



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

# **ESTUDIO DEL PROCESO DE RUPTURA EN PROBETAS DE ROCAS SOMETIDAS A CARGA UNIAXIAL MEDIANTE TÉCNICAS DIC**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO  
**SEBASTIÁN ANDRÉS CARVAJAL MARAMBIO**

PROFESOR GUÍA:  
**SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA**

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
**ANDRÉS BRZOVIC PÉREZ**  
**JAVIER VALLEJOS MASSA**

SANTIAGO DE CHILE

2018



# **RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**POR:** Sebastián Andrés Carvajal Marambio

**FECHA:** 6/10/18

**PROFESOR GUÍA:** Sergio Sepúlveda Valenzuela

## **ESTUDIO DEL PROCESO DE RUPTURA EN PROBETAS DE ROCA SOMETIDAS A CARGA UNIAXIAL MEDIANTE TÉCNICAS DIC**

En el rubro de la minería siempre están muy presentes dos factores, la rentabilidad del negocio y la seguridad de los trabajadores. Para cumplir con ambas es necesario tener un acabado conocimiento sobre el comportamiento local de la roca.

Entre las pruebas más básicas e importantes dentro de la caracterización física de la roca está el de compresión uniaxial no confinado (UCS), que como bien dice su nombre, es una prueba donde se aplica compresión en un solo sentido (vertical) a una muestra de roca cilíndrica, hasta que esta falle. Externamente se usa un dispositivo para medir la deformación, como los strain gauges y LVDT. Si bien estos son métodos confiables y ampliamente usados, en este trabajo, el objetivo es validar una técnica relativamente nueva en esta área, la medición de deformación usando correlación de imágenes digitales (DIC).

El concepto básico de esta consiste en tomar una gran cantidad de fotos de un objeto en una ventana de tiempo en la que presente algún tipo de movimiento o deformación. Estas imágenes son luego procesadas en un software especializado que identifica los desplazamientos a través de la comparación de imágenes. Lo que se hace en este trabajo es realizar y grabar 15 ensayos UCS de carga fija en probetas de roca, con los que se busca determinar hasta donde llegan las capacidades del DIC en estudios de roca.

En las pruebas realizadas se encuentra que los gráficos de deformación versus estrés son parecidos a los que se hacen con otros métodos. La cantidad de deformación es similar, mientras que la forma y eventos capturados en la curva dependen mucho del criterio de posicionamiento de las mediciones por DIC. Se confeccionan representaciones visuales de la deformación, donde se muestra, usando mapas de colores, las zonas que sufren desplazamiento durante el proceso de falla. Por último, en el análisis estructural de la secuencia se hace un detalle de cómo va apareciendo cada fractura durante la carga, dando la posibilidad de encontrar relaciones entre cada falla.

A partir de los resultados obtenidos se concluye que el DIC es un método muy flexible en cuanto que puede hacer infinitas mediciones de la cara estudiada, de alta precisión y que entrega mucha más información que otros métodos. Todo esto hace que sea muy útil en tres escenarios: cuando se quieren hacer mediciones de deformación sobre una muestra, cuando se quiere mostrar visualmente la deformación ocurrida en la muestra y para hacer análisis estructurales muy enfocados.



*A mi padre, y su incesante lucha para que nunca nos faltase nada*

*A mi madre, que nunca permitió que me diera por vencido*

*A mi hermano, por su preocupación y compañía*

*A mis amigos, por todo el apoyo brindado*

*Para ellos mi trabajo y mi vida*

# AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la profesora Viviana Meruane por dejarnos usar las preciadas cámaras de alta velocidad y su infinita disposición. De la misma forma, al profesor Javier Vallejos por dejarnos usar el laboratorio y el equipamiento, y por supuesto, al gran equipo del laboratorio de rocas, que sin ellos hubiera estado muy perdido, David Veloz, Flavia Polanco y Daniela Pollak. Al profesor Andrés por el tema interesante y la ayuda brindada para sacarlo adelante, y el profesor Sergio, que me salvó varias veces cuando tuve problemas.

Han sido muchos años desde que empecé a estudiar, y aunque uno nunca termina de aprender, esta es una gran etapa que se termina con este documento. Solo me queda agradecer a toda la gente que ha estado conmigo de alguna u otra forma a través de este camino.

Gracias a mi familia por ser un pilar fundamental en toda mi educación. A mi papá por ser un modelo a seguir y mostrarme que el esfuerzo siempre es recompensado. A mi mamá por atención y cuidado que ha tenido conmigo. A mi hermano por su preocupación y por ser un gran compañero. A todos mis tíos y primos que me apoyaron y han estado ahí. Y por supuesto a mis abuelos, que siempre mantienen unida a la familia.

Gracias a todos los amigos que hice en la universidad y a los funcionarios del departamento, en especial a la generación 2014, que hizo que todos los terrenos fueran muy entretenidos. Gran parte de la carrera se la debo a ellos.

Gracias a todos mis amigos, los que todavía quedan de la media, de la básica, los que han aparecido en el camino, gracias por todas las reuniones pasadas y las que quedan. En especial al Alfo y al Mati, que han sido grandes amigos estos 7 años en el 907.

A todos ellos, muchas gracias.

# TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	vi
TABLA DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Estado del arte.....	1
1.3 Medición de deformación por DIC.....	2
1.4 Muestras utilizadas .....	4
1.5 Abreviaciones.....	5
1.6 Objetivos .....	6
2. MARCO GEOLÓGICO .....	7
2.1 Antecedentes generales .....	7
2.2 Geología de El Teniente .....	8
2.3 Nuevo Nivel Mina .....	13
3. CONCEPTOS PREVIOS.....	14
3.1 Palabras clave.....	14
3.2 Generalidades del sistema DIC (Digital Image Correlation).....	14
3.3 Principios de funcionamiento del sistema DIC .....	14
3.4 Prueba de compresión uniaxial no confinada .....	18
4. METODOLOGÍA.....	21
4.1 Elección de muestras.....	21
4.2 Mapeo de estructuras e identificación de mineralogía .....	22
4.3 Pintado de muestras .....	23
4.4 Montaje del experimento.....	24
4.5 Ejecución de los ensayos.....	26
4.6 Procesamiento de datos y grabaciones .....	27
5. RESULTADOS .....	31
5.1 Resultados generales .....	31
5.2 Resultados específicos y de la secuencia.....	34

5.3 Resultados de mediciones de LVDT y strain gauges.....	37
5.4 Resultado de mediciones por DIC.....	40
5.5 Representación visual de deformación .....	43
5.6 Análisis estructural .....	44
6. DISCUSIONES.....	48
6.1 Características físicas de la roca .....	48
6.2 Ventajas de las grabaciones de alta velocidad .....	50
6.3 Mediciones de strain gauge y LVDT .....	50
6.4 Mediciones de deformación por DIC .....	52
6.5 Representación visual de la deformación .....	56
6.6 Problemas del estudio.....	62
6.7 Recomendaciones .....	63
7. CONCLUSIONES .....	65
8. BIBLIOGRAFÍA .....	68
9. ANEXOS .....	71



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Resumen general del ensayo y grabación de las 15 muestras. Las muestras definitivas están destacadas en negrita. ....	31
<b>Tabla 2:</b> Factibilidad de hacer una prueba usando los datos obtenidos desde el método DIC. ....	32
<b>Tabla 3:</b> Detalle de la secuencia de fracturamiento de la muestra en la figura 19. ....	34
<b>Tabla 4:</b> Subtabla resumen que compara el JRC y ángulo de las vetillas y estructuras de la muestra anterior. Se confecciona una para cada muestra. ....	35
<b>Tabla 5:</b> Resumen de vetillas y fracturas en las 4 muestras principales. En la contabilización de fracturas se incluyen las que pasaron por matriz. ....	36
<b>Tabla 6:</b> Aquí se muestra el resumen de las fracturas ocurridas en el total de muestras analizadas (12). ....	36
<b>Tabla 7:</b> Espesor promedio de las vetillas de las muestras mapeadas totales versus las que participaron en el fracturamiento. ....	36
<b>Tabla 8:</b> Porcentaje de relleno de minerales blandos de las vetillas que participan en la fractura. Anh = anhidrita, Bt = biotita, Cpy = calcopirita, Bn = bornita, Cv = covelina, Co = calcosina, Mo = molibdenita. ....	37
<b>Tabla 9:</b> Ángulo de las fracturas en el tiempo. ....	37
<b>Tabla 10:</b> Módulo de Young y coeficiente de Poisson de las muestras estudiadas. ....	40

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> A la izquierda, strain gauge instalado en un sondaje (imagen tomada de la página web de CONTROLS group). A la derecha, un diagrama del dispositivo (diagrama tomado de la página web de National Instruments). .....	1
<b>Figura 2:</b> Tipo de LVDT usado en este proyecto. ....	2
<b>Figura 3:</b> Esquema del funcionamiento de la metodología DIC. Tomado de la presentación de Ian McEnteggart (2015), de la empresa Instron Composites. ....	3
<b>Figura 4:</b> Muestra de tipo dacita usada en este trabajo (PDAC). ....	4
<b>Figura 5:</b> Muestra de tipo basalto usada en este trabajo (CMET). ....	5
<b>Figura 6:</b> Unidades geomorfológicas de la región de O'Higgins. Tomado de EducarChile.cl. ....	7
<b>Figura 7:</b> Distribución espacial de las zonas de extracción en la mina El Teniente. Las muestras estudiadas en este trabajo pertenecen al Nuevo Nivel Mina, un nuevo nivel de producción ubicado en una cota inferior a los que aparecen en la figura. Tomado de Harrison (2009). ....	9
<b>Figura 8:</b> Ejemplo de una trama de alto contraste aplicado sobre una muestra, puntos negros sobre fondo blanco. Tomado de la presentación DIC and ISTRA4D training de DantecDynamics (2011). ....	15
<b>Figura 9:</b> Ejemplificación de la construcción de la grilla virtual. Los signos "+" en naranja indican los puntos virtuales equidistantes que forman la grilla. En tanto, en amarillo, las ventanas de búsqueda que se crean alrededor. Se puede ver en la imagen derecha que se produce un solapamiento entre estas. Modificado de la presentación DIC and ISTRA4D training de DantecDynamics (2011). ....	15
<b>Figura 10:</b> Esquema de cómo funciona la identificación de píxeles dentro de la memoria del software versus la cámara. Tomado de la presentación Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software, SEM 2009 Workshop. ....	16
<b>Figura 11:</b> Ejemplificación de cómo es en realidad la identificación por parte la técnica. Tomado de la presentación Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software, SEM 2009 Workshop. ....	17
<b>Figura 12:</b> Esquema del posicionamiento espacial de las cámaras 3D. Tomado de Sutton et al., 2009. ....	17
<b>Figura 13:</b> Tablero de calibración para cámaras DantecDynamics. ....	18
<b>Figura 14:</b> Ruptura de roca en compresión uniaxial. Imagen tomada de la página web de BAW. ....	19
<b>Figura 15:</b> Ejemplo de una curva típica de deformación vs tensión (strain vs stress) obtenida con strain gauge o LVDT. Fuente: Pruebas realizadas por el IDIEM de la Universidad de Chile sobre el mismo tipo de muestras usadas en este trabajo. ....	20
<b>Figura 16:</b> Algunas de las muestras probadas. Las más oscuras a la derecha e izquierda corresponden a litología CMET, mientras que la del medio es dacita. ....	21
<b>Figura 17:</b> Clasificación de rugosidad por JRC. Barton, 1977. ....	22
<b>Figura 18:</b> Mapeo de vetillas digitalizado de una de las muestras. ....	23
<b>Figura 19:</b> Muestras pequeñas recién pintadas. ....	23

<b>Figura 20:</b> Sello usado para imprimir la trama de puntos negros sobre el área blanca.	24
<b>Figura 21:</b> Ambas cámaras montadas en el trípode junto a los focos. ....	24
<b>Figura 22:</b> Prensa Servosis para ensayos de compresión y computador de monitoreo	25
<b>Figura 23:</b> Computador para registrar las mediciones de los strain gauges.....	25
<b>Figura 24:</b> Montaje final. ....	26
<b>Figura 25:</b> Panel de representación gráfica del software. Encerrado en rojo aparecen las líneas que actúan como strain gauges virtuales. ....	28
<b>Figura 26:</b> Diferencia entre la curva de deformación sin aplicar filtros (en azul) y con filtros (verde). Notar que sin suavizar la curva no tiene sentido, pues muestra una deformación positiva. ....	29
<b>Figura 27:</b> Foto compuesta, mostrando un símil al mapeo 2D hecho sobre la lámina. .	33
<b>Figura 28:</b> Secuencia de fractura, muestra CX2.....	34
<b>Figura 30:</b> Arriba: Strain vs stress usando strain gauges en probetas grandes. Abajo: Strain vs stress usando LVDT en probetas grandes. Algunas muestras no tienen datos de mediciones de LVDT. ....	38
<b>Figura 31:</b> Gráfico de stress vs strain en las probetas chicas. El registro no es muy bueno debido a que estas muestras fueron parte del proceso de pruebas previas. ....	39
<b>Figura 32:</b> En estos gráficos el amarillo representa lo que se midió con los strain gauges, tanto en la deformación axial como lateral, indicado en el título del gráfico. De la misma forma, el azul representa mediciones con LVDT, el naranja usando la medición tipo Gauge strain (distancia entre puntos extremos) y el verde el Full strain (resolviendo el tensor). El eje Y marca el stress en MPa, mientras que el X muestra la deformación (en %). ....	41
<b>Figura 33:</b> En estos gráficos el amarillo representa lo que se midió con los strain gauges, tanto en la deformación axial como lateral, indicado en el título del gráfico. De la misma forma, el azul representa mediciones con LVDT, el naranja usando la medición tipo Gauge strain (distancia entre puntos extremos) y el verde el Full strain (resolviendo el tensor). El eje Y marca el stress en MPa, mientras que el X muestra la deformación (en %). ....	42
<b>Figura 34:</b> Presentación visual de la deformación axial en la muestra DV7. Alta deformación en sentido positivo es indicada por colores cálidos, mientras que en sentido negativo lo hacen los colores fríos.....	43
<b>Figura 35:</b> presentación visual usando el método PLS en Matlab de la deformación axial. ....	44
<b>Figura 36:</b> Primera fractura con su traza marcada con amarillo en la mica de mapeo. .	44
<b>Figura 37:</b> A la izquierda una foto del relleno de la vetilla que participó en la fractura. A la derecha el segmento de la matriz.....	45
<b>Figura 38:</b> Segunda fractura y su traza en amarillo marcada en la mica de mapeo.....	45
<b>Figura 39:</b> Tercera fractura y su traza marcada en amarillo en la mica de mapeo.....	46
<b>Figura 40:</b> Lo blanco apreciado en la vetilla es cuarzo, mientras que lo grisáceo corresponde a molibdenita. ....	46
<b>Figura 41:</b> Cuarta fractura y su traza marcada en amarillo en la mica de mapeo. ....	47
<b>Figura 42:</b> Se sobrepone la mica usada para mapear sobre la muestra fracturada para comprobar sobre que vetillas se propagó. ....	47

<b>Figura 43:</b> Comparación de deformación axial y lateral registradas por los strain gauges y LVDT. ....	51
<b>Figura 44:</b> Comparación de mediciones en DIC, sin suavizamiento y con diferentes niveles de suavizamiento. Se muestran también las mediciones por strain gauge (SG) y LVDT. ....	53
<b>Figura 45:</b> Diferencia de resultados usando solapamiento de 0% y ~25%.....	54
<b>Figura 46:</b> Gráfico mostrando mediciones representativas de la deformación axial en la muestra CX4 y CX11.....	55
<b>Figura 47:</b> Variación gráfica del strain axial usando diferentes valores para el facet, en la muestra CX12. Notar que a simple vista en la muestra no se puede observar ninguna fractura todavía. ....	57
<b>Figura 48:</b> Comparación usando varios tipos de suavizamiento sobre mediciones con y sin solapamiento del fotograma 7042 en la probeta CX4. Marcadas en rojo las fracturas. Sm: cantidad de suavizamiento, número más altos indican mayor suavizamiento. Sl: porcentaje de solapamiento entre las ventanas de búsqueda de correlación. Notar que en la zona superior se ve esfuerzo en otra vetilla, pero esta no resultó en una fractura. ....	57
<b>Figura 49:</b> El efecto de varios niveles de suavizamiento usando regresión local en el fotograma 6176 de la muestra CX12.....	58
<b>Figura 50:</b> Diferencias visuales que se producen al variar los valores de Grid (G) y Smoothing (SM) del método de suavizamiento por splines.....	59
<b>Figura 51:</b> Comparación entre el resultado visual entre el método PLS (izquierda) y el de Istra4D (derecha) en una probeta grabada a altos FPS. Las zonas de deformación son parecidas, pero menos precisas.....	60
<b>Figura 52:</b> Comparación entre el resultado visual entre el método PLS (izquierda) y el de Istra4D (derecha) en una probeta grabada a bajos FPS. Las zonas de deformación son parecidas y están menos afectadas por ruido. ....	60
<b>Figura 53:</b> cambio en la deformación axial ( $E_a$ ) y lateral ( $E_l$ ) en una muestra de arenisca a una tasa de carga ( $dq/dt$ ) fija. Notar que la deformación se dispara en los últimos momentos antes de llegar al peak y fallar (34 MPa). Tomado de Muñoz et al., 2017. ....	61
<b>Figura 54:</b> Figura mostrando las curvas de error que aparecen en las muestras de bajos FPS. Muestra CX4 a la izquierda y CX11 a la derecha. ....	61
<b>Figura 55:</b> Deformación en la muestra CX11 grabada a 62.5 FPS. El número del fotograma está indicado en la parte superior. Se aprecian diferencias de colores, pero es más que nada ruido, y no una guía de donde pueden aparecer las fracturas. ....	62
<b>Figura 56:</b> Primera fractura y su traza marcada en amarillo.....	98
<b>Figura 57:</b> cara interior con fragmentos unidos y separados, mostrando matriz. ....	98
<b>Figura 58:</b> Segunda fractura y su traza marcada en amarillo. ....	99
<b>Figura 59:</b> No se observa mineralogía en la cara expuesta. ....	99
<b>Figura 60:</b> Tercera fractura y su traza marcada en amarillo. ....	100
<b>Figura 61:</b> Vetilla mencionada, con gran proporción de bornita. ....	100
<b>Figura 62:</b> Cuarta fractura y su traza marcada en amarillo.....	101
<b>Figura 63:</b> Marcado en rojo el camino el borde de la fractura. Se pueden ver caras mineralizadas principalmente con cuarzo y anhidrita. ....	101

<b>Figura 64:</b> Primera fractura y su traza marcada en amarillo.....	102
<b>Figura 65:</b> Diferentes perspectivas de la fractura indicada.....	102
<b>Figura 66:</b> Segunda fractura con su traza marcada en amarillo.....	103
<b>Figura 67:</b> Fractura mencionada anteriormente, exponiendo matriz.....	103
<b>Figura 68:</b> Tercera fractura y su traza marcada en amarillo.....	104
<b>Figura 69:</b> Estructura expuesta luego de la fractura central.....	104
<b>Figura 70:</b> Fracturas de matriz saliendo de la primera fractura.....	105
<b>Figura 71:</b> Vetillas 14 y 17 respectivamente.....	105
<b>Figura 72:</b> Fotos mostrando las últimas fracturas internas en vetillas con minerales blandos.....	106
<b>Figura 73:</b> Segunda fractura y su traza marcada en amarillo.....	107
<b>Figura 74:</b> Vetilla con fractura limpia.....	107
<b>Figura 75:</b> Fractura vertical.....	108

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

En el área de la geología estructural y aplicada es de vital importancia el comportamiento de las rocas frente a cambios de esfuerzo y tensión. Estallidos de rocas en faenas mineras, desprendimientos en túneles, derrumbes de laderas son algunas de los eventos que estas áreas de la geología buscan predecir y tratar de que produzcan la menor cantidad de daño, especialmente cuando se está tratando con la vida de personas. Para esto, el trabajo de estos profesionales implica crear modelos físico matemáticos que se adapten a las características del lugar a estudiar, y así tomar medidas precautorias. Para hacer modelos más precisos estos deben estar calibrados con información local del tipo de roca, tales como la cantidad de deformación en la que incurren frente a un cambio de presión, la cuantificación de esta deformación antes de fallar y finalmente ceder, los minerales en las estructuras, entre otras.

En respuesta a esto, el trabajo aquí expuesto presenta una metodología alternativa para hacer mediciones de deformación de roca, diferente a las usadas de manera clásica.

## 1.2 Estado del arte

Actualmente, para medir las tasas de deformación de roca hay dos métodos comunes, el primero consiste en usar sensores basados en el efecto piezorresistivo, o sea, la propiedad de algunos materiales de cambiar su resistencia cuando son sometidos a un cambio en su forma. Estos sensores se llaman *strain gauges*, y se adhieren a la superficie de la muestra (ver Fig. 1) y luego son conectados a través de cables hacia un dispositivo que traduce los cambios de señales eléctricas en cantidad de deformación.

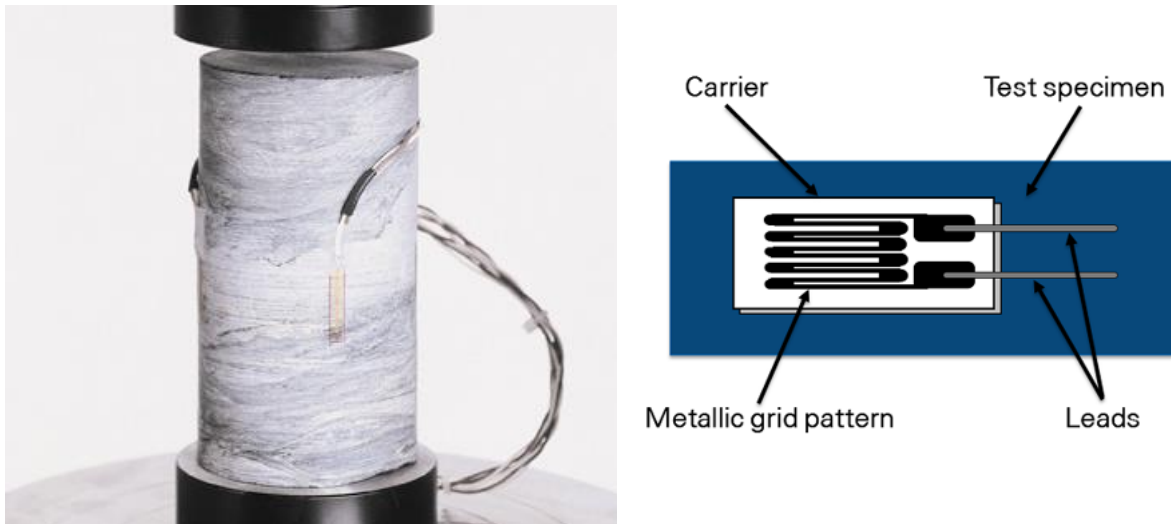


Figura 1: A la izquierda, strain gauge instalado en un sondaje (imagen tomada de la página web de CONTROLS group). A la derecha, un diagrama del dispositivo (diagrama tomado de la página web de National Instruments).

Este método, si bien es confiable y ampliamente usado, presenta algunas limitaciones. Entre estas, que el dispositivo solo mide la deformación en el punto en que

está adherido. Por lo tanto, si la muestra no sufre deformación en la zona en que está emplazada, o, por el contrario, sufre mucha más deformación que en el resto de la roca, la medición es poco representativa. Además, si no se elige bien el tamaño y tipo de strain gauge se presentan pérdidas de información. Por último, en la gran mayoría de las pruebas no es capaz de capturar información en la fase post-peak de deformación (Muñoz et al. 2016).

El segundo método consiste en usar dispositivos llamados LVDT (linear variable differential transformer), que en su sentido más básico corresponden a sensores electromecánicos que convierten movimiento en señales eléctricas y viceversa. En este caso se trata de un pedestal unido a varios tubos de metal, en el que uno de estos en su punta tiene un sensor que se puede desplazar (ver Fig. 2)



*Figura 2: Tipo de LVDT usado en este proyecto.*

El principal problema con este tipo de LVDT en el caso de medición en rocas, es que estos no están en contacto directo con la roca en el caso de pruebas de deformación axial. Además, en el caso de deformación lateral, están apoyados sobre puntos muy específicos de una muestra, por lo tanto, puede haber problemas de representatividad, al igual que con los strain gauges, producidos por la heterogeneidad de la muestra (Taheri A. y Tani K. 2008, Muñoz et al. 2016).

### **1.3 Medición de deformación por DIC**

La técnica DIC, o correlación de imágenes digitales, a diferencia de las otras dos formas mencionadas, es totalmente digital y no requiere ningún tipo de contacto con la

muestra, ya que hace uso de cámaras de video. Consiste básicamente en grabar una muestra mientras se deforma para que luego un software especializado pueda comparar imagen a imagen los cambios que ha sufrido la muestra y traducir estos cambios a cantidades de deformación reales.

## What is Digital Image Correlation?

An optical method to measure deformation on an object's surface

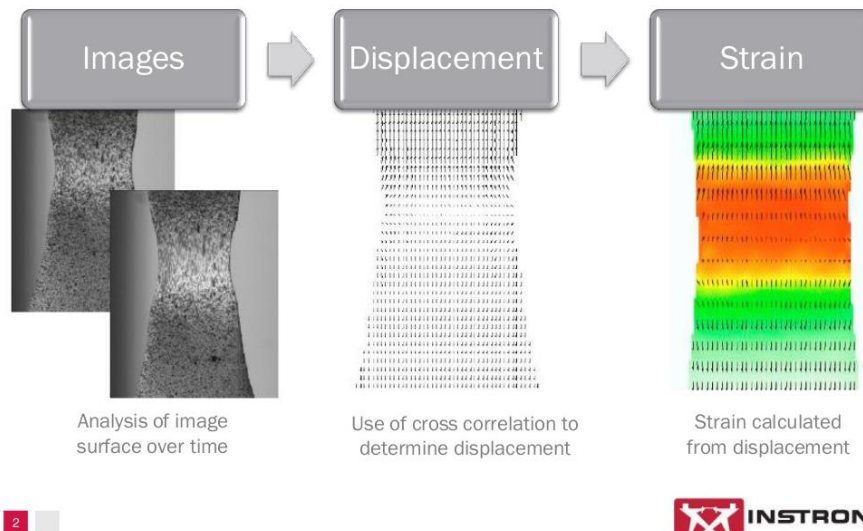


Figura 3: Esquema del funcionamiento de la metodología DIC. Tomado de la presentación de Ian McEnteggart (2015), de la empresa Instron Composites.

En el caso de la aplicación de DIC, es una metodología que ha ido en aumento en el último tiempo debido principalmente a que el poder de procesamiento computacional es cada vez más accesible, un requerimiento importante de esta técnica. Entre otras razones también está que presenta un nivel de detalle ajustable a un gran rango de tamaños, no necesita interferir con la muestra y en general es de una gran flexibilidad (Nick McCormick y Jerry Lord (2010)).

En cuanto a mediciones específicamente en muestras de rocas, no se ha hecho mucha investigación. Los trabajos de Muñoz y compañía (2016 y 2017), y Zhang (2012 y 2015) son alguno de los pocos documentados, donde presentan algunos resultados para muestras bajo compresión, carga puntual y tensión en muestras de arenisca y granito, y concluyen que el método de medición por DIC tiene grandes ventajas sobre el uso de strain gauges, como la capacidad de medir deformación en toda la muestra, eliminando el factor de error de elección de zona de interés, la posibilidad de medición en el régimen post-peak, y la producción de un mapa de deformación automático.

Dicho esto último, en este trabajo se aplica esta metodología relativamente nueva en esta área para obtener algunos parámetros de deformación de la roca, para luego comprobar si presenta resultados válidos.



#### 1.4 Muestras utilizadas

Las muestras que se usan en la prueba consisten en sondajes cortados y rectificadas provenientes de la mina El Teniente, CODELCO. Se eligen muestras de dos tipos diferentes, dos muestras de color gris, que corresponden a litología dacita (Unidad Pórfido dacítico, PDAC, Fig. 4), y dos muestras de color negro, que son de litología basalto (Unidad Complejo Máfico El Teniente, CMET, Fig. 5), todas de tamaño probetón (de tipo 150 mm de diámetro). Las cuatro muestras presentan gran cantidad de vetillas cortándose entre sí, con variada mineralogía de relleno. Esta mineralogía comprende, en orden de mayor abundancia a menor: cuarzo, anhidrita, calcopirita, biotita, bornita, aunque el cuarzo suele estar mucho más presente que todos las demás.

Además de estas cuatro muestras bases, se disponen de otras cuatro probetas de la misma litología y tamaño, y otras 7 muestras pequeñas (del orden de 50 mm) de basalto de proveniencia no identificada.

En estudios anteriores se ha concluido que en los dos tipos de roca suelen dominar la ruptura de tipo mixta (Superintendencia de Geología de El Teniente, 2014), o sea, que es una combinación de matriz y vetillas. La fractura solo por vetilla ocurre en menor medida. Las muestras de dacita (Unidad PDAC) tienen mayor resistencia de roca intacta que las basálticas (Unidad CMET), pero estas últimas presentan un mayor módulo de elasticidad.



*Figura 4: Muestra de tipo dacita usada en este trabajo (PDAC).*



*Figura 5: Muestra de tipo basalto usada en este trabajo (CMET).*

## 1.5 Abreviaciones

En esta sección se presenta una guía de las abreviaciones usadas en este trabajo.

- **Act:** Actinolita
- **Anh:** Anhidrita
- **Bn:** Bornita
- **Bt:** Biotita
- **Calc:** Calcosina
- **CMET:** Complejo Máfico de El Teniente
- **Cov:** Covelina
- **Cpy:** Calcopirita
- **DIC:** Digital Image Correlation
- **FPS:** Fotogramas por segundo
- **JRC:** Joint Roughness Coefficient
- **LVDT:** Lineal Variable Differential Transformer
- **PDAC:** Pórfido Dacítico
- **Py:** Pirita
- **Qz:** Cuarzo
- **SG:** Strain Gauge
- **UCS:** Unconfined Compressive Strength

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo principal**

El objetivo de este trabajo es evaluar la validez de la técnica DIC y el uso de cámaras de alta velocidad en el análisis de la deformación y fracturamiento de rocas de la mina El Teniente.

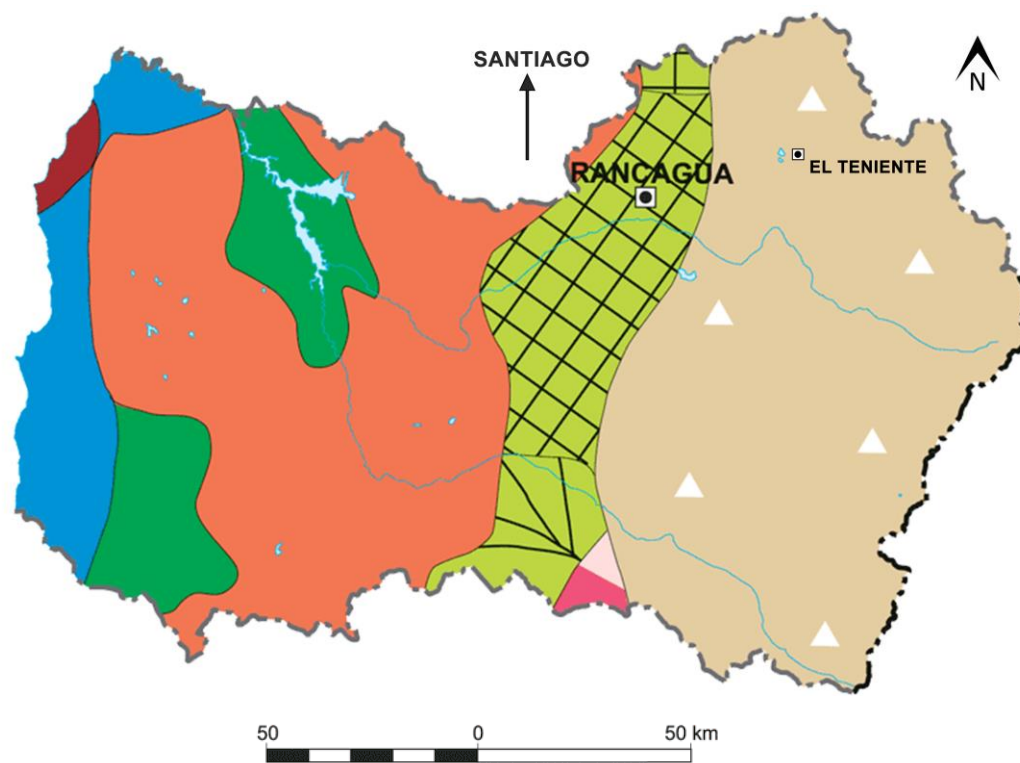
### **1.6.2 Objetivos específicos**

- Cálculo de deformación y parámetros físicos (módulo de Young, coeficiente de Poisson) usando strain gauges, LVDT y la técnica DIC.
- Análisis detallado de la secuencia de fracturamiento usando las grabaciones de cámaras de alta velocidad.
- Evaluación de la incidencia de la geología en la secuencia de fracturamiento.
- Elaboración de representaciones visuales de deformación.

## 2. MARCO GEOLÓGICO

### 2.1 Antecedentes generales

El área de donde se obtuvieron las muestras se ubica en zona central de Chile, en la región de O'Higgins, a la altura del paralelo 34°S. Esta zona se caracteriza por haber sufrido varios procesos de deformación debido a la acción del margen continental activo en el que se encuentra. A causa de la forma de este margen y el movimiento de la placa continental, las unidades geomorfológicas se disponen de una manera Norte-Sur característica, en las que se pueden distinguir, desde Occidente a Oriente, la planicie litoral, Cordillera de la Costa, el valle central y Cordillera Principal (ver Fig. 6) Es en esta última unidad en la que varios cuerpos intrusivos se emplazaron durante el Mioceno Tardío y el Plioceno, dentro de la Formación Farellones, formando así el depósito más grande de cobre del mundo, El Teniente (Skewes et al 2002).



#### LEYENDA

Planicie marina y/o fluvio marina	Cuenca de Santiago
Farellón costero	Cordillera andina de retención crionival
Llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional	Llano central fluvio-glacio-volcánico
Cordillera de la Costa	Precordillera
Cuenca de Rancagua	

Fuente: Börgel, 1983

Figura 6: Unidades geomorfológicas de la región de O'Higgins. Tomado de EducarChile.cl.

**La Formación Farellones** (Mioceno Superior), definida por Klöhn (1960), que sobreyace a la Formación Coya-Machalí en discordancia angular, está conformada por lavas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de brechas. Las lavas tienen más predominancia sobre las tobas y brechas, mientras que la alternancia de rocas volcánicas más finas, en tramos de 4 a 5 metros, producen una marcada estratificación de la serie (Thiele, 1980).

Tiene una disposición NS y está delimitada tanto al este como al oeste por la Formación Coya-Machalí. Su espesor es muy discutido, pero en general se le asocia un máximo entre 3 km, pudiendo llegar a los 5.5 km (Robinson *et al.*, 2004). Tiene pliegues suaves, con inclinaciones de 25° a subhorizontal (Charrier, 1983). Localmente subyace a la Formación Colorado-La Parva (Thiele, 1980).

A las rocas extrusivas de la Formación Farellones cercanas al depósito El Teniente se les denomina Complejo Volcánico El Teniente, y se les asocia una edad de 15.2 a 7.5 Ma (Stern, 2010). Estas rocas extrusivas fueron intruidas en múltiples ocasiones por cuerpos ígneos de gabro, diorita, latita, diabasa y dacita, entre los años 12.4 y 4.8 Ma (Cuadra, 1986; Kurtz *et al.*, 1997; Rivera y Falcón, 1998; Makshev *et al.*, 2001, 2002).

Los cuerpos ígneos se dividen en tres grupos dependiendo de la edad, en base a estudios de geocronología con Ar-Ar (Kurtz *et al.*, 1997):

- **Mioceno Temprano:** Plutones antiguos, como La Obra y Santa Rosa de Rengo, con una edad entre 21.6 +/- 4.9 Ma y 16.2 +/- 1.2 Ma.
- **Mioceno Medio a Tardío** (~12 a 8 Ma): Complejo Plutónico del Teniente, el cual se subdivide en dos grupos. El primero, comprende entre los años 12.4 +/- 2.5 Ma y 11.3 +/- 0.3. El segundo, entre 8.8 +/- 0.1 Ma y 7.7 +/- 0.1 Ma.
- **Mioceno Tardío – Plioceno** (~6 a 5 Ma): Denominado Complejo Plutónico Joven, comprendido entre los años 6.6 +/- 0.1 Ma y 5.5 +/- 0.2 Ma.

Durante las dos últimas etapas es cuando se emplazan los principales cuerpos que formarían el depósito, siendo principales receptores de la mineralización los cuerpos máficos.

## 2.2 Geología de El Teniente

El depósito El Teniente es el yacimiento de cobre y molibdeno más grande del mundo, con recursos estimados en más de 75.000.000 toneladas de cobre fino a 0.67% de ley. Los recursos de la mina se encuentran alrededor de las múltiples brechas magmático-hidrotermales que aparecen en el depósito. Los complejos de brecha con alta mineralización tienen una extensión vertical de más de 1.5 km y sus bases no son conocidas. Estas están emplazadas principalmente dentro de los cuerpos ígneos máficos altamente alterados y mineralizados, que comprenden gabros, diabasas, basaltos porfíricos y andesitas basálticas que intruyeron en las rocas volcánicas de la Formación Farellones (Stern, 2010, Cuadra, 1986). La mena principal es calcopirita y luego bornita.

Se ha considerado tanto un depósito de tipo pórfido cuprífero producido por la alteración hidrotermal de los varios cuerpos magmáticos (Maksaev *et al.*, 2004) como un de tipo megabrecha, producido por la alteración de los fluidos de plutones enfriados (Skewes, 2002).

El depósito es resultado de varias etapas de intrusiones, formaciones de brechas, alteración y mineralización, las que ocurrieron en un tiempo de más de 2 millones de años, entre >7.1 Ma y 4.4 Ma, justo antes de la migración hacia el este del arco magmático y el engrosamiento cortical, que provocaría que todo este sistema de brechas y cuerpos plutónicos fueran expuestos cerca de la superficie (Stern, 2010).

La zona del yacimiento se puede describir como un gran cuerpo intrusivo máfico, en el que se pueden encontrar varios intrusivos félsicos con brechas en sus márgenes. Una brecha, posterior a la mineralización, destaca entre las demás, tanto por su tamaño como por su baja ley de cobre. Esta es la Chimenea Braden (Cuadra, 1986), una unidad en el centro del depósito, que presenta una forma de cono invertido, con un diámetro de 1200 m en superficie (3140 m.s.n.m) y una extensión vertical de más 2000 m, también llamada Pipa (ver Fig. 7).

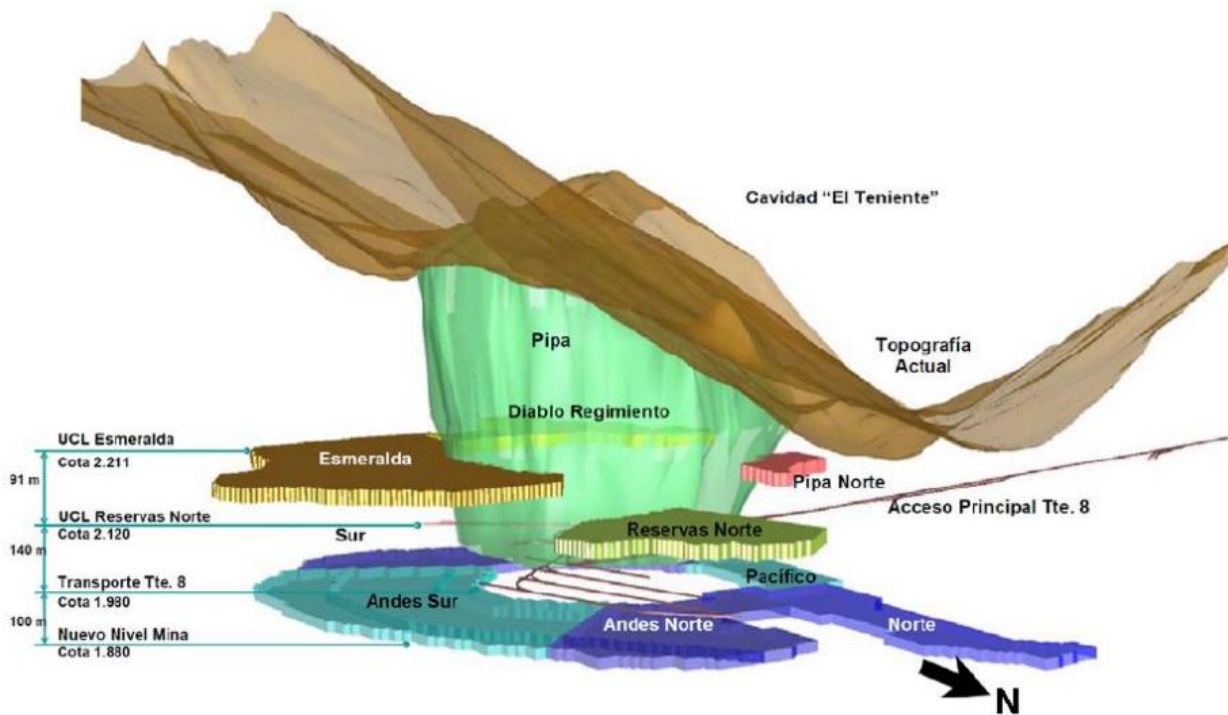


Figura 7: Distribución espacial de las zonas de extracción en la mina El Teniente. Las muestras estudiadas en este trabajo pertenecen al Nuevo Nivel Mina, un nuevo nivel de producción ubicado en una cota inferior a los que aparecen en la figura. Tomado de Harrison (2009).

## 2.2.1 Litología

En el yacimiento se encuentran principalmente rocas ígneas intrusivas y extrusivas, con numerosos cuerpos de brecha distribuidos dentro de este. Skewes (2002) divide las litologías dependiendo de su edad y composición, y las agrupa en unidades, clasificación que todavía es usada.

### A) Rocas ígneas

#### **Complejo Máfico del Teniente (CMET; 8.9 +- 1.4 Ma)**

Las rocas más antiguas dentro de la mina. Son rocas máficas color negro con textura afanítica a porfírica. Antiguamente conocidas como las Andesitas de la mina. En general están fuertemente alteradas a biotita, brechizadas y mineralizadas, escondiendo la petrología original de la roca. Forman parte de un complejo intrusivo con forma de lacolito, que intruyó el Complejo Volcánico de El Teniente. La parte central de este complejo, que es donde está la mina, tiene un espesor de al menos 2000 m, y en total, se estima que el cuerpo tiene un volumen mayor a 50 km<sup>3</sup> (Stern, 2010). En este cuerpo se ubica el 80% de la mineralización de cobre de la mina (Camus, 1975; Arévalo *et al.*, 1998).

#### **Tonalita Sewell (7.05 +- 0.14 Ma) y sills andesíticos asociados (8.2 +- 0.5 Ma a 6.6 +- 0.4 Ma)**

La Tonalita Sewell es uno de los plutones de composición félsica a intermedia que es parte del Complejo Plutónico de El Teniente que intruyó las rocas volcánicas preexistentes, ubicado al sureste de la Brecha Braden. Es un cuerpo con textura equigranular, holocristalino, con fuerte alteración a cuarzo-sericita-clorita, que aflora en un área aproximadamente de la mitad del tamaño del CMET. Se estima que tiene un volumen de la menos 30 km<sup>3</sup>.

#### **Pórfidos dacíticos del Norte y Centro (6.09 +- 0.18 Ma)**

Son dos cuerpos intrusivos pequeños dacíticos ubicados al este y noreste de la Brecha Braden. Basado en su edad estos cuerpos pertenecerían al Complejo Plutónico Joven.

#### **Pórfido A (5.67 +- 0.19 Ma)**

Es un stock granitoide pequeño que presenta anhidrita. Este intruye una brecha magmático-hidrotermal de anhidrita rica en Cobre (>1-2 wt % Cu) emplazada en el contacto entre la Tonalita Sewell y el CMET. Los márgenes del stock se caracterizan por

ser brechas ígneas matriz soportadas que contienen clastos angulares y redondeados que provienen tanto de la Tonalita Sewell como del complejo máfico. De esto aparecen los nombres “microdiorita” si los clastos son de color claro y brecha “andesítica” si estos son oscuros. Este cuerpo presenta brechas con altas leyes de cobre.

### **Pórfido Dacítico (ex Pórfido Teniente) (5.28 +- 0.1 Ma)**

Es un cuerpo elongado de forma tabular, orientado NS a noroeste y con manteo subvertical que se extiende por 1.5 km desde la Brecha Braden hacia el norte. No está claro si aparece también hacia el sur de esta.

### **Diques de Latita (4.82 +- 0.09 Ma)**

Son diques pequeños que aparecen de forma concéntrica alrededor de la Brecha Braden, pero sin mucha continuidad (Uribe *et al.*, 2003). La ocurrencia de estos bloques relacionados a la Brecha Braden, pueden indicar que intruyeron antes de esta y que pueden haber tenido incidencia en su formación (Stern, 2010).

### **Diques lamprófidos post-mineralización (3.85 +- 0.18 a 2.9 +- 0.6 Ma)**

Las rocas ígneas más jóvenes del depósito son los diques lamprófidos de olivino-hornblenda, y representan la última fase volcánica del lugar. Son rocas mágicas, negras a verde oscuro, frescas o poco alteradas de manteo subvertical que ocurren dentro de la mina y en sus cercanías. Tienen algunas similitudes químicas con las andesitas adakíticas.

## **B) Brechas**

El Teniente contiene varias brechas magmático-hidrotermales, algunas mineralizadas y otras no. En general se separan por la litología y el mineral más abundante en la matriz. Skewes (2002) hace una categorización que todavía está vigente.

### **Brecha Braden**

La brecha más grande y la estructura central de El Teniente. Es un conjunto de brechas hidrotermales dispuesto en forma de cono invertido con un diámetro de 1200 m en la superficie actual y una extensión vertical máxima de 3168 m (Floody, 2000). En la periferia de esta se produce lo que se llama Brecha Marginal, que es una brecha de turmalina, con un ancho promedio de 50-60 m. Está constituida por fragmentos angulosos a subangulosos, provenientes de las rocas adyacentes preexistentes, y presentan grados variables de alteración cuarzo-sericita-clorita (Cuadra, 1986).



### **Brechas de biotita**

El mineral dominante es la biotita. Usualmente son brechas monolíticas, con clastos del cuerpo máfico o félsico, y en algunos casos, de ambas. Generalmente tienen una alta ley de cobre. Es difícil diferenciar estos cuerpos cuando están dentro del CMET, pues ambas litologías tienen colores parecidos y texturas muy alteradas. Han sido identificadas en zonas hipógenas de alto cobre alrededor de la Brecha Braden y lejos del Pórfido Dacítico (Skewes, 2002).

### **Brecha de anhidrita**

Brecha constituida por fragmentos líticos con matriz de anhidrita. Están asociadas a una alteración hidrotermal. Los fragmentos provienen de rocas adyacentes fragmentadas. Se ubican preferentemente en los contactos del Complejo Máfico El Teniente. Se formaron después de las brechas de biotita e ígneas (Skewes, 2002).

## **2.2.2 Alteración**

El yacimiento se formó gracias a un proceso continuo de alteración y mineralización. Cuadra (1986) categorizó este proceso en 4 etapas hipógenas, llamadas Tardimagmática, Hidrotermal Principal, Hidrotermal Tardía y Póstuma, más una supérgena.

### **Etapas Tardimagmática**

Se trata de una alteración potásica en vetillas (cuarzo, biotita, feldespático potásico, anhidrita) y en forma masiva (pertzación en intrusivos y biotización en andesitas) y biotización del Complejo Máfico El Teniente. Conforman zonas de mayor intensidad de forma concéntrica al Pórfido Dacítico y en el borde del intrusivo tonalítico. Está relacionada a la consolidación de los intrusivos Tonalita Sewell y Pórfido Dacítico. Se superponen sobre estas etapas vetillas de la etapa Hidrotermal Principal y Tardía.

### **Etapas Hidrotermal Principal**

Alteración fílica, desarrollada a partir de vetillas de cuarzo y sulfuros, generando halos de alteración cuarzo-sericita-clorita de ancho variable (Cuadra, 1986). La mayor intensidad se encuentra en franjas simétricas alrededor del Pórfido Dacítico, y en general ocurre alejado del complejo de Brecha Braden. Se relaciona a la reacción de los fluidos tardimagmáticos con las aguas meteóricas. En esta se desarrolla principalmente el enriquecimiento de molibdeno en vetillas.

### **Etapa Hidrotermal Tardía**

Alteración fílica que afecta a los clastos de la Brecha Marginal (también llamada de turmalina) y en vetillas, pero con menor intensidad que la Principal. Se desarrolla de forma concéntrica a la Brecha Marginal, y se extiende unos 100-150m. Se relaciona a fluidos hidrotermales, generados por el emplazamiento de esta brecha.

### **Etapa Póstuma**

Una etapa de alteración sericita calcita, restringida a la Brecha Braden, en vetillas con poca frecuencia y afectando a la matriz y a los clastos de la brecha. Relacionada a la consolidación de la Brecha Braden.

### **2.3 Nuevo Nivel Mina**

Este proyecto corresponde a la nueva zona de explotación subterránea que se planea hacer en la mina, a una cota de 1800 m.s.n.m., más abajo que los niveles activos. Actualmente se siguen haciendo estudios estructurales de la roca a esta profundidad para comenzar la construcción y futura actividad extractiva. En este trabajo las muestras usadas pertenecen a esta zona de El Teniente.

### 3. CONCEPTOS PREVIOS

El estudio, como se ha explicado anteriormente, hace uso de cámaras especiales para calcular deformaciones. Debido a esto, en este capítulo se procede a explicar algunos conceptos claves en el manejo de estas y del método para este trabajo.

#### 3.1 Palabras clave

**FPS (Fotogramas por segundo):** Un video no es más que una colección de imágenes puestas en secuencia, por lo tanto, hay una velocidad a la que estas van cambiando. Esta velocidad es medida según el número de imágenes que aparecen en un segundo, o FPS. Como referencia, las películas en general se producen a 24FPS, y la señal estándar de TV es de 25 o 30FPS.

**Cámara de alta velocidad:** Se refiere a una cámara que puede grabar sobre la cantidad de FPS normales. En este caso, las cámaras usadas son capaces de grabar sin problema sobre los 5000FPS.

**Grabación lenta/rápida:** Término usado en este trabajo para categorizar la cantidad de FPS de cualquiera de las grabaciones. Bajo los 100 cuadros por segundo se denomina una grabación lenta, y sobre los 500, una rápida. Se hace esta separación porque cada una entrega información diferente sobre el ensayo.

#### 3.2 Generalidades del sistema DIC (Digital Image Correlation)

Es una técnica óptica sin contacto, que sirve para medir deformaciones y desplazamientos de forma muy versátil tanto en 2D como en 3D. Puede usarse para pruebas de tensión, torsión, compresión, doblamiento y combinaciones de estas. Además, es capaz de hacer mediciones en áreas muy pequeñas, desde el orden de nanómetros, hasta cientos de metros, dependiendo del equipamiento. Entre los usos más comunes se encuentran el testeado de materiales, eventos de alta velocidad, prueba mecánica de componentes, etc.

El principio básico por el cual trabaja esta técnica es la comparación de imágenes digitales en varios estados de deformación o movimiento, combinado con los principios de localización en el espacio 3D (fotogrametría).

#### 3.3 Principios de funcionamiento del sistema DIC

Para la aplicación, se debe seleccionar una región de interés en donde se quieran hacer las mediciones, y dentro de esta, imprimir una malla de puntos con alto contraste, isotrópica y no repetitiva (generalmente una trama de puntos negros predefinida por el fabricante, aplicada sobre un fondo blanco) que actuará como referencia digital para las cámaras (ejemplo en Fig. 8). Una vez aplicada esta trama, se realiza la prueba mientras las cámaras graban en todo momento.

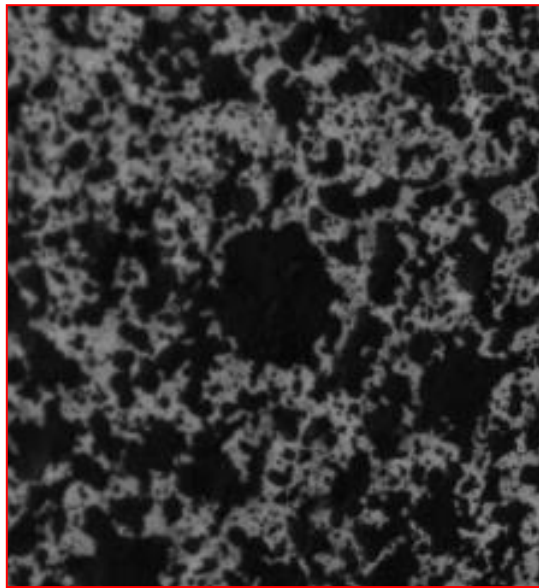


Figura 8: Ejemplo de una trama de alto contraste aplicado sobre una muestra, puntos negros sobre fondo blanco. Tomado de la presentación DIC and ISTR4D training de DantecDynamics (2011).

Luego de haber grabado la secuencia de imágenes, estas son procesadas en un software especializado para la metodología. Este crea una grilla de puntos virtuales que a su vez son centros de un cuadrado virtual de tamaño  $N \times N$  píxeles, los cuales actúan como una ventana de búsqueda, que pueden incluso llegar a superponerse, produciendo un área común, lo que se conoce como solapamiento (ver ejemplo en Fig. 9).

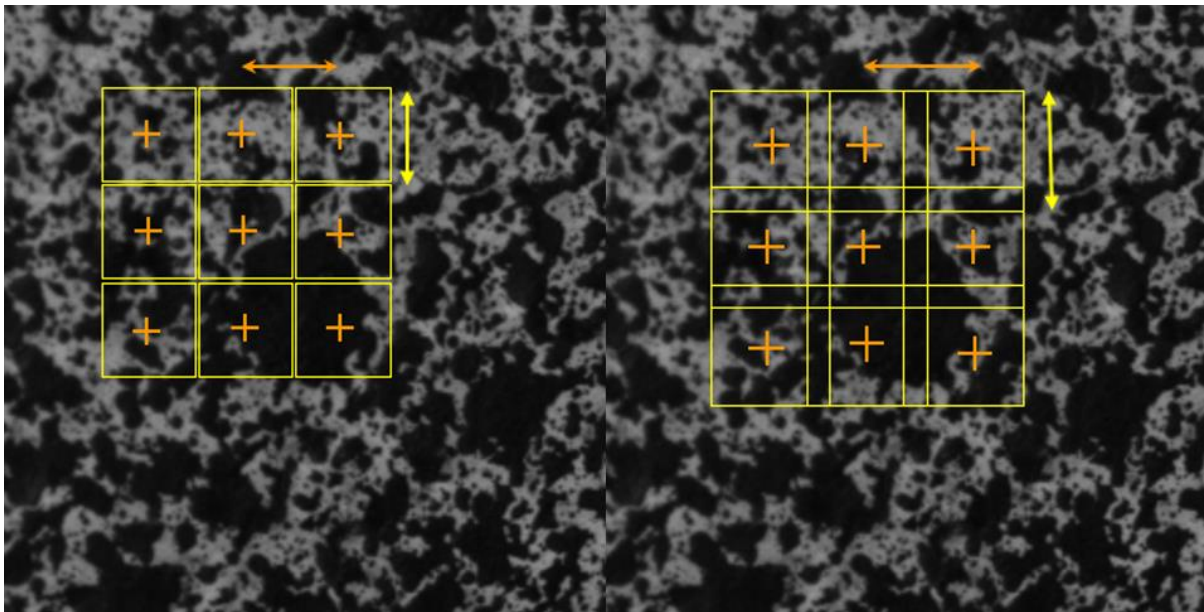


Figura 9: Ejemplificación de la construcción de la grilla virtual. Los signos "+" en naranja indican los puntos virtuales equidistantes que forman la grilla. En tanto, en amarillo, las ventanas de búsqueda que se crean alrededor. Se puede ver en la imagen derecha que se produce un solapamiento entre estas. Modificado de la presentación DIC and ISTR4D training de DantecDynamics (2011).

Estas ventanas de búsquedas identifican el patrón de píxeles asignado usando la intensidad del color, donde el valor mínimo lo toma un píxel totalmente negro y el máximo

uno totalmente blanco. Luego, esta misma ventana intenta buscar en la vecindad una zona que tenga los mismos valores, pero en otra imagen.

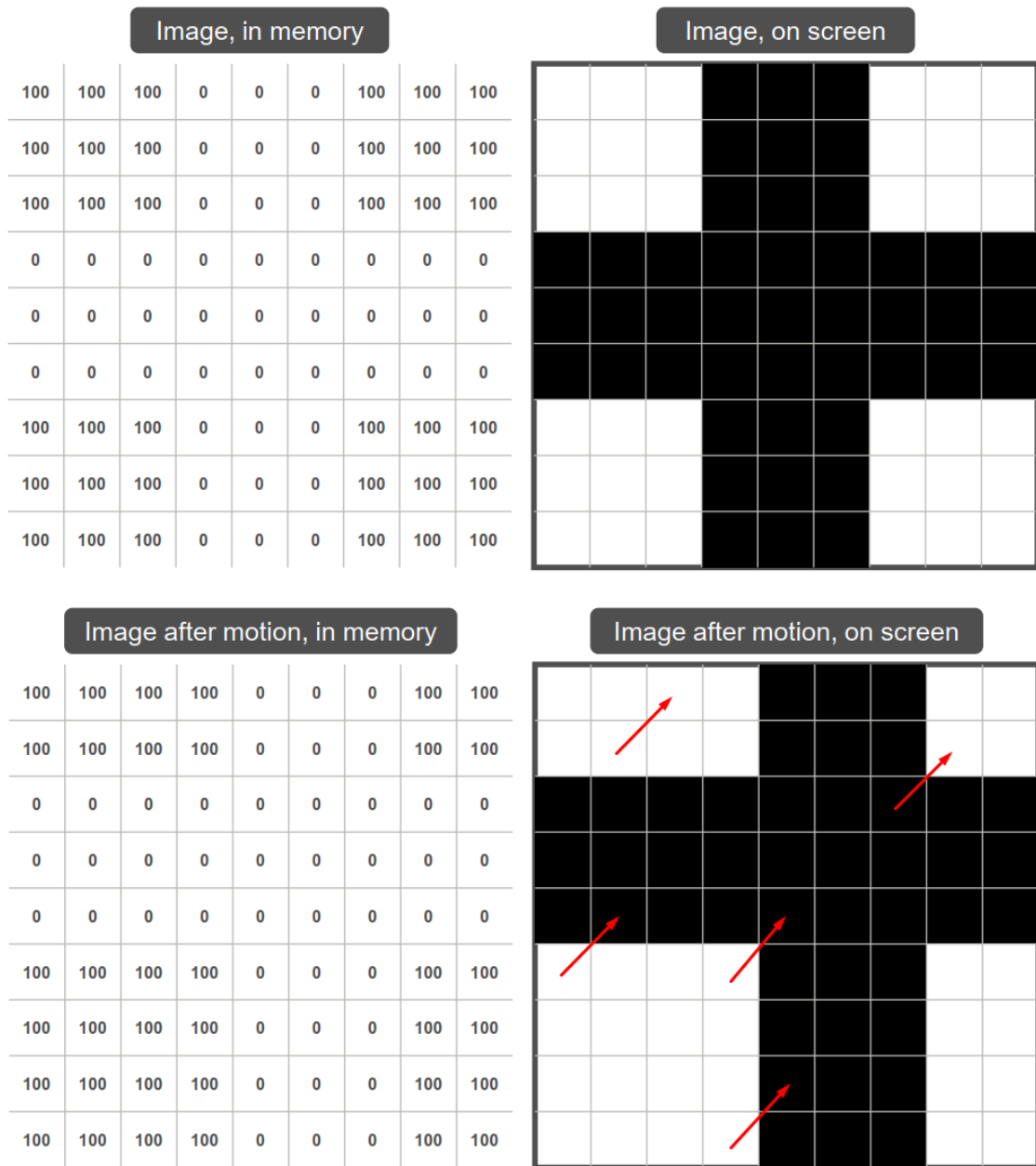


Figura 10: Esquema de cómo funciona la identificación de píxeles dentro de la memoria del software versus la cámara. Tomado de la presentación *Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software*, SEM 2009 Workshop.

Esto difícilmente ocurre, debido a que hay deformación y la intensidad de los píxeles varía mucho, por lo que en realidad se hace es minimizar una **función de correlación**, que típicamente es una función de error cuadrático medio, para encontrar el mejor *match* y trazar así entonces, vectores de desplazamientos de los puntos en las ventanas (ver Fig. 11)

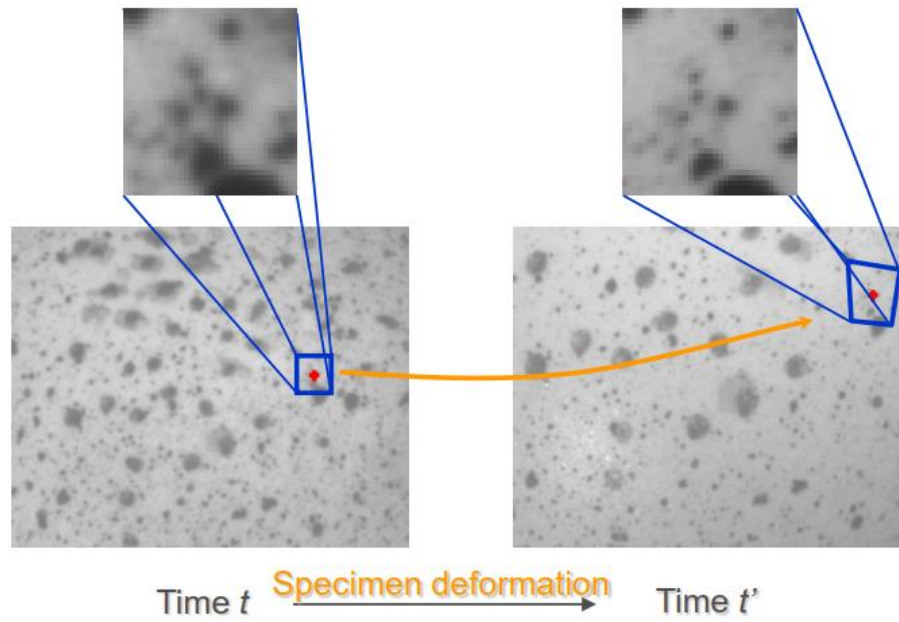


Figura 11: Ejemplificación de cómo es en realidad la identificación por parte la técnica. Tomado de la presentación *Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software, SEM 2009 Workshop*.

Esto se repite en todas las ventanas de cada punto de la grilla virtual. Dependiendo del programa utilizado, este puede ofrecer opciones para cambiar la cantidad de puntos en la grilla, el tamaño de la ventana, considerar desplazamientos muy bruscos, cambiar la función de correlación, etc.

La factibilidad, precisión y exactitud de la técnica está ligada fuertemente con la calidad del entorno en donde se hacen las mediciones, por ejemplo, la iluminación, la estabilidad del sostén del objeto que se deforma, el tipo y tamaño de puntos que se usa como trama y el contraste. Asegurando buenas condiciones de mediciones se puede llegar a resultados más fiables y más precisos (se habla del orden de 1 micrómetro de precisión para el sistema de este trabajo (McGinnis, 2005, DantecDynamic Measure Principles of DIC)).

Ahora, una cámara es suficiente para calcular movimientos en el plano, pero para calcular movimientos con profundidad, es decir en el espacio 3D, se deben usar al menos dos cámaras.

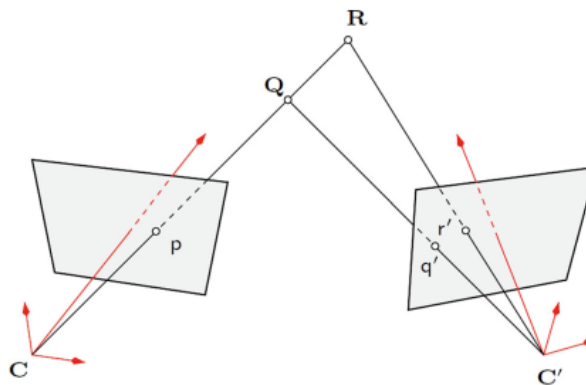


Figura 12: Esquema del posicionamiento espacial de las cámaras 3D. Tomado de Sutton et al., 2009

Esto funciona porque desde un rayo proyectivo de una sola cámara (C en la figura 12, por ejemplo), el punto  $p$  puede representar una infinidad de puntos (Q y R por nombrar un par), pero al usar un segundo rayo proyectivo (con otra cámara), el punto Q es el único punto 3D que puede representar los puntos  $q'$  y  $p$ .

Internamente, lo que hace el computador es seleccionar una cámara como la principal, y usarla como sistema de referencia. Luego, se usa un tablero con figuras de tamaño conocido (ver Fig. 13) para calibrar los parámetros de ubicación en el espacio del sistema, a través del posicionamiento de este frente a las cámaras en varios ángulos.

Existen dos tipos de parámetros obtenidos desde esta calibración, los intrínsecos y extrínsecos. Los primeros están relacionados con el posicionamiento del sistema de referencia para la cámara seleccionada como "principal": *punto principal*, la coordenada en el plano X-Y desde donde salen los rayos proyectivos; *distancia focal*, la distancia desde el punto principal hasta el plano imaginario donde está el objeto grabado; y *parámetros de distorsión*, que son valores de error geométrico inducidos por el lente usado. Los extrínsecos incluyen a los valores de *traslación*, que son la distancia entre el origen de la cámara secundaria hasta el punto principal de la cámara principal, y la *matriz de rotación*, que indica cuanto tendría que rotar el sistema de coordenadas de la cámara secundaria para que coincida con el de la principal.

Estos dos parámetros son los que indican finalmente la confianza del cálculo de la profundidad de un punto en el espacio.



Figura 13: Tablero de calibración para cámaras DantecDynamics.

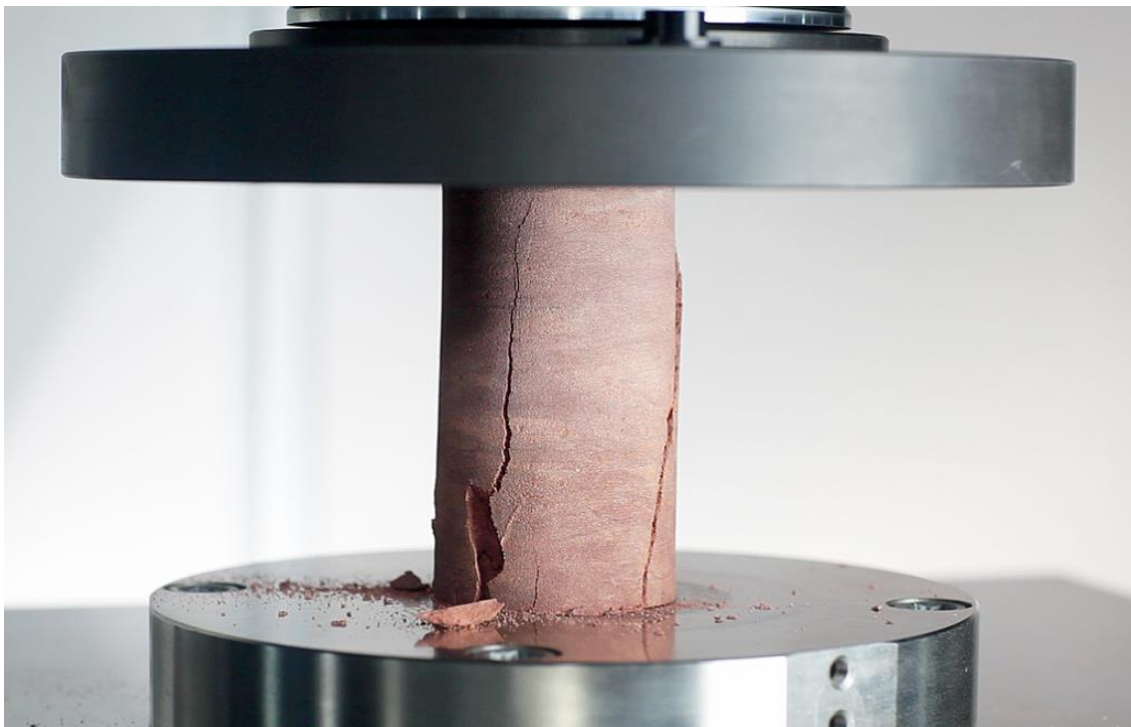
### 3.4 Prueba de compresión uniaxial no confinada

Es una prueba de resistencia que consiste en aplicar esfuerzo compresivo sobre el eje de una muestra de roca para calcular parámetros físicos de esta, como el modo de fractura, resistencia compresiva máxima (UCS), cantidad de deformación. La muestra debe cumplir con ciertos estándares antes de ser sometido a estas pruebas, como son, ser una muestra representativa de la zona de la que se quieren obtener datos, tener una proporción alto/diámetro específico (suele pedirse valores entre 2 y 3 dependiendo de la

normativa usada) y para este estudio, base superior e inferior totalmente planas y paralelas.

Esta muestra se monta en una prensa, que utiliza dos placas cilíndricas de metal (una de compresión y otra de apoyo) para comprimirla (ver Fig. 14). La tasa de esfuerzo aplicada sobre la muestra depende del tipo de ensayo a realizar. En general los más comunes son por tasa constante y por deformación controlada. Para los de tasa constante se fija una tasa y esta es aplicada por todo el ensayo, independiente de cualquier otro parámetro. En cambio, con deformación controlada, se comienza con una tasa y se usa algún tipo de medidor para retroalimentar la prensa con la deformación en tiempo real e ir cambiando la tasa de compresión para que la muestra siempre se deforme en una cantidad fija. La prueba termina cuando el espécimen ya no resiste más la compresión y se fractura, lo que en las rocas frágiles como las de este trabajo, se manifiesta como un violento estallido de la muestra.

Usualmente se usa algún método externo para medir propiedades. En este trabajo se usan strain gauges, LVDT y DIC para hacer mediciones de deformación y cálculo de propiedades físicas, como módulo de Young y coeficiente de Poisson. Una clásica forma de representar la deformación es haciendo gráficos de tensión vs deformación (stress vs strain), como se puede ver en el ejemplo de la figura 15.



*Figura 14: Ruptura de roca en compresión uniaxial. Imagen tomada de la página web de BAW.*



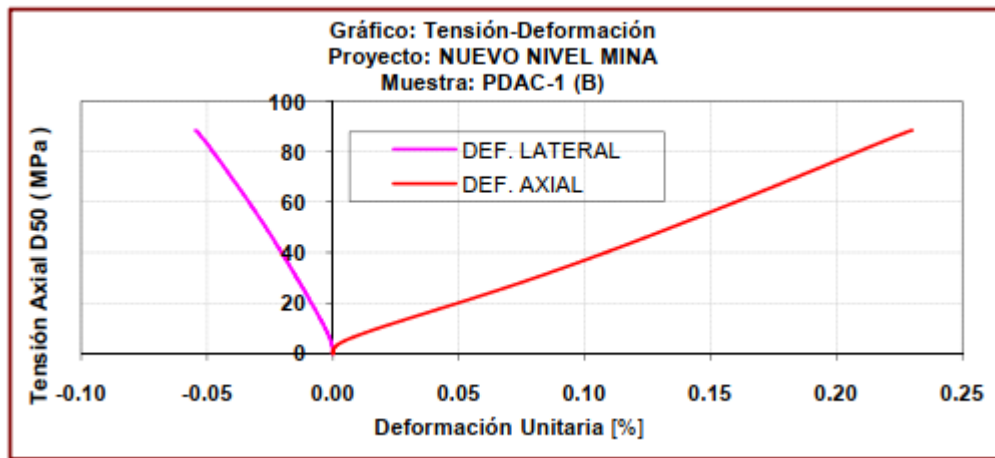


Figura 15: Ejemplo de una curva típica de deformación vs tensión (strain vs stress) obtenida con strain gauge o LVDT. Fuente: Pruebas realizadas por el IDIEM de la Universidad de Chile sobre el mismo tipo de muestras usadas en este trabajo.

## 4. METODOLOGÍA

El trabajo de investigación incluyó varias etapas. Comenzó en la elección de muestras en la testigoteca de El Teniente y culminó con los análisis de las mediciones de deformación y representación gráfica de los ensayos.

### 4.1 Elección de muestras

Se seleccionan desde la testigoteca de El Teniente, ubicada en Rancagua. Se eligen varios segmentos de sondajes del sector Nuevo Nivel Mina de la mina, la mitad del tipo de litología CMET y la otra mitad de tipo Dacita. Estos se mandan a cortar y finalmente resultan en 8 muestras (tipo probetón, de 32 cm de largo por 14 cm de diámetro), 5 de tipo CMET y 3 de Dacita. Adicionalmente, se agregan 7 muestras más provenientes de sondajes de El Teniente, de dimensiones menores (13 cm de largo por 6.3 cm de diámetro) y de una zona no identificada de la mina, para usarse como pruebas antes de los ensayos definitivos. En la figura 16 se pueden observar el tipo de muestras utilizadas.



*Figura 16: Algunas de las muestras probadas. Las más oscuras a la derecha e izquierda corresponden a litología CMET, mientras que la del medio es dacita.*

## 4.2 Mapeo de estructuras e identificación de mineralogía

De las 8 muestras en un principio se eligen 4 (2 de cada litología), que son las muestras principales, y por lo tanto se estudian más en detalle. La primera parte del estudio de las muestras es hacer una descripción de las estructuras. Para esto se sigue como guía el manual de mapeo de probetas de CODELCO, que sugiere una plantilla para rellenar los datos de la roca. En esta plantilla se levantan antecedentes relativos a la mineralogía de las vetillas, JRC, ángulo, espesor y otras características que podrían ser importantes en un análisis estructural.

Para la identificación de minerales se usa una lupa con aumento 10x, ácido clorhídrico y un rayador de punta de tungsteno, además de agua para hacer más visible los minerales. Para medir el JRC se usa la clasificación propuesta por Barton en 1977 (ver Fig. 17). Se estima un valor promedio entre los 2 lados de una vetilla en el caso de las vetillas gruesas. Para el espesor y ángulo en tanto, se usa un geoflex.

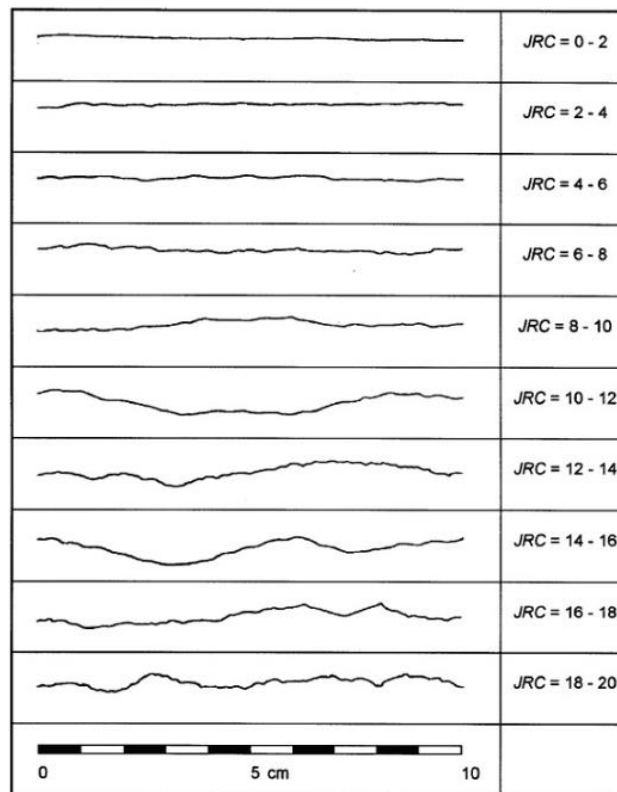


Figura 17: Clasificación de rugosidad por JRC. Barton, 1977.

Además, se utiliza una mica transparente para hacer un mapeo de las estructuras, apoyándola sobre la probeta y marcando con lápices de tinta la traza de las vetillas de espesor 0.2 mm o mayor (mostrado en la figura 18). Los colores no representan ninguna propiedad de estas, solo se usan varios para no confundir trazas que sigan un camino similar. Se enumera en una hoja aparte cada vetilla para identificarla después del ensayo. Para eliminar ambigüedades, el halo **no se marca**.

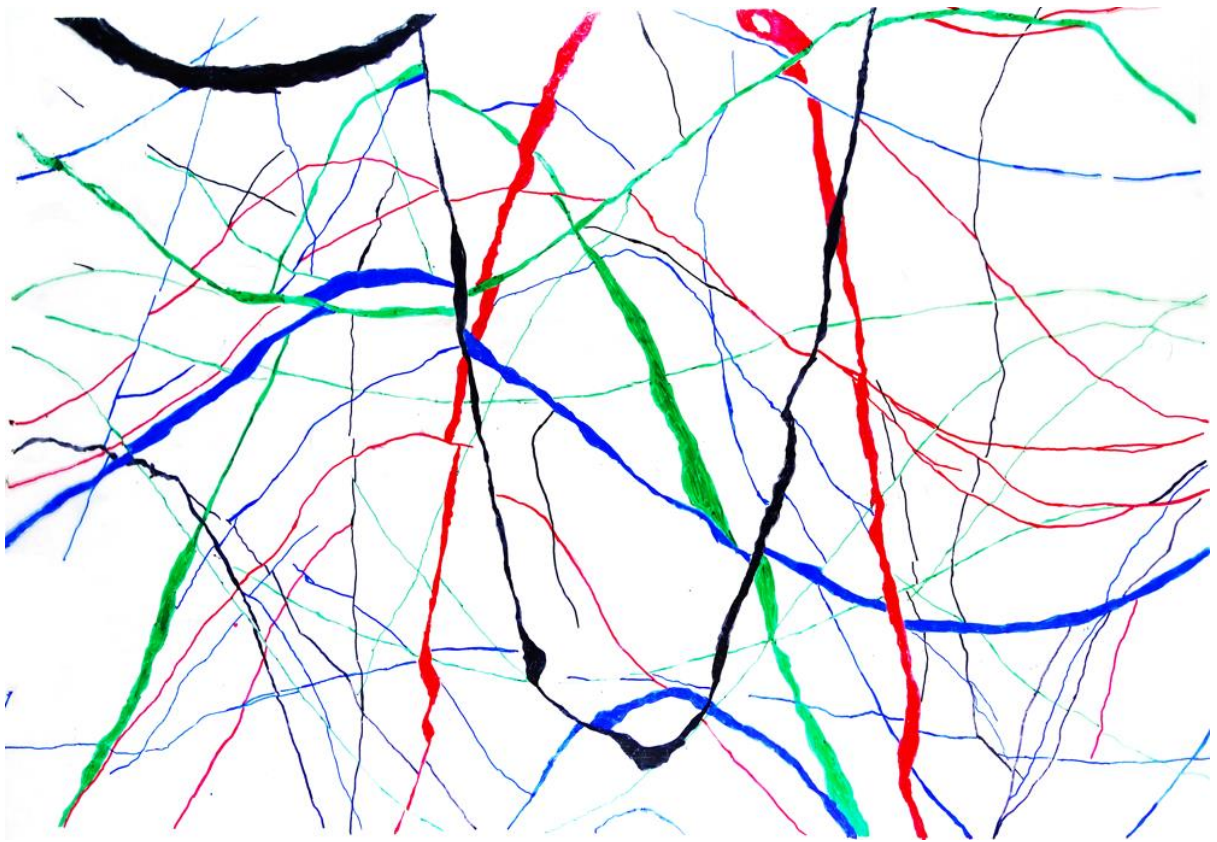


Figura 18: Mapeo de vetillas digitalizado de una de las muestras.

### 4.3 Pintado de muestras

Una vez que ya están mapeadas las muestras, se fotografían exhaustivamente para no perder detalle en los análisis post fractura. Luego, para preparar las probetas para usar DIC, estas son pintadas de color blanco con spray en zonas donde se cree que es más probable que puedan ocurrir las fracturas principales (ver Fig. 19) y se estampa con tinta negra la grilla de puntos. Esta es una grilla predeterminada (de puntos de tamaño 0.026 pulgadas) que se elige en base a la resolución de las cámaras y se aplica como un sello sobre la zona blanca, la que se puede ver en la figura 20.

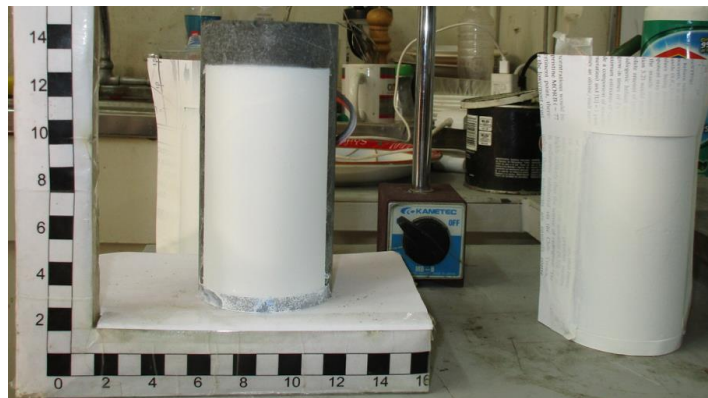


Figura 19: Muestras pequeñas recién pintadas

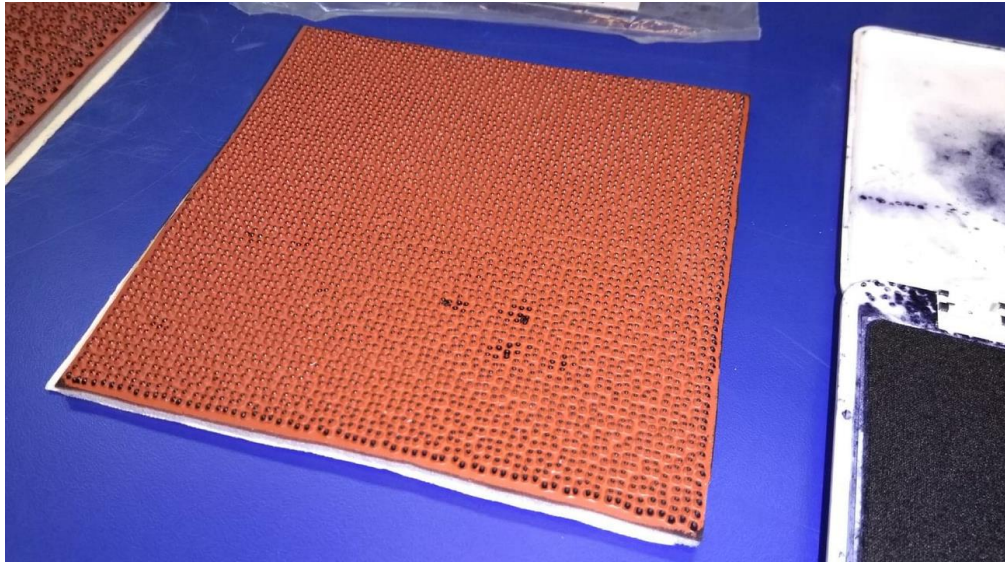


Figura 20: Sello usado para imprimir la trama de puntos negros sobre el área blanca.

#### 4.4 Montaje del experimento

Se usa el sistema de cámaras y luces proporcionados por la profesora Viviana Meruane, del departamento de Ingeniería mecánica de la Universidad de Chile. Este sistema comprende 2 cámaras Q-450 de la empresa DantecDynamics especialmente acondicionadas para el uso de esta técnica (ver Fig. 21), un computador con la licencia del programa Istra4D para el procesamiento de datos, un trípode, las placas de calibración, las tramas de puntos y 2 focos de iluminación continua, además de los cables necesarios.



Figura 21: Ambas cámaras montadas en el trípode junto a los focos.

Por otra parte, la prensa compresiva servoasistida es proporcionada por el profesor Javier Vallejos, del departamento de Ingeniería en Minas de la Universidad de

Chile, producida por la empresa Servosis Testing Machines y propiedad del AMTC en conjunto con el Departamento de Ingeniería en Minas, que también incluye su propio computador y medidores de strain tipo LVDT (ver Fig. 22). El sistema está montado en el laboratorio de rocas del mismo departamento. Para hacer las grabaciones con la prensa se usa una mica gruesa transparente como protección para las cámaras (mostrada en la figura 24).



Figura 22: Prensa Servosis para ensayos de compresión y computador de monitoreo.

Por último, se usa un tercer computador para registrar las mediciones de los strain gauges (ver Fig. 23).

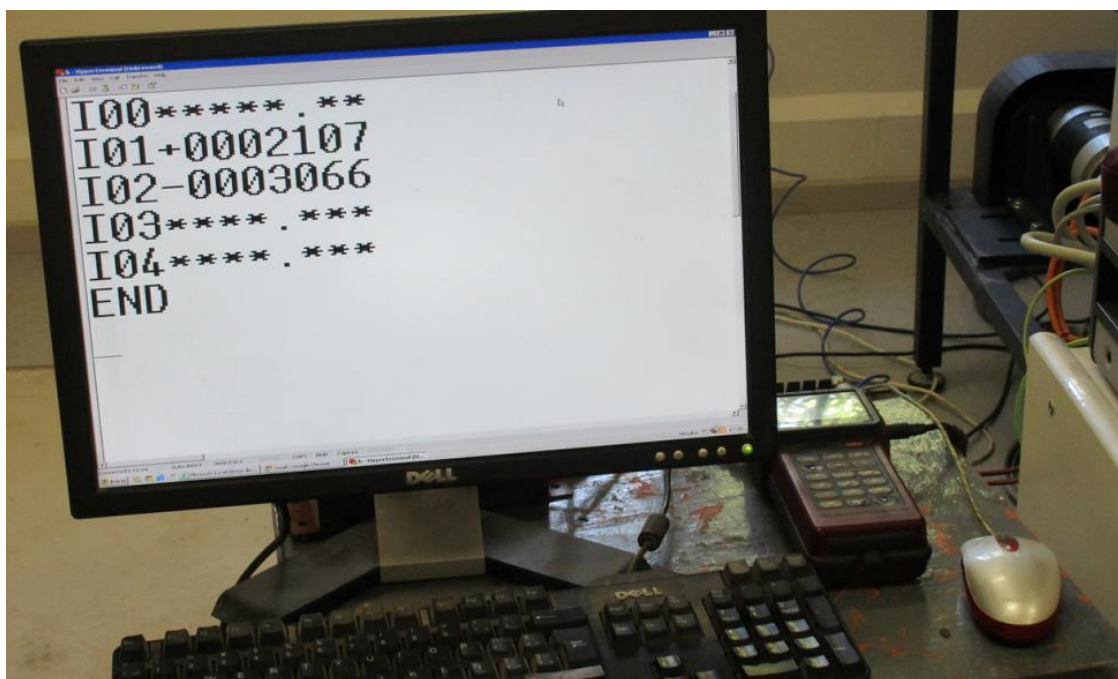


Figura 23: Computador para registrar las mediciones de los strain gauges.

El montaje en sí consiste en la prensa con la placa protectora montada entre la probeta y las cámaras. Los focos de luz y el trípode con las cámaras enfocando a la muestra, formando un ángulo aproximado de  $25^\circ$  entre ellas. Los computadores y sistemas de medición apartados, dispuestos en el laboratorio (ver Fig. 24).

Los LVDT y strain gauges son montados dependiendo del tipo de muestra. El LVDT se instala poniendo el pedestal en la base de la prensa, y el sensor apuntando hacia arriba, tocando el techo del pistón de la prensa, en el caso que se quiera medir la deformación axial. En el caso de la deformación lateral, se usan dos LVDT, en que cada uno apoya el sensor de forma horizontal contra la roca, en puntos diametralmente opuestos. Los strain gauges se pegan atrás de la cara que se graba, para todas las muestras.

Todo esto está dispuesto dentro del laboratorio de mecánica de rocas en el edificio de Ingeniería de Minas en la Universidad de Chile.



*Figura 24: Montaje final.*

#### **4.5 Ejecución de los ensayos**

Esta es la parte principal del estudio. Consiste en dos días de comprimir muestras con diferentes configuraciones en las cámaras. En total se completan 15 ensayos, en los cuales varía el tipo de litología, tamaño de la muestra, y fotogramas capturados por segundo. La tasa de carga también se modifica, pero siempre es un valor constante durante todo el ciclo. Las primeras muestras se usan a modo de prueba, para calibrar y

elegir las mejores configuraciones para las 4 muestras definitivas. Una vez ensayadas las muestras definitivas se siguen cargando más muestras preparadas para obtener más datos, aunque sin objetivo en específico (i.e. sin una configuración previamente en mente), más que nada para probar otras configuraciones de grabación.

Un resumen de los experimentos realizados y las configuraciones aparecen en la Tabla 1 en la sección de resultados.

## **4.6 Procesamiento de datos y grabaciones**

La parte del trabajo que más ocupa tiempo es la del procesamiento de los datos e imágenes obtenidas. Consiste en ordenar resultados en tablas y procesar las grabaciones en el software oficial Istra4D para calcular curvas de deformación, confeccionar mapas de deformación visual y análisis estructurales, usando varias configuraciones de parámetros, como solapamiento de las ventanas de búsqueda, cantidad de puntos en la grilla virtual, tamaño de la ventana de búsqueda, etc.

Debido a los requerimientos del método en cuanto a buena iluminación y conexión estable entre los dispositivos de grabación, algunos problemas sobre estos provocaron que no se pudiera aplicar la técnica en algunas muestras. Estos casos son señalados en la Tabla 1.

### **4.6.1 Curvas de deformación vs tensión**

Para confeccionar las curvas de deformación vs tensión se usaron tres métodos, con el objetivo de comparar los resultados y averiguar las limitaciones de cada uno. El primer método de medición es con strain gauges. Cada muestra tiene pegada uno de estos, que pueden leer deformación axial y lateral. El segundo método es con LVDT (Linear variable differential transformer), los cuales se usan en la mayoría de las muestras para medir deformación axial, y en algunos casos para deformación lateral. Ambos son métodos fiables que se pueden usar como punto de comparación. Además, se hace una tabla resumen mostrando los valores del módulo de Young y coeficiente de Poisson calculado para ambos tipos de mediciones.

El último método por utilizar es el DIC (digital image correlation), que es el que se busca comparar contra los métodos más clásicos. Para testear la utilidad de la técnica se realizan mediciones usando “strain gauges virtuales”, que son líneas virtuales puestas sobre la muestra y que al igual que un strain gauge normal, registran la deformación dependiendo de cuanto esta línea virtual se deforma (ver Fig. 25).



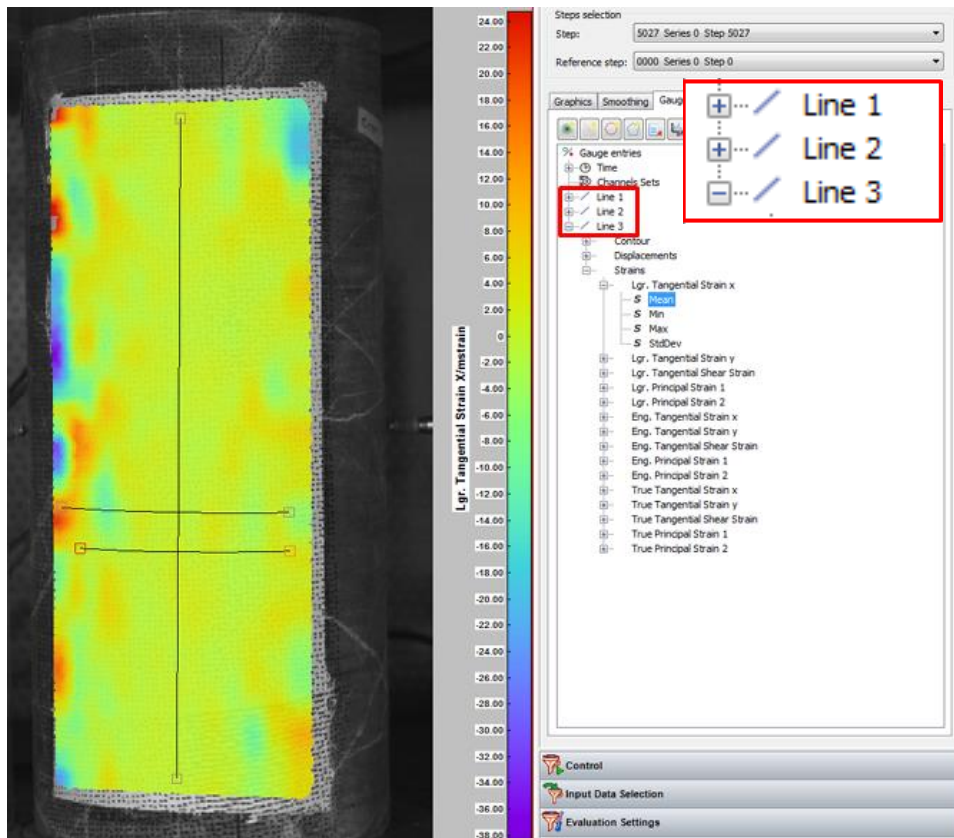


Figura 25: Panel de representación gráfica del software. Encerrado en rojo aparecen las líneas que actúan como strain gauges virtuales.

Esta deformación se puede calcular de dos formas usando el software Istra4D. La primera forma es calculando la distancia entre dos puntos fijos en la muestra, que no toma en cuenta la deformación en los puntos entremedio, medición que se denomina **gauge strain**. La segunda forma disponible en el programa es resolviendo el tensor de deformación de Lagrange:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \sum_{l=1}^3 \frac{\partial u_l}{\partial x_i} \frac{\partial u_l}{\partial x_j} \right)$$

Este tensor da una medición más realista, pues toma en cuenta también la deformación entre los puntos de una línea, que, aunque es muy pequeña en este tipo de material, existe. Para efectos de este trabajo se le denominará **strain full o completo**.

Sin embargo, la información que exporta el programa son datos de diferentes ventanas de búsqueda pegadas unos al lado de otros. Esto al graficarlo no tiene mucho sentido (ver Fig. 26), por lo que deben pasar por un paso extra para que tengan una continuidad en el tiempo, hay que suavizar los resultados.

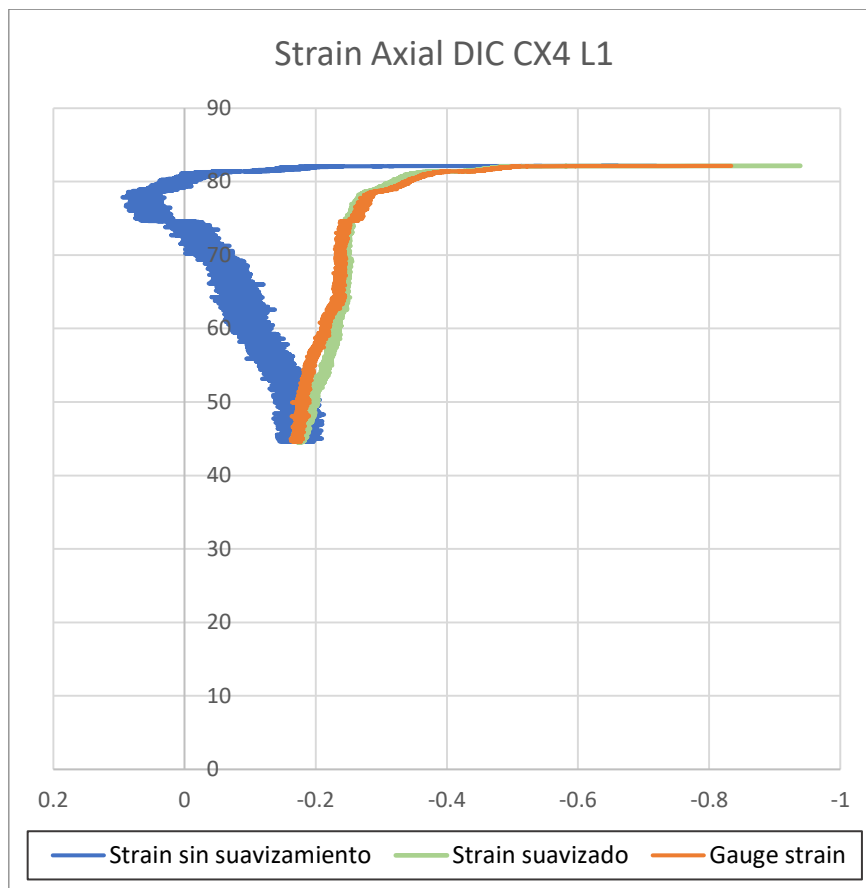


Figura 26: Diferencia entre la curva de deformación sin aplicar filtros (en azul) y con filtros (verde). Notar que sin suavizar la curva no tiene sentido, pues muestra una deformación positiva.

El programa presenta dos tipos de suavizamiento, la regresión local y las splines. En el caso de la regresión local, consiste en promediar los resultados de cada punto en la grilla con los cercanos, dentro de una cierta área de dimensiones  $N \times N$ . El valor puede variar desde  $3 \times 3$  hasta  $31 \times 31$ , donde los más pequeños indican una menor aproximación, y los más grandes una mayor.

En la suavización tipo spline, el programa adapta globalmente el desplazamiento a curvas de tipo spline. La cantidad de curvatura que tienen estas splines y la similitud del desplazamiento a estas splines son los parámetros que se pueden manejar. Según la empresa que fabrica los productos, esta es la mejor opción para estudiar fenómenos que afectan globalmente al área de estudio, aunque el efecto de elegir una u otra se discute más adelante.

#### 4.6.2 Representación visual de la deformación

Una de las grandes propiedades de la metodología es poder representar la deformación usando mapas de colores. En este caso, se prueban dos maneras de hacerlo, con el programa oficial que viene integrado en las cámaras (Istra4D) y con una función de Matlab.

En el software Istra4D se tiene una sección en la que se pueden comparar dos imágenes, usando una como referencia (visto en la figura 25). O sea, se puede elegir cualquier paso de la secuencia grabada y hacer que compare la propiedad física que se elija contra otro paso de la misma secuencia. Por supuesto, el mayor interés para el trabajo, y lo que se opta por hacer finalmente, es representar la deformación axial y lateral en la cara de la roca para ver cómo avanza en el tiempo.

Al igual que para el caso de cálculo de deformación para curvas, se necesita aplicar un suavizamiento para que las zonas de colores se vean representadas de buena forma.

En el caso de la función en Matlab, los datos de deformación se exportan en forma de texto y son entregados al programa, el que luego calcula, dependiendo de cómo esté programada, una representación visual de la deformación axial, lateral o en profundidad. No requiere de ningún tipo de configuración extra.

#### **4.6.3 Análisis estructural**

Apoyado en la capacidad de las cámaras de poder grabar a una muy alta tasa de fotogramas, se usan las grabaciones para hacer detalles del momento exacto en que se producen las fracturas de las muestras principales. Esto es útil para estudiar como comienza a producirse el fracturamiento y cómo evoluciona debido a la disposición de elementos estructurales.

Una vez que los resultados están procesados, se prosigue a revisar y analizarlos. Esto lleva muchas veces a que se descubran nuevas ideas de cómo mejorar las mediciones y otras opciones de procesamiento, por lo que al final el ciclo de tratar los datos y analizarlos para encontrar una forma para perfeccionarlos es reiterativo.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Resultados generales

En total se ensayan 15 muestras durante dos días. Los primeros siete ensayos son de prueba, para aprender a utilizar el sistema de cámaras. Luego de los ensayos de prueba, se cargan las cuatro muestras principales de este trabajo (también llamadas *muestras definitivas o principales*). De estas cuatro muestras definitivas, 2 corresponden a la unidad CMET (basalto) y las otras 2 a la unidad Dacita (dacita). Para cada litología, 1 de las muestras se usa para hacer una grabación de alto FPS (rápida) y otra de bajo FPS (lenta). Finalmente, con el tiempo restante se ensayan 4 muestras extras para obtener más datos.

A pesar de tener 15 muestras, la cantidad de datos disponibles no es la misma para todos los ensayos, pues solo de las 4 definitivas se tienen todos los detalles y mediciones. En las restantes se registran la mayor cantidad de datos que permiten el tiempo y las posibilidades.

N°	Probeta	Duración [s]	FPS	Litología	DIC aplicable?	Resistencia peak [MPa]
1	Chica n°1	30	400	CMET	Si	155.3
2	Chica n°3	5	833	CMET	Si	109.4
3	Chica n°5	53	294	CMET	Si	77
4	Chica n°2	2	2000	CMET	Si	64
5	Chica n°6	6	2000	CMET	Si	73
6	Grande DV4	150	100	Dacita	Si	92.6
7	Grande DV5	55	500	CMET	No	96
<b>8</b>	<b>Grande CX 11</b>	<b>220</b>	<b>62.5</b>	<b>Dacita</b>	<b>Si</b>	<b>118</b>
<b>9</b>	<b>Grande CX 4</b>	<b>241</b>	<b>62.5</b>	<b>CMET</b>	<b>Si</b>	<b>82.1</b>
<b>10</b>	<b>Grande CX 12</b>	<b>6</b>	<b>1500</b>	<b>Dacita</b>	<b>Si</b>	<b>94.1</b>
<b>11</b>	<b>Grande CX 2</b>	<b>7.3</b>	<b>1500</b>	<b>CMET</b>	<b>Si</b>	<b>67.7</b>
12	Grande DV6	23	1000	CMET	Si	96.5
13	Grande DV7	6	1000	CMET	Si	34
14	Chica n°12	1.5	4400	CMET	No	107.2
15	Chica n°14	8	1500	CMET	No	126.1

Tabla 1: Resumen general del ensayo y grabación de las 15 muestras. Las muestras definitivas están destacadas en negrita.

En la Tabla 1 se pueden ver algunos datos básicos de los ensayos realizados. En los primeros ensayos la cantidad de fotogramas por segundo (FPS) y la duración de las grabaciones es muy variable, debido a que el objetivo es ver cómo responde el programa

y el sistema de grabación a diferentes configuraciones. Luego de haber asegurado la factibilidad de las mediciones, se deciden llevar a cabo las pruebas definitivas, haciendo una grabación lenta (62.5 FPS) para 2 de las muestras, y otra rápida para las dos restantes (1500 FPS). La tabla con datos completos se incluye en anexos.

En la Tabla 2 se muestra que tipo de pruebas se pudieron completar en cada muestra dependiendo de la información que se pudo obtener **a través del DIC**.

<b>Tipo de prueba</b>	<b>Medición de deformación</b>	<b>Representación visual</b>	<b>Análisis estructural</b>
<b>Grande CX 11</b>	Disponible	Disponible	Disponible
<b>Grande CX 4</b>	Disponible	Disponible	Disponible
<b>Grande CX 12</b>	No disponible	Disponible	Disponible
<b>Grande CX 2</b>	No disponible	Disponible	Disponible

*Tabla 2: Factibilidad de hacer una prueba usando los datos obtenidos desde el método DIC.*

Para cada muestra definitiva se hace una descripción detallada de la mineralogía de vetillas, un mapeo de estructuras (Fig. 27), ángulo y JRC. Estos datos sirven como una guía para futuros análisis.

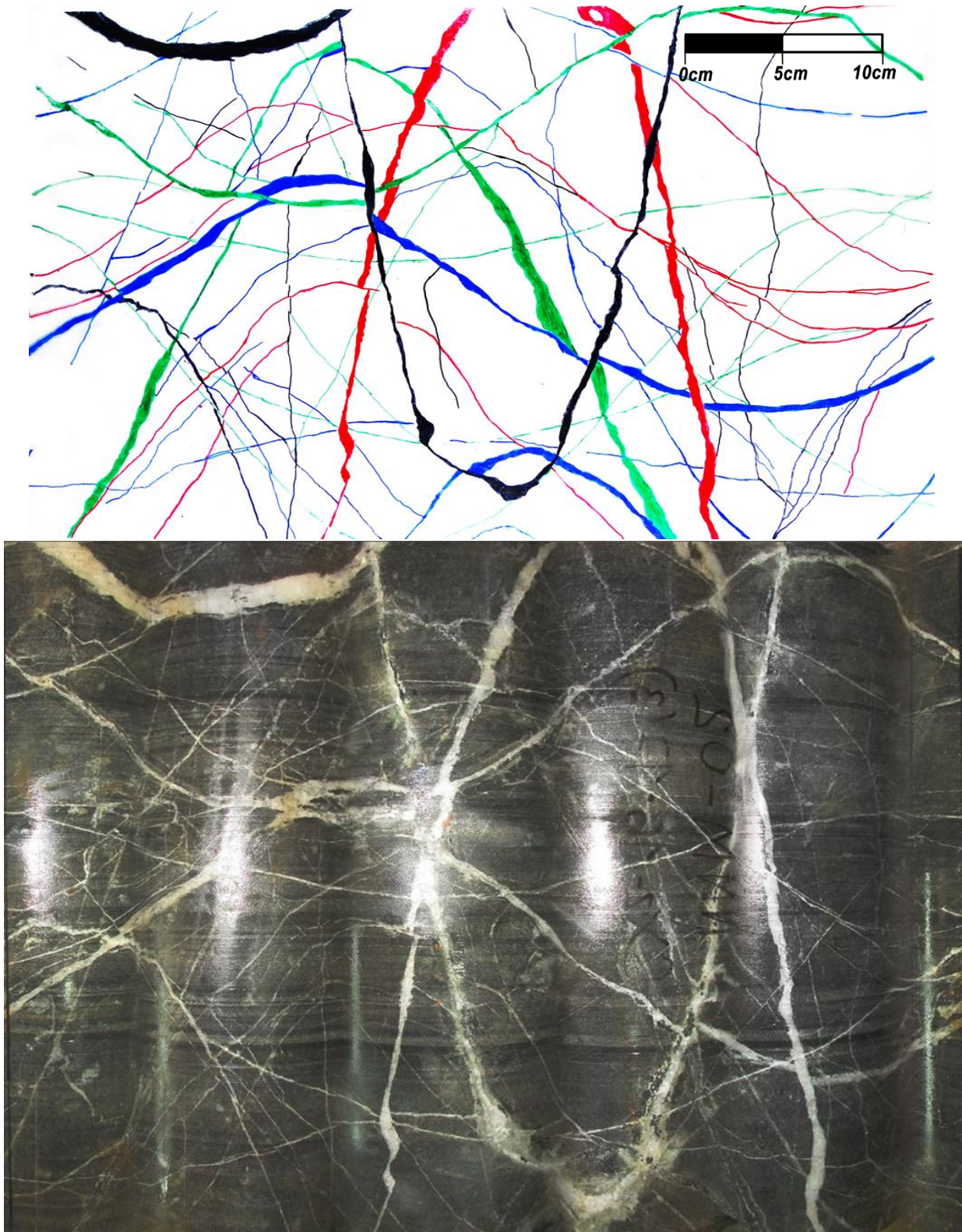


Figura 27: Foto compuesta, mostrando un símil al mapeo 2D hecho sobre la lámina.

## 5.2 Resultados específicos y de la secuencia

En la imagen anterior (Figura 27) se puede observar la digitalización de uno de los mapeos que se realizaron a 4 muestras a través del calcado, y la comparación entre la roca real y el mapeo estructural.

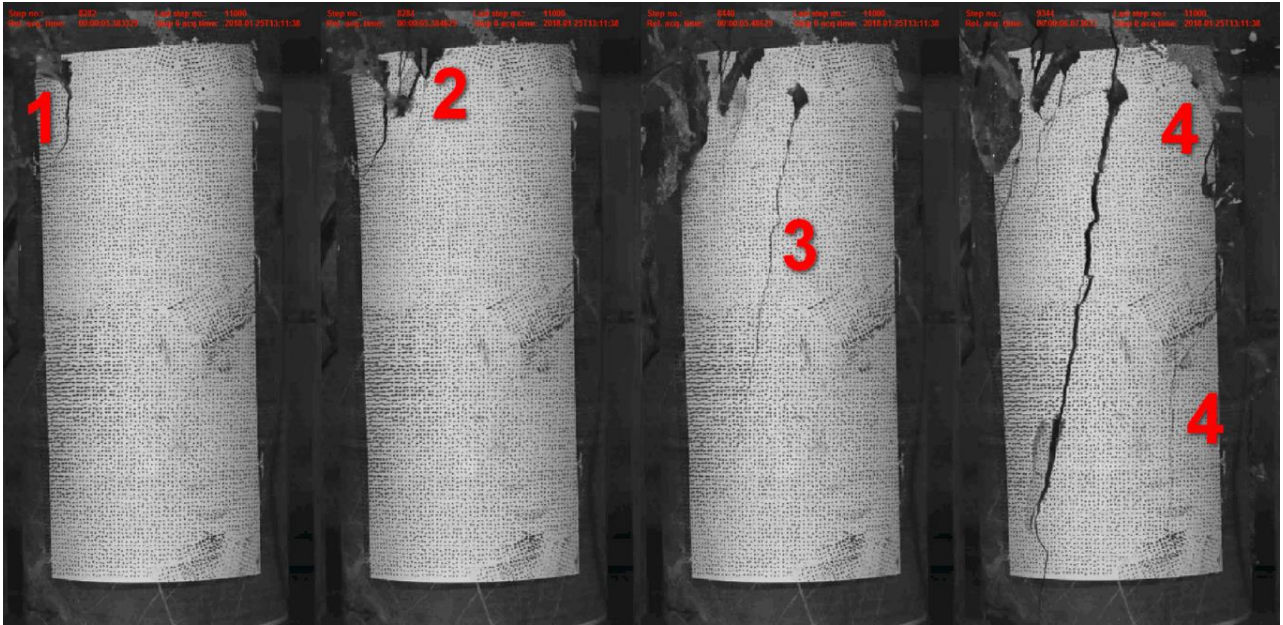


Figura 28: Secuencia de fractura, muestra CX2.

En las imágenes de la figura 28 se pueden ver algunos fotogramas de la secuencia en la que se rompe la probeta anteriormente mostrada en la figura 27. Desde la primera imagen hasta la última pasan 0.15s aproximadamente. Para cada uno de estos pasos marcados en la secuencia, y haciendo uso de la velocidad de las cámaras, se crean tablas resúmenes (ver Tabla 3) indicando el tipo de fracturas que ocurren y las características de las vetillas involucradas, para 12 de los ensayos. Los números asignados a cada vetilla se pueden encontrar en anexos.

Muestra CX2	Medio	Ángulo Respecto a la horizontal	JRC	Espesor tipo [mm]	Halo		Mineralogía				
					Tipo	Espesor [mm]	Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn
1° Fractura	Matriz	Medio									
	Vetilla 1	82	3	2			95	5			
	Vetilla 10	43	10	1.8	Bt-Ser	4	80	15	5		
2° Fractura	Matriz	Alto									
3° Fractura	Vetilla 9	77	3	1.7	Bt-Chl-Ser	1.1	5	80		15	
4° Fractura	Matriz	Alto									
	Vetilla 2	72	6	3			20	45		35	
	Vetilla 8	35	8	10			97		3		
	Vetilla 14	52	8	0.3			100				
	Vetilla 15	88	14	0.3	Bt	2	78	20		2	
	Vetilla x	No se registró esta vetilla por ser muy delgada, <0.2mm									

Tabla 3: Detalle de la secuencia de fracturamiento de la muestra en la figura 19.

Esta Tabla 3 es una de las tablas resúmenes que se obtienen desde la misma muestra mostrada anteriormente. Se confecciona usando el mapeo numerado de vetillas en conjunto con las grabaciones de alta velocidad. La sección de mineralogía varía dependiendo de la muestra, pues no todas tienen los mismos rellenos. En los anexos se incluyen el resto de las tablas sobre las otras muestras.

Para el espesor de vetillas, en esta tabla se usa el espesor tipo, o sea, el espesor que más se repite para la vetilla, ya que es más representativo que usar el máximo o mínimo. Se considera lo mismo para el espesor del halo.

En la clasificación de fracturas en **matriz** se usa el criterio por rangos, ya que estas en general no siguen un solo ángulo, si no que más bien una tendencia; luego, si las fracturas en matriz siguen un camino en un ángulo 0-30°, se considera un ángulo bajo, si es entre 30° y 60°, medio, y si es entre 60° y 90°, se categoriza como alto. El JRC se calcula usando la clasificación de Barton (1977).

Se hacen también subtablas resúmenes (ver Tabla 4) comparando el JRC y ángulo de las vetillas de la muestra con la de las fracturas. Esta está hecha para la misma muestra que se usó como ejemplo anteriormente. Las tablas categorizan el número de vetillas de un JRC y ángulo específico antes del ensayo, y luego el número de estas que se vieron involucradas en la fractura.

JRC	# de vetillas totales	# de vetillas fracturadas	% de vetillas fracturadas
Entre 1 y 3	3	2	66
Entre 4 y 6	3	1	33
Entre 7 y 9	7	2	29
Entre 10 y 12	2	1	50
13 y más	2	1	50
Ángulo	# de vetillas totales	# de vetillas fracturadas	% de vetillas fracturadas
Entre 0° y 30°	2	0	0
Entre 30° y 60°	9	4	44
Entre 60° y 90°	6	6	66

Tabla 4: Subtabla resumen que compara el JRC y ángulo de las vetillas y estructuras de la muestra anterior. Se confecciona una para cada muestra.

Para el caso de las fracturas en matriz, estas se agregan como fractura en el rango de ángulo que pertenezca, pero no se contabilizan en el número de vetillas ni en la categoría de JRC.

Las tablas resúmenes (como las de la Tabla 3) y sus subtablas (tipo Tabla 4) correspondientes se confeccionan para 12 de las muestras, pero el detalle se concentró en las 4 principales, dado que no hay tantos datos disponibles para las restantes. En total, desde el mapeo de las probetas principales se describen 82 estructuras, y se observan 21 fracturas sobre estas. En la Tabla 5 se muestra el desglose del total de estas.



JRC	# de Vetillas	# de Fracturas	% de Fracturas
Entre 1 y 3	14	6	43
Entre 4 y 6	27	6	22
Entre 7 y 9	21	4	19
Entre 10 y 12	14	4	29
13 y más	4	1	25
Ángulo	# de Vetillas	# de Fracturas	# de Fracturas
Entre 0° y 30°	10	4	40
Entre 30° y 60°	35	7	20
Entre 60° y 90°	36	20	56

Tabla 5: Resumen de vetillas y fracturas en las 4 muestras principales. En la contabilización de fracturas se incluyen las que pasaron por matriz.

Si se agregan también las fracturas sobre el resto de las muestras, o sea, no de las cuatro principales, se obtiene una tendencia similar (Tabla 6). Sin embargo, hay que tener en cuenta que fuera de las principales solo se cuenta con datos sobre las **fracturas**, y no de las vetillas previamente existentes. Además, no se tiene un conteo de las vetillas totales para todas las muestras, por lo que no se pueden comparar valores de porcentajes frente a un total.

Ángulo	# de vetillas fracturadas
Entre 0° y 30°	6
Entre 30° y 60°	10
Entre 60° y 90°	43

Tabla 6: Aquí se muestra el resumen de las fracturas ocurridas en el total de muestras analizadas (12).

Además, se hace una tabla comparativa (Tabla 7) del espesor de las vetillas en total en las cuatro muestras definitivas versus las que participaron en el proceso de fracturamiento. Se aprecia que suelen ser vetillas más anchas las que están involucradas en este.

Espesor	Max	Min	Tipo
Promedio vetillas	2.08	0.6	1.19
Promedio vetillas fracturadas	3.38	0.92	1.7

Tabla 7: Espesor promedio de las vetillas de las muestras mapeadas totales versus las que participaron en el fracturamiento.

Por último, se intenta encontrar una relación entre las fracturas que ocurren primero y las tardías. Para esto se comparan el porcentaje de minerales blandos involucrados en ambos momentos y el ángulo de las fracturas (Tablas 8 y 9).

Fractura	1°	2°	3°	4°
Porcentaje minerales blandos (Anh+Bt+Cpy+Bn+Cv/Co+Mo)	24.5	23.2	21.8	12.8

Tabla 8: Porcentaje de relleno de minerales blandos de las vetillas que participan en la fractura. Anh = anhidrita, Bt = biotita, Cpy = calcopirita, Bn = bornita, Cv = covelina, Co = calcosina, Mo = molibdenita.

Fractura	1°	2°	3°	4°
Ángulo promedio vetillas fracturadas	62°	69°	66°	56°
Fracturas de ángulo alto (matriz)	3	6	3	1
Fracturas de ángulo medio (matriz)	3	1	0	0
Fracturas de ángulo bajo (matriz)	0	0	0	0

Tabla 9: Ángulo de las fracturas en el tiempo.

En el caso de los minerales blandos se puede observar que las primeras fracturas ocurren en las vetillas con mayor cantidad de relleno blando, y que las subsecuentes van afectando a vetillas con menor relleno blando, aunque la diferencia es muy pequeña para dar una conclusión. Se da un caso parecido en los ángulos de las fracturas, pues no hay un comportamiento que se pueda deducir desde los datos que entrega la tabla. Las fracturas en general son todas de ángulo alto, pero no hay una tendencia clara de disminución o aumento del ángulo en el tiempo.

### 5.3 Resultados de mediciones de LVDT y strain gauges

En los gráficos de la figura 29 se presentan los resultados de deformación versus estrés en las 8 probetas grandes (150mm) tanto en strain gauges como en los LVDT. Para cada muestra se asigna un color, que muestra en la parte positiva la deformación lateral, y en la negativa, la deformación axial. En general las curvas suelen seguir el comportamiento esperado, según mediciones hechas por otros laboratorios en el mismo tipo de muestras (Área de mecánica de rocas del SGS, Informes de compresión simple realizados por IDIEM), para los dos tipos de medición, a exceptuar de la muestra DV4 (color violeta), que presenta algunos puntos discordantes cuando el ciclo de carga va en 57 MPa aproximadamente, en ambos tipos de mediciones. También hay que notar que en varios casos los LVDT registran casi el doble de deformación que los strain gauges.

En los anexos se incluyen todos los gráficos para cada muestra comparando su medición en strain gauges contra la de LVDT.

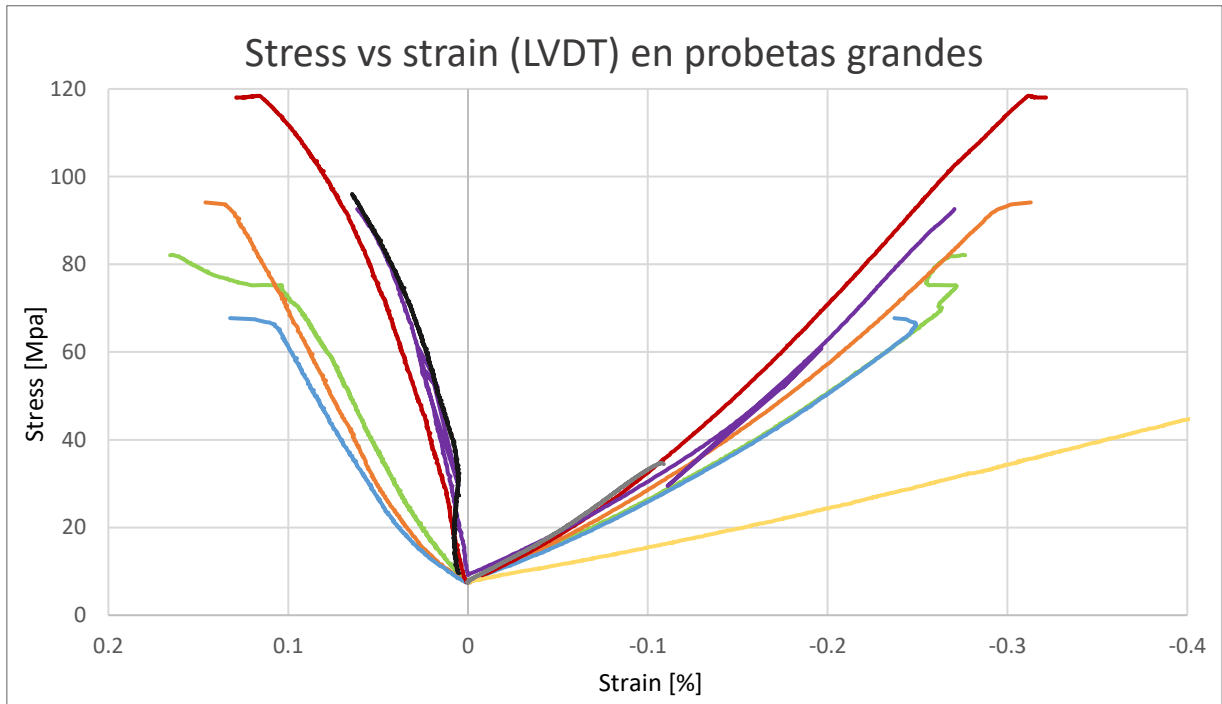
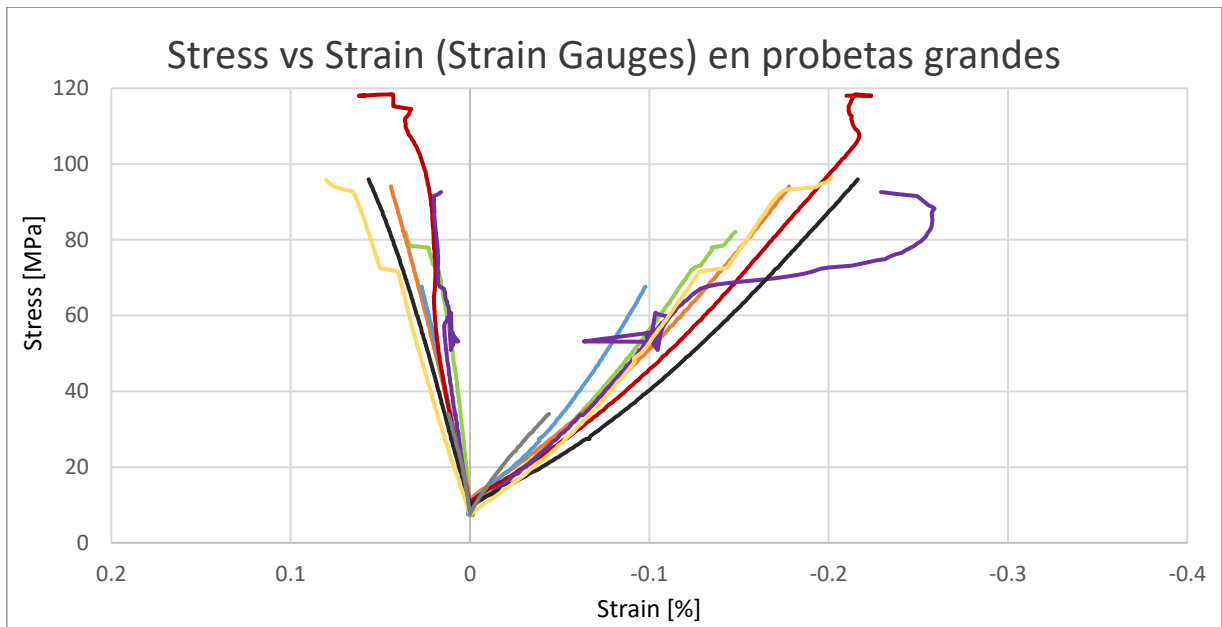


Figura 29: Arriba: Strain vs stress usando strain gauges en probetas grandes. Abajo: Strain vs stress usando LVDT en probetas grandes. Algunas muestras no tienen datos de mediciones de LVDT.

Para las muestras chicas también se hace un gráfico (figura 30) usando las mediciones de strain gauge, pero debido a que la mayoría de estas muestras son usadas como pruebas antes de las mediciones reales durante el proceso de aprendizaje, el registro no es muy completo y tiene algunos problemas. Además, solo una de estas muestras tiene datos de LVDT, por lo que no se incluye un gráfico aparte. Al igual que en los anteriores, el lado positivo (izquierdo) muestra la deformación lateral, y el negativo (derecho), la axial.

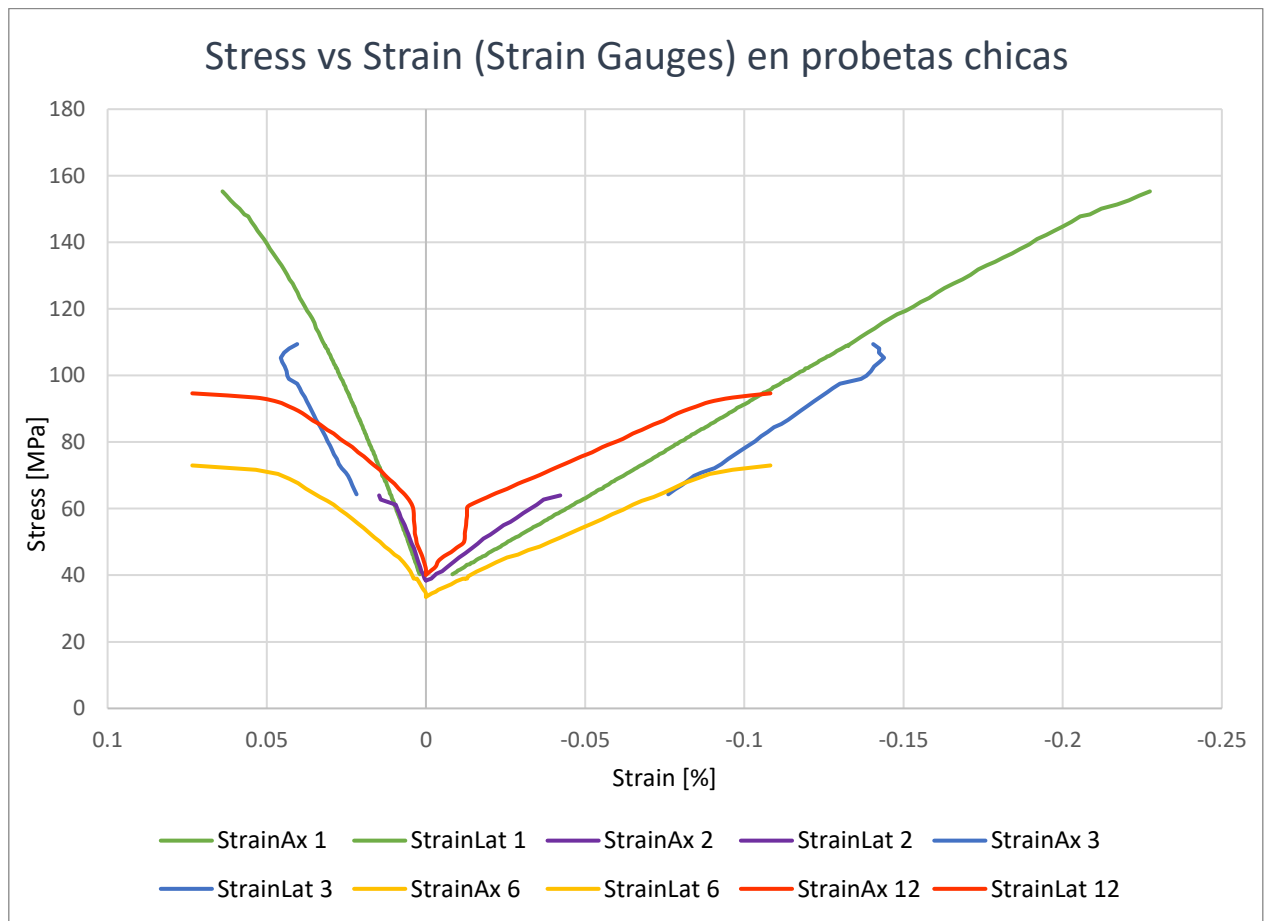


Figura 30: Gráfico de stress vs strain en las probetas chicas. El registro no es muy bueno debido a que estas muestras fueron parte del proceso de pruebas previas.

Para finalizar se ordena una tabla (Tabla 10) con el Módulo de Young y coeficiente de Poisson usando los datos obtenidos con los strain gauges y LVDT según la disponibilidad y fiabilidad de los registros. El valor del módulo de Young se considera cuando la prueba lleva 50% de la carga total del experimento y se encuentra en la parte lineal de la curva de deformación. Para el coeficiente de Poisson se usan los valores de deformación justo antes de fallar.

N°	Probeta	Young (SG) [GPa]	Young (LVDT) [Gpa]	Poisson (SG)	Poisson (LVDT)
1	Chica n°1	87.6	-	0.28	-
2	Chica n°3	78.9	-	0.29	-
3	Chica n°5	-	-	-	-
4	Chica n°2	281.8	-	0.35	-
5	Chica n°6	121.6	-	-	-
6	Grande DV4	53.6	27.8	0.08	0.23
7	Grande DV5	40.4	-	0.26	-
<b>8</b>	<b>Grande CX 11</b>	<b>46</b>	<b>34.7</b>	<b>0.17</b>	<b>0.18</b>
<b>9</b>	<b>Grande CX 4</b>	<b>55.3</b>	<b>25.1</b>	<b>0.24</b>	<b>0.27</b>
<b>10</b>	<b>Grande CX 12</b>	<b>51</b>	<b>28.2</b>	<b>0.25</b>	<b>0.2</b>
<b>11</b>	<b>Grande CX 2</b>	<b>65.6</b>	<b>24.8</b>	<b>0.27</b>	<b>0.19</b>
12	Grande DV6	52.7	11.1	0.4	-
13	Grande DV7	-	36.8	0.28	-
14	Chica n°12	233.5	43.4	-	-
15	Chica n°14	-	48.5	-	-

Tabla 10: Módulo de Young y coeficiente de Poisson de las muestras estudiadas.

Se puede apreciar que los resultados están en el rango normal para este tipo de rocas, a exceptuar algunas muestras chicas, esto debido probablemente a que algunos de estos ensayos no están completamente registrados y eran solo de prueba. A pesar de que están dentro del rango, la diferencia entre las mediciones de Young para LVDT y strain gauge no es despreciable.

#### 5.4 Resultado de mediciones por DIC

En los resultados a continuación (gráficos de la figura 30 y 31) se muestran algunas de las mediciones que se hicieron usando los strain gauges virtuales, midiendo la deformación de las 2 formas disponibles para dos de las muestras que se hicieron a baja tasa de fotogramas por segundo (CX11 y CX4) y con suavizamiento por regresión lineal de bajo nivel (3x3). Esto porque solo en estas dos grabaciones de bajo FPS se puede alcanzar a grabar una parte significativa de la prueba (al menos un tercio del total), debido a la limitación de memoria. Ya que no se tiene todo el ciclo de carga, se ajusta **manualmente** la curva para que estas partan en el mismo punto que la deformación medida con LVDT.

Se muestra también en la probeta la ubicación de los strain gauges virtuales y el estado en que quedó la roca, como una forma de guiarse. En cada uno de los gráficos se indica si corresponde a deformación axial o lateral, y está identificada la línea del strain gauge con el número que corresponde en la foto inicial.

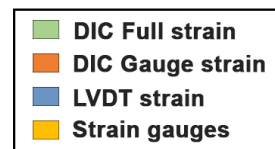
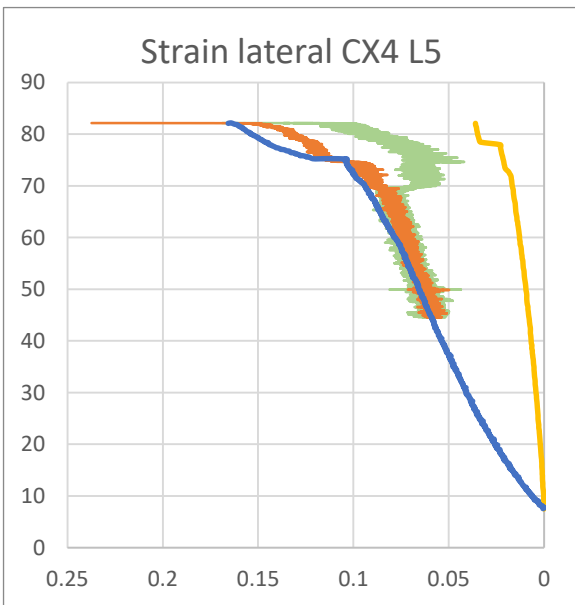
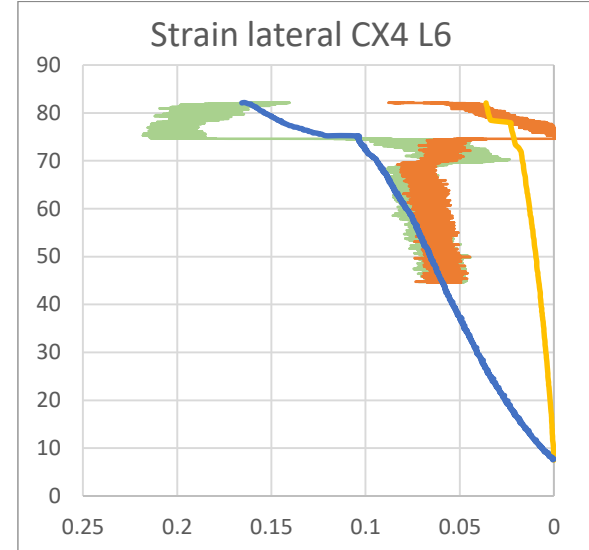
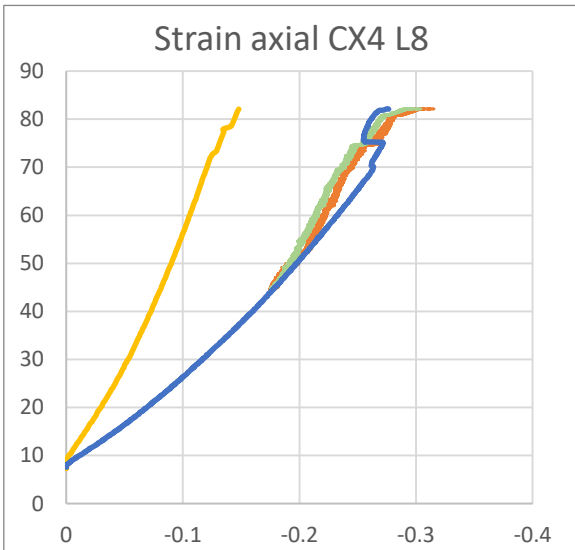
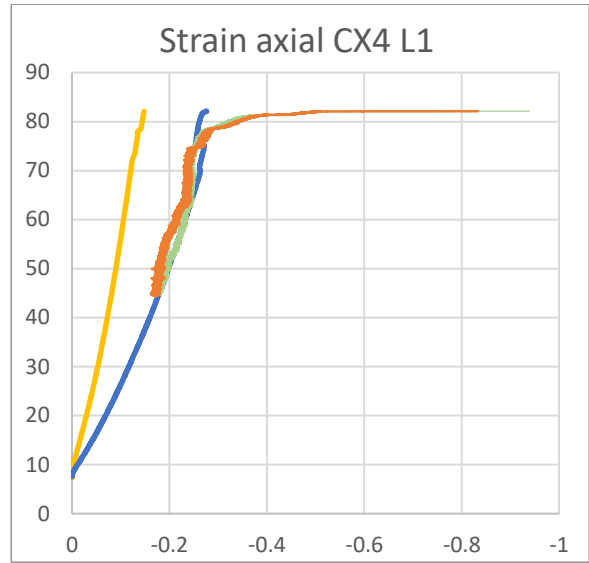
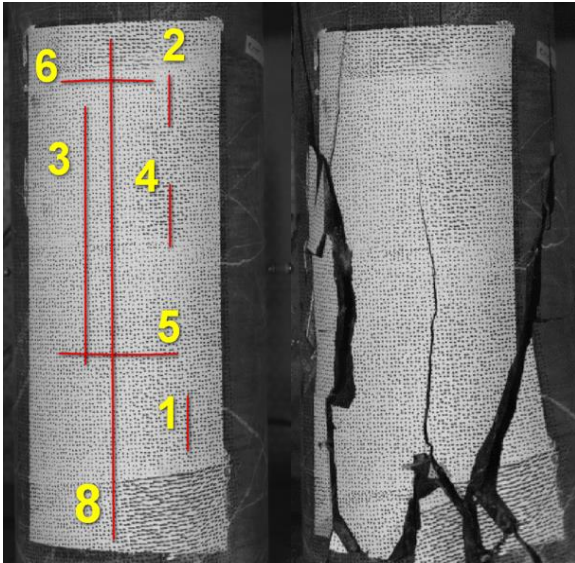


Figura 31: En estos gráficos el amarillo representa lo que se midió con los strain gauges, tanto en la deformación axial como lateral, indicado en el título del gráfico. De la misma forma, el azul representa mediciones con LVDT, el naranja usando la medición tipo Gauge strain (distancia entre puntos extremos) y el verde el Full strain (resolviendo el tensor). El eje Y marca el stress en MPa, mientras que el X muestra la deformación (en %).

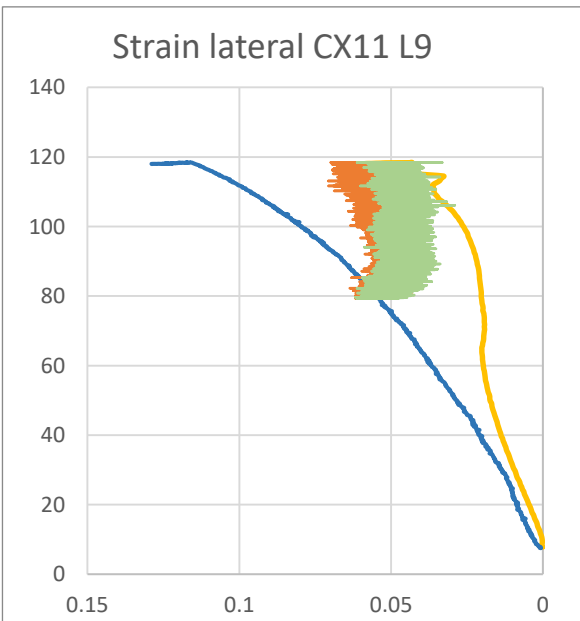
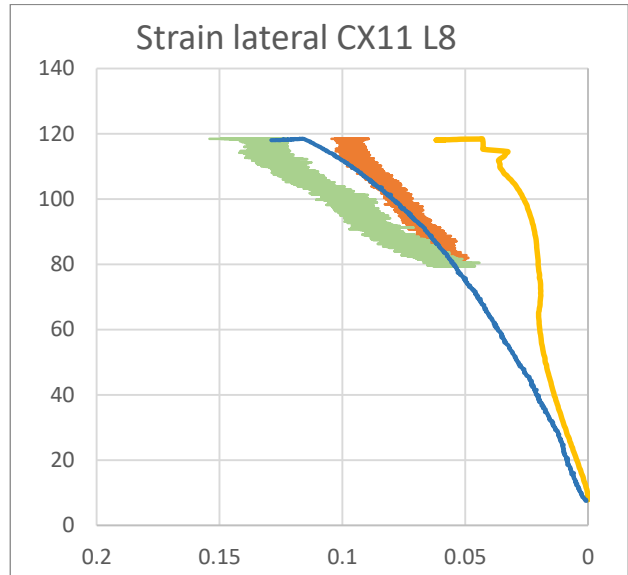
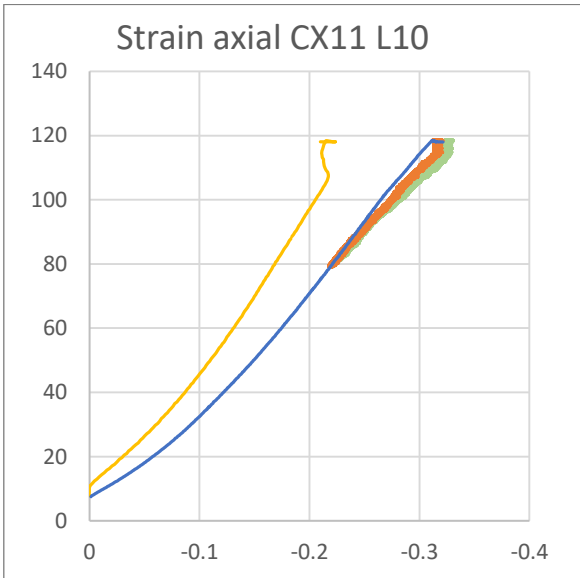
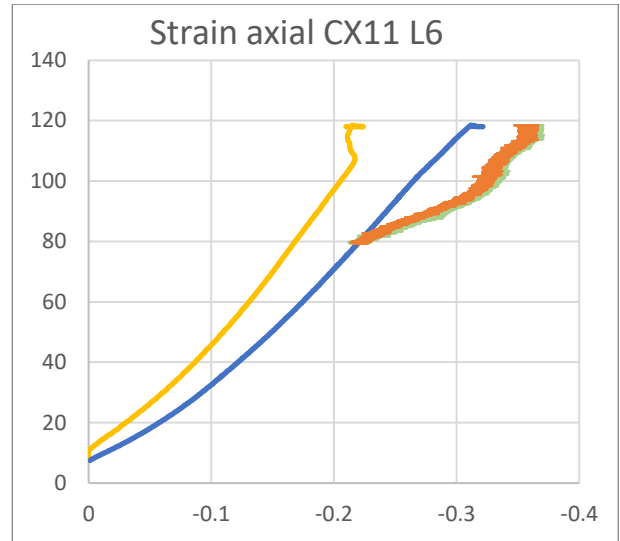
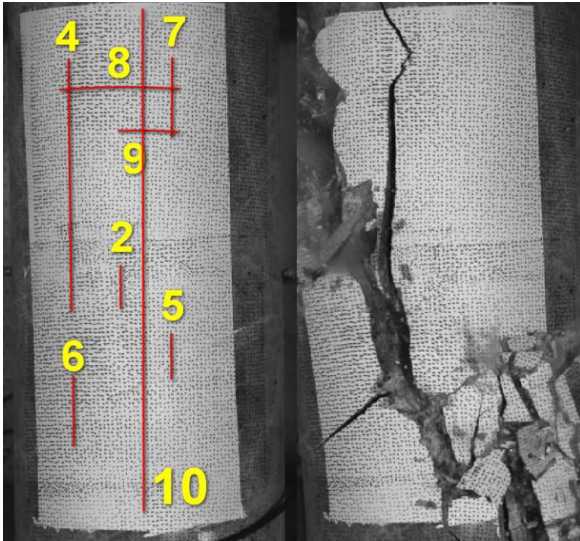


Figura 32: En estos gráficos el amarillo representa lo que se midió con los strain gauges, tanto en la deformación axial como lateral, indicado en el título del gráfico. De la misma forma, el azul representa mediciones con LVDT, el naranja usando la medición tipo Gauge strain (distancia entre puntos extremos) y el verde el Full strain (resolviendo el tensor). El eje Y marca el stress en MPa, mientras que el X muestra la deformación (en %).

## 5.5 Representación visual de deformación

Para algunas muestras es posible ver la deformación visualmente usando mapas de colores sobrepuestos a la superficie de estudio. En este trabajo se presentan dos formas de hacer la visualización, con el método PLS en Matlab y con el software que viene con el sistema de las cámaras, Istra4D.

En la figura 33 se muestran resultados sobre una de las muestras usando el programa Istra4D. En específico, se presenta la cantidad de deformación axial, en el que los colores cálidos representan una deformación positiva y los fríos una deformación negativa. Esto es ajustable, por lo que es mejor tener en cuenta que, como regla general, fuertes cambios de colores indican una diferencia de strain. La probeta corresponde a la muestra DV7, en la que se enfoca en una estructura por la que se pensaba que ocurriría la fractura, lo que efectivamente ocurre, y puede ser corroborado mirando la secuencia de fotos. Otros resultados de deformación se pueden encontrar en Anexos.

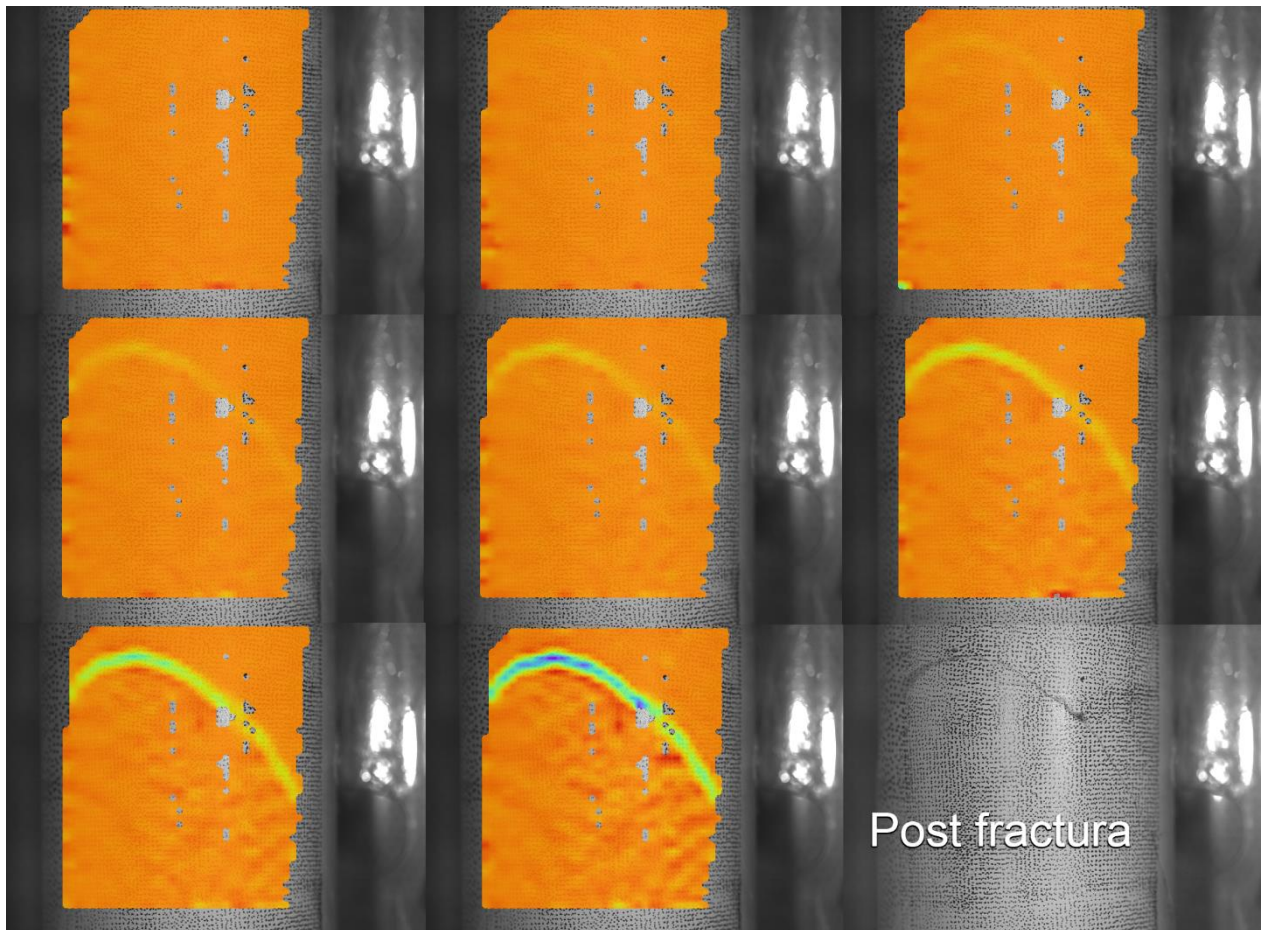


Figura 33: Presentación visual de la deformación axial en la muestra DV7. Alta deformación en sentido positivo es indicada por colores cálidos, mientras que en sentido negativo lo hacen los colores fríos.

En la Figura 34, en tanto, se muestran los resultados usando la función de Matlab sobre la muestra CX12. Los colores cálidos indican deformación axial negativa, y los fríos positiva.



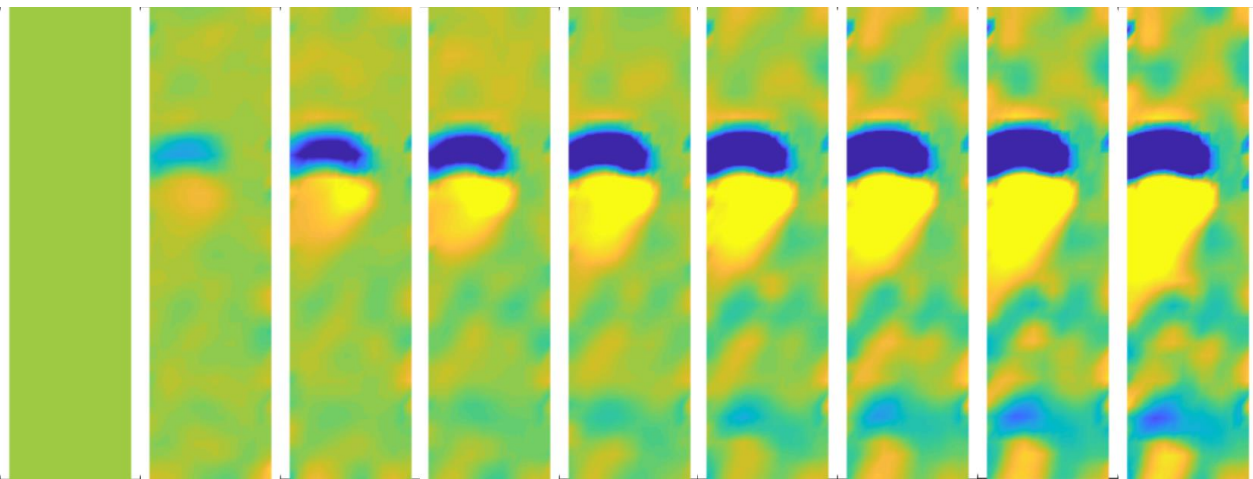


Figura 34: presentación visual usando el método PLS en Matlab de la deformación axial.

## 5.6 Análisis estructural

El análisis estructural detallado se hace sobre las 4 muestras principales. Los mejores resultados se observan en las 2 que fueron grabadas a mayor cantidad de FPS, pues muestran mayor cantidad de imágenes en la pequeña ventana de tiempo en la que ocurren las fallas.

En esta sección se muestra el estudio de la secuencia de fracturamiento (200 fotogramas entre la 1° y 4° fractura, unos 0.13 segundos) de la muestra CX12, grabada a 1500 FPS, para demostrar que tiene potencial como herramienta de análisis. En los anexos se encuentran los análisis de las otras 3 muestras principales.

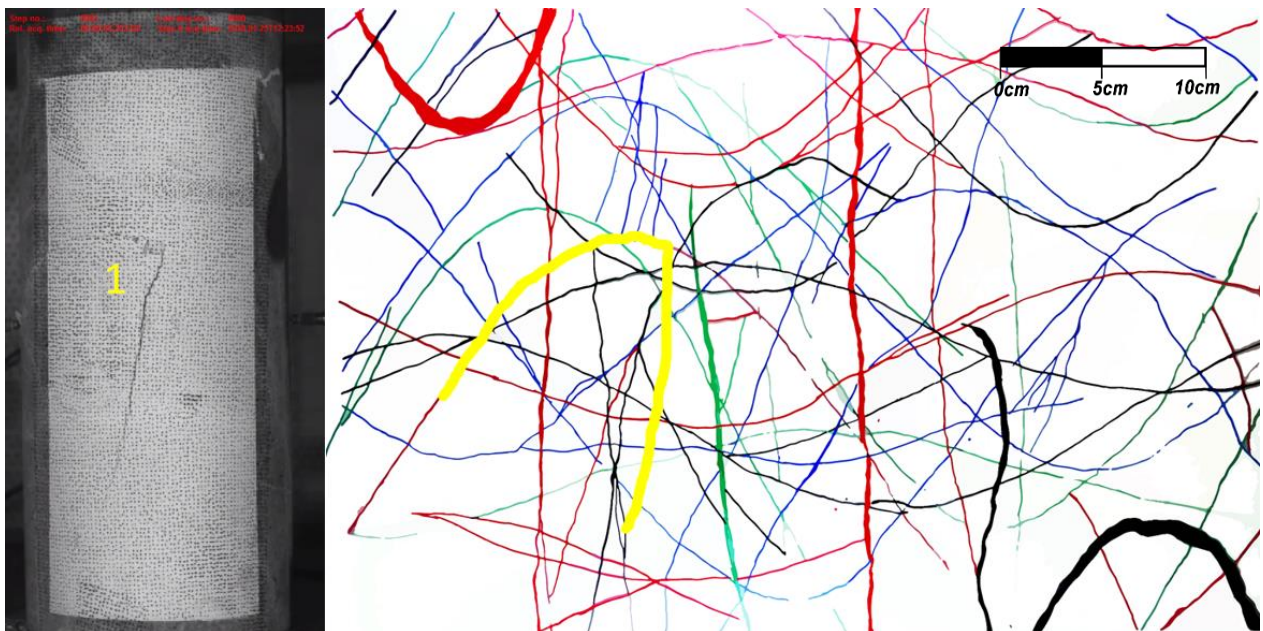


Figura 35: Primera fractura con su traza marcada con amarillo en la mica de mapeo.

**5.6.1 Primera fractura (Figura 35):** marcada en la imagen de la derecha se encuentra la traza de la primera fractura. Se propaga tanto la vetilla roja (vetilla n°1 en el mapeo) en primera instancia, como por matriz, en el segmento semivertical, abriéndose desde arriba hacia abajo, formando una cuña y propiciado por lo tanto que la muestra se incline hacia el lado que aparecieron estas fracturas.



Figura 36: A la izquierda una foto del relleno de la vetilla que participó en la fractura. A la derecha el segmento de la matriz.

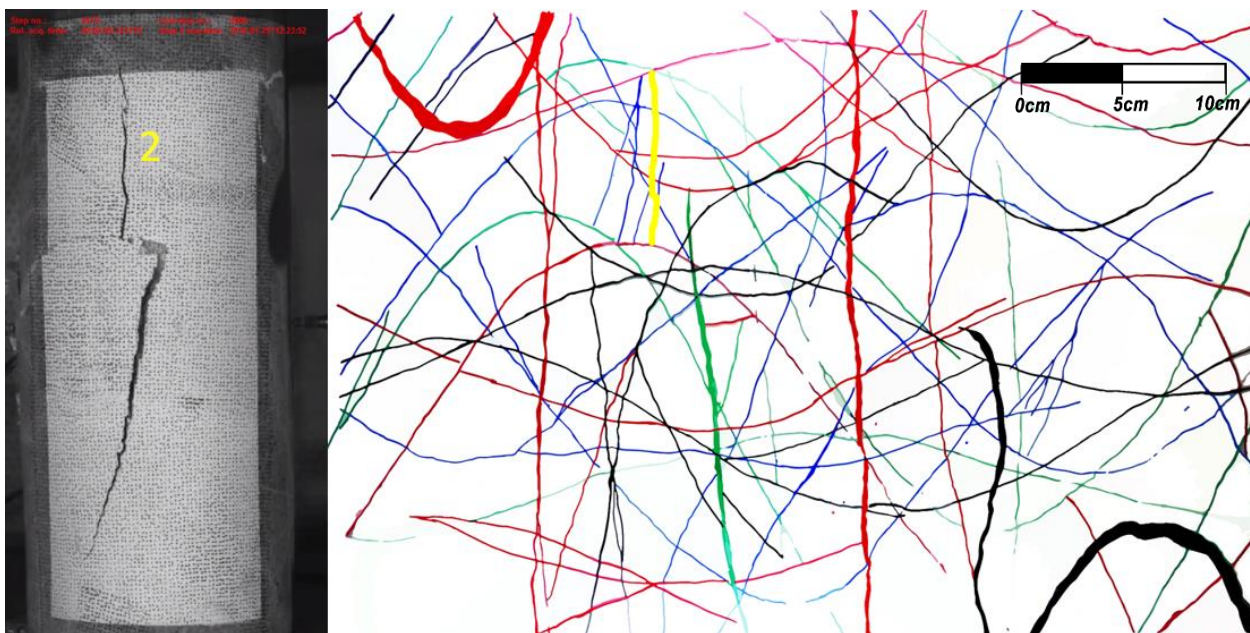


Figura 37: Segunda fractura y su traza en amarillo marcada en la mica de mapeo.

**5.6.2 Segunda fractura (Figura 37):** esta ocurre a través de un pequeño sistema de vetillas, marcado con azul en el mapeo, de orientación vertical, y que nace a partir de la vetilla que se fracturó al principio. Son vetillas menores rellenas en su mayoría por cuarzo e ínfimas cantidades de otros minerales, razones por la cual no estaban incluidas en el mapeo. Se piensa que esta zona ya era débil por la existencia del pequeño sistema de

vetillas vertical, luego, la rotura de la cuña hizo aún más propicio la aparición de esta fractura.

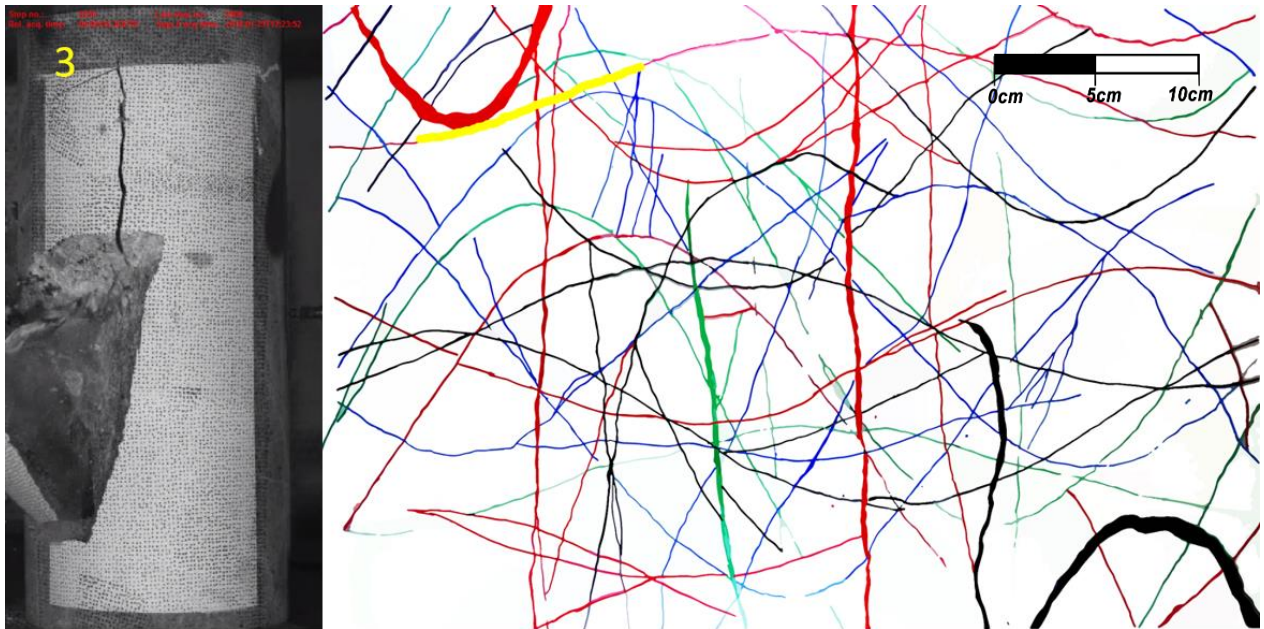


Figura 38: Tercera fractura y su traza marcada en amarillo en la mica de mapeo.

**5.6.3 Tercera fractura (Figura 38):** Aprovechando la debilidad de la zona debido a las fracturas anteriores, y por la necesidad de liberar energía, aparece otra fractura conectada a la segunda. Esta se propaga por una vetilla marcada en rojo, la vetilla n°4 del mapeo. Esta vetilla presenta relleno de cuarzo + molibdenita, un mineral muy blando, por lo cual era previsible que rompiera por esta estructura.



Figura 39: Lo blanco apreciado en la vetilla es cuarzo, mientras que lo grisáceo corresponde a molibdenita.

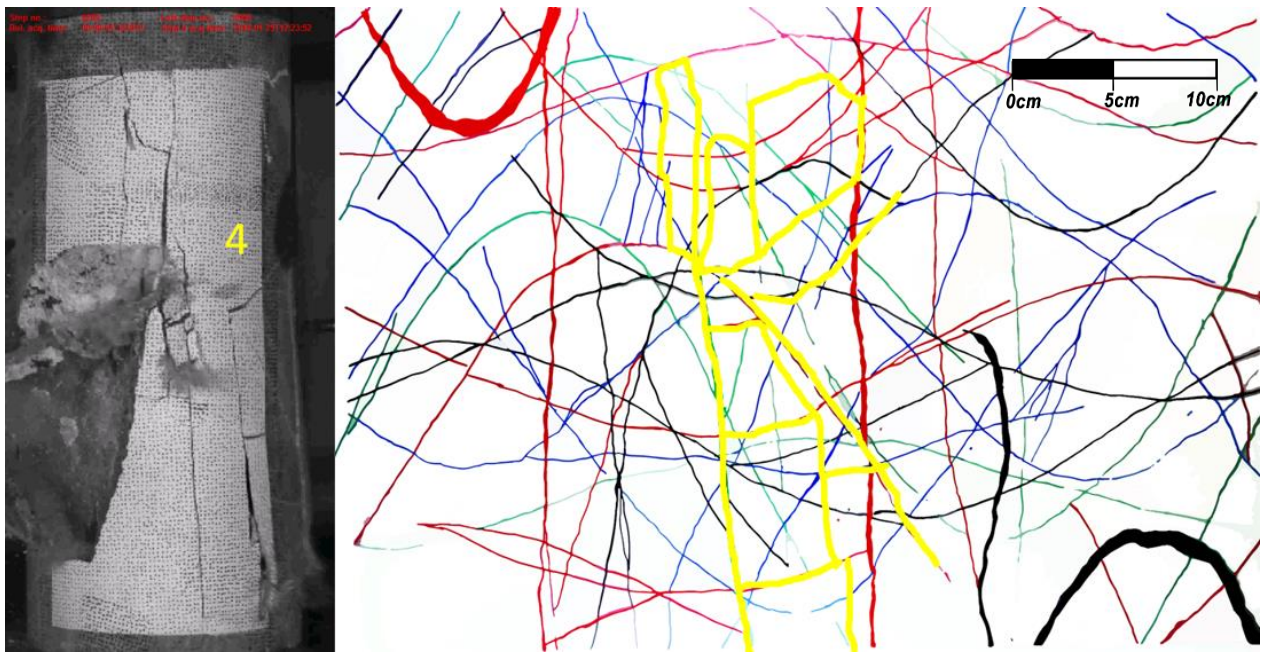


Figura 40: Cuarta fractura y su traza marcada en amarillo en la mica de mapeo.

**5.6.4 Cuarta fractura (Figura 40):** La muestra llega a su peak de resistencia, por lo que se fractura de manera explosiva. En la imagen del mapeo se puede ver que gran parte de las fracturas pasan por vetillas. En la Tabla 2 se detalla con exactitud que vetillas son las que participan en el fracturamiento.

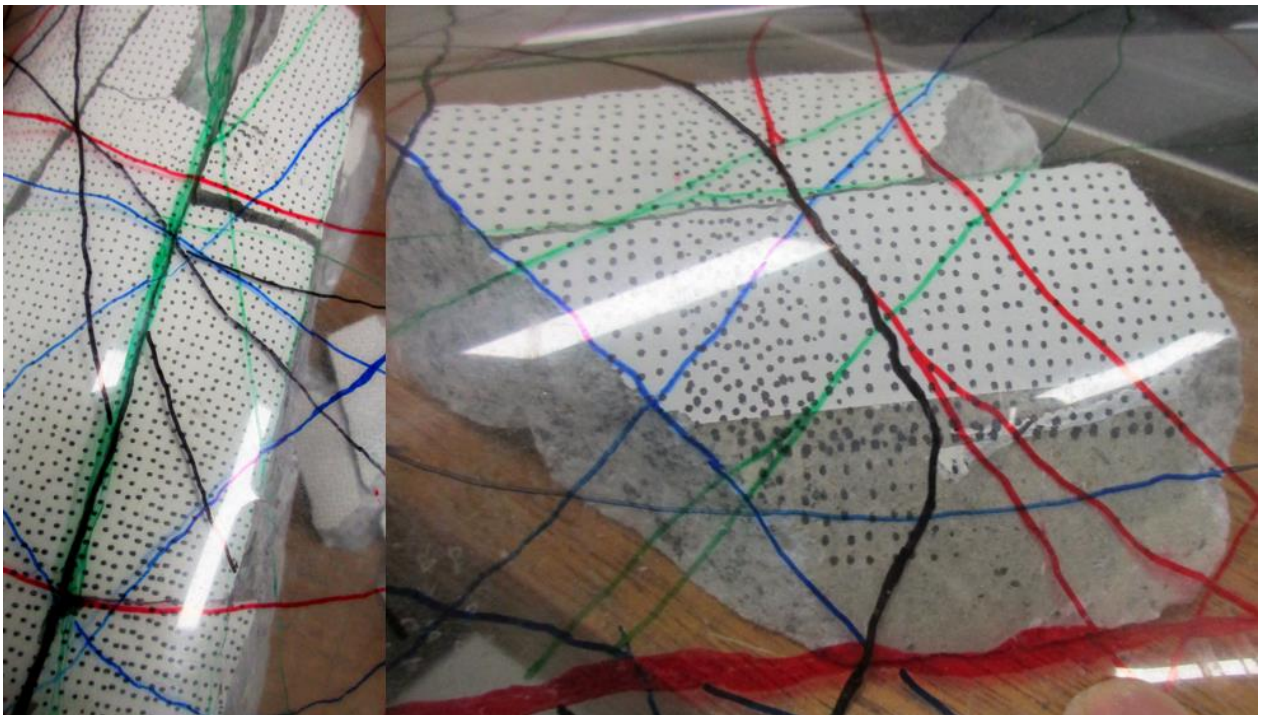


Figura 41: Se sobrepone la mica usada para mapear sobre la muestra fracturada para comprobar sobre que vetillas se propagó.

## **6. DISCUSIONES**

En esta sección se discute sobre los resultados obtenidos del trabajo. Están escritos de tal forma que responde a los varios objetivos específicos propuestos al comienzo.

### **6.1 Características físicas de la roca**

En el mapeo de vetillas de las muestras se registran propiedades físicas y mineralógicas de la roca. Estas arrojan resultados que se pueden usar como punto de control para comprobar que las muestras siguen el comportamiento esperado según estudios anteriores y por lo tanto son aptas para validación de una técnica nueva.

#### **6.1.1 JRC**

En el caso de JRC (joint roughness coefficient), se puede ver que en la Tabla 5 se contabilizaron 81 vetillas, de las cuales la gran mayoría están en el rango de rugosidad de 4 a 9. En tanto, las fracturas se ubican en el rango 1 a 6. Si bien hay más datos que intervienen en el comportamiento del JRC y el fracturamiento, es posible asumir que la tendencia general de que a menor valor de rugosidad es más probable una fractura, se cumple, lo cual además es la misma conclusión que se ha visto en los estudios de este tipo de rocas en estudios realizados por la minera El Teniente (Consolidación del Modelo Geotécnico para Proceso Productivo de la Roca Primaria, 2014), de la cual provienen las probetas.

#### **6.1.2 Espesor**

Para ver la injerencia del espesor en el proceso de fracturamiento se obtienen los valores promedios de las vetillas para los tres tipos de mediciones realizadas en el mapeo y se comparan con los de las fracturas posteriores. Los resultados, mostrados en la Tabla 7, muestran que en general las fracturas ocurren en las vetillas de mayor espesor. Este resultado es esperable, pues la relación inversa entre espesor y resistencia al corte ya estaba demostrada para este tipo de muestras (Consolidación del Modelo Geotécnico para Proceso Productivo de la Roca Primaria, 2014).

#### **6.1.3 Ángulo**

Una de las características más notorias a la hora de hacer estos ensayos es el ángulo de las estructuras en la muestra. Para hacer el análisis del fracturamiento en este trabajo, se decidió usar tres rangos de ángulos, que corresponden a los valores 0-30°, 30°-60° y 60°-90° mostrados anteriormente. Esto se hace con el fin de que se puedan agregar en la contabilización de las fracturas aquellas que pasan por la matriz, las cuales por lo general no tienen un ángulo exacto, pero se mueven dentro de un rango. Como se puede ver en la tabla 5, de las 81 vetillas en las cuatro muestras principales, 71 de estas

están en el rango entre 30° y 90°, por lo cual es esperable que la mayoría de las fracturas estén en ese rango. Sin embargo, aún con esta distribución, se observa que la mayor parte de las fallas (65%) ocurren solamente en el rango 60°-90°. Si luego se toma también los datos de todas las muestras en general (Tabla 6), se confirma la tendencia, pues la cantidad de fracturas (73%) en el rango superior es aún mayor.

Esto es un fuerte indicador de que el ángulo es un factor muy importante al momento de que la roca falle y de que puede haber una relación directa entre el ángulo de fractura y la probabilidad de fallar.

#### **6.1.4 Relleno**

El relleno mineralógico es una variable a considerar en el proceso de fracturamiento de las rocas, sin embargo, en este experimento no se pudo encontrar una relación clara entre el relleno de las vetillas y la cantidad de fracturas involucrando el tipo de relleno, e incluso algunos resultados podrían indicar levemente una mayor probabilidad de que las fracturas ocurran en rellenos duros, que en este trabajo corresponden en su mayoría a cuarzo. Se piensa que una de las razones de esto es que se mapearon las vetillas de dos tipos de rocas, de las que se tienen dos muestras para cada tipo, lo que es un universo muy pequeño para observar una tendencia. Por ejemplo, en el caso de las muestras de CMET (basalto), si se considera que una vetilla blanda se puede clasificar como tal al tener 20% o más de minerales blandos, la probeta CX2 tiene 14 vetillas blandas de un total de 20, y del total de las 8 fracturas, solo 4 pasan por vetillas blandas. Similar comportamiento para la segunda muestra de CMET, CX4, en donde 15 de 19 vetillas son consideradas blandas bajo el mismo criterio, y 4 de 6 fracturas pasan por este tipo de vetillas. Cambiando el criterio de vetilla blanda (i.e. porcentaje) produce resultados muy parecidos.

Una segunda razón puede ser que en el caso de las muestras de dacita se tienen muy pocas vetillas con cantidades significativas de minerales blandos, por lo que son un mal objeto de prueba para esta propiedad.

De forma extra, para probar la influencia del ángulo y relleno, haciendo uso de la capacidad de las cámaras de grabar a alta velocidad, se reconstruye parcialmente la secuencia de fracturamiento. Estos resultados están presentados en orden, según la aparición de la fractura en la roca y en la grabación. Es decir, se identifican en cada paso todas las vetillas y/o matriz que son afectadas por un fallamiento de la muestra y en el cual sea indistinguible qué fractura apareció primero que la otra. A pesar del obvio problema de que no hay una relación completamente directa entre la “tercera fractura” de una probeta con otra, se intenta relacionar el ángulo y el relleno de las vetillas versus el orden de la fractura. El resultado se puede ver en la tabla 8, donde se aprecia la tendencia de que el porcentaje de relleno blando disminuye a medida que las fracturas son más tardías. A su vez, el comportamiento con respecto al ángulo no es muy claro por lo que no se podría agregar nada a lo que ya se vio anteriormente. Estos últimos resultados solo sirven como prueba de que este ejercicio se podría realizar eventualmente teniendo un mismo marco para todas las muestras, o sea, que presenten el mismo tipo de comportamiento y estén grabadas a la misma tasa de fotogramas.

## **6.2 Ventajas de las grabaciones de alta velocidad**

Uno de los puntos importantes en este proyecto es la posibilidad de contar con cámaras especiales que puedan grabar a una alta velocidad con buena calidad de imagen. Incluso sin aplicar ningún tipo de procesamiento por software, la información que entrega el tener cada fotograma de la secuencia de fracturamiento da paso a variados análisis.

La cantidad de información obtenible está relacionada directamente con la tasa de refresco a la que se registra el ciclo de carga, ya que, para un mismo ensayo y las mismas condiciones, una mayor cantidad de FPS en la grabación siempre significa una igual o mayor cantidad de detalle.

Estos registros, como se vio en el caso de la muestra CX12, ayudan a hacer una reconstrucción a fondo de la secuencia de fracturamiento, y revisar los tipos de vetillas que se involucran en el proceso, al menos en lo que a superficie se refiere, y podría ser usado por lo tanto para encontrar relaciones estructurales específicas al tipo de roca, velocidades de propagación de fractura, energía liberada, etc. Debido a que este no es el fin del trabajo, estas tareas quedan en propuestas para futuros trabajos.

## **6.3 Mediciones de strain gauge y LVDT**

Como ya se ha dicho, los métodos de mediciones de deformación usando strain gauges y LVDT son algunos de los más comunes para este tipo de ensayos. Luego, como se intenta probar la viabilidad de usar una nueva forma de medición, las más confiables y estándares son una de las mejores formas de crear un punto de comparación para hacer esto.

En este caso, se expusieron los resultados de deformación por strain gauges y LVDT en los gráficos de la figura 29. Estos muestran comportamientos típicos de este tipo de rocas, pudiéndose esto constatar al ver los resultados que se obtienen en los informes de El Teniente sobre las muestras del Nuevo Nivel Mina, que en general marcan una deformación axial máxima entre 0.1% y 0.3% y una lateral máxima entre 0.05% y 0.02%. A pesar de los valores normales, ambos tipos de mediciones muestran diferentes cantidades de deformación, resultados probablemente debidos a la forma en que se implementa el método, ya que en el caso de los strain gauges, los parches son puestos en un lugar específico de la muestra, y por lo tanto son muy afectados por los movimientos locales alrededor de este parche. Así mismo, los LVDT son herramientas posadas en la placa de prueba, que, a pesar de moverse a la misma altura que la muestra, no están físicamente en contacto con esta, lo que puede producir algunas diferencias. En el caso de este trabajo, los LVDT registran casi siempre una mayor deformación que los strain gauges, como se muestra en el siguiente gráfico (ver Fig. 42), que compara en las cuatro muestras principales los dos tipos de mediciones mencionadas.

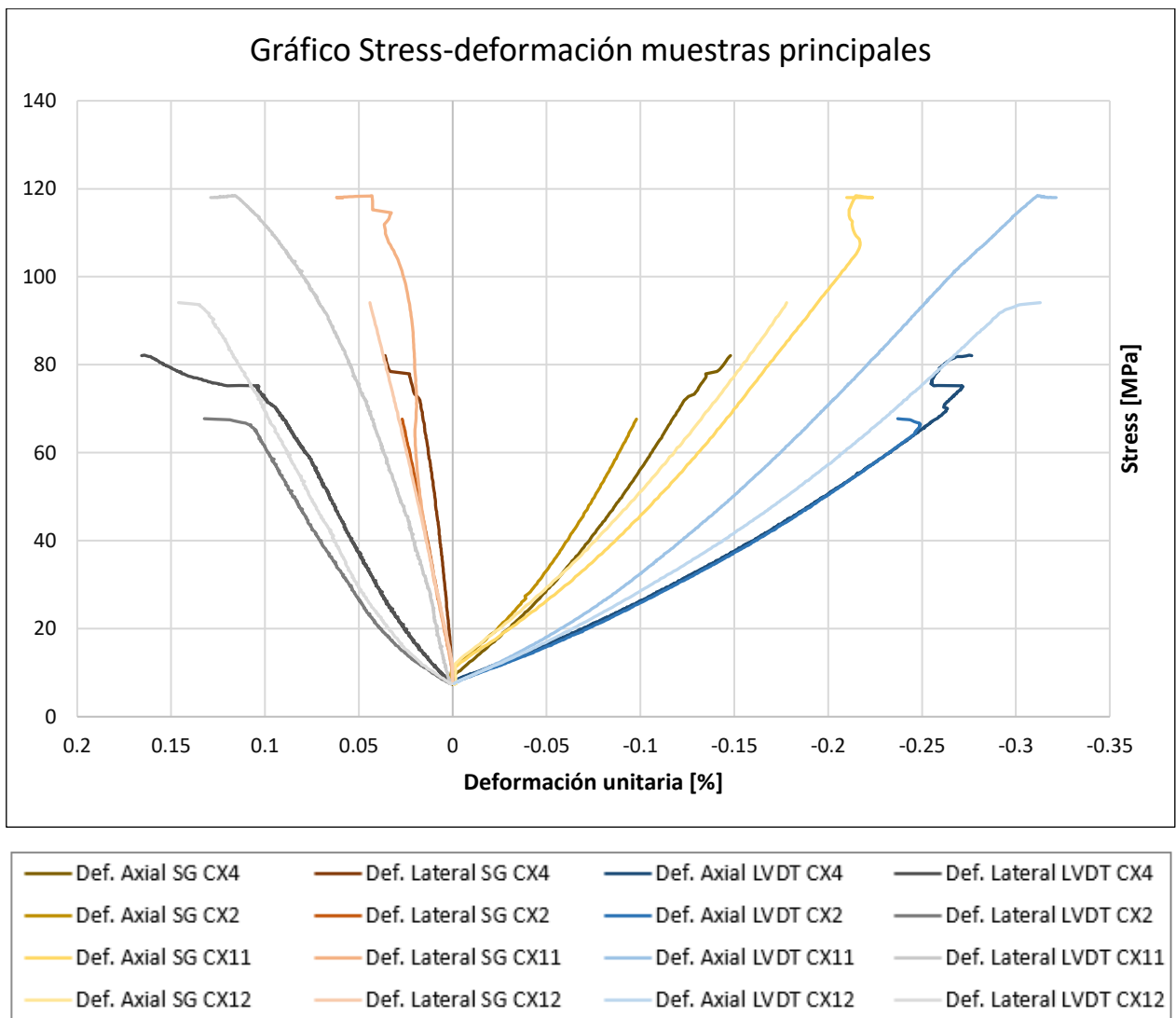


Figura 42: Comparación de deformación axial y lateral registradas por los strain gauges y LVDT.

Para las mediciones de módulo de Young ( $E$ ) y coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) también se hace una comparación entre los resultados obtenidos. Justamente debido a que los LVDT registran una mayor deformación, los valores de  $E$  y  $\nu$  son diferentes también, casi siempre mucho menores que en el caso de los strain gauges, aunque más consistentes. A pesar de todo, los valores de Young y Poisson están dentro del rango normal, similar a lo medido por los informes de El Teniente, lo que nos asegura que estas muestras son factibles de usar para la validación de las mediciones con DIC.

Cabe mencionar también que en algunas muestras chicas el módulo de Young muestra números muy fuera del rango debido a que los registros de deformación no salieron correctos.

Ya que las mediciones con LVDT representan una caracterización de toda la muestra en el caso de la deformación axial y la medición lateral usa al menos dos puntos, se prefiere la medición de esta para la comparación con DIC, por esto las curvas se ajustan a las de los LVDT.



## 6.4 Mediciones de deformación por DIC

Luego, teniendo un punto de referencia para las nuevas mediciones se hace una comparación con los resultados de las deformaciones usando los strain gauges virtuales del DIC. Estos son puestos en varios puntos y con diferentes largos con el fin de observar la variación en las mediciones, como se muestra en la sección de resultados, en las Figuras 31 y 32, donde aparecen las probetas CX11 y CX4 y la posición de los puntos de medición. Como se explicó anteriormente, el programa da dos opciones de medir el strain cuando se hace usando una línea. La primera es el gauge strain, que simplemente calcula la distancia entre los puntos extremos del strain gauge virtual, y la segunda, se obtiene resolviendo el tensor de Lagrange, que toma en cuenta las pequeñas curvaturas formadas sobre la línea virtual. En este sentido, el gauge strain medido de forma simple sigue una lógica más parecida a la de los LVDT en la que no importa la curvatura de la muestra, sino que solo la distancia entre el punto más alto de la probeta y el más bajo.

Lo primero que se puede indicar es que las mediciones se ubican dentro del rango típico de la deformación, aunque tienen una variación no despreciable con respecto a las hechas en LVDT. Este comportamiento se asemeja a lo que ocurre con los strain gauges reales, pues las mediciones tienen una variación muy dependiente de la zona específica de la muestra donde se hace la medición. Además, en varios de los strain gauges virtuales, la forma que toma la curva se parece más a lo que registran su contraparte real, probablemente por la capacidad de estar midiendo “directamente” sobre la roca.

En cuanto al suavizamiento, en este trabajo se prefirió usar el de tipo regresión local, y en sus niveles más bajo posible. Esto porque el fabricante del sistema recomienda este tipo para mediciones en las que se requiere ver los efectos de strain en lugares localizados, como es el caso de este proyecto, en el que se favorecen los desplazamientos de puntos específicos (vetillas y estructuras delgadas) más que una deformación global. Sin embargo, una deformación global puede ser más idónea cuando se planea encontrar un valor promedio para la probeta en general o en muestras sin estructuras.

Para demostrar el efecto del suavizamiento en las mediciones, se confecciona un gráfico (Figura 43) en el que se puede ver como varían las cantidades en varios tipos de escenarios comparadas a las de los strain gauge reales y los LVDT. Recordar que el filtro de regresión local promedia localmente una ventana de  $N \times N$ , en el que un  $N$  más grande significa una potencia mayor del filtro.

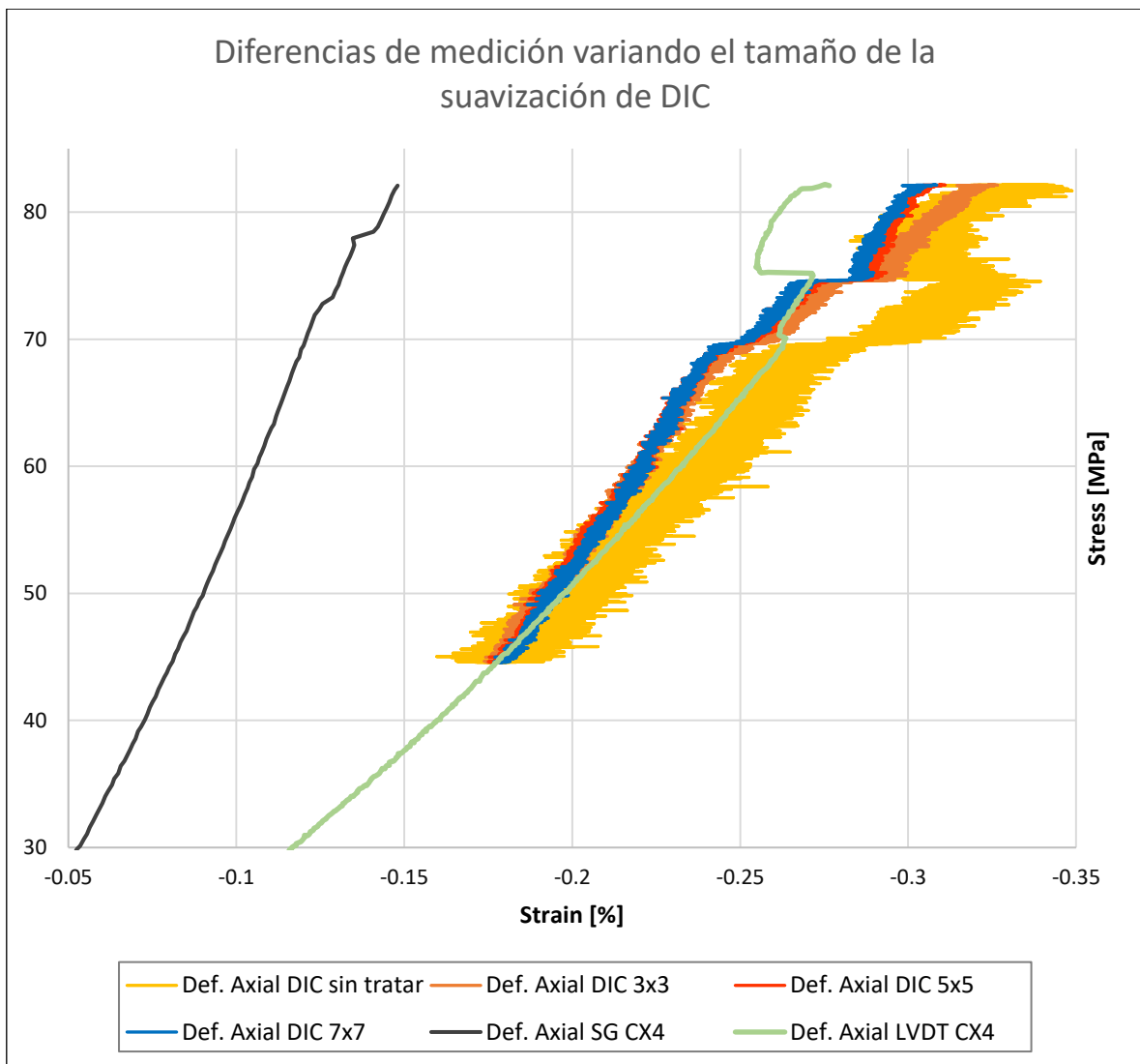


Figura 43: Comparación de mediciones en DIC, sin suavizamiento y con diferentes niveles de suavizamiento. Se muestran también las mediciones por strain gauge (SG) y LVDT.

En la Figura 43 se observa que la medición DIC sin tratar no hace sentido con respecto a los métodos clásicos, tiene mucha variación local, los saltos de deformación tienen otro sentido y es mucho más caótica. Aplicar el filtro más suave (3x3) es suficiente para que la curva se ordene y tome una forma más acorde al comportamiento real. Al subir la potencia de este, la curva conserva el mismo comportamiento, pero los valores comienzan a centrarse más, debido a que lo que hace el filtro es promediar los valores en una ventana dada. Por lo tanto, se puede decir que el filtro es indispensable, pero incluso la mínima aplicación es suficiente para alcanzar una buena definición.

Como se explicó dentro del funcionamiento básico del DIC, el tamaño de las ventanas de búsqueda se puede agrandar a tal grado que se produce una intersección de estas, un área común. A esto se le conoce como solapamiento, y lo que produce en la correlación es que se suavizan artificialmente los resultados. La siguiente figura (Fig. 44) muestran cómo afecta este parámetro en el caso de las mediciones de deformación.

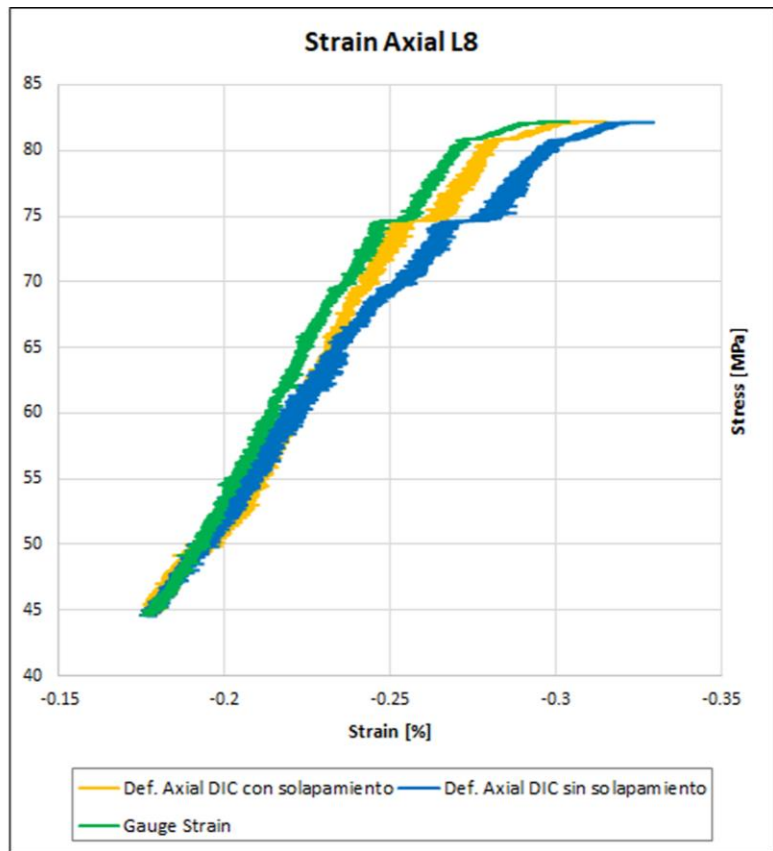
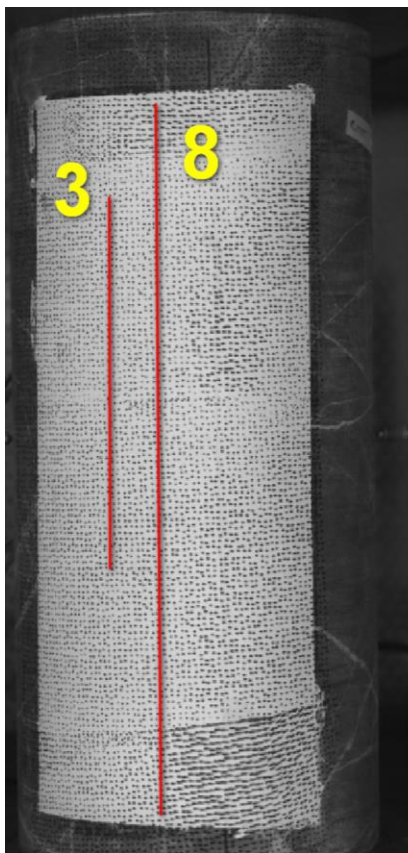


Figura 44: Diferencia de resultados usando solapamiento de 0% y ~25%.

Se aprecia que la curva con solapamiento de 25% no cambia mucho, y tiene las mismas curvas que las mediciones de gauge strain y la que no usa solapamiento. El único cambio visible es que, tal como ocurre cuando se aplica un suavizamiento más potente, los valores se hacen menos extremos, incurriendo en aproximadamente una máxima diferencia de 0.015% de deformación.

En un tema aparte, se aprecia que líneas cortas y/o instaladas sobre lugares donde la deformación es alta no producen una curva de deformación representativa de la muestra. Líneas largas, o mejor aún, que cruzan la muestra de base a techo, y que no pasen por zonas de extrema deformación, son los que producen una mejor medición y que tiene las ventajas tanto de las mediciones de LVDT, en cuanto que es representativa de toda la muestra, y de los strain gauge, que es estar midiendo sobre la roca y no el movimiento de la prensa.

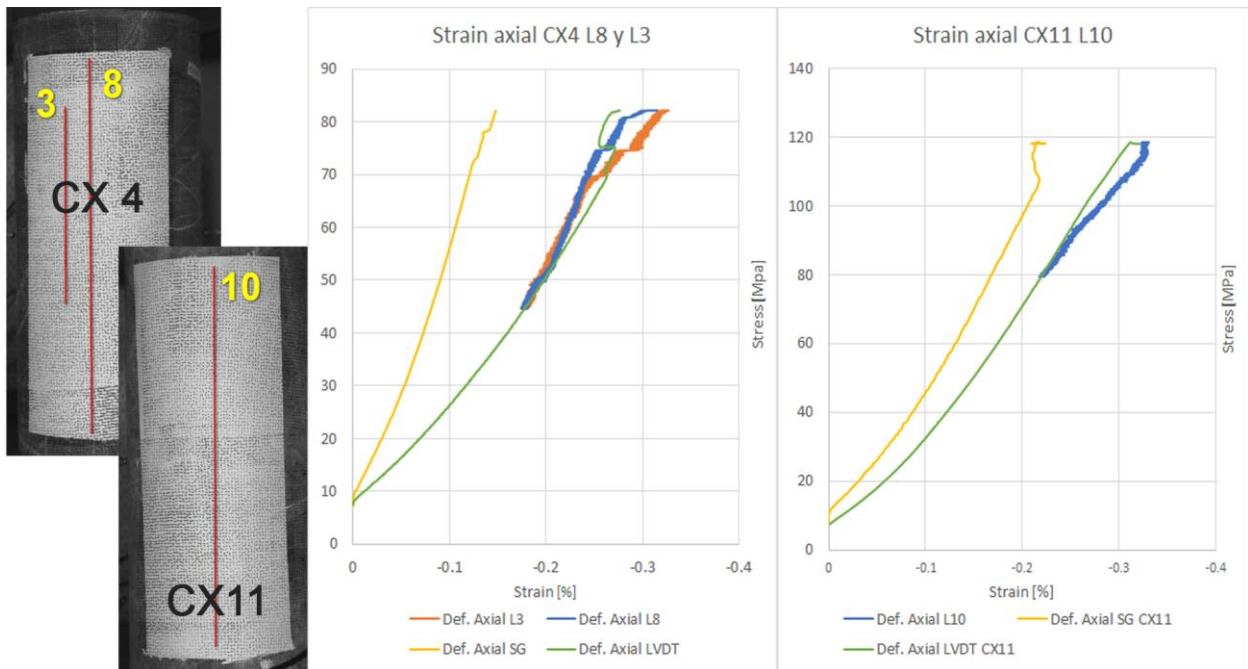


Figura 45: Gráfico mostrando mediciones representativas de la deformación axial en la muestra CX4 y CX11.

Ejemplo de este se encuentra en la figura 45, todas las líneas fueron puestas en zonas donde, previa inspección de la representación visual de deformación, se verifica que la deformación no es muy alta, y atravesando casi toda la probeta. Así, por lo tanto, se nota que la L8 y la L3 tienen una curva similar, la que solo se desvía en los últimos momentos probablemente porque la L8 promedia más la deformación o porque la L3 está puesta en una zona inherentemente con mayor desplazamiento.

Otro punto muy importante en las mediciones DIC de deformación es que estas presentan una alta desviación en tramos cortos. La tendencia final es siempre clara, pero en ventanas pequeñas de tiempo el error es muy alto. Se piensa que una de las causas de esto es el largo del strain gauge virtual, pues, en general cuando se hacen mediciones usando líneas cortas las mediciones presentan más variación y viceversa, aunque también hay varios contraejemplos a esto. Otra de las causas que se barajan es que en las zonas donde no se aprecia deformación ni fracturamiento aparente (al menos al ojo humano) es más difícil para el software discernir si hubo desplazamiento o no, por lo que cualquier mínimo movimiento cae dentro del rango de error y produce errores en la metodología. Una forma de descartar esto último sería repetir el experimento haciendo que tome datos más apartados entre sí, ya que incluso en las mediciones más lentas el programa está midiendo la deformación al menos 62 veces por segundo.

Por supuesto también para hacer una comparación completa es necesario que la deformación sea registrada durante todo el ciclo. Para este caso las mediciones fueron hechas en partes y luego unidas y ajustadas para que comenzaran en el mismo punto que en las del LVDT, pero pueden haber ocurrido fácilmente que estas en realidad siguieran un camino totalmente diferente. En este trabajo solo se registraron fragmentos de la deformación debido a que la carga era realizada a una tasa fija de esfuerzo y no era posible calcular de antemano en qué momento la muestra fallaría. Además, tampoco se tenía en principio la noción de que se podrían hacer mediciones usando strain gauges

virtuales. Estos últimos puntos se esperan sean corregidos en futuros experimentos, pues son muy fáciles de enmendar.

De todas formas, este sistema de medición presenta una alternativa adecuada a los métodos más clásicos. Tiene una gran adaptabilidad gracias a la facilidad para medir deformación en cualquier zona de la muestra de manera completamente virtual, sin necesidad de hacer ninguna instalación sobre esta, evitando errores humanos, dando la posibilidad de hacer un estudio más a cabalidad de la roca y ciertamente certeras.

## **6.5 Representación visual de la deformación**

El paso siguiente luego de obtener las mediciones de deformación, y una de las grandes propiedades de usar el sistema DIC, es que se puede mostrar gráficamente, usando un mapa de colores, donde se producen las mayores deformaciones gracias a que el método toma datos de toda la superficie de una muestra. La principal forma de obtener imágenes útiles es usando el software incluido con el sistema de las cámaras, Istra4D, que aplica la metodología de resolver el tensor de Lagrange más una suavización a través de regresión local o splines para calcular la deformación. Adicionalmente se prueba usando PLS, un método de detección volumétrica que calcula en base a sistema de ecuaciones el movimiento de puntos dentro de vóxeles usando aproximaciones de Taylor de primer orden.

Lo primero para tener en cuenta es lo que se quiere conseguir. En este trabajo se quiere encontrar evidencias visuales de deformación, por lo que se estudian tres tipos de strain: axial, lateral y de corte. Dependiendo de la orientación de la fractura, cualquiera puede mostrar un indicio de la aparición de estas. Por ejemplo, el strain axial suele mostrarse muy fuerte cuando las vetillas son de bajo y medio ángulo, pero es muy difícil que sirva cuando la fractura es semivertical. A su vez, el strain lateral sirve mucho cuando la fractura es semivertical, pero es inútil cuando no lo es. Por último, el shear strain es un término medio y en general muestra en alguna medida las fracturas de cualquier orientación.

El resultado visual de la deformación, al igual que las mediciones, es afectado por varios factores que se eligen en la etapa de procesamiento de datos y el post proceso. Entre estos, los que producen mayor variación en la imagen final son el tamaño de ventana de búsqueda (facet) y solapamiento en la etapa de procesamiento de datos (la correlación de imágenes en sí, el proceso que le da el nombre al método), y la suavización en la etapa de post proceso. El tamaño del facet se refiere a la extensión de cada ventana de búsqueda virtual en la muestra, y el efecto que tiene es que mientras mayor sea el tamaño de esta, se puede hacer una mejor correlación de los cambios en el tiempo en esta ventana y por lo tanto tener una mayor resolución del strain, a cambio de que existan menos puntos de obtención de datos. El efecto de cambiar este parámetro se puede ver en figura 46, en donde se varió solo el valor del facet.

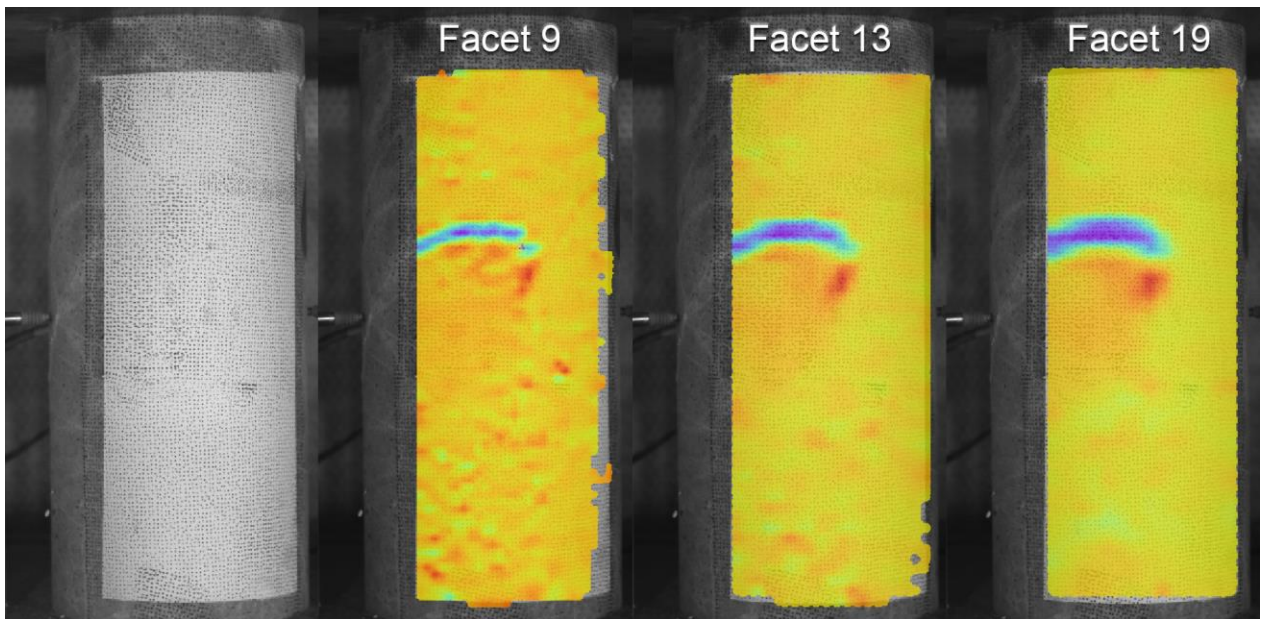


Figura 46: Variación gráfica del strain axial usando diferentes valores para el facet, en la muestra CX12. Notar que a simple vista en la muestra no se puede observar ninguna fractura todavía.

Como se puede apreciar, la tendencia al usar facets mayores, es que la información se promedia y se hace menos precisa. La vetilla sufriendo deformación se hace más difusa, al igual que la segunda fractura vertical, que termina viéndose como un punto. Al mismo tiempo, otros puntos que aparecen marcados en la muestra de facet 9 donde no hay fractura, terminan desapareciendo. Por lo tanto, depende del tipo de visualización que uno busca cual es el valor que sirve más.

El solapamiento es otro de los parámetros a elegir, que se decide indirectamente al cambiar el espaciamento entre los centros de las ventanas de búsquedas. En la documentación del sistema se habla de que una alta cantidad de solapamiento produce suavizamiento artificial, y por lo tanto llevar a una pérdida de exactitud. Al variar este parámetro en la muestra CX4 manteniendo otras opciones constantes, se observa lo siguiente:

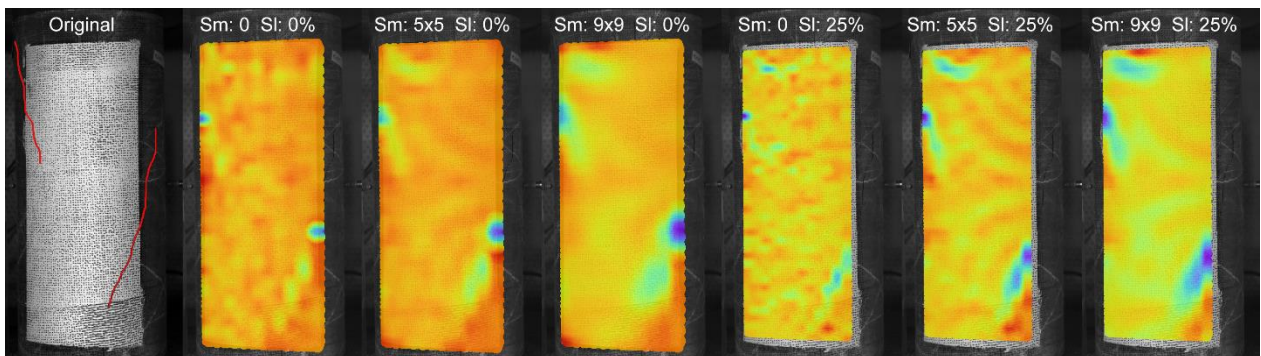


Figura 47: Comparación usando varios tipos de suavizamiento sobre mediciones con y sin solapamiento del fotograma 7042 en la probeta CX4. Marcadas en rojo las fracturas. Sm: cantidad de suavizamiento, número más altos indican mayor suavizamiento. Sl: porcentaje de solapamiento entre las ventanas de búsqueda de correlación. Notar que en la zona superior se ve esfuerzo en otra vetilla, pero esta no resultó en una fractura.

El fabricante recomienda ciertos valores para la cantidad de solapamiento y el tamaño del facet, pero estos son aplicables más que nada para las mediciones de

deformación, que requieren de una mayor rigurosidad. Para estas representaciones visuales en general es mejor usar el propio criterio, ya que dependen del tipo de información que se quiera mostrar los valores que se eligen.

Por último, el tipo y cantidad de suavización es otra de las opciones que se traducen en un gran cambio en la presentación visual, al igual que en los valores de deformación. Esta se cambia en la etapa de post procesamiento y se aplica como un filtro en los resultados de la correlación sin afectarlos permanentemente, por lo que se pueden variar y probar rápidamente sin costo de tiempo. El fabricante hace el acotamiento de que visualmente la regresión local es mejor para los casos en que la deformación es focalizada en puntos específicos, al igual que en el caso de las mediciones, y las splines son preferidas para deformaciones a escala global de la muestra. Se prueban ambas y, tal como se puede ver en la Figura 48, la regresión local en este caso produce un suavizamiento leve de los colores, dando más continuidad, pero haciendo más difusa las trazas de las vetillas y eliminando gran parte del ruido.

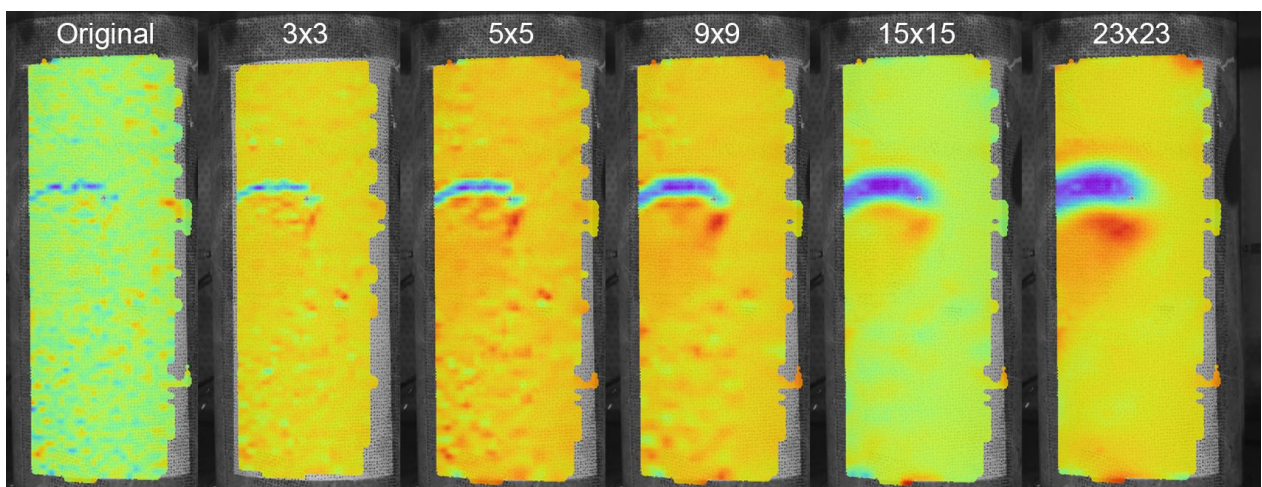


Figura 48: El efecto de varios niveles de suavizamiento usando regresión local en el fotograma 6176 de la muestra CX12.

En el caso de las splines (Figura 49), hay dos factores que se pueden variar para cambiar los colores, el grid (entre 1 y 2.5) y smoothing (entre 1 y -4.1). El rango de elección da espacio a poder jugar más con los valores y encontrar una configuración que se adecue a lo que se busca. A continuación, se presenta una comparación entre algunas combinaciones de valores usando splines.

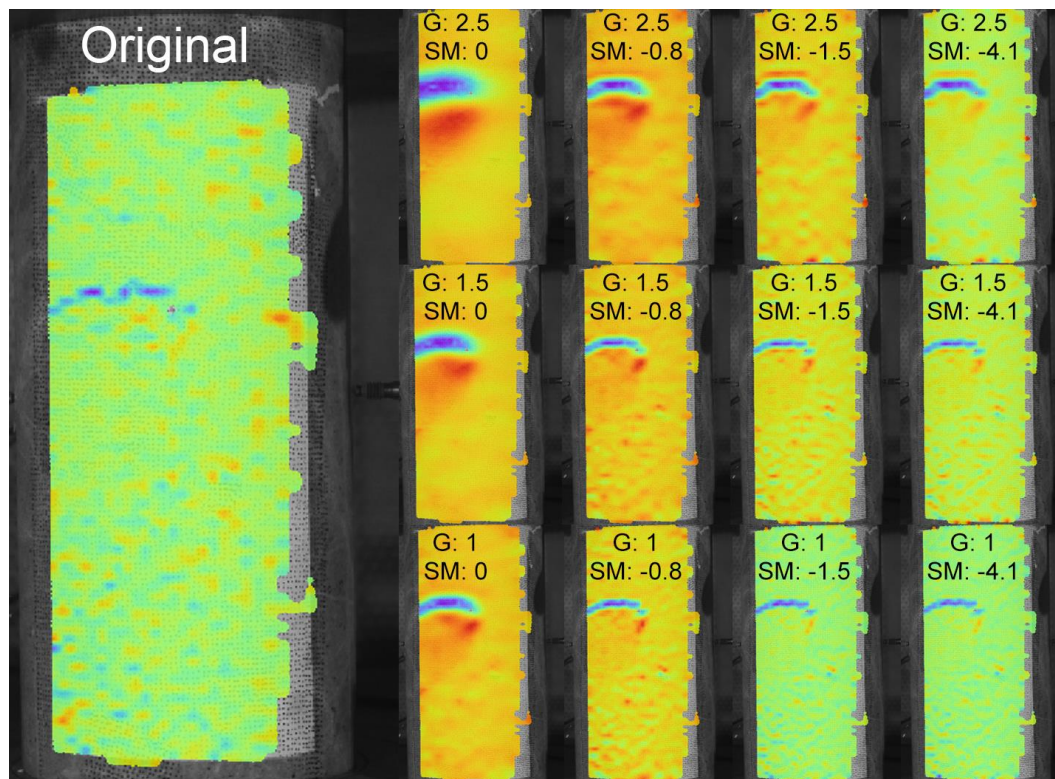


Figura 49: Diferencias visuales que se producen al variar los valores de Grid (G) y Smoothing (SM) del método de suavizamiento por splines.

Se puede ver que el valor del grid (G) produce un cierto suavizamiento, pero no promedia mucho los puntos de diferente color y no adapta los puntos a una curva. El valor de smooth (SM), en cambio, promedia mucho los colores y produce más curvas. La diferencia de resultados es fácil de ver en el caso de los valores extremos, pero cuando se usan intermedios, se parecen mucho a los niveles de 5x5 o 9x9 de la regresión local, por lo que al menos visualmente, no se podría decir que un método es mejor que el otro.

Independiente del método, es imperante el uso de alguno de estos filtros, pues rectifica los resultados y da continuidad en el tiempo a la deformación, además de eliminar gran parte del ruido.

Adicionalmente se prueban las muestras usando funciones en Matlab basadas en el método PLS. No presentan opciones de procesamiento, por lo que la metodología es básicamente elegir los archivos de grabación y hacer correr la función. De esto se obtienen imágenes como las vistas en la figura 34. Dependiendo del tipo de grabación los resultados cambian. En el caso de las muestras de alto FPS, las zonas de alta y baja deformación son similares a las que se muestran con el software Istra4D, como se puede constatar en las figuras 50 y 51, sin embargo, la extensión de esta es mucho más alta y menos precisa, casi un paralelo a lo que ocurre cuando se aplica un suavizamiento muy fuerte en Istra4D. Por lo demás, el procesamiento es mucho más lento y hacer ajustes manuales a los límites superior e inferior es tedioso y requiere procesar los datos cada vez que se hace un cambio. La única ventaja que presenta es que es menos afectada por el ruido (como se ve en la figura 51). Debido a los largos tiempos de procesamiento, poca flexibilidad y alta dificultad de configuración y representación visualmente inferior, no se recomienda usar esta herramienta para este tipo de ensayos.



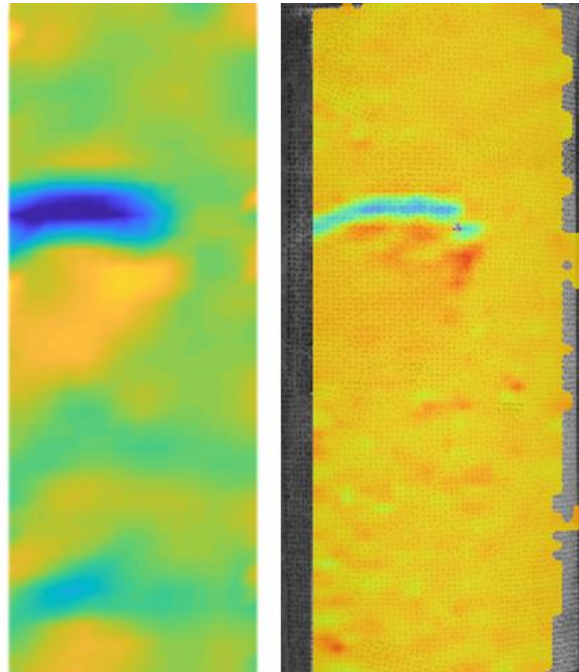


Figura 50: Comparación entre el resultado visual entre el método PLS (izquierda) y el de Istra4D (derecha) en una probeta grabada a altos FPS. Las zonas de deformación son parecidas, pero menos precisas.

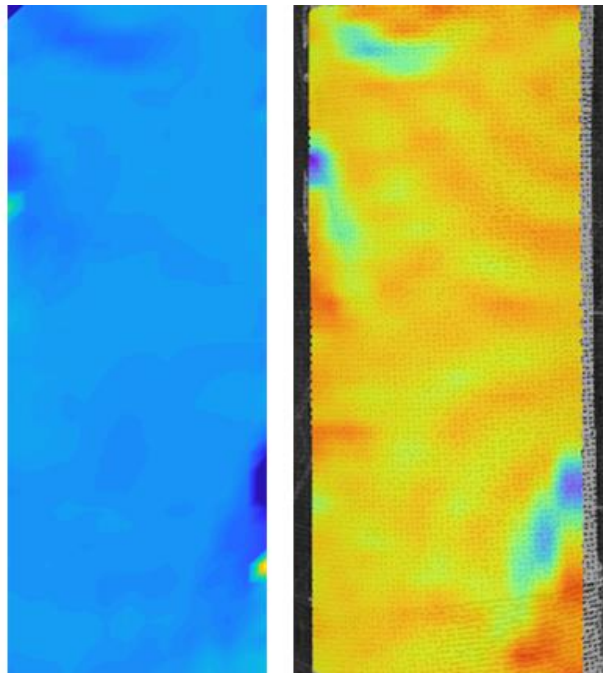


Figura 51: Comparación entre el resultado visual entre el método PLS (izquierda) y el de Istra4D (derecha) en una probeta grabada a bajos FPS. Las zonas de deformación son parecidas y están menos afectadas por ruido.

De lo que se puede observar en los diferentes tipos de grabaciones (número alto de FPS versus las de baja cantidad), la mayoría de la deformación se produce en los últimos momentos del ensayo. Esto se apoya en los resultados mostrados en Muñoz et

al., (2017), en el que se muestra la tasa de deformación axial y lateral bajo una tasa fija de carga, sobre una muestra de arenisca Hawkesbury, que es un tipo de roca con módulo elástico aproximadamente cuatro veces menor (Pells, 1977) que las analizadas en este trabajo, por lo que este efecto debido a la rigidez es amplificado.

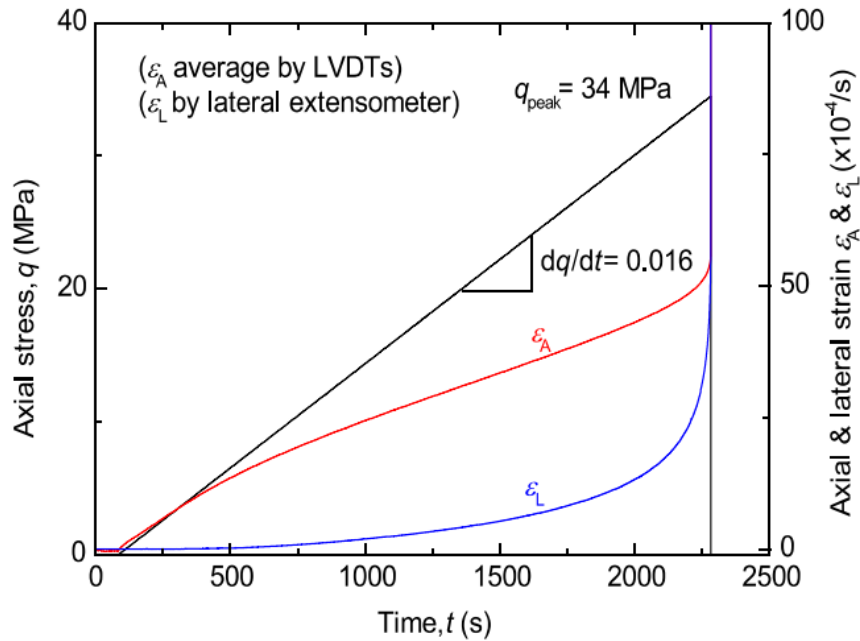


Figura 52: cambio en la deformación axial ( $\epsilon_A$ ) y lateral ( $\epsilon_L$ ) en una muestra de arenisca a una tasa de carga ( $dq/dt$ ) fija. Notar que la deformación se dispara en los últimos momentos antes de llegar al peak y fallar (34 MPa). Tomado de Muñoz et al., 2017.

Debido a esto, en las muestras lentas, grabadas a baja tasa de refresco, existe una posibilidad de que la representación visual no indique correctamente donde aparece la deformación (figura 54, muestra CX11). Además, estas presentan líneas curvas de error que aparecen desde la derecha de la zona de estudio (figura 53) que no se han podido explicar todavía.

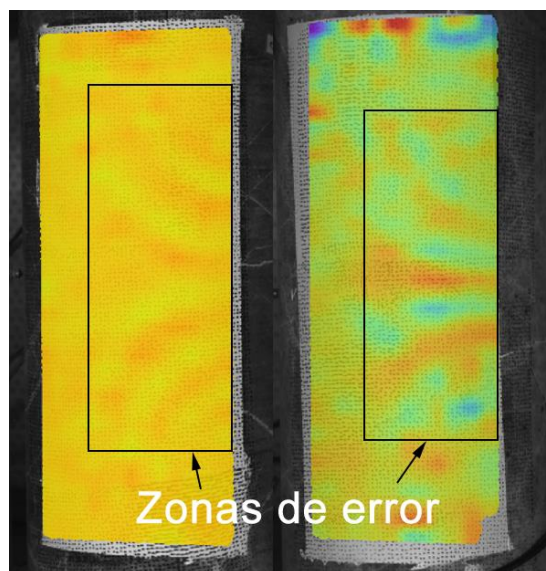


Figura 53: Figura mostrando las curvas de error que aparecen en las muestras de bajos FPS. Muestra CX4 a la izquierda y CX11 a la derecha.

Los mejores resultados se obtienen en las muestras de alta frecuencia que se enfocan en grabar los últimos segundos de los ensayos y/o en las que la deformación se produce por alguna vetilla blanda. Se cree que la forma más directa de evitar este problema es hacer un ensayo en el que se controle la deformación axial o lateral, con tal de que la deformación se produzca lentamente, aunque no es una solución segura, pues puede ocurrir también que la cantidad de deformación se disperse en la duración del ensayo y luego sea más difícil para las cámaras captar la deformación.

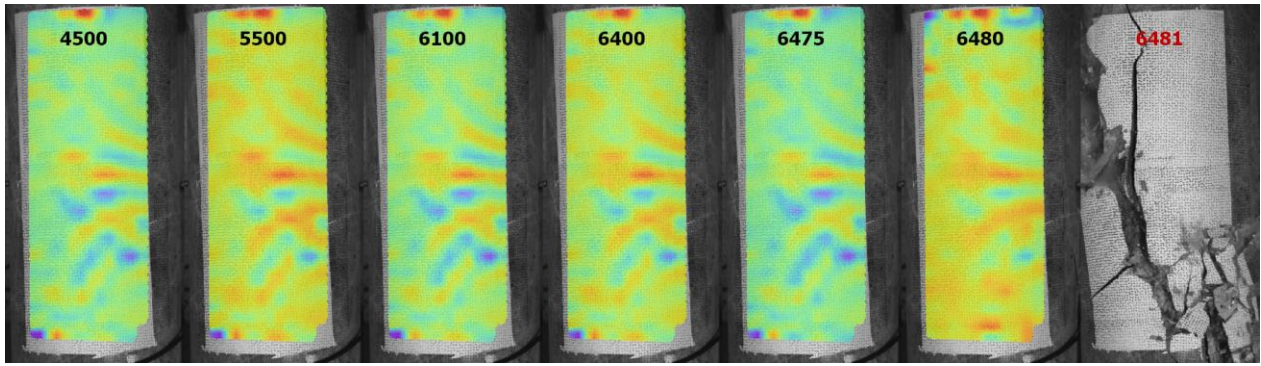


Figura 54: Deformación en la muestra CX11 grabada a 62.5 FPS. El número del fotograma está indicado en la parte superior. Se aprecian diferencias de colores, pero es más que nada ruido, y no una guía de donde pueden aparecer las fracturas.

Finalmente, todo depende del objetivo que se busque en el trabajo. Si los ensayos buscan medir deformación de la forma clásica, tal como si se usara un strain gauge o LVDT, lo mejor es optar por hacer grabaciones largas a baja frecuencia y a una tasa fija de carga, mientras que, si se quieren hacer estudios más a fondo sobre las propiedades de las vetillas, su efecto en el proceso de fracturamiento y obtener imágenes gráficamente significativas mostrando puntos específicos de deformación, es una mejor idea hacer grabaciones de alta frecuencia.

## 6.6 Problemas del estudio

A pesar de los buenos resultados que se obtienen para los diferentes tipos de pruebas, surgen algunos problemas que merman la calidad y certeza de estos, ya sea por error humano o por capacidad técnica de los instrumentos. En este apartado se listan algunos de los factores que tienen algún efecto sobre los resultados y que se deben tener en mente al revisar este trabajo.

Límite de discernimiento de deformación: es el límite técnico de medición debido al equipamiento. En el caso de estas muestras, la cantidad de deformación de los segmentos grabados se ubicó generalmente en el rango de  $1 \times 10^{-4}$  a  $3 \times 10^{-4}$  (0.1 a 0.3mm), mientras que la precisión típica para este sistema es de  $1 \times 10^{-6}$  (1 micrón), lo que indica que es un método adecuado, pero que cualquier problema con la configuración o un movimiento del sistema que disminuya la precisión puede invalidar la medición.

Segmentos del ensayo total: los ensayos no se pudieron grabar completamente, por lo que la información del ensayo es parcial, en específico, de la última sección. Esto afecta en el sentido de que, si bien se puede comprobar que hay una similitud en el

registro de deformación hacia el final del ensayo, no se puede hacer una comparación total ya que falta aproximadamente casi 2/3 de este.

Fracturamiento fuera de zona de estudio: el problema de la representación de la medición por usar strain gauges y apoyar LVDT en puntos específicos se resuelve en cierta manera al tener una gran área donde hacer mediciones, pero aun así, más de la mitad de la probeta queda fuera de la zona de estudio donde hacer representaciones visuales o sacar datos de deformación. Además, en el caso de los análisis estructurales, cualquier fractura que ocurra en alguna zona sin visión causa gran incertidumbre sobre la información que se pueda sacar de esta.

Tanto el problema de la precisión como el del fracturamiento fuera de la zona de estudio son solucionables solo comprando más equipamiento (para este tipo de estudio), pero el de la grabación por segmentos se puede arreglar fácilmente ajustando parámetros de las cámaras.

## **6.7 Recomendaciones**

En este trabajo se busca validar la metodología DIC como una alternativa viable para la medición de deformación en ensayos UCS, lo que se cree que hasta cierto punto se logró. Sin embargo, para que esta pueda ser completamente aceptada hacen falta algunos puntos que no se pueden probar debido a la ausencia de los ensayos correspondientes y fallas por inexperiencia con el sistema. Por lo tanto, en este apartado se escribirán algunas recomendaciones para futuros experimentos en los que se quiera aplicar esta metodología.

La cara de la muestra a grabar debe ser pintada completamente. En algunos ensayos se perdió información importante debido a esto. En general esto no afecta a la calidad de las mediciones de strain, pero puede que se pierdan resultados visuales, pues algunas fracturas pueden ocurrir fuera del área pintada. Además, pintar mayor porcentaje de la muestra no presenta ninguna desventaja, y si lo que se busca es preservar imágenes de la muestra fresca, lo mejor es tomar fotos de buena calidad y generar una imagen compuesta, como en la figura 27.

Grabar todo el proceso de deformación y en una sola toma. El desconocimiento de la existencia de strain gauges virtuales y problemas técnicos produjeron que solo se grabara una parte del ensayo, por lo que la información de deformación es incompleta y no se puede hacer una comparación lado a lado totalmente fiable con otros métodos.

Se debe tener claro el objetivo del estudio. Para obtener mediciones de strain que puedan ser alternativas reales a las clásicas, lo mejor es grabar el ensayo completo, incluyendo la mayor área posible y tratando de llenar toda el área de enfoque de la cámara. Si se prefiere obtener imágenes claras representando la deformación lo mejor es hacer ensayos lentos con deformación controlada, para que esta no se concentre solo en los segundos finales. Por último, si el objetivo es estudiar alguna característica específica, como vetillas de algún mineral, relaciones estructurales, etc., lo mejor es centrar la cámara con un lente pequeño en la zona de interés y grabar a alta tasa de fotogramas. En este sentido, el método ofrece alta flexibilidad.

Una parte no menor del trabajo incluye ordenar el formato de los datos, hacer funciones en Excel, hacer coincidir las horas de las mediciones, muchas conversiones, entre otras tareas. Varias de estas no se pueden automatizar por el diferente origen de los datos, pero se pueden hacer algunas cosas para acortar los tiempos de procesamiento, como una guía para entender los datos de los strain gauges, poner la misma hora para todos los instrumentos de medición y hacer macros que automaticen algunos procesos en Excel.

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha buscado analizar la validez de aplicar la técnica DIC como una alternativa real a las formas clásicas de medición de deformación. Esto se realizó ensayando muestras de la mina El Teniente en pruebas de compresión uniaxial (UCS) mientras eran grabadas por cámaras especialmente acondicionadas para esta técnica.

Las pruebas iniciales consistieron en usar los LVDT y strain gauges para medir deformación y parámetros físicos para confirmar que las muestras presentaban un comportamiento típicamente esperado y por lo tanto que eran adecuadas para ser sujetas a pruebas con una técnica nueva. En este sentido, en las muestras grandes (150mm) el promedio de resistencia peak de las muestras fue de 85 MPa, el coeficiente de Poisson fue de 0.21 para las mediciones en LVDT y 0.24 para las hechas con strain gauges. El módulo de Young con LVDT dio como resultado 27 GPa como promedio y 59 GPa para los strain gauges, y fue donde se dieron las mayores diferencias, debido a que los LVDT registraron una mayor cantidad de deformación y un par de muestras tuvieron resultados fuera de lo normal.

En general, a pesar de que las diferencias entre los resultados por LVDT y strain gauges no son despreciables, ambos registraron valores normales y dentro del rango en las muestras principales si se compara con las mediciones sobre el mismo tipo de muestras hechas por CODELCO y laboratorios independientes (IDIEM y SGS por ejemplo).

Luego, aprovechando la velocidad de las grabaciones se hicieron también estudios enfocados en la secuencia de fractura y como son afectados por varios parámetros clásicamente estudiados. Estos arrojaron como resultados que, las vetillas más probables a romperse son las de mayor ángulo, las de espesor mayor y de menor JRC. Sobre el tipo de mineralogía de relleno no se pudo encontrar un resultado claro, aunque una revisión por orden de aparición de fracturas podría sugerir que las primeras fracturas ocurren en vetillas con mayor proporción de mineralogía blanda.

Le siguió la parte más importante del estudio, hacer las mediciones en DIC. Estas se realizaron en dos muestras de las definitivas, las que incluían la mayor parte del ensayo registrado. A continuación, se detallan los puntos principales de este tipo de medición

- El método es muy flexible. Se pueden hacer infinitas mediciones en cualquier parte del área pintada, lo que sirve para estudiar al mismo tiempo zonas muy específicas alrededor de una fractura como una traza mayor que represente la deformación general de la muestra. Adicionalmente incluye herramientas para hacer mediciones en áreas, círculos, puntos, etc., en los que no se ahondó en este trabajo.
- Las curvas de deformación presentan un comportamiento similar. Dependiendo de donde se hagan las mediciones virtuales, los saltos de deformación y magnitud que se muestran en los LVDT y strain gauges es la misma que para DIC.

- Hay dos tipos de mediciones cuando se trata de emular un strain gauge, estos son el Gauge Strain y Strain en eje Y/X/Z. El Gauge Strain reporta la deformación en base a la diferencia de distancia entre los extremos de un segmento elegido entre un tiempo inicial y final, es decir, en una dimensión, por lo que no toma en cuenta la deformación que ocurre con los puntos entremedio. Esto en general afecta muy poco debido a que la curvatura de este tipo de material es muy baja, aunque, de todos modos, debe tenerse en cuenta para el tipo de análisis. Por otra parte, la medición de Strain en eje Y/X/Z sí toma en cuenta la deformación de todos los puntos en una línea elegida.
- El uso de alguno de los dos filtros que tiene el programa es totalmente necesario para que los resultados tengan sentido. Sin procesar, la deformación tiene mucho ruido y poca continuidad, por lo que es imprescindible familiarizarse con el uso de estos para tener datos confiables.

Otra parte de este trabajo consistió en aprovechar el sistema para hacer representaciones visuales de los datos. Para esto se usó una de las funciones que trae el software oficial de las cámaras (Istra4D). Como regla general, aplicar alguno de los filtros disponibles es necesario y suficiente para que se puedan ver las deformaciones correctamente marcadas. El filtro de regresión lineal produce mejores resultados cuando la deformación es muy localizada, mientras que el filtro por splines se ajusta más a los casos de deformación es global. En general los resultados son fiables, pero existe mucho ruido en los segmentos de baja deformación, que en este tipo de ensayo por carga fija es la gran mayoría del tiempo, por lo que se recomienda usar esta visualización solo en los momentos finales de la muestra o en ensayos de deformación controlada.

Como punto final, se puede decir que el método es muy útil en tres casos principales, cuando se quiere hacer mediciones de deformación general y específicos, para hacer representaciones visuales de la deformación, y para hacer análisis estructurales enfocados en zonas específicas de la roca. Dependiendo de cuál es el objetivo, es la configuración física que se debe hacer de la cámara, prensa y muestras.





## 8. BIBLIOGRAFÍA

**API T10 E 202. 2011.** Informe de ensayo de compresión simple con medición de deformación en muestras de 150 mm de diámetro. Laboratorio IDIEM, Santiago, Universidad de Chile.

**Arévalo, A., Floody, R. y Olivares, A. 1998.** Modelo geometalúrgico. Estudio geometalúrgico del mineral a explotar a mediano y largo plazo (GL-133/98). Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 76 pp., Rancagua.

**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.

**Camus, E. 1975.** Geology of the El Teniente ore body with emphasis on wall-rock. CODELCO-Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología.

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

**Christián A. López. 2013.** Informe de resultados de ensayos geotécnicos CODELCO Chile División El Teniente, Área Mecánica de Rocas, SGS CIMM T&S, Santiago, Chile.

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

**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.

**Floody, R. 2000.** Estudio de vulnerabilidad geológica-geotécnica de la Chimenea de Brechas Braden. Fase 1, Geología de Brechas Braden (GL-044/00). Codelco Chile, División El Teniente, Superintendencia Geología (Inédito): 90 pp., Rancagua.

**Geerling, E. L. 2015.** Reducción del Error Experimental en los Campos de Deformación Obtenidos por un Sistema De Correlación de Imágenes Digitales. Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico. Santiago de Chile, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica.

**GRMD-SGL-INF-61-2014. 2014.** Consolidación del Modelo Geotécnico para Proceso Productivo de la Roca Primaria. Superintendencia de Geología, División El Teniente, CODELCO, Chile.

**Harrison, D. 2009.** Caracterización estructural bajo el nivel Teniente 8, mediante el análisis de sondajes ortogonales orientados, para el proyecto nuevo nivel mina, Yacimiento El Teniente, VI Región, Chile. Concepción, Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Ciencias de la Tierra.

**H. Munoz, A. Taheri, E. K. Chanda. 2016.** Pre-Peak and Post-Peak Rock Strain Characteristics During Uniaxial Compression by 3D Digital Image Correlation. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. 49, p 2541-2554.

**H. Munoz, A. Taheri. 2017.** Specimen aspect ratio and progressive field strain development of sandstone under uniaxial compression by three-dimensional digital image correlation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, p 599-610.

**Influence of Filter parameter on Q-480 measurement results. 2011.** Dantec Dynamics, Nova Instruments.

**Istra4D Software Manual Q-450 System. 2013.** Dantec Dynamics GmbH, Nova Instruments.

**J. McGinnis, M & Pessiki, Stephen & Turker, Hakan. 2005.** Application of Three-Dimensional Digital Image Correlation to the Core-Drilling Method. *Experimental Mechanics*. 45. 359-367. 10.1007/BF02428166.

**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., Munizaga, F., McWilliams, M., Thiele, K., Arévalo, A., Zúñiga, P., and Floody, R. 2001.** 40Ar/39Ar Geochronology of the El Teniente Porphyry Copper Deposit. III South American Symposium on Isotope Geology, Extended Abstract Volume (CD), Sociedad Geológica de Chile, Santiago, Chile, p. 496-499.

**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, p. 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 U-Pb, 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.

**Mapa geomorfológico Sexta Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. 2018.** Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.

**Nick McCormick y Jerry Lord. 2010.** Digital Image Correlation. *Materials Today*, vol. 13, issue 12, p. 52-54.

**Pan, Bing & Wu, Dafang & Wang, Zhaoyang. 2012.** Internal displacement and strain measurement using digital volume correlation: A least-squares framework. *Measurement Science and Technology*. 23. 045002. 10.1088/0957-0233/23/4/045002.

**Pells, P.J.N. 1977.** Measurement of Engineering Properties of Hawkesbury Sandstone. *Australian Geomechanics Journal*, vol. G5, No. 1, p. 10-20.

**Q-400 DIC and Istra4D training. 2011.** Dantec Dynamics, Nova Instruments.

**Robinson, D., Bevins, R.E., Aguirre, L. y Vergara, M. 2004.** A reappraisal of episodic burial metamorphism in the Andes of central Chile: Contributions to Mineralogy and Petrology, vol. 146, no. 4, p. 513–528.

**Skewes, M. A., Arévalo, A., Floody, R., Zuñiga, P. y Stern, C. 2002.** The Giant El Teniente Breccia Deposit: Hypogene Copper Distribution and Emplacement. Society of Economic Geologists, Special Publication 9, p. 299-332.

**Stern, C.R., Skewes, M.A., Arévalo, A. 2010.** Magmatic evolution of the giant El Teniente Cu-Mo deposit, central Chile. Journal of Petrology, vol. 52, p. 1591-1617.

**Sutton MA, Orteu JJ, Schreier HW. 2009.** Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. Springer, LLC.

**Taheri A., Tani K. 2008.** Use of down-hole triaxial apparatus to estimate the mechanical properties of heterogeneous mudstone. Int J Rock Mech Min Sci 45:1390–1402. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.01.017

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

**Uribe, F., Morales, A., Pereira, J. y Russo, A. 2003.** Estudio de vulnerabilidad geológica-geotécnica de Chimenea de Brechas Braden, Segunda Fase. Tomo I: Geología y Geotecnia. Superintendencia de Geología. CODELCO, El Teniente.

**Zhang H, Huang G, Song H, Kang Y. 2012.** Experimental investigation of deformation and failure mechanisms in rock under indentation by digital image correlation. Eng Fract Mech 96:667–675.

## **9. ANEXOS**

En la sección A de Anexos se presentan las fichas de todas las muestras usadas en el trabajo. En estas aparecen los gráficos, fotos antes y después del ensayo, parámetros físicos y otros detalles que puedan ser necesitados.

En la sección B se ubica una tabla resumen de las muestras con especificaciones técnicas.

En la sección C se incluyen las fichas que se usaron para mapear las cuatro muestras principales.

En la sección D están las tablas resúmenes que describen cada vetilla y estructura afectada mientras avanzaba la secuencia de fracturamiento y un esquema con las vetillas enumeradas.

En la sección E se encuentran los análisis estructurales realizados sobre las 3 otras muestras aparte de la mostrada en resultados.

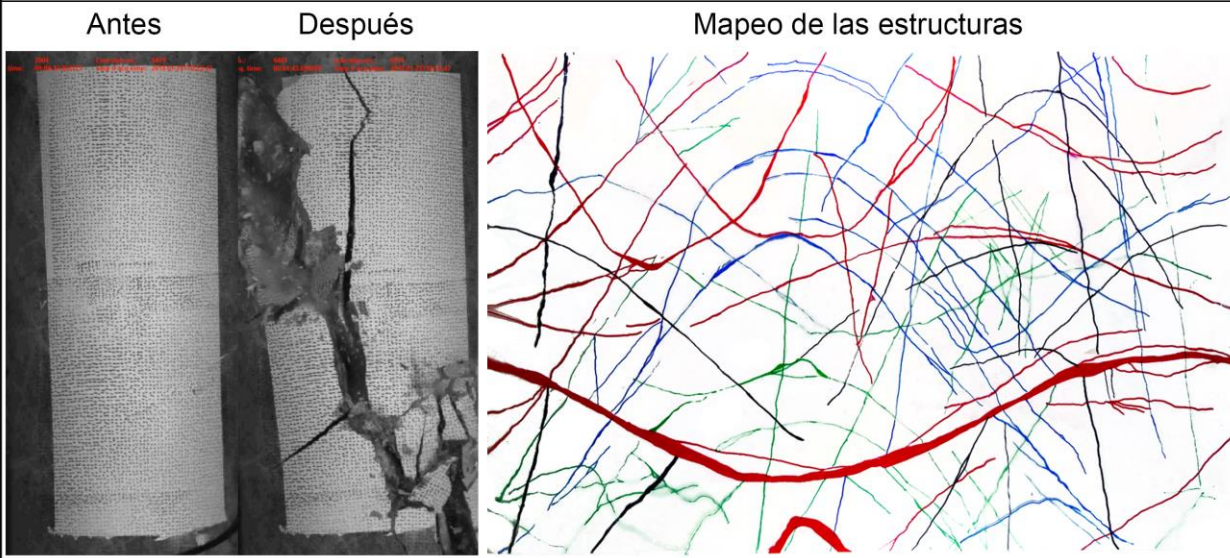
Por último, en la sección F están los resultados visuales significativos obtenidos de este trabajo.

# Probeta CX11

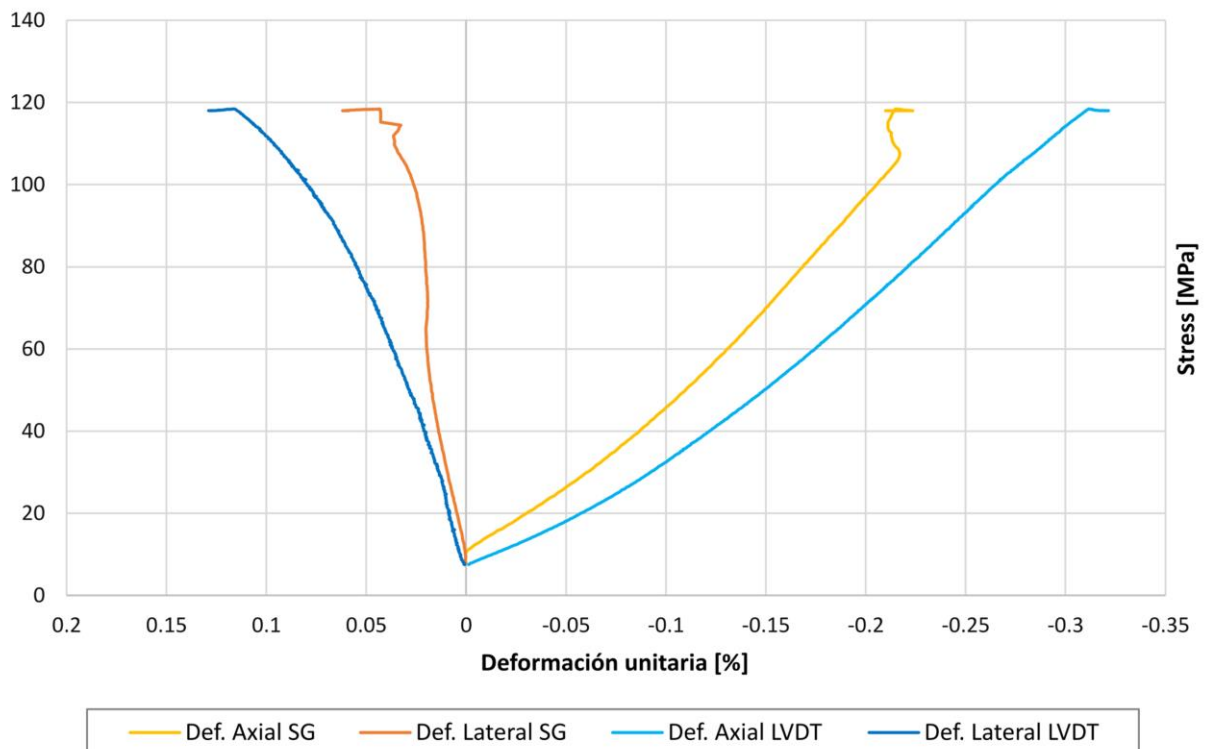
## Sección A

Grabación	Propiedades físicas	
FPS: 62,5 Duración [s]: 220 1° fractura:	Litología: Dacita Altura: 31,8 cm Diámetro: 14,3 cm Resistencia peak [MPa]: 118	Young (E) [GPa] SG: 55,3 Young (E) [GPa] LVDT: 25,1 Poisson (ν) SG: 0,17 Poisson (ν) LVDT: 0,18

\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer



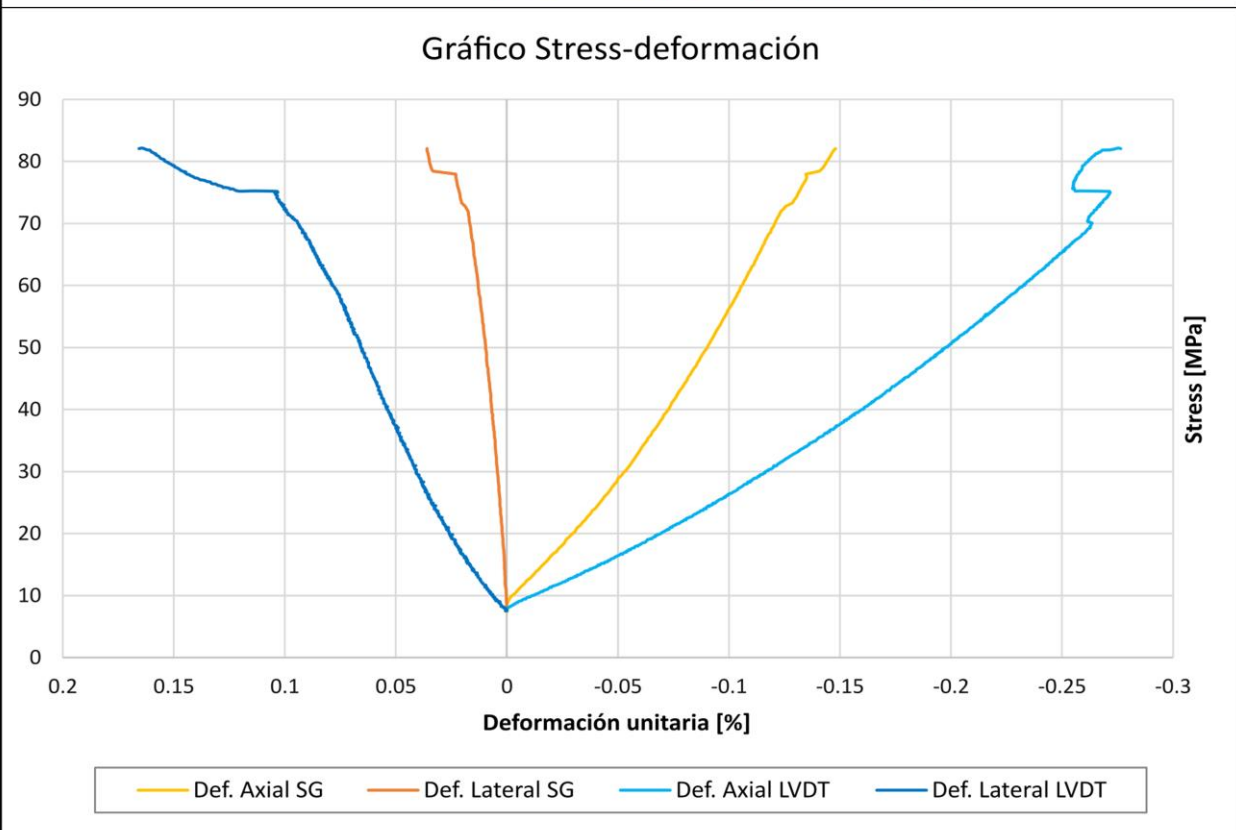
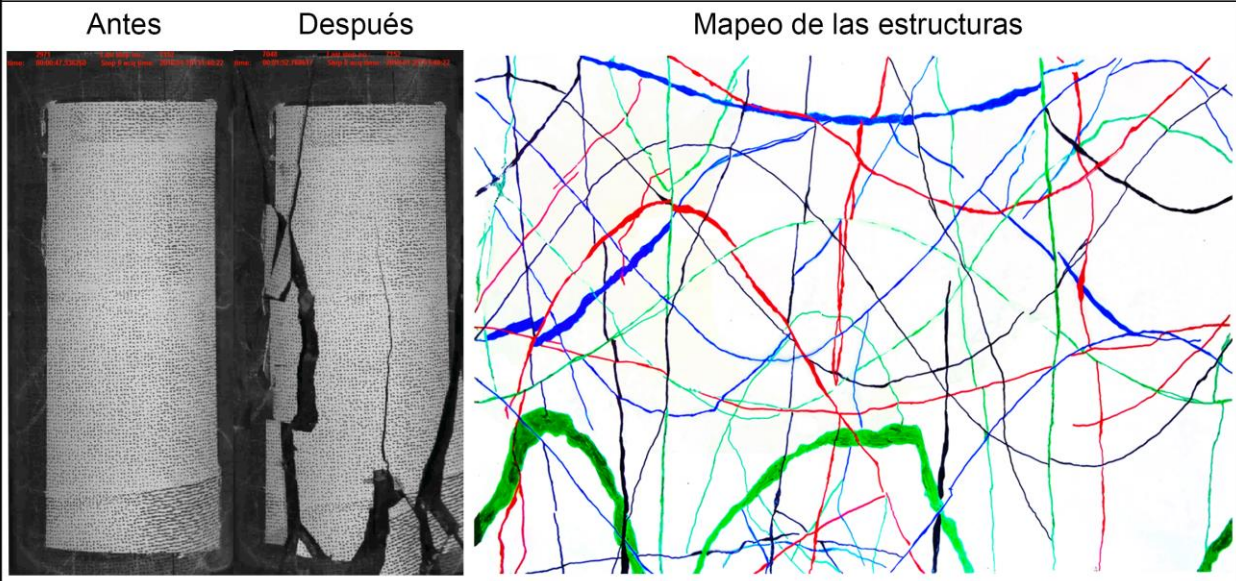
### Gráfico Stress-deformación



# Probeta CX4

Grabación	Propiedades físicas	
FPS: 62,5 Duración [s]: 241 1° fractura:	Litología: CMET Altura: 31,2 cm Diámetro: 14,3 cm Resistencia peak [MPa]: 82,1	Young (E) [GPa] SG: 55,3 Young (E) [GPa] LVDT: 25,1 Poisson (ν) SG: 0,24 Poisson (ν) LVDT: 0,27

\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer



# Probeta CX12

## Grabación

FPS: 1500  
 Duración [s]: 6  
 1° fractura:

## Propiedades físicas

Litología: Dacita  
 Altura: 31,8 cm  
 Diámetro: 14,2 cm  
 Resistencia peak [MPa]: 94,1

Young (E) [GPa] SG: 51  
 Young (E) [GPa] LVDT: 28,2  
 Poisson (ν) SG: 0,25  
 Poisson (ν) LVDT: 0,2

\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer

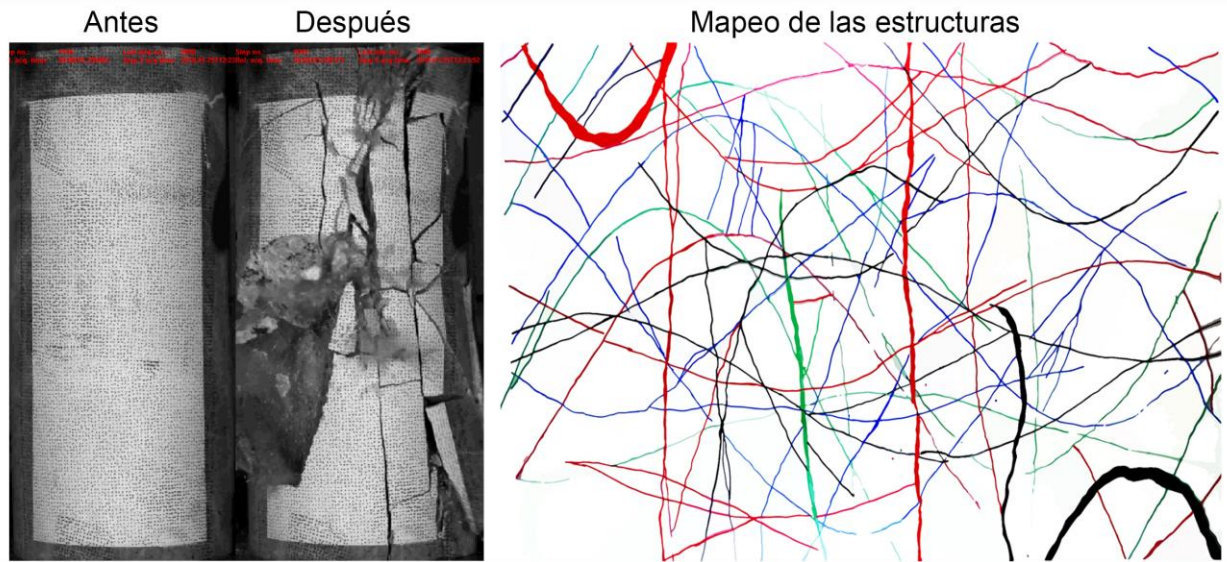
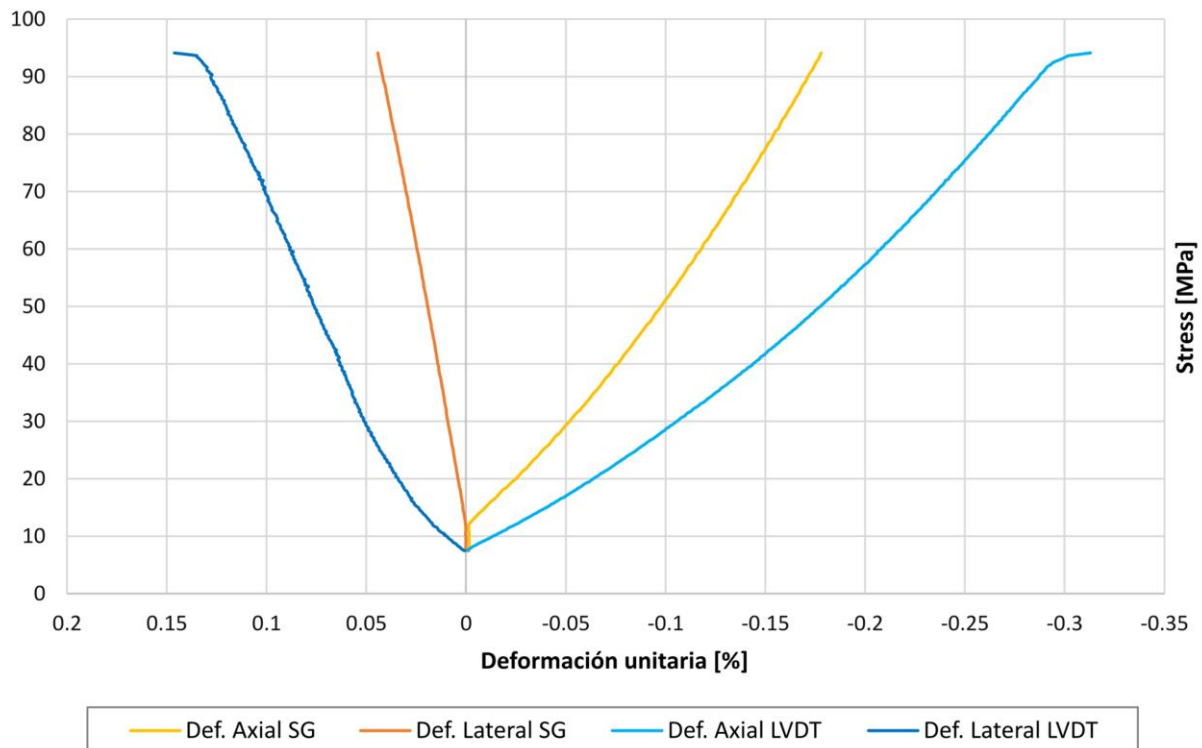


Gráfico Stress-deformación



# Probeta CX2

Grabación	Propiedades físicas	
FPS: 1500 Duración [s]: 7,3 1° fractura:	Litología: CMET Altura: 31,9 cm Diámetro: 14,3 cm Resistencia peak [MPa]: 67,7	Young (E) [GPa] SG: 65,6 Young (E) [GPa] LVDT: 24,8 Poisson (ν) SG: 0,27 Poisson (ν) LVDT: 0,19

\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer

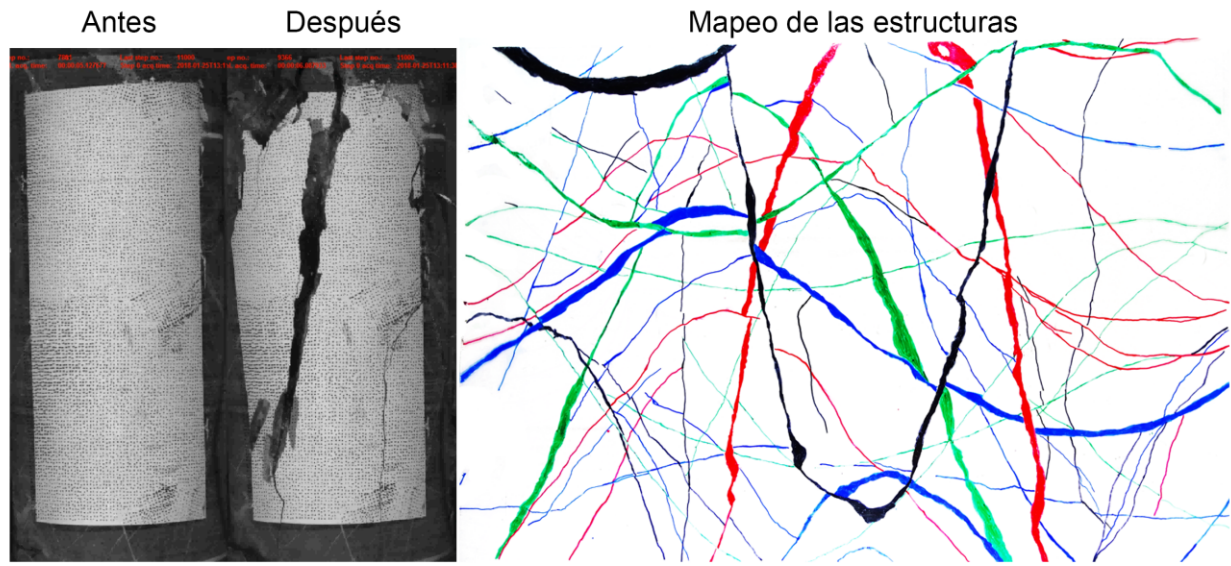
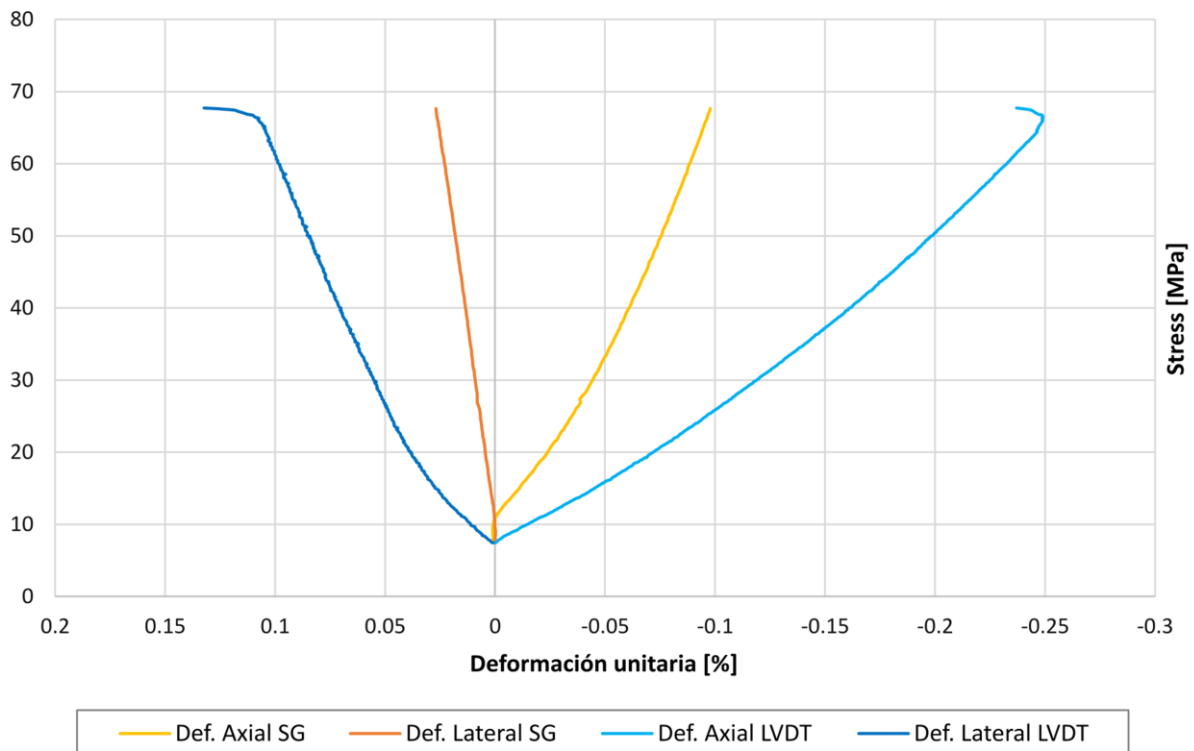


Gráfico Stress-deformación

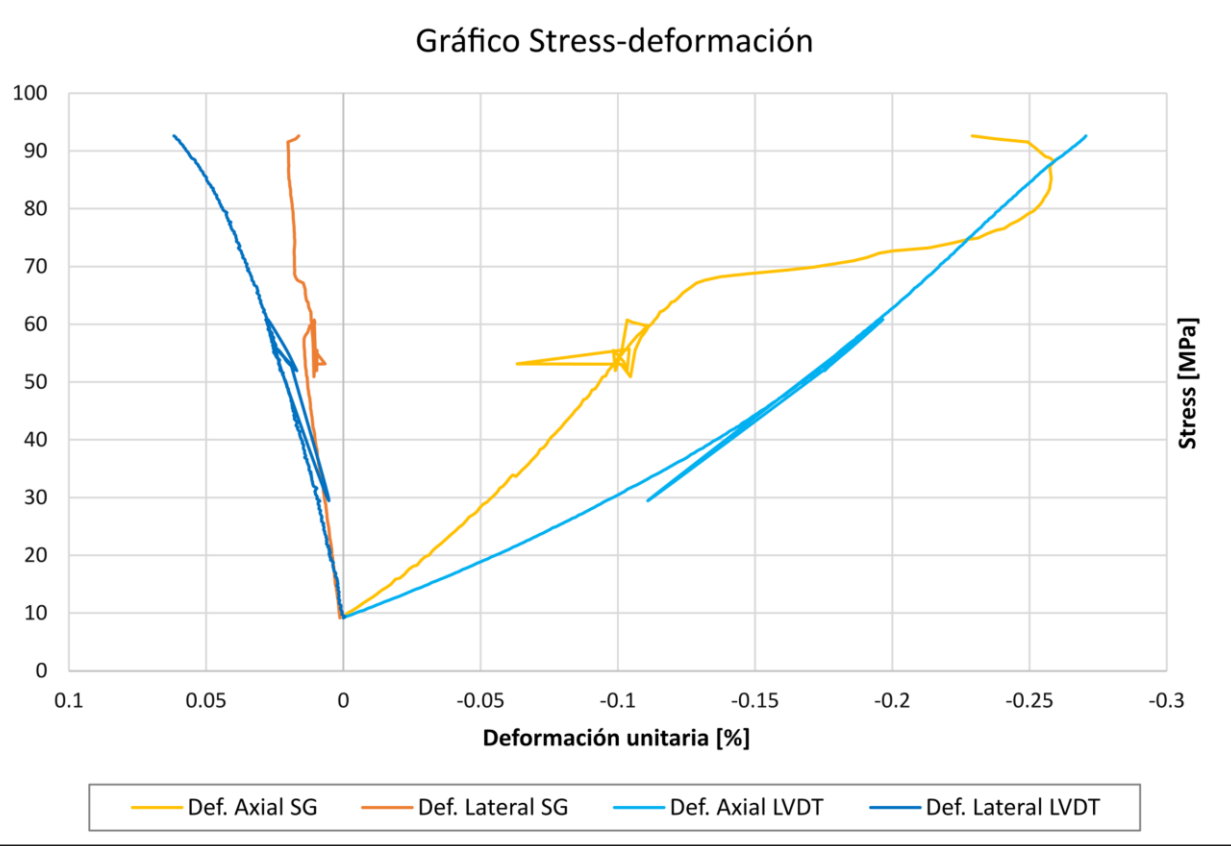
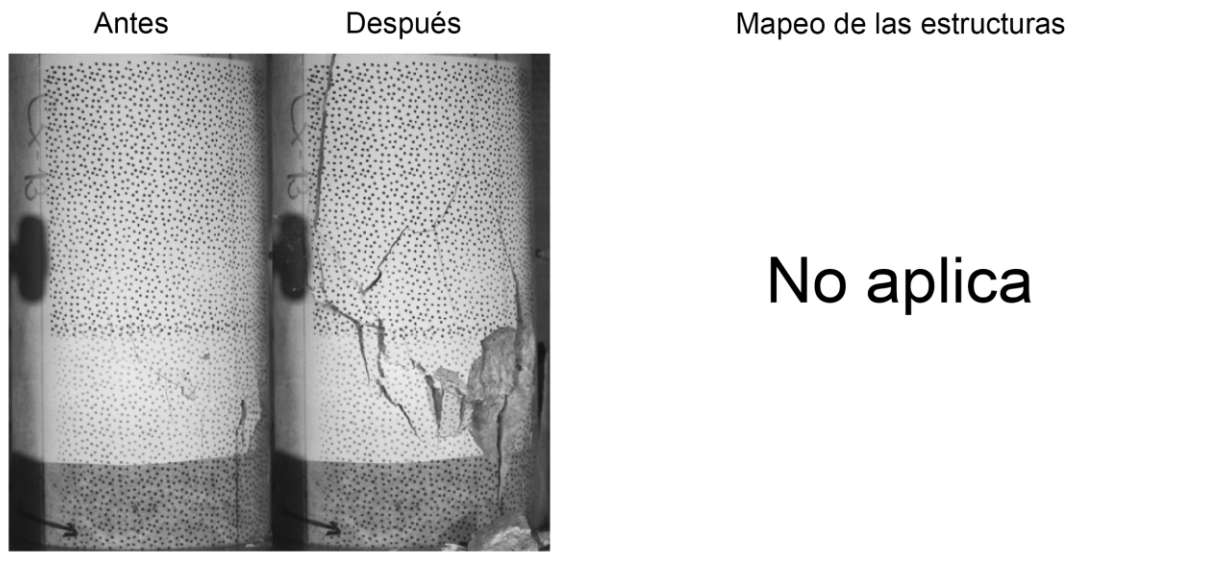




# Probeta DV4

Grabación	Propiedades físicas	
FPS: 100 Duración [s]: 150 1° fractura:	Litología: Dacita Altura: 30,1 cm Diámetro: 14,3 cm Resistencia peak [MPa]: 92,6	Young (E) [GPa] SG: 53,6 Young (E) [GPa] LVDT: 27,8 Poisson (ν) SG: 0,08 Poisson (ν) LVDT: 0,23

\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer



# Probeta DV5

## Grabación

FPS: 500  
Duración [s]: 55  
1° fractura:

## Propiedades físicas

Litología: CMET  
Altura: 31,8 cm  
Diámetro: 14,3 cm  
Resistencia peak [MPa]: 96

Young (E) [GPa] SG: 40,4  
Young (E) [GPa] LVDT: -  
Poisson ( $\nu$ ) SG: 0,26  
Poisson ( $\nu$ ) LVDT: -

*\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer*

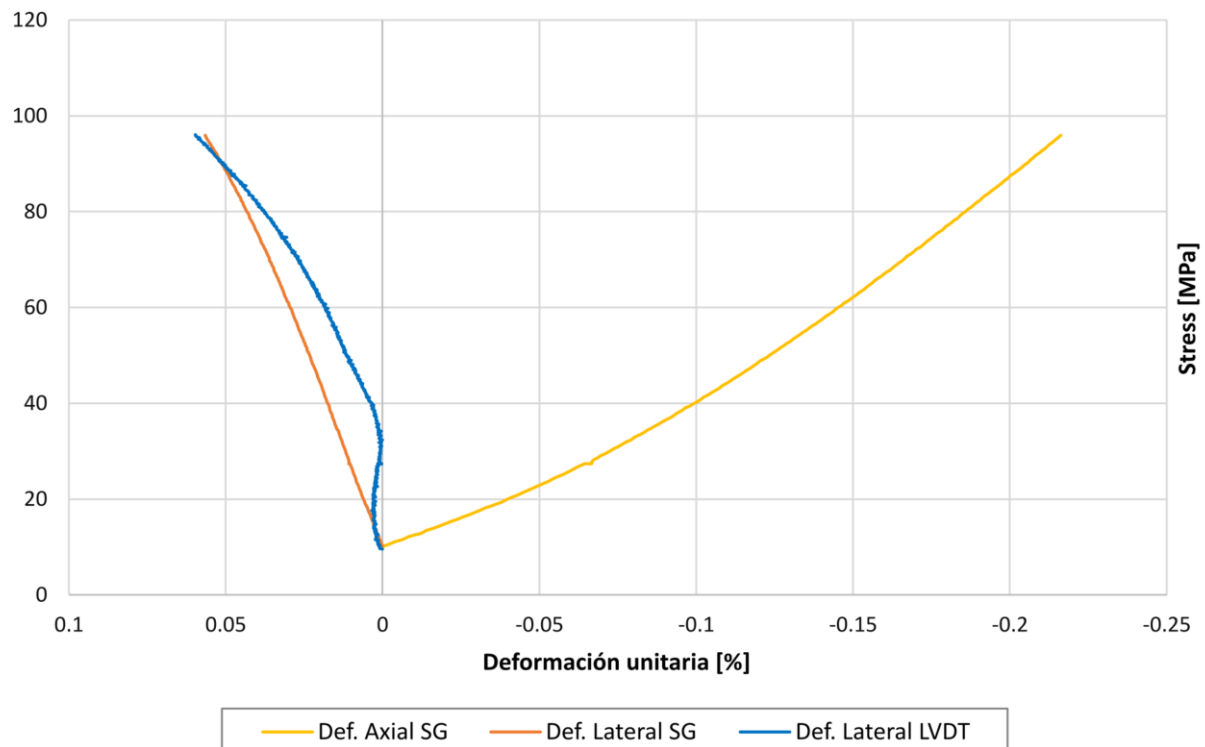
Antes

Después

Mapeo de las estructuras

No aplica

Gráfico Stress-deformación



# Probeta DV6

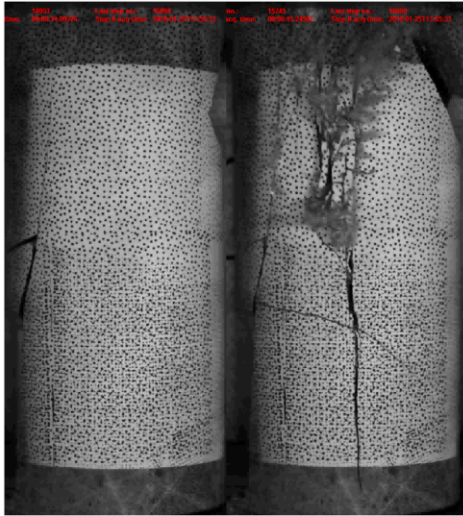
Grabación	Propiedades físicas	
FPS: 1000 Duración [s]: 23 1° fractura: Combinada	Litología: CMET Altura: 31,8 cm Diámetro: 14,3 cm Resistencia peak [MPa]: 96,5	Young (E) [GPa] SG: 52,7 Young (E) [GPa] LVDT: 11,1 Poisson (ν) SG: 0,4 Poisson (ν) LVDT: -

\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer

Antes

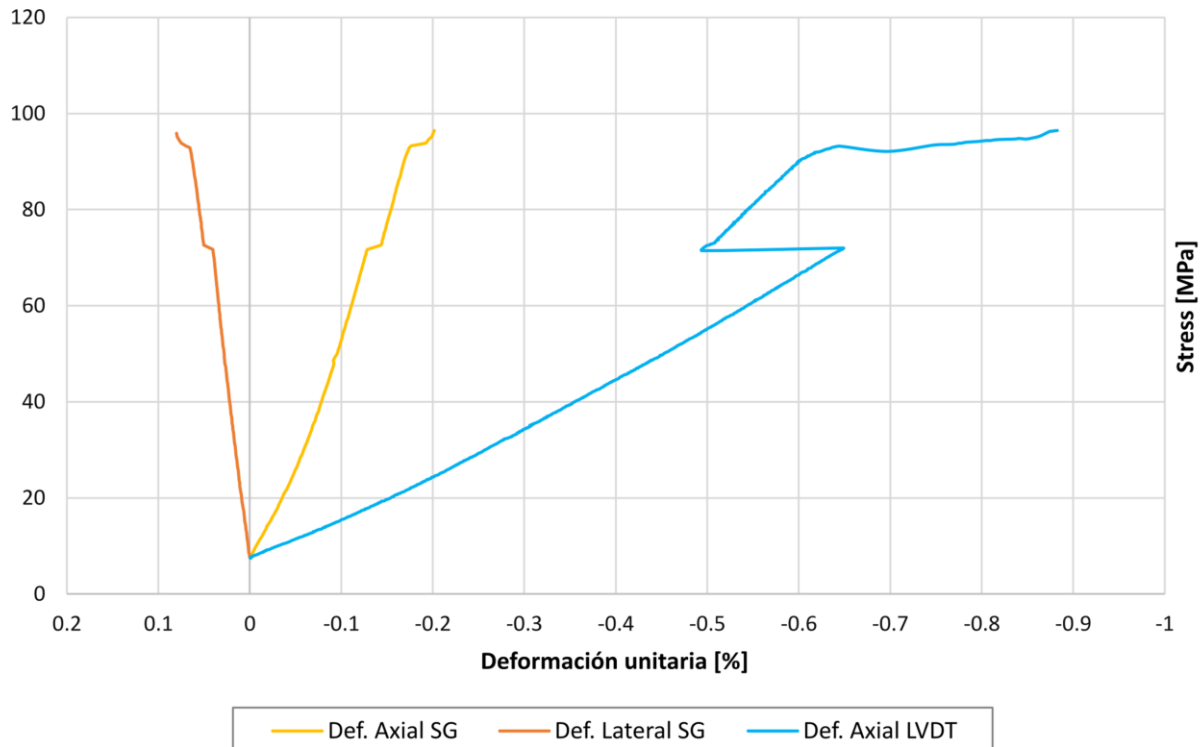
Después

Mapeo de las estructuras



No aplica

Gráfico Stress-deformación



# Probeta DV7

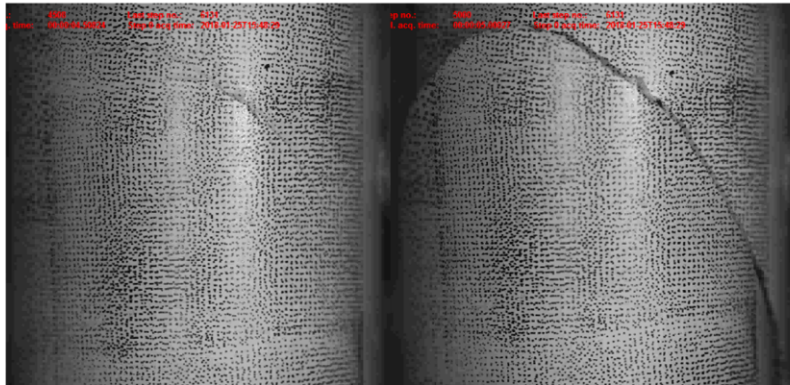
Grabación	Propiedades físicas	
FPS: 1000 Duración [s]: 6 1° fractura: Vetilla	Litología: CMET Altura: 29,8 cm Diámetro: 14,2 cm Resistencia peak [MPa]: 34	Young (E) [GPa] SG: 108,8 Young (E) [GPa] LVDT: 36,8 Poisson (ν) SG: 0,28 Poisson (ν) LVDT: -

\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer

Antes

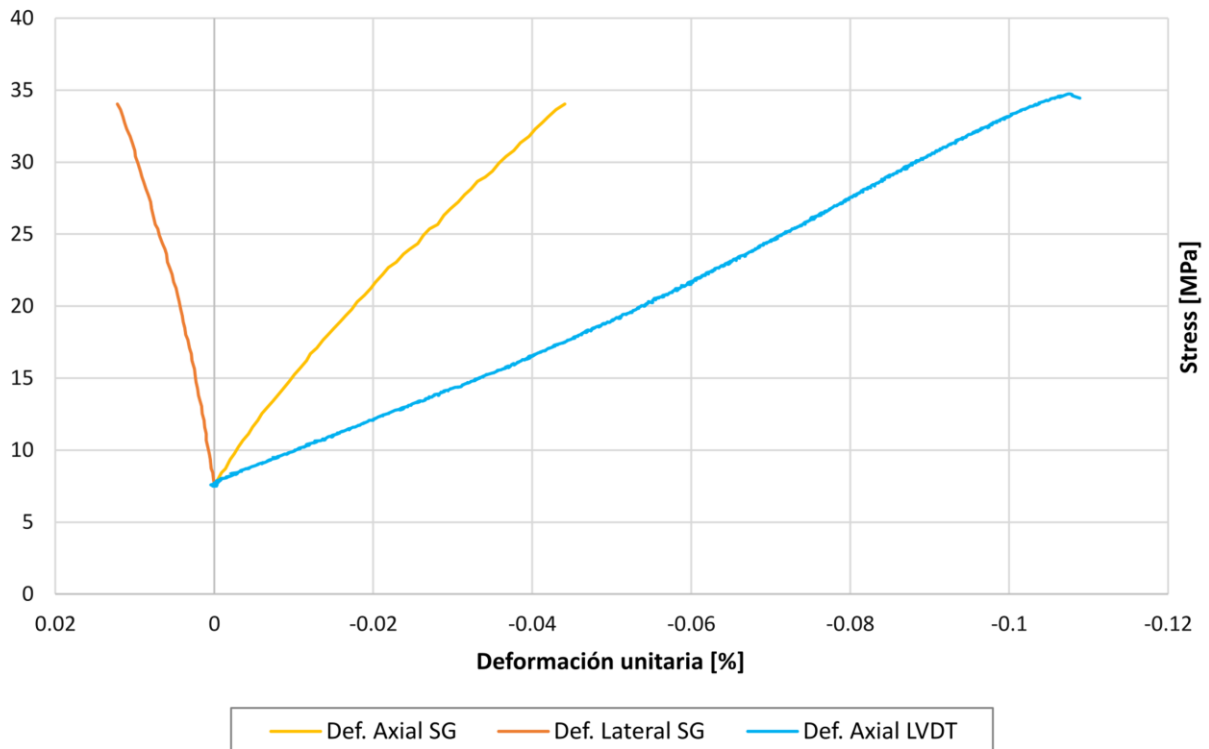
Después

Mapeo de las estructuras



No aplica

Gráfico Stress-deformación



# Probeta Chica 1

## Grabación

FPS: 400  
Duración [s]: 30  
1° fractura: Vetilla

## Propiedades físicas

Litología: CMET  
Altura: 12,7 cm  
Diámetro: 6,3 cm  
Resistencia peak [MPa]: 155,3

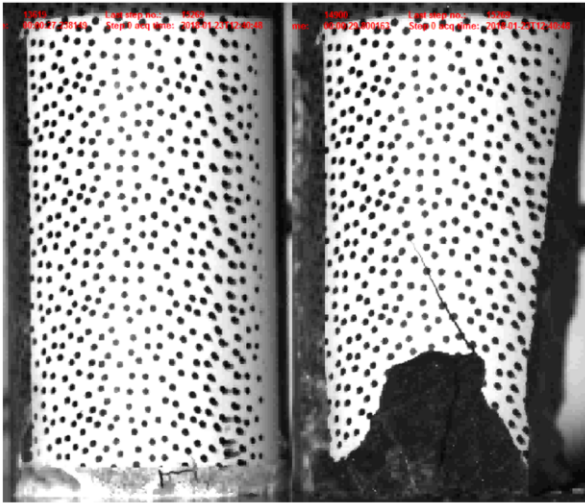
Young (E) [GPa] SG: 87,6  
Young (E) [GPa] LVDT: -  
Poisson ( $\nu$ ) SG: 0,28  
Poisson ( $\nu$ ) LVDT: -

\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer

Antes

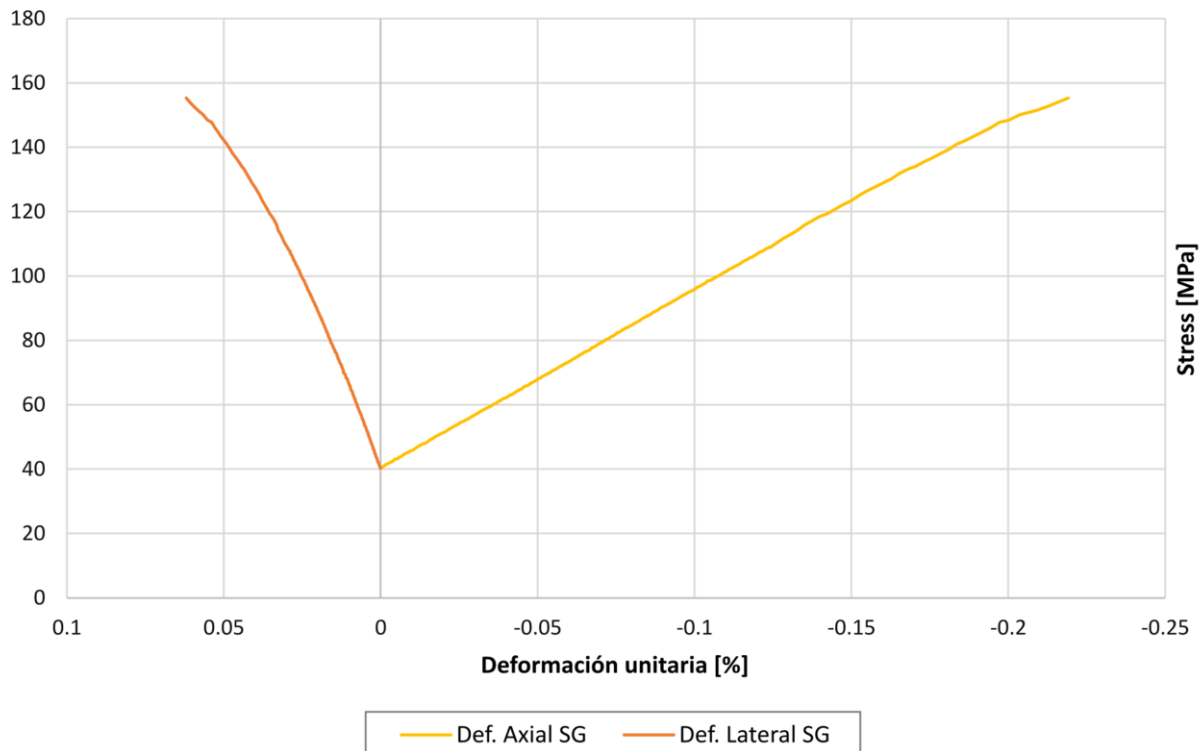
Después

Mapeo de las estructuras



No aplica

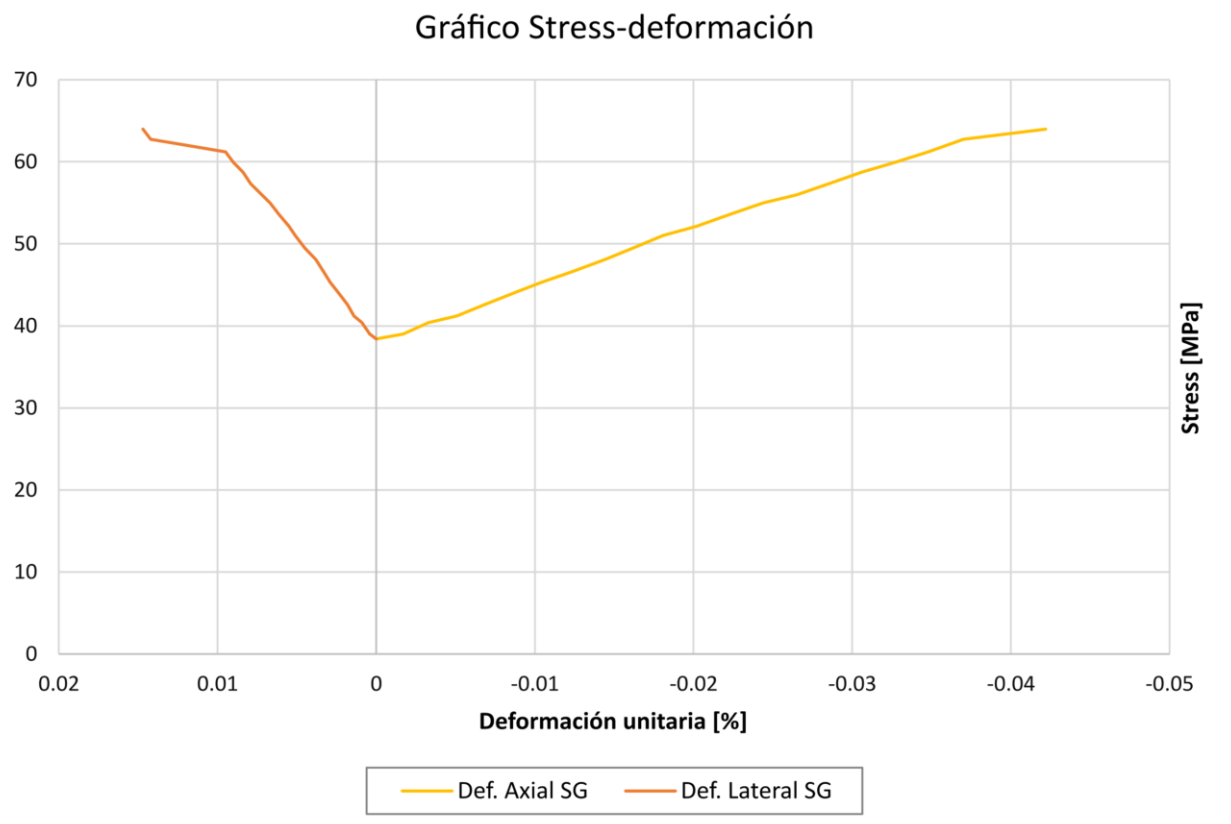
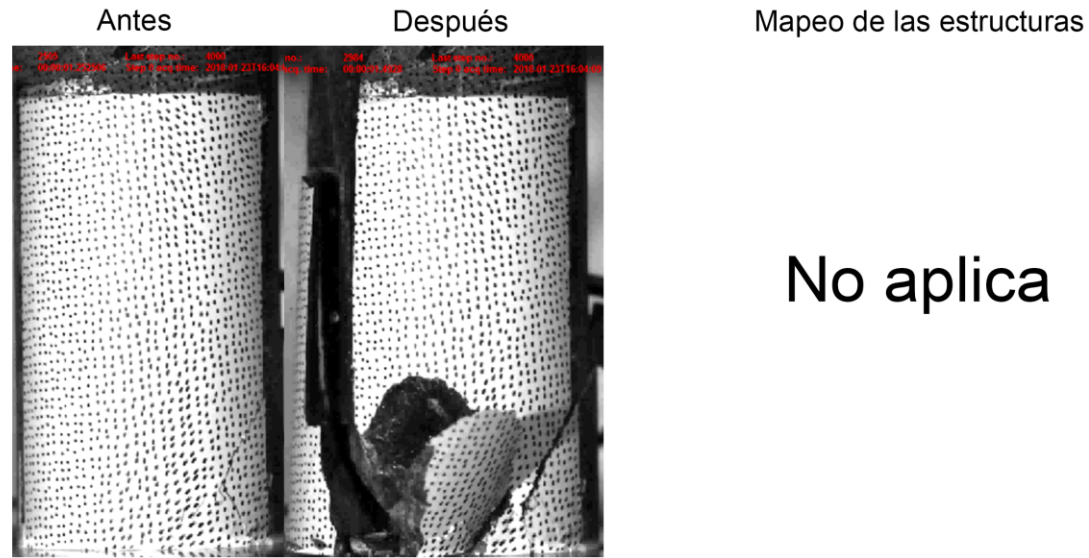
Gráfico Stress-deformación



# Probeta Chica 2

Grabación	Propiedades físicas	
FPS: 2000 Duración [s]: 2 1° fractura: Mixta	Litología: CMET Altura: 12,8 cm Diámetro: 6,3 cm Resistencia peak [MPa]: 64	Young (E) [GPa] SG: 281,8 Young (E) [GPa] LVDT: - Poisson (ν) SG: 0,35 Poisson (ν) LVDT: -

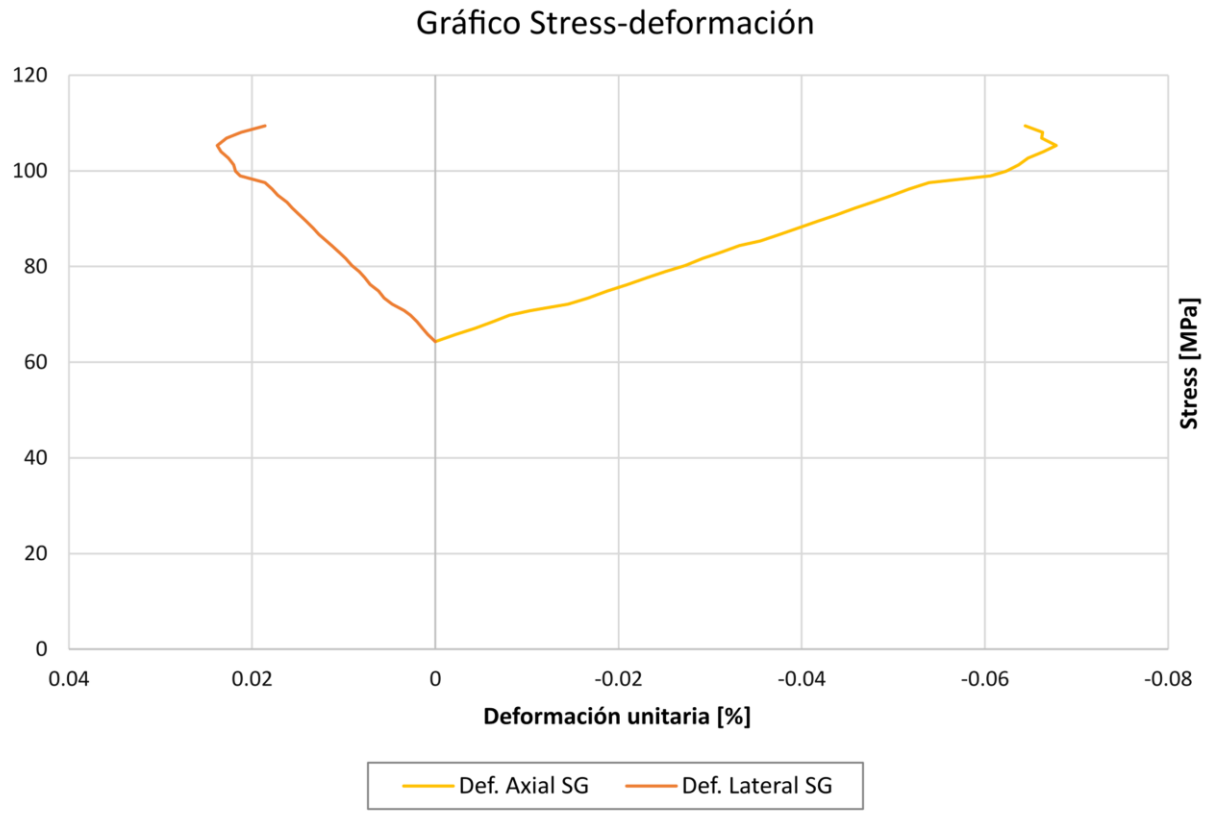
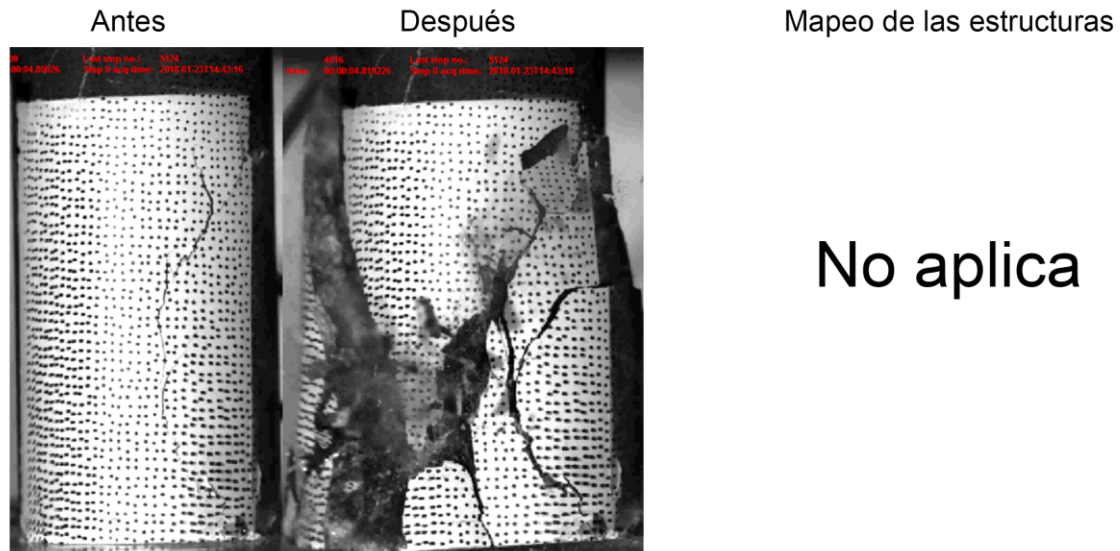
\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer



# Probeta Chica 3

Grabación	Propiedades físicas	
FPS: 833 Duración [s]: 5 1° fractura: Vetilla	Litología: CMET Altura: 12,9 cm Diámetro: 6,3 cm Resistencia peak [MPa]: 109,4	Young (E) [GPa] SG: 78,9 Young (E) [GPa] LVDT: - Poisson (ν) SG: 0,29 Poisson (ν) LVDT: -

\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer



# Probeta Chica 5

## Grabación

FPS: 294  
Duración [s]: 53  
1° fractura: Mixta

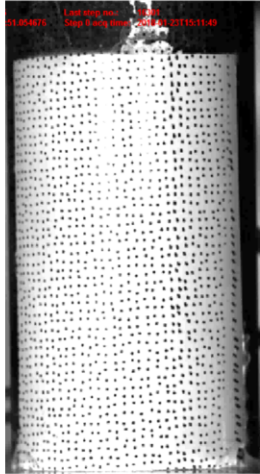
## Propiedades físicas

Litología: CMET  
Altura: 12,8 cm  
Diámetro: 6,3 cm  
Resistencia peak [MPa]: 77

Young (E) [GPa] SG: -  
Young (E) [GPa] LVDT: -  
Poisson ( $\nu$ ) SG: -  
Poisson ( $\nu$ ) LVDT: -

*\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer*

Antes



Después



Mapeo de las estructuras

No aplica

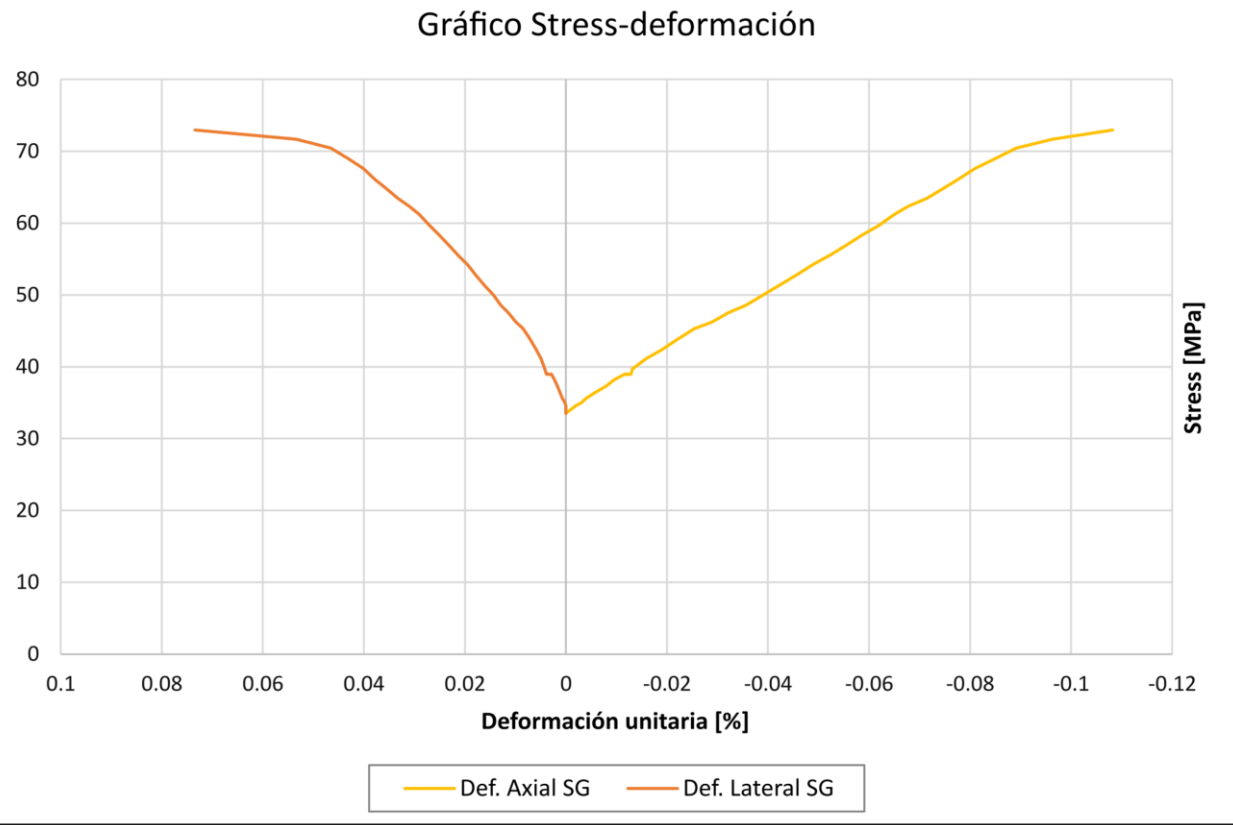
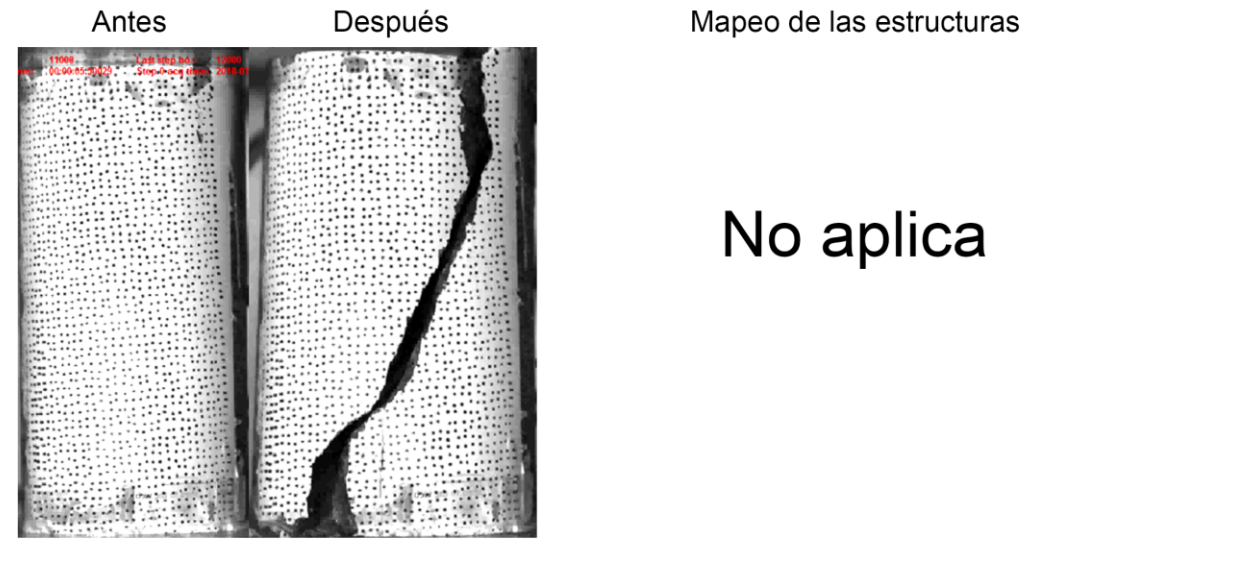
No se pudo obtener un gráfico



# Probeta Chica 6

Grabación	Propiedades físicas	
FPS: 2000 Duración [s]: 6 1° fractura: Matriz	Litología: CMET Altura: 12,9 cm Diámetro: 6,3 cm Resistencia peak [MPa]: 7	Young (E) [GPa] SG: 121,6 Young (E) [GPa] LVDT: - Poisson ( $\nu$ ) SG: - Poisson ( $\nu$ ) LVDT: -

\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer



# Probeta Chica 12

## Grabación

FPS: 4400  
Duración [s]: 1,5  
1° fractura: -

## Propiedades físicas

Litología: CMET  
Altura: 12,7 cm  
Diámetro: 6,3 cm  
Resistencia peak [MPa]: 107,2

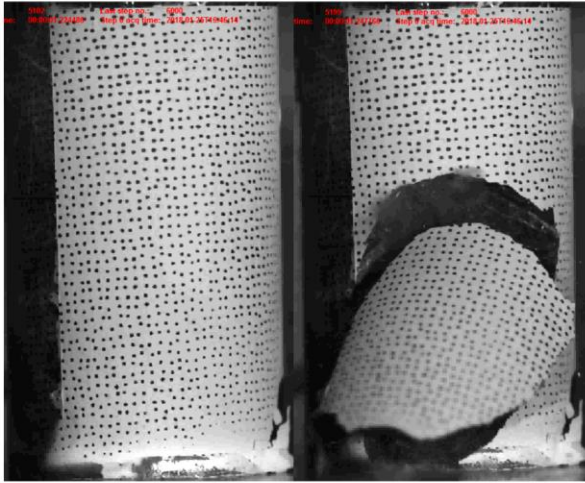
Young (E) [GPa] SG: 233,5  
Young (E) [GPa] LVDT: 43,4  
Poisson ( $\nu$ ) SG: -  
Poisson ( $\nu$ ) LVDT: -

*\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer*

Antes

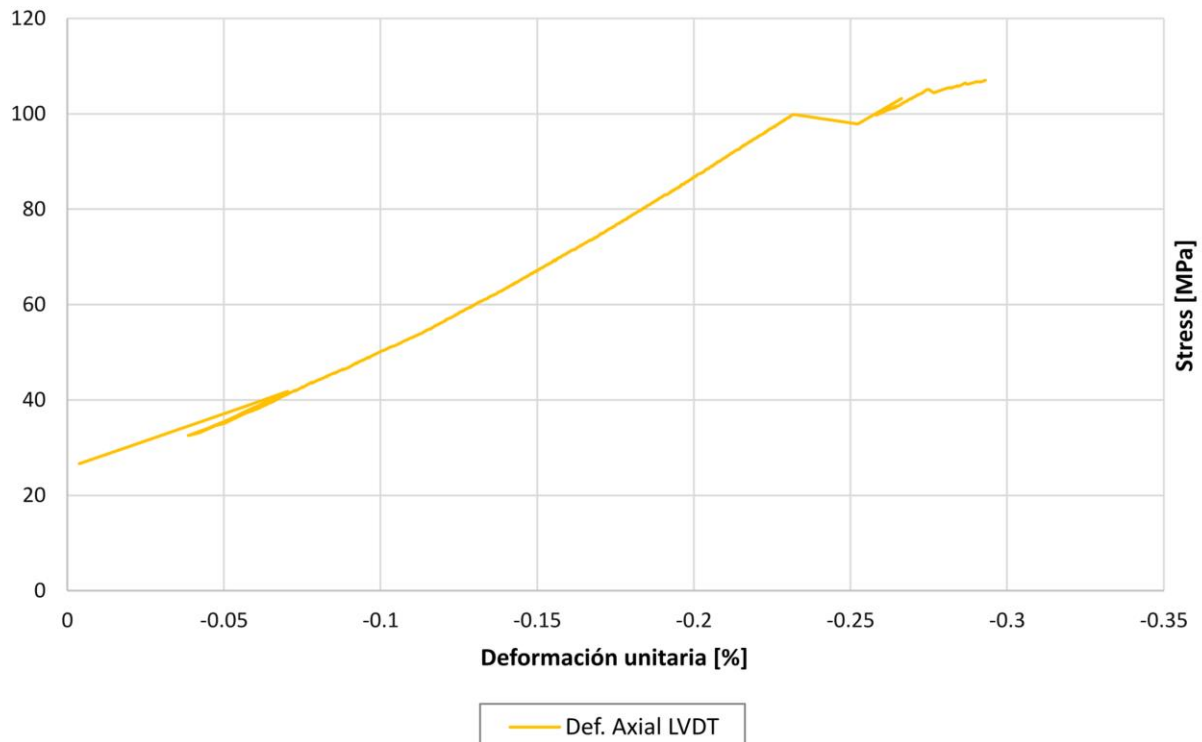
Después

Mapeo de las estructuras



No aplica

Gráfico Stress-deformación



# Probeta Chica 14

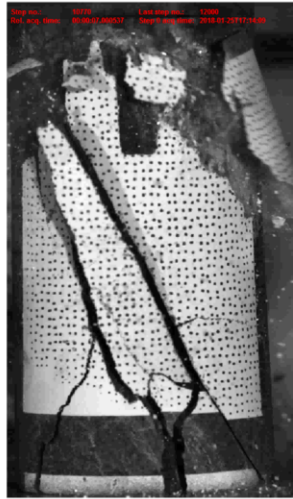
Grabación	Propiedades físicas	
FPS: 1500 Duración [s]: 8 1° fractura: Mixto	Litología: CMET Altura: 12,8 cm Diámetro: 6,3 cm Resistencia peak [MPa]: 126,1	Young (E) [GPa] SG: - Young (E) [GPa] LVDT: 48,5 Poisson (ν) SG: - Poisson (ν) LVDT: -

\*SG se usa como indicación de medición con strain gauge. LVDT es una abreviación para Linear variable differential transformer

Antes

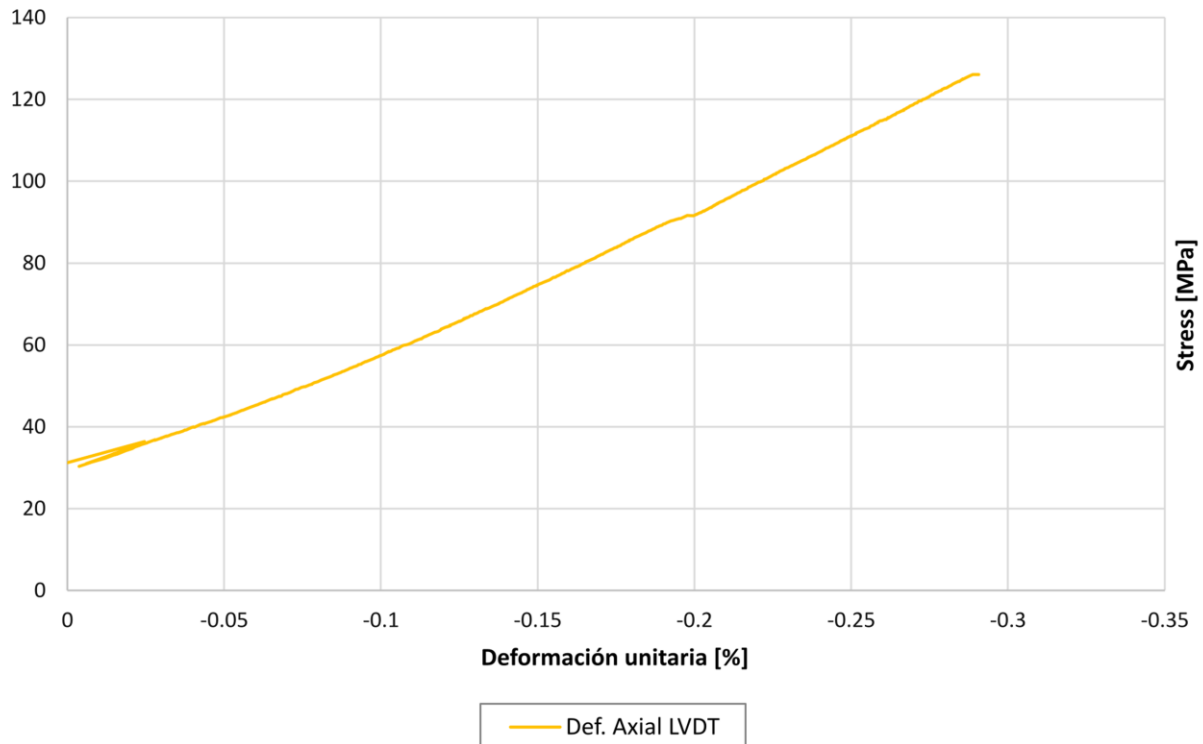
Después

Mapeo de las estructuras



No aplica

Gráfico Stress-deformación



## Sección B

N°	Probeta	Duración [s]	FPS	Litología	DIC aplicable?	Resistencia [MPa]	Altura [mm]	Diámetro [mm]	Tasa de compresión [kN/min]
1	Chica n°1	30	400	CMET	Si	155.3	126.7	63.2	21.4
2	Chica n°3	5	833	CMET	Si	109.4	129.5	63.3	85.7
3	Chica n°5	53	294	CMET	Si	77	127.5	63.1	85.7
4	Chica n°2	2	2000	CMET	Si	64	127.8	63.1	85.7
5	Chica n°6	6	2000	CMET	Si	73	128.5	62.6	85.7
6	Grande DV4	150	100	Dacita	Si	92.6	300.8	142.69	200
7	Grande DV5	55	500	CMET	No	96	317.6	143.03	150
8	<b>Grande CX 11</b>	<b>220</b>	<b>62.5</b>	<b>Dacita</b>	<b>Si</b>	<b>118</b>	<b>318</b>	<b>142.81</b>	<b>214.3</b>
9	<b>Grande CX 4</b>	<b>241</b>	<b>62.5</b>	<b>CMET</b>	<b>Si</b>	<b>82.1</b>	<b>319.5</b>	<b>142.86</b>	<b>150</b>
10	<b>Grande CX 12</b>	<b>6</b>	<b>1500</b>	<b>Dacita</b>	<b>Si</b>	<b>94.1</b>	<b>317.5</b>	<b>142.36</b>	<b>214.3</b>
11	<b>Grande CX 2</b>	<b>7.3</b>	<b>1500</b>	<b>CMET</b>	<b>Si</b>	<b>67.7</b>	<b>319.5</b>	<b>142.86</b>	<b>150</b>
12	Grande DV6	23	1000	CMET	Si	96.5	317.9	142.6	214.0
13	Grande DV7	6	1000	CMET	Si	34	297.5	142.02	150.0
14	Chica n°12	1.5	4400	CMET	No	107.2	127.4	63.3	86.0
15	Chica n°14	8	1500	CMET	No	126.1	128.2	63.1	86.0

Muestra CX11, Dacita			Espesor (mm)				Mineralogía							Comentarios
Id	Ángulo	JRC	Max	Min	Tip	Qz	Anh	Bt	Cpy	Bo	Mo	Cv-Calc		
1	60	4	1.1	0.1	0.7	80		20					Relleno parcial	
2	28	3	9	2	4	98				2				
3	21	5	1.2	0.2	0.5	98			2					
4	47	7	1.2	0.3	0.8	90		10					Sistema de vetillas	
5	65	8	0.3	0.1	0.2	95		5						
6	45	2	1	0.1	0.3	95		5					Interrumpida	
7	80	7	1.2	0.1	0.3	100								
8	46	2	1.2	0.2	1	100								
9	70	8	2	0.5	1.2	75			5	20			Sist. de vetillas blandas	
10	84	5	1	0.1	0.2	80		20						
11	33	10	0.2	0.1	0.2	100							Discontinua	
12	50	11	3	0.1	1	100							Sistema de vetillas	
13	84	7	2.2	0.8	1	100							Interrumpida	
14	86	12	1	0.1	0.2	85		15						
15	62	3	0.5	0.1	0.2	98				2				
16	45	4	1	0.1	1	100							Interrumpida	
17	60	8	1.2	1	1	100								

## Sección C

Muestra CX4, CMET			Espesor (mm)				Mineralogía								Comentario
Id	Ángulo	JRC	Max	Min	Tip	Qz	Anh	Bt	Cpy	Bo	Mo	Cv-Calc	Comentario		
1	75	5	7	3	4	10	30	50	5	5					
2	56	4	2	0.7	1	30	70		2						
3	47	10	6	0.5	3	20	10		<1	70					
4	19	11	1.2	0.3	0.8	80	20								
5	50	5	1.5	0.2	1	30	70		1	1			Sistema de vetillas		
6	16	11	7	1	3	55	35		5	5					
7	85	12	3	0.1	2	85	15								
8	72	9	2	0.2	0.8	95	5		2				Interrumpida		
9	54	16	1.5	0.5	1.2	45	45		10						
10	90	7	2	0.7	1	75	20		3	3					
11	35	5	1.2	0.1	0.8	70	30								
12	65	6	1.2	0.2	0.8	70	20		10						
13	86	10	1	0.2	0.3	90	5		5				Sistema de vetillas		
14	65	5	3	0.3	2	27	60		10	3					
15	58	3	1.2	0.2	0.7	90	5		5						
16	87	9	0.7	0.2	0.5		95		5				Halo muy desarrollado		
17	84	3	2	0.2	1	45	50		5						
18	78	10	1.2	0.1	1	15	70		10	5					
19	68	9	4	2	3	40	25		30	5					

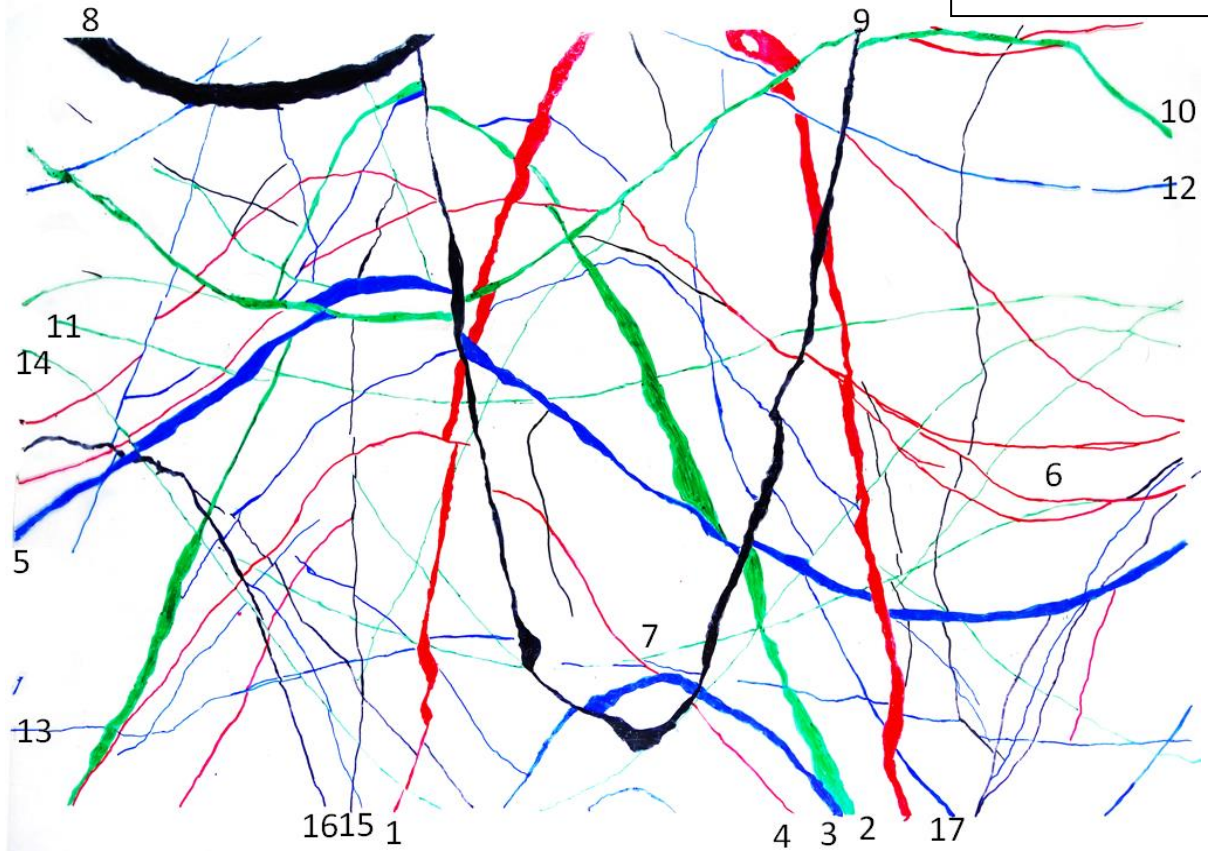
Muestra CX12, Dacita			Espesor (mm)				Mineralogía										Comentarios
Id	Ángulo	JRC	Max	Min	Tip	Qz	Anh	Bt	Cpy	Bo	Mo	Cv-Calc	Chl				
1	55	5	1.3	0.8	1	88			2	1		10					
2	25	2	1.2	1	1	100											
3	40	5	1.1	0.7	1	95				5							
4	21	2	1.2	0.5	1	90					10						
5	50	4	1.1	0.5	1	100											
6	62	8	2	0.5	1.5	100											
7	90	7	2	0.7	1.6	96		1	1	1			1		Relleno parcial		
8	88	9	1	0.2	0.8	95		5									
9	55	6	1	0.3	0.8	84				3	10	3			Relleno parcial		
10	52	4	0.8	0.1	0.5	90				10							
11	45	6	0.3	0.1	0.2	100		<1									
12	66	10	0.2	0.1	0.1	100											
13	88	9	0.6	0.2	0.5	100						1					
14	52	6	1	0.2	0.8	88				10	2						
15	75	12	0.8	0.3	0.5	100											
16	17	3	1	0.3	0.8	100						5					
17	63	2	1	0.5	0.9	95			<1	5		2					
18	64	3	1	0.5	0.8	97				3							
19	90	10	1	0.2	0.5	95											
20	82	6	2.2	0.5	1.7	98											
21	48	5	0.5	0.1	0.3	97				3							
22	36	4	0.3	0.1	0.2	100											
23	65	8	3	2.5	3	100											
24	90	15	2	0.1	0.2	100											
25	31	6	0.3	0.1	0.1	100											
26	25	4	1.3	0.5	0.9	100											
27	47	6	1.5	0.6	0.9	80	10			8			2		Relleno parcial		
28	50	4	1.1	0.5	0.7	85			2	5	3	5			Relleno parcial		
29	?	6				100											
30	80	?				99					1						

Muestra CX2, CMET			Espesor (mm)				Mineralogía							
Id	Ángulo	JRC	Max	Min	Tip	Qz	Anh	Bt	Cpy	Bo	Mo	Cv-Calc	Comentarios	
1	82	3	8	1	2	95	4							
2	72	6	12	2	3	20	45			35				
3	55	6	3.2	2	2.5		60	30		10				
4	50	10	1.1	0.8	1	70	25	5						
5	37	8	6	0.7	3.5	70	15	5		10				
6	50	9	1.9	0.2	1	90	10						Serie de vetillas	
7	20	5	1	0.7	1	50	50			5				
8	35	8	12	7	10	97		3						
9	77	3	2	0.7	1.7	5	80			15				
10	43	10	3.5	0.8	1.8	80	15			5				
11	18	7	1.5	1	1	90	8			2				
12	37	2	2	1	1	40	60		<1					
13	11	18	1.1	0.5	0.8	100							Muy interrumpida	
14	52	8	1.2	0.1	0.3	100								
15	88	14	1	0.1	0.3	78	20			2				
16	75	8	1.1	0.4	0.8	50	50							
17	60	8	1	0.3	0.7	70	30							
18	No registrada en un principio por tener un espesor muy bajo													

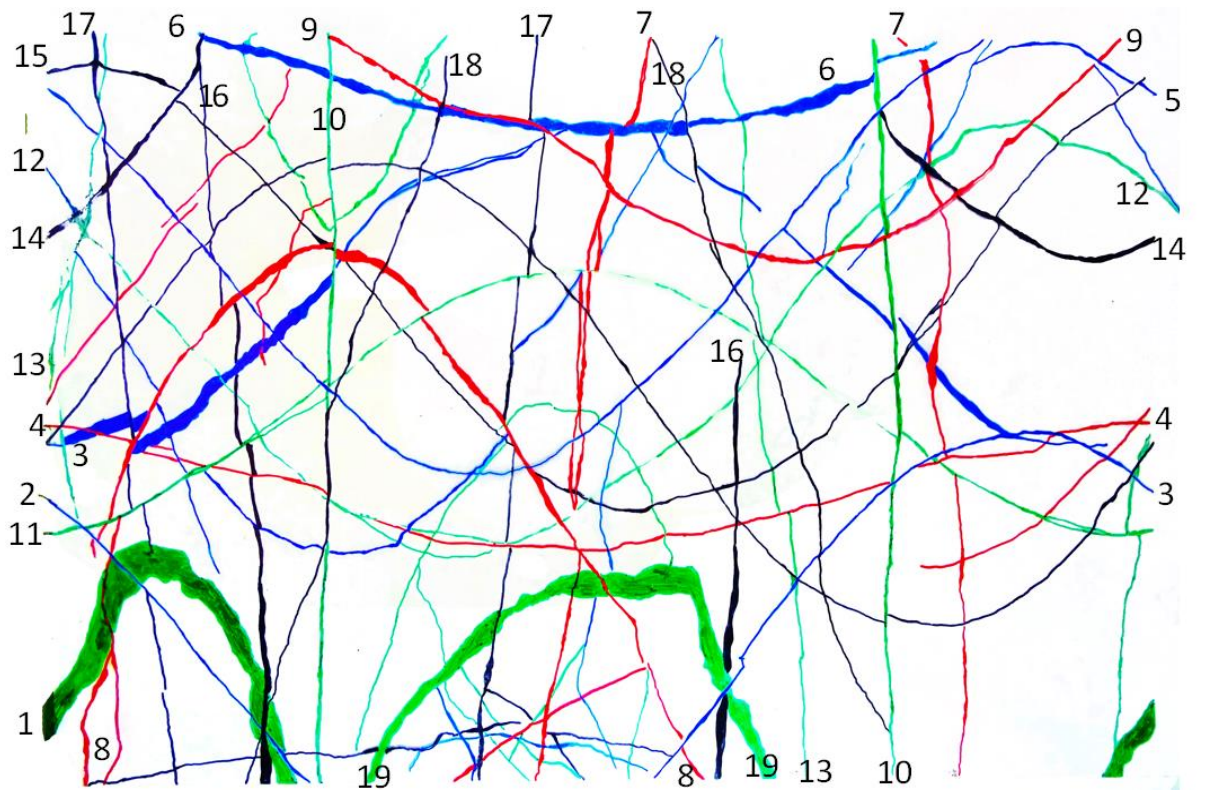


CX2

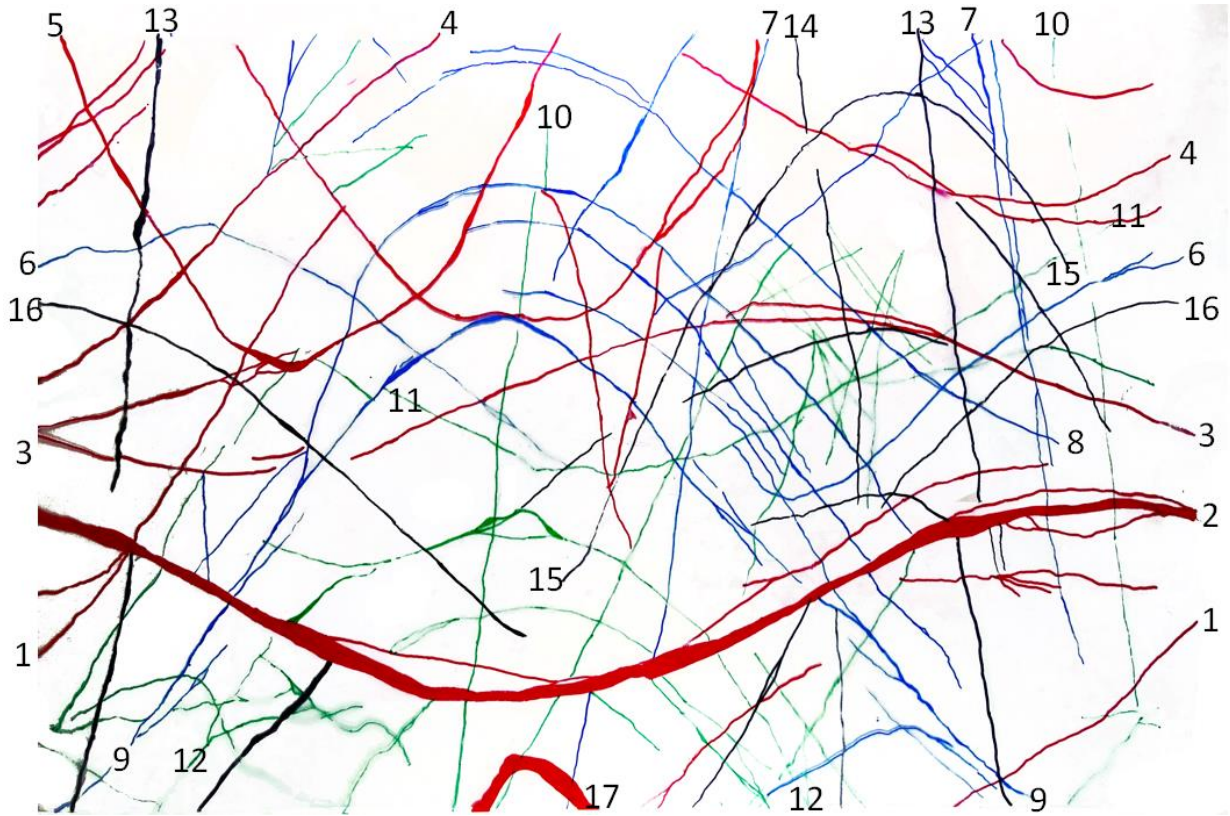
**Sección D**



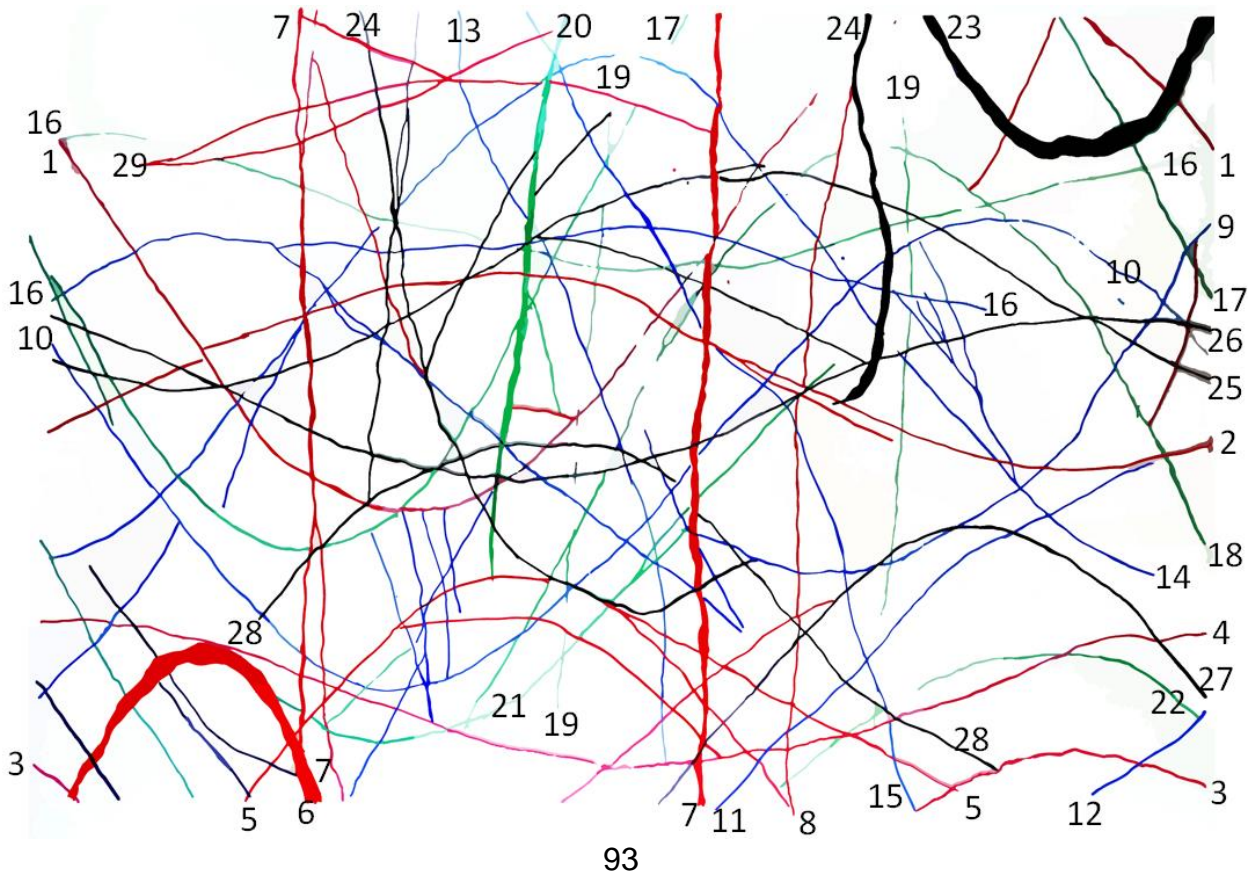
CX4



CX11



CX12



Muestra CX4	Medio	Ángulo	JRC	Espesor tipo (mm)		Halo		Otros	Mineralogía									
				Ángulo	JRC	Espe	Tip		Espe	Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn	Mo	Cov+Calco		
1° Fractura	Matriz	Alto																
2° Fractura	Matriz	Alto																
3° Fractura	Matriz	Alto																
	Vetilla 10	90	7	1	Bt	0.5												
	Vetilla 13	86	10	0.3														
	Vetilla 14	65	5	2	Bt	0.5												
	Vetilla 17	84	3	1	Bt	0.5												
	Vetilla 18	78	10	1	Bt	1												

Matriz presenta cantidades mínimas de bn y mo

Muestra CX2	Medio	Ángulo	JRC	Espesor tipo (mm)		Halo		Otros	Mineralogía										
				Ángulo	JRC	Espe	Tip		Espe	Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn	Mo	Cov+Calco			
1° Fractura	Matriz	Medio																	
	Vetilla 1	82	3	2															
	Vetilla 10	43	10	1.8	Bt-Ser	4													
2° Fractura	Matriz	Alto																	
3° Fractura	Vetilla 9	77	3	1.7	Bt-Chl-Ser	1.1													
4° Fractura	Matriz	Alto																	
	Vetilla 2	72	6	3															
	Vetilla 8	35	8	10															
	Vetilla 14	52	8	0.3															
	Vetilla 15	88	14	0.3	Bt	2													
	Vetilla x																		

No se registró esta vetilla por ser muy delgada, <0.2mm

Muestra CX11	Medio	Ángulo	JRC	Espesor tipo (mm)		Halo		Otros	Mineralogía								
				JRC	Ángulo	Tipo	Esesor (mm)		Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn	Mo	Cov+Calco		
1° Fractura	No se puede observar debido a que ocurre en la cara no visible de la probeta.																
2° Fractura	Matriz Vetilla 2 Vetilla 9	Alto 28 50-70	3 8	4 1.2	Ser Qz-Ser-Chl	0.5 7	Parcialmente rellena Sistema de vetillas	98 75						2 20			

Muestra CX12	Medio	Ángulo	JRC	Espesor tipo (mm)		Halo		Otros	Mineralogía									
				JRC	Ángulo	Tipo	Esesor (mm)		Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn	Mo	Cov+Calco			
1° Fractura	Matriz Vetilla 1	Alto 55	5	1	Chl-Qz-Ser	2.2		88				2	1				10	
2° Fractura	Matriz Vetillas	Medio 80		0.3				100									1	
3° Fractura	Vetilla 4	21	2	1				90									10	
4° Fractura	Matriz Vetilla 9 Vetilla 16 Vetilla 19 Vetilla 20 Vetilla 29	Variado 55 17 90 82 15	6 3 10 6 6	0.8 0.8 0.5 1.7	Chl-Ser-Qz Chl-Ser	1.5 1.5	90% relleno	84 100 95 98 100					3	10			3 5 2	

DV6	Medio	Ángulo	Otros	Mineralogía						
				Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn	Act	Py
1° Fractura	Matriz	54								
	Vetilla	15		90	8			2		
	Vetilla	74		68	10			2	20	
2° Fractura	Matriz	90								
3° Fractura	Matriz	Alto	Fragmentación importante							
	Vetilla	13		99				1		

DV7	Medio	Ángulo	Otros	Mineralogía						
				Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn	Act	Py
1° Fractura	Vetilla	60	Limpia, atraviesa toda la muestra	50	22		25			3
			Está en un sistema de vetillas							

Chica 1	Medio	Ángulo	Otros	Mineralogía						
				Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn	Act	Py
1° Fractura	Vetilla	79			65		15	5	15	
2° Fractura	Matriz	Alto								
	Vetilla	70			70		5		25	
3° Fractura	Vetilla	68			20	10	10	10	40	
	Vetilla	85			40	5	10		45	

Chica 2	Medio	Ángulo	Otros	Mineralogía						
				Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn	Act	Py
1° Fractura	Matriz	Alto								
	Vetilla	60			30	50	20			
2° Fractura	Matriz	Alto								
3° Fractura	Matriz	Alto								

Chica 3	Medio	Ángulo	Otros	Mineralogía						
				Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn	Act	Py
1° Fractura	Vetilla	65			80	5	15			
	Vetilla	75			89	10	1			
	Vetilla	70		12	75	10	3			
2° Fractura	Vetilla	68	Fuerte fragmentación en intersección	93	5	2				

Chica 5	Medio	Ángulo	Otros	Mineralogía						
				Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn	Act	Py
1° Fractura	Matriz	Medio	Atraviesa muchas vetillas blandas							
	Vetilla	75			20	20	10		50	
2° Fractura	Vetilla	75			15	15	15		50	5
	Vetilla	70			70	25	5			

Chica 6	Medio	Ángulo	Otros	Mineralogía						
				Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn	Act	Py
1° Fractura	Matriz		Pocas vetillas blandas							

Chica 14	Medio	Ángulo	Otros	Mineralogía						
				Qz	Anh	Bt	Cpy	Bn	Act	Py
1° Fractura	Matriz	Medio	Alta densidad de vetillas blandas							
	Vetilla	61			90	6	4			
2° Fractura	Matriz	Alto	Baja densidad de vetillas							
3° Fractura	Vetilla	60			95		5			

## Descripciones extra de la secuencia de fracturamiento

Muestra CX2

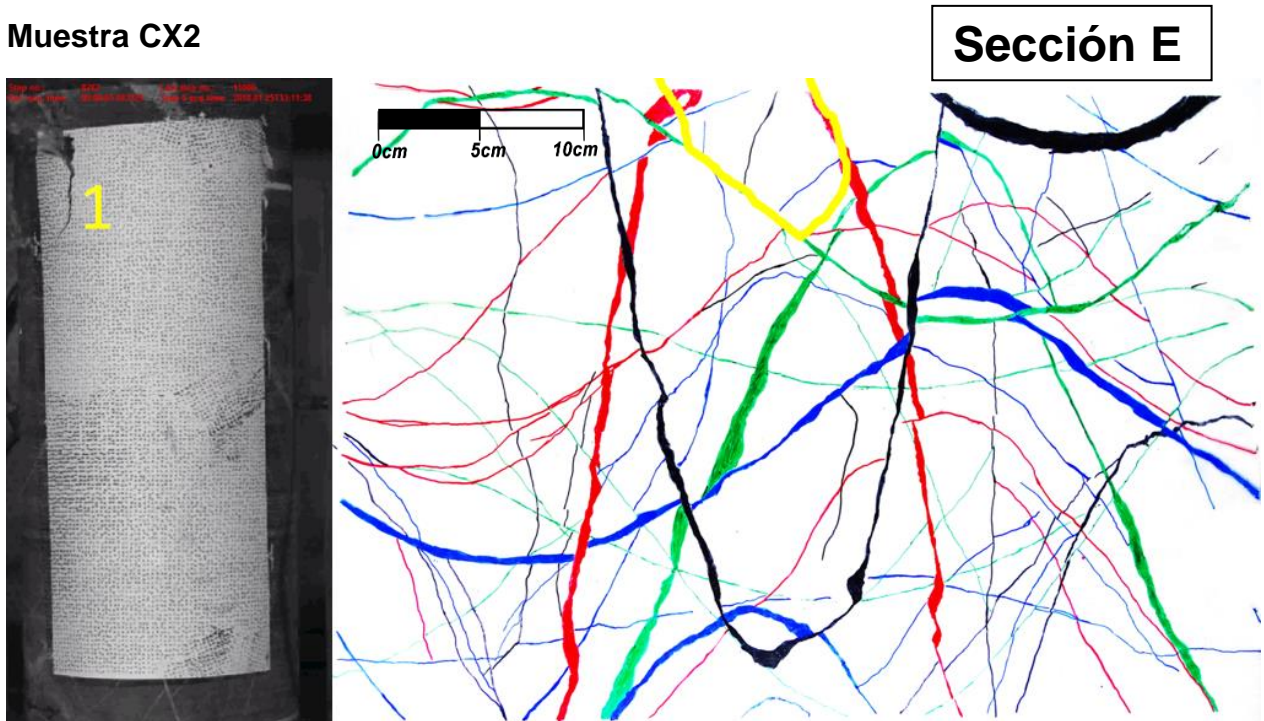


Figura 55: Primera fractura y su traza marcada en amarillo.

**Primera fractura:** pasa por 2 vetillas, la roja y verde marcadas en la imagen, produciendo una cuña de alto ángulo. La cara interior que queda expuesta no es de una vetilla, sin embargo, presenta algo de mineralogía de anh + bn. Produce debilidad en esta zona de la probeta.



Figura 56: cara interior con fragmentos unidos y separados, mostrando matriz.

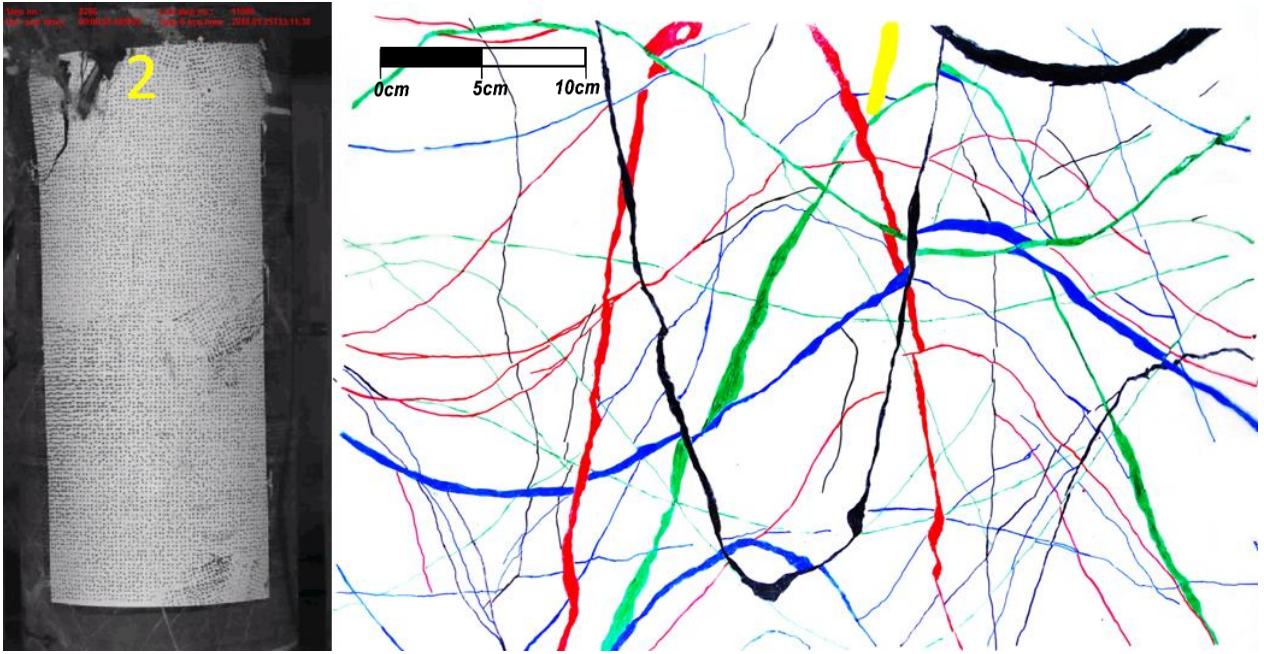


Figura 57: Segunda fractura y su traza marcada en amarillo.

**Segunda fractura:** ocurre muy cerca de la primera, en la misma zona, sin aprovechar ninguna estructura. La fractura produce alta fragmentación, por lo que no se pueden recuperar muchos pedazos de la roca.

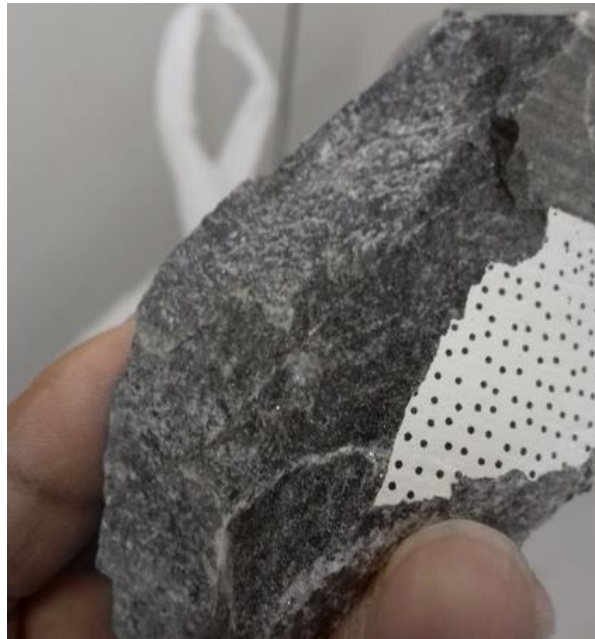


Figura 58: No se observa mineralogía en la cara expuesta.



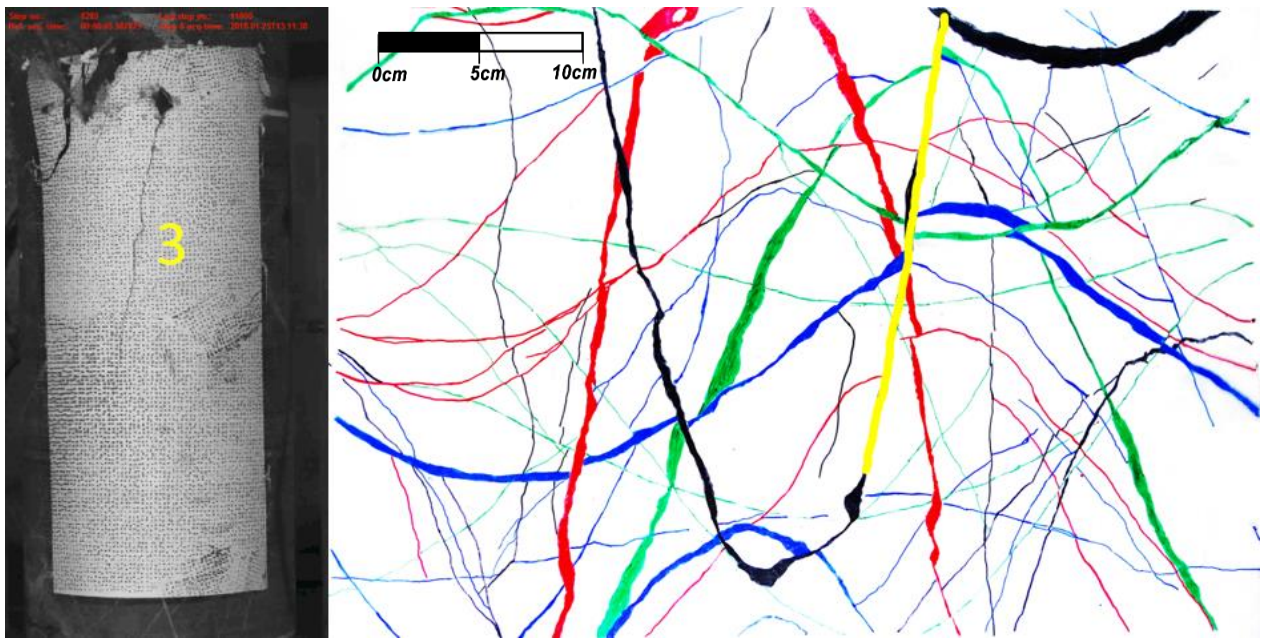


Figura 59: Tercera fractura y su traza marcada en amarillo.

**Tercera fractura:** sigue el camino de una vetilla de gran espesor. El fracturamiento es esperable, debido a que el proceso de falla en total parece inclinarse a este lado de la muestra, además, es una vetilla con alta proporción de minerales blandos, como bornita.

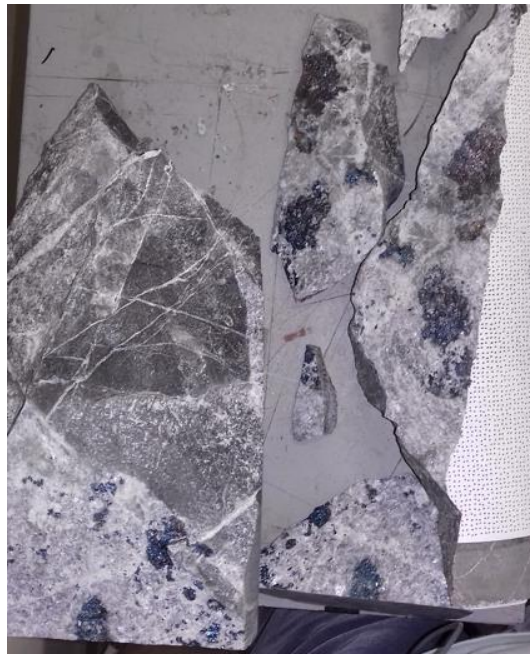


Figura 60: Vetilla mencionada, con gran proporción de bornita.



Figura 61: Cuarta fractura y su traza marcada en amarillo.

**Cuarta fractura:** pasa por la estructura de mayor espesor y, además, desde arriba hacia abajo, cruzando varias vetillas y matriz sin seguir alguna en específico. La zona presenta una alta densidad de estructuras, razón probable de la propagación por esta área. Cuando llega a la vetilla azul ancha, la fractura comienza a seguir el camino de 2 estructuras, una verde casi vertical, y luego una azul vertical. Las estructuras por las que cruzó son de qz, anh y bn principalmente. La estructura verde y azul son de qz+bn, y anh+qz+bn respectivamente. Por último, termina sigue una estructura más, marcada en verde, de qz+bn+anh.



Figura 62: Marcado en rojo el camino el borde de la fractura. Se pueden ver caras mineralizadas principalmente con cuarzo y anhídrita.

## Muestra CX4

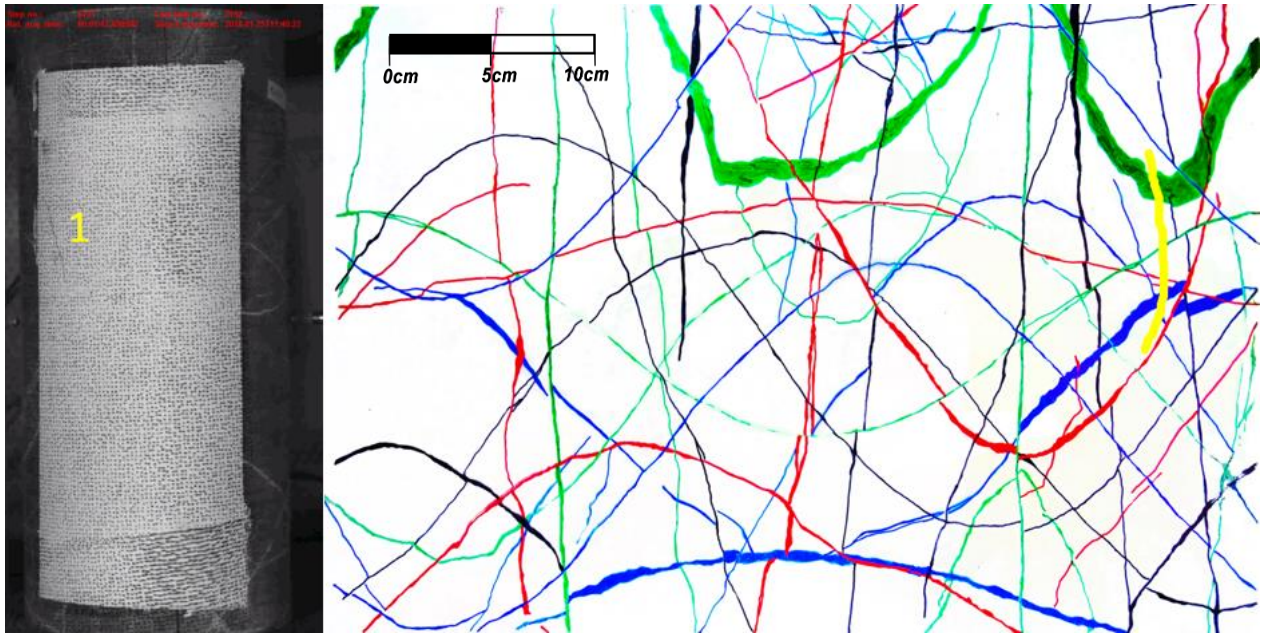


Figura 63: Primera fractura y su traza marcada en amarillo.

**Primera fractura:** a pesar de la gran cantidad de vetillas en la zona de fracturamiento, la falla ocurre en matriz, y no sigue el camino de ninguna de las debilidades.



Figura 64: Diferentes perspectivas de la fractura indicada.

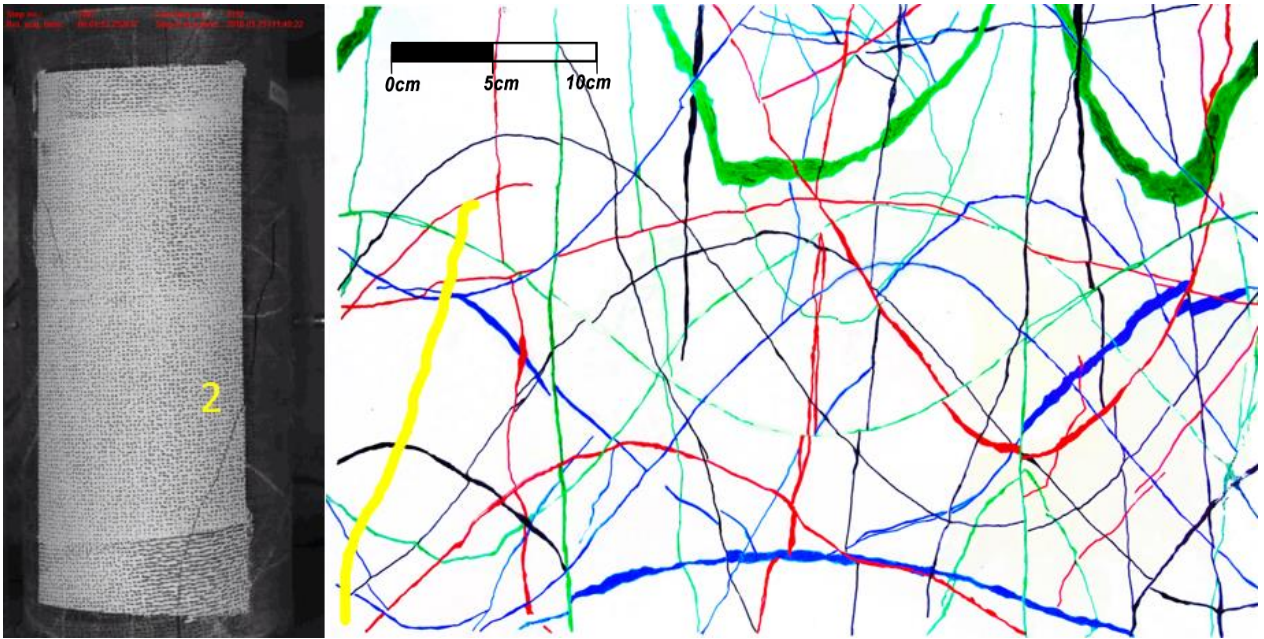


Figura 65: Segunda fractura con su traza marcada en amarillo.

**Segunda fractura:** comienza desde una vetilla roja arriba y avanza hacia abajo, pero no sigue ninguna debilidad, incluso, pasa por una zona de baja densidad de estructuras. Luego de una posterior inspección del fragmento, se puede ver que en la matriz hay bn y mo.



Figura 66: Fractura mencionada anteriormente, exponiendo matriz.

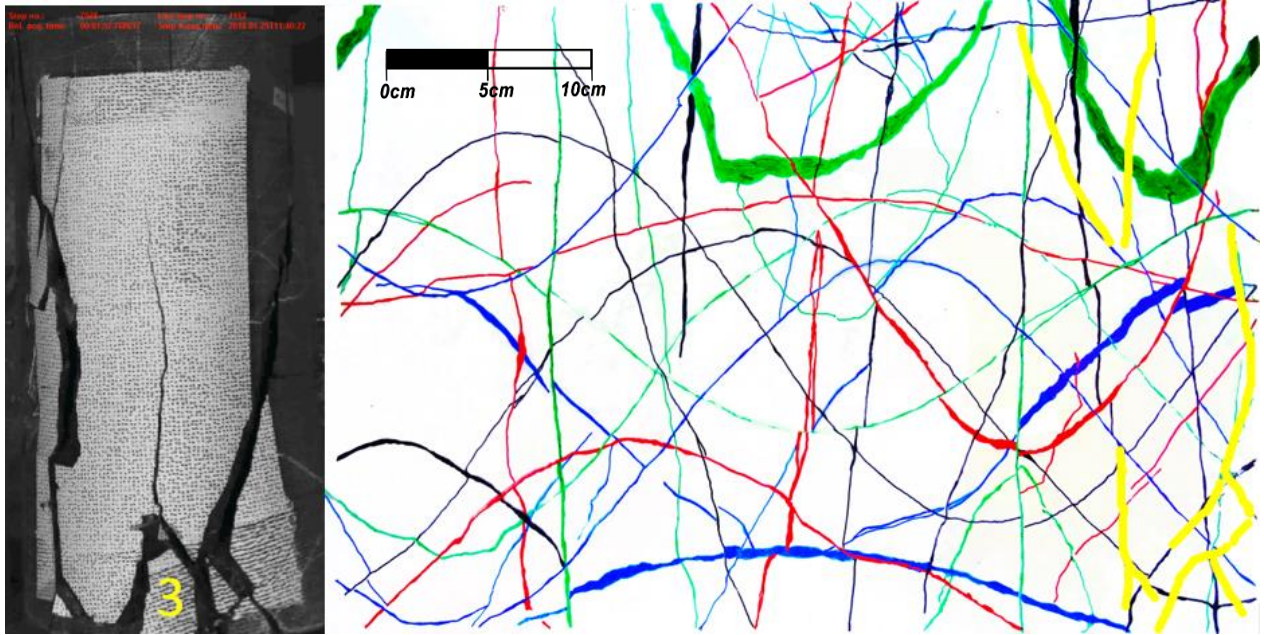


Figura 67: Tercera fractura y su traza marcada en amarillo.

**Tercera fractura:** debido a la baja cantidad de FPS en este ensayo, es difícil ver cómo fue gradualmente la propagación después. Se aprecia que la zona baja de la probeta se fragmentó en varias partes, desde abajo hacia arriba. Además, en la zona central aparece una grieta que sigue una estructura.

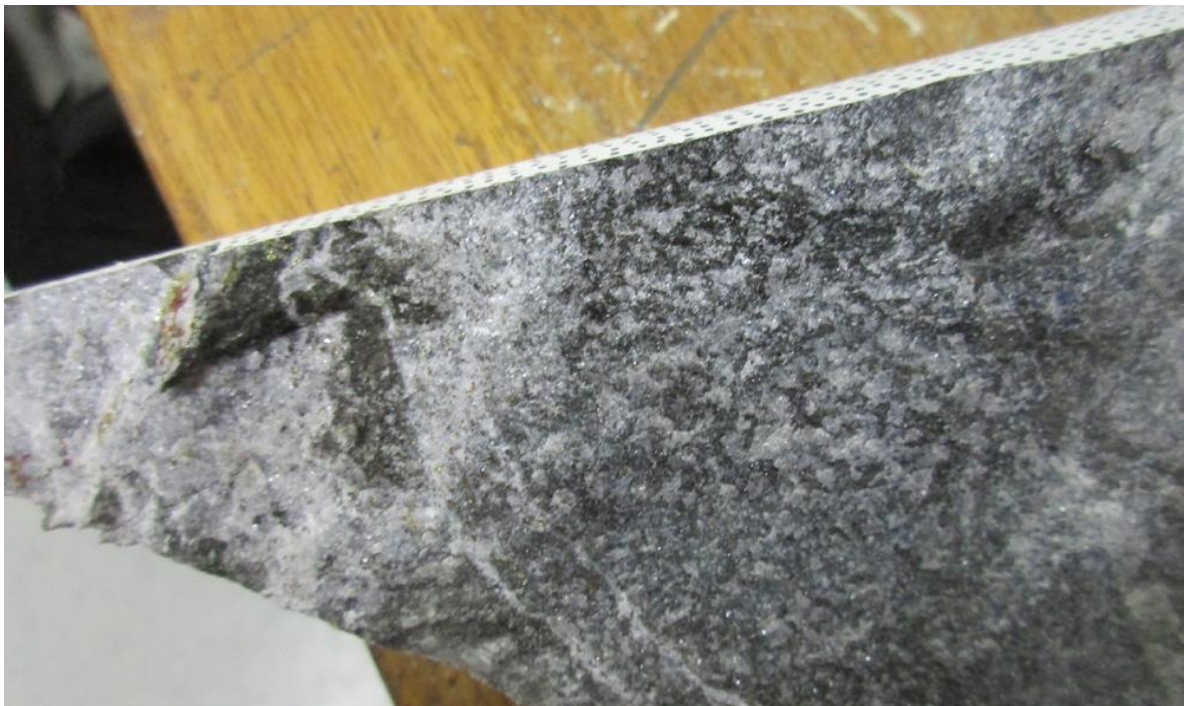
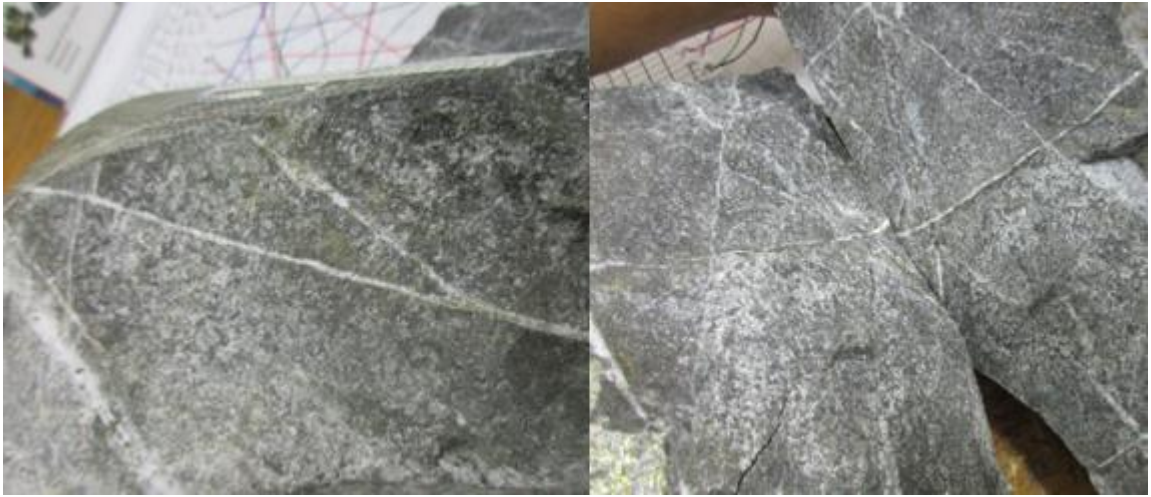


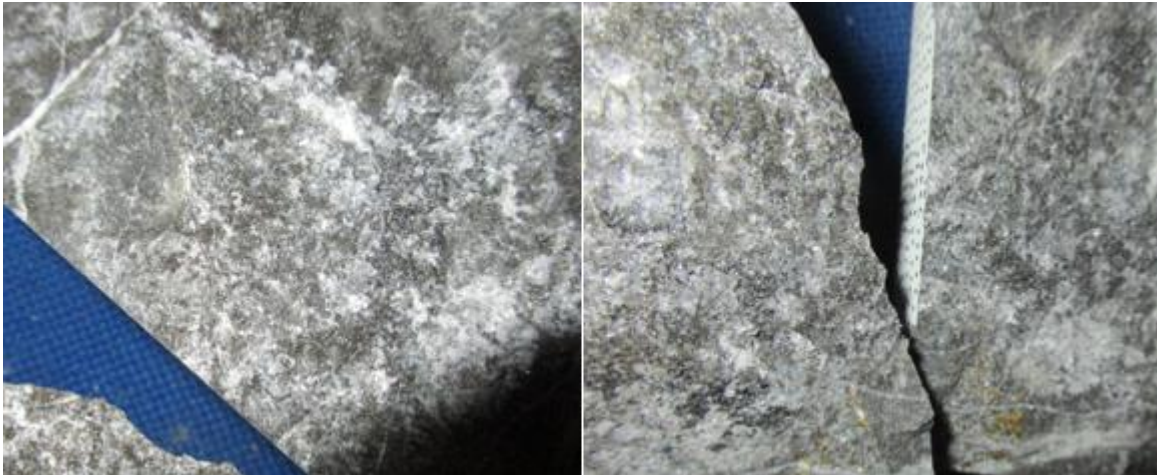
Figura 68: Estructura expuesta luego de la fractura central.

En la izquierda de la probeta se puede ver que desde la primera fractura se propagaron otras dos hacia el techo, las cuales no presentan relleno de ningún tipo.



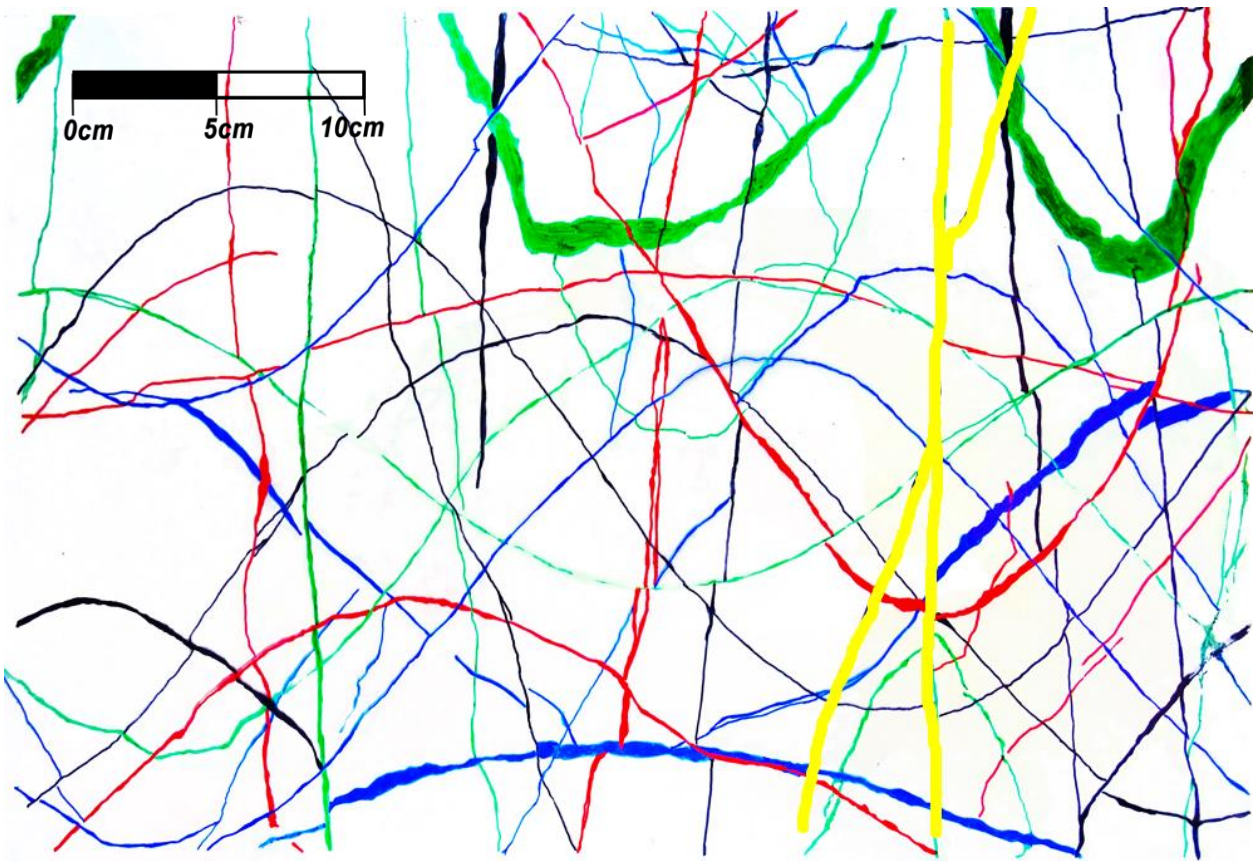
*Figura 69: Fracturas de matriz saliendo de la primera fractura.*

En el piso de la probeta, si pasaron por una debilidad parcialmente rellenada con  $bt+qz\pm anh$ . Estas vetillas son la 17 y la 14.



*Figura 70: Vetillas 14 y 17 respectivamente.*

Al recuperar los pedazos rotos, se observa que el fracturamiento ocurrió también por estructuras con gran cantidad de minerales blandos, como  $anh+cpy+bn$  (vetilla 18) y  $anh+qz\pm cpy\pm bn$  (vetilla 10). Estas fracturas no aparecen en el video pues se propagan dentro de la probeta y por la cara trasera. Además, no se tiene certeza si fue al mismo tiempo que la tercera, o posterior.



*Figura 71: Fotos mostrando las últimas fracturas internas en vetillas con minerales blandos.*

## Muestra CX11

**Primera fractura:** La primera fractura no se puede observar, debido a que ocurren en la cara del probetón que no es visible. Se sabe que ocurren pues se ven fragmentos disparados desde detrás de la grabación.

Debido a la baja cantidad de FPS, no se puede ver la evolución lenta de las fracturas. Por lo tanto, pareciera que todas se produjeron al mismo tiempo.

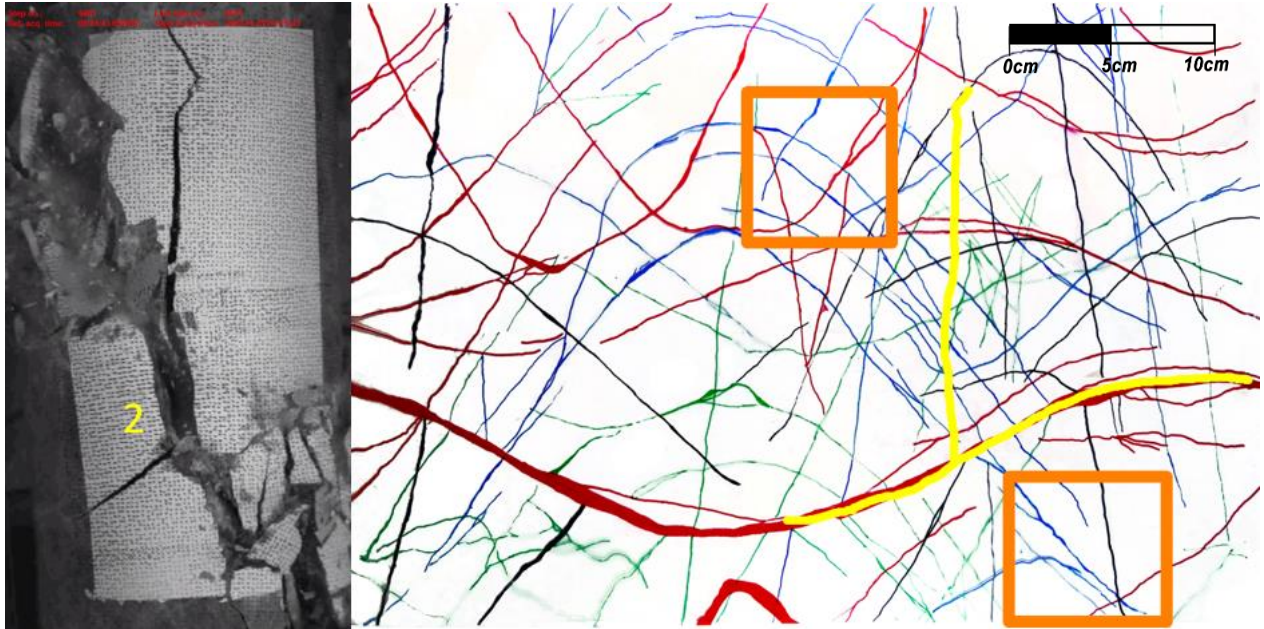


Figura 72: Segunda fractura y su traza marcada en amarillo.

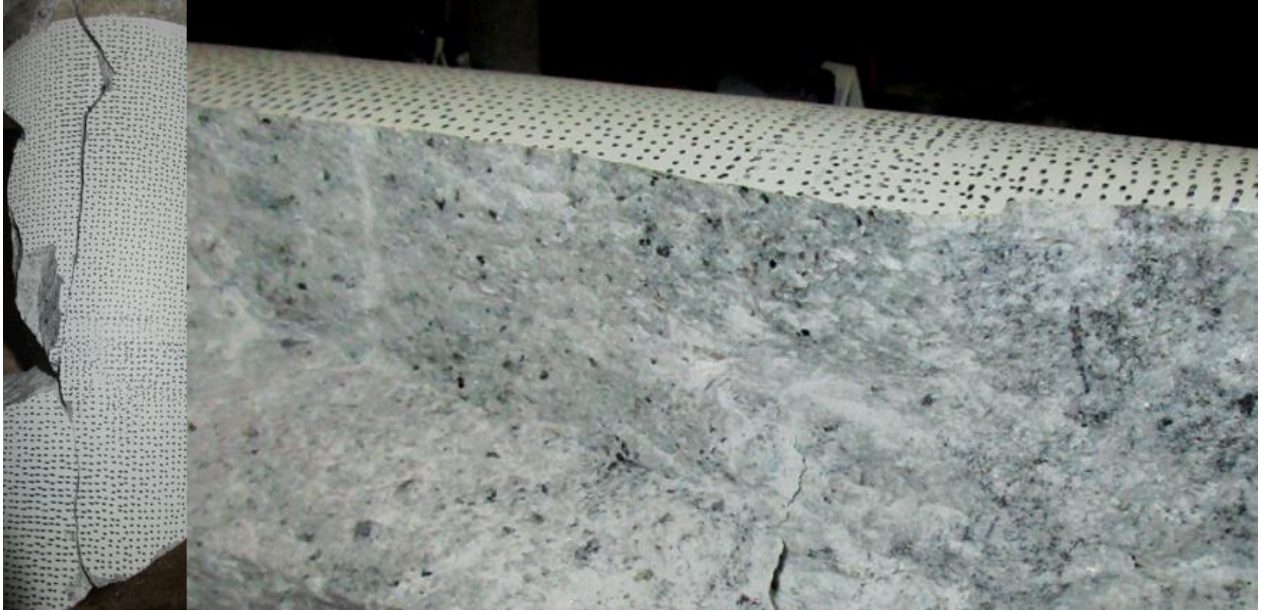
**Segunda fractura:** Ocurre en 3 partes principalmente. La más notoria es la fractura limpia que se produce en la vetilla roja ancha. Esta vetilla (vetilla 2) no estaba totalmente rellena y tenía un gran espesor, por lo que se intuía que podía romperse por aquí. Sin embargo, lo más interesante fue que la fractura siguió perfectamente el camino de la estructura. Esta vetilla estaba compuesta casi totalmente por cuarzo.



Figura 73: Vetilla con fractura limpia.



Otra fractura se propagó verticalmente hasta el techo de la probeta. Esta no siguió el camino de alguna debilidad, pero si modificó su trayectoria cuando se encontró con una debilidad (vetilla 15), propagándose por esta temporalmente, para luego seguir subiendo por matriz. Como no pasa por una debilidad, se ve básicamente matriz pasando por algunas estructuras rellenas de qz y algo de bn y/o mo.



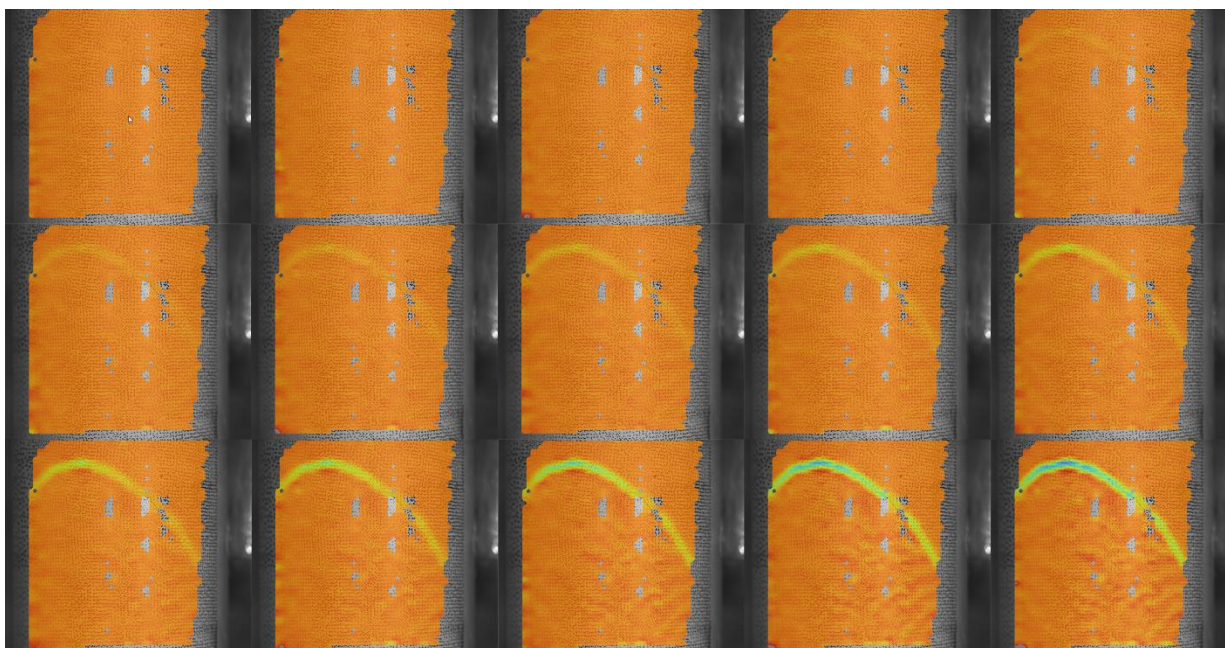
*Figura 74: Fractura vertical.*

La otra parte de la fractura fue una violenta fragmentación en esquinas opuestas de la probeta. Se piensa que estas zonas se fragmentaron mucho porque tenían una gran densidad de vetillas, muchas de estas tenían la misma orientación (las azules en la imagen son solo algunas) y pertenecían a un sistema de vetillas, lo cual las hacía áreas débiles. Reconstruir la probeta con cada fragmento es casi imposible, pero una revisión de los recuperados muestra fracturas mixtas entre matriz y estructuras.

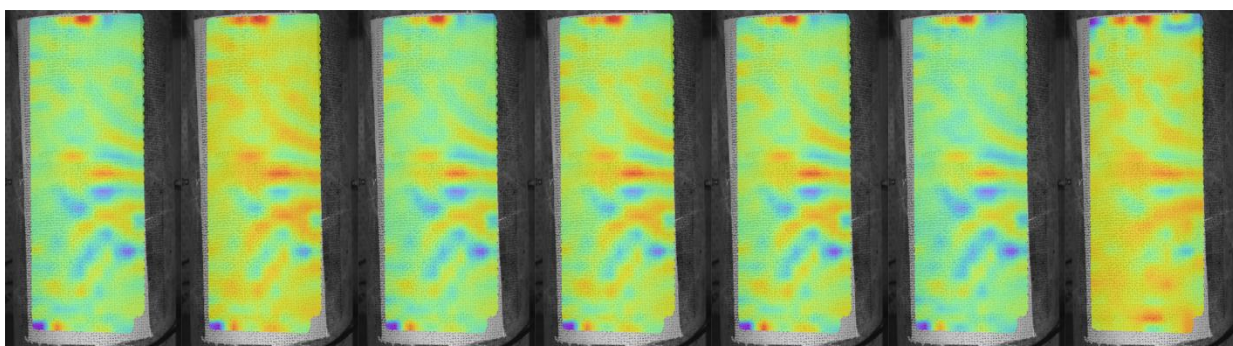
# Representación visual de la deformación.

Probeta DV7

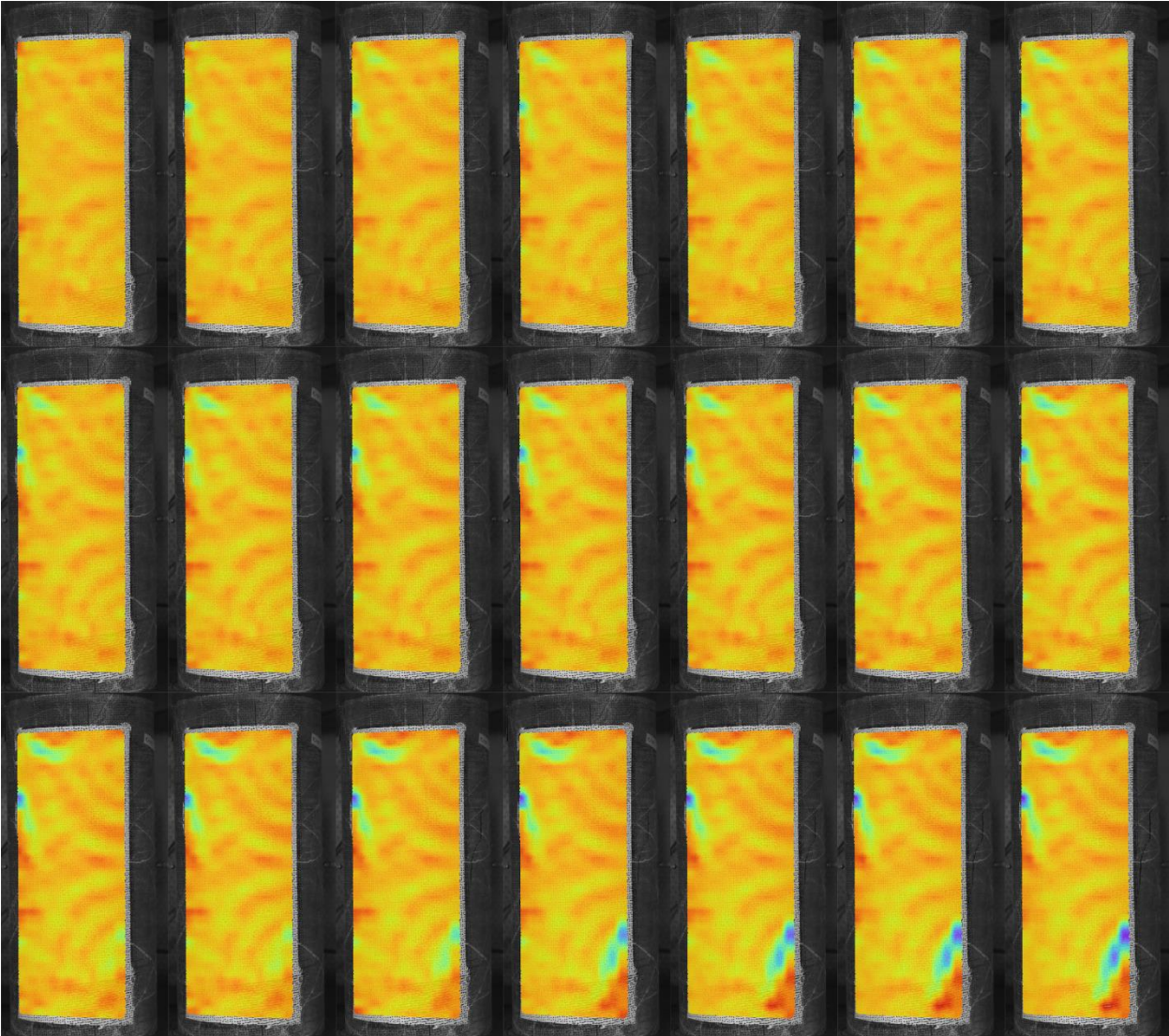
**Sección F**



Probeta CX11



Probeta CX4



Probeta CX12



Probeta CX2

