.



**Figura 38.** Diagrama porcentual de clase de ruptura para cada rango de % minerales duros. Las clases de ruptura son V: ruptura por vetilla, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetillas y roca).



**Figura 39.** Histograma de clase de ruptura para vetillas de Py y de Cpy. V: ruptura por vetilla, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetillas y roca).

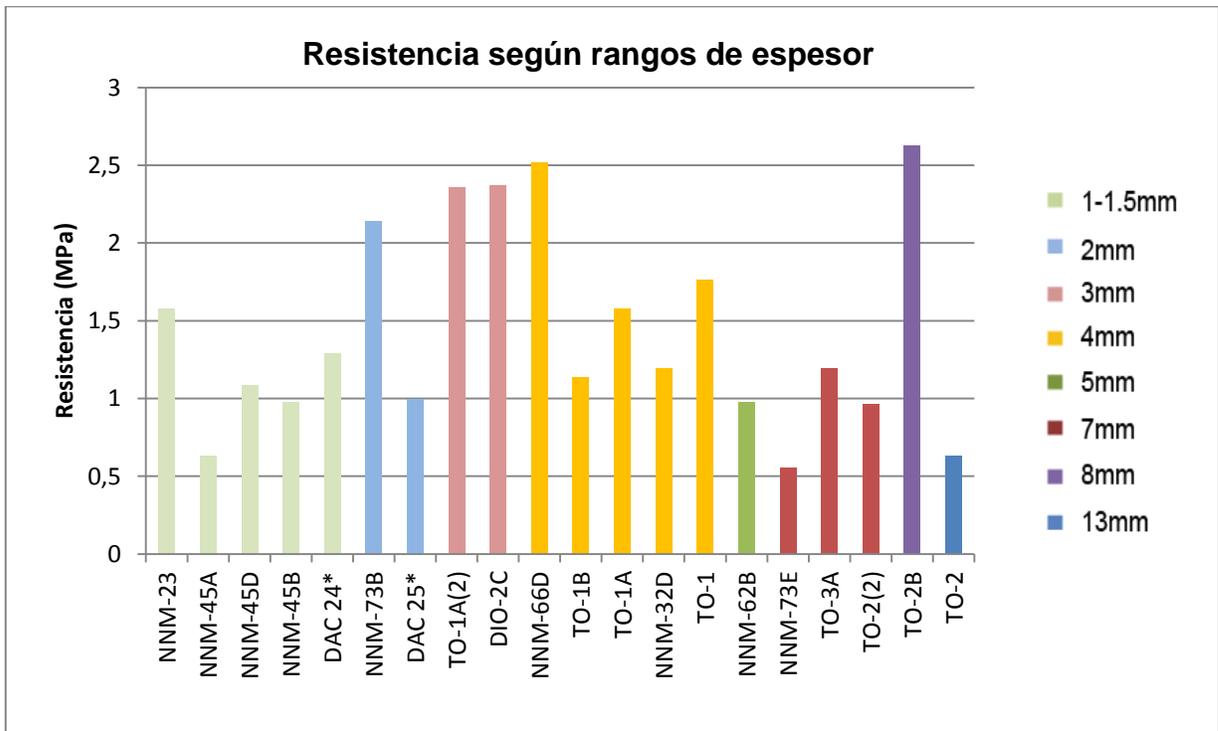
## 6.3 ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

### 6.3.1 Espesor

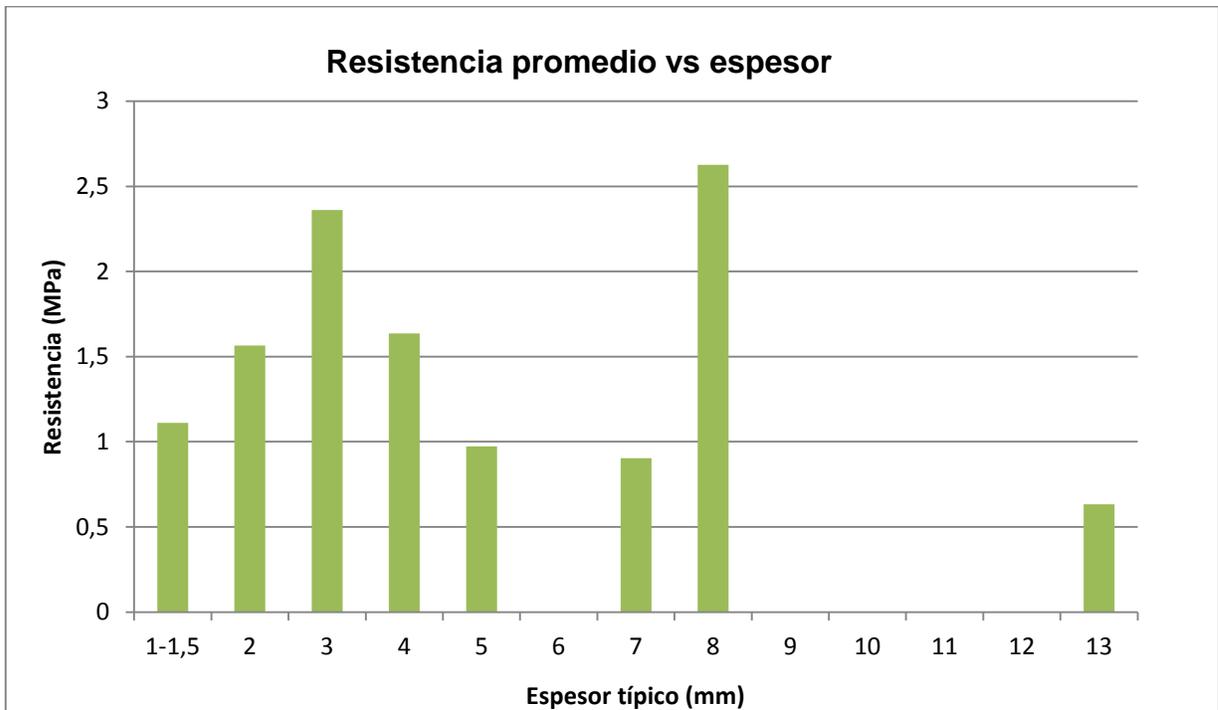
#### 6.3.1.1 Resistencia versus espesor

En la Figura 40. se hace un desglose de los datos en rangos de espesor. Los rangos de espesores menores presentan resistencias relativamente similares entre ellas, con alguna excepción, como es el caso de la muestra NNM-23 de 1-1,5 mm, NNM-73B de 2 mm y NNM-66D de 4 mm de espesor; las que presentan valores mayores al resto.

En la Figura 41 se muestra el promedio de resistencia de cada rango de espesor. En el cual parece haber una tendencia creciente hasta los 3 mm y luego una decreciente. Sin embargo, algunos rangos tienen escasas muestras, como es el ejemplo del espesor 8 mm que tiene sólo la muestra TO-2B, la cual se sale de la tendencia con su resistencia mayor a 2,5 MPa. Es necesario un análisis más profundo y contar con mayor cantidad de datos para confirmar o desechar lo observado en la Figura 41.



**Figura 40.** Diagrama de resistencia a la tracción para cada espesor típico. \* Corresponde a vetillas cuyo ensayo fue realizado en el instituto SP de Suecia.



**Figura 41.** Promedios de resistencia para los distintos espesores típicos observados.

### 6.3.1.2 Resistencia versus espesor para vetillas de Py, Cpy y Cpy- Bo

La Figura 42 muestra un gráfico de espesor de la vetilla versus resistencia a la tracción en el que se distingue a las muestras según su mineral predominante. Al distinguir las vetillas según su mineralogía surge una clara tendencia decreciente en vetillas de pirita y una aparente tendencia creciente en vetillas de calcopirita.

No se dispone de suficientes datos de vetillas de calcopirita de espesores mayores a 2 mm, para asegurar la tendencia creciente, por lo que es necesario contar con más datos.

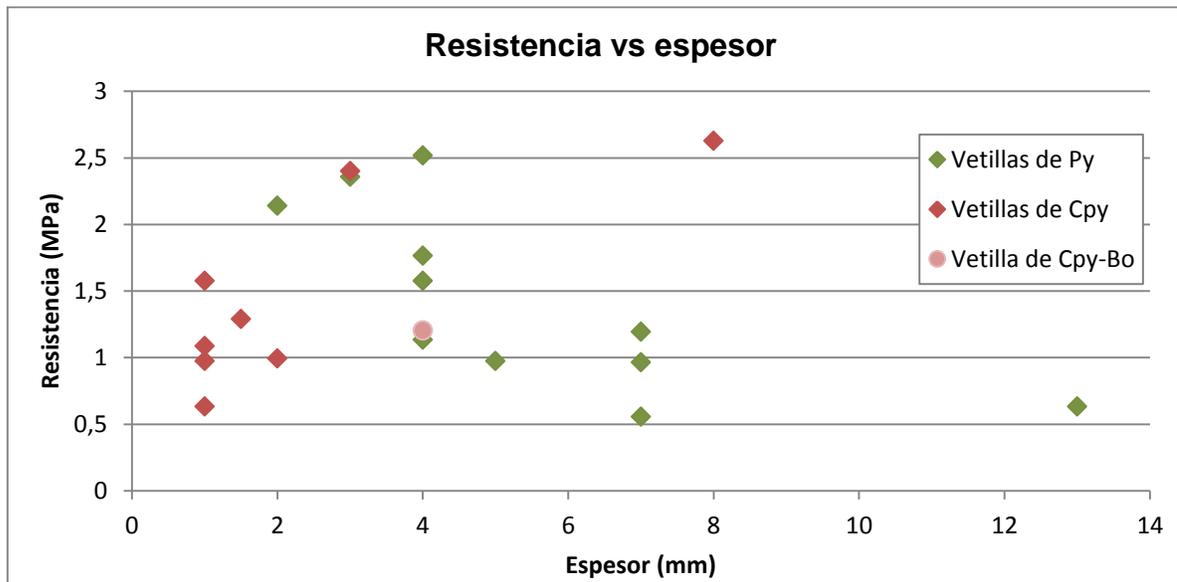
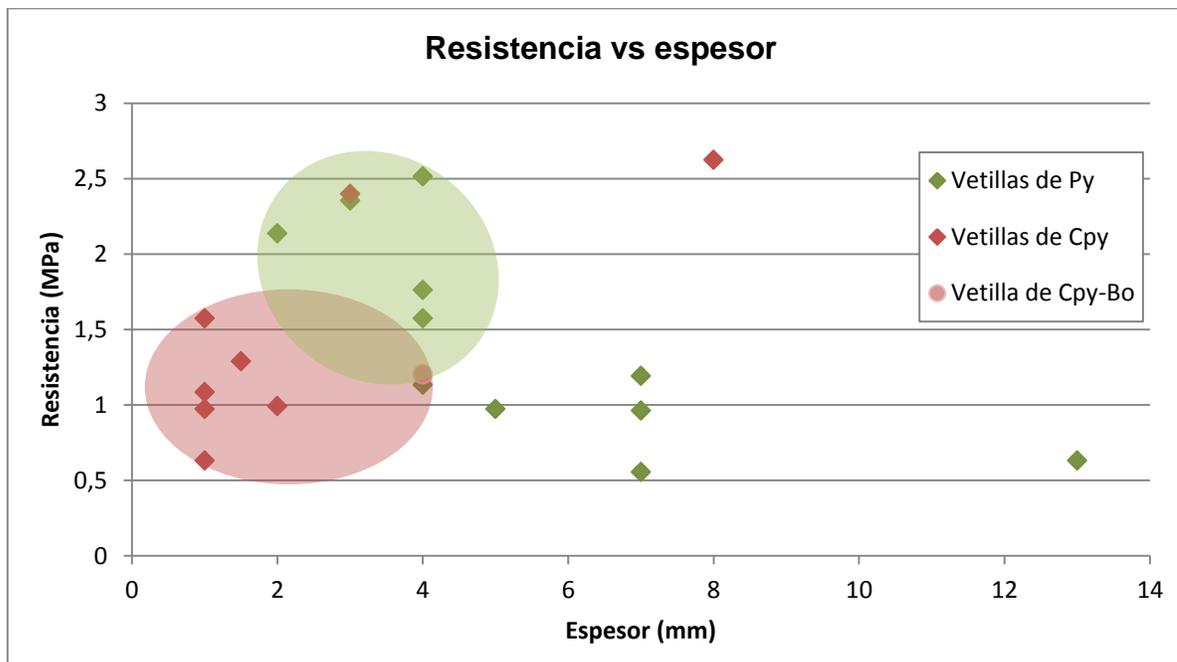


Figura 42. Resistencia a la tracción versus espesor típico para vetillas de Cpy, Py y Cpy-Bo.

### 6.3.1.3 Resistencia de vetillas de pirita y de calcopirita según el espesor.

En el gráfico de resistencia a la tracción directa vs espesor se puede observar que en espesores bajo los 4 mm las vetillas de pirita presentan mayor resistencia que las vetillas de calcopirita (Figura 43).

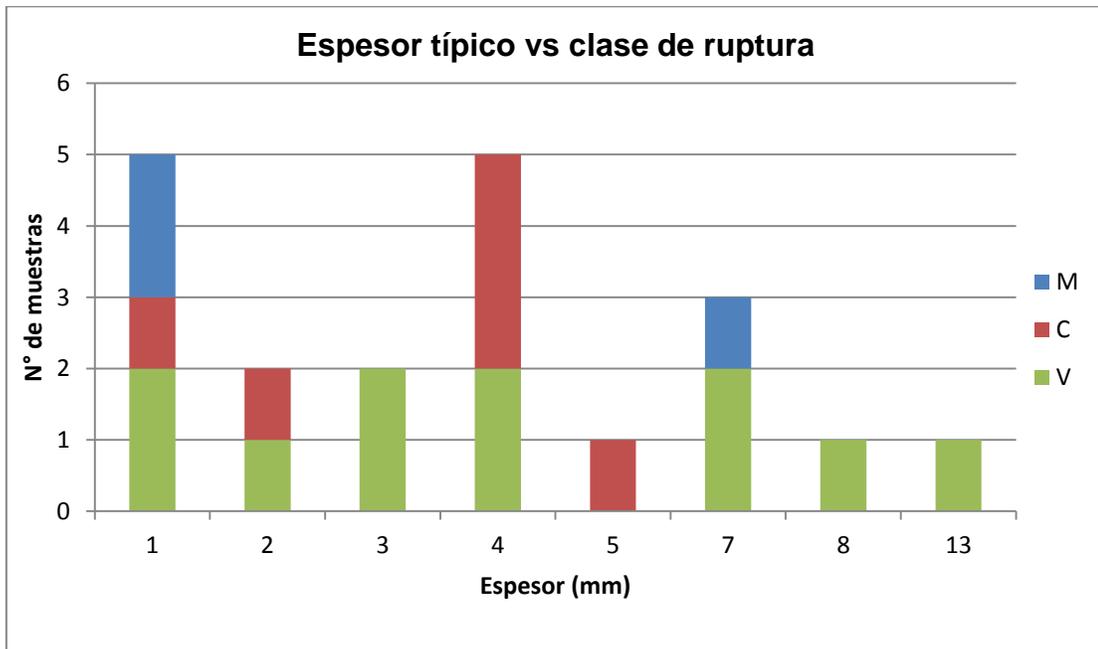
La única muestra de calcopirita que se posee sugiere que en espesores mayores a 5 mm las vetillas de calcopirita superan en resistencia a las vetillas de pirita. Sin embargo, la escasez de datos hace que este comportamiento sea poco claro.



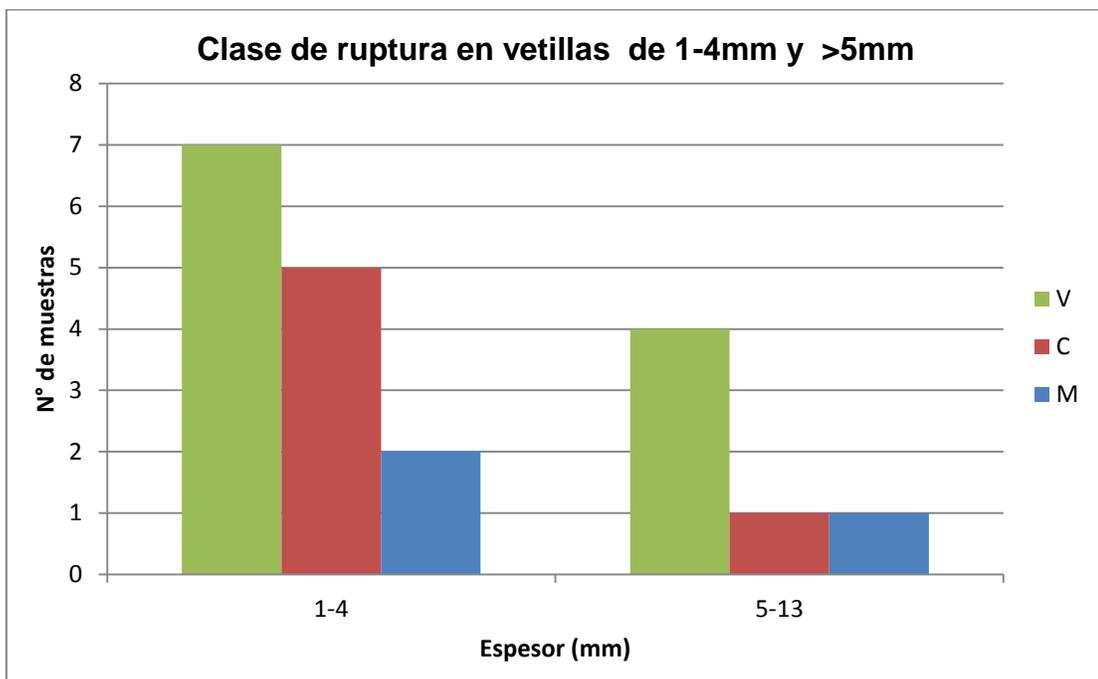
**Figura 43.** Resistencia a la tracción de vetillas de pirita es mayor a la resistencia de las vetillas de calcopirita de rango de espesor 1-4 mm. Para espesores mayores la relacion no es clara por falta de datos.

#### 6.3.1.4 Clase de ruptura según espesor de vetilla

Para el análisis de la influencia del espesor de la vetilla sobre la forma de romperse en ensayo de tracción, se definieron distintos rangos de espesor típico y se graficó la ocurrencia de cada clase de ruptura en un diagrama de columnas, el cual se presenta en la Figura 44. Por otro lado, en la Figura 45 se presenta un histograma en el cual se definen dos rangos de espesor (1-4 mm y mayor a 5 mm). En ambas figuras se ve que la ruptura tipo V ocurre en casi todos los espesores, la ruptura por contacto vetilla/halo o vetilla/roca ocurre solo en muestras de espesor menor a 5 mm. La ruptura mixta ocurre en menor medida, tanto en vetillas delgadas como gruesas.



**Figura 44.** Diagrama porcentual de clase de ruptura para cada rango de espesor de vetilla. V: ruptura por vetilla, R: por roca, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetillas y roca).



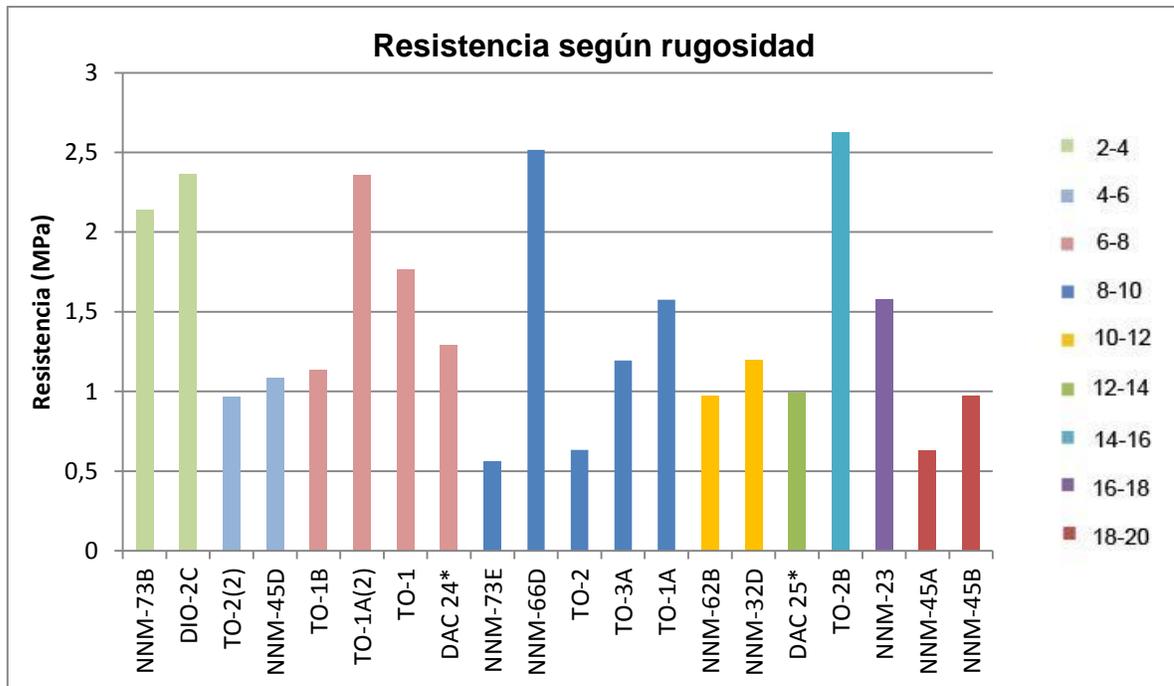
**Figura 45.** Histograma de clase de ruptura para distintos rangos de espesor de vetilla. V: ruptura por vetilla, R: por roca, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetillas y roca).

## 6.3.2 Rugosidad de la vetilla

### 6.3.2.1 Resistencia versus rugosidad

A continuación, en la Figura 46, se muestra un diagrama de columnas donde se representa la resistencia a la tracción de la muestra y la rugosidad expresada en diferentes colores para cada JRC.

En general las muestras de vetillas correspondientes al mismo JRC resultaron tener una resistencia similar o variar dentro de límites no tan alejados. Los JRC 6-8 y 8-10 presentan resistencias más variables y son los que tienen más datos. Por ejemplo, la muestra NNM-66D que tiene una resistencia muy alta en comparación con las demás muestras de igual JRC.



**Figura 46.** Diagrama de resistencia para distintos JRC. \* Corresponde a vetillas cuyo ensayo fue realizado en el instituto SP de Suecia.

La Figura 47 corresponde a los promedios de resistencia para cada rugosidad. En ella no se observa algún patrón entre ambos valores.

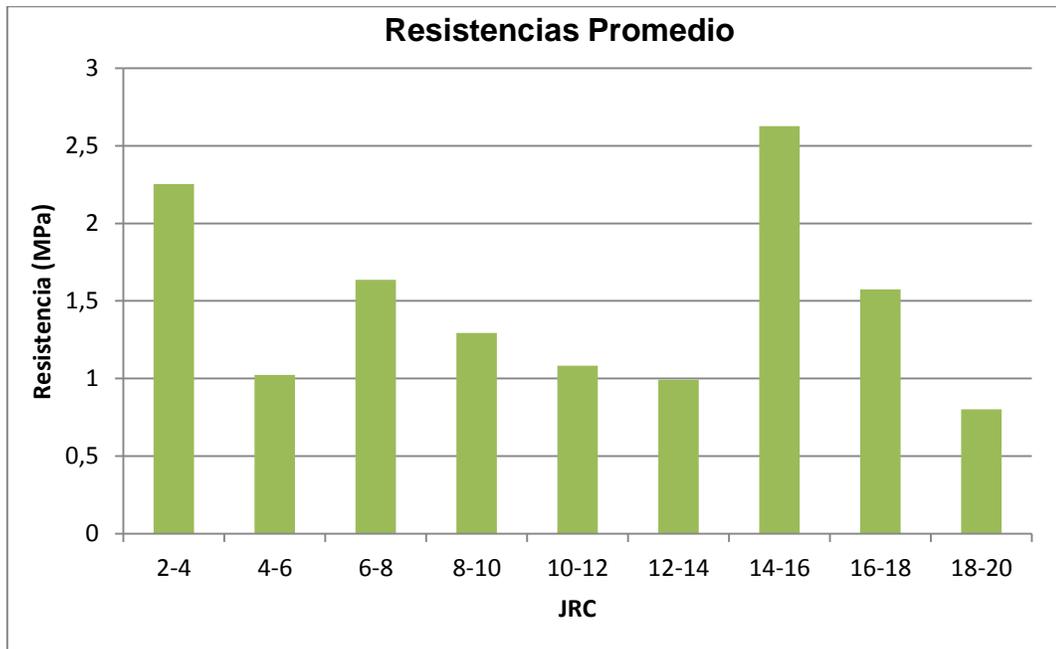


Figura 47. Diagrama Resistencias promedios para cada JRC.

### 6.3.2.2 Resistencia versus rugosidad para vetillas de Py, Cpy y Cpy-Bo

La siguiente imagen (Figura 48) presenta un gráfico de resistencia versus JRC. El JRC se expresa como un rango (por ejemplo JRC: 2-4). Por lo tanto, cada dato en el gráfico, ubicado en un punto impar del eje X, representa al rango dentro del que se ubica. Por ejemplo, los puntos más altos se ubican en el 19, es decir, JRC: 18-20. La figura tampoco muestra alguna relación o patrón evidente entre estos parámetros.

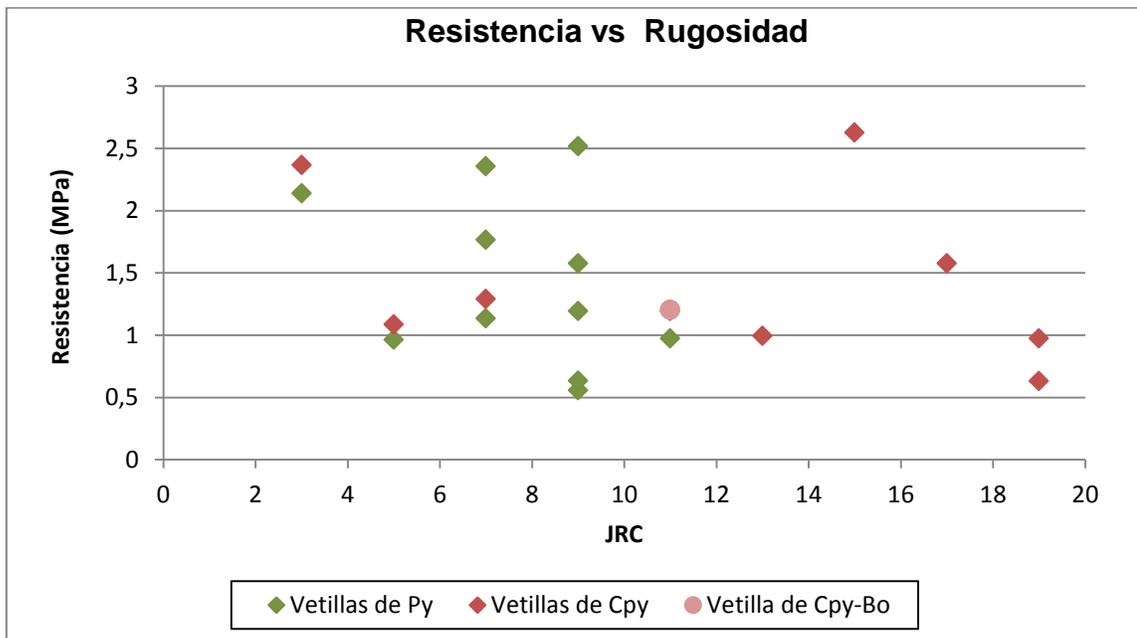


Figura 48. Gráfico de resistencia versus rugosidad para vetillas de Py, Cpy, Cpy-Bo.

### 6.3.2.3 Resistencia versus rugosidad fijando el espesor

Previamente se observó que las resistencias de las vetillas de pirita y calcopirita varían al cambiar el espesor. Por esta razón es necesario mantener fijo este parámetro para analizar la influencia de la rugosidad.

Otro aspecto a considerar es que la rugosidad ejerce una clara influencia ante el actuar de esfuerzos de corte, pues se opone al movimiento de cizalle. Este tipo de stress aparece en el ensayo de tracción directa cuando la vetilla no es ortogonal al esfuerzo aplicado y actúa como una componente normal a la vetilla y otra de corte (ver Figura 17).

La Figura 49 muestra los gráficos resultantes al relacionar la resistencia a la tracción con el JRC de muestras del mismo rango de espesor. En cada gráfico se distingue, además, los casos de vetillas de ángulo aproximadamente ortogonal al esfuerzo aplicado (ángulo menor o igual a  $5^\circ$ ) y de vetillas inclinadas (ángulo mayor a  $5^\circ$ ). En éste no se encuentra ninguna tendencia clara en vetillas de pirita o calcopirita, de 1-4 mm ni de espesor mayor a 5 mm y tampoco en vetillas de diferente ángulo. La rugosidad parece no ser determinante en el ensayo de tracción directa. Sin embargo, un mejor análisis se puede llevar a cabo con mayor cantidad de muestras que permitan tener más datos al realizar las divisiones según espesor y ángulo.

Ya se ha observado que sólo en algunos casos la ruptura se produjo a través del contacto vetilla/halo (ver Figura 30), zona que fue utilizada para estimar el JRC de cada vetilla, por lo que puede ser útil realizar el análisis anterior pero considerando la rugosidad de la superficie de ruptura. La Figura 51 presenta esta situación, para cada rango de espesor de vetilla y distinguiendo las vetillas según su ángulo. Al igual que el JRC de la vetilla, el JRC de la ruptura no muestra relación clara con la resistencia a la tracción obtenida en los ensayos.

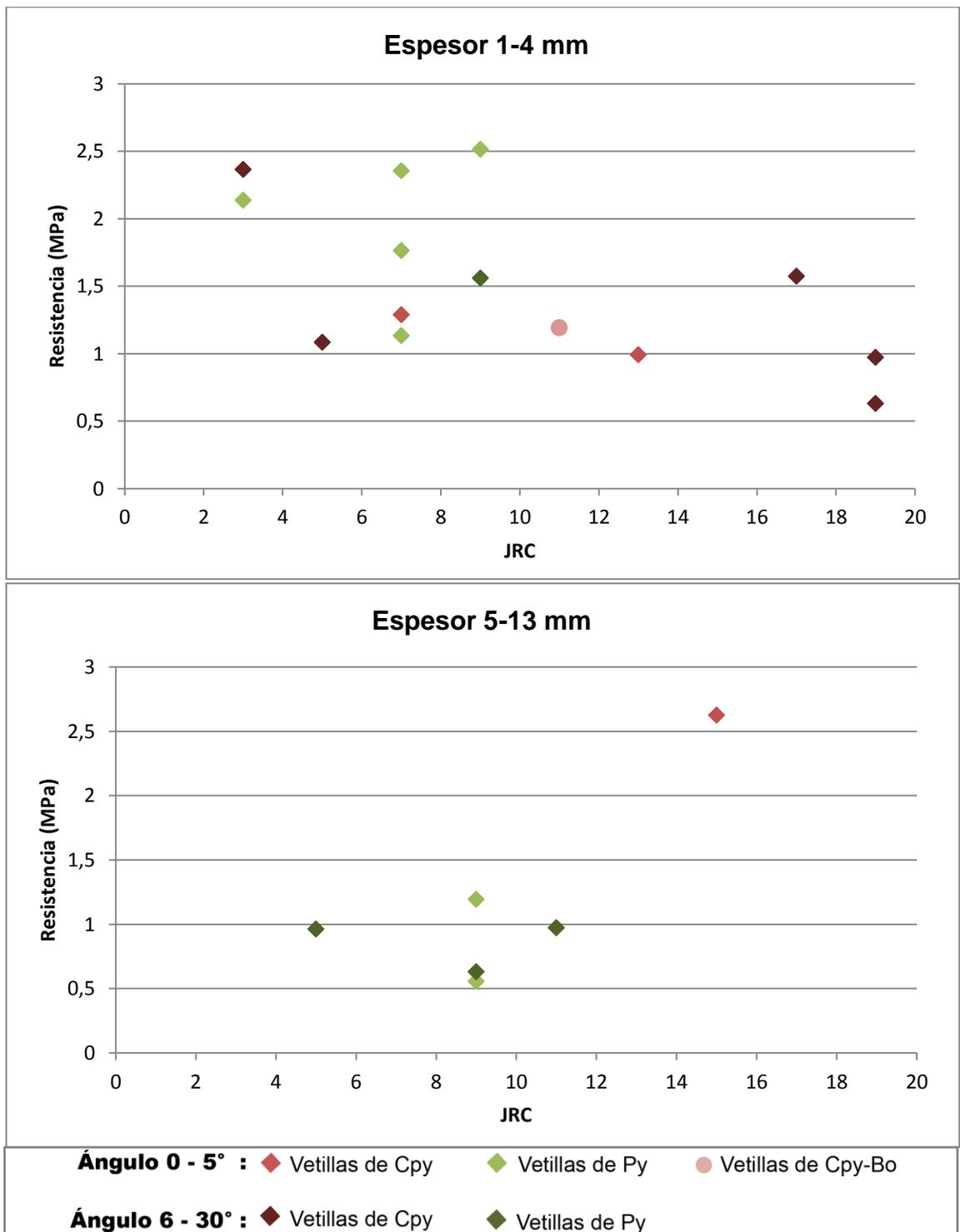
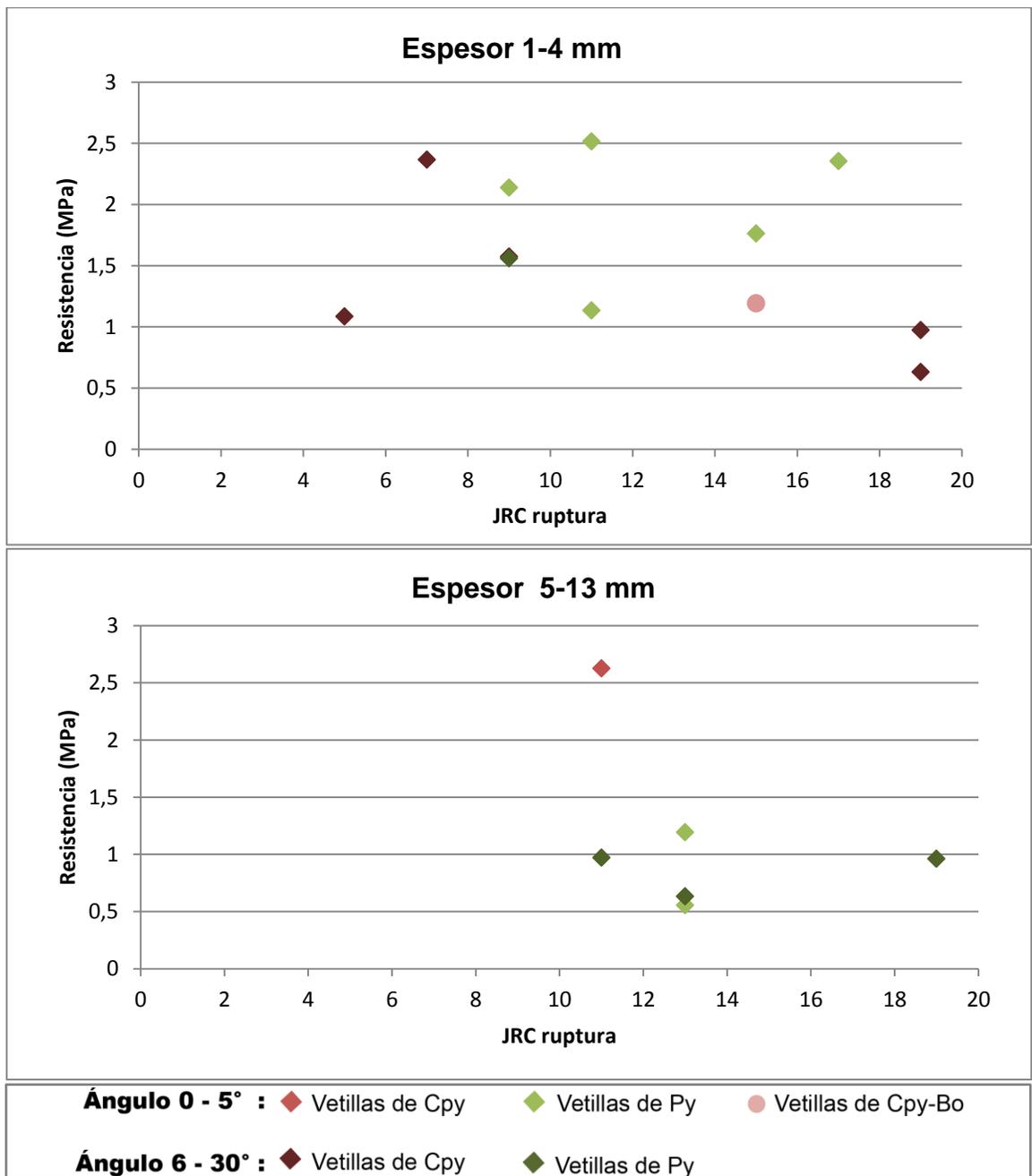


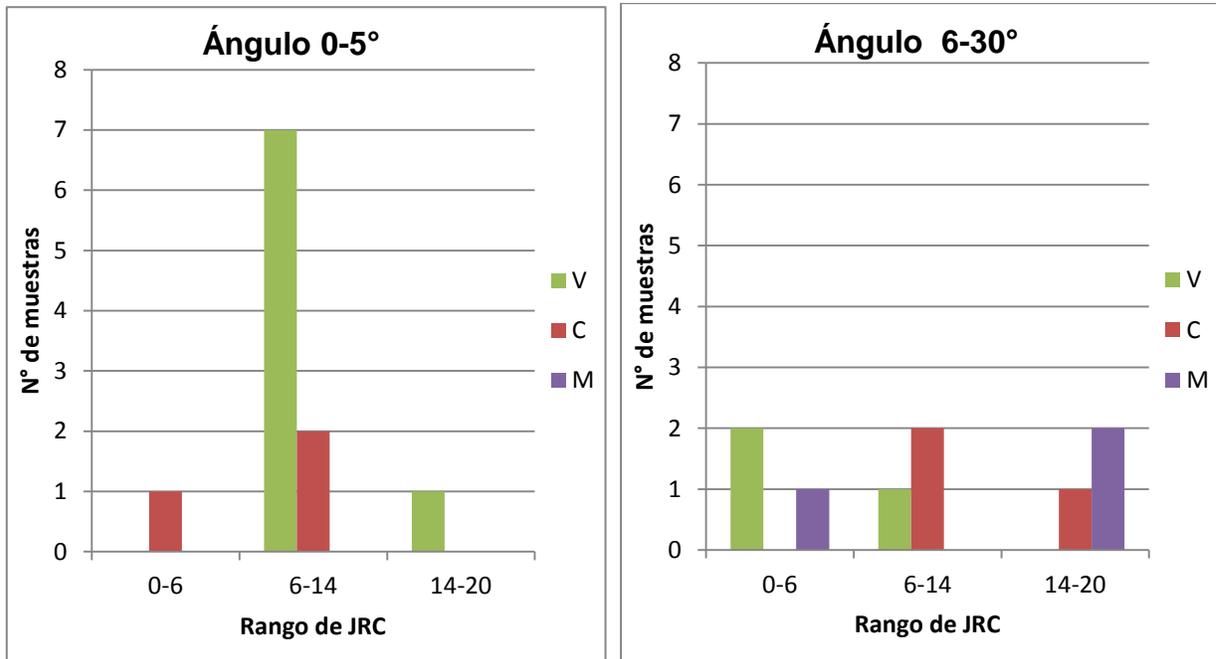
Figura 49. Resistencia versus JRC para distintos rangos de espesor y según ángulo.



**Figura 50.** Gráficos de resistencia a la tracción versus JRC de la superficie de ruptura para vetillas de 1-4 mm de espesor y de 5-13 mm. Se distingue con colores entre vetillas de pirita y calcopirita de 0-5° y >5°.

### 6.3.2.4 Clase de ruptura según rugosidad de la vetilla

En la Figura 51 se presentan dos diagramas de columna de las clases de ruptura en relación a la rugosidad, uno para vetillas de ángulo menor a 5° y otro para vetillas de ángulo mayor, en cada uno de ellos se agruparon los JRC en tres categorías. JRC 0 - 6, 6 -14 y 14 - 20. El resultado muestra que la ruptura V, por el medio del relleno de la vetilla, predomina en vetillas de JRC 6-14 y ángulo de 0-5° y que la ruptura mixta (M) ocurre más en vetillas con JRC 14-20 de ángulo mayor a 5°. En los demás casos los datos son insuficientes para concluir.

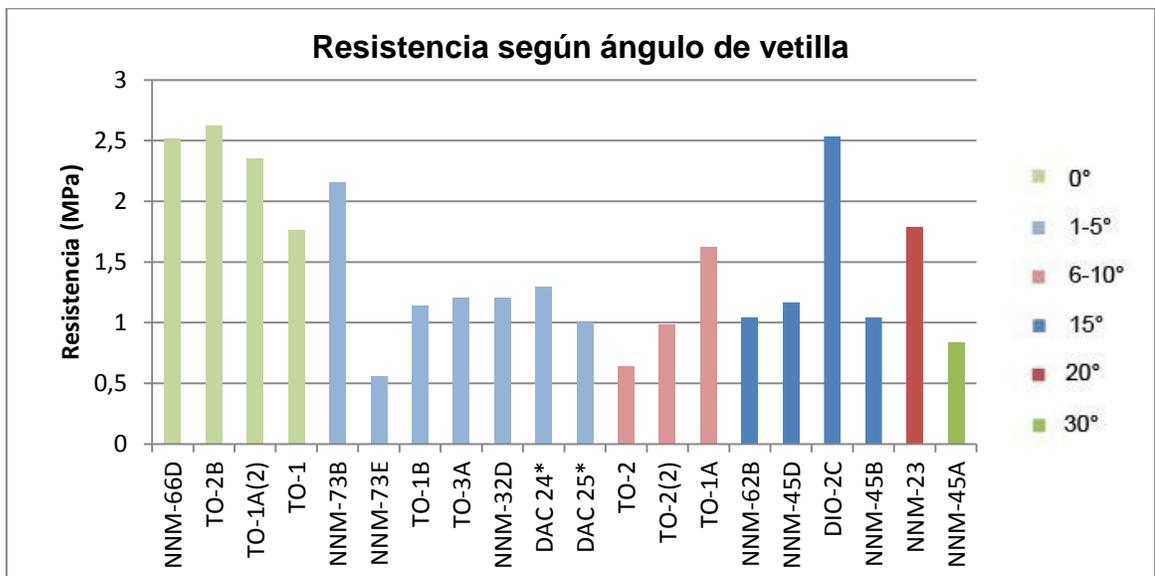


**Figura 51.** Diagramas de clase de ruptura para rangos de JRC de vetilla según el ángulo de la vetilla. V: ruptura por vetilla, R: por roca, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetilla y roca).

### 6.3.3 Ángulo de vetilla

#### 6.3.3.1 Resistencia versus Ángulo de vetilla

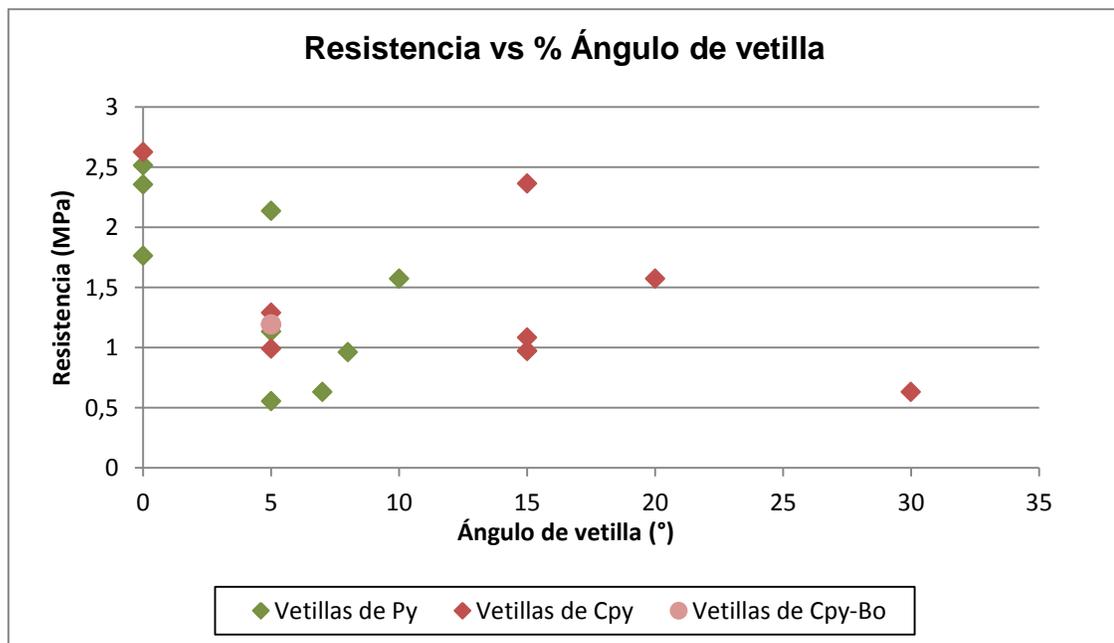
El ángulo de la vetilla contenida en cada probeta, con respecto al esfuerzo de tracción aplicado, es relacionado con la resistencia a la tracción resultante en el ensayo por medio del gráfico presentado en la Figura 52. Se observa que las vetillas que son ortogonales al esfuerzo (ángulo 0°), las que experimentan esfuerzo de tracción puro, sin componente de corte, presentan las mayores resistencias. El resto de los rangos presenta resistencias, en general, más bajas y varían entre 0,5 MPa y 2,5 MPa.



**Figura 52.** Resistencia a la tracción para cada ángulo de vetilla. \* Corresponde a vetillas cuyo ensayo fue realizado en el instituto SP de Suecia.

### 6.3.3.2 Resistencia versus ángulo, para vetillas de Py, Cpy y Cpy-Bo

El gráfico de resistencia versus ángulo de vetilla según mineral predominante se encuentra en la Figura 53. A partir de este no se observa relación clara entre ambos parámetros, pero si se aprecia que las resistencias resultantes, tanto en vetillas de pirita como de calcopirita, son cercanas o mayores a 2 MPa cuando el ángulo es 0°.



**Figura 53.** Resistencia a la tracción versus ángulo, para vetillas de Py, Cpy y Cpy-Bo.

### 6.3.3.3 Resistencia versus ángulo, fijando rugosidad y espesor

Es necesario realizar la correlación de la resistencia con el ángulo de vetilla manteniendo fijo el rango de espesor, puesto que este parámetro muestra una cierta influencia en el valor de las resistencias de las vetillas, como se mostró anteriormente. También es necesario considerar el comportamiento de las vetillas de diferente rugosidad, pues los mayores ángulos aumentan el actuar de esfuerzos de corte. En la Figura 54 se presentan los casos de JRC: 6-14 y JRC: 14-20 (el rango de JRC: 0-6 no se muestra debido a que contiene muy pocas datos y no aporta mayor información). A su vez, se distinguen las vetillas de 1-4 mm de espesor de las de 5-13 mm. Las vetillas de calcopirita de JRC alto (14-20) parecen mostrar una tendencia decreciente, en que a mayor ángulo se obtienen menores resistencias. En el caso de las vetillas de pirita de JRC: 6-14 no se observa ninguna tendencia.

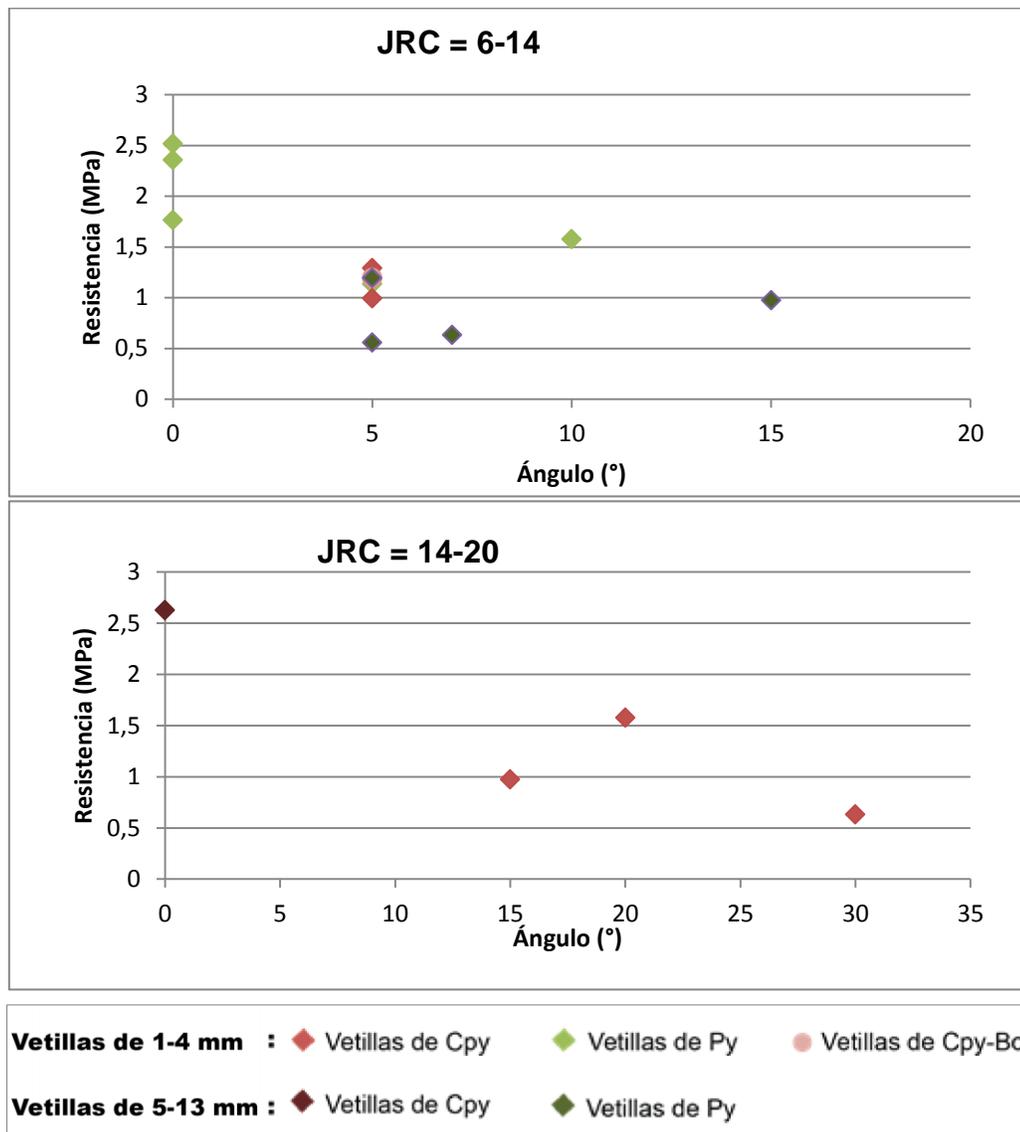


Figura 54. Resistencia a la tracción versus ángulo de vetilla para distintos rangos de JRC.

### 6.3.3.4 Clase de ruptura según ángulo de vetilla

La Figura 55 muestra la clase de ruptura para distintos rangos de ángulo de la vetilla con respecto al plano ortogonal al esfuerzo aplicado. En ellas se observa que la mayoría de las vetillas se ubican con un ángulo menor a 5° y que de estos, la mayoría rompe por el relleno de la vetilla (V). En el caso de la ruptura por contacto vetilla/halo o vetilla/roca, esta ocurre en casi todos los rangos. Se tiene, además, que la ruptura mixta sólo ocurre en vetillas de ángulo superior a los 8°.

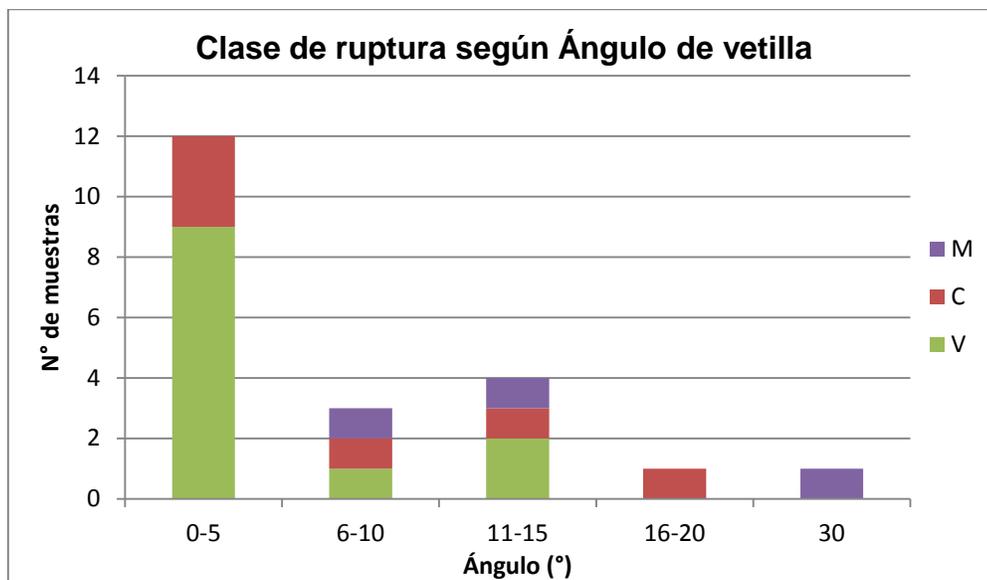


Figura 55. Diagrama de clases de ruptura según el ángulo de vetilla. V: ruptura por vetilla, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetilla y roca).

## 6.4 ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN SEGÚN PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y MINERALÓGICOS

### 6.4.1 Stress límite de comportamiento elástico

Al relacionar los valores de stress en el puntos de fluencia, correspondientes al valor del stress en el límite de comportamiento elástico (parte recta de la curva stress vs strain), con porcentaje de minerales duros de cada vetilla (como se muestra en el punto A de la Figura 26) se obtiene el gráfico de la Figura 56. En éste se observa que las vetillas de calcopirita presentan valores que varían entre 0,26 MPa y 0,5 MPa, prácticamen-

te el mismo rango que las vetillas, a excepción de tres muestras cuyo stress del punto de fluencia es de 0,1 MPa.

Si bien no se ve en el gráfico una tendencia que permita establecer una correlación entre el stress del punto de fluencia y el porcentaje de minerales duros. Éste si sugiere que tanto vetillas de pirita como de calcopirita inician su comportamiento plástico a stress similares y bajo los 0,5 MPa.

En el Anexo B se presentan los gráficos de stress en el punto de fluencia versus los otros parámetros (espesor, JRC y ángulo). En ellos no se encuentra ninguna regularidad.

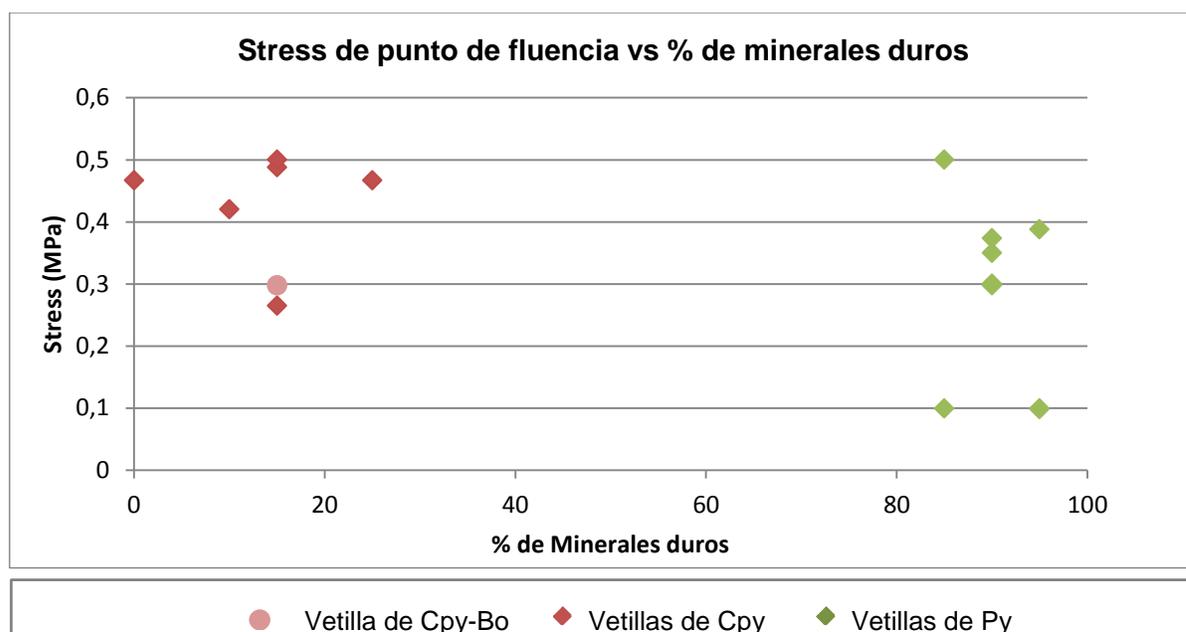


Figura 56. Gráfico de punto de fluencia versus porcentaje de minerales duros en vetillas de pirita y calcopirita.

#### 6.4.2 Módulo de Elasticidad

En el gráfico de la Figura 57 se muestra la relación entre el módulo de elasticidad, correspondiente a la pendiente de la recta tangente en el principio de la curva (punto C en la Figura 26), y el espesor de la vetilla.

Sólo una de las vetillas ensayadas presentó un módulo de elasticidad mayor a 40 GPa, y esta corresponde a una vetilla pirita de 4 mm, JRC: 6-8 y 0° de ángulo, que no muestra ninguna característica macroscópica que permita explicar este alto valor. Todas las demás vetillas, mantienen un valor inferior a los 20 GPa.

Omitiendo la muestra de pirita cuyo módulo de elasticidad resalta (muestra TO-1) todas las demás vetillas de pirita presentan un valor inferior a 7 GPa. Por su parte, las

vetillas de calcopirita tienen, en su mayoría, valores entre 10 y 20 GPa (mayores a los de pirita)

En el gráfico de espesor no hay ninguna tendencia. En los gráficos de rugosidad y ángulo tampoco hay correlación (Anexo B)

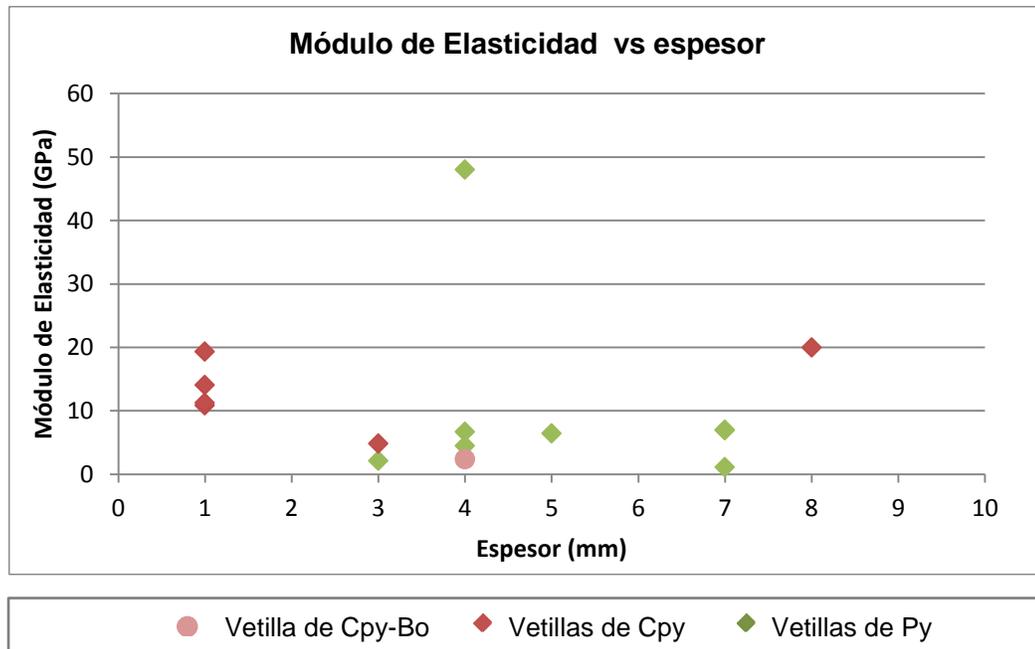
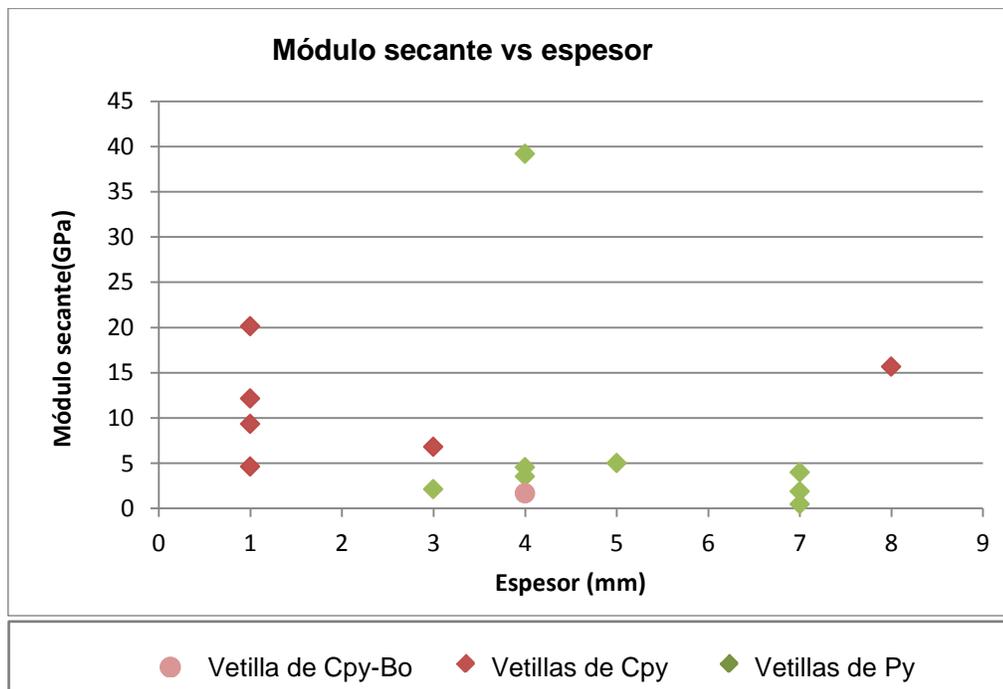


Figura 57. Gráfico de módulo de elasticidad vs espesor, JRC y ángulo.

#### 6.4.3 Módulo secante o pendiente de la secante en el 50% del stress aplicado

En la Figura 58 se presenta el gráfico de pendiente de la recta secante que pasa por la curva en el 50% del stress aplicado (punto D de la Figura 26) versus el espesor.

Las vetillas de calcopirita presentan módulos de 2 GPa a 21 GPa, sin mostrar ninguna tendencia en función del espesor (ni de los otros parámetros estudiados, Anexo B). Por otro lado, las vetillas de pirita alcanzan valores inferiores a 5 GPa a excepción de una vetilla de 4 mm que alcanzan los 39 GPa.



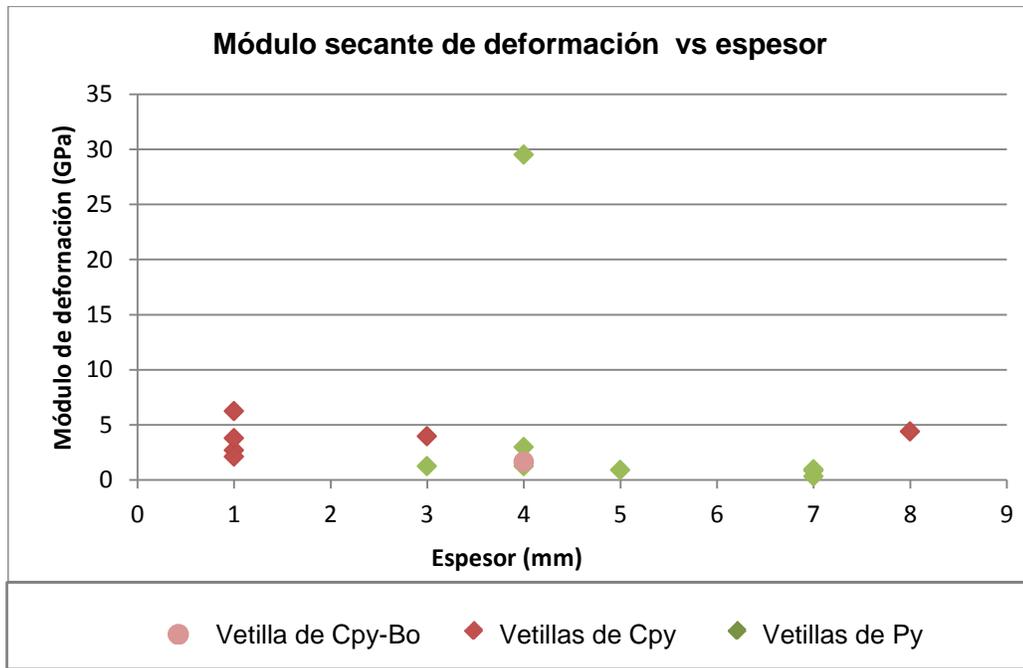
**Figura 58** . Gráficos de pendiente de la recta secante en el punto de 50% del stress aplicado vs parámetros geométricos.

#### 6.4.4 Módulo de deformación o pendiente de la secante en el 50% de la deformación

El gráfico expuesto en la Figura 59 corresponde a la relación entre la pendiente de la recta secante que pasa por la curva en el 50% de deformación (punto E de la Figura 26) y el espesor.

El total de las vetillas de calcopirita presentan módulos secantes de deformación menores a 6 GPa, pero no se observa ningún patrón.

Las vetillas de pirita alcanzan valores inferiores a 3 GPa, a excepción de una vetilla de 4 mm que alcanza los 30 GPa.



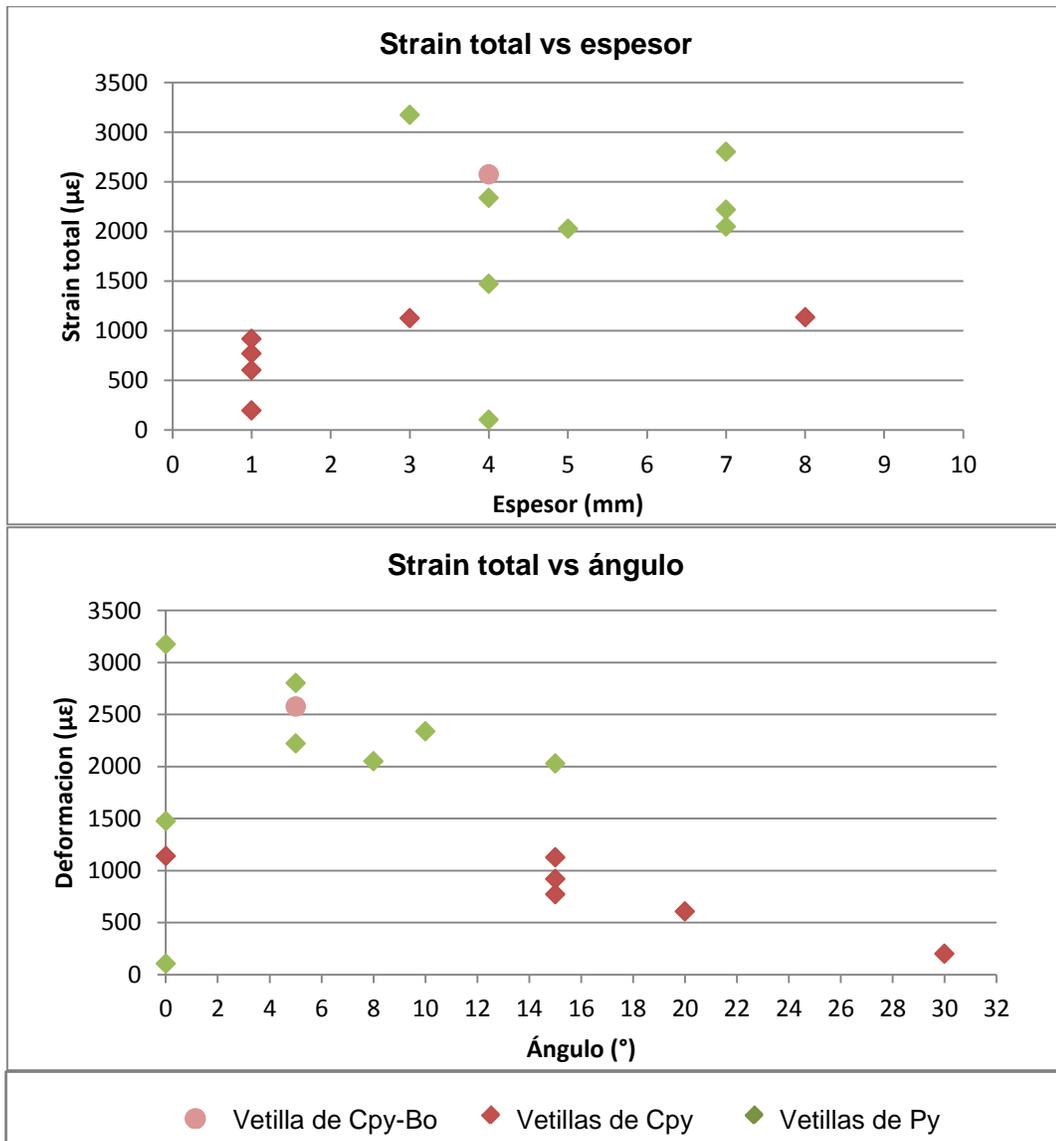
**Figura 59.** Gráfico de pendiente de la recta secante en el punto de 50% de deformación según espesor.

#### 6.4.5 Strain total

La Figura 60 contiene gráficos de deformación total (punto B en la Figura 26) versus el espesor y ángulo de las vetillas analizadas.

Las vetillas de pirita tienen valores de hasta 3170  $\mu\epsilon$ . Las de calcopirita alcanzan hasta 1137  $\mu\epsilon$  y la vetilla de calcopirita-bornita alcanza 2577  $\mu\epsilon$ . Se observa una tendencia creciente en vetillas de calcopirita, en que a mayor espesor, la vetilla presenta mayor deformación. Esta tendencia creciente no se observa al considerar las vetillas de pirita por separado. Por otra parte, la mayoría de las vetillas de pirita presenta mayores deformaciones que las vetillas de calcopirita.

El gráfico de strain total versus ángulo sugiere una tendencia decreciente donde las vetillas de calcopirita de mayor ángulo presentan menor strain. La rugosidad no muestra patrón alguno (gráfico en Anexo B)



**Figura 60.** Gráficos de strain total vs porcentaje de minerales duros, espesor, JRC y ángulo.

## 7. DISCUSIONES

Variados estudios se han realizado con anterioridad sobre los efectos de las vetillas en la respuesta del macizo rocoso cuando es sometido a esfuerzos. Los ensayos de tracción que se han hecho en muestras de la mina El Teniente con anterioridad corresponden, en general, a ensayos indirectos, los cuales registran valores de resistencia a la tracción un poco más altos (ver Tabla 9) y los cuales pueden ser comparados con los resultados del presente estudio. Otros estudios que también dan pistas de las características de una vetilla más propensa a romper son aquellos que han estudiado las caras de las colpas de los puntos de extracción, pues en el proceso de hundimiento hay esfuerzos de tracción involucrados.

Entre los ensayos de tracción directa en vetillas de El Teniente se encuentra aquellos realizados en el instituto SP de Suecia, analizado por Jacobsson y otros (2011) y De los Santos (2011), en los cuales, los valores de resistencia a la tracción directa obtenidos fueron bajos en comparación con lo obtenido en ensayos de tracción indirecta, de igual manera que las resistencias obtenidas en IDIEM. Sus resultados han sido usados en este estudio para encontrar la relación entre la resistencia y las características de las vetillas.

**Tabla 9.** Resumen de resultados de ensayos de tracción realizados anteriormente en vetillas de El Teniente. Se incluyen ensayos de tracción directa (DT) e indirecta (BT) también llamado ensayo brasileño. Se muestran resultados de vetillas de categoría Hidrotermal Principal (HP) con distintas proporciones de pirita (Py) y calcopirita (Cpy)

Autor	Ensayo	N° de muestras	Diámetro Disco	Min (MPa)	Max (MPa)	Promedio (MPa)	Observación
Jacobsson y otros (2011)	DT	4	-	1,2	0,4	1,3	Vetillas de Py y Cpy
DICTUC (2010)	BT	4	50	3,6	5	4,3	Vetillas de > 60%Cpy
Padilla (2004)	BT	9	50	0,8	2,8	1,8	Vetillas de >97% de Py
Padilla (2004)	BT	3	50	0,1	2,3	1,5	Vetillas 100% Cpy
Padilla (2004)	BT	29	35	3,6	8,4	6,2	Vetillas HP (Py y/o Cpy)
Padilla (2004)	BT	5	100	3,6	7,1	5,5	Vetillas HP (Py y/o Cpy)
Gavia (2005)	BT	4	35	3,6	7,3	5,4	Vetillas HP de Py y Cpy.
Willoner (2000)	BT	2	94,5	5,0	5,6	5,3	Vetillas HP 90% Cpy
Willoner (2000)	BT	2	94,5	6,7	6,9	6,8	33% Cpy
Willoner (2000)	BT	3	94,5	3,9	4,4	4,1	30-35% Py

De los Santos (2011) entrega una razón entre resistencia a la tracción indirecta y tracción directa para vetillas de calcopirita, de 0,1-0,2, comparando con los resultados de otros autores. Al realizar la misma comparación con los resultados de este estudio se obtiene una razón de 0,2-0,3. Ambas diferencias son mayores que los entregados por Alehossein y Boland (2004) y Grosky y otros (2007) para muestras de granito, de 0.8 y 0.4-0.6 respectivamente. Se puede decir, por tanto, que la resistencia a la tracción directa es siempre menor que la resistencia a la tracción indirecta. La Tabla 10 muestra los resultados de los ensayos en vetillas de Cpy, con lo cual se calculó la razón recién mencionada.

**Tabla 10.** Tabla modificada de Jacobsson y Brzovic (2011) que recopila resultados de distintos trabajos de ensayos de tracción directa (DT) e indirecta (BT).

Referencia	Resistencia a la tracción de vetillas de Calcopirita (MPa)
Padilla, 2004 (BT)	6,2
Gavia, 2005 (BT)	5,5
Dictuc, 2010 (BT)	4,5
Jacobsson y Brzovic, 2011 (DT)	1,2
<b>Este estudio (DT)</b>	<b>0,5 - 2,6</b>
	<b>1,5 (promedio)</b>

La comparación de los resultados de resistencia de las vetillas con la resistencia de la roca intacta en las que éstas se encuentran inmersas no se pudo llevar a cabo, debido a que sólo se cuenta con resultados de ensayos de tracción indirecta, los cuales se muestran en la Tabla 11 (extraídos de SGL-I-123/2003, 2003).

**Tabla 11.** Resistencia a la tracción indirecta de la roca intacta para litologías del Teniente (SGL-I-123/2003, 2003). El coeficiente de variación corresponde a la división de desviación estándar y media aritmética de los datos de las resistencias a la tracción indirecta e indica la confiabilidad de cada parámetro y el rango en que éste podría variar; así en el caso del CMET el valor esperado de resistencia es de 14 MPa y su coeficiente de variación de 25% indica que la resistencia podría variar entre 11 y 18 MPa.

Litología	$T_i$ (MPa)	Coeficiente de variación (%)
CMET	14	25
Pórfido Dacítico	12	20
Diorita	15	30
Brecha Braden	6	20

Es, por lo tanto, necesario realizar los ensayos correspondientes de tracción directa en muestras de las distintas litologías de El Teniente.

Con respecto a las relaciones encontradas por autores anteriores entre la resistencia a la tracción indirecta y los parámetros mineralógicos y geométricos de la vetilla se tiene lo siguiente:

### Porcentaje minerales duros

En los estudios de caras de colpas de los puntos de extracción se ha encontrado que las vetillas que las forman poseen, principalmente, menos de 1/3 de minerales du-

ros y baja participación de cuarzo, independientemente de la litología y tipo de alteración de la roca en que la vetilla se hospeda. De esto se desprende que las vetillas con mayor porcentaje de minerales duros son más resistentes por lo que no suelen quebrarse en el proceso de hundimiento (Brzovic y Villaescusa, 2007)

En ensayos de tracción indirecta se ha encontrado que la resistencia depende de la mineralogía de la vetilla (Gavia, 2005; Padilla, 2004; Willoner, 2000), que la presencia de cuarzo tiende a aumentar la resistencia (Willoner, 2000). Además, para que se tenga mayor o menor resistencia a la tracción no le basta con tener minerales duros o blandos, si no que estos deben predominar para influir (Padilla, 2004)

En este estudio, las vetillas de pirita y calcopirita presentan el mismo rango de resistencias a la tracción. Sólo al mantener fijo otro parámetro como el espesor, las vetillas de pirita de espesor 1-4 mm presentan una resistencia a la tracción directa levemente mayor que las de calcopirita (Figura 43).

También se tiene, que la única muestra de vetilla de cuarzo descrita, presentó ruptura por el pegamento que fija la muestra a la máquina del ensayo, es decir, el ensayo no es válido.

### **Espesor**

Sólo algunos autores han analizado como este parámetro podría afectar a la resistencia a la tracción de una vetilla. Willoner (2000) no lo hace, pero lo propone. Gavia (2005), sin ahondar más en el tema, atribuye las variaciones obtenidas de la resistencia a la tracción indirecta en su trabajo a la diferencia de espesor.

Padilla (2004) encuentra gran variabilidad en los datos de igual espesor en ensayos de tracción indirecta, por lo que no puede concluir sobre su influencia en la resistencia a la tracción.

Por otro lado, en el estudio de caras de colpas mencionado anteriormente se determinó que las vetillas selladas con espesor mayor a 2 mm son las principales formadoras de caras de bloque. Esto sugiere que las vetillas de espesor menor a 2 mm presentan resistencias superiores, puesto que existe una escasa ocurrencia de aquéllas en las caras de las colpas, siendo las más abundantes (Brzovic y Villaescusa, 2007). Es decir, a mayor espesor, menor resistencia.

Según lo observado en los gráficos presentados en la sección de resultados, el espesor influye sobre la resistencia. En vetillas de pirita, al aumentar el espesor resulta una resistencia menor. Las vetillas de calcopirita, por el contrario, parecen aumentar de resistencia al aumentar el espesor, sin embargo, son pocas las muestras que permiten concluir esta tendencia (Ver Figura 42), por lo que se debería contar con mayor cantidad de datos para corroborar este resultado, o concluir que se trata de casos especiales en los cuales los altos valores de resistencia se deben a otras causas.

Hay acuerdo en lo encontrado en este estudio y en los antecedentes, pero solo en las vetillas de predominancia de pirita. El caso de las vetillas de calcopirita es diferente y requiere mayor cantidad de muestras ensayadas de este tipo para corroborar lo observado.

## **Rugosidad**

En ensayos de tracción indirecta anteriores, se indica que a mayor JRC se obtienen mayores resistencias (Padilla, 2004; Willoner, 2000) Este resultado no es fácilmente comparable con lo obtenido en este estudio, donde la relación de la resistencia con la rugosidad no es clara.

Manteniendo fijo el espesor y el ángulo, se observa que no hay ninguna tendencia en las vetillas de ángulo menor a  $5^\circ$ , tanto en vetillas gruesas como delgadas (Figura 49). Como es esperable, el JRC no debería ejercer mayor influencia cuando no hay movimiento de cizalle.

En vetillas cuyo ángulo es mayor a  $5^\circ$ , hasta  $30^\circ$ , se espera que a mayor rugosidad aumente la resistencia. Esto no es observado en la Figura 49, donde las vetillas de calcopirita de espesor menor a 4 mm de mayor JRC presentan las resistencias más bajas. Una vez más, la escasez de datos que resulta al subdividir en categorías según espesor y ángulo, no permite realizar una conclusión definitiva. Es necesario contar con más ensayos.

La situación anterior se repite al realizar el análisis con el JRC de la superficie de ruptura, no hay tendencias en vetillas de los rangos de espesor 1-4 mm ni 5-13 mm, ni en vetillas de ángulos altos o bajos.

## **Ángulo de vetilla**

El ángulo de la vetilla con respecto al plano ortogonal a la dirección del esfuerzo de tracción aplicado no parece condicionar la resistencia de una vetilla, pues no se encuentran tendencias en ningún rango de espesor ni JRC (Figura 54).

Las vetillas de piritita de JRC: 6-14 y de calcopirita de JRC: 14-20 presentan los mayores valores de resistencia cuando el ángulo es  $0^\circ$ , lo que es contrario a lo esperado (vetillas de mayor rugosas debieran ofrecer más resistencia cuando existen esfuerzos de corte, los que surgen en vetillas de mayor ángulo). Al realizar la distinción entre vetillas de diferente espesor se puede notar que aquellas vetillas de mayor resistencia son justamente las de piritita de 1-4 mm y de calcopirita de espesor mayor a 5 mm, por lo que este comportamiento se debería al espesor y no al ángulo.

Es posible que los ángulos de las vetillas no sean lo suficientemente grandes ( $<30^\circ$ ) como para afectar la resistencia a la tracción, aun cuando la vetilla presenten rugosidades altas, debido a que el esfuerzo de corte generado por la descomposición del esfuerzo en uno normal y otro tangencial a la vetilla, es muy pequeño. Nuevamente, se hace necesario contar con más datos para comprobar esto.

## **Clase de ruptura**

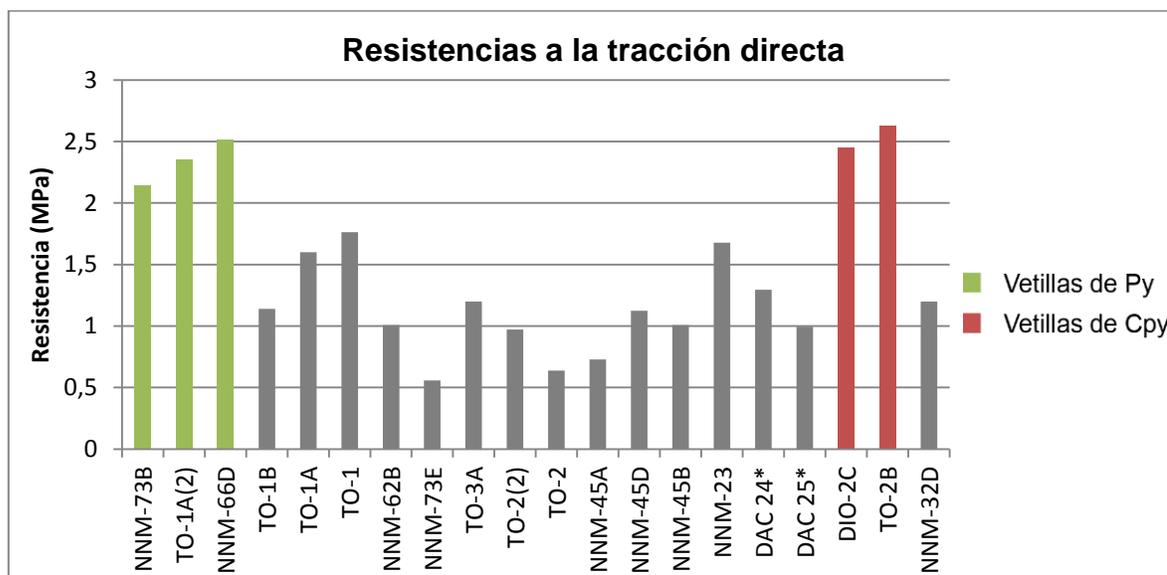
Las clases de ruptura obtenidas en vetillas en ensayos de tracción indirecta corresponden en su mayoría a través del relleno de la vetilla (clase V), y en segundo lugar a clase C, es decir, por el contacto vetilla/halo (Padilla, 2004) con un 75% y 10% de ocurrencia, respectivamente. Brzovic y Figueroa (2009) indican que durante el proceso de hundimiento las colpas resultantes presentan caras donde las vetillas han presentado rupturas principalmente tipo V (en un 62%) y luego tipo C (con un 34%)

En este trabajo, al igual que en los recién mencionados, la ruptura por relleno es la que más ocurre, observándose en el 55% de los casos. La clase de ruptura que sigue en importancia es la C, por contacto, y luego la clase M o mixta. Se realizó gráficos de clase de ruptura para los distintos rangos de porcentaje de minerales duros, espesores y JRC, y en ellos destacó la predominancia de la ruptura clase V o por relleno.

La ruptura mixta M ocurren más en vetillas de espesores de 1-2 mm, rugosidad alta (JRC: 18-20) y ángulos mayores a 5°. Sin embargo, la ruptura M está propiciada por la presencia de otras vetillas débiles cortando a la vetilla principal, las más observadas fueron vetillas de anhidrita delgadas, de espesor menor a 1 mm.

## Resistencias sobresalientes

Las muestras que sobresalen por sus mayores resistencias (mayores a 2 MPa) son NNM-66D, NNM-73B, TO-2B, TO-1A(2), DIO-2C, lo cual se puede observar en la Figura 61. Es necesario ver si las relaciones encontradas en los diagramas explican estas diferencias.



**Figura 61.** Diagrama con los resultados de las resistencias, se destaca en verde las muestras de pirita cuya resistencia resalta por ser mayor a 2 MPa. En rojo se destacan las muestras de calcopirita.

Las vetillas de NNM-66D, TO-1A(2) y NNM-73B tienen predominancia de pirita en su mineralogía y sus espesores están entre 2 y 4mm, por lo que calzan en el gráfico observado de resistencia versus espesor con la zona de resistencias más altas (Figura 42). Su elevada resistencia, por tanto sería propiciada por el bajo espesor.

De igual manera, el espesor podría explicar la resistencia de la vetilla de calcopirita TO-2B (espesor 8 mm) y DIO-2C (espesor 3 mm) ya que, al contrario del caso de vetillas de pirita, los gráficos muestran que al aumentar el espesor se obtienen mayores resistencias. Sin embargo la escasa cantidad de datos de vetillas de calcopirita de es-

pesores mayores a 3mm no permiten concluir de forma segura que esta tendencia sea real. Un factor que puede influir en la resistencia de las vetillas de calcopirita es la presencia de cuarzo, como se ha manifestado en trabajos anteriores. Las vetillas recién mencionadas presentan cúmulos de cuarzo, visibles macroscópicamente, que podrían tender a aumentar la resistencia, como se expresa en la memoria de De los Santos (2011) en que vetillas de calcopirita masiva presentan menor resistencia que vetillas de calcopirita con cúmulos de otros minerales en ensayos de corte, es posible que un efecto similar se de en ensayos de tracción directa.

Considerando todo lo anterior se puede decir que la resistencia final de la vetilla depende tanto de la mineralogía como del espesor. La rugosidad de las vetillas parece no influir, incluso variando los ángulos.

Aunque en este trabajo no se realizó, otras variables que con seguridad influyen y se deben considerar son el tamaño y distribución de los cristales del relleno de la vetilla, datos a evaluar mediante análisis microscópico de cortes transparentes y pulidos.

Finalmente, en este trabajo se obtuvo valores de tracción que varían dentro de un rango no muy amplio, de 2 MPa, (vetillas de Py o Cpy tienen similares resistencias a pesar de sus diferentes durezas) y sus diferencias se deben a variaciones de espesor y mineralogía. Para poder determinar con certeza las relaciones entre resistencias y los parámetros de las vetillas, se debe realizar mayor cantidad de ensayos, abarcando vetillas de mayor variedad de espesores, rugosidades y mineralogías.

## **Deformación**

La comparación entre las distintas curvas de stress/strain se llevó a cabo graficando los parámetros que caracterizan la curva, estos son el strain final, stress en el límite del comportamiento elástico, módulo de elasticidad y módulos secantes. No se posee registro de análisis anteriores de deformación en ensayos de tracción de estas vetillas, por lo que tampoco es posible realizar una comparación.

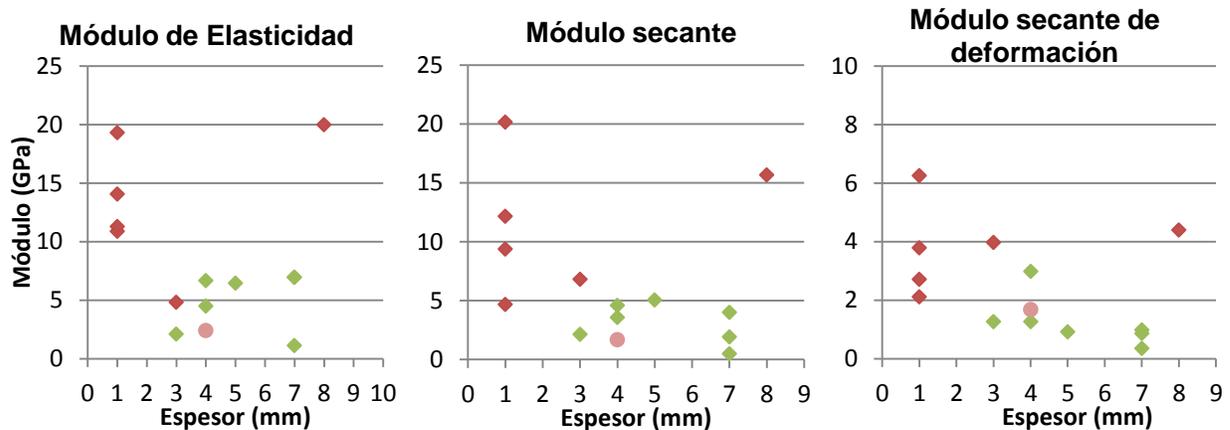
De las 21 muestras utilizadas para realizar los gráficos de resistencia según los parámetros de las vetillas, hubo algunas que no se pudo utilizar en el análisis de deformación, entre ellas se tiene las muestras ensayadas en Suecia, la única muestra mayor al largo del strain gage (TO-2), la cual presenta el registro de la deformación de sólo una parte de la vetilla, y dos muestras cuyos diagramas de stress/strain no permitieron estimar los valores necesarios debido a que la deformación era muy pequeña, cercana al error del strain gage.(NNM73B y TO-1B). Por esta razón para esta parte del estudio se utilizó sólo 16 muestras.

De los gráficos de stress en el punto de fluencia o límite del comportamiento elástico se extrae que las vetillas presentan casi el mismo rango de valores independiente de si corresponden a vetillas de pirita o calcopirita. Por tanto, ambas terminan el comportamiento elástico y comienzan su comportamiento plástico a esfuerzos de tracción similares y muy bajos.

Los módulos de elasticidad, módulo secante al 50% de stress y módulo secante al 50% de deformación muestran la situación de la deformación en tres momentos sucesivos durante el ensayo e indican cuan rígida es la vetilla en cada momento. La mayoría de las veces la pendiente de la curva en el segmento inicial recto de esta (módulo de elasticidad) es el que presenta mayor valor que los módulos secantes. Esto se observa en la Figura 62, la cual corresponde a los gráficos en función del espesor, pero sin considerar la muestra que contiene módulos sobre los 30 GPa.

Las vetillas cuyo módulo secante en el 50% de stress aplicado es mucho menor que su módulo de elasticidad son las que pierden rigidez más rápido. En este punto de la curva, las vetillas menos rígidas alcanzan hasta un 10% de su deformación.

El módulo secante en el 50% de deformación presenta valores muy inferiores a los anteriores. Las vetillas ya están debilitadas y con un mínimo aumento de stress de tracción sufren el resto de su deformación y ruptura. Aquí los valores de las vetillas de calcopirita siguen superando los de las vetillas de pirita.



**Figura 62.** Gráficos de módulo de elasticidad, secante (al 50% de stress) y de deformación (secante al 50% de deformación) versus el espesor de la vetilla.

Las vetillas de calcopirita presentan mayores módulos que las vetillas de pirita, es decir, ofrecen mayor resistencia a ser deformadas. Por otro lado, los valores mayores se tienen en las vetillas de bajo espesor, de JRC elevado (mayor a 14) y ángulo mayor a 15°. Nuevamente, para concluir si estos parámetros efectivamente ejercen alguna influencia es necesario contar con ensayos de más vetillas.

De todos modos se atribuye las diferencias iniciales, con mayor seguridad, a la mineralogía que constituye al relleno de la vetilla, pues el comportamiento mecánico depende del material. Entonces las grandes variaciones, por ejemplo, el de la muestra TO-1, puede deberse a que tiene una diferente composición mineralógica, con un poco más de cuarzo que el resto, o a la forma de inter crecimiento de los cristales.

A modo de comparación se tiene los valores de módulo de elasticidad de los distintos tipos litológicos de la mina, obtenidos en SGL-I-123/03 (2003), los que se mues-

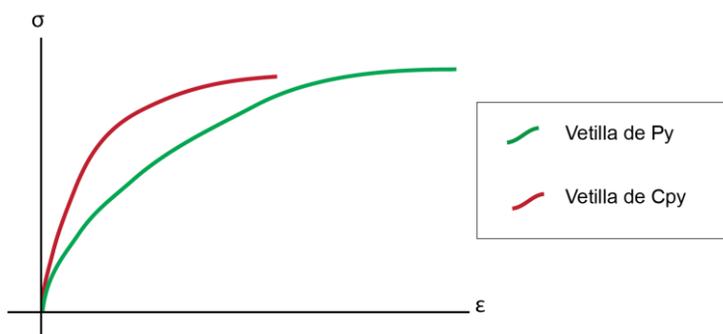
tran en la Tabla 12. Estos son notablemente mayores a los obtenidos en los presentes ensayos de tracción directa en vetillas (a excepción de la vetilla de pirita TO-1). Al ser la roca intacta mucho más rígida, prácticamente la totalidad de la deformación sucede en la vetilla.

**Tabla 12.** Módulo de elasticidad E de distintas litologías de El Teniente obtenidos a partir de ensayos geotécnicos. (SGL-I-123/03, 2003)

Litología	E (GPa)	Coefficiente variación (%)
CMET primario	60	20
Pórfido Dacítico	30	30
Diorita	45	20
Brecha Braden	25	25

Con respecto al strain total alcanzado, se puede decir que las vetillas de pirita presentaron mayores deformaciones que las de calcopirita. Estas se traducen en deformaciones de hasta 0,02 mm antes de producirse la ruptura. La Figura 60 sugiere que una mayor deformación es presentada por las vetillas de mayor espesor y de menor ángulo. Una de las muestras que escapa a esta tendencia es la TO-1, con el strain más bajo.

La Figura 63 muestra un esquema comparativo entre una curva de stress/strain de una vetilla de pirita y otra de calcopirita, en ella se muestra que la vetilla de pirita presenta una curva más suave (módulos menores que los de vetillas de calcopirita) y más extensa (mayor strain total)



**Figura 63.** Esquema de curva de stress/strain en vetilla de pirita y calcopirita. Ambas empiezan su comportamiento plástico a bajo stress. Las vetillas de pirita presentan menor módulo de elasticidad y menores módulos secantes al 50% de stress y 50% deformación, por lo que tiene menor pendiente y se curvan más suavemente que las vetillas de calcopirita. Además alcanzan mayores valores de strain total.

## 8. CONCLUSIONES

En el presente estudio se ha buscado determinar como la resistencia a la tracción de las vetillas de El Teniente depende de las características mineralógicas y geométricas de éstas. Para ello se describió y analizó los resultados de 19 muestras ensayadas en IDIEM y, adicionalmente, se agregaron los resultados de 2 muestras ensayadas en la SP de Suecia también en tracción directa.

Las vetillas estudiadas presentan resistencias a la tracción que van desde 0,5 a 2,7 MPa. La mayoría de las muestras corresponde a vetillas V10, V11 y V12, cuyo relleno característico corresponde a pirita y/o calcopirita mayoritaria, con halo sericítico clorítico silíceo que difiere para cada subtipo en si es simple o doble. De acuerdo a lo anterior se realizó el análisis separando vetillas de pirita y calcopirita. La influencia del halo de la vetilla no fue evaluada puesto que se contó con solo dos muestras sin halo, los datos que permitirían realizar comparaciones son escasos.

A partir de la información extraída de los gráficos expuestos en este trabajo, se puede interpretar lo siguiente:

El porcentaje de minerales duros, considerando como tal aquellos que tienen dureza de Mohs mayor a 4,5 (cuarzo y pirita), no determina por si solo el valor de la resistencia y no se encuentra una relación clara al evaluar ambos valores manteniendo fijo el espesor o el JRC, pero se encontró que las vetillas de pirita (mineral de dureza alta, 6,5 en la escala de Mohs) tienen, en general, mayor resistencia a la tracción directa que las vetillas en las que predomina la calcopirita, en el rango de espesor de 1 a 4 mm, por lo que coincide con lo observado en ensayos de tracción indirecta anteriores, donde a mayor cantidad de minerales duros, mayor resistencia tiene la vetilla.

Con respecto al espesor de la vetilla, los datos disponibles indican que las vetillas de pirita disminuyen su resistencia al aumentar el espesor y que las vetillas de calcopirita se comportan al revés, al aumentar el espesor aumenta la resistencia. Sin embargo el caso de la calcopirita posee pocas muestras de espesor mayor a 4 mm por lo que esta tendencia puede deberse a otras causas. La relación debe ser comprobada con más muestras.

La rugosidad medida en la interfase vetilla/halo no parece influir en la resistencia, aun cuando la vetilla está inclinada y produzca un efecto de corte en vetilla. Tampoco hay correlación con el JRC de la superficie de ruptura.

Los gráficos de ángulo de vetilla con respecto al plano ortogonal a la dirección del esfuerzo de tracción aplicado tampoco muestran correlación con la resistencia.

Las vetillas de pirita y calcopirita tienden a romperse por el relleno de la vetilla (ruptura clase V) y en segundo lugar por contacto vetilla/halo (clase C).

Los parámetros mineralógicos y geométricos no muestran una influencia clara sobre la clase de ruptura en los gráficos presentados, los que en general muestran una distribución irregular, a excepción de las siguientes observaciones: La ruptura mixta aparece mayoritariamente en vetillas con JRC alto, 18-20 y con ángulo superior a 10°,

además, ocurre en muestras que poseen más vetillas secundarias con rellenos más blandos, como anhidrita y biotita, por donde se propaga parcialmente la ruptura.

En general no se encuentran discrepancias entre los resultados de los ensayos presentados y los ensayos de tracción indirecta realizados con anterioridad. Solo el caso de la tendencia creciente de la resistencia con el espesor de las vetillas de calcopirita contradice lo señalado en la bibliografía, pero no es concluyente debido a la escasez de datos.

En relación a la comparación de los gráficos de stress versus strain, se concluye que:

El stress del punto de fluencia, considerado como el punto donde acaba el comportamiento lineal de la curva, de las vetillas de pirita y calcopirita están dentro del mismo rango (0,25-5 MPa), en algunos casos las vetillas de pirita obtienen un valor inferior (0,1 MPa). Estos bajos valores indican que el comportamiento plástico comienza a bajo stress.

Los módulos de elasticidad, secante en el 50% de stress y en el 50% de deformación son mayores en las vetillas de calcopirita. Lo que indica que estas son más rígidas. Los parámetros geométricos no muestran una influencia clara.

Por otro lado, las vetillas de pirita alcanzan un strain total mayor que las vetillas de calcopirita. Este strain total parece tener una relación con el espesor de la vetilla y su ángulo, con algunas excepciones. A mayor espesor, mayor strain total y a mayor ángulo, menor strain.

Finalmente, se recomienda continuar con este estudio, agregando mayor cantidad de muestras las cuales posean variedad de espesores, ángulos, rugosidades y distintos subtipos, para mejorar la caracterización de las vetillas de pirita y calcopirita y sumar información de vetillas con otros rellenos.

Se recomienda también, realizar ensayos en muestras de roca intacta para poder comparar la resistencia a la tracción directa y deformación de las distintas litologías de la mina con la de las vetillas y con las resistencias ya conocidas por ensayos de tracción indirecta.

## 9. REFERENCIAS

- Aguirre, L. 1960.** Geología de Los Andes de Chile Central. Provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile. Bol. N ° 9.
- 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). Antofagasta.
- Arévalo, A. & Floody, 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. 158p.
- Arredondo, C. 1994.** Distribución, caracterización & génesis de los cuerpos de brecha en el sector central-este del yacimiento El Teniente. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 99 p.
- ASTM International. 2001.** Standard Test Method for Direct Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. D2936 – 95.
- Barton, N. y Choubey, V. 1977.** The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics. Viena, Austria. Rock Mechanics 12, p. 1-54.
- Börgel, R., 1983.** *Geografía de Chile*, Tomo Geomorfología. Instituto Geográfico Militar Colección Geografía de Chile. 182 p.
- Brown E.T. 1981.** Rock Characterisation Testing and Monitoring, suggested methods. International Society for Rock Mechanics. London, Pergamon
- Brzovic, A. 2001.** Fundamentos Geológicos Para un Sistema De Clasificación Geotécnica Del Macizo Rocosó Primario, Mina El Teniente. *Hundibilidad Fase I, API-T01m101 – G1187 / 01*. Rancagua.
- Brzovic, A. y Benado, D. 2003.** Sistema de Clasificación Geotécnico Roca Primaria Mina El Teniente. Superintendencia de Geología. CODELCO, El Teniente. Informe Inédito. SGL-I-05/2003. 119p.
- Brzovic, A. y Figueroa, C. 2009.** Caracterización de las estructuras geológicas que definen la fragmentación durante el hundimiento de la mena primaria en mina El Teniente, Chile. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente. Rancagua, Chile.
- Brzovic, A. y 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.*, Vol. 44,; 565-583.
- 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 p.
- Camus, E. 1975.** Geology of the El Teniente ore body with emphasis on wall-rock alteration: *Economic Geology*, V. 70, p. 1.341-1.372.

**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.

**Cannell, J. 2004.** El Teniente Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Central Chile. Ph.D. Thesis, University of Tasmania (Inédito), 317 pp., Tasmania.

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

**Charrier, R. 1981.** Mesozoic and Cenozoic stratigraphy of the Central Argentinean-Chilean Andes (32°-35°S) and chronology of their tectonic evolution. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Stuttgart*. Vol 1 (3-4): 344-355.

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

**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.

**Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J., Gans, P., Kay, S., Muñoz, N., Wyss, A. & Zurita, E. 2002.** Evidence for cenozoic extensional basin development and tectonic inversión south of the flat slab segment, Southern Central Andes, Chile (33°-36° L.S.). *South American Earth Sciences*, 23 p.

**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, M., Novacek, N. 1996.** New evidence for Late Mesozoic-Early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the Upper Tinguiririca Valley (35° S, Central Chile). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 9, N° 5/6, Departamento de Geología Universidad de Chile, p. 393-422.

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

**Davidson, J. & Vicente, J. 1973.** Características paleogeográficas & estructurales del área fronteriza de las Nacientes del Teno (Chile) & Santa Elena (Argentina) (Cordillera Principal, 35° a 35°15' latitud S). Actas del Quinto Congreso Geológico Argentino, Vol. 5, p. 11-55. Buenos Aires.

**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 p. Concepción.

**DICTUC, S.A. 2010,** Ensayos de laboratorio en vetillas para el Informe Geomecánico Pilares Mina Esmeralda, Reporte técnico (inédito), Universidad Católica. Santiago, Chile.

**Drake, R., Charrier, R., Thiele, R., Munizaga, F., Padilla, H., Vergara, M. 1982.** Distribución & edades K-Ar de volcanitas post Neocomianas en la Cordillera Principal entre 32° & 36° Latitud

Sur. Implicaciones estratigráficas & tectónicas para el Meso-Cenozoico de Chile Central. Proceedings 3º Congreso Geológico Chileno, Concepción, v.1, p. D 42-D-78.

**Enrione, A. 1972.** Estabilidad de los terrenos del área de Alto Colón. Sociedad Minera El Teniente, Departamento de Geología. Inédito, 10 p.

**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** Engineering Behaviour of Rocks. Segunda Edición

**Faunes, A. 1981.** Caracterización de la mineralogía metálica & de alteración en un sector del stock tonalítico del yacimiento El Teniente. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología, 175 p.

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

**Gana, P. & Wall, R. 1997.** Evidencias geocronológicas Ar40/Ar39 & K-Ar de un hiatus Cretácico Superior-Eoceno en Chile Central (33º-33º 30' S). Revista Geológica de Chile N° 24, 145-163.

**Garrido, I., Riveros, M., Cladouhos, T., Espiñeira, D. & Allmendinger, R. 1994.** Modelo geológico-estructural, yacimiento El Teniente. Actas del VIII Congreso Geológico Chileno, Vol. 2, p. 1553-1558, Concepción.

**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.

**Gavia, B. 2005.** Resistencia en vetillas selladas del yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología & Geofísica (Inédito): 86 pp., Santiago.

**Godoy, E. 1993.** Geología del Área entre los ríos Claro del Maipo & Cachapoal, Volumen I: Texto & Mapas, 67 p. Informe Final Proyecto CODELCO & SERNAGEOMIN.

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

**Gómez, R. 2001.** Geología de las unidades volcanogénicas cenozoicas del área industrial de la mina El Teniente, entre Colón & Coya, Cordillera Principal de Rancagua, VI Región. El Teniente. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 143 p.

**Hevia, B. 1984.** Estudio Geotécnico De Probetas De Testigos De Sondajes Sometidas A Ensayos De Mecánica De Rocas. Informe De Práctica. *Departamento De Geología División El Teniente Codelco*, Inédito. Rancagua

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

**Jacobsson, L. & Flansbjer, M., Brzovic, A. & De los Santos, C. 2010.** Direct shear and tensile test on cemented healed joints from El Teniente mine, Chile.

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

**Kay, S. & Kurtz, A. 1995.** Magmatic and Tectonic Characterization of the El Teniente Region. Informe Inédito, 180 p. CODELCO-Chile, División El Teniente. 180 pp.

**Kay, S., Mpodozis, C., Ramos, V. & Munizaga, F. 1991.** Magma source variations for mid-late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the Central Andes (28-33°S), in Harmon, R., Rapela, C., eds., *Andean magmatism and its tectonic setting: Geological Society of America Special Paper 265*, p. 113-137.

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

**Kurtz, A., Kay, S., Charrier, R. & Farrar, E. 1997.** Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, Central Chile (34°-35°). *Revista Geológica de Chile*, Vol. 16. p. 145-162.

**Maksaev, V. and Zentilli, M. 2002.** Chilean strata-bound Cu- (Ag) deposits: An Overview. In - Porter, T.M. (Editor), 2002 - *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global perspective*, volume 2; PGC Publishing, Adelaide, Australia, pp. 185-205.

**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*, p.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.

**Munizaga, F., Maksaev, V., Mathur, R., Ruiz, J., McWilliams, M. & Thiele, K. 2002.** Understanding molybdenite Re-Os ages from the El Teniente porphyry copper deposit, Chile. 2002 Denver Annual Meeting (October 27-30, 2002), paper N° 152-5, 1 p.

**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. 112p.

**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.

**Pilger, R. 1981.** Plate reconstruction, a seismic ridges and low angle subduction beneath the Andes. Geological Society of American Bulletin, Vol. 92, p. 448-456.

**Rivera, O & Cembrano, J. 2000.** Modelo de formación de cuencas volcánotectónicas 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 volcánico-tectónicas transversales Oligoceno-Miocenas en los alrededores del Yacimiento El Teniente (33° 45'-34° 30' S). IX° Congreso Geológico Chileno, Puerto Varas, v.1, pp. 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 & 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 p.

**Rojas, E.; Molina, R. & Cavieres, P. 2001.** Preundercut caving in El Teniente mine, Chile. En Hustrulid, W. R. & Bullok, R. (Eds.) Underground Mining Methods; engineering fundamental and international case studies. Colorado, SME.

**SGL-I-123/03, 2003.** Estándares & Metodologías de Trabajo para Geología de Minas Actualización Año 2003. Superintendencia Geología, División El Teniente, CODELCO-Chile. Alto Colón, Chile.

**Sillitoe, R. H. & Perelló, J. 2005.** Andean copper province: tectomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume, p. 845-890.

**Skewes, A. 1997.** Informe petrológico preliminar del sector oriental del perfil 124 en El Teniente. Informe Inédito. Departamento de Geología, Superintendencia de Geología, División El Teniente, CODELCO-Chile 49 p.

**Skewes, M.A. 1999.** Notas petrográficas sobre algunas Brechas de El Teniente: Informe Inédito. Departamento de Geología, Superintendencia de Geología, División El Teniente, CODELCO-Chile. 34 p.

**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.

**Skewes, M. & Stern, Ch. 1995.** Genesis of the Giant Late Miocene to Pliocenecopper deposits of Central Chile in the context of Andean magmatic and tectonic evolution. International Geology review, Vol. 37, p. 893-909.

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

**Spröhnle, C. 1990.** Exploración sector sur-este mina El Teniente. Informe GL-402/90. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente. 8 p. Inédito.

**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.

**Stewart, J. & Araya, R. 1972.** Programa de exploración minera SOMEX-IIG en la alta Cordillera de los Andes entre los paralelos 34°10' & 35°10' latitud sur. Instituto de Investigaciones Geológicas, Informe inédito, 65 p. Santiago, Chile.

**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 p.

**Willoner, A. 2000.** Characterization of rock mass quality and prediction of mass behaviour; an investigation into the parameters which influence the strength of healed joints in hypogene mineralized andesite at El Teniente Copper mine, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. The University of Leeds, School of Earth Sciences (Inédito): 82 pp.

**Thiele, R. 1980.** Carta Geológica de Chile N°39. Hoja Santiago, escala 1:25.000. Instituto de Investigaciones Geológicas Chile, 51 p.

**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 p.

## **ANEXO A**

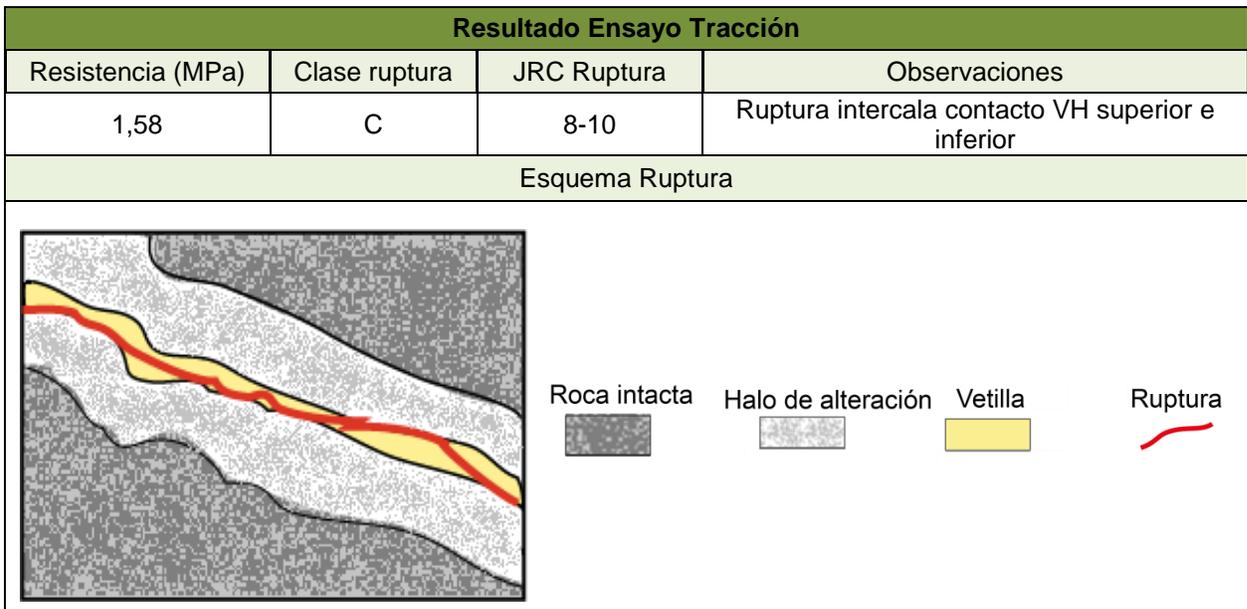
**Descripciones de las muestras (Mineralogía, geometría y resultados del ensayo de tracción directa)**

Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>NNM-23</b>	HP	V12	CMET	50

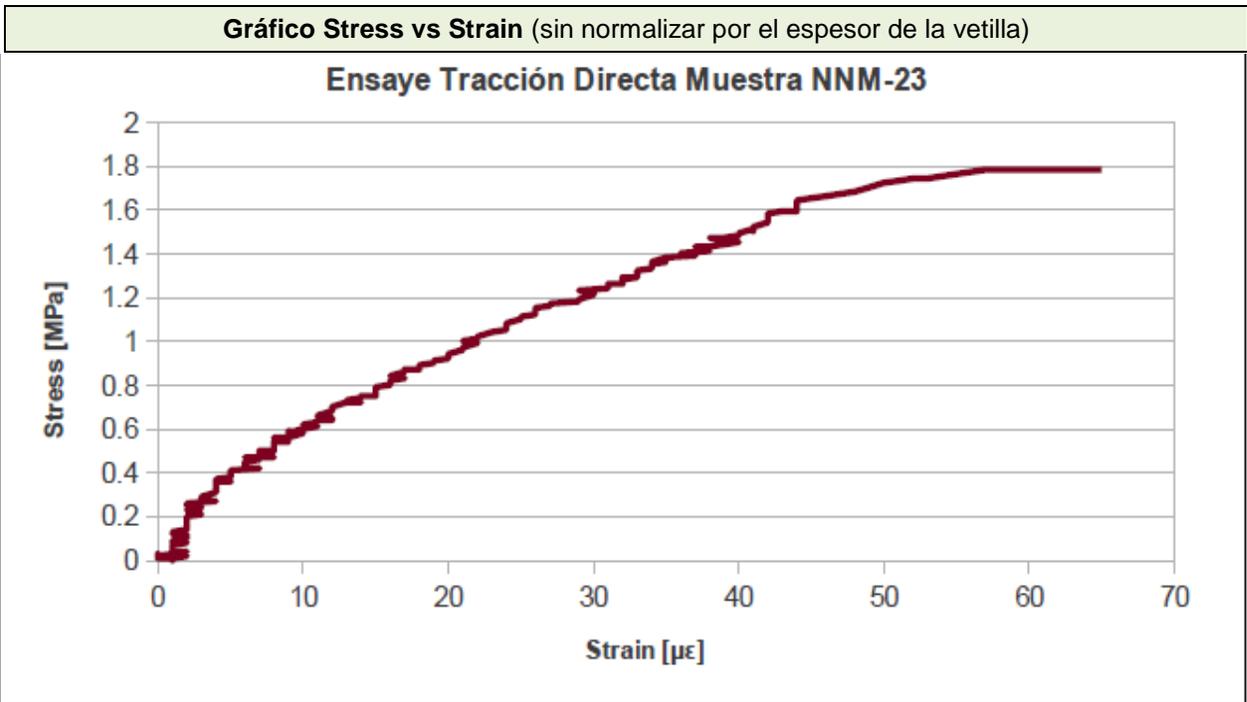
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	50	Silíceo-sericítico-clorítico. Cpy diseminada en el halo exterior
Anhidrita	30	
Cuarzo	15	
Clorita	5	
Observaciones		
Cúmulos de Cpy y Anh y Qz. Cl diseminada		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
20		16-18
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
1	2	1
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
4	8	6
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido e irregular		





Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	606	Módulo de elasticidad (GPa)	11,3	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,26	Módulo secante stress (GPa)	4,7	Módulo secante deformación (GPa)	3,8

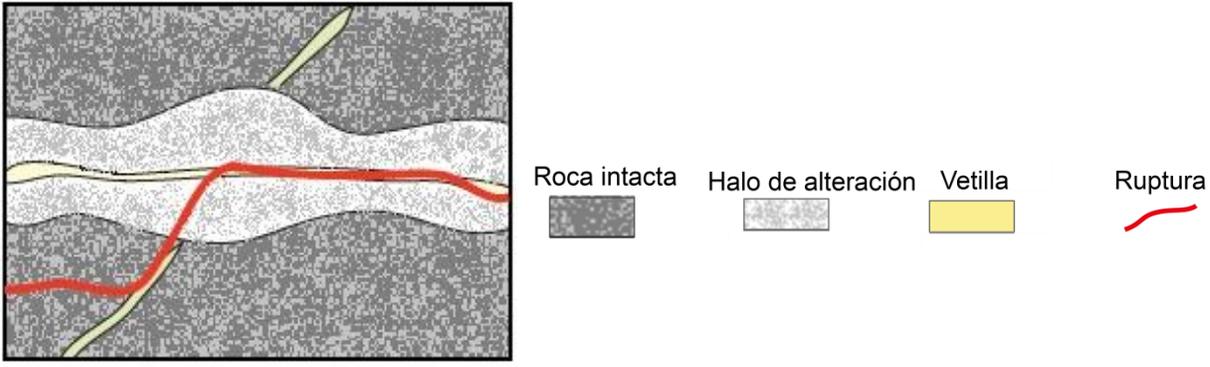


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>NNM-45B</b>	HP	V11	CMET	68

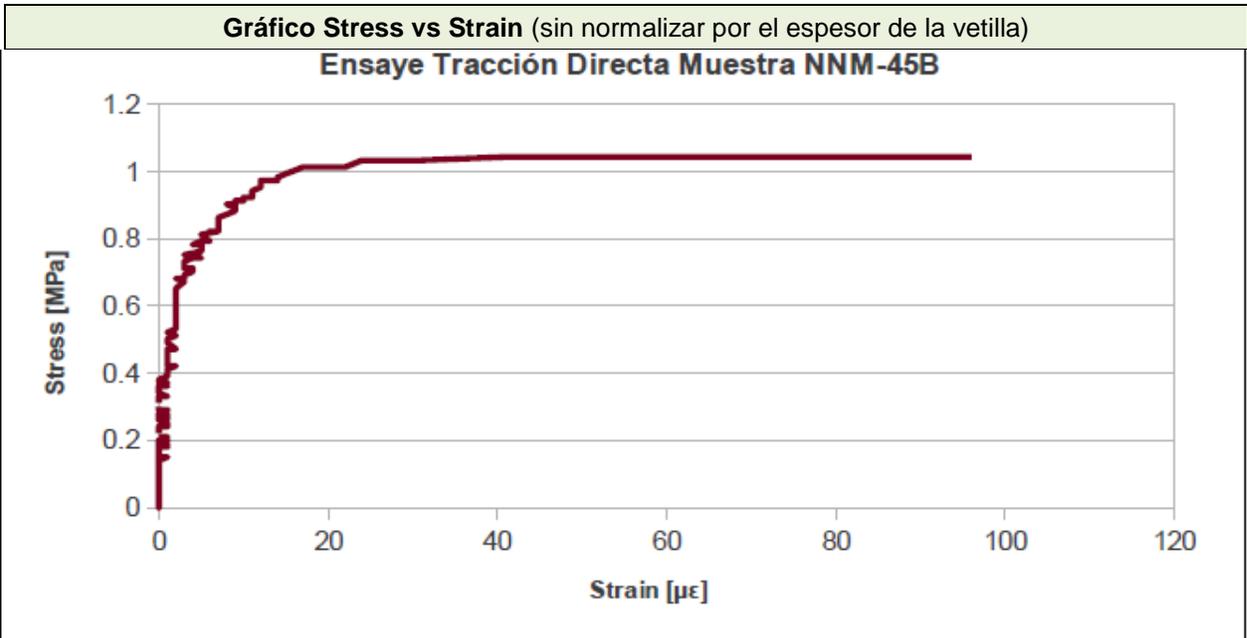
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	50	Síliceo- sericítico
Biotita	25	
Anhidrita	25	
Observaciones		
Cpy masiva, con Qz y Anh en cúmulos		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
15		18-20
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
2	1	1
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
9	3	5
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido e irregular		



Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
0,97	M	18-20	Ruptura mixta, ocurre un 50% por la vetilla descrita (V), otra porción ocurre por vetillas V6 de espesor $\leq 1$ y por roca (R).
Esquema Ruptura			
			

Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	917	Módulo de elasticidad (GPa)	19,3	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,5	Módulo secante stress (GPa)	20,1	Módulo secante deformación (GPa)	2,1

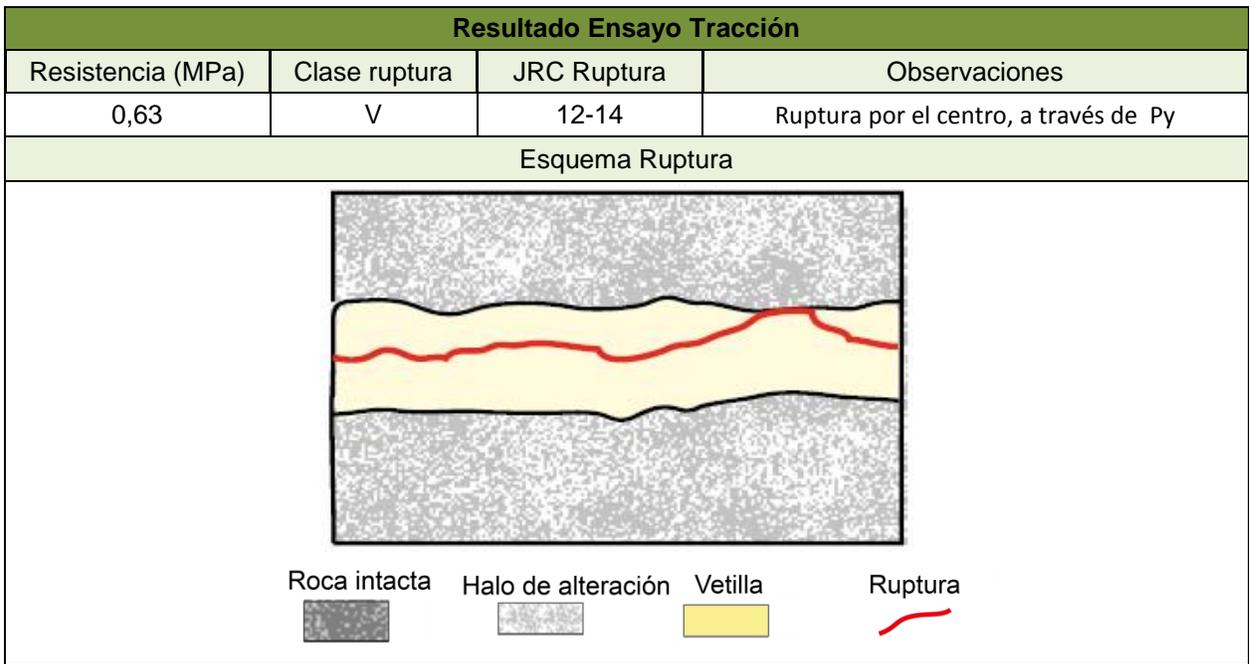


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>TO-2</b>	HP	V10	Tonalita	65

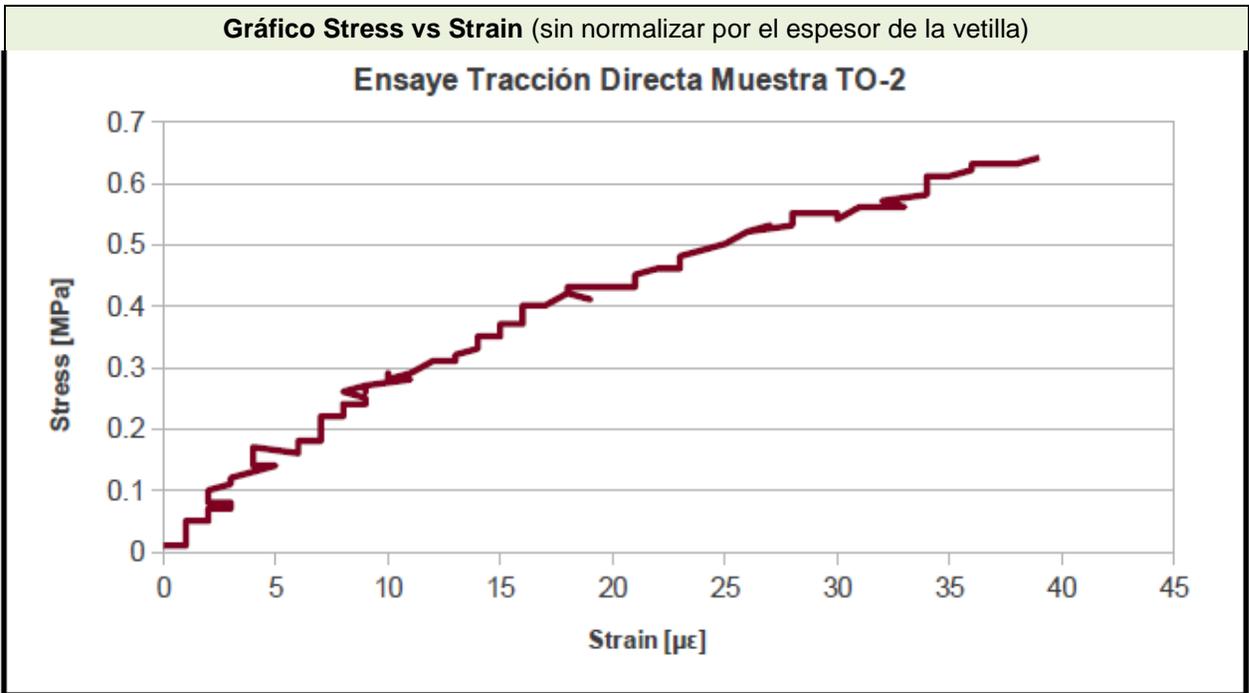
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Pirita	50	Sericítico-clorítico. Py y Cpy diseminada
Cuarzo	45	
Calcopirita	5	
Observaciones		
Py masiva al centro, con forma irregular, Qz a los bordes.		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
7		8-10
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
15	10	13
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
?	?	?
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es difuso y levemente ondulado. No se observa el límite del halo		





Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	39	Módulo de elasticidad (GPa)	37,5	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,15	Módulo secante stress (GPa)	26,8	Módulo secante deformación (GPa)	21,2

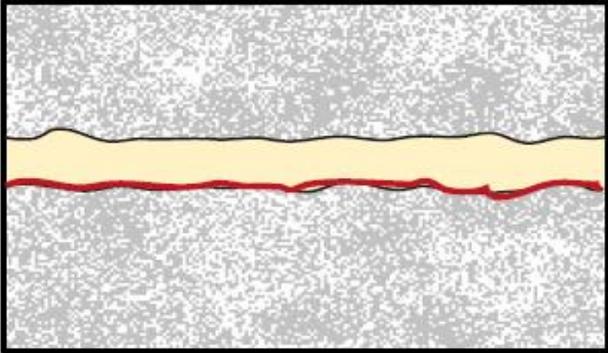


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>TO-1A</b>	HP	V10	Tonalita	74

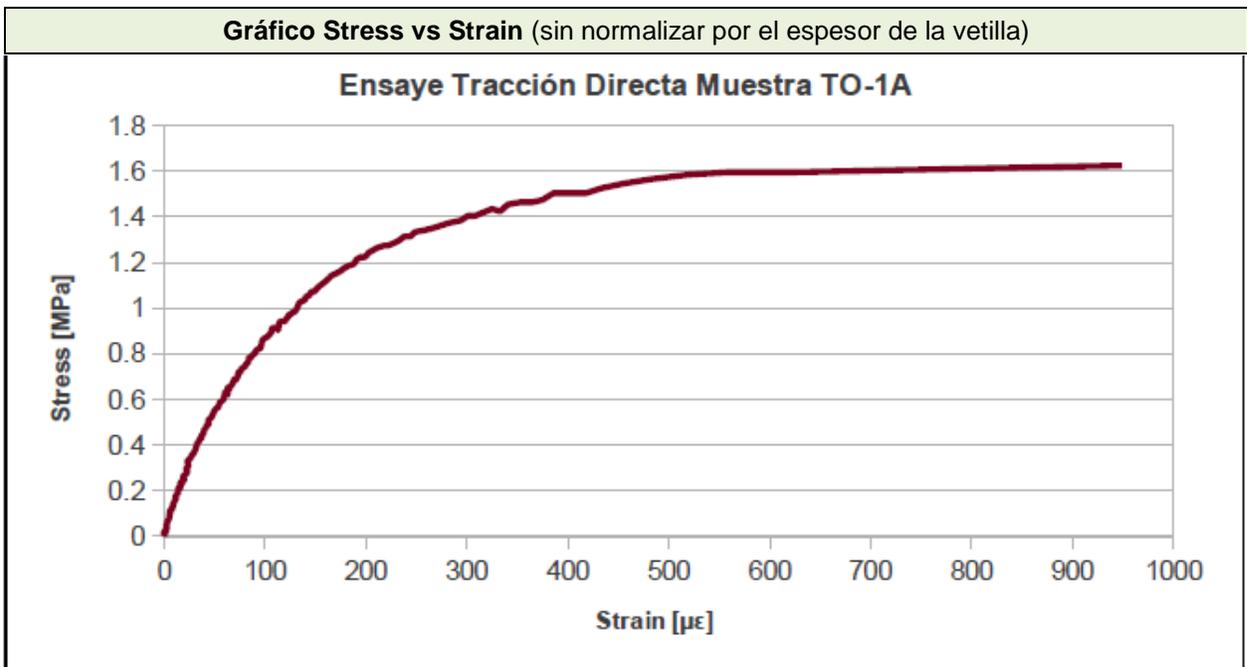
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Pirita	85	Síliceo-sericítico-clorítico
Cuarzo	10	
Anhidrita	5	
Observaciones		
Py masiva y Qz en cúmulos. Halo de 30mm, con una banda interior de 1mm síliceo.		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
10		6-8
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
4	2	4
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
30	23	25
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido y ondulado		



Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
1,58	C	8-10	Ruptura por uno de los contactos v/h
Esquema Ruptura			
			
Roca intacta	Halo de alteración	Vetilla	Ruptura
			

Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	2339	Módulo de elasticidad (GPa)	4,5	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,4	Módulo secante stress (GPa)	3,6	Módulo secante deformación (GPa)	1,3

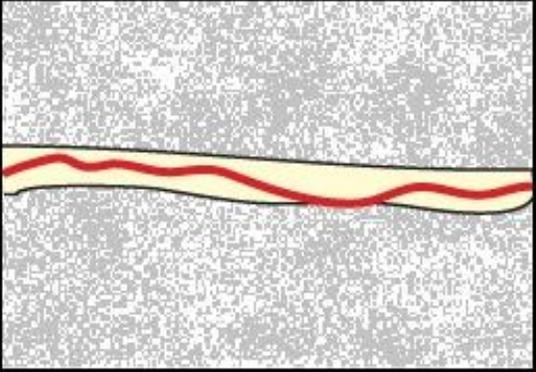
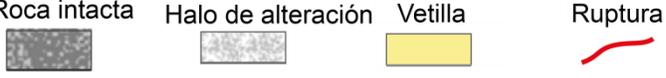


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
TO-1	HP	V10	Tonalita	65

Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Pirita	60	Sericítico clorítico. Py diseminada
Cuarzo	30	
Anhidrita	10	
Observaciones		
Py masiva, con Qz en cúmulos principalmente en los bordes de la vetilla		

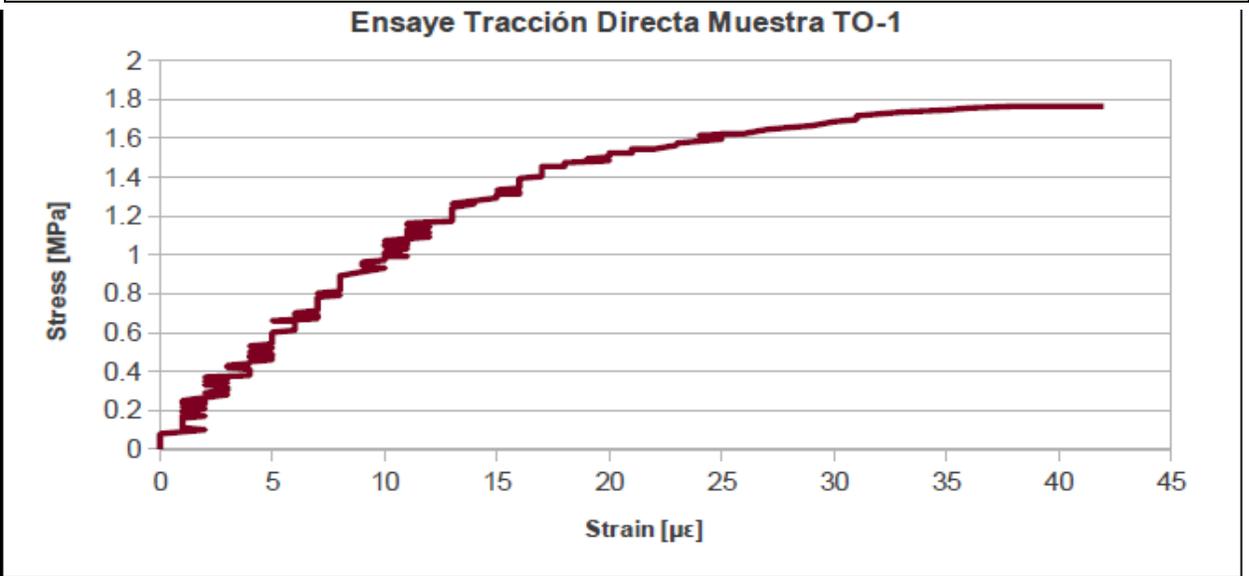
Geometría		
Ángulo (°)		JRC
0		6-8
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
4	3	4
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
?	?	?
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido y ondulado		



Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
1,76	V	14-16	Ruptura por el medio de la vetilla y en zonas cortas por ocurre por el contacto con el halo
Esquema Ruptura			
			
<p>Roca intacta    Halo de alteración    Vetilla    Ruptura</p> 			

Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	105	Módulo de elasticidad (GPa)	48	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,3	Módulo secante stress (GPa)	39,2	Módulo secante deformación (GPa)	29,5

**Gráfico Stress vs Strain** (sin normalizar por el espesor de la vetilla)

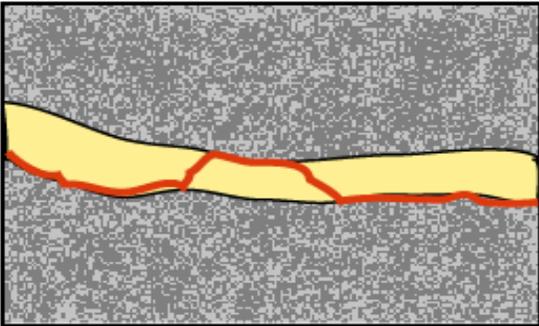


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>NNM-32D</b>	TM	V7	CMET	55

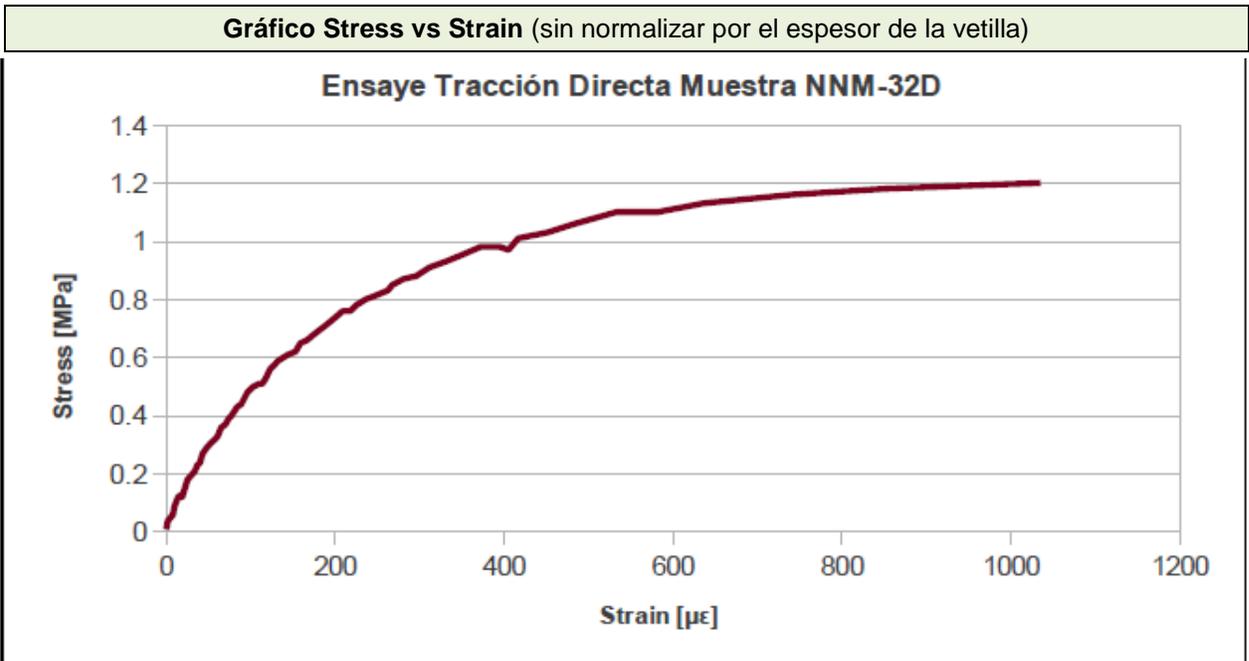
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	48	/
Bornita	35	
Cuarzo	15	
Anhidrita	1	
Observaciones		
Cpy masiva con grandes cúmulos de Bo, también hay cristales de Qz diseminados.		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
5		10-12
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
3	5	4
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
/	/	/
Observaciones		
Contacto vetilla/roca es nítido y ondulado		



Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
1,19	C	14-16	Ruptura por contacto entre vetilla y roca, intercala borde superior e inferior
Esquema Ruptura			
			
Roca intacta	Halo de alteración	Vetilla	Ruptura
			

Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	2580	Módulo de elasticidad (GPa)	2,4	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,3	Módulo secante stress (GPa)	1,7	Módulo secante deformación (GPa)	0,8

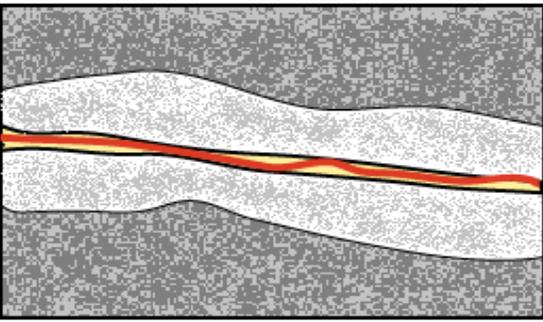


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
NNM-45D	HP	V11	CMET	50

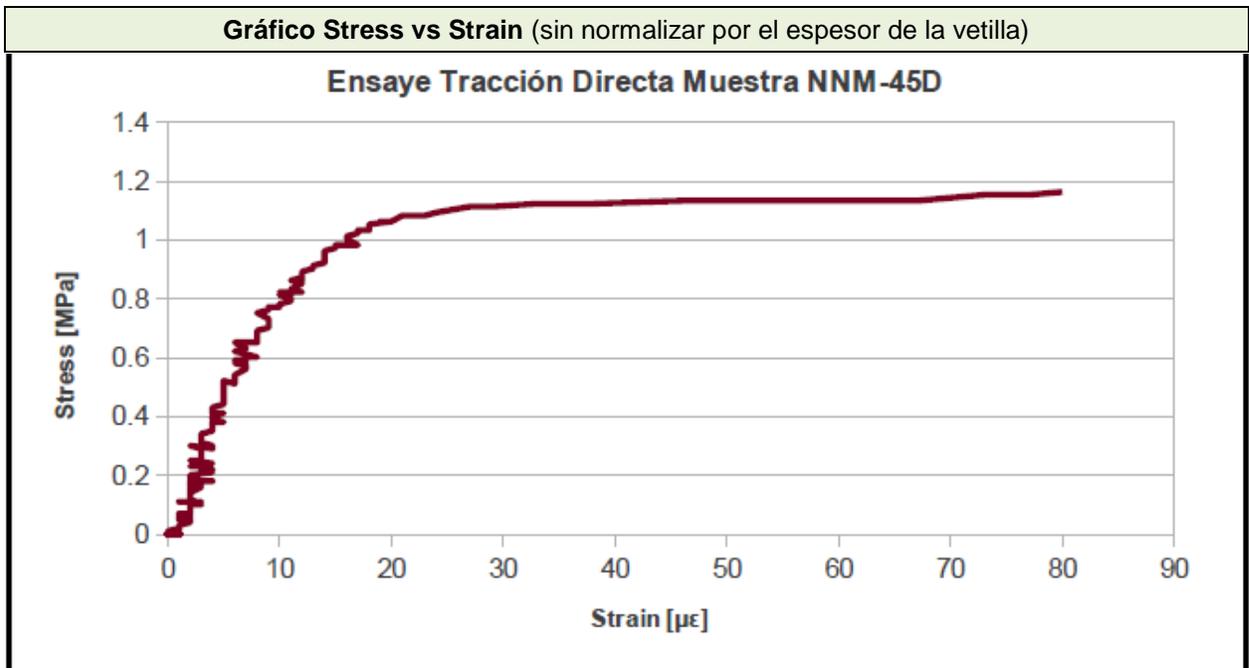
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	80	Sílicea sericítica clorítica. Cpy diseminada
Cuarzo	10	
Anhidrita	10	
Observaciones		
Cpy masiva, con Qz y Anh en cúmulos		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
15		4-6
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
1,5	1	1
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
12	5	8
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido e irregular		



Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
1,09	V	4-6	Ruptura principalmente por el medio de la vetilla.
Esquema Ruptura			
			
Roca intacta	Halo de alteración	Vetilla	Ruptura

Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	773	Módulo de elasticidad (GPa)	10,9	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,4	Módulo secante stress (GPa)	9,4	Módulo secante deformación (GPa)	2,7



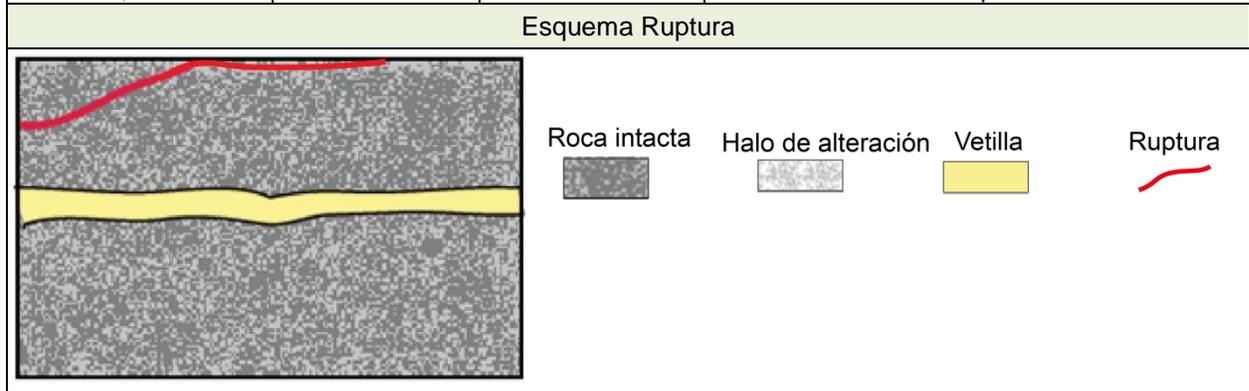
Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>NNM-41C</b>	TM	V5	CMET	4

Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Cuarzo	85	/
Anhidrita	10	
Clorita	5	
Observaciones		
Qz masivo, cúmulos de Anh y Cl diseminada		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
0		4-6
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
1	3	2
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
/	/	/
Observaciones		
Contacto vetilla/roca es nítido y recto		



Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
1,163	Anómala	-	Ruptura por roca. Despega parcialmente un cap.



Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>DIO-2C</b>	HP	V10	Pórfido Diorítico	58

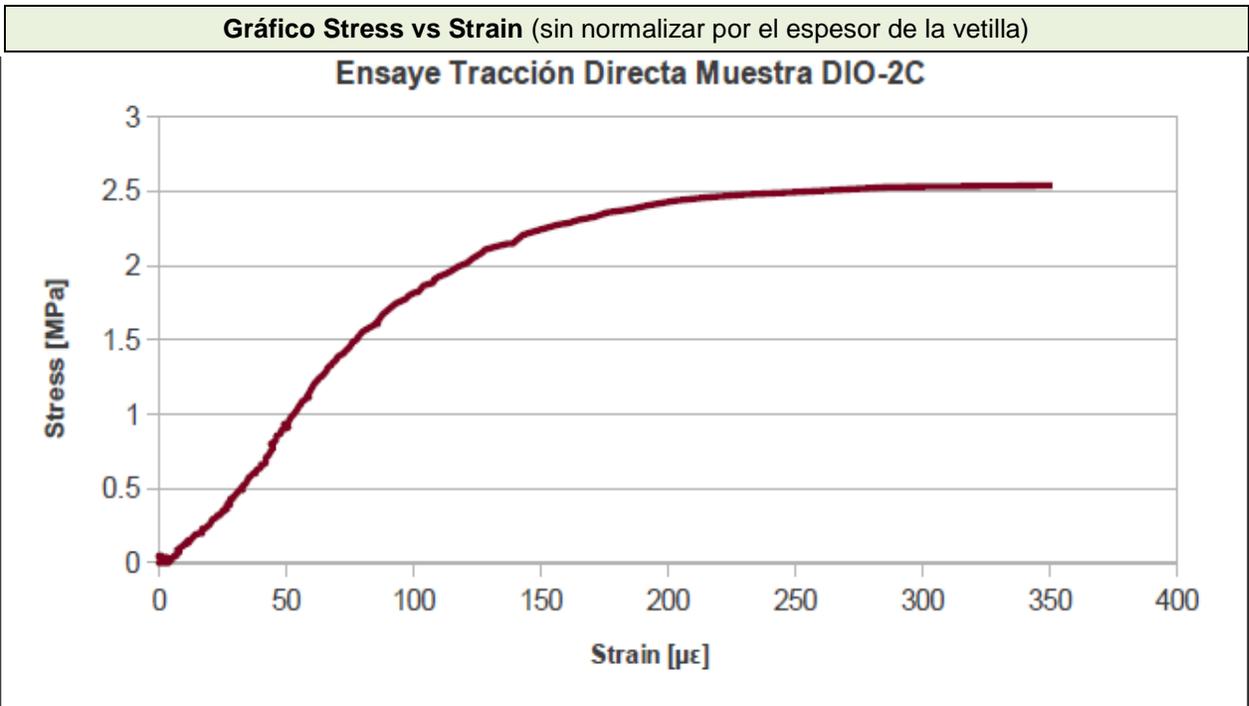
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	60	Sericítica clorítica. Cpy diseminada
Cuarzo	25	
Anhidrita	15	
Observaciones		
Cpy masiva y en cúmulos, Qz y Anh en cúmulos		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
15		2-4
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
4	3	3
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
?	19	?
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido y recto		



Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
2,37	V	6-8	Ruptura ocurre principalmente por el medio de la vetilla, hay una porción (~30%) que ocurre por el contacto VH
Esquema Ruptura			

Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	1127	Módulo de elasticidad (GPa)	4,8	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,5	Módulo secante stress (GPa)	6,8	Módulo secante deformación (GPa)	4,0



Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>NNM-45A</b>	HP	V11	CMET	80

Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	70	Sílicea sericítica clorítica. Cpy diseminada
Cuarzo	15	
Anhidrita	15	
Observaciones		
Cpy masiva con cúmulos de Qz y Anh.		

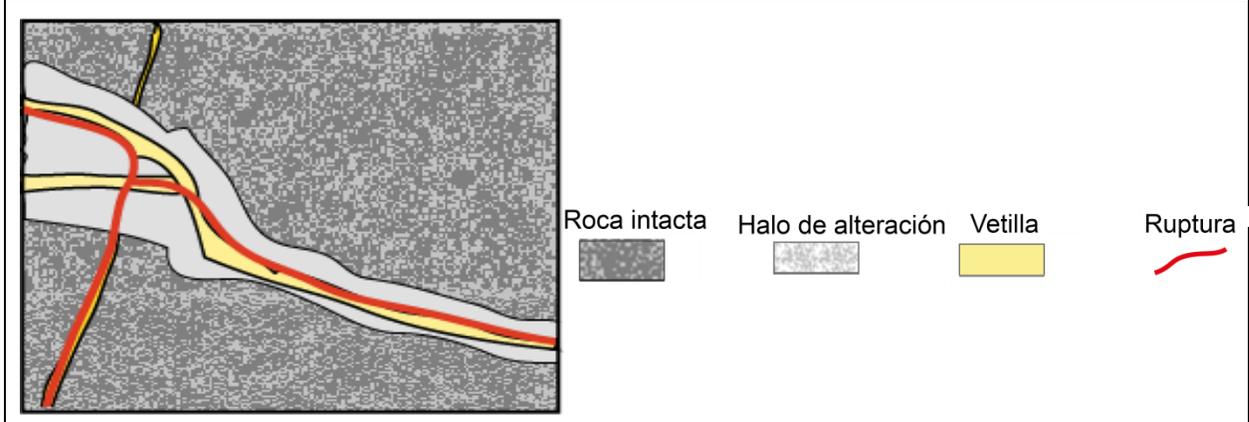
Geometría		
Ángulo (°)		JRC
30		18-20
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
2	0,5	1
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
3	1	2
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido e irregular		



**Resultado Ensayo Tracción**

Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
0,63	C	18-20	Ruptura ocurre por varios planos correspondiente a distintas vetillas que cortan el sondaje en distintas direcciones, la recién descrita es la más importante en cuanto a espesor y rompe por el contacto VH, las otras son <1mm y de tipo V6 y V3

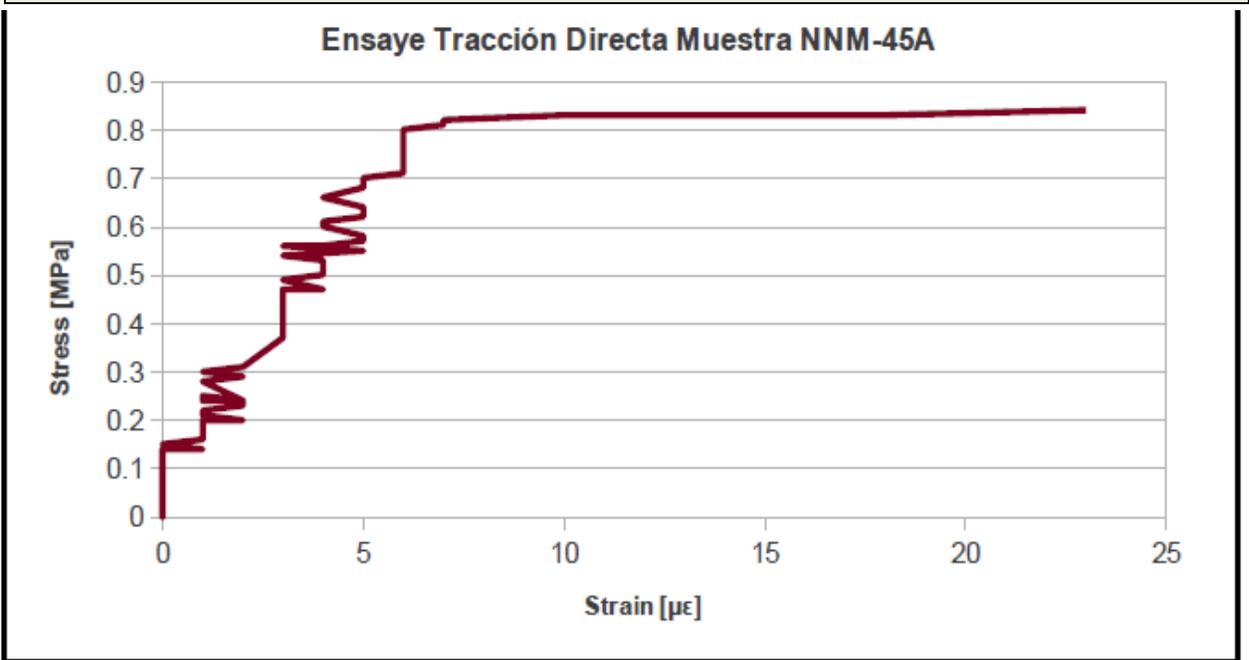
**Esquema Ruptura**



**Deformación**

Strain total ( $\mu\epsilon$ )	200	Módulo de elasticidad (GPa)	14,1	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,5	Módulo secante stress (GPa)	12,2	Módulo secante deformación (GPa)	6,3
--------------------------------	-----	-----------------------------	------	--------------------------------	-----	-----------------------------	------	----------------------------------	-----

**Gráfico Stress vs Strain (sin normalizar por el espesor de la vetilla)**



Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>TO-1A(2)</b>	HP	V10	Tonalita	65

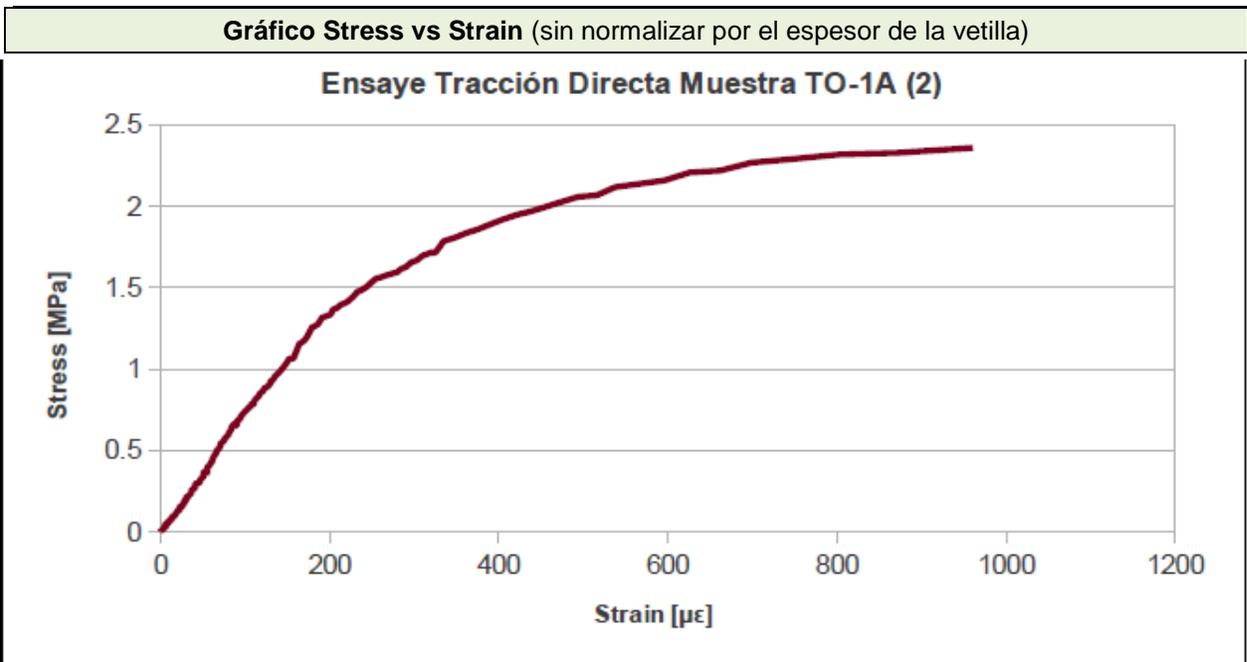
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Pirita	60	Silíceo-sericítico. Py y Cpy diseminado
Cuarzo	30	
Anhidrita	10	
Observaciones		
Qz y Py masivos, Qz principalmente en los bordes.		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
0		6-8
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
2	4	3
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
?	?	?
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido e irregular		



Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
2,36	V	16-18	Ruptura principalmente por el medio de la vetilla. En algunas ocasiones pasa por el contacto VH
Esquema Ruptura			
Roca intacta	Halo de alteración	Vetilla	Ruptura

Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	3177	Módulo de elasticidad (GPa)	2,1	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,35	Módulo secante stress (GPa)	2,1	Módulo secante deformación (GPa)	1,3

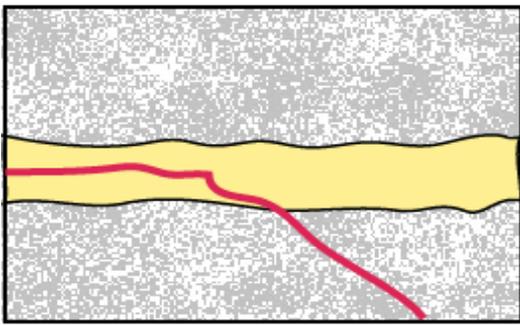


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>TO-2(2)</b>	HP	V10	Tonalita	75

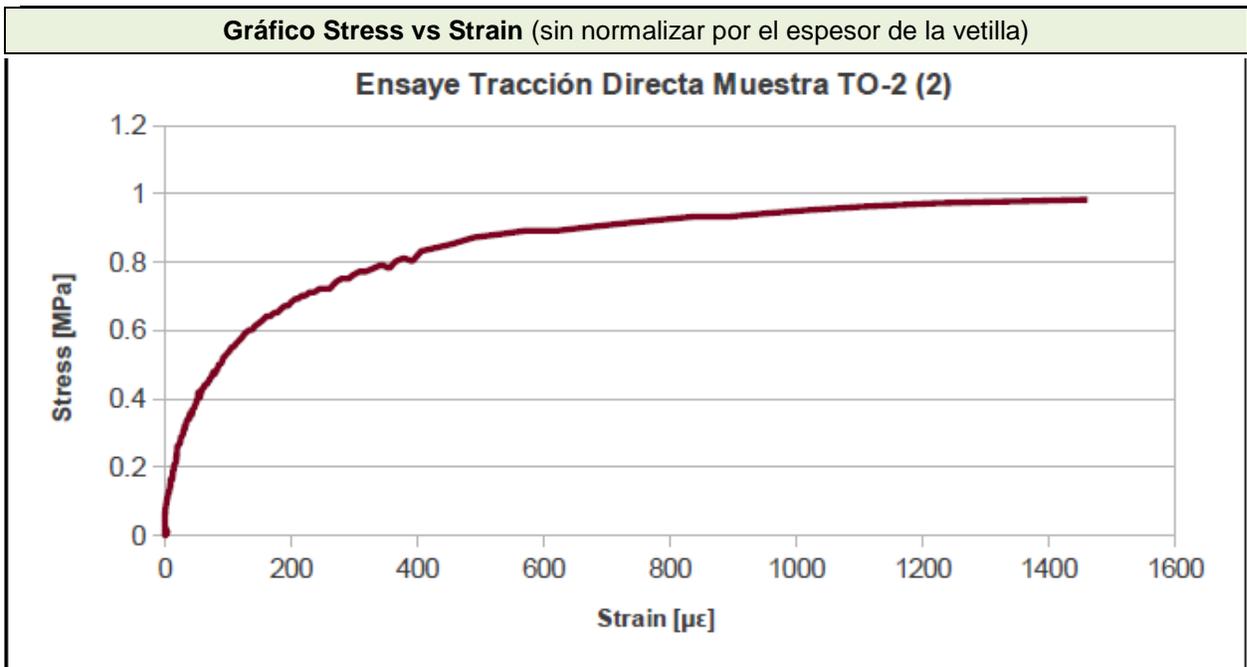
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Pirita	70	Silíceo-sericítico. Py y Cpy diseminados
Cuarzo	25	
Calcopirita	5	
Observaciones		
Py masiva con algunos cúmulos de Cpy, Qz masivo en los bordes de la vetilla.		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
8		4-6
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
5	8	7
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
5	10	10
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido e irregular		



Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
0,96	M	18-20	Ruptura ocurre principalmente en roca (R) con un ángulo de 35-40° c/r al plano ortogonal al esfuerzo. Parte menor de la ruptura ocurre por el medio de la vetilla (V).
Esquema Ruptura			
			
Roca intacta	Halo de alteración	Vetilla	Ruptura

Deformación									
Strain total (μϵ)	2051	Módulo de elasticidad (GPa)	6,9	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,1	Módulo secante stress (GPa)	4,0	Módulo secante deformación (GPa)	0,9

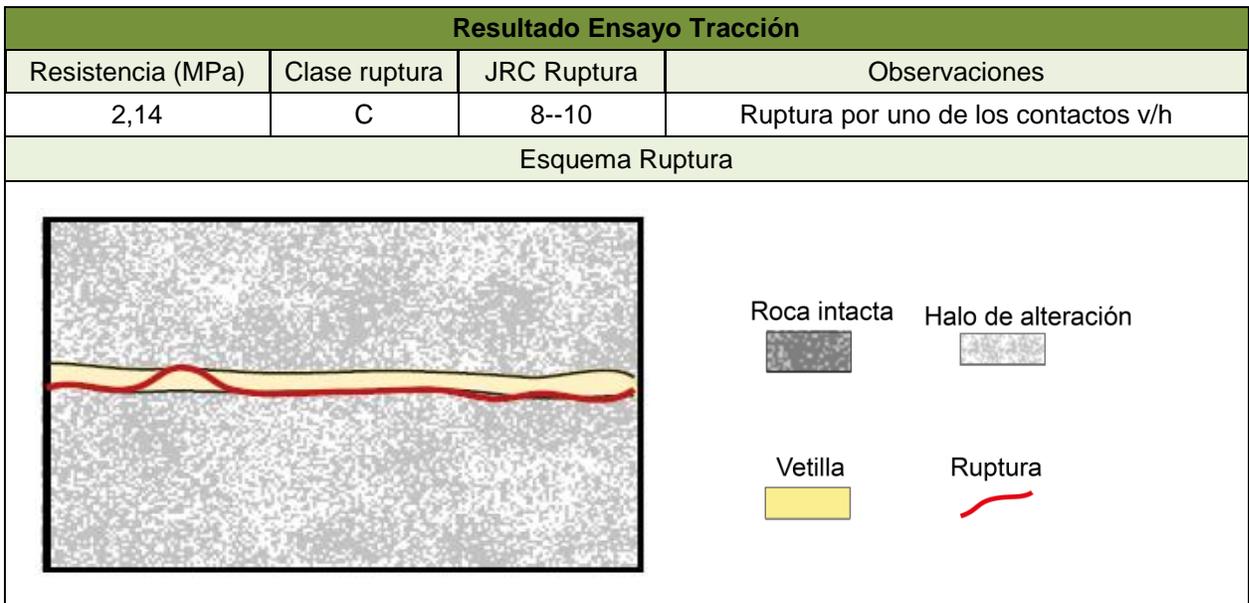


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>NNM-73B</b>	HP	V12	Tonalita	105

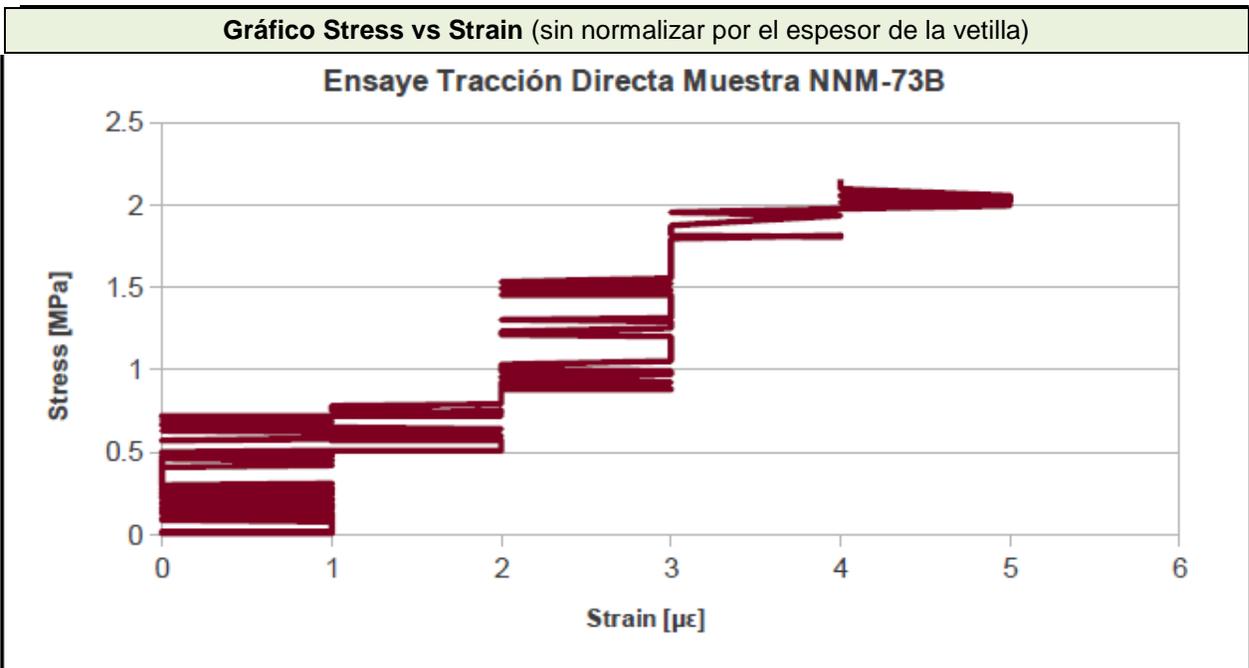
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Cuarzo	60	Sericítico-clorítico
Pirita	40	
Observaciones		
Cúmulos de Py y cúmulos de Qz. Halo presenta distintas bandas		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
5		2--4
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
2	2	2
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
25	10	20
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido y recto		





Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	25	Módulo de elasticidad (GPa)	-	Stress Punto de Fluencia (MPa)	-	Módulo secante stress (GPa)	-	Módulo secante deformación (GPa)	-

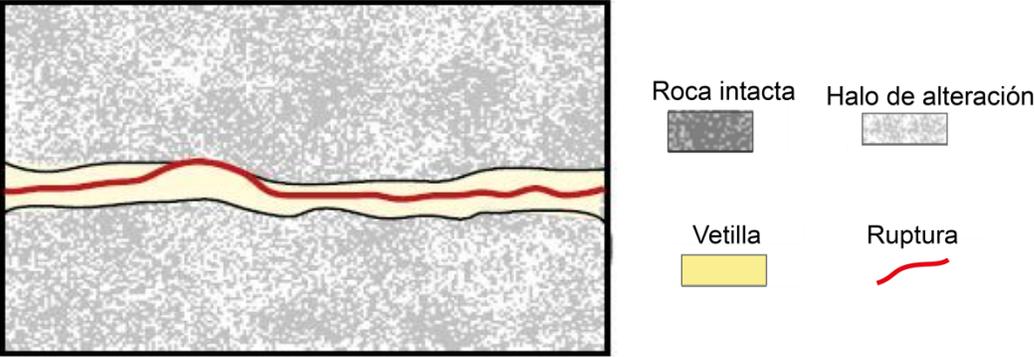


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>NNM-66D</b>	HP	V10	Tonalita	60

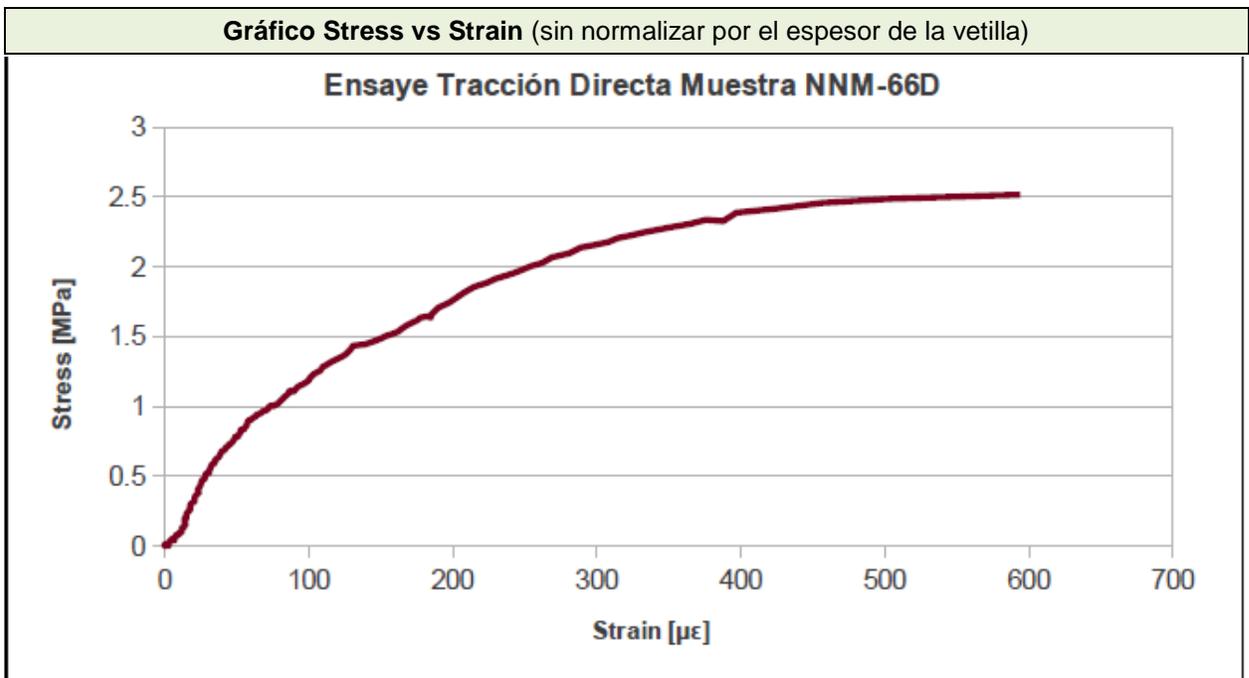
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Pirita	75	Silíceo-sericítico. Py diseminada
Anhidrita	15	
Cuarzo	10	
Observaciones		
Py masiva (granos <3mm) y cúmulos de Anh y Qz		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
0		8-10
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
5	3	4
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
?	?	?
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es difuso e irregular		



Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
2,52	V	10-12	Ruptura principalmente por el centro de la vetilla y en algunos casos por el contacto v/h
Esquema Ruptura			
			

Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	1475	Módulo de elasticidad (GPa)	6,7	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,5	Módulo secante stress (GPa)	4,6	Módulo secante deformación (GPa)	3,0

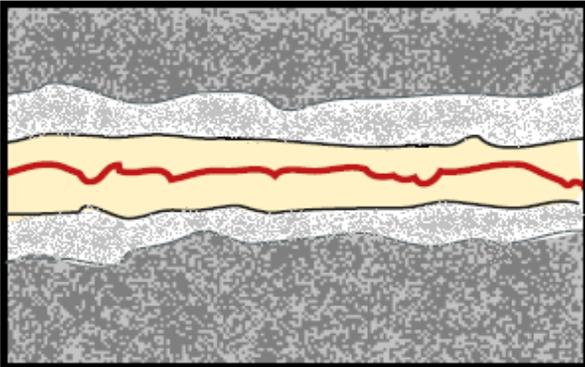


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>TO-3A</b>	HP	V10	Tonalita	64

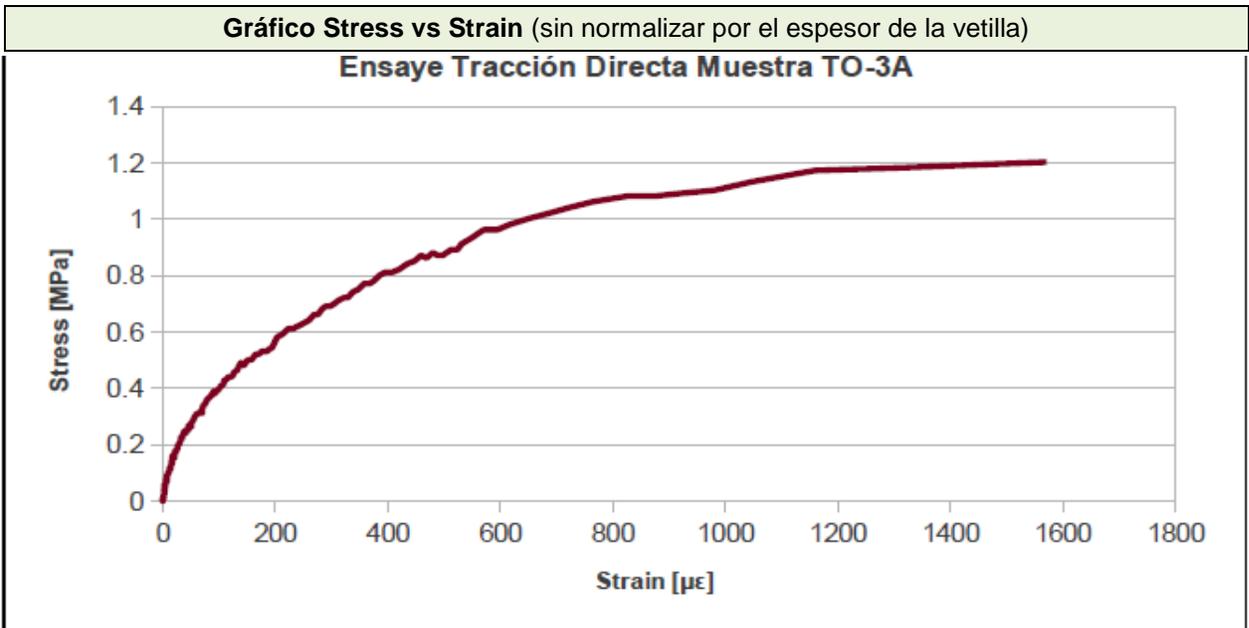
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Pirita	60	Silíceo-sericítico
Cuarzo	25	
Calcopirita	10	
Anhidrita	5	
Molibdenita	Traza	
Observaciones		
Py y Qz masivos, escasos cúmulos de Anh y de Cb. Halo difuso e irregular con escasa py diseminada		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
5		8-10
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
9	5	7
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
5	2	4
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido y ondulado		



Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
1,19	V	12-14	Ruptura por el medio de la vetilla.
Esquema Ruptura			
			

Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	2220	Módulo de elasticidad (GPa)	7,0	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,1	Módulo secante stress (GPa)	1,9	Módulo secante deformación (GPa)	1,0

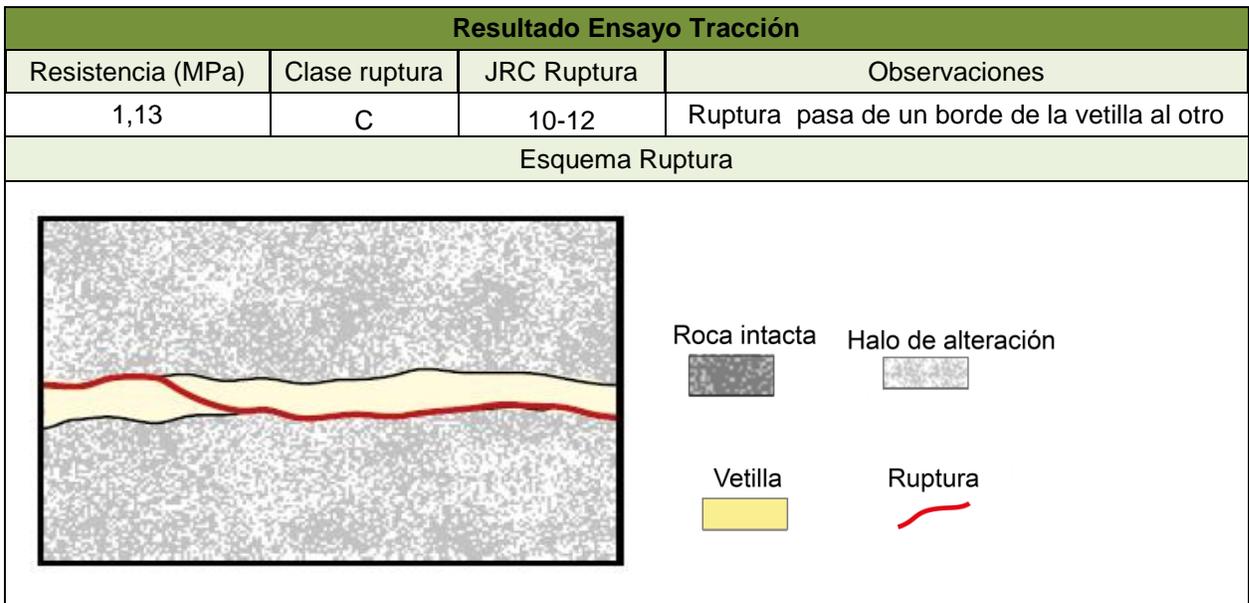


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>TO-1B</b>	HP	V10	Tonalita	45

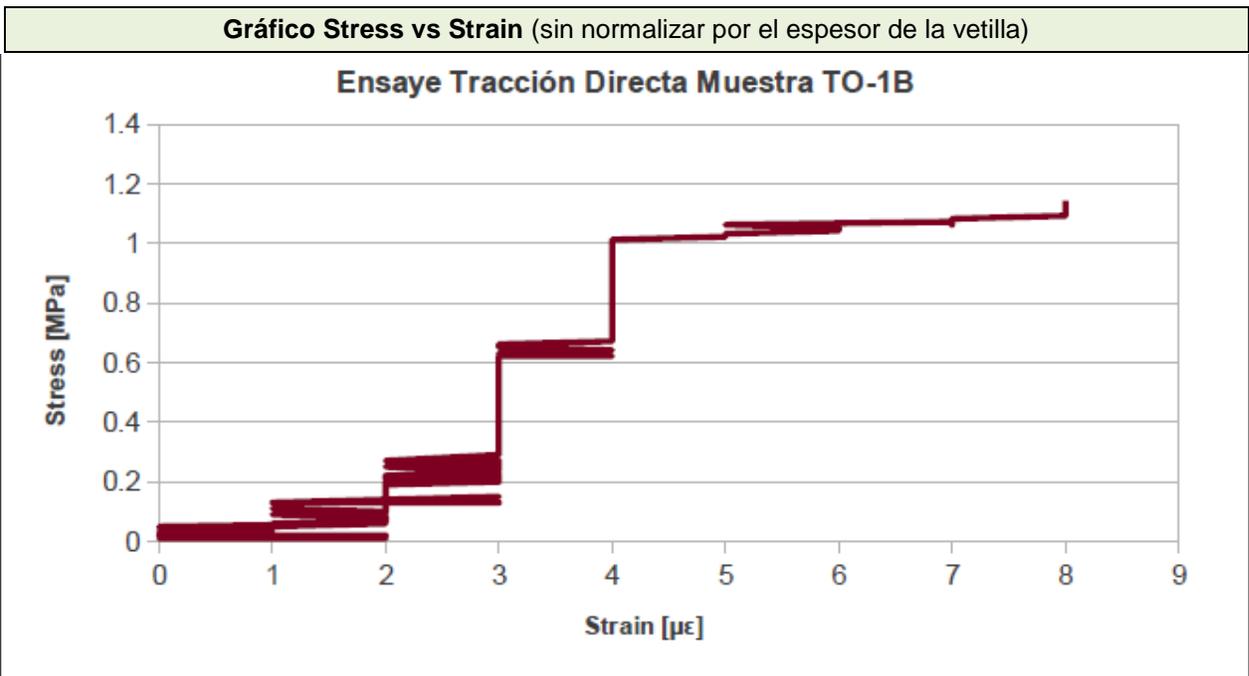
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Pirita	70	Sericítico. Escasa Py diseminada
Cuarzo	20	
Anhidrita	10	
Observaciones		
Vetilla presenta Py masiva, cúmulos de Qz y de Anh		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
5		6-8
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
4	3	4
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
2	1	2
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido y levemente ondulado		





Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	-	Módulo de elasticidad (GPa)	-	Stress Punto de Fluencia (MPa)	-	Módulo secante stress (GPa)	-	Módulo secante deformación (GPa)	-

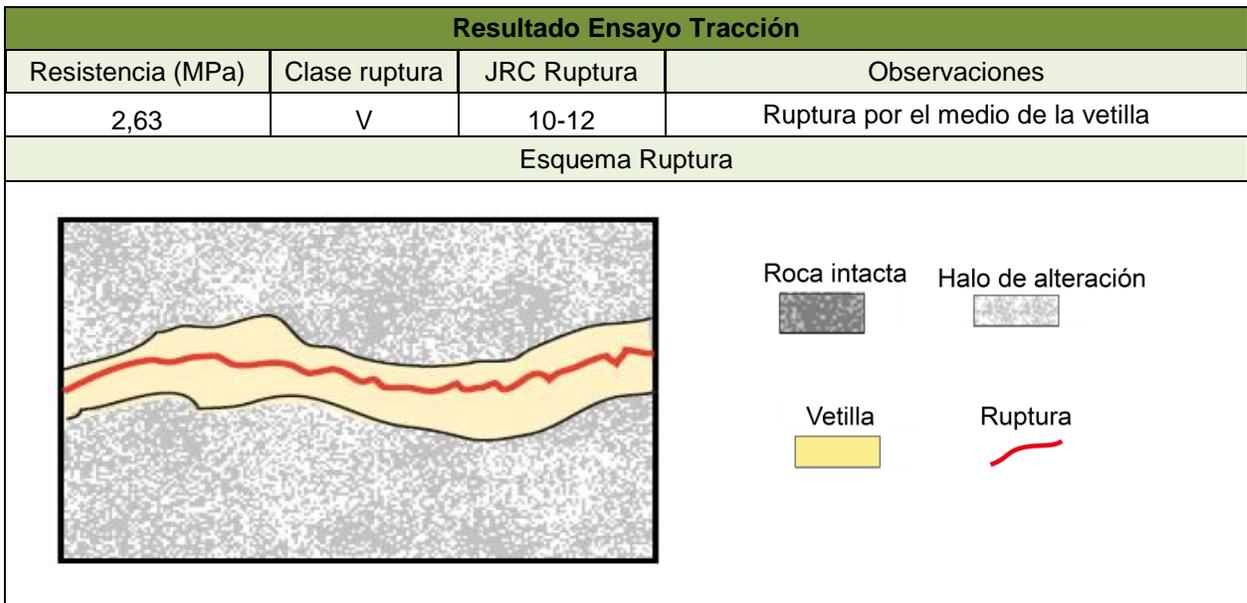


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
TO-2B	HP	V10	Tonalita	60

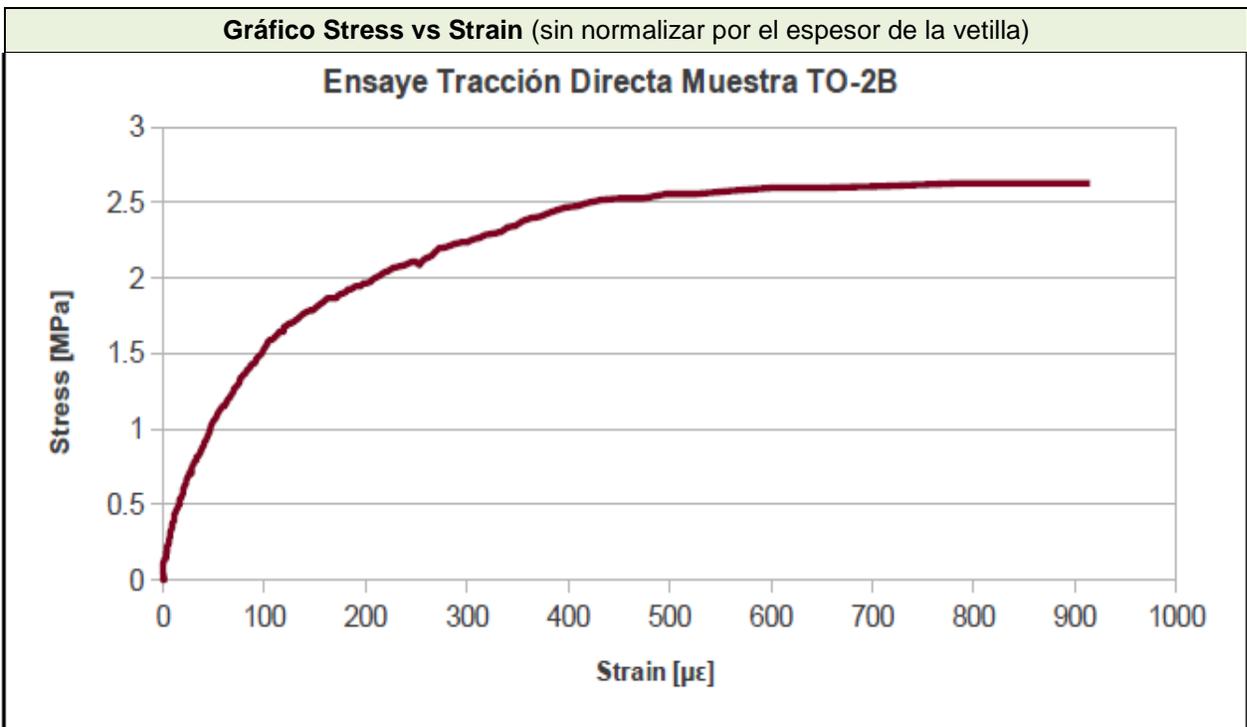
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	75	Sericítico.
Cuarzo	10	
Anhidrita	10	
Pirita	5	
Observaciones		
Cpy masiva, cúmulos de Anh y Qz, y Py diseminada.		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
0		14--16
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
10	4	8
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
7	5	5
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es difuso e irregular		





Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	1138	Módulo de elasticidad (GPa)	20	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,5	Módulo secante stress (GPa)	15,7	Módulo secante deformación (GPa)	4,4

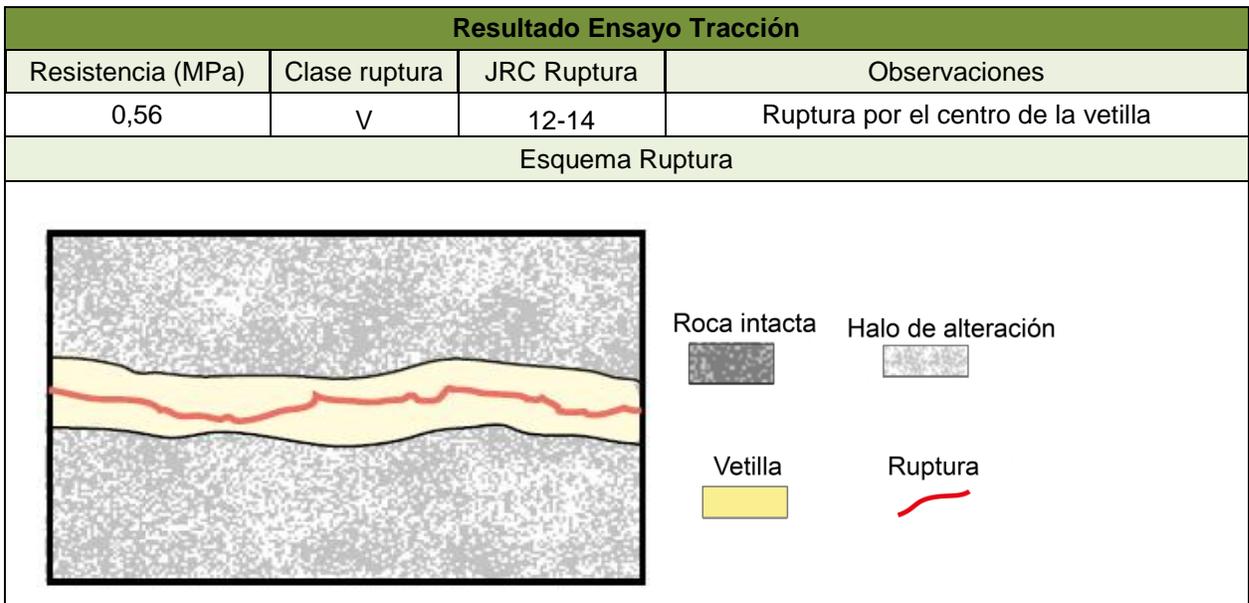


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>NNM-73E</b>	HP	V10	Tonalita	45

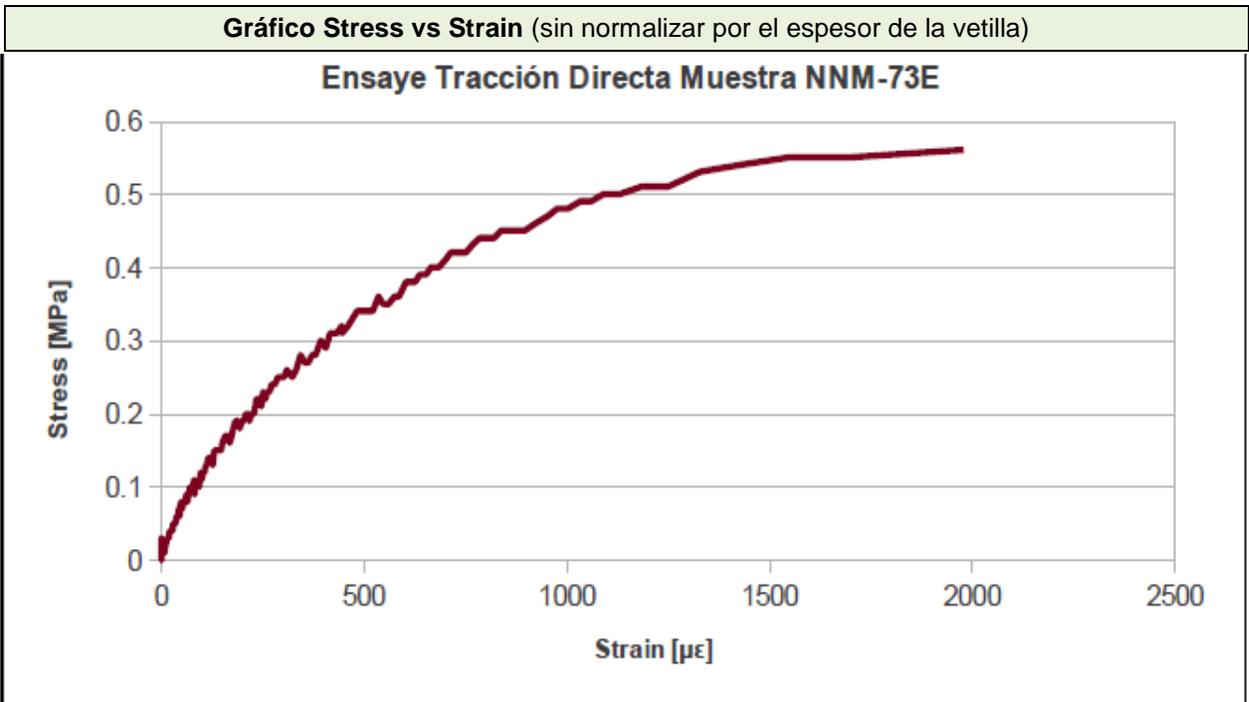
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Pirita	70	Sericítico. Py diseminada
Cuarzo	25	
Anhidrita	5	
Observaciones		
Py masiva (granos <2mm), banda de Qz en ambos bordes y Qz en cúmulos entre la Py		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
5		8-10
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
7	5	7
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
?	15	?
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es difuso e irregular		





Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	2804	Módulo de elasticidad (GPa)	1,1	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,1	Módulo secante stress (GPa)	0,5	Módulo secante deformación (GPa)	0,3

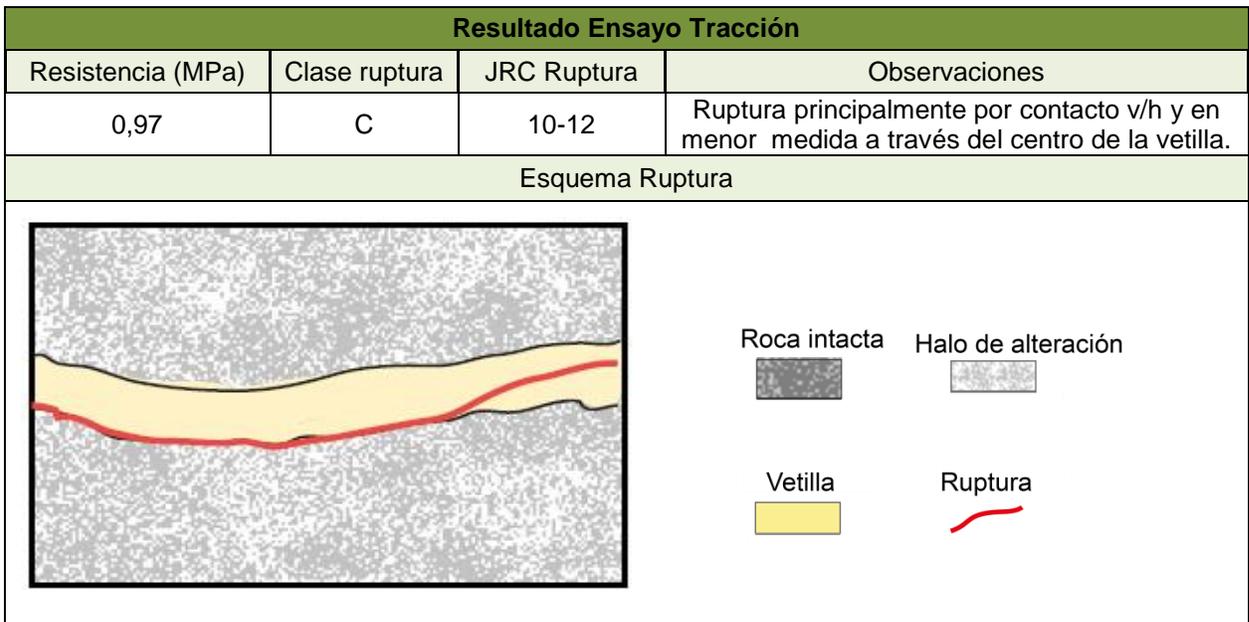


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>NNM-62B</b>	HP	V10	Tonalita	40

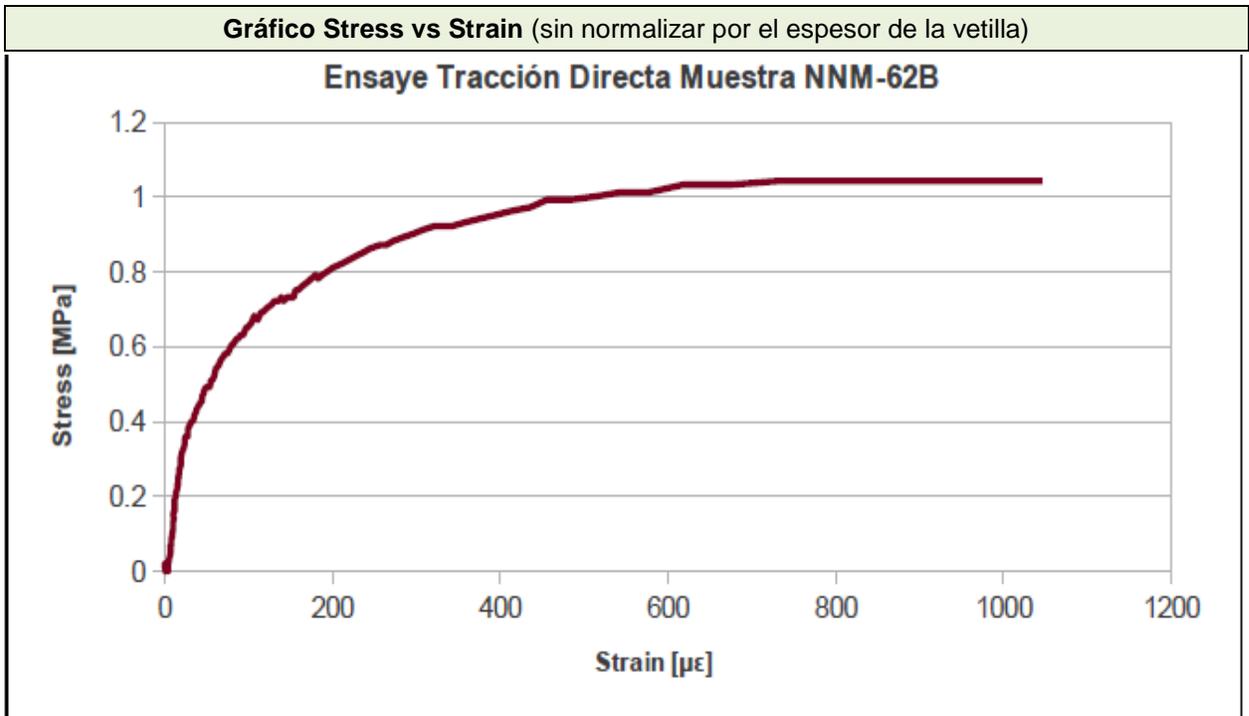
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Pirita	80	Silíceo-sericítico. Py y Cpy diseminado
Calcopirita	10	
Cuarzo	10	
Observaciones		
Py masiva, Cpy en cúmulos y escasos cúmulos de Qz.		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
15		10-12
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
7	1	6
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
?	12	?
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido y ondulado		





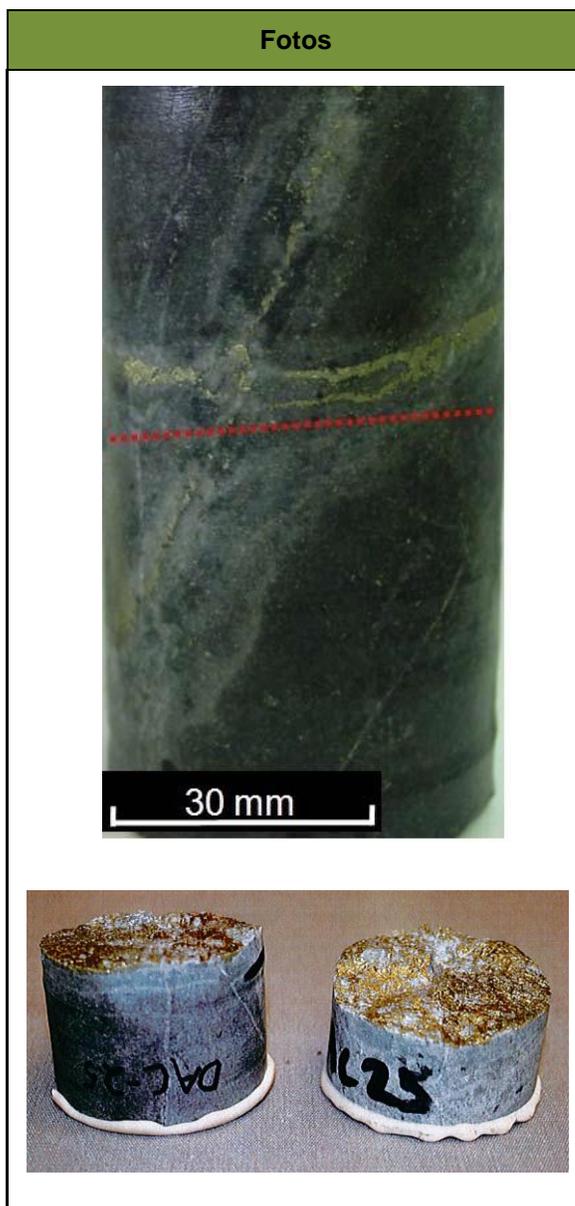
Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	2028	Módulo de elasticidad (GPa)	6,4	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,37	Módulo secante stress (GPa)	5,0	Módulo secante deformación (GPa)	0,9



Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>DAC-25</b>	HP	V10	CMET	-

Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	77	Silíceo sericítico clortítico
Cuarzo	21	
Anhidrita	1	
Pirita	1	
Observaciones		
Información extraída de la memoria de De los Santos (2011)		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
5		10-12
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
3	1	2
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
7	3	4
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es recto y difuso		

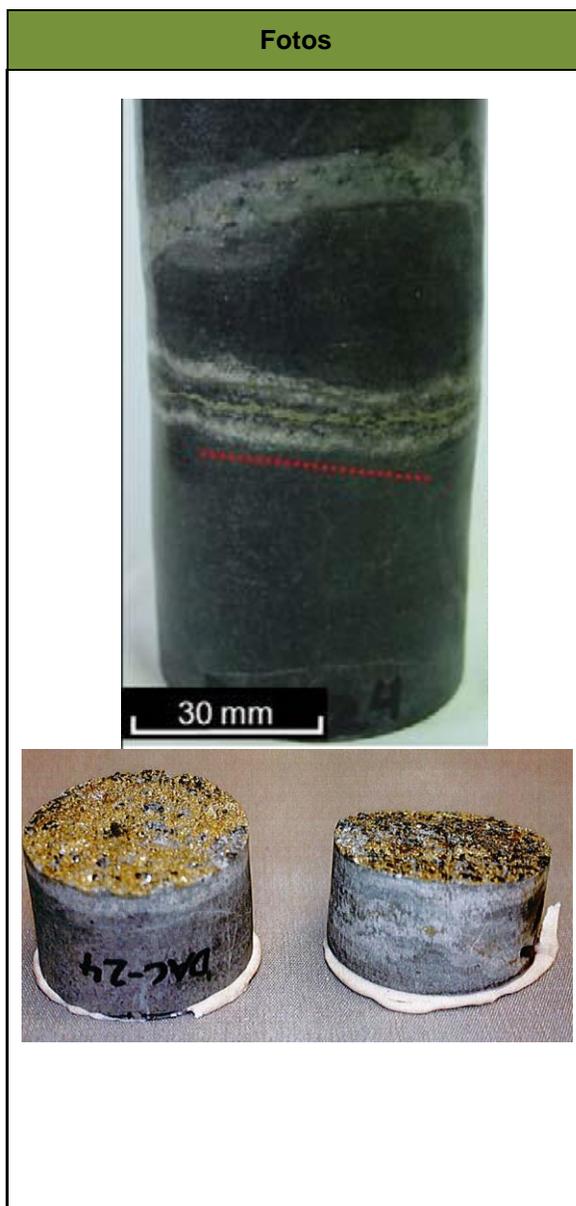


Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
1	V	-	Información extraída de la memoria de De los Santos (2011)

Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>DAC-24</b>	HP	V10	CMET	-

Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	55	Silíceo sericítico clorítico
Clorita	25	
Anhidrita	19	
Pirita	1	
Observaciones		
Información extraída de la memoria de De los Santos (2011)		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
5		6-8
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
2	1	1,5
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
8	3	6
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido y recto		

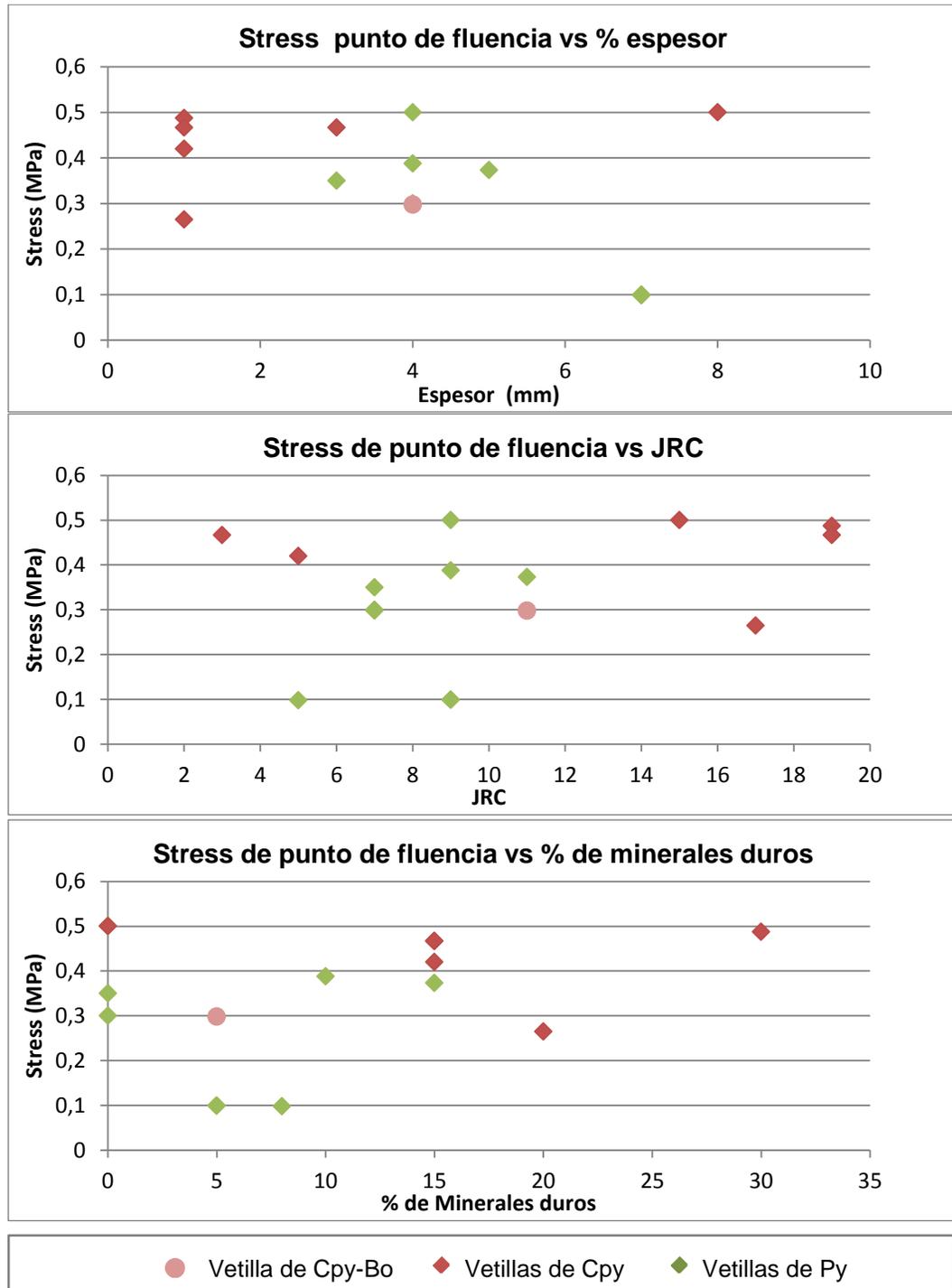


Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
1.3	V	-	Información extraída de la memoria de De los Santos (2011)

## **ANEXO B**

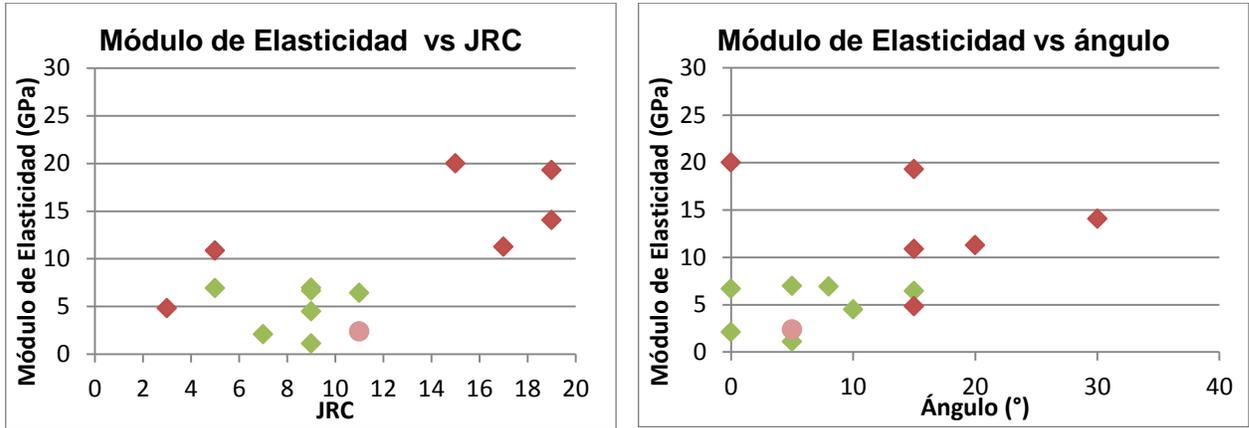
### **Gráficos adicionales sobre deformación**

## Stress en el Punto de fluencia versus espesor, JRC y ángulo de la vetilla

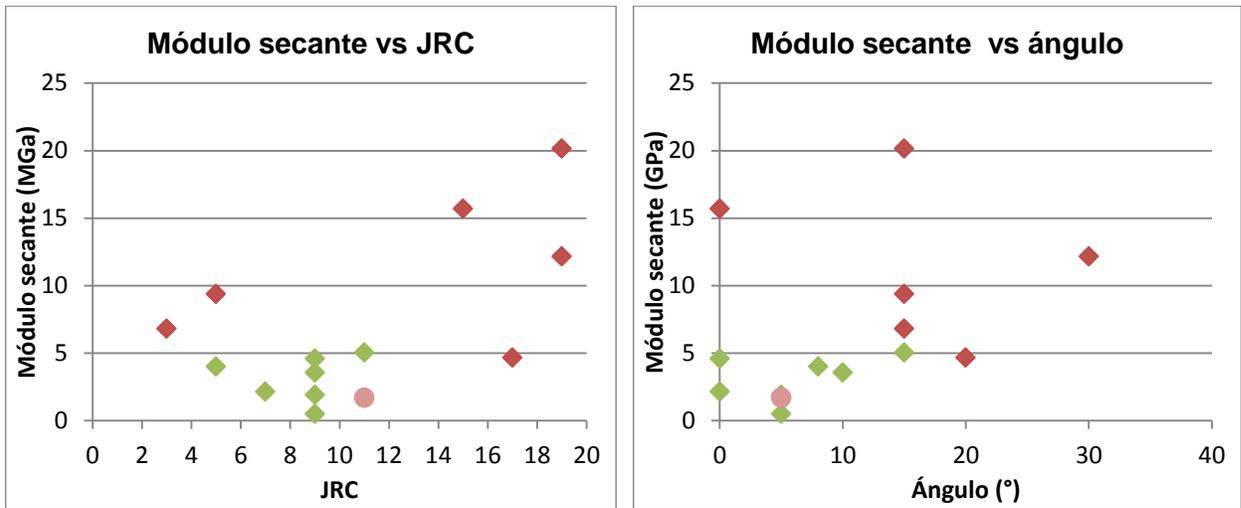


**Figura 1.** Gráficos de módulo de elasticidad vs porcentaje de minerales duros, vs espesor, vs JRC y vs ángulo. Estos no muestran ningún patrón que haga pensar que estos parámetros geométricos de la vetilla influyen en el valor del stress en que acaba el comportamiento elástico.

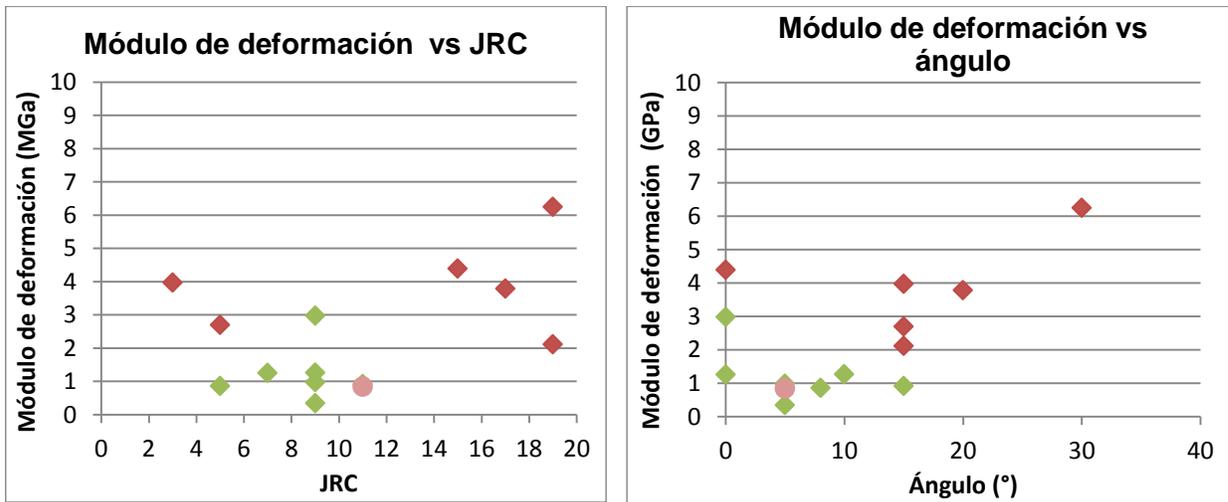
## Módulos de elasticidad y secantes versus JRC y ángulo de la vetilla



**Figura 2.** Módulo de elasticidad versus JRC y ángulo de la vetilla (sin el dato de la muestra TO-1). En el gráfico de la izquierda se observa que las vetillas de calcopirita de mayor JRC presentan mayor módulo de elasticidad. EL gráfico de la derecha no muestra ninguna regularidad en vetillas de pirita ni calcopirita.

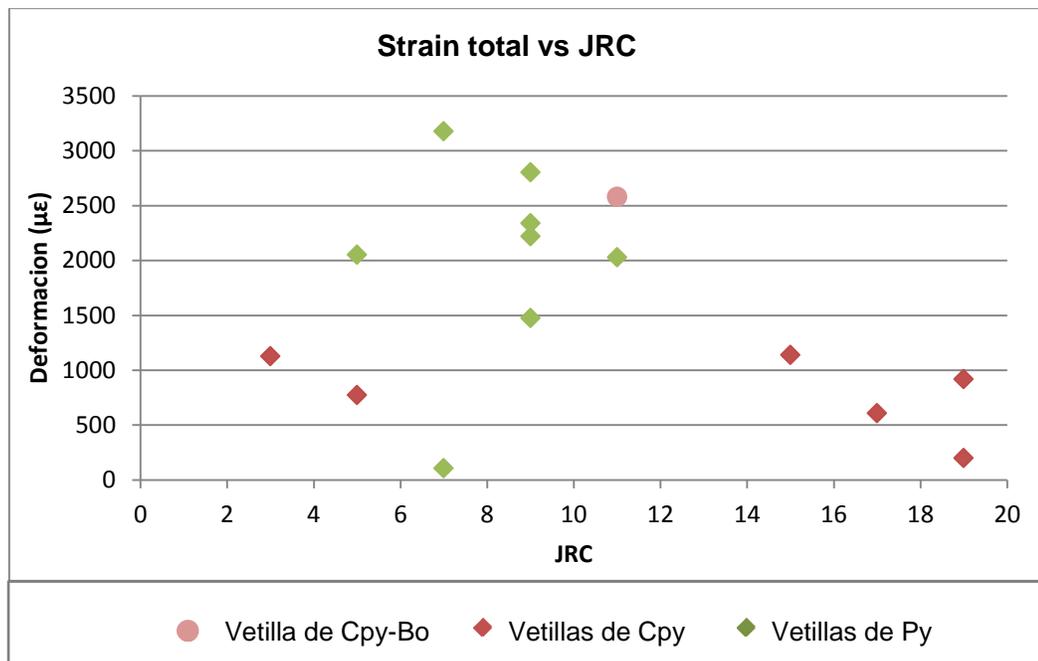


**Figura 3.** Módulo secante a la curva en el 50% de stress aplicado versus JRC y ángulo de la vetilla (sin el dato de la muestra TO-1). Las vetillas de calcopirita presentan valores mayores. En el gráfico de rugosidad se observa que las vetillas de calcopirita de mayor JRC presentan mayor módulo secante. EL gráfico de la derecha no muestra ninguna regularidad en vetillas de pirita ni calcopirita que indique una influencia del ángulo.



**Figura 4.** Módulo secante a la curva en el 50% de strain versus JRC y ángulo de la vetilla (sin el dato de la muestra TO-1). Ya no se ve, en el gráfico de JRC, la tendencia de los gráficos anteriores de las vetillas de calcopirita de mayor JRC. En el gráfico de ángulo se insinúa una tendencia creciente en vetillas de calcopirita. Las vetillas de pirita no muestran ningún patrón en ninguno de los dos parámetros.

### Strain total versus JRC



**Figura 5.** Gráfico de strain total vs JRC. Las vetillas de calcopirita presentan valores de strain total menor que las vetillas de pirita y sus valores se encuentran, en general, dentro del mismo rango sin observarse una influencia de la rugosidad. Tampoco influye en las vetillas de pirita.