



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

HABILITACIÓN DE UN MARCO DE CARGA BIAXIAL PARA EL ENSAYO DE MATERIALES ANÁLOGOS A ROCAS

TOMÁS EMILIO FELIPE HIDALGO AVILA

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
ESTEBAN PATRICIO SÁEZ ROBERT
JOHN BROWNING

Santiago de Chile, Agosto de 2021

© 2021, TOMÁS EMILIO FELIPE HIDALGO AVILA



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

HABILITACIÓN DE UN MARCO DE CARGA BIAXIAL PARA EL ENSAYO DE MATERIALES ANÁLOGOS A ROCAS

TOMÁS EMILIO FELIPE HIDALGO AVILA

Miembros del Comité:

ESTEBAN PATRICIO SÁEZ ROBERT

JOHN BROWNING

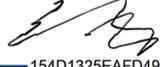
EDUARDO CÓRDOVA VERGARA

LUIS FELIPE ORELLANA ESPINOZA

GONZALO CORTÁZAR SANZ

Tesis para optar al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería

DocuSigned by:

154D1325EAFD493...

DocuSigned by:

7EC91FBB6124415...

DocuSigned by:

65B49BAB01294F2...

Santiago de Chile, Agosto de 2021

Buena Caza a todos y todas

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mis profesores supervisores, Esteban Sáez Robert y John Browning, que en conjunto pudimos llevar a cabo una tesis experimental de laboratorio en estos tiempos de pandemia. A Guillermo Poblete, que fue un gran compañero y tutor en laboratorio. A Miguel, Ricardo, Hugo, Dani y Jairo que me ayudaron con materiales, probetas y ensayos.

La repentina muerte de mi padre a comienzos de abril del 2020 generó una gran caída en mí, con él solía conversar de mi tesis dado sus conocimientos en el tema. Pasé por meses en que simplemente no tenía motivación; en cuarentena, sin laboratorio, sin avances, realmente estancado. Es ahí donde tengo que agradecer principalmente a mi polola, que estuvo incondicionalmente en mis peores momentos. A mi mamá y hermanos, que me motivaron a seguir; y a mis amigos y amigas, donde pude encontrar la desconexión y alegría que tanto necesité.

Espero ser un aporte en la cadena de la investigación sobre este marco biaxial, creado hace ya 15 años por el profesor Michel Van Sint Jan y Fernando García. Confío en que más estudiantes se sumen a esta cadena hasta perfeccionar este gran y entretenido equipo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVOS	5
3. ANTECEDENTES Y REVISIÓN BILIOGRÁFICA	6
3.1. Resistencia de macizos rocosos	6
3.1.1. Criterio de Mohr-Coulomb	6
3.1.2. Criterio de rotura Hoek y Brown	8
3.2. Materiales modelos de roca	9
3.3. Ensayos biaxiales	12
3.4. Propagaciones de fracturas en ensayos biaxiales	14
3.5. Alcance de investigación	20
4. MATERIALES Y MÉTODOS	22
4.1. Protocolos de elaboración de probetas de material modelo	22
4.2. Diseño experimental	25
4.3. Análisis de resultados del material modelo	34
5. PREPARACIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y ENSAYO DE PROBETAS BIAXIALES	36
5.1. Características del marco biaxial	36
5.2. Elaboración de probetas	39

5.3.	Instrumentación	43
5.4.	Limitaciones y recomendaciones	46
5.5.	Montaje probeta en marco biaxial	47
5.6.	Ensayo efectuados	48
5.6.1.	Descripción Ensayo 1	50
5.6.2.	Descripción Ensayo 2	55
5.6.3.	Descripción Ensayo 3	57
5.6.4.	Descripción Ensayo 4	57
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
6.1.	Ensayo 1	58
6.1.1.	Resultados Ensayo 1 Fase de carga 1. Ensayo 1A	58
6.1.2.	Resultados Ensayo 1 Fase de carga 2. Ensayo 1B	62
6.1.3.	Discusión de resultados Ensayo 1	66
6.1.4.	Conclusiones Ensayo 1	67
6.2.	Ensayo 2	68
6.2.1.	Resultados Ensayo 2 Fase de carga 1. Ensayo 2A	69
6.2.2.	Resultados Ensayo 2 Fase de carga 2. Ensayo 2B	72
6.2.3.	Discusión de resultados Ensayo 2	76
6.2.4.	Conclusiones Ensayo 2	77
6.3.	Ensayo 3	78
6.3.1.	Resultados Ensayo 3	78
6.3.2.	Discusión de resultados Ensayo 3	82
6.3.3.	Correlación de imágenes Ensayo 3	84
6.3.4.	Conclusiones Ensayo 3	90
6.4.	Ensayo 4	90
6.4.1.	Resultados Ensayo 4	91
6.4.2.	Discusión de resultados Ensayo 4	95
6.4.3.	Correlación de imágenes Ensayo 4	98
6.4.4.	Conclusiones Ensayo 4	107

7. CONCLUSIONES	109
8. PERSPECTIVAS	111
REFERENCIAS	114
ANEXO	116
A. ANEXO A	117
B. ANEXO B	118

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Diagrama idealizado que muestra la transición desde una condición de roca intacta a la de un macizo rocoso muy fracturado, en la medida que aumenta el tamaño de la muestra considerada.	3
3.1	Envolvente de falla de Mohr-Coulomb	7
3.2	Envolvente de falla de Hoek y Brown genérica	9
3.3	Comparación de granulometrías de arenas usadas (Zegpi, 2017 y presente investigación)	12
3.4	Recta teórica de Mohr-Coulomb vs puntos reales, según gráfico de Cording & Jamil (1994). Extraído de García, (2005)	13
3.5	Probetas construidas por bloques. (García, 2005)	15
3.6	Malla generadora de discontinuidad cuando el yeso está en proceso de curado. Zegpi (2014)	16
3.7	Proceso de preparación de probetas con fracturas. (a) Molde de probetas. (b) Creación de fracturas. (c) Proceso de curado. (d) Resultado final de probetas. (Liu et al., 2016)	17
3.8	Propagación de fractura simple. (a) $\sigma_1=2.45$ MPa. (b) $\sigma_1=2.87$ MPa. (c) $\sigma_1=3.33$ MPa. (d) Falla. (Liu et al., 2016)	18
3.9	Propagación de fractura simple para caso biaxial. (a) $\sigma_1=2.45$ MPa. (b) $\sigma_1=2.87$ MPa. (c) $\sigma_1=3.33$ MPa. (d) Falla	19
3.10	Método empleado por Prudencio (2002) para introducir y guiar láminas que generan las fracturas	20
4.1	Probetas en diferentes bases del proceso de fraguado	24

4.2	Probetas rotas al desmoldarse	26
4.3	Ensayos UCS para material de arena y yeso con RP a 0,2 mm/min	27
4.4	Ensayos UCS para material de arena y yeso con RP a 1,0 mm/min	27
4.5	Ensayos UCS para material de yeso a 0,2 mm/min	28
4.6	Ensayos UCS para material de yeso a 1,0 mm/min	28
4.7	Ensayos UCS para material de yeso a 0,1 MPa/s	29
4.8	Ensayos UCS para material de yeso con RP a 1,0 mm/min	29
4.9	Ensayos UCS para material de yeso con RP a 1,0 MPa/s	30
4.10	Ensayos UCS para material de yeso colado a 1,0 mm/min	30
4.11	Ensayos UCS para material de yeso colado a 1,0 MPa/s	31
4.12	Equipo ultrasonido	32
5.1	Vista general marco biaxial con probeta en él	36
5.2	Esquema de cargas de confinamiento	38
5.3	Esquema de cargas desviador	39
5.4	Molde con probeta adentro	40
5.5	Carro habilitado para elevar probeta dentro del marco biaxial	42
5.6	Probeta en carro habilitado con molde interior	43
5.7	Vista en planta de probeta con elementos de instrumentación	44
5.8	Resumen de trayectorias de tensiones de ensayos realizados	50
5.9	Tipos de mangueras utilizadas	53
5.10	Pintura en probeta de hormigón	54

5.11	Vista en planta del ensayo 1	55
5.12	Vista en planta del ensayo 2	56
6.1	Ensayo 1. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 1. Presión en probeta eje \hat{x} . $\sigma_2=0.07$ MPa	59
6.2	Ensayo 1. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 1. Presión en probeta eje \hat{y} . $\sigma_2=0.07$ MPa	60
6.3	Ensayo 1. Gráfico Tensión-deformación-tiempo. Fase de carga 1. $\sigma_2=0.07$ MPa	61
6.4	Ensayo 1. Gráfico . Fase de carga 1. $\sigma_2=0.07$ MPa	62
6.5	Ensayo 1. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 2. Presión en probeta eje \hat{x} . $\sigma_2=0.09$ MPa	63
6.6	Ensayo 1. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 2. Presión en probeta eje \hat{y} . $\sigma_3=0.09$ MPa	64
6.7	Ensayo 1. Gráfico Tensión-deformación-tiempo. Fase de carga 2. $\sigma_2=0.09$ MPa	65
6.8	Ensayo 1. Gráfico Desplazamiento-tiempo. Fase de carga 2. $\sigma_2=0.09$ MPa . .	65
6.9	Vista perfil eje \hat{x} luego del ensayo	66
6.10	Vista perfil eje \hat{y} luego del ensayo.	67
6.11	Ensayo 2. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 1. Presión en probeta eje \hat{x} . $\sigma_2=0.15$ MPa	69
6.12	Ensayo 2. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 1. Presión en probeta eje \hat{y} . $\sigma_2=0.15$ MPa	70
6.13	Ensayo 2. Gráfico Tensión-deformación-tiempo. Fase de carga 1. $\sigma_2=0.15$ MPa	71
6.14	Ensayo 2. Gráfico Desplazamiento-tiempo. Fase de carga 1. $\sigma_2=0.15$ MPa . .	72

6.15	Ensayo 2. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 2. Presión en probeta eje \hat{x} . $\sigma_2=0.11$ MPa	74
6.16	Ensayo 2. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 2. Presión en probeta eje \hat{y} . $\sigma_3=0.11$ MPa	74
6.17	Ensayo 2. Gráfico Tensión-deformación-tiempo. Fase de carga 2. $\sigma_2=0.11$ MPa	75
6.18	Ensayo 2. Gráfico Desplazamiento-tiempo. Fase de carga 2. $\sigma_3=0.11$ MPa . .	76
6.19	Vista perfil eje \hat{x} luego del ensayo	77
6.20	Ensayo 3. Gráfico Tensión-deformación. Presión en probeta eje \hat{x} . $\sigma_2=0.2$ MPa	79
6.21	Ensayo 3. Gráfico Tensión-deformación. Presión en probeta eje \hat{y} . $\sigma_2=0.2$ MPa	80
6.22	Ensayo 3. Gráfico Tensión-deformación-tiempo. $\sigma_2=0.2$ MPa	81
6.23	Ensayo 3. Gráfico Desplazamiento-tiempo. $\sigma_2=0.2$ MPa	81
6.24	Recorrido corto de transductor de desplazamiento	82
6.25	Concentración de tensiones en esquina de probeta	83
6.26	Concentración de tensiones en esquina de probeta	83
6.27	Zona de obtención de desplazamientos mediante MatchID en eje \hat{x} para ensayo 3	84
6.28	Comparación de desplazamientos entre transductor de desplazamiento (TD) y correlación de imágenes para ensayo 3	85
6.29	Zona de obtención de desplazamientos mediante MatchID en eje \hat{y} para ensayo 3	86
6.30	Comparación de desplazamientos entre <i>Epsilon</i> y correlación de imágenes para ensayo 3	87
6.31	Movimiento de <i>Epsilon</i> durante ensayo 3	88

6.32	Evaluación de la distribución de deformaciones en ensayo 3	89
6.33	Ensayo 4. Gráfico Tensión-deformación. Presión en probeta eje \hat{x} . $\sigma_2=1$ MPa	92
6.34	Ensayo 4. Gráfico Tensión-deformación. Presión en probeta eje \hat{y} . $\sigma_2=1$ MPa	93
6.35	Ensayo 4. Gráfico Tensión-deformación-tiempo. $\sigma_2=0.15$ MPa	94
6.36	Ensayo 4. Gráfico Desplazamiento-tiempo. $\sigma_2=1$ MPa	94
6.37	Vista en cara libre luego del ensayo. Parte a	95
6.38	Vista en cara libre luego del ensayo. Parte b	95
6.39	Vista lateral eje \hat{y} luego del ensayo	96
6.40	Vista en cara libre luego del ensayo. Parte c	97
6.41	Zona de obtención de desplazamientos mediante MatchID en eje \hat{x}	98
6.42	Comparación de desplazamientos entre transductor de desplazamiento y correlación de imágenes para ensayo 4	99
6.43	Rotación de fijación de transductor de desplazamiento en ensayo 4	100
6.44	Rotación de fijación de transductor de desplazamiento en ensayo 4	101
6.45	Zona de obtención de desplazamientos mediante MatchID en eje \hat{y} para ensayo 4	102
6.46	Comparación de desplazamientos entre <i>Epsilon</i> y correlación de imágenes para ensayo 4	103
6.47	Movimiento de <i>Epsilon</i> durante ensayo 4	104
6.48	Evaluación de la distribución de deformaciones en ensayo 4	106
B.1	Cara libre para antes y después del ensayo 3	118
B.2	Cara libre para antes y después del ensayo 4	119

B.3	Elaboración de probeta 4	120
-----	------------------------------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

3.1	Granulometría de arena usada	10
4.1	Resultados ensayos de compresión simple	25
4.2	Caracterización de la variabilidad de macizos rocosos (Codelco-1997)	25
4.3	Resultados ensayos de velocidades de compresión y de corte	33
4.4	Requerimientos de material modelo y resultados obtenidos	34
5.1	Resumen de ensayos realizados	49

RESUMEN

El método de diseño de minería subterránea denominado *block caving* fragmenta el cuerpo de roca colapsándola con su peso iniciando así la minería. Este trabajo evaluó el comportamiento de un material análogo a roca en marco de trayectorias biaxiales habilitado para tales condiciones en probetas de $120 \times 60 \times 19$ cm. El objetivo de este dispositivo es medir el rol de las fracturas durante la propagación del *caving*.

El material análogo se compone de yeso, agua y retardante de yeso (RP). Representa las características de roca dura frágil con propiedades reducidas y se caracterizó mediante ensayos de laboratorio uniaxiales y velocidades de onda para luego ser comparados con los resultados biaxiales, obteniendo módulos de Poisson y Young similares y dentro del rango que Heuer y Hendron (1969) proponen. Se rehabilitó un marco de carga biaxial desde aspectos técnicos de funcionamiento como mangueras y conexiones, hasta adecuaciones del equipo para ensayar cuatro probetas confeccionadas con este material análogo.

Se utilizaron transductores de desplazamiento en dos orientaciones sobre la superficie de la probeta para controlar las deformaciones. Estas mediciones directas fueron complementadas y comparadas con mediciones indirectas mediante correlación de imágenes. Se realizaron dos ensayos exploratorios verificando la capacidad del equipo para otorgar las tensiones y desplazamientos necesarios para que la probeta lograra una falla frágil. Establecido el protocolo de cargas, se realizaron dos ensayos con diferentes niveles de confinamiento: 0.2 y 1 MPa.

Los principales resultados demostraron que el marco biaxial rediseñado y el material análogo son adecuados para representar aspectos del comportamiento de deformación y fracturamiento en condiciones de tensiones horizontales elevadas. En el futuro, se espera que el equipo pueda utilizarse para estudiar los procesos fundamentales relacionados con la fractura de roca durante *block caving*.

Palabras Claves: marco de carga, ensayo biaxial, *block caving*, material análogo a roca.

ABSTRACT

The design method of underground mining is block caving, which fragments the body of rock, collapsing it with its own weight, initiating the deposit. To diagnose the role of fractures during block caving, the deformation behaviour of a rock-like material was evaluated under biaxial loading using a purpose-built frame with rock analogue samples of the dimension $120 \times 60 \times 19$ cm.

The analogue rock material was composed of gypsum, water and gypsum retardant (RP), and several tests were performed to create a material representative of the properties of brittle hard rock. To test these properties, uniaxial and benchtop ultrasonic wave velocity laboratory characterization were compared with the biaxial loading results to provide values of Poisson's ratio and Young's modulus within a similar range to that determined by Heuer and Hendron (1969) as suitable for rock. A biaxial load frame was rehabilitated by redesigning and repairing several technical aspects of operation, such as hoses and connections. These adaptations made it possible to be able to test four samples of the analogue material that were made from scratch.

The samples were monitored using linear variable displacement transducers (LVDTs) directly on the sample surface in two orientations to monitor sample strain. These data (direct measurements) were complemented and compared with images correlation (indirect measurements). In order to initially verify that the biaxial frame was capable of generating the stresses and displacements necessary for the specimen to achieve brittle failure, a suite of exploratory tests was performed on two of the prepared samples. Once a loading protocol was established, a final suite of tests was carried out on the remaining two samples with two different levels of applied confining pressure: 0.2 and 1 MPa.

The main results demonstrated that the redesigned biaxial apparatus and analogue material are suitable for gaining insight into several aspects of the deformation and fracturing

behaviour under conditions of elevated horizontal stresses. In future, it is proposed that the apparatus could be further used to illuminate fundamental processes related to fracturing during block caving.

Keywords: load frame, biaxial compression, block caving, analogue rock material.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años, la minería subterránea ha adquirido mayor importancia por su potencial desarrollo en comparación a la ya explotada minería a rajo abierto (Cochilco, 2005). En ella la exploración debe ocurrir en niveles más profundos, donde se llega a recursos que antes eran desaprovechados por estar en lugares de más difícil acceso. Esta técnica se puede extender a varios países, donde los yacimientos de mineral de alta ley disminuyen y surgen nuevas metodologías de exploración. En ingeniería de rocas subterráneas, existen dos condiciones de estabilidad dependiendo si es roca intacta o roca naturalmente agrietada: la primera está controlada por la condición de tensión acumulada, mientras que la segunda, por las fracturas presentes (Zhong et al., 2018).

Uno de los métodos de diseño de minería subterránea es el *block caving*, que consiste en fragmentar el cuerpo de roca y así colapsarla con su propio peso iniciando la minería. Este método permite convertir la minería a rajo abierto en subterránea (Cochilco, 2005), disminuir la eliminación de residuos en el exterior y extraer grandes yacimientos de baja ley.

Las dimensiones de estos depósitos contemplan los cientos de metros de largo, donde existen diversas familias de estructuras siendo difícil de predecir las direcciones de propagación de fracturas y su comportamiento frente a las sollicitaciones, dado que las direcciones probables son en general dirigidas por la anisotropía (presencia de estructuras), mientras que si la roca es homogénea, la dirección de la fractura es mucho más difícil de predecir. Es importante destacar que la propagación de la red de fracturas es un factor preponderante en la efectividad de la técnica utilizada (Liu, Liu, Huang, Wei, & Lei, 2016). De momento, existen pocos ensayos que puedan modelar el comportamiento en trayectorias de tensiones similares al *block caving* y más aún, sus patrones de propagación de fracturas.

Una de las principales dificultades de la industria minera, radica en que los minerales de alta ley y la roca fracturada o menos competente ya se han explotado, teniendo que

ingeniárselas en producir mecanismos en roca dura, aumentando considerablemente los costos de operación.

El proceso de *block caving* corresponde a un método masivo de explotación mineral en el cual a través de explosivos en la base, se busca el colapso del material dada la remoción del material en la base. Este fenómeno genera nuevas propiedades mecánicas en el macizo rocoso dado que el flujo de roca se produce por las tensiones acumuladas o fracturas presentes. En conclusión, cada bloque se explota individual e independiente de los otros bloques.

Existen diversos factores que regulan el diseño del caving, entre los que destacan:

- (i) Interacción de zonas de flujo de roca
- (ii) Estabilidad del nivel (condiciones geotécnicas)
- (iii) Fragmentación del material y su transporte y/o extracción
- (iv) Factores operacionales

Si bien es difícil poder manejar todos los factores a la vez, pues algunos provienen de las condiciones naturales y otros por accionar del ser humano, es posible automatizar algunos métodos. Estos métodos de explotación vienen incluso del siglo XIX, en Estados Unidos (E.T. Brown, 2003. Extraído de Cochilco (2005)).

Uno de los grandes desafíos se asocia a la dificultad de ensayar muestras de roca natural en los ensayos de laboratorio, dado que es necesario tener muestras grandes que sean representativas de la roca lo que requiere muestras muy grandes y/o pruebas in situ. Para ello, se puede analizar la Figura 1.1, en la cual se muestran las diferencias y dificultades presentes al variar la escala de análisis, variando de roca intacta a macizo rocoso fracturado. Estas diferencias llevan a que las resistencias sean muy variadas, dependiendo del grado de meteorización, campo de tensiones y discontinuidades presentes, entre otras, afectando a la resistencia última y módulo de Young, principalmente.

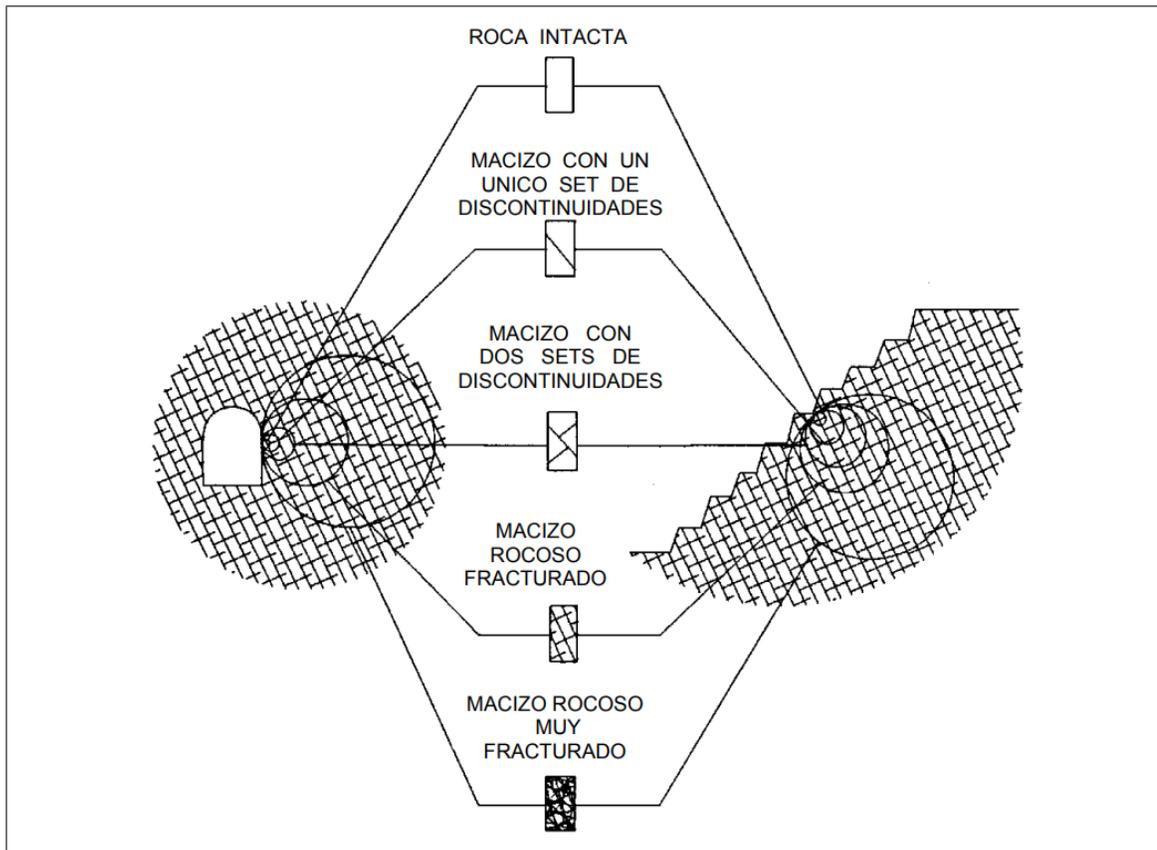


Figura 1.1. Diagrama idealizado que muestra la transición desde una condición de roca intacta a la de un macizo rocoso muy fracturado, en la medida que aumenta el tamaño de la muestra considerada (Hoek & Brown, 1997)

Para evadir esta gran dispersión de resultados, muchos autores han preferido elaborar probetas artificiales mediante mezcla de materiales, por sobre probetas naturales de roca misma, pudiendo reproducir varias probetas de iguales características y estudiar fenómenos de mejor manera, a diferencia de una probeta de material natural donde cada una tendría propiedades diferentes, tal como se explica en el capítulo 3.2.

En relación con el tema del *caving*, esta tesis presentará en detalle la habilitación de un marco biaxial que puede ensayar probetas grandes mediante desviador controlado. Para ello, se estudiará mediante diferentes ensayos las propiedades mecánicas uniaxiales de un

material análogo (y todas las ventajas que involucra) tal que sea capaz de representar roca dura frágil, para posteriormente poder comparar con los resultados biaxiales obtenidos.

Dentro de las ventajas que se expondrán, está la posibilidad de incluir diferentes configuraciones de fracturas preexistentes en la probeta para evaluar y reproducir las propagaciones en cada escenario. Además, es posible adecuar el marco para generar las tensiones presentes en el proceso de *block caving*, tanto de confinamiento, desviador y excavación.

En el capítulo 3 de la presente tesis, se revisarán los trabajos realizados por diferentes autores que han desarrollado temas similares, en el capítulo 4 se revisará el material modelo y los ensayos realizados para su fabricación y uso como material sustituto de roca. En el capítulo 5 se verá en detalle el marco de carga biaxial habilitado, instrumentación y la elaboración respectiva de probetas. Finalmente, en el capítulo 6, se verán los resultados de los ensayos realizados junto con las conclusiones y futuras mejoras.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de la investigación es la habilitación de un marco biaxial para la realización de ensayos de laboratorio para probetas prismáticas de 60×120 cm que sea capaz de reproducir el estado tensional de una roca hasta aproximadamente 5.0 MPa, con la posibilidad de aplicar un desviador controlado. Con este equipo, se espera estudiar materiales bajo carga biaxial mediante la determinación de resistencia y comportamiento de la fracturas presentes en diferentes escenarios preestablecidos.

La puesta en marcha del equipo se llevará a cabo mediante el desarrollo de un material modelo que represente cualitativamente una roca dura frágil con propiedades reducidas. Se efectuarán los ensayos de laboratorio correspondientes para determinar sus propiedades mecánicas uniaxiales y así poder compararlas frente a los resultados biaxiales que se espera determinar con el marco.

En segunda parte, se presenta la habilitación del marco biaxial para el ensayo de las probetas, desde los aspectos técnicos hasta las adecuaciones que se efectuaron sobre el equipo existente. Luego, se presentará la generación de probetas para poder ser ensayadas en el marco biaxial. De esta manera, el ensayo será capaz de reproducir el confinamiento y el desviador que sufre la roca durante durante el proceso de *caving*.

Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos por los diferentes equipos de monitoreo e instrumentación utilizados en el momento del ensayo y se compararán los resultados frente a los parámetros uniaxiales.

3. ANTECEDENTES Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Resistencia de macizos rocosos

El proceso de predecir el comportamiento de algún macizo rocoso exige considerar varios factores a la vez, siendo muy difícil de entregar resultados concretos, recurriendo en muchas ocasiones a supuestos, aproximaciones y factores de seguridad elevados. Estos factores comprenden desde las tensiones a la que está sometida la roca, hasta propiedades de su estructura, calidad del macizo, grados de perturbación *in situ*, etc. Para poder manejar este abanico de variables, varios autores han propuesto diferentes modelos teóricos para predecir el comportamiento del material. A continuación, se presentan dos de los modelos más usados en la actualidad.

3.1.1. Criterio de Mohr-Coulomb

Este criterio fue creado en primera instancia por Coulomb en 1773, y luego ampliado por Mohr en el siglo XIX. El criterio establece relaciones de tensiones normales y tangenciales que se propagan en una superficie que ha alcanzado la resistencia máxima del material, suponiendo que todos los puntos de la superficie de falla lo alcanzan en forma simultánea. Inicialmente el método fue creado para evaluar el comportamiento en suelos, sin embargo, es uno de los criterios más utilizados hoy en día por su sencillez, comodidad y gracias a que los parámetros que necesita el método son propiedades físicas de la roca, aún cuando este criterio no predice muy bien el comportamiento de rocas para cargas triaxiales.

La ecuación de la envolvente de falla del criterio de Mohr-Coulomb, es la siguiente:

$$\tau = c' + \sigma'_n \cdot \tan(\phi') \quad (3.1)$$

donde

- τ es la tensión tangencial en el plano de falla.
- σ'_n es la tensión normal efectiva en dicho plano.
- c' es la cohesión.
- ϕ' es el ángulo de fricción interna del material.

En la Figura 3.1, puede verse la superficie de falla para el caso anterior. Es trivial verificar que la cohesión corresponde a la intersección de la superficie con el eje de las ordenadas y que el ángulo de fricción interna es la pendiente de la envolvente con el eje de las abscisas. Además, el eje de las ordenadas corresponde a la tensión tangencial efectiva y el eje de las abscisas, a la tensión normal en el plano. Por otra parte, todo par de tensiones principales σ'_1 y σ'_3 genera un estado tensional cuya representación gráfica en el círculo de Mohr-Coulomb corresponde a una circunferencia. Por tratarse de un modelo elasto-plástico perfecto, aquellos estados tensionales que se ubiquen por debajo de la envolvente de falla, están en estado elástico, mientras que los que se encuentren en la envolvente, están en condición de rotura. Notar que en una trayectoria triaxial, la tensión principal intermedia es idéntica a la menor, entonces $\sigma'_2 = \sigma'_3$.

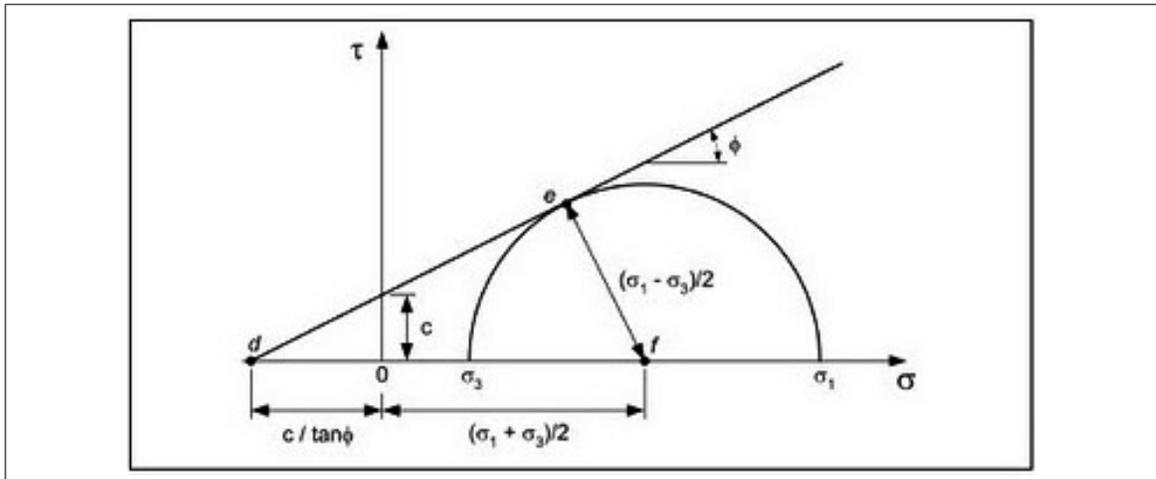


Figura 3.1. Envolvente de falla de Mohr-Coulomb

Es usual usar el método en función de las tensiones principales del material, mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \cdot N_\phi + 2 \cdot c' \cdot \sqrt{N_\phi} \quad (3.2)$$

donde

- σ'_1 es la tensión efectiva principal mayor.

- σ'_3 es la tensión efectiva principal menor.

- $N_\phi = \tan(45^\circ + \frac{\phi'}{2})$.

La ecuación anterior, es equivalente a la ecuación 3.1 solo que evita resolver el estado de tensiones sobre el plano de rotura. Por otra parte, el modelo tiende a sobre estimar la envolvente de falla cuando se trabaja con rocas duras en baja profundidad a bajo confinamiento. El análisis correspondiente de este tema se presentará en el capítulo 3.3.

3.1.2. Criterio de rotura Hoek y Brown

El criterio de Hoek y Brown fue desarrollado inicialmente en 1980, con su última actualización en 2018. Es un método desarrollado especialmente para roca intacta y macizo rocoso, de manera empírica, utilizando parámetros de resistencia propios de la roca mediante ensayos de laboratorio o basados en literatura. La ecuación utilizada en la actualidad, es la siguiente:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci} \cdot \left[m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma'_{ci}} + s \right]^a \quad (3.3)$$

donde

- σ'_1 es la tensión efectiva principal mayor.

- σ'_3 es la tensión efectiva principal menor.

- σ'_{ci} es la resistencia a compresión simple de la roca intacta.

- $m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D}}$.

- m_i es el parámetro m pero para roca intacta.

- GSI es el índice de resistencia geológica.

$-D$ es el parámetro para cuantificar perturbación de macizo rocoso por tronadura y desconfinamiento, siendo $D = 0$ para mucha perturbación y $D = 1$ para cero perturbación.

$$-s = e^{\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D}}$$

$$-a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left[e^{\frac{GSI}{15}} - e^{\frac{20}{3}} \right]$$

El factor GSI es un parámetro empírico que define la calidad del macizo rocoso, incluyendo sistema de fracturas y contacto entre ellas. Es uno de los factores más importantes dado que permite escalar eficientemente de material intacto a macizo rocoso, junto con el factor D . En la Figura 3.2, se puede ver la envolvente de rotura en un gráfico σ_1 vs σ_3 . Al comparar la envolvente con el caso $\sigma_1 = \sigma_3$, puede notarse la no linealidad del criterio, donde la envolvente debe calcularse para cada caso. La no linealidad se debe a que la pendiente se hace más horizontal a medida que aumenta el confinamiento.

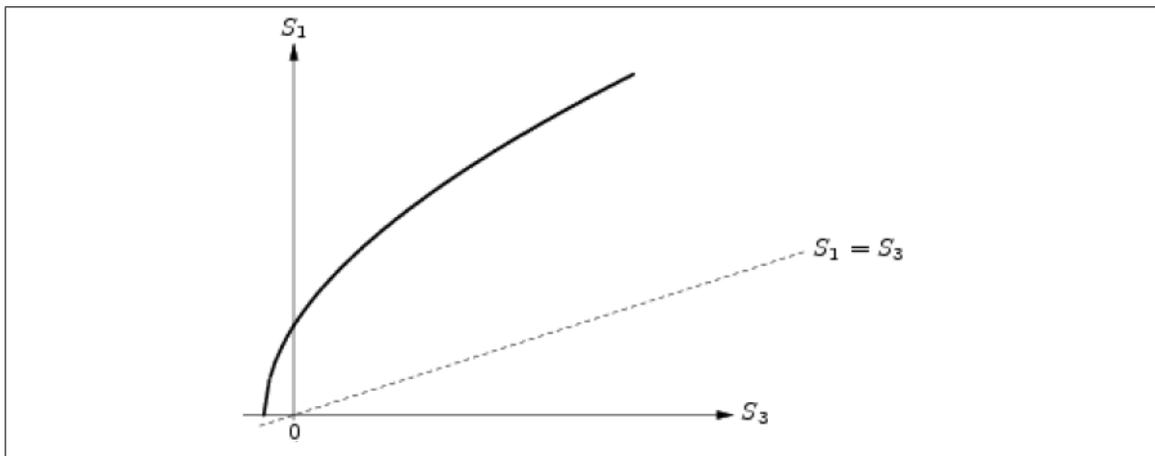


Figura 3.2. Envolvente de falla de Hoek y Brown genérica

3.2. Materiales modelos de roca

El material modelo creado en la presente investigación tiene por objetivo representar una roca dura frágil, es decir, que sus parámetros mecánicos pertenezcan a los rangos que caracterizan a una roca como tal en la clasificación presentada por Heuer and Hendron

(1969), quienes resumen las propiedades adimensionales que un material debe cumplir para simular material rocoso:

- (i) Presentar curva de tensiones principales $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_c$ vs ε , similares a las de una roca.
- (ii) Relación E/σ_c entre 250 y 500.
- (iii) Relación σ_t/σ_c entre 0,05 y 0.1.
- (iv) Ángulo de fricción interna del material intacto ϕ_i entre 25° y 60° .
- (v) Módulo de Poisson ν entre 0,1 y 0,3.
- (vi) Ángulo de fricción residual ϕ_j entre 25° y 60° .

Dentro de estos parámetros, los más importantes corresponden al módulo de Young y la tensión de rotura o tensión máxima. Para ello, se comenzó usando el material modelo propuesto por Zegpi (2014), que incluye un estudio detallado de diferentes materiales y sus características de comportamiento que serían candidatos para simular una roca. Entre estos, concluye que el yeso es el mejor calificado por su facilidad de trabajo, fraguado rápido y que mediante la adición de agua y/o aditivos, cambia sus propiedades en forma versátil. Luego de probar más de 100 mezclas diferentes, concluyó que la mejor proporción era la de yeso "SUPER" marca EL VOLCÁN, arena gruesa sin finos y agua, era de 1,0-0,5-0,65, respectivamente. La granulometría de la arena usada se muestra en la Tabla 3.1, donde realizó tres ensayos de clasificación de suelos USCS.

Tabla 3.1. Granulometría de arena usada

Tamiz	Apertura	% Pasa ensayo 1	% Pasa ensayo 2	% Pasa ensayo 3
#16	1.18mm	99,9%	100,0%	99,0%
#30	0.6mm	90,1%	90,9%	90,3%
#50	0.3mm	39,9%	40,4%	41,2%
#100	0.15mm	0,7%	0,8%	1,1%
#200	0.075mm	0,1%	0,1%	0,1%

Dentro de los requerimientos propios del material para su confección y construcción de probetas, desmolde y ensayo en marco biaxial, se añade lo siguiente:

- (i) La resistencia del material modelo debe ser como máximo del orden de 5,0 MPa. El marco biaxial tiene diferentes capacidades en mangueras, marco de carga, gatos hidráulicos y otros elementos que se revisarán en detalle en el capítulo 5.4.
- (ii) Tiempo de fraguado alto. El yeso se clasifica como material que se caracteriza por su rápido fraguado, más aún, se añade a varias mezclas en construcción para lograr este objetivo, por lo que se debería aumentar el tiempo el fraguado de alguna manera.
- (iii) Variabilidad controlada. Material que sea múltiples veces reproducible con propiedades mecánicas que no tengan mucha dispersión, estableciendo casos parecidos de análisis.

Se tienen varios factores que deben coincidir en el material modelo, haciéndolo práctico para su estudio y, a la vez, mecánicamente compatible para representar a una roca.

Dado que la investigación de García (2005) también fue desarrollada en el mismo grupo de investigación, se utilizó la arena que aún estaba en el laboratorio. Sin embargo, cuando se acabó, se buscó una lo más parecida posible. En el análisis siguiente, se comparan las curvas granulométricas de ambas arenas sin finos, donde se verifica la gran similitud excepto en las últimas dos mallas que difieren en alrededor del 10%. Para ello, se realizaron ensayos uniaxiales tal de comparar curvas de tensión-deformación, obteniendo resultados muy parecidos que se analizarán en el capítulo 4.2.

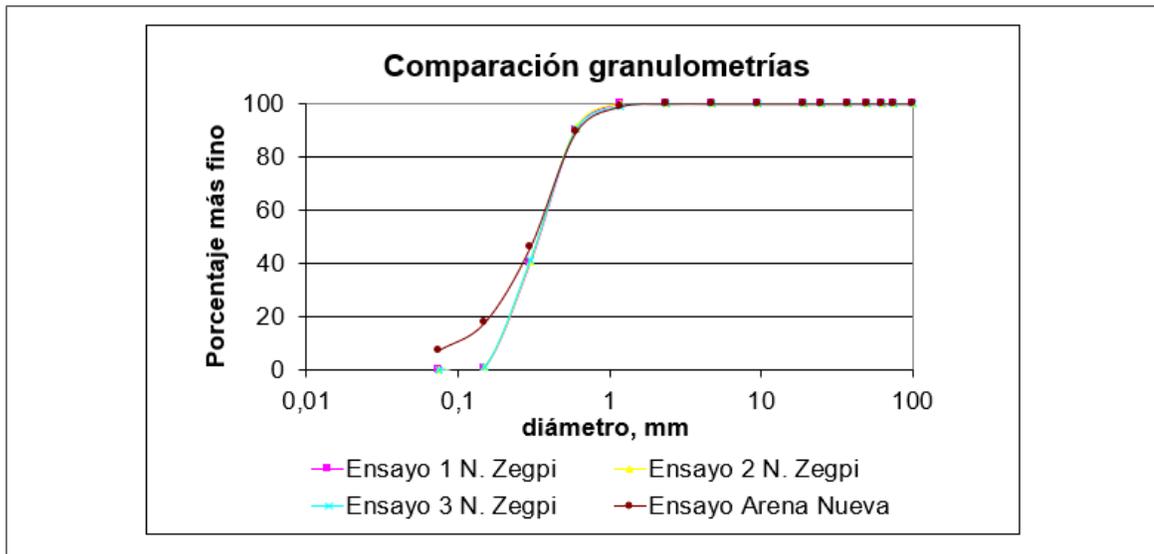


Figura 3.3. Comparación de granulométrias de arenas usadas (Zegpi, 2017 y presente investigación)

3.3. Ensayos biaxiales

El marco biaxial que se usó en el presente trabajo (ver capítulo 5.1), fue inicialmente desarrollado por García (2005), con el objetivo de realizar ensayos de laboratorio con carga en dos ejes para probetas grandes y a altas presiones. El principal objetivo era poder comprender el comportamiento de una roca en casos de presiones relativamente menores donde el método de Mohr-Coulomb predice resistencias mayores a las reales. Ejemplos de este fenómeno puede darse en un talud donde la roca está a poca profundidad. En la Figura 3.4, puede verse que para tensiones $\sigma_n < 0.2 \cdot \sigma_{ci}$, el criterio de rotura de Mohr-Coulomb predice resistencias mayores a las reales, donde τ corresponde a la tensión de corte y σ a la tensión normal, ambas en el plano de rotura. Además, σ_{ci} corresponde a la resistencia de compresión de la roca intacta.

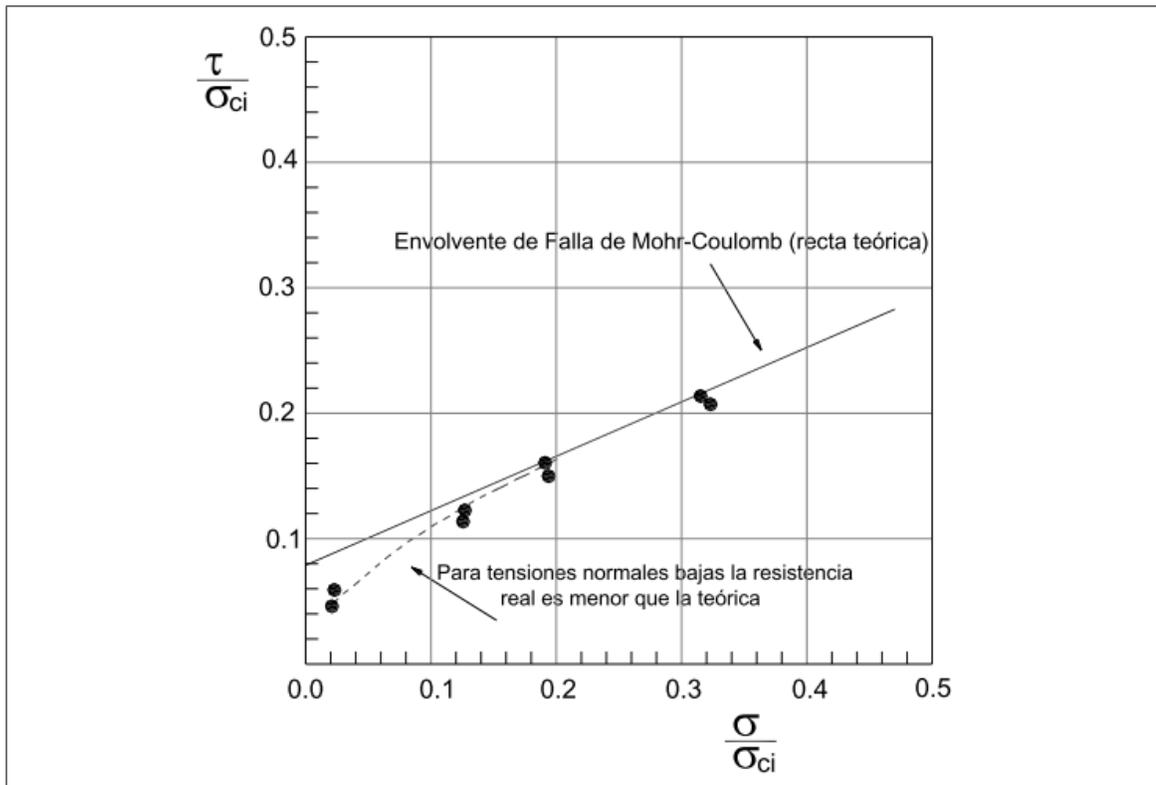


Figura 3.4. Recta teórica de Mohr-Coulomb vs puntos reales, según gráfico de Cording & Jamil (1994). Extraído de García, (2005)

Puede notarse que para una roca intacta muy competente (σ_{ci} alto), la predicción realizada a bajas presiones no es precisa si se siguiera el criterio de Mohr-Coulomb, dado que las resistencias reales son menores. Esta sobre-estimación de la resistencia puede afectar gravemente el análisis de estabilidad y generar falla importantes en zonas donde se permitan factores de seguridad cercanos a la unidad (FS=1).

El marco biaxial se diseñó para el uso de probetas grandes de 120×60 cm, las que según García (2005) tienen las principales ventajas:

- (i) Uso de probetas grandes con mayor espacio para analizar diferentes configuraciones de fracturas o condiciones de borde más complejas.

- (ii) La propagación de fracturas tiene mayor espacio para poder propagarse dentro de la probeta, teniendo así, una zona de transición conocida. Si fuese una probeta pequeña, la propagación ocurriría hasta alcanzar el borde de la probeta.
- (iii) Existe mayor realidad en cuanto a la proporción en escala de las propiedades de una o más familia de estructuras. Siendo estas: espaciamiento, apertura, rugosidad, persistencia y relleno. Un ejemplo puede ser al tener un espaciamiento grande y no persistencia en comparación a espaciamiento grande con persistencia.
- (iv) Al trabajar con números más grandes en comparación a una probeta pequeña, ya sea en término de tensiones, dosificaciones u otros, es menor el margen de error obtenido. Si se requiere trabajar con 5 MPa, tener 4,9 o 5,1 MPa es parecido y el porcentaje de variación es muy pequeño; pero no así si se quiere trabajar con 1 MPa, donde para 0,9 o 1,1 MPa, el porcentaje de variación es mucho mayor (2% vs 10% de error con el mismo 0,1 MPa de diferencia).

Además, dado que el marco biaxial permite trabajar con probetas grandes, la biaxialidad otorga el efecto del confinamiento, que es propiedad clave en el estudio de roca fracturada.

3.4. Propagaciones de fracturas en ensayos biaxiales

La propagación de las fracturas controla el comportamiento que tendrá el macizo rocoso, afectando gran parte su deformabilidad y resistencia. Más aún, mediante ensayos de laboratorio, es posible reproducir diferentes configuraciones de fracturas con las cuales se puede calibrar soluciones analíticas y estudios numéricos (Prudencio et al., 2007).

Existen dos formas de generar fracturas en probetas artificiales para ensayos de laboratorio; mediante el ensamble de pequeños bloques o la elaboración de una sola gran probeta. La primera manera (Figura 3.5), a pesar de ser muy utilizada por varios autores por su sencillez de montaje y facilidad de configuración de una o más familias de fracturas,

tiene la dificultad que los bloques tienden a girar, afectando la resistencia, deformabilidad, creando acumulación de tensiones no reales e induciendo modos de falla (Jamil, 1992).

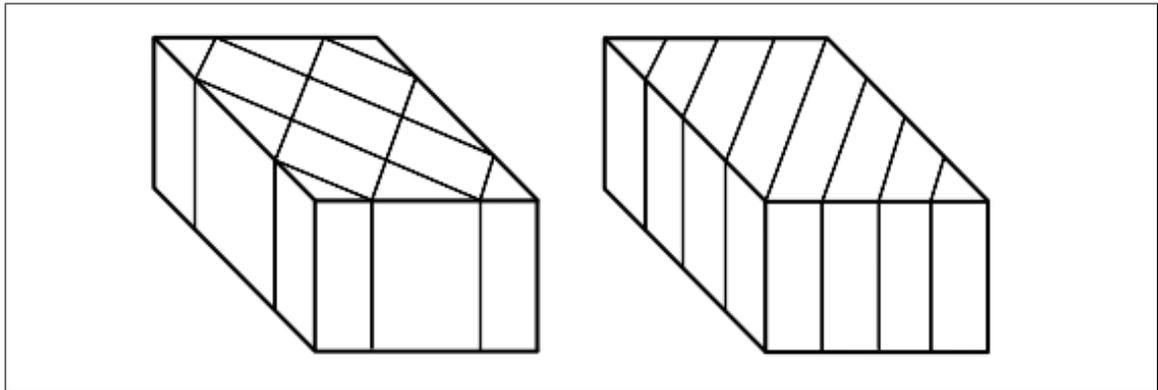


Figura 3.5. Probetas contruidas por bloques (García, 2005)

La segunda manera, corresponde a la de crear las fracturas en el mismo proceso de elaboración de la probeta, cuando el material base está proceso de curado, sea este hormigón, yeso u otro. Para este efecto, se han utilizado láminas de metal, cintas magnéticas, papel aluminio, etc., combinada con algún tipo de aceite para facilitar la extracción. Otra opción, es dejar el material embebido en la probeta (como las cintas magnéticas), sin embargo se generan fuerzas de roce en la estructura por lo que se debe verificar que sean muy inferiores a las del material que constituye la probeta. En la Figura 3.6, puede verse el uso de malla que genera la discontinuidad durante el curado. En este caso se considera la posterior extracción de este elemento.

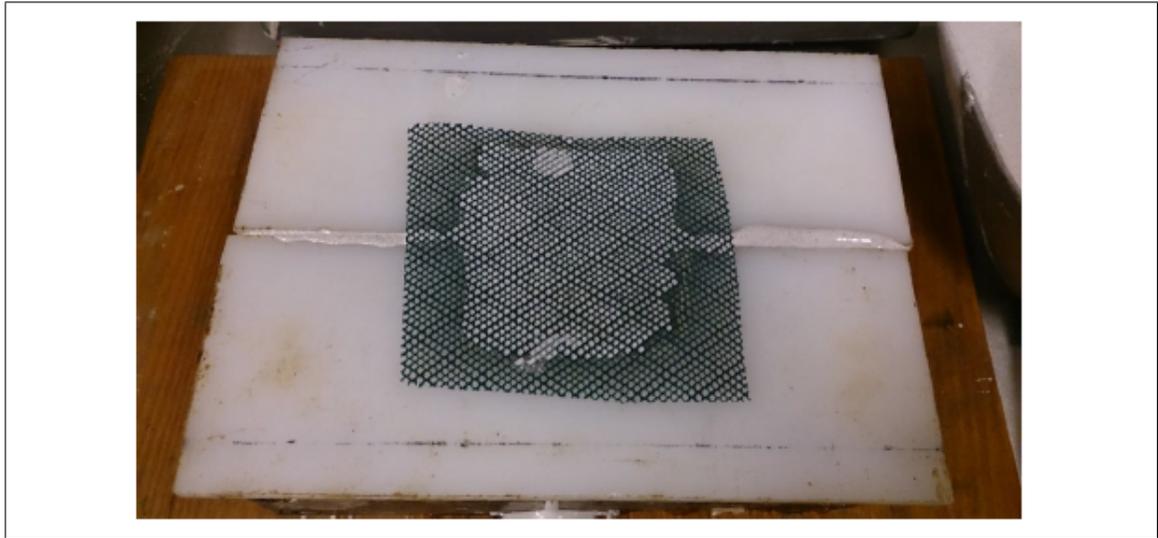


Figura 3.6. Malla generadora de discontinuidad cuando el yeso está en proceso de curado. (Zegpi, 2014)

Liu et al. (2016) realizó estudios de ensayos uniaxiales y biaxiales en probetas artificiales que simulan roca, con propagación de fracturas en especímenes pequeños de 120x60x40 mm. Realizó la inclusión de fracturas mediante el segundo método estudiado, es decir, durante el proceso de curado del material, tal y como puede verse en la Figura 3.7.

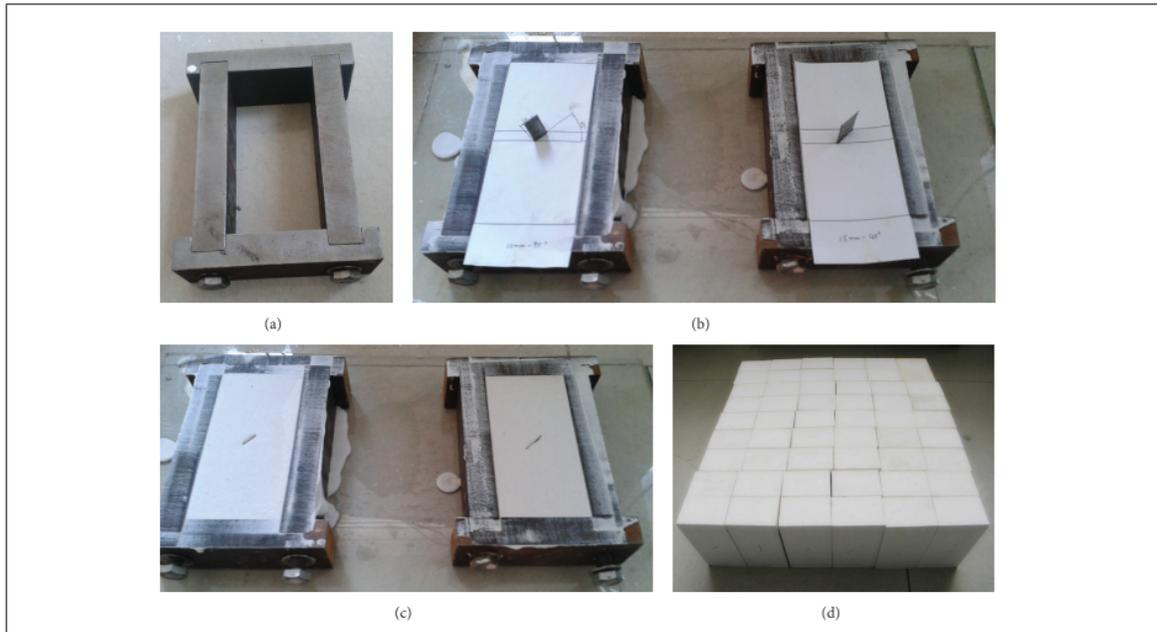


Figura 3.7. Proceso de preparación de probetas con fracturas. (a) Molde de probetas. (b) Creación de fracturas. (c) Proceso de curado. (d) Resultado final de probetas. (Liu et al., 2016)

Además, dicho trabajo incluyó un sistema *AE* (*acoustic emissions*) para poder monitorear el inicio de la propagación de microfisuras. Las fracturas simples fueron realizadas en sets de 30° , 45° , 60° y 90° respecto a la horizontal y también realizó fracturas múltiples en forma de X (*X-shape cross fractures*) con los mismos ángulos.

En la Figura 3.8 puede verse la propagación de una fractura simple con inclinación de 30° en ensayo uniaxial. Se puede notar la propagación al mismo tiempo en dirección axial pero en sentidos contrarios.

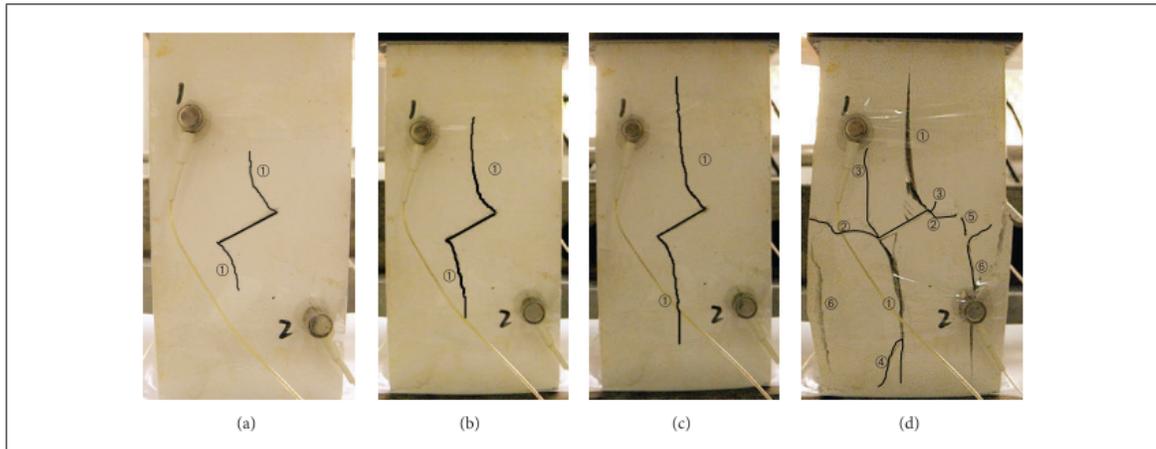


Figura 3.8. Propagación de fractura simple. (a) $\sigma_1=2.45$ MPa. (b) $\sigma_1=2.87$ MPa. (c) $\sigma_1=3.33$ MPa. (d) Falla. (Liu et al., 2016)

Sin embargo, al comparar el caso anterior con un ensayo biaxial, con inclinación de 45° y confinamiento de 1 MPa, hay diferencias importantes. La Figura 3.7 muestra que la fractura se expande manteniendo la apertura al menos hasta llegar a la falla, donde se generan más fracturas, antes, solo se transformaba en dos que se expandían axialmente. En la Figura 3.9 del caso biaxial, puede verse al momento de la falla que la propagación de la fractura no ocurre en dirección axial, el espesor de la apertura y el largo de la fractura son mayores. Además, solo en el caso biaxial se presentan fracturas que no son propagación de la inicial, sino que surgen en zona intacta, producto de la biaxialidad (fracturas 4 y 6). Por último, se van generando zonas de generación de nuevas fracturas, marcadas con color verde.



Figura 3.9. Propagación de fractura simple para caso biaxial. (a) $\sigma_1=2.45$ MPa. (b) $\sigma_1=2.87$ MPa. (c) $\sigma_1=3.33$ MPa. (d) Falla. (Liu, 2016)

En el trabajo de Prudencio (2002), se ocupan rieles que sostienen láminas de metal aceitadas para producir las fracturas. Para ello, es necesario contar con una estructura sobre el moldaje, tal como se ve en la Figura 3.10, de manera que sea compatible con el proceso de elaboración de la probeta, es decir, con el material base en el proceso de curado. Si bien existe complejidad en el montaje, estos rieles permiten crear diferentes familias de fracturas, variando ubicación y orientación de varillas. Este sistema es muy útil para probetas grandes dado que es capaz de crear fracturas de mayor espesor y evita los problemas ya mencionados de las probetas hechas con bloques pequeños, sin embargo, no pueden realizarse configuraciones geométricas muy complejas. Un factor importante a

tener en consideración es la dificultad en el montaje del molde, de los rieles y transporte de materiales y pesos grandes.

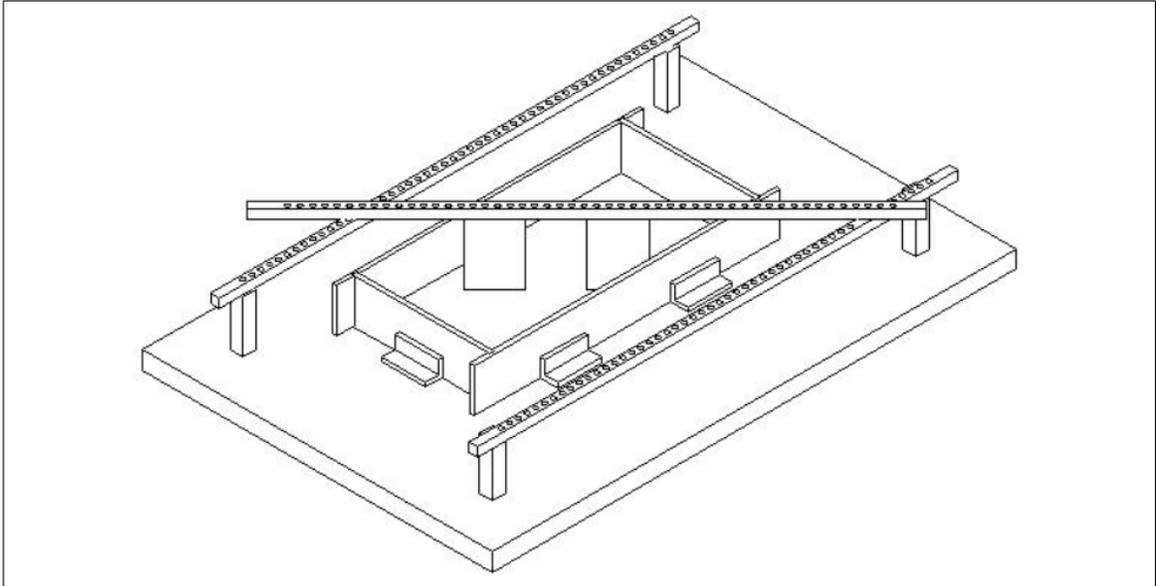


Figura 3.10. Método empleado por Prudencio (2002) para introducir y guiar láminas que generan las fracturas

3.5. Alcance de investigación

El presente trabajo busca desarrollar un material ficticio o análogo con propiedades similares a la de una roca frágil competente, sometido a un marco biaxial en confinamientos bajos donde el criterio de Mohr-Coulomb sobre estima la rotura. Para ello, se efectuarán ensayos de laboratorio en probetas de compresión uniaxial (UCS) hasta obtener el material modelo ideal para luego habilitar el marco biaxial para su ensayo. Esto involucra desde el pesaje del material, protocolo de confecciones de probetas, instrumentación, calibración y el montaje final para la extracción de resultados y conclusiones respectivas.

Si bien el alcance inicial de la investigación incluía someter probetas sintéticas a trayectorias compatibles con *caving*, por las restricciones de acceso al laboratorio dada la situación sanitaria, se limitó el alcance al desarrollo del material modelo y la adecuación

del marco biaxial existente . De todas formas, futuras investigaciones podrán beneficiarse del uso del marco biaxial que quedará plenamente operativo fruto del presente trabajo.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Protocolos de elaboración de probetas de material modelo

Con el material modelo base apropiado, es decir, yeso "SUPER" marca EL VOLCÁN, y arena gruesa sin finos; se crearon protocolos de elaboración de las probetas cilíndricas de 5×10 cm para poder realizar varios ensayos y así confirmar el cumplimiento de las propiedades necesarias. Las probetas creadas fueron realizadas de a tríos (usando tres moldes por vez), donde se necesitaron 333,3 gr de arena; 666,6 gr de yeso y 433,3 gr de agua, para llenar los tres moldes y tener un exceso tal de que la mezcla fuera capaz de escurrir en el contenedor al llenarlos. Se utilizaron moldes plásticos dado que era de fácil uso y lavado frente al yeso seco.

Primero, se amasó la cantidad de yeso, la cantidad de arena y se juntó en una bolsa para mezclarlas hasta obtener una mezcla homogénea. Paralelamente, los moldes se humectaron interiormente con paño estilo huaípe o similar untado en aceite de motor o parecido, para ayudar al proceso de desmolde.

Luego, en el contenedor plástico en el que se revolverá la mezcla, se echa una capa de agua y encima de ella se vierte el contenido de la bolsa y rápidamente, el resto de agua. Se revuelve con una o dos espátulas manualmente y se mezcla enérgicamente por alrededor de dos minutos hasta dejarla sin grumos.

A continuación, se vierte el contenido en las tres probetas hasta la mitad y se golpea con algún martillo o similar para generar vibración al interior, sacando las burbujas de aire y luego rellenando al ras. Para ayudar este proceso, se puede usar film plástico para que la tapa superior quede homogénea y lisa al secarse. Cabe mencionar, que las dos mitades de los moldes utilizados se cerraban mediante tornillos, pero también pueden usarse aquellos que se cierran con abrazadera.

El tiempo de fraguado es aproximadamente de cinco minutos, por lo que el proceso de revolver la mezcla es de dos minutos y el paso siguiente de llenado, inferior a tres

minutos. Sin embargo, dado que al realizar las probetas del marco biaxial, el tiempo de elaboración de probetas será mucho mayor producto del gran volumen, se consiguió un retardante de yeso de la marca SIKA (*Retardant-P*) o RP, el cual se añade en un 0,06% del gramaje de yeso. Según el manual informativo del producto, se debe añadir entre 0,01-0,02%, obteniéndose un tiempo de fraguado de 20 minutos con el último porcentaje. Sin embargo, se realizaron alrededor de diez pruebas para determinar que un 0,06% aumentaba el tiempo de fraguado de 5 a 60 minutos, necesario para la probeta del marco biaxial. Además se verificó que no modificase las curvas de tensión-deformación del material ni otras propiedades. A modo de ejemplo, con 1% de RP, el tiempo de fraguado era de 25 horas.

Luego del llenado al ras, se esperan 30 minutos hasta poder desmoldar, teniendo cuidado de no romper la probeta al golpear el molde. Finalmente, estas se llevan a horno por tres días a 40°C para obtener el curado del material y se mide masa, altura y diámetro respectivo (se toman dos diámetros y dos alturas y se calcula el promedio).

Se usan lentes de seguridad y guantes para evitar que el yeso fino ingrese a los ojos y posteriormente, se pegue a las manos en el proceso de fraguado. Para el uso del retardante, se usa también una mascarilla antipolvo. A continuación se muestran las probetas en diferentes fases del proceso de fraguado, recordar que el diámetro de las probetas es de 5 cm de diámetro.



(a) Probetas en proceso de fraguado



(b) Probetas con 30 minutos de fraguado

Figura 4.1. Probetas en diferentes bases del proceso de fraguado

4.2. Diseño experimental

Se realizaron una serie de ensayos para confirmar las propiedades necesarias y que fueran comparables o similares al material de Zegpi (2014). Los primeros ensayos fueron de compresión uniaxial simple a rotura realizado en el Laboratorio de Geotecnia Experimental de la PUC, con tasa de aplicación de tensión constante de $500 \frac{kPa}{s}$, a probetas cilíndricas de 5×10 cm de alto. La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos (donde σ_{ci} corresponde a la tensión de compresión intacta).

Tabla 4.1. Resultados ensayos de compresión simple

Ensayo	1	2	3	4	5	6	Prom.	Desv. Est.	C. Var. (%)
σ_{ci} [MPa]	7,7	8,4	8,1	9,7	7,9	8,7	8,4	1,1	13,3

El coeficiente de variación observado de 0,133 corresponde a un rango de *Variabilidad Aceptable* según los datos de resistencia en compresión no confinada de roca intacta propuesto por CODELCO (1997) por lo que es suficiente para fines de esta investigación (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Caracterización de la variabilidad de macizos rocosos (Codelco-1997)

COEFICIENTE DE VARIACIÓN	COEFICIENTE DE VARIACIÓN
0,00 a 0,05	Muy Poca Variabilidad
0,05 a 0,10	Muy Poca Variabilidad
0,10 a 0,20	Variabilidad Aceptable
0,20 a 0,35	Variabilidad Alta
0,35 a 0,50	Variabilidad Muy Alta
> 0,50	Variabilidad Extremadamente Alta

Luego, se efectuaron ensayos complementarios en una prensa que permite efectuarlos a deformación constante y medir tensiones. La deformación utilizada fue de $0,2 \frac{mm}{min}$ y de $1 \frac{mm}{min}$. En los gráficos 4.3 a 4.11, cada curva corresponde a una probeta ensayada. Cabe mencionar que alrededor de un 20% de las probetas preparadas se perdieron al ser desmoldadas por falta de aceite en el proceso de preparación o porque se rompían al golpearlas para desmoldarlas (Figura 4.2). Algunas probetas fueron ensayadas en otra prensa a $1 \frac{MPa}{s}$ de carga controlada y $1 \frac{mm}{min}$ a deformación controlada.



Figura 4.2. Probetas rotas al desmoldarse

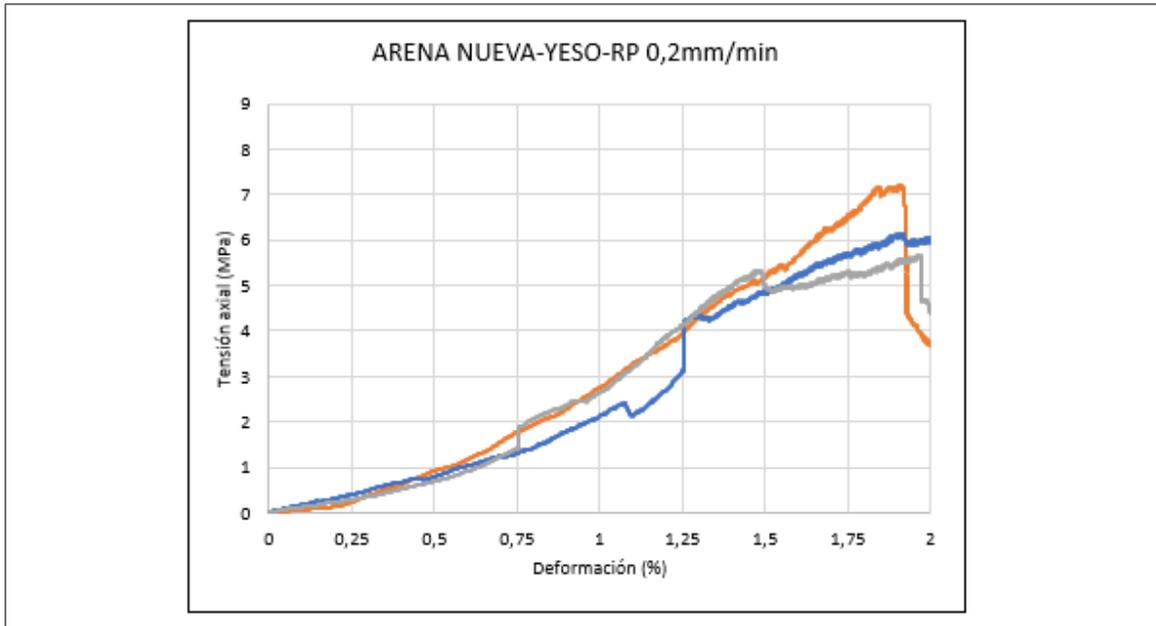


Figura 4.3. Ensayos UCS para material de arena y yeso con RP a 0,2 mm/min

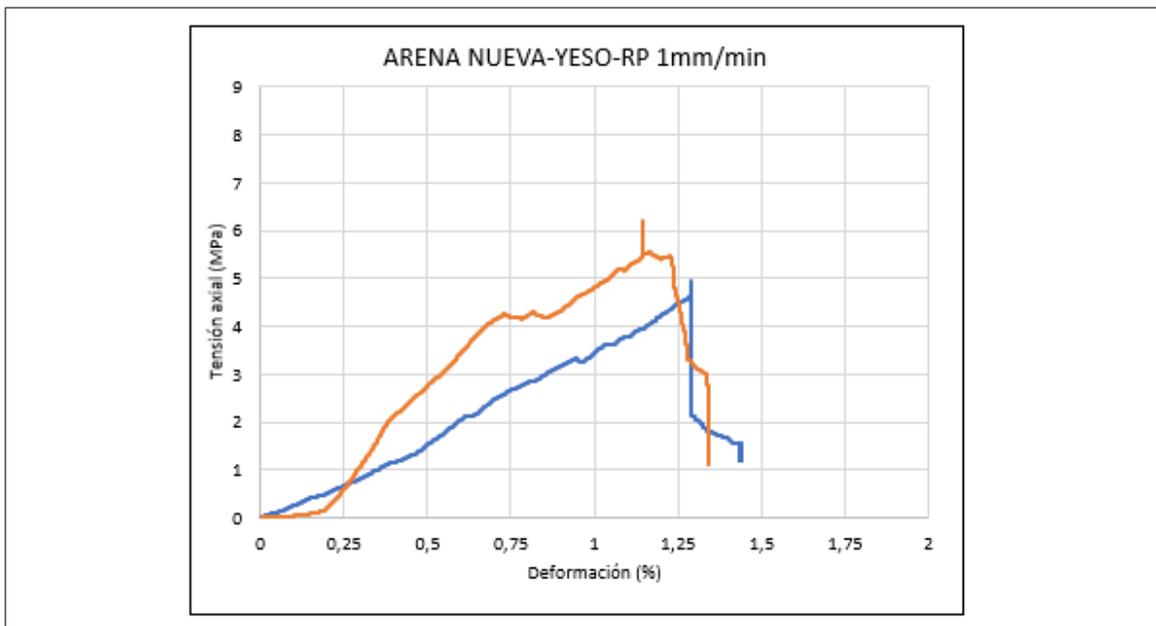


Figura 4.4. Ensayos UCS para material de arena y yeso con RP a 1,0 mm/min

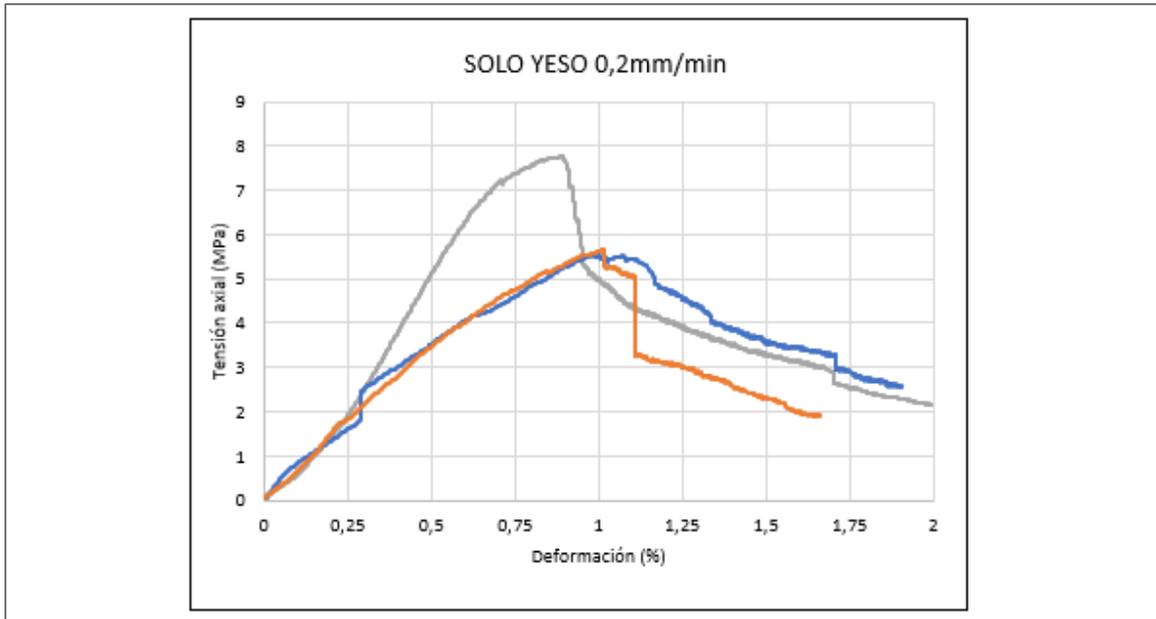


Figura 4.5. Ensayos UCS para material de yeso a 0,2 mm/min

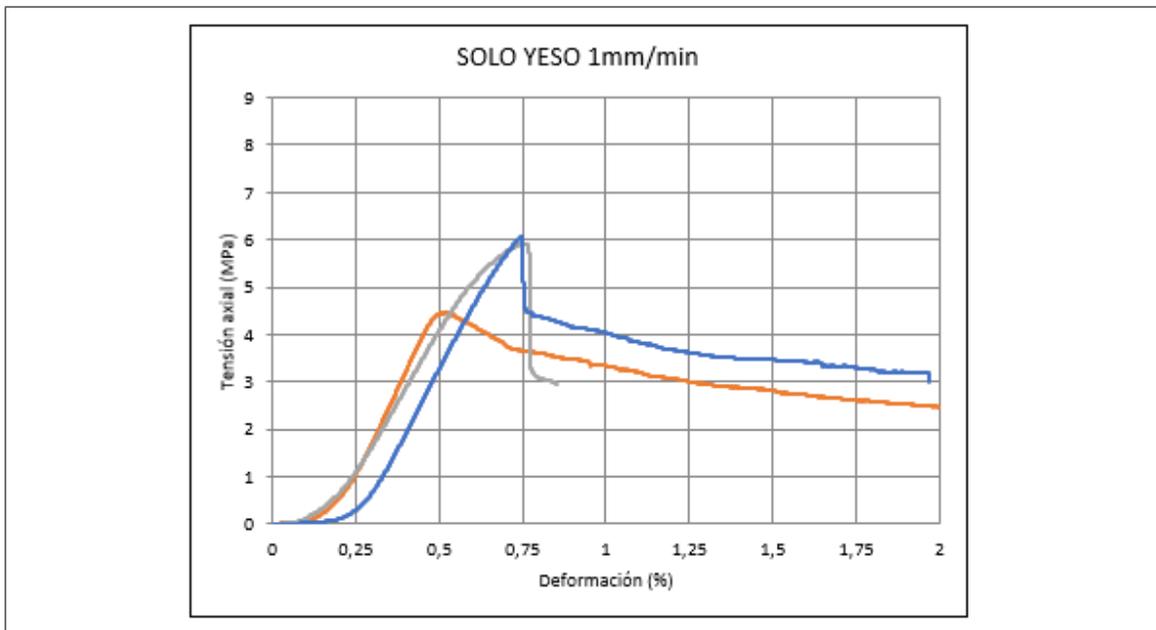


Figura 4.6. Ensayos UCS para material de yeso a 1,0 mm/min

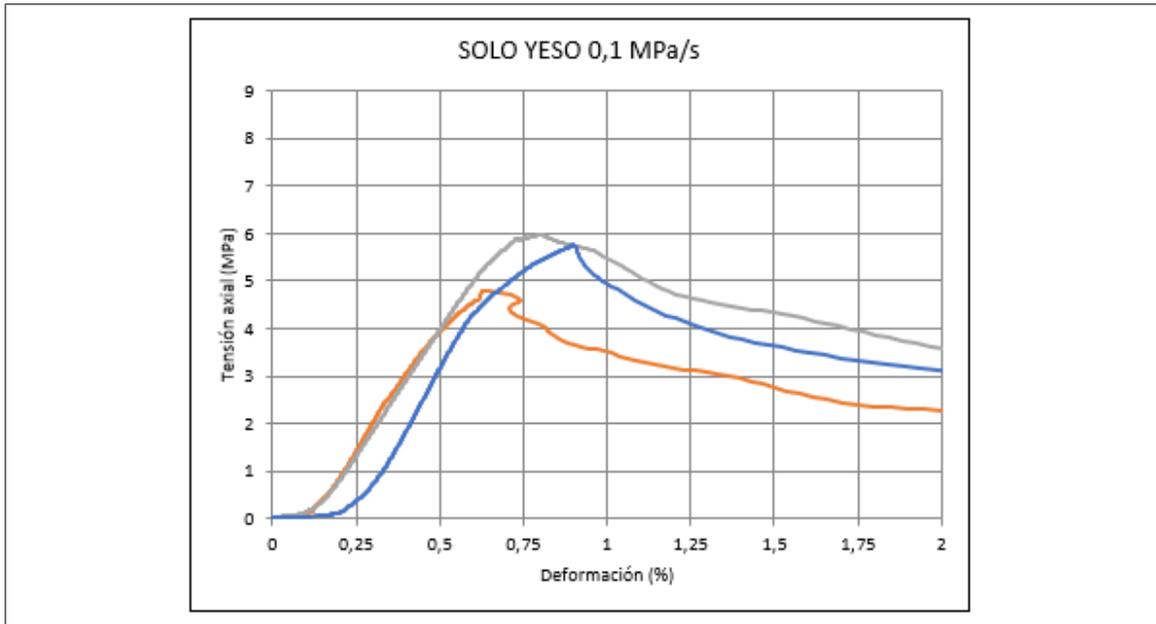


Figura 4.7. Ensayos UCS para material de yeso a 0,1 MPa/s

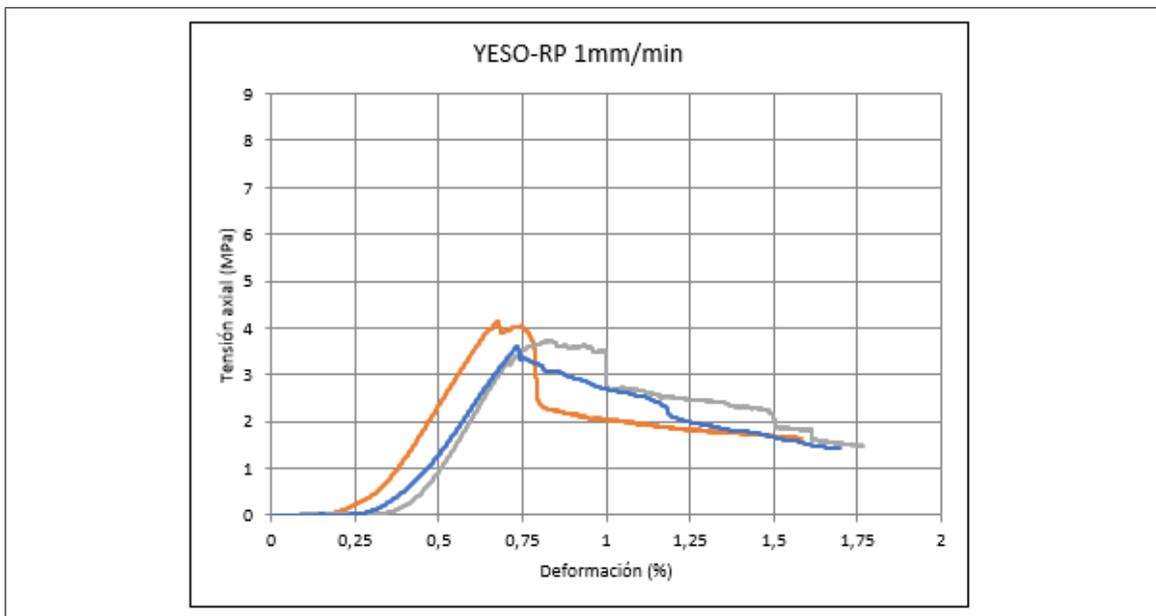


Figura 4.8. Ensayos UCS para material de yeso con RP a 1,0 mm/min

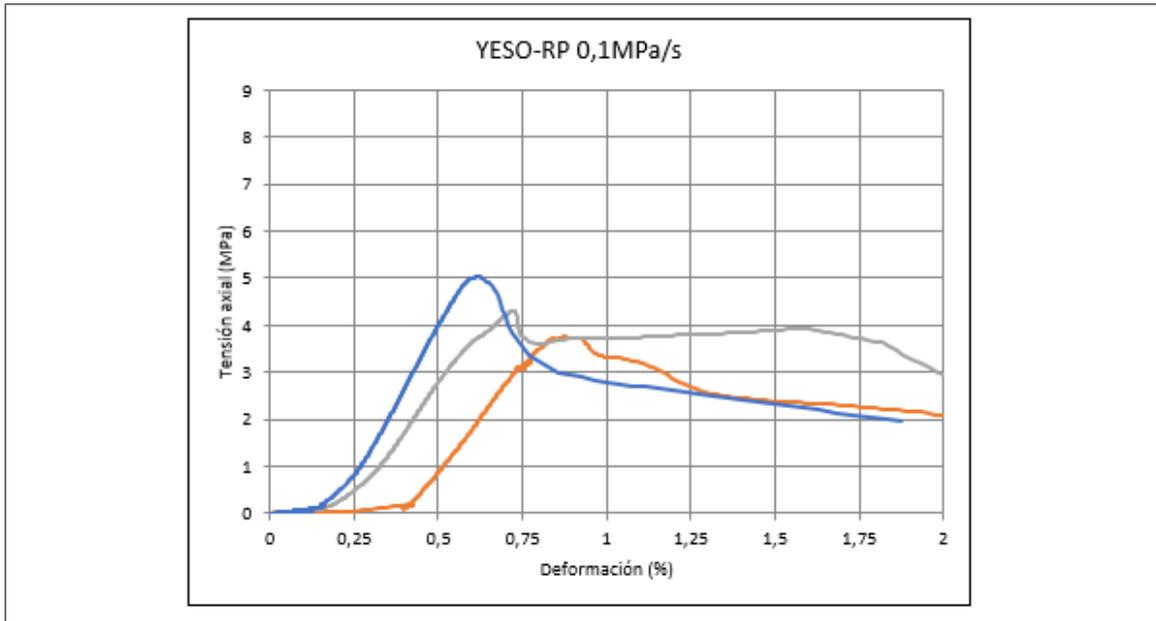


Figura 4.9. Ensayos UCS para material de yeso con RP a 1,0 MPa/s

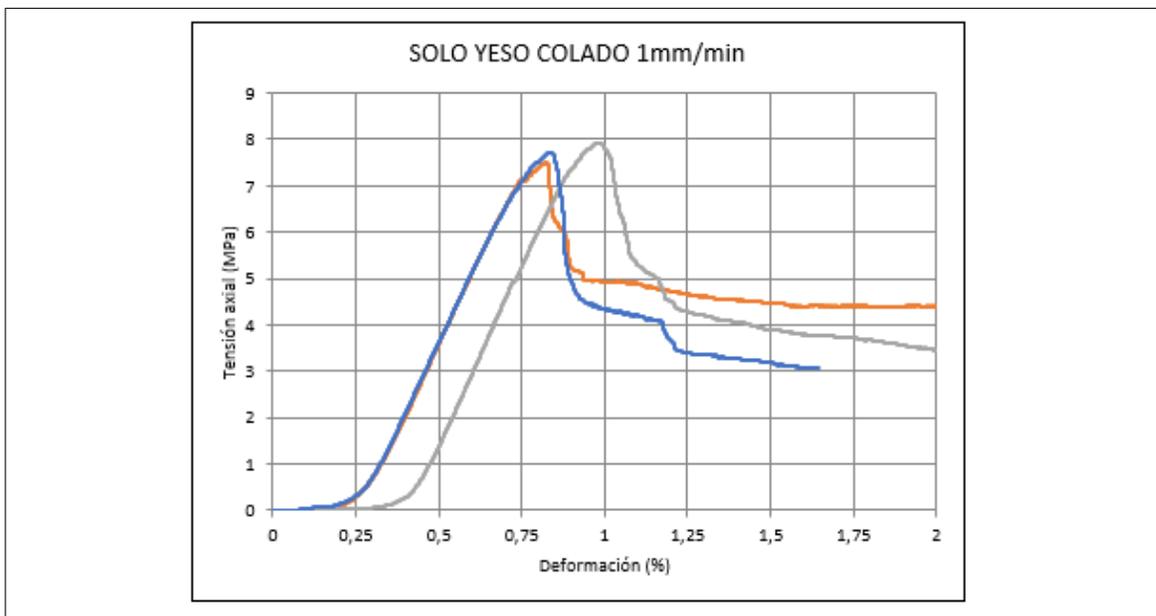


Figura 4.10. Ensayos UCS para material de yeso colado a 1,0 mm/min

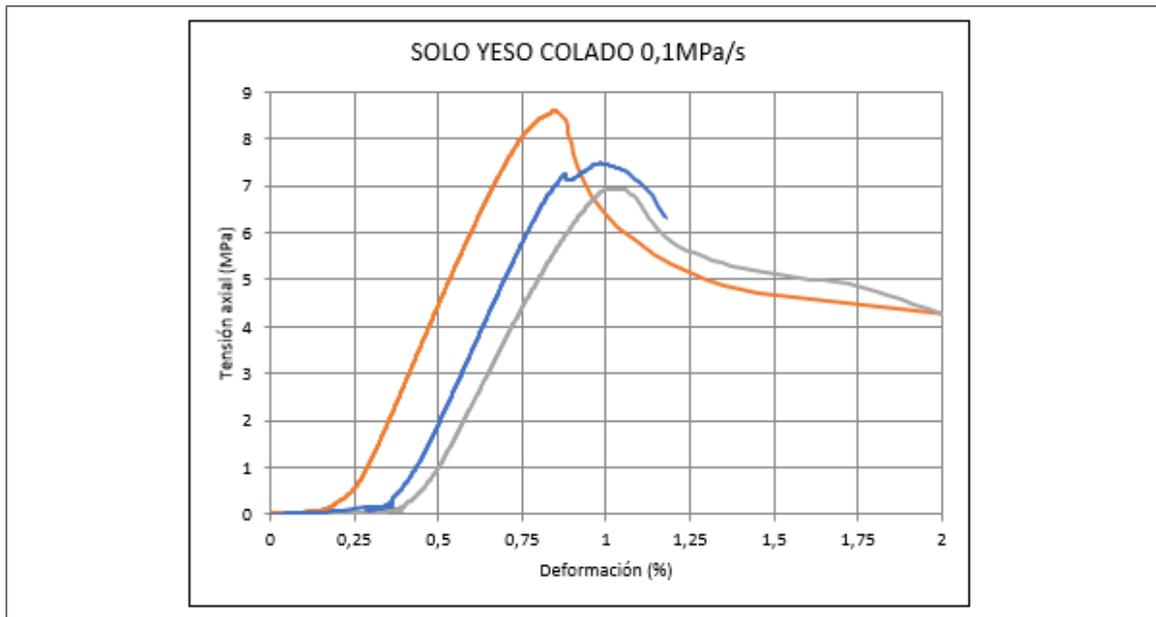


Figura 4.11. Ensayos UCS para material de yeso colado a 1,0 MPa/s

Si bien las probetas con arena, yeso, agua y RP, mantuvieron la proporción mencionada, se efectuaron ensayos en probetas sin arena con el objetivo de explorar el efecto en el aumento de la fragilidad (Figuras 4.5 a 4.9). En estas probetas, solo se aumentó la cantidad de yeso, agua y/o RP manteniendo las proporciones hasta cubrir el volumen de los moldes y el suplemento que queda en el molde. Aquellas probetas realizadas con yeso colado, tienen como única diferencia en que el yeso se pasó por un colador de cocina para separar las partículas y así mejorar el contacto con el agua.

Se puede concluir de las Figuras 4.3, 4.4, 4.8 y 4.9, que el retardante RP disminuye la resistencia máxima del material y que la presencia de arena en la muestra lo hace más dúctil y disminuye la resistencia máxima. A medida que la velocidad del ensayo aumenta, el material es más frágil, es decir, se alcanza la resistencia máxima a un menor porcentaje de deformación y con una caída de tensiones más abrupta. Por último, el yeso colado aumenta la resistencia máxima en alrededor de un 30%, tal como puede verse en la Figura 4.10.

La densidad del material modelo de arena-yeso-agua-RP corresponde a $1,6 \frac{g}{cm^3}$, mientras que las de yeso-agua-RP es de $1,1 \frac{g}{cm^3}$.

Con el objetivo de poder calcular el módulo de Poisson y módulo de Young, se realizaron ensayos de velocidades de compresión (P) y corte (S) con equipo de ultrasonido. Este equipo pertenece al Departamento de Construcción PUC y consta de un osciloscopio digital y pulsador/receptor ultrasónico, par de transductores de onda S Panametrics V150 con frecuencia de 150 Hz mediante disposición de transductores correspondiente a transmisión directa. En la Figura 4.12 se muestra el equipo utilizado y los transductores.



Figura 4.12. Equipo ultrasonido

Para usar el dispositivo, es necesaria su calibración con el material de referencia que viene en el equipo. Posteriormente, se toman las siguientes mediciones:

- (i) Se toma una lectura de tiempo de viaje de onda P más las dos placas de tungsteno que se ubican en cada borde la probeta. El tiempo de viaje a través de las placas es de $0.14 \mu s$ para onda P.
- (ii) De la misma forma, se procede con las ondas S, solo se varía el dispositivo para que envíe una onda de corte. Se considera que el tiempo de viaje de las placas de tungsteno cambia a $0.25 \mu s$.

Sin embargo, dada la alta variabilidad en el tiempo de viaje por las probetas (recordar que la dimensiones eran de 11 cm de alto y 5 cm de radio) que fue del orden de milise-gundos, se obtuvo una alta variabilidad en el valor de las velocidades de compresión y de corte. Se espera poder analizar el estudio de estas propiedades con las probetas grande para disminuir la variabilidad.

A partir de las velocidades de compresión y de corte, es posible calcular módulo de Poisson y de Young, respectivamente, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot [V_p^2 - V_s^2]} \quad (4.1)$$

$$E = 2 \cdot \rho \cdot V_s^2 \cdot (1 + \nu) \quad (4.2)$$

Tabla 4.3. Resultados ensayos de velocidades de compresión y de corte

Unidades	μs	μs	cm	m/s	m/s	-	kg/m ³	GPa
Ensayo	Tiempo Vp	Tiempo Vs	Largo	Vp	Vs	Poisson	ρ	E
1	43,9	64,5	10,1	2.289	1.558	0,07	13.547	7,0
2	47,0	71,5	10,2	2.172	1.428	0,12	13.199	5,9
3	43,9	68,8	10,0	2.278	1.453	0,16	12.865	6,3
4	51,2	81,6	10,0	1.957	1.228	0,18	13.605	4,8
5	44,4	74,0	10,2	2.302	1.381	0,22	13.041	5,9
6	46,2	73,6	10,2	2.208	1.386	0,17	13.349	5,8
7	49,5	74,0	10,2	2.057	1.376	0,10	12.961	5,4
8	44,7	68,5	10,3	2.304	1.504	0,13	13.145	6,7
Prom.	46,9	70,6	10,2	2.179	1.450	0,14	13.214	6,0
Desv. Est	3,3	5,6	0,1	144,2	117,5	0,05	268	0,7
C. Var. (%)	6,9	7,9	1,1	6,6	8,1	34,2	2	11,6

De la tabla 4.3, es posible determinar los órdenes de magnitudes de módulo de Poisson y módulo de Young, aún cuando los coeficientes de variación pueden ser altos, sobre todo en Poisson, por las razones ya mencionadas. Sin embargo, se puede concluir que en promedio, el módulo de Poisson es 0.14 y el Módulo de Young es 6,0 GPa . Si se compara este último valor al de las curvas de tensión-deformación de los gráficos 4.3 a 4.11, donde el valor oscila entre 1 y 1,5 GPa, se puede decir que es del orden de cuatro veces mayor. En otras palabras, el módulo de Young dinámico del ensayo de velocidades de corte y compresión es cuatro veces mayor al módulo de Young estático del ensayo UCS, lo cual es razonable dado que ambos ensayos trabajan a diferentes niveles de deformación muy distintos.

4.3. Análisis de resultados del material modelo

Las verificaciones del material modelo se centraron en la curvas de tensión-deformación, tensión máxima y módulo de Young. La Tabla 4.4 muestra los rangos requeridos y el valor obtenido.

Tabla 4.4. Requerimientos de material modelo y resultados obtenidos

Material	Tasa de ensayo	σ_{ci} (MPa)	ε_{fmax} (%)	E/σ_{ci}
Solo Yeso	1mm/min	5.52	0.67	247.8
Solo Yeso	0,2mm/min	6.32	1.00	122.6
Solo Yeso	0,1MPa/s	5.55	0.78	193.7
Solo Yeso RP	1mm/min	3.84	0.75	289.1
Solo Yeso RP	0,1MPa/s	4.41	0.74	278.2
Arena Yeso RP	0,2mm/min	5.76	1.93	87.7
Arena Yeso RP	1mm/min	6.45	1.23	93.4

De la tabla anterior, puede notarse que E/σ_{ci} de solo Yeso y RP se ajusta muy bien a los valores requeridos, de entre 250-500; y así también, las curvas de tensión-deformación en su comportamiento frágil es de 0.75% de deformación para tensión de rotura aproximadamente. Las tensiones máximas se ajustan muy bien al material deseado y son compatibles con las capacidades del marco biaxial que se verá en el capítulo 5.1.

Otro factor importante a considerar corresponde al valor de ε_{ult} que debía estar entre 1-5%. Ambas prensas usadas para este trabajo pararon los ensayos a la deformación del protocolo del ensayo y no se alcanzó a llevar a la falla completa las probetas. Sin embargo, en los gráficos de los ensayos (Figuras 4.3 a 4.11), se ve puede confirmar que todas las curvas alcanzan deformaciones que están dentro del rango de las buscadas.

En conclusión, el material modelo sólo con yeso y retardante (RP) es adecuado para representar un material de roca dura frágil por analogía, a escala de laboratorio. Con el material modelo ya desarrollado, es posible idear metodologías para la elaboración de probetas grandes para el marco biaxial. La elaboración de una probeta con material análogo presenta la ventaja de que es una muestra representativa de la roca intacta, a diferencia de muestras naturales grandes de roca, las cuales necesitan pruebas *in situ* y de difícil extracción. Además, para futuras investigaciones, se pueden crear diferentes configuraciones a gusto, a diferencia del uso de muestras naturales de roca.

En el capítulo siguiente, se describirá el equipo a utilizar, el protocolo de elaboración de probetas, instrumentación y montaje en el marco biaxial.

5. PREPARACIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y ENSAYO DE PROBETAS BIAXIALES

5.1. Características del marco biaxial

El ensayo de marco biaxial empleado para esta investigación permite ensayar una probeta de forma prismática mediante la carga controlada de dos ejes perpendiculares a la vez. En la Figura 5.1, puede verse la vista en planta del ensayo. El marco está diseñado para ensayar probetas de $120 \times 60 \times 19$ cm. Denominaremos carga de confinamiento a la que se aplica en las dos caras laterales de 120×19 cm, como carga desviadora a la que se aplica en una cara frontal de 60×19 cm, mientras que la otra cara frontal de 60×19 cm es fija. Por abajo, también tiene una cara fija donde actúa la gravedad y por arriba la cara es libre.



Figura 5.1. Vista general marco biaxial con probeta en él

La cara frontal fija está fabricada con un bloque de acero relleno con una mezcla de 17 L de gravilla, 12 L de arena, 9,6 kg de cemento Portland y 5 L de agua, mezclado manualmente e introducido en bloque y vibrado hasta que no hayan burbujas a 1450 Hz, otorgando una resistencia estimada de $350 \frac{Kg}{cm^2}$. Las paredes del bloque son de planchas de acero carbono 1020 de 5 mm de espesor solado al arco con soldadura 6011.

Las caras laterales son cargadas por ocho placas metálicas de $19 \times 14 \times 2,5$ cm cada una, las cuales son empujadas por gatos hidráulicos de capacidad de 5 ton mediante pistón de diámetro 2,5 cm. La cara frontal de carga, tiene cuatro placas de $19 \times 14 \times 5$ cm empujadas por gatos hidráulicos de capacidad de 25 ton mediante pistón de diámetro de 5 cm. Todos los pistones tienen presión máxima de 700 bares (10.000 psi).

Las placas metálicas, están sujetas por cilindros metálicos y encajados en el marco biaxial, tal como se aprecia en la Figura 5.1.

Existen dos bombas manuales que usan aceite como fluido en el interior de ellas. Una está conectada por una manguera a un manifold que conecta a tres salidas: una a cada lado de confinamiento y la restante, a otro gato hidráulico de 5 ton. En cada lado de confinamiento, salen ocho mangueras de presión máxima de 10.000 psi, que cargan a los pistones y así a las placas de metal. La Figura 5.2 presenta el esquema descrito: mangueras, manifold, bomba y gatos hidráulicos. Además, en color verde y gris dentro de la probeta, se muestran elementos de instrumentación que se describen más adelante. Se indica también el sistema de coordenadas será utilizado para toda la descripción y análisis de resultados.

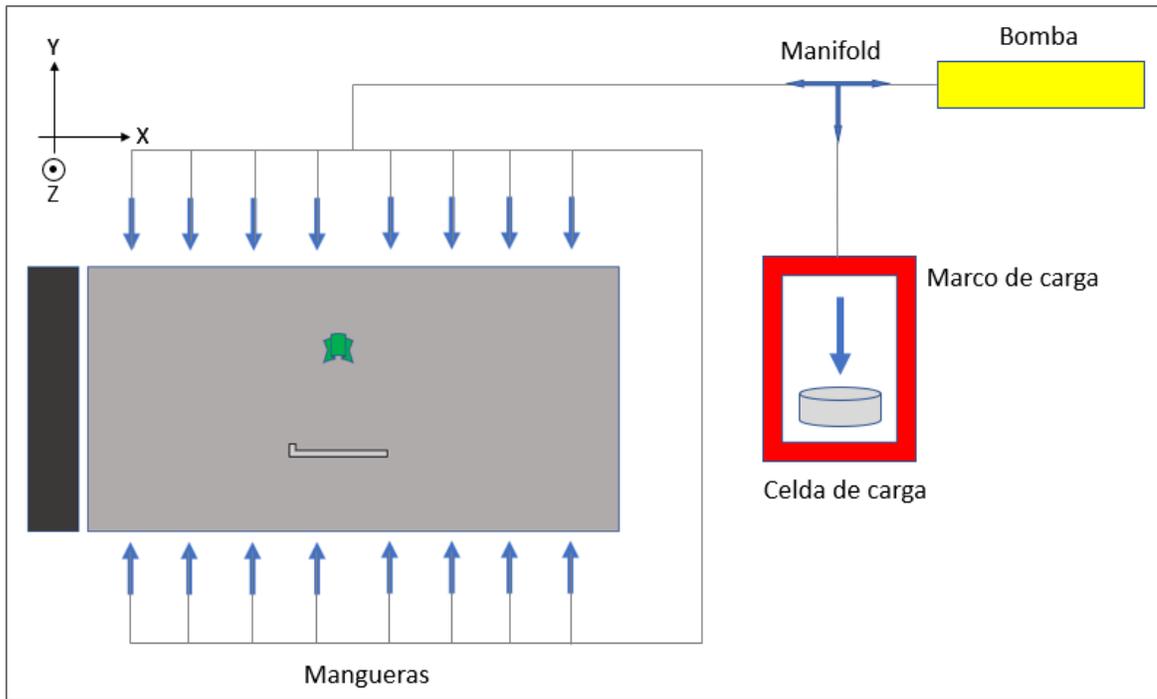


Figura 5.2. Esquema de cargas de confinamiento

La segunda bomba hace un trabajo similar, pero solo que tiene doble salida. Una salida da a una manguera que está conectada a otro gato hidráulico de 25 ton y la otra, a un manifold que tiene cuatro mangueras de salida a los cuatro pistones de 25 ton (Figura 5.3).

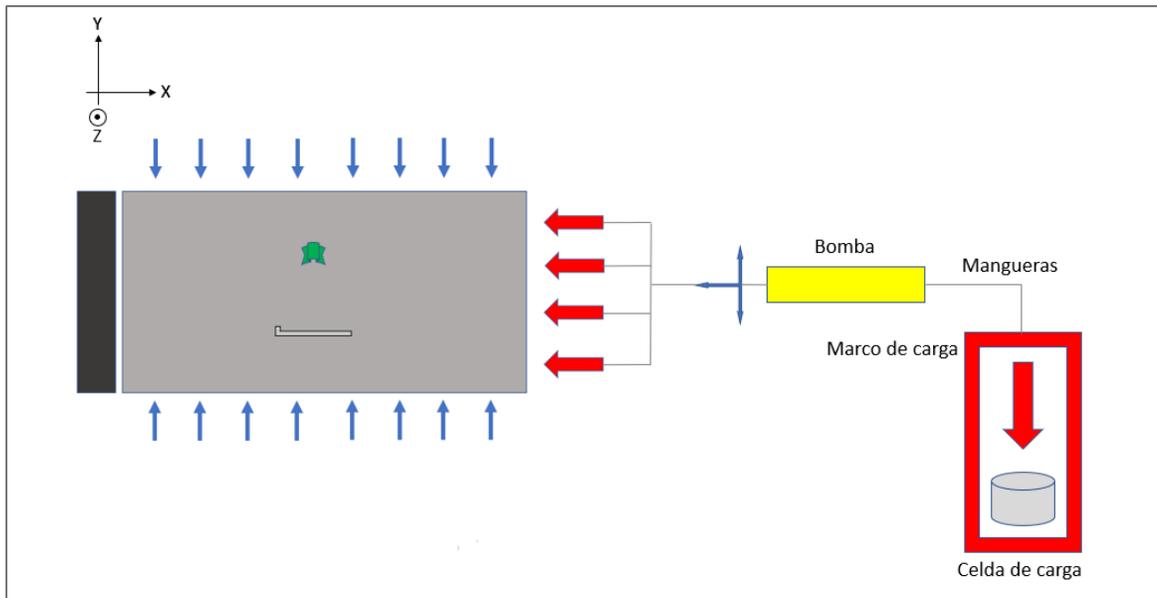


Figura 5.3. Esquema de cargas desviadoras

De manera resumida, una bomba está conectada con los pistones de carga de confinamiento y la otra bomba, a los pistones de carga desviadora. En cada bomba, existe una manguera conectada a un gato hidráulico, de 5 y 25 ton, los cuales están insertos en una celda de carga y dentro de un marco de carga. Cada vez que se cargan los gatos hidráulicos, la celda de carga es capaz de registrar esta carga a través de un sistema de adquisición de datos.

5.2. Elaboración de probetas

La elaboración de probetas prismáticas diseñadas en el marco biaxial, requieren gran trabajo y coordinación previa e *in situ*. Hay que considerar que por razones de espacio dentro del laboratorio y facilitar la limpieza del yeso dado su rápido fraguado, estas se realizaron en el patio del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica (DIEG), donde se tenía a disposición manguera con agua y desagüe competente.

Para ello, el molde está hecho de perfiles Cintac $200 \times 500 \times 3$ mm de acero ASTM A 36, que se cierra con tuercas, donde en su interior puede fabricarse una probeta de $120 \times 60 \times 20$ cm, teniendo un volumen de 144 L (Figura 5.4). Sin embargo, dado que las placas miden 19 cm, existe una holgura de un centímetro donde la probeta no tiene contacto y que generó la ocurrencia de fallas locales no deseadas durante algunas pruebas preliminares. Para evitar esto, se decidió colocar en el interior del molde una placa de 1 cm de material MDF impregnado con vitrificante poliuretano como suple para reducir esta holgura.



Figura 5.4. Molde con probeta adentro

Respecto a la fabricación de la probeta, primero se deben disponer de ocho sacos de 25 kg de yeso SUPER marca "El Volcán". Se recomienda tenerlos ya abiertos por la parte superior o vertirlos sobre cubetas de 25 L. Además, tener contenedores plásticos de 200 L con agua y cubetas dispuestas para ello. Es importante no mezclar las cubetas durante la experiencia. Tener a disposición el polvo de RP en contenedores con tapa para uso exclusivo. Es importante aceitar todo el molde en su interior, tanto en paredes laterales como en la base, verificar a través de uso de nivel que el molde esté derecho en sus cuatro paredes.

Para fabricar la mezcla, se utilizó una betonera de 80 L y un vibrador de concreto. Se debe tener acceso a una salida de agua y manguera cercana, un listón de madera de 2x2” para enrasar y un alargador conectado a corriente eléctrica con al menos dos conexiones. Se recomienda tener el molde de la probeta sobre un pallet para que luego sea más fácil moverla al carro transportador con ayuda de una grúa horquilla.

Teniendo los materiales a disposición, se procede a la elaboración de la probeta entre dos personas. Una de ellas realiza todo el proceso, mientras la otra se encarga de vibrar la mezcla vertida dentro del molde en todo momento.

Se enciende la betonera y se coloca en su interior agua para humedecer todo el interior de la betonera y se empieza a colocar yeso y el retardante RP. Dado el volumen de la betonera en movimiento, se separó toda la mezcla en cuatro partes, es decir, se fue colocando agua, yeso y RP hasta tener un cuarto de la mezcla total y cuando la mezcla ya estaba homogénea se vertía en el molde. Es conveniente dosificar mayor retardante RP en el comienzo del ensayo que en el final, para que el yeso no comience a fraguar dentro de la betonera. Inmediatamente, la otra persona comienza a vibrar igual que hormigón, entrando la sonda hasta el fondo y sacándola lentamente. Es importante pasar y vibrar bien en las esquinas y orillas del molde. Puede usarse la pala para verter las grandes cantidades de yeso en la betonera. Este proceso dura entre 45 y 50 minutos, dejando un pequeño tiempo para el lavado de materiales.

El proceso de confección de mezcla se realiza cuatro veces hasta llenar la probeta, momento en el que se usa el listón de madera para enrasar y dejar la parte superior lo más liso y homogéneo posible. Dejando lista la probeta, se procede a lavar rápidamente el exceso de mezcla dentro de la betonera con ayuda de la manguera. No es posible dejarla limpia totalmente, pero pasado unos días, puede usarse un martillo para golpear lo que queda de yeso, rompiéndose fácilmente debido a su fragilidad. Los otros elementos también deben ser limpiados con agua.

La probeta necesita 14 días a temperatura ambiente para su curado. Finalizado este tiempo, con ayuda de la grúa horquilla se traspa al carro transportador, cuyas medidas especiales servían para bajarlo a través del ascensor hacia el subterráneo donde se encuentra el Laboratorio de Geotecnia Experimental PUC con el marco biaxial. Ahí, se traspa al carro especial y adaptado para el ensayo (Figura 5.5).



Figura 5.5. Carro habilitado para elevar probeta dentro del marco biaxial

El carro especial tiene la capacidad de resistir y levantar hasta 350 kg, posee un pequeño marco en su interior para nivelar la probeta y ajustarla al ensayo. Además, tiene extensión para poder manejarse a distancia, es decir, fuera del marco biaxial. Tanto el marco como la extensión son en perfil laminado $50 \times 50 \times 4$ mm en acero carbono ASTM A36 y pernos $1/2''$ grado 6. Cuando la probeta ya está sobre este carro, se deben sacar las tuercas y las paredes laterales. Se ensaya con la placa metálica inferior y la placa de 1cm de supe. Por último, se coloca un marco del mismo material anterior, para que al elevar el carro con la probeta, las placas metálicas que ejercen la carga, queden en contacto homogéneo luego de nivelar la probeta.

En la Figura 5.6, puede verse la probeta sin las paredes laterales del molde, con el marco interior y ya pintada (ver capítulo 5.3 para una descripción más completa).



Figura 5.6. Probeta en carro habilitado con molde interior

5.3. Instrumentación

La instrumentación cumple un papel clave en el análisis de los datos proveniente de los ensayos en el marco biaxial. Si bien el material debe cumplir varias necesidades físicas y mecánicas, debe ser compatible con los mecanismos de instrumentación, refiriéndose a la capacidad de registrar y almacenar los datos provenientes del ensayo.

Al aplicar presión por una bomba, se transmite a los gatos hidráulicos, en particular, aquellos que están ubicados en los marcos de carga. En estos marcos hay instaladas celdas de carga que se conectan a un digitalizador marca HBM, el cual está conectado a un computador mediante el *software* CATMAN. Este *software* es capaz de leer la carga de la celda de carga y mostrarla en diferentes interfaces. Este ejercicio se realiza para la carga de confinamiento y carga desviadora, según se muestra en las Figuras 5.2 y 5.3.

Teniendo claro la interpretación y almacenamiento de datos de cargas, es necesario obtener los desplazamientos. Para esto, se ocupa en el eje \hat{x} de la probeta un dispositivo llamado *Epsilon* que mide desplazamientos máximos de 2,5 cm con precisión milimétrica. En el eje \hat{y} de la probeta, se ocupa un transductor de desplazamiento, que es capaz de medir

máximo 10 cm también con precisión milimétrica. Ambos dispositivos son conectados al HBM. Para colocar el dispositivo *Epsilon*, se debe fijar la ubicación y marcar los lugares donde estarán las patas del dispositivo.

Con ayuda de un taladro ligero, se generan las entradas y utilizando una pistola con silicona caliente, se adhiere el *Epsilon*. Este proceso ayuda a que sea fácil de instalar, quitar y no daña el elemento. De manera parecida, se coloca el transductor de desplazamiento. Se tienen que colocar cuatro tornillos, dos del elemento y dos del tope del transductor, con ayuda de un destornillador eléctrico. Primero, se instala y fija el tope. Segundo, el soporte del transductor para poder ingresarlos por las canaletas que trae y se cierran los dos tornillos que tiene (este proceso, se realiza una vez que la probeta este dentro del marco biaxial)

En la Figura 5.7, puede observarse una vista en planta de la probeta con los tres elementos de instrumentación descritos (*Epsilon*, transductor de desplazamiento y tope de este último), además, una pantalla LED extra que tiene el cronómetro del *software* que visualiza los datos de almacenamiento.

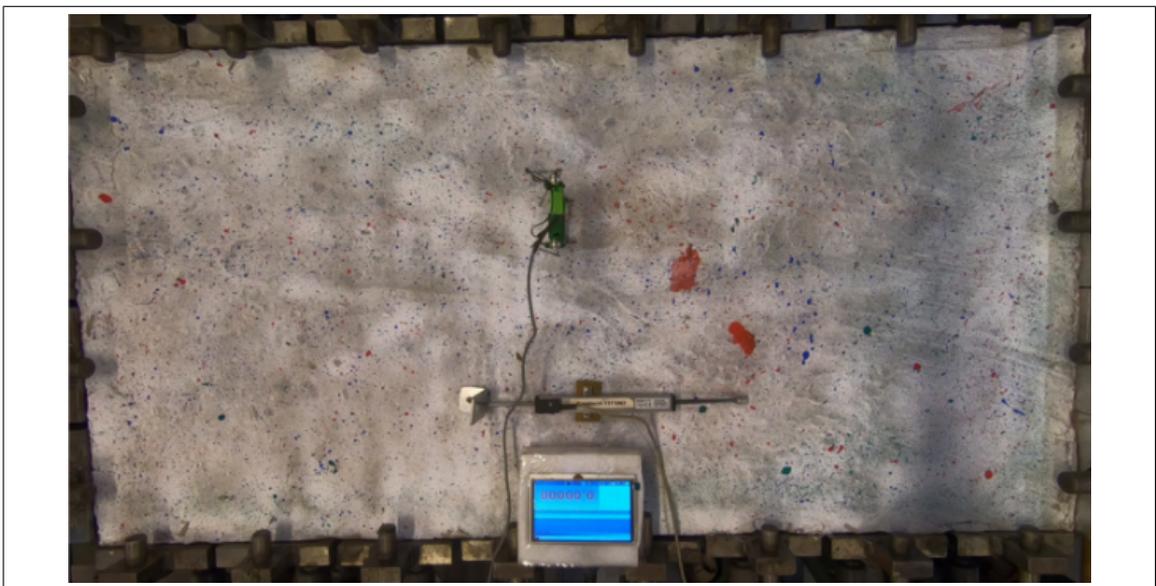


Figura 5.7. Vista en planta de probeta con elementos de instrumentación

Teniendo cuatro entradas al HBM, es posible en CATMAN mostrar gráficos en tiempo real del ensayo de carga del marco biaxial. El programa se puede configurar para mostrar en el eje \hat{x} la carga, sea de confinamiento o desviadora, y en el eje \hat{y} los desplazamientos (*Epsilon* y transductor de desplazamiento). Además, es posible ver un cronómetro con el tiempo en vivo del ensayo. Cabe destacar que los dispositivos se configuraron para muestrear a 5 Hz. Finalmente, se pueden exportar los resultados en un archivo *.txt* para posterior trabajo e interpretación de datos.

Además, en la Figura 5.7 pueden verse manchas de pintura de diferentes colores. Luego del proceso de curado de cada probeta, esta se pinta con aerosol en spray color blanco mate u opaco, para luego añadir con alguna herramienta (en este caso se utilizó un cepillo de dientes, dando muy buenos resultados), pintura de color verde, roja y azul. Esto se realiza con el fin de generar contrastes visuales para poder aplicar la técnica de correlación de imágenes digitales de forma de inferir el campo de desplazamiento a través de toda la probeta. Para el éxito de la técnica se requiere una iluminación adecuada mediante focos de luces que ayuden a iluminar de manera homogénea la probeta y grabar con algún dispositivo de adquisición de imágenes. En esta investigación se utilizó una cámara GoPro 6 BLACK para grabar a 2.6k, con 23 cuadros por segundo.

Cada video es convertido a fotos en formato **.tiff* usando 2 cuadros por segundo de captura. A través del programa MatchID, es posible calcular los desplazamiento a través del movimiento relativo de los pixeles entre cada cuadro o fotografía. Es importante el uso de focos de luces de gran potencia en el ensayo, dado que las luces halógenas débiles generan sombra y luz a alta velocidad, que no es tan perceptible por el ser humano, sin embargo, arroja bastante movimiento de pixeles entre fotografías, dando resultados erróneos.

Finalmente, el programa es capaz de arrojar visualizaciones 2D de la probeta, tanto para desplazamientos como para deformaciones, para ser comparadas frente a las lecturas directas que son obtenidas a través de la instrumentación local descrita.

5.4. Limitaciones y recomendaciones

Existen muchos factores a tener en cuenta en el ensayo de marco biaxial, sin embargo, se ha intentado mecanizar el proceso y adaptarlo para que no sea tan engorrosa la ejecución y montaje de cada ensayo.

Dentro de todo el sistema del ensayo, siempre hay que estimar antes las presiones y/o desplazamientos esperados para no sobrepasar las capacidades de los elementos. Dependiendo del fabricante, las presiones pueden estar en bares, psi o megapascales. A continuación, se indica los límites máximos de cada elemento considerado en el ensayo:

- (i) Mangueras admiten una presión máxima de 10.000 psi (o 68.95 MPa).
- (ii) Pistones admiten un desplazamiento máximo de 6 cm y capacidad de 5 ó 25 ton.
- (iii) Bloque de reacción de hormigón tiene capacidad máxima de $350 \frac{kg}{cm^2}$ (34.32 MPa).
- (iv) Bombas tienen capacidad máxima de 1.000 bares (100 MPa).

Dado los resultados del capítulo 4.4, la presión requerida para fracturar la probeta es alrededor de un $\frac{1}{7}$ de la presión que controla la capacidad del equipo, correspondiente al bloque de hormigón. De esta manera, no deberían existir problemas al momento de ensayar las probetas del material modelo en el marco biaxial.

Sin embargo, las mangueras resisten una presión máxima de 68,95 MPa, multiplicado por el área del pistón de radio 5 cm, se obtiene una fuerza de 135,38 kN (13.804,91 kgf). Esta fuerza puede verificarse en el momento mismo del ensayo, a través de la celda de carga conectada al HBM. Además, dado que el área de las placas en la zona de contacto del gato hidráulico es de 266 cm^2 (19x14 cm), la presión máxima por cada costado que recibe la probeta es de 5,1 MPa. Este valor no puede sobrepasarse, en caso contrario las mangueras podrían estallar soltando aceite o generarse fugas violentas en las conexiones. Finalmente, el bloque de hormigón no limita el ensayo, sino más bien las mangueras.

Dentro de los cuidados especiales que hay que tener en el momento de la confección de la probeta, se considera de gran importancia la vibración, dado que la mala ejecución de la técnica de vibrado (bajar hacia la mezcla rápido y levantarlo lento), puede generar burbujas en la mezcla disminuyendo en gran medida la resistencia del material. En otras palabras, la función e importancia de la vibración radica en la eliminación de las burbujas que suben y se eliminan, teniendo mayor cuidado en las esquinas y bordes del molde.

Ya se mencionaron las grandes cantidades de cada material que necesita en la realización de cada probeta, es por esto que otra fuente de error se da al no respetar las proporciones de los materiales al colocarlos en la betonera. Por ello se sugiere separar equitativamente los materiales dependiendo del volumen de la betonera a utilizar con anterioridad, antes de iniciar la confección de la probeta. De la misma manera, se deben añadir los materiales en medida que la betonera los vaya mezclando. Si luego de separar en cuatro partes, por ejemplo, se añade todo el yeso de esa cuarta parte, la betonera expulsa cierta cantidad de yeso, afectando la proporcionalidad buscada. Se sugiere por cuarta parte añadir un poco de agua, dejar que la betonera mezcle, añadir un poco de yeso, un poco de RP, luego otro poco de agua y repetir hasta que en la betonera, la mezcla esté homogénea y luego verterla en el molde.

5.5. Montaje probeta en marco biaxial

En el capítulo 5.2, se describió el proceso de la elaboración de probetas, desde su confección hasta el momento en que se encuentra la probeta en el carro adaptado para el marco biaxial. Tal y como se ve en la Figura 5.5, la probeta debe quedar centrada en el carro para ingresarlo por debajo del marco. El carro tiene una manilla en el extremo que queda fuera del marco, que al bajarla, la probeta sube, lo que simplifica el proceso de posicionamiento de la probeta. Luego, se realiza el proceso de instrumentación descrito en el capítulo 5.3 para finalmente, centrar y dejar la probeta lista. Esto incluye la nivelación de cada lado de la probeta, con los elementos que incorpora el carro, con tal de dejar una

separación mínima entre la probeta y las placas de acero, sin perder la nivelación respecto de la horizontal.

Luego, se conecta el *Epsilon* y transductor de desplazamiento al HBM, se instala y conecta la pantalla LED a corriente y computador. Cabe aclarar que solo es necesario revisar las bombas, celdas de carga y marco de carga, ya que estos no se extraen entre ensayos. Se inicializa el *software* de adquisición CATMAN, introduciendo las configuraciones iniciales a los canales de adquisición del *Epsilon*, del transductor de desplazamiento y de las celdas de carga para comenzar el ensayo.

Finalmente, la probeta está en condiciones de ser ensayada dentro del marco biaxial habilitado para las condiciones mencionadas. El equipo puede otorgar una presión de hasta 5.1 MPa en cada lado de la probeta, con deformaciones máximas de 6 cm en cada eje, las cuales pueden ser contrastadas con la correlación de imágenes

5.6. Ensayo efectuados

A continuación, se describirán cuatro ensayos realizados con tal de aprobar la habilitación del marco biaxial para las capacidades descritas. En cada uno de ellos, fueron probadas las mangueras, bombas y corregidos los errores instrumentales y de ejecución. Se utilizaron transductores de desplazamiento para medir deformaciones en ambos ejes, además de monitoreo de las cargas a través de CATMAN y HBM, descrito en el capítulo 5.3.

El primer ensayo se realizó con el fin de probar el marco biaxial y el comportamiento general, tanto de mangueras, bombas e instrumentación. El segundo ensayo se realizó con una probeta homogénea corrigiendo los errores de la primera, donde se detectaron problemas con las placas metálicas, pues estas placas eran de menor altura que la probeta, creando patrones falla indeseadas. Además, se concluyó que las luces halógenas de laboratorio no eran suficientes para la aplicación de la técnica de correlación de imágenes, por lo que fue necesario dos añadir focos extras de alta potencia eléctrica. La tercera probeta

se realizó también con probeta homogénea y focos extras, teniendo muy buenos resultados y siendo analizados en MatchID. Se obtuvo un pequeño error con la capacidad del transductor de desplazamiento, dado que este llegó a su máximo recorrido. La última probeta, se realizó en las mismas condiciones de la tercera, tal de poder confirmar una uniformidad en los ensayos y sus resultados.

La Tabla 5.1 presenta el resumen de los ensayos realizados, mostrando las tensiones de confinamiento y de roturas obtenidas. Se entiende por objetivo exploratorio a aquellas probetas ensayadas para probar el funcionamiento del equipo, material modelo a la mezcla utilizada con resultados de interés y a material definitivo, la propuesta final de la tesis. Además, la Figura 5.8 muestra en un gráfico σ_2 vs σ_1 el mismo esquema, siguiendo la misma nomenclatura de la tabla 5.1. Es importante aclarar que los ensayos 1A y 1B, corresponden a ensayar la misma probeta, teniendo dos fases de carga diferentes. Caso similar ocurre con los ensayos 2A y 2B, que ocurren con la misma probeta teniendo dos fases de carga. El ensayo 3 tuvo solo una fase de carga en una probeta, al igual que el ensayo 4.

Tabla 5.1. Resumen de ensayos realizados

Ensayo #	Material	Confinamiento (MPa)	Rotura (MPa)	Objetivo
1A	Hormigón H30	0,07	1,6	Exploratorio
1B	Hormigón H30	0,09	3,2	Exploratorio
2A	Arena-Yeso-Agua-RP	0,15	2,3	Material modelo
2B	Arena-Yeso-Agua-RP	0,11	5,1	Material modelo
3	Yeso-Agua-RP	0,2	2,6	Material definitivo
4	Yeso-Agua-RP	1,0	3,1	Material definitivo

En las fases de carga del primer ensayo se utilizaron confinamientos bajos, para probar el funcionamiento de bombas y gatos hidráulicos. De la misma manera, en el segundo ensayo, se utilizaron confinamientos bajos para ver como actuaba la probeta frente a tales

solicitaciones. Ya habiendo visto estos resultados, se duplicó el confinamiento en el ensayo 3, obteniendo buenos resultados. Finalmente, para el ensayo 4 se intentó quintuplicar el confinamiento, teniendo así un barrido importante y eficaz de las presiones que las bombas otorgan (Figura 5.8).

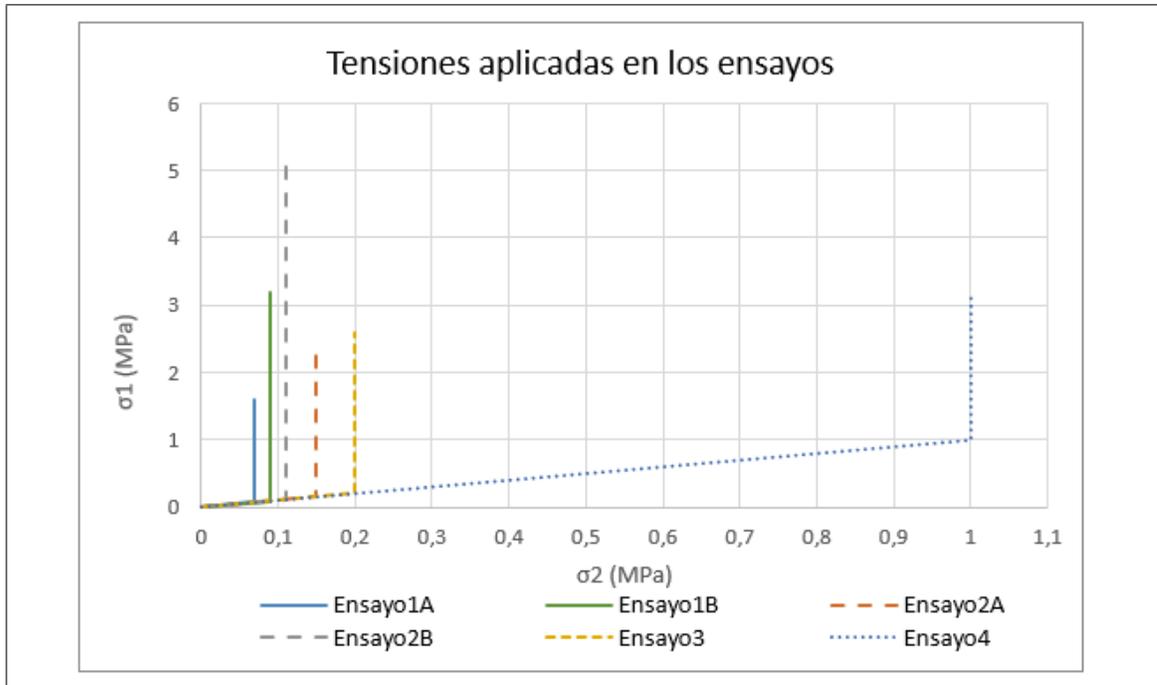


Figura 5.8. Resumen de trayectorias de tensiones de ensayos realizados

Cada experiencia entregaba conclusiones a partir de configuraciones iniciales y resultados, que serían mejorados en los ensayos siguientes. A continuación, se describen procedimientos realizados para cada probeta y sus características.

5.6.1. Descripción Ensayo 1

Dado que el marco biaxial no había sido utilizado desde el año 2004, en el marco de la tesis de García (2005) bajo la supervisión del profesor Michel Van Sint Jan, lo primero era verificar el funcionamiento de mangueras, bombas y otros elementos del equipo. Para ello, se aprovechó un excedente de hormigón de unos ensayos que se estaban ejecutando

en el laboratorio de Estructuras del DIEG para llenar el molde. Este hormigón era H30, por lo que sería de gran utilidad para probar las capacidades del equipo, dado que su resistencia era mucho mayor a la que se espera alcanzar con las probetas de yeso. El proceso de curado de la probeta fue de 10 meses dado que el ingreso a la universidad estuvo restringido por la pandemia del momento.

La probeta estaba en el patio de Estructuras del DIEG, por lo que se utilizó un carro diferente al habilitado del ensayo, para bajarla por el ascensor hacia el nivel -1 donde se encuentra el laboratorio de Geotecnia Experimental. Este tiene un largo máximo de 144 cm, por lo que el carro debía soportar 350 kg aprox y ser de largo inferior al mencionado. Una vez abajo, se debía traspasar al carro habilitado, por lo que debía ser elevado y empujado con rodillos metálicos grandes.

El carro habilitado no tenía ruedas pequeñas cercano a la extensión por lo que al hacer fuerza con el pie en la manilla para subir la probeta, la extensión estaba en voladizo y generaba mucho movimiento, por lo que debió ser ajustada con la incorporación de las pequeñas ruedas (Figura 5.5).

En un primera etapa, se montó la probeta en el ensayo, se conectaron bombas, manifolds y se comenzó a ensayar solo para verificar el estado de las mangueras y las bombas. Varias de ellas tenían fugas y debieron sustituirse por otras de las mismas características. Para esto, fue necesario apoyarse en proveedores apropiados para asegurarse que tuviesen las mismas características y terminales de conexión. Cabe recalcar que existen tres tipos de mangueras en el equipo, las que salen de bombas y se conectan a manifolds, las que se conectan entre manifolds y las que salen de los manifolds para conectarse a los gatos hidráulicos, estas varían en diámetro y boquillas (ver Figuras 5.2 y 5.3 para ver conexiones de mangueras).

El contacto entre probeta y placa metálica no fue óptimo, por lo que se tuvieron que pensar soluciones en futuros ensayos. Se utilizaron dos bombas manuales para la ejecución de este ensayo.

Se realizaron dos fases de carga para esta probeta, donde cada una tuvo confinamiento parecido pero se resolvieron problemas de ejecución que se verán en el capítulo 6.1.



(a) Manguera bomba-manifold



(b) Manguera manifold-manifold



(c) Manguera manifold-gato hidráulico

Figura 5.9. Tipos de mangueras utilizadas

Respecto a la instrumentación utilizada, se controlaron las cargas aplicadas usando el gato hidráulico, marco de carga y celda de carga en cada uno de los ejes de la probeta (\hat{x} e \hat{y}). Además, se utilizaron transductores de desplazamiento en ambos ejes, mediante el sistema explicado en el capítulo 5.3. Estos últimos dispositivos fueron colocados en el extremo más alejado del desviador, cercano a bloque fijos, tal como muestra la Figura 5.10. Además, se puede notar la pantalla LED y que los fierros que sujetan las placas metálicas, están muy adentro, lo que traería problemas con los videos.



Figura 5.10. Pintura en probeta de hormigón

Puede verse en la Figura, 5.11, la pintura realizada con spray blanco mate y témperas de color. Puede notarse también que el acabado no es totalmente liso, detalle que sería corregido más adelante.



Figura 5.11. Vista en planta del ensayo 1

5.6.2. Descripción Ensayo 2

La probeta utilizada en este ensayo, fue confeccionada con materiales yeso, arena, agua y RP (en proporciones de 1-0.5-0.65-0.006, respectivamente). Al ser la primera probeta confeccionada, se realizó sobre el carro habilitado para el marco biaxial en el laboratorio de Geotecnia Experimental PUC, dado que no se tenía el carro utilizado en el primer ensayo para bajarla por el ascensor. Se tuvo muchas complicaciones de espacio y lavado de materiales, donde todos quedaron con restos de yeso fraguado. Además, el espacio necesario para usar betonera, molde y vibradoras era mayor del disponible en el laboratorio.

Por temas de tiempo, no fue posible contar con la incorporación de pequeñas ruedas en la extensión en voladizo del carro habilitado. La probeta fue ensayada con cuatro semanas de curado, no antes por temas de ingreso a la universidad debido a la pandemia del momento.

Se intentó mejorar la posición de las placas metálicas en su contacto con la probeta pero no fue posible mejorar el contacto por completo. Se utilizaron dos bombas manuales para la ejecución de este ensayo.

La instrumentación utilizada fue la misma explicada en el primer ensayo con la diferencia de que se movieron ambos transductores de desplazamiento al centro de la probeta, para tener valores alejados de las condiciones de borde (Figura 5.12). Puede notarse también, que se corrigió el error de los fierros, dejando estos fuera del objetivo de grabación.

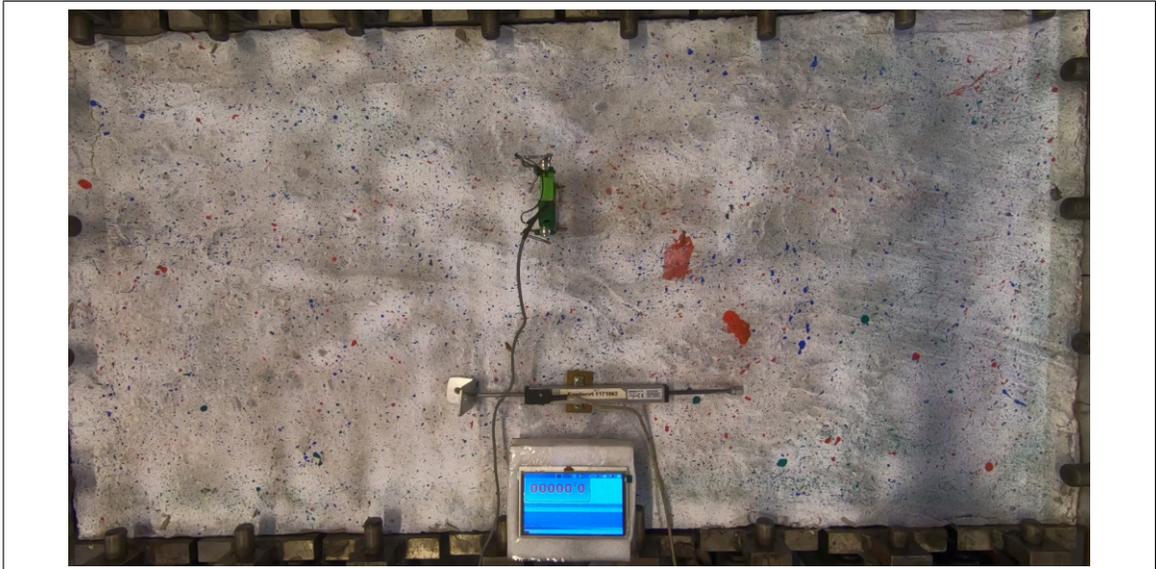


Figura 5.12. Vista en planta del ensayo 2

Se realizaron dos fases de carga para esta probeta, donde cada una tuvo confinamiento parecido pero se resolvieron problemas de ejecución que se verán en el capítulo 6.2.

Debido a las luces halógenas del techo de laboratorio, se producía un juego de luz y sombra que era imperceptible al ojo humano, pero si por los videos. Esto generaba mucho ruido en el estudio de correlación de imágenes con MatchID.

5.6.3. Descripción Ensayo 3

Esta probeta se realizó con materiales yeso, agua y RP (en proporciones 1-0.65-0.006, respectivamente), dado que se concluyó que la arena contribuía mayor ductibilidad en el ensayo. Dadas las experiencias anteriores, esta probeta se realizó en el patio de Estructuras, siguiendo los protocolos finales descritos en el capítulo 5.2. Luego, se bajó utilizando un carro que cabe dentro del ascensor y se traspasó al carro habilitado para el ensayo que ya poseía las ruedas pequeñas en la extensión.

Se incorporó la lámina de 1 cm dentro del molde para que la altura de la probeta sea de 19 cm y así mejorar el contacto de placa metálica y probeta. Además, se incorporó el marco del mismo material al momento del ensayo. Se utilizó una bomba manual para el desviador y una bomba automática para el confinamiento.

Una mejora en este ensayo fue la utilización de focos externos de alta potencia eléctrica que sirvieron para mejorar y realizar la correlación de imágenes. Se utilizaron dos focos de 500 W externos al marco, en el mismo brazo que esta colocada la cámara GoPro.

5.6.4. Descripción Ensayo 4

Similar al ensayo 3, esta probeta se realizó de manera eficiente y práctica recogiendo todas las experiencias anteriores, confeccionada con materiales yeso, agua y RP (en proporciones 1-0.65-0.006, respectivamente).

El confinamiento utilizado fue significativamente mayor a los demás, para poder comparar como afecta un alto confinamiento. Además, se intentó realizar un desviador durante el confinamiento lo más cercano a cero, teniendo en cuenta que se utilizaban dos bombas a la vez, siendo una manual y la otra automática.

En el capítulo siguiente se detallan y discuten cada uno de los resultados obtenidos de los cuatro ensayos efectuados en este trabajo.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los cuatro ensayos realizados se presentan a continuación, describiendo fases de carga, gráficos de estas fases, discusión de resultados y conclusiones respectivas. En total son cuatro ensayos, donde los dos primeros tienen dos fases de carga cada uno y el resto, solo una fase de carga.

Respecto a la nomenclatura utilizada en los gráficos, se tienen las presiones y deformaciones en toda la fase de carga, teniendo $P_i - e_j$, donde $i = \hat{x}, \hat{y}$ en términos de presiones y $j = \hat{x}, \hat{y}$ en términos de deformaciones. Esta nomenclatura será la misma para todos los análisis.

6.1. Ensayo 1

A continuación, se presentan los resultados y conclusiones de las dos fases de carga realizadas a una misma probeta de material hormigón H30, cuyo objetivo era el de ser un ensayo exploratorio del funcionamiento del marco biaxial.

6.1.1. Resultados Ensayo 1 Fase de carga 1. Ensayo 1A

Las fases de carga de este ensayo se dividieron en cuatro etapas:

- (i) Se cargó el eje \hat{y} hasta una presión pequeña de 0,07 MPa de confinamiento.
- (ii) Se comenzó la carga desviadora desde cero hasta la falla y se continuó ensayando hasta lograr mayores desplazamientos.
- (iii) Descarga axial hasta presión igual a cero.
- (iv) Descarga de confinamiento hasta presión igual a cero.

En los gráficos 6.1 y 6.2, se presentan los resultados con 50 datos por segundo, generando mucho ruido en la gráfica. En esta fase de carga, se probó un confinamiento bajo para poder ver el funcionamiento de todas las partes del marco biaxial.

La deformación en el eje \hat{x} fue baja, llegando a un 0,05%, mientras que en el eje \hat{y} fue de 0,01%. Cabe destacar que ambas curvas tienen una deformación inicial de 0,01% hacia el lado negativo. Estos resultados ilustran la alta sensibilidad de ambos transductores de desplazamiento.

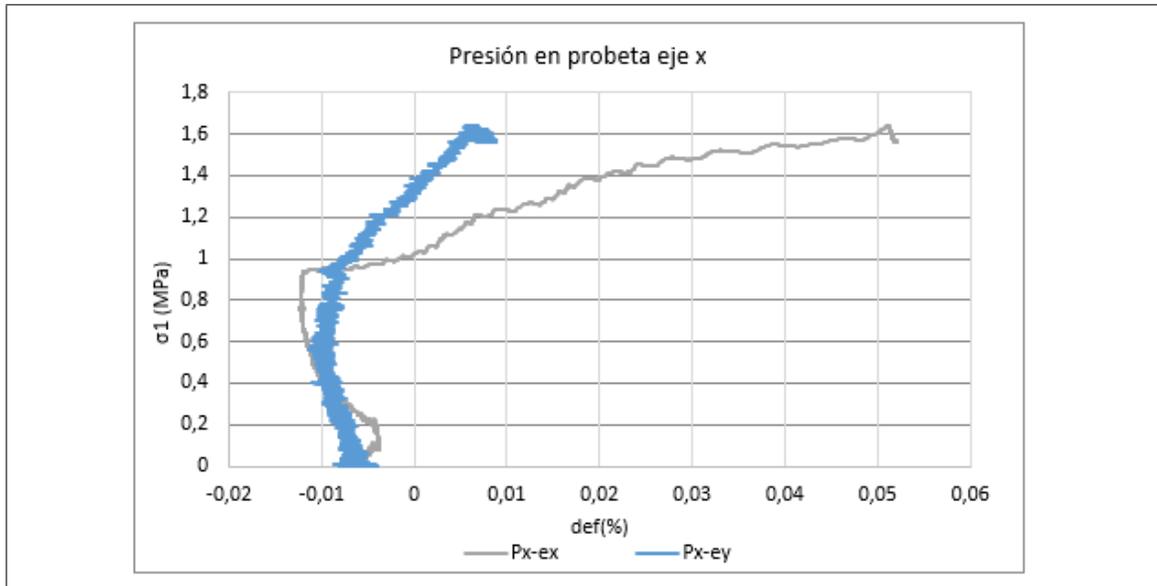


Figura 6.1. Ensayo 1. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 1.
Presión en probeta eje \hat{x} . $\sigma_2=0.07$ MPa

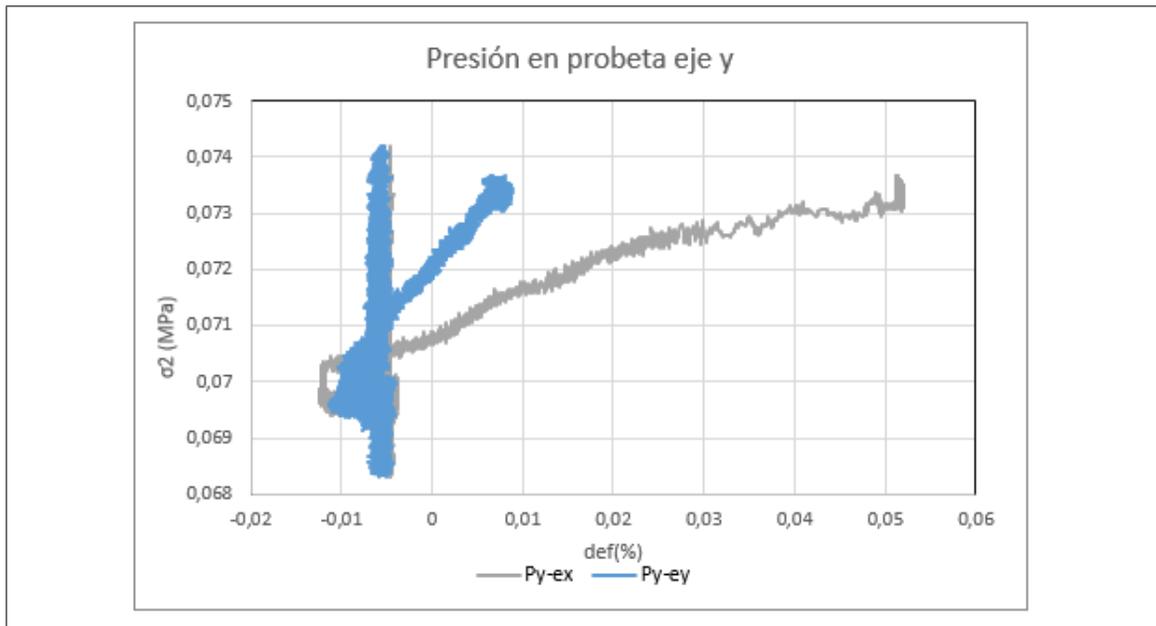


Figura 6.2. Ensayo 1. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 1.
Presión en probeta eje \hat{y} . $\sigma_2=0.07$ MPa

Puede notarse además, que por poca experiencia en el montaje de todo el ensayo, se comenzó a almacenar datos una vez iniciado el confinamiento, por lo que el Gráfico 6.2 no comienza con su presión desde cero. Puede verificarse esto en el Gráfico 6.3, donde se tiene el resumen de las mediciones de tensiones y deformaciones en el ensayo a través del tiempo en doble escala. Por el costado izquierdo del eje \hat{y} del gráfico, se tienen las presiones y por el costado derecho, las deformaciones.

En conclusión, las deformaciones obtenidas fueron bien medidas y se espera que tomen mayores valores en ensayos para el material modelo. Puede comprobarse en el Gráfico 6.4, donde se presenta el aumento del desplazamiento en el eje \hat{x} a medida que se aumenta la tensión, mientras que en el eje \hat{y} , es prácticamente constante.

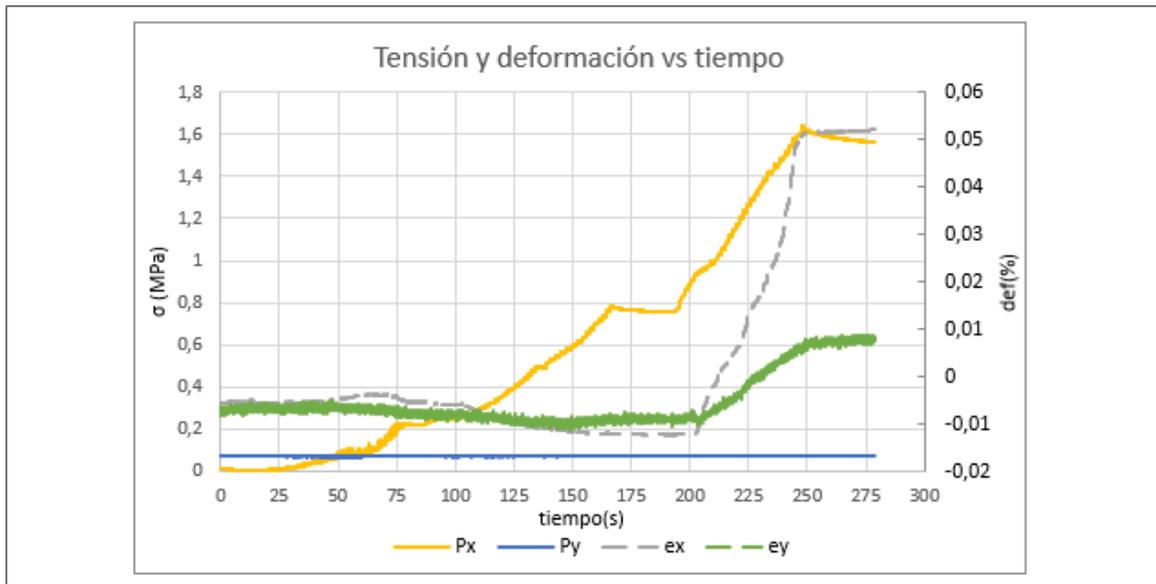


Figura 6.3. Ensayo 1. Gráfico Tensión-deformación-tiempo. Fase de carga 1.
 $\sigma_2=0.07$ MPa

Puede notarse además del Gráfico 6.3, que la tasa de carga controlada que se obtuvo a través de la bomba manual, fue aproximadamente de 8 kPa/s en el tramo de 100 a 170 s y de 14 kPa/s en el tramo de 200 a 250 s.

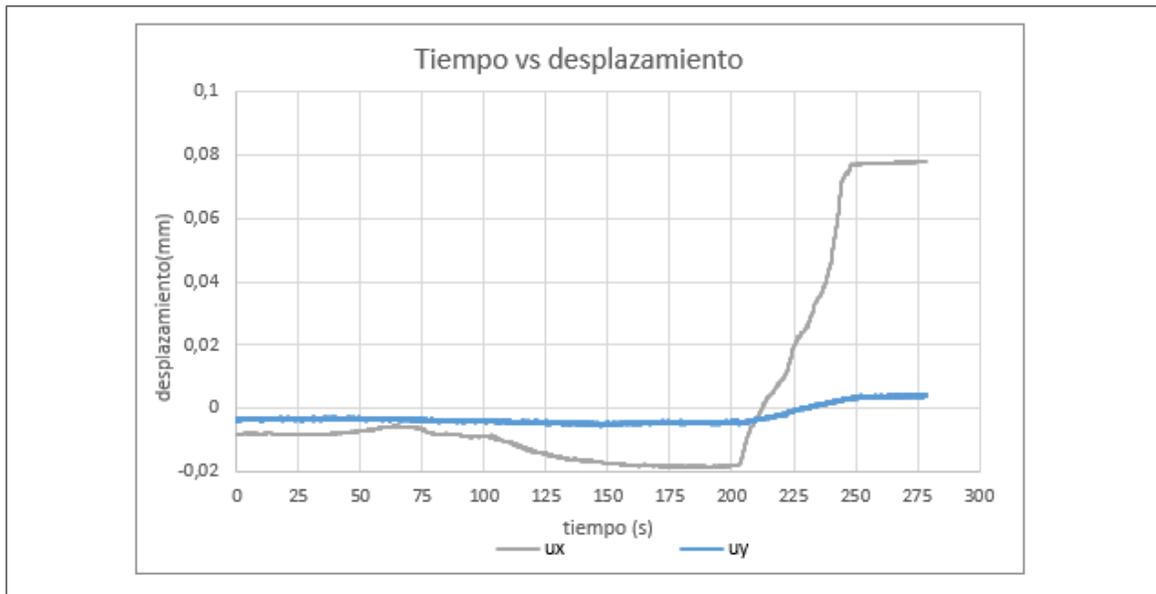


Figura 6.4. Ensayo 1. Gráfico Desplazamiento-tiempo. Fase de carga 1. $\sigma_2=0.07$ MPa

6.1.2. Resultados Ensayo 1 Fase de carga 2. Ensayo 1B

Las fases de carga de este ensayo se dividió en cuatro etapas:

- (i) Se cargó el eje \hat{y} hasta una presión pequeña de 0,09 MPa de confinamiento.
- (ii) Se comenzó la carga desviadora desde cero hasta la falla y se continuó ensayando hasta lograr mayores desplazamientos.
- (iii) Descarga axial hasta presión igual a cero.
- (iv) Descarga de confinamiento hasta presión igual a cero.

En esta ocasión, se utilizaron 5 datos por segundo, obteniendo ruido casi imperceptible. Se intentó llegar a presiones mayores, cercanas a la que en teoría puede proveer el sistema (5.1 MPa). En el Gráfico 6.6 se ve que el dispositivo *Epsilon* mide desplazamiento cercano a cero, a diferencia de la fase de carga anterior (Gráfico 6.2). Sin embargo, en el Gráfico 6.5 se ve claramente un aumento de la tensión sin aumento del desplazamiento. Esto ocurrió dado que uno de los suples utilizado en el marco de carga del eje \hat{x} falló,

alterando la curva tensión-deformación, dado que la deformación fue realizada en el suple en vez de la probeta.

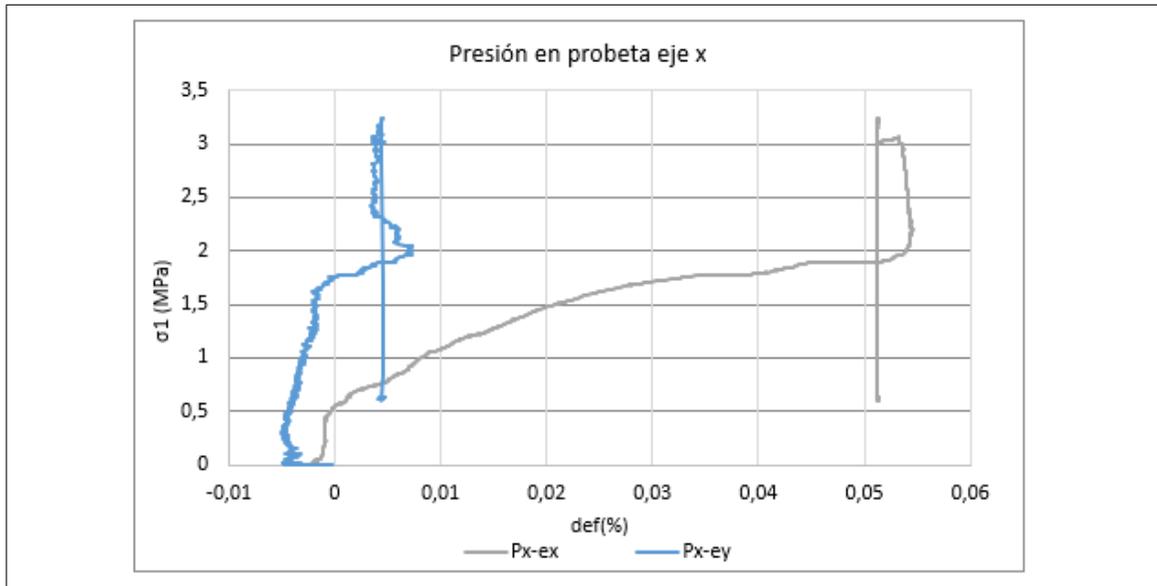


Figura 6.5. Ensayo 1. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 2.
Presión en probeta eje \hat{x} . $\sigma_2=0.09$ MPa

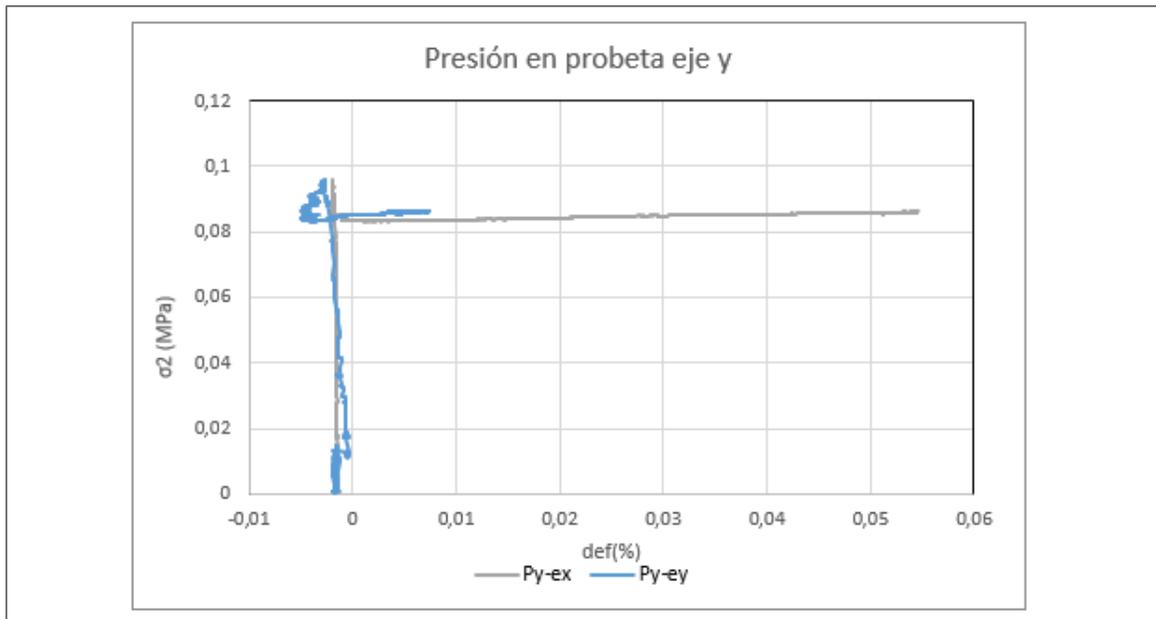


Figura 6.6. Ensayo 1. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 2.
Presión en probeta eje \hat{y} . $\sigma_3=0.09$ MPa

Puede notarse además del Gráfico 6.7, que la tasa de carga controlada que se obtuvo a través de la bomba manual, fue aproximadamente de 10 kPa/s en el tramo de 100 a 200 s y de 20 kPa/s en el tramo de 275 a 300 s. Además, en el mismo gráfico es posible determinar que las deformaciones esperadas son bastante parecidas a la primera fase de carga (ensayo 1A).

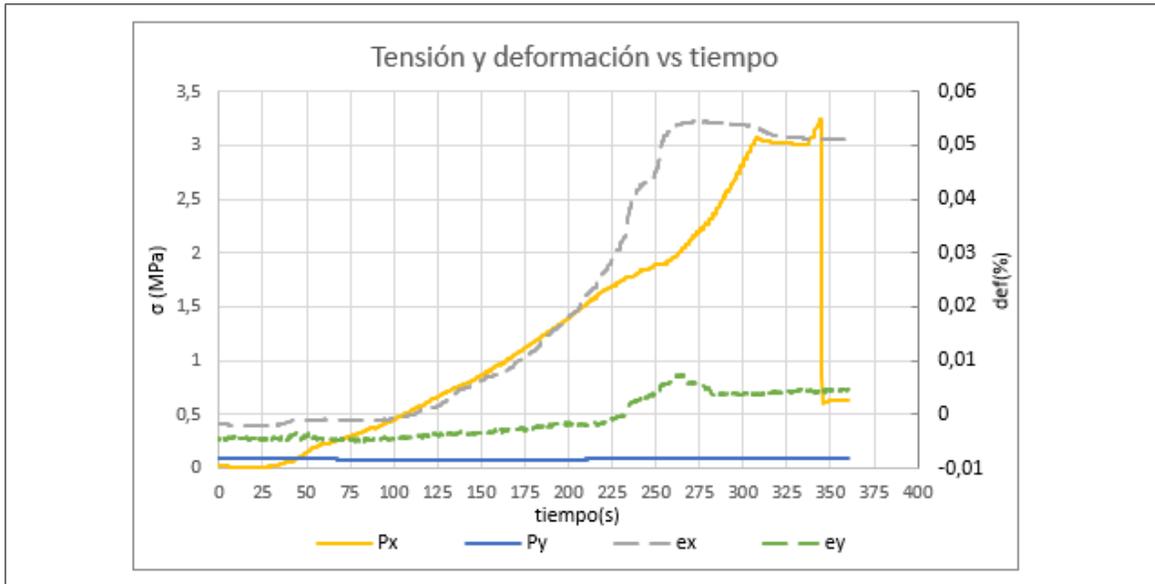


Figura 6.7. Ensayo 1. Gráfico Tensión-deformación-tiempo. Fase de carga 2.
 $\sigma_2=0.09$ MPa

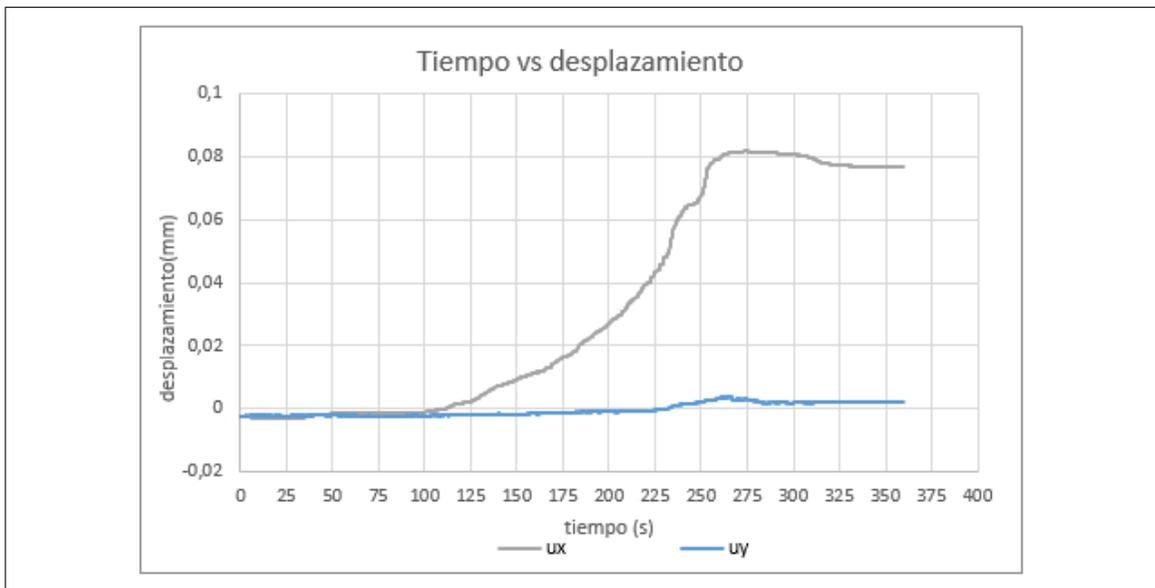


Figura 6.8. Ensayo 1. Gráfico Desplazamiento-tiempo. Fase de carga 2.
 $\sigma_2=0.09$ MPa

6.1.3. Discusión de resultados Ensayo 1

En la Figura 6.9, se puede ver un claro desajuste en el contacto probeta y placa metálica, donde por temas de diseño, había un desajuste de 1 cm (altura de placa es 1 cm menor a la altura de la probeta) y por temas de ejecución del ensayo, la parte en voladizo de la probeta genera 1,5 cm más de diferencia.



Figura 6.9. Vista perfil eje \hat{x} luego del ensayo

Puede notarse en la Figura 6.9 y 6.10, que este desajuste provoca una falla inversa al momento de la ejecución del ensayo. Claramente no se busca este efecto con el marco biaxial, por lo que se buscó una solución para el siguiente ensayo.



Figura 6.10. Vista perfil eje \hat{y} luego del ensayo.

Todas las fases de carga fueron realizadas por dos personas, una que monitoreaba las cargas en el computador a través de CATMAN y la otra persona que manipulaba las bombas. Por motivos de la pandemia, fue imposible realizar los ensayos por tres personas, donde la tercera fuese la que observara estos detalles en el marco biaxial. Cuando se percibió en el CATMAN lo sucedido, se frenó el ensayo.

6.1.4. Conclusiones Ensayo 1

Las conclusiones obtenidas a partir del Ensayo 1, son las siguientes:

- (i) El sistema hidráulico del marco biaxial funcionó perfectamente, sin tener fugas en sus mangueras y otorgando de manera homogénea la presión a los gatos hidráulicos. La única falla presente ocurrió con el supe de metal del marco de carga del eje \hat{x} , donde al aumentar la tensión en la segunda fase de carga, el material falló. Este se cambió por uno de mayor espesor y más competente.
- (ii) La instrumentación utilizada para medir desplazamientos y presiones funcionan adecuadamente, aún cuando los desplazamientos fueron bajos. Se espera que

estos sean mayores en las fases de carga para el material modelo. Se llegó sin problemas a 3.2 MPa y 0.05% de deformación.

- (iii) El desviador fue cercano a cero durante la fase de confinamiento global, dado que el confinamiento en el eje \hat{y} fue muy bajo. En futuros ensayos, habría que evaluar como sería el desviador al utilizar dos bombas manuales a la vez y con mayor confinamiento en aquel eje.
- (iv) El molde es para una probeta de dimensiones de $120 \times 60 \times 20$ cm, la cual funcionó bien en el marco de carga biaxial. Sin embargo, cabe recordar que el hormigón tiene mayor rigidez que el material modelo, por lo que debe evaluarse las deformaciones en futuros ensayos.
- (v) Es necesario corregir la diferencia entre la altura de la probeta y altura de las placas metálicas y mejorar la diferencia de altura producida por el voladizo. Esto se mejoraría con la inclusión de una placa de 1 cm dentro del molde de la probeta y la incorporación de un marco del mismo material y espesor que haría de intermediario en el contacto entre el carro habilitado para el ensayo y las placas metálicas. Además, este va por encima de un sistema que es capaz de nivelar la probeta antes de ensayar (Figura 5.5).
- (vi) La tasa de carga controlada fue de 8 y 10 kPa/s en ensayos 1A y 1B, respectivamente. Bastante buena para el monitoreo y ejecución del ensayo.

6.2. Ensayo 2

A continuación, se presentan los resultados y conclusiones de las dos fases de carga realizadas a una misma probeta de material arena, yeso, RP y agua. El fin de este ensayo es ver el comportamiento de la probeta de material homólogo a roca frágil dentro del marco biaxial. Si bien ya se realizó un ensayo exploratorio, este sería el primer ensayo con resultados de interés.

6.2.1. Resultados Ensayo 2 Fase de carga 1. Ensayo 2A

Las fases de carga de este ensayo se dividió en cuatro etapas:

- (i) Se cargó el eje \hat{y} hasta una presión pequeña de 0,15 MPa de confinamiento.
- (ii) Se comenzó la carga desviadora desde cero hasta la falla y se continuó ensayando hasta lograr mayores desplazamientos.
- (iii) Descarga axial hasta presión igual a cero.
- (iv) Descarga de confinamiento hasta presión igual a cero.

En este ensayo se reemplazó el suple del marco de carga que había fallado en la fase de carga 2 del ensayo 1, por uno más competente. En el Gráfico 6.11 se ve un buen comienzo de la curva hasta los 2,2 MPa aproximadamente, donde luego existe ruido en la ejecución del ensayo debido a que la celda de carga no estaba bien fijada al marco de carga. En el Gráfico 6.12 se ve que el confinamiento es prácticamente cero durante todo el ensayo hasta un 0,2% de deformación, donde ocurre el fenómeno anteriormente descrito.

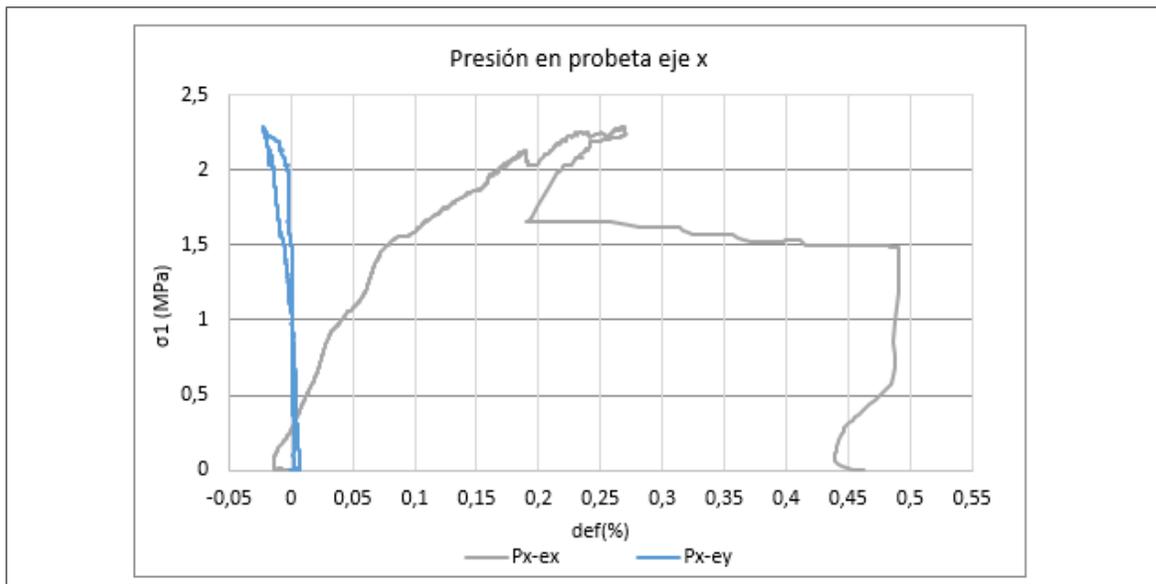


Figura 6.11. Ensayo 2. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 1.
Presión en probeta eje \hat{x} . $\sigma_2=0,15$ MPa

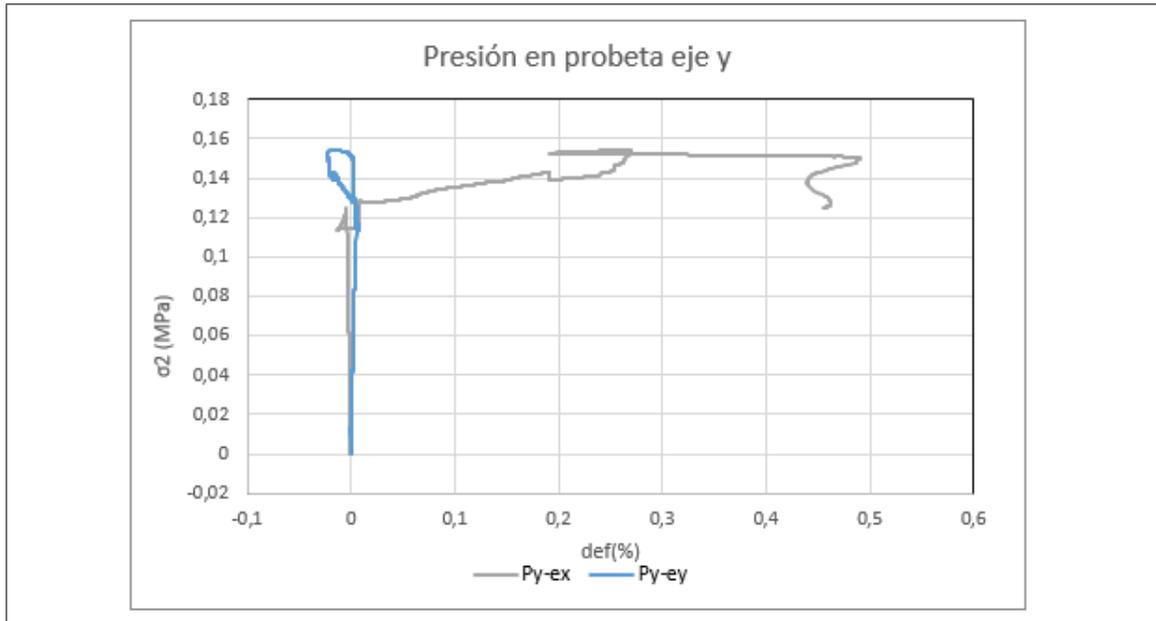


Figura 6.12. Ensayo 2. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 1.
Presión en probeta eje \hat{y} . $\sigma_2=0.15$ MPa

A partir de los resultados del Gráfico 6.11, es posible calcular el módulo de Young. Para ello, hay que determinar un Δt donde las curvas sean lo más rectas posibles. Se utilizaron las curvas entre 200 s y 250 s para $P_x - e_x$ y $P_x - e_y$, con el fin de determinar las deformaciones y tensiones en aquel intervalo de carga. Se utilizó la Ley de Hooke 3D para caso isótropo para obtener el módulo de Young.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{pmatrix}$$

Despejando ε_{xx} y ε_{yy} y considerando que $\sigma_{zz} = 0$ (cara libre), se obtienen las ecuaciones 6.1 y 6.2.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu \cdot \sigma_{yy}] \quad (6.1)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu \cdot \sigma_{xx}] \quad (6.2)$$

De las ecuaciones anteriores es posible despejar módulo de Poisson y módulo de Young, obteniendo $\nu = 0.35$ y $E = 0.53$ GPa. El valor de módulo de Poisson es bastante aceptable para el material y el módulo de Young es muy parecido a los valores de la Tabla 4.4 para material de arena, yeso y RP, cuyos valores corresponden a 0.51 GPa y 0.6 GPa para tasas de 0.2 mm/min y 1 mm/min, respectivamente.

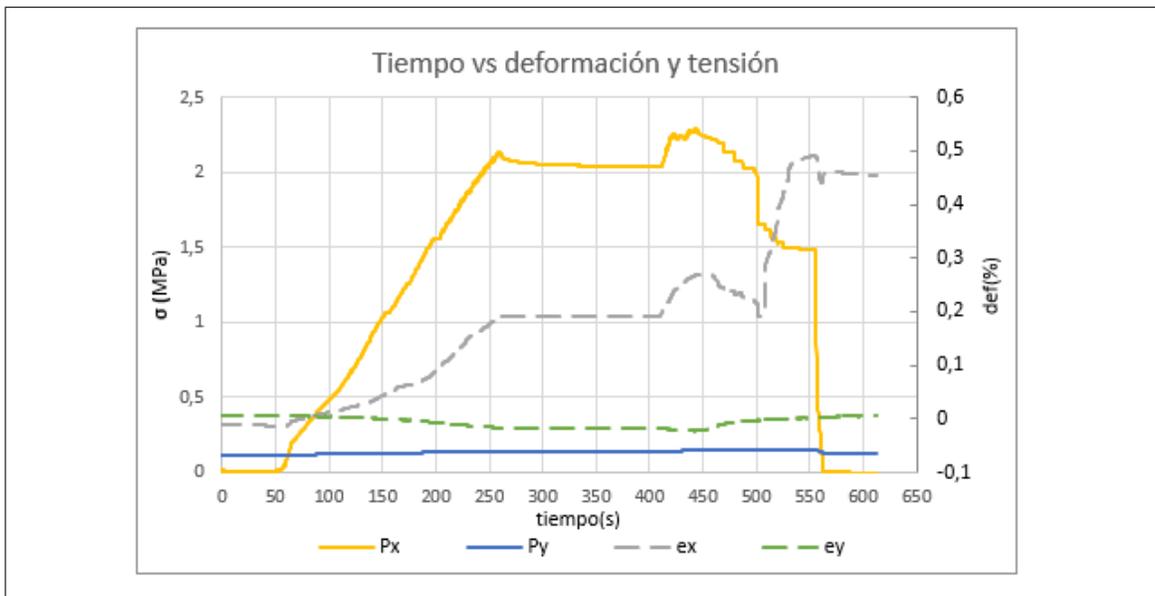


Figura 6.13. Ensayo 2. Gráfico Tensión-deformación-tiempo. Fase de carga 1. $\sigma_2=0.15$ MPa

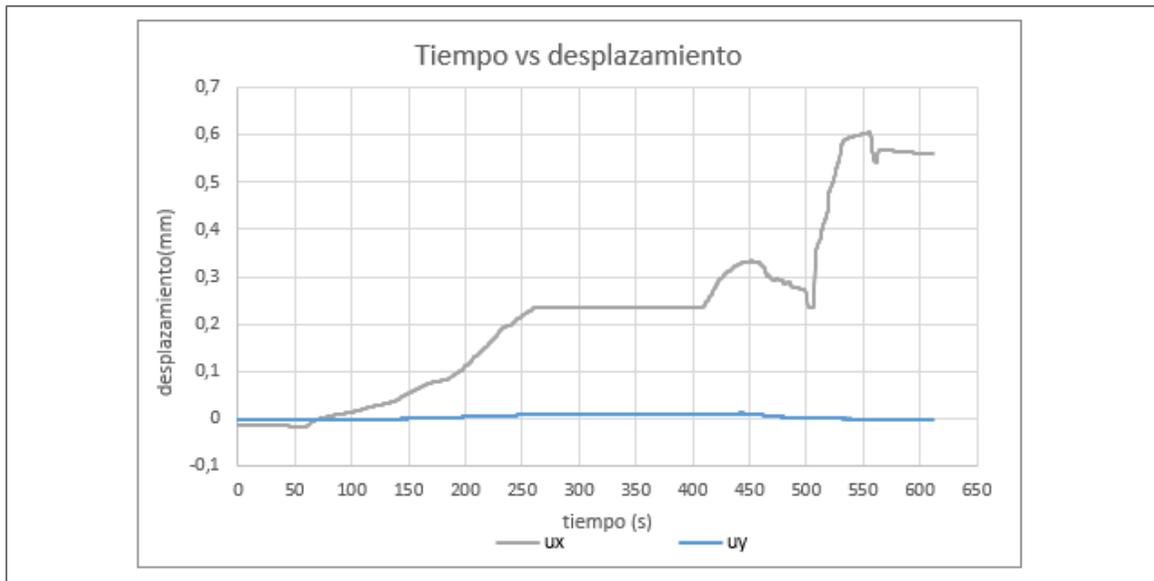


Figura 6.14. Ensayo 2. Gráfico Desplazamiento-tiempo. Fase de carga 1.
 $\sigma_2=0.15$ MPa

Las deformaciones son un orden de magnitud mayor al ensayo 1 de probeta de hormigón, siendo de un máximo de 0.5% para eje \hat{x} y prácticamente 0% para eje \hat{y} . Este último valor es correcto dado que se espera que el confinamiento sea lo más regular posible durante la ejecución del ensayo. Esto puede corroborarse en el Gráfico 6.14.

Puede notarse además del Gráfico 6.13, que la tasa de carga controlada que se obtuvo a través de la bomba manual, fue aproximadamente de 10 kPa/s en el tramo de 100 a 250 s. Además, en el mismo gráfico es posible determinar que las deformaciones esperadas son bastante parecidas a la primera fase de carga (ensayo 1A).

6.2.2. Resultados Ensayo 2 Fase de carga 2. Ensayo 2B

La fase de carga anterior (Ensayo 2A) no logró llegar a la falla, por lo que el objetivo de esta fase de carga sería alcanzar la falla y ver el comportamiento de la probeta.

Las fases de carga de este ensayo se dividió en cuatro etapas:

- (i) Se cargó el eje \hat{y} hasta una presión pequeña de 0,11 MPa de confinamiento.
- (ii) Se comenzó la carga desviadora desde cero hasta la falla y se continuó ensayando hasta lograr mayores desplazamientos.
- (iii) Descarga axial hasta presión igual a cero.
- (iv) Descarga de confinamiento hasta presión igual a cero.

Se puede ver en los gráficos 6.15 y 6.16 que existen mayores tensiones y deformaciones que la primera fase de carga (Gráfico 6.11). La tensión en el eje \hat{y} es prácticamente constante durante todo el ensayo, corroborando resultados anteriores. Además, la deformación también es casi nula. Respecto al eje \hat{x} se pueden notar dos grandes diferencias tanto en tensión como en deformación. Las deformaciones son mucho mayores para una presión de 2 MPa, precisamente un orden mayor de magnitud en comparación a la fase de carga anterior (Ensayo 2A). Sin embargo, se puede ver que la tensión en el Gráfico 6.15 en el eje \hat{x} comienza a aumentar, sin el incremento de la deformación. Este error se debió a una falla de montaje del ensayo, donde la placa metálica de la esquina del eje \hat{x} chocó con la placa metálica de la esquina del eje \hat{y} . En otras palabras, cuando se insertó la probeta al marco biaxial con el carro habilitado, esta no quedó centrada y se produjo el fenómeno descrito.

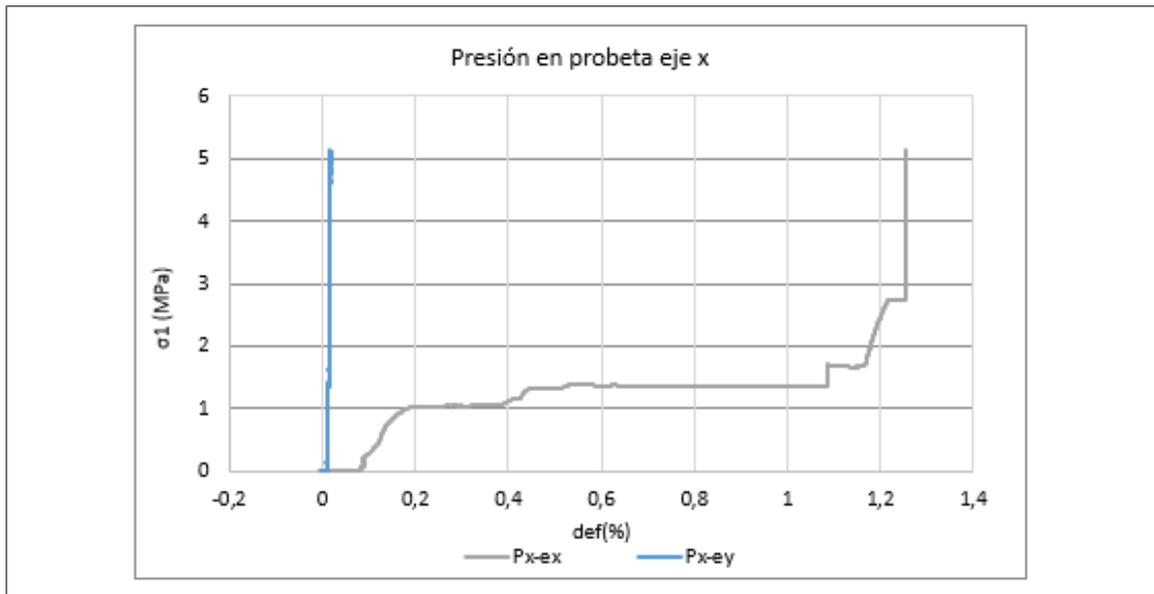


Figura 6.15. Ensayo 2. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 2.
Presión en probeta eje \hat{x} . $\sigma_2=0.11$ MPa

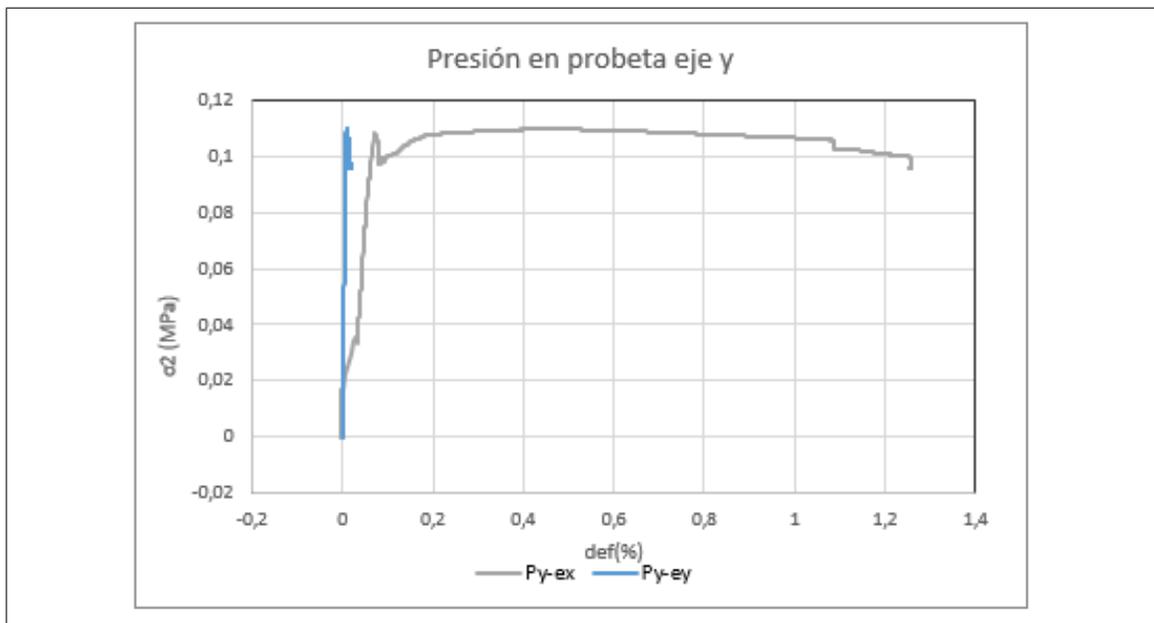


Figura 6.16. Ensayo 2. Gráfico Tensión-deformación. Fase de carga 2.
Presión en probeta eje \hat{y} . $\sigma_3=0.11$ MPa

En el Gráfico 6.17 puede verse el comportamiento esperado para el marco biaxial, donde tanto tensiones como desplazamientos del eje \hat{x} aumentan ambos con el tiempo, mientras que en el eje \hat{y} se mantienen constante. Además, la tasa de carga controlada obtenida, fue aproximadamente de 12 kPa/s en el tramo de 50 a 110 s y de 24 kPa/s en el tramo de 270 a 400 s.

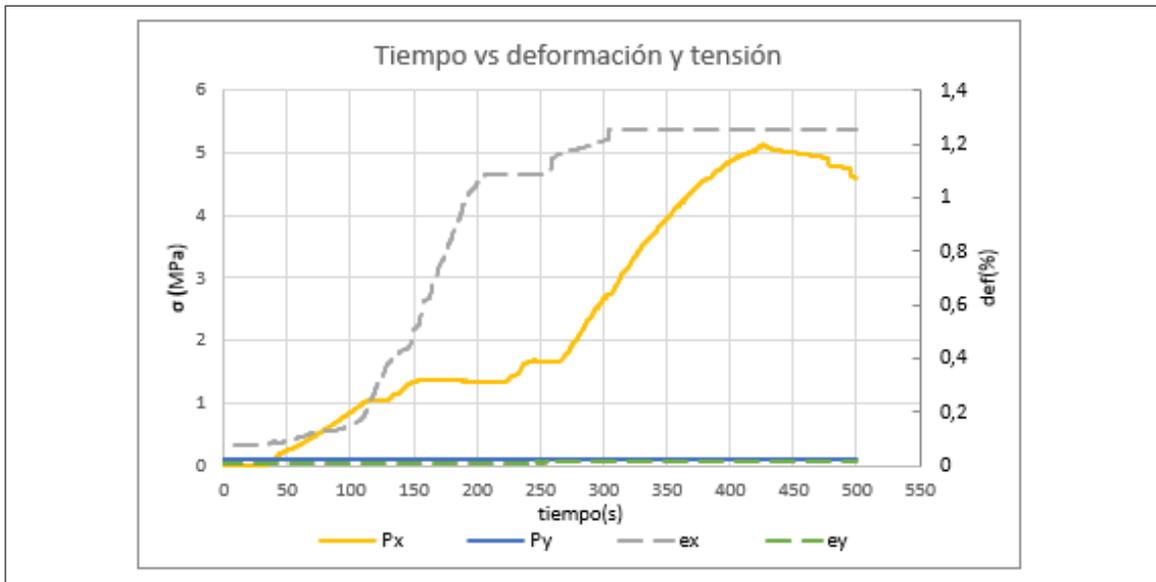


Figura 6.17. Ensayo 2. Gráfico Tensión-deformación-tiempo. Fase de carga 2. $\sigma_2=0.11$ MPa

Durante el ensayo, se logró llegar a tensiones muy altas, en el límite que el marco biaxial puede proveer (5.1 MPa). Este resultado fue dado por el bloqueo del recorrido de los gatos hidráulicos dado que las placas metálicas bloqueaban el movimiento, sin embargo, la celda de carga y HBM almacenaron los datos de igual manera.

Sin embargo, se pudo verificar que los gatos hidráulicos habían alcanzado el desplazamiento máximo de 6 cm, por lo que no podían desplazarse más. En el Gráfico 6.18 se ven desplazamientos máximos de 1,6 cm, sin embargo, los gatos hidráulicos realizan un recorrido antes de ejercer tensión sobre la probeta. Este tema debía solucionarse colocando suples en ambos costados del eje \hat{x} para futuros ensayos.

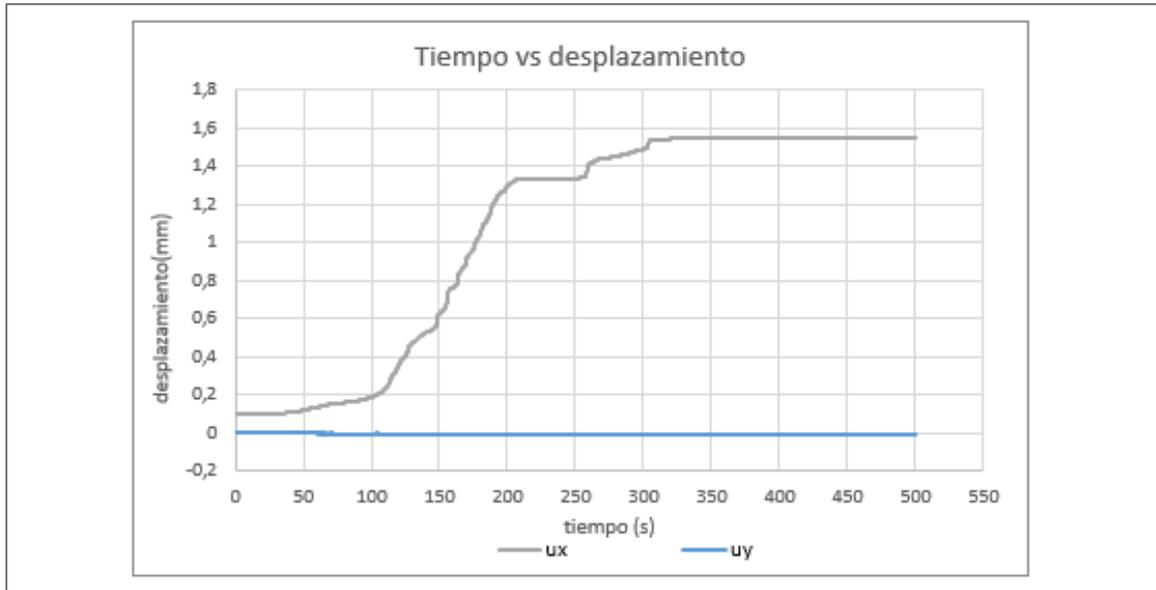


Figura 6.18. Ensayo 2. Gráfico Desplazamiento-tiempo. Fase de carga 2.
 $\sigma_3=0.11$ MPa

6.2.3. Discusión de resultados Ensayo 2

En la Figura 6.19, se ve la cara del eje \hat{x} por donde actúan los gatos hidráulicos mediante las placas metálicas. Si bien se intentó corregir la falla ocurrida en el primer ensayo (Figura 6.9), aún se puede ver al menos 1 cm donde las placas no alcanzan a realizar contacto con la base de la probeta. Eso debe corregirse para el siguiente ensayo.



Figura 6.19. Vista perfil eje \hat{x} luego del ensayo

6.2.4. Conclusiones Ensayo 2

Las conclusiones obtenidas a partir del Ensayo 2, son las siguientes:

- (i) Los cambios realizados en los suples funcionaron perfectamente para el ensayo 2B. Quedaría pendiente incorporar suples para disminuir el recorrido de los gatos hidráulicos antes de hacer contacto con las placas metálicas y así con la probeta.
- (ii) El marco biaxial es capaz de tomar tensiones de 5,1 MPa, tal como se calculó en la teoría y se logran alcanzar deformaciones altas de incluso 1.25 % (Figura 6.17).
- (iii) Las condiciones de confinamiento en el eje \hat{y} funcionan adecuadamente, teniendo tensiones constantes y deformaciones casi nulas. Hay que evaluar su funcionamiento con confinamientos mayores.
- (iv) El material de arena, yeso y RP es más frágil que el mismo sin arena, tal como se revisó en el capítulo 4.3, sin embargo, los valores de módulo de Poisson de

0.35 y de módulo de Young de 0.6 GPa son adecuados y consistentes con las pruebas de compresión uniaxial UCS.

- (v) La tasa de carga controlada obtenida fue de 10 y 24 kPa/s en ambas fases de carga, siendo muy parecidas respecto al primer ensayo.
- (vi) Se realizó la correlación de imágenes mediante el sistema de grabación de video en el ensayo en la probeta, sin embargo, y tal como se detalló en el capítulo 5.6, las luces utilizadas no fueron las adecuadas. Para el próximo ensayo, se debe corregir esto añadiendo focos extras de alta potencia eléctrica.
- (vii) Será necesario corregir la diferencia entre la altura de la probeta y altura de las placas metálicas y mejorar la diferencia de altura producida por el voladizo. Esto se corregirá al colocar ruedas pequeñas en la parte en voladizo del carro habilitado y el uso de un marco para ensayar y una placa de 1 cm del mismo material dentro del molde. Este último debe estar en su posición desde la elaboración de la probeta hasta la ejecución del ensayo.

6.3. Ensayo 3

A continuación, se presentan los resultados y conclusiones de la fase de carga realizada a una probeta de material yeso, RP y agua. El objetivo de este ensayo es monitorear el comportamiento de la probeta de material homólogo a roca frágil dentro del marco biaxial a bajo confinamiento, donde las curvas de ensayo de compresión UCS indican comportamiento más frágil que el material de la probeta del ensayo 2.

6.3.1. Resultados Ensayo 3

La fase de carga de este ensayo se dividió en cuatro etapas:

- (i) Se cargó el eje \hat{y} hasta una presión pequeña de 0,2 MPa de confinamiento.
- (ii) Se comenzó la carga desviadora desde cero hasta la falla y se continuó ensayando hasta lograr mayores desplazamientos.

- (iii) Descarga axial hasta presión igual a cero.
- (iv) Descarga de confinamiento hasta presión igual a cero.

En el Gráfico 6.20 puede notarse la tendencia de los ensayos anteriores, donde la tensión en el eje \hat{x} aumenta linealmente con la deformación y que la deformación del eje \hat{y} es prácticamente nula. Un factor importante, es que luego de alcanzar aproximadamente los 2,6 MPa en el eje \hat{x} , ocurre mucho ruido durante el ensayo, dado que hubo desprendimiento de material en la cara libre del ensayo, alterando las fijaciones de ambos transductores de desplazamiento. Sección 6.3.2.

Se realizó el estudio de la determinación de módulos de Poisson y Young mediante el análisis descrito para el ensayo 2A (Fase de carga 1). Mediante las ecuaciones 6.1 y 6.2, durante las fases lineales ocurridas entre 75 y 130 s aproximadamente, se obtuvo $\nu=0.32$ y $E=1.4$ GPa. El valor del módulo de Poisson es razonable para el material y el módulo de Young es bastante parecido a los valores de la tabla 4.4, donde para material de yeso, agua y RP, los resultados fueron de 1.11 GPa y 1.23 para tasas de 0.2 mm/min y 0.1 MPa/s.

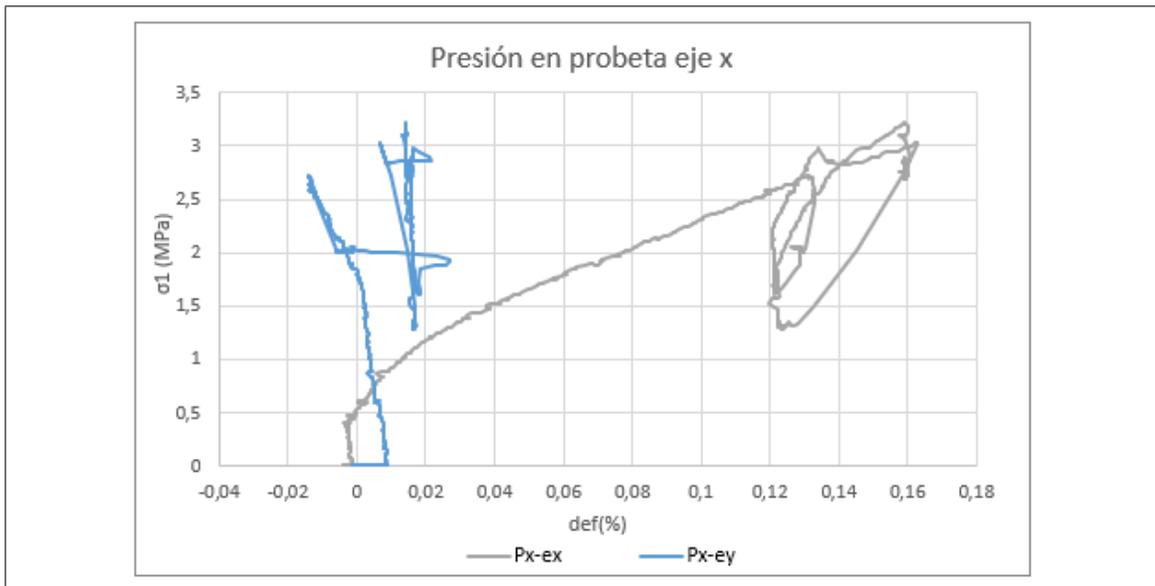


Figura 6.20. Ensayo 3. Gráfico Tensión-deformación. Presión en probeta eje \hat{x} . $\sigma_2=0.2$ MPa

En el Gráfico 6.21 puede comprobarse que la tensión en el eje \hat{y} es muy uniforme durante el ensayo.

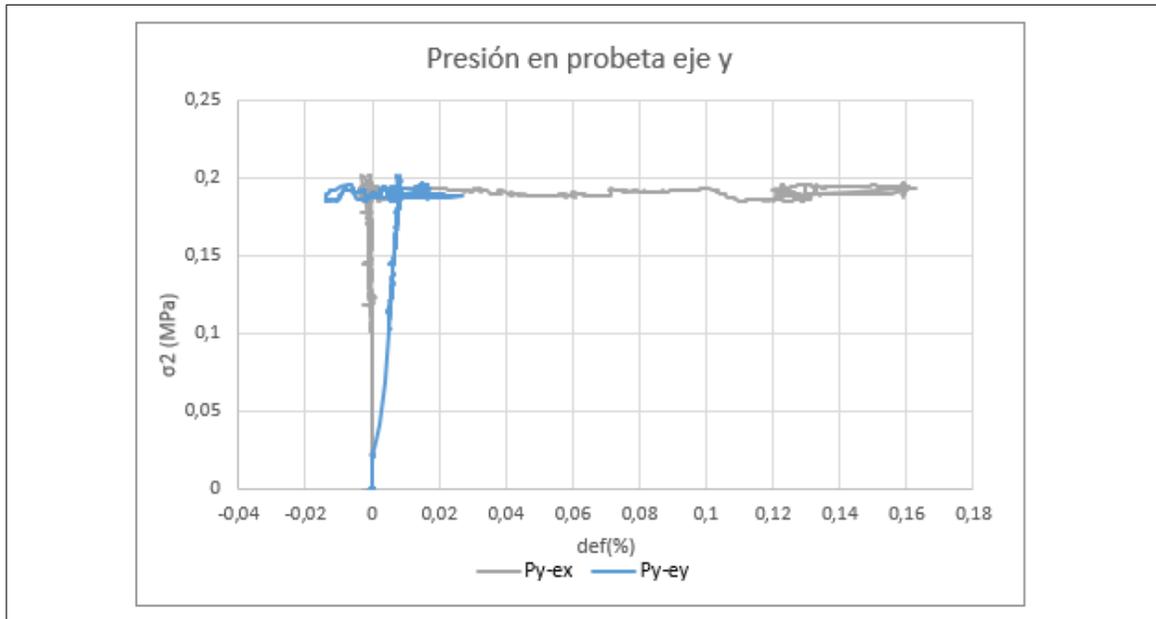


Figura 6.21. Ensayo 3. Gráfico Tensión-deformación. Presión en probeta eje \hat{y} . $\sigma_2=0.2$ MPa

En el Gráfico 6.22, se nota como la tensión en el eje \hat{x} aumenta linealmente hasta 2.6 MPa aproximadamente y luego tiene varias subidas y bajadas de la tensión. Esto se produjo producto de que hubo una localización de la falla en una esquina del ensayo, produciendo varias fracturas. Además, es fácil de ver como las deformaciones fueron alteradas luego de los 140 s aproximadamente. Para los análisis respectivos del ensayo, se utilizaron los datos hasta ese tiempo.

Además, del Gráfico 6.22 es posible determinar que entre 70 y 125 segundos, la tasa de carga controlada a través de la bomba manual, fue de 30 kPa/s.



Figura 6.22. Ensayo 3. Gráfico Tensión-deformación-tiempo. $\sigma_2=0.2$ MPa

Los desplazamientos obtenidos en este ensayo son bastante bajos, según se ve en el Gráfico 6.23, dado que en la fijación del transductor de desplazamiento (eje \hat{x}) se dejó poco recorrido, chocando rápidamente con su tope (Figura 6.24).

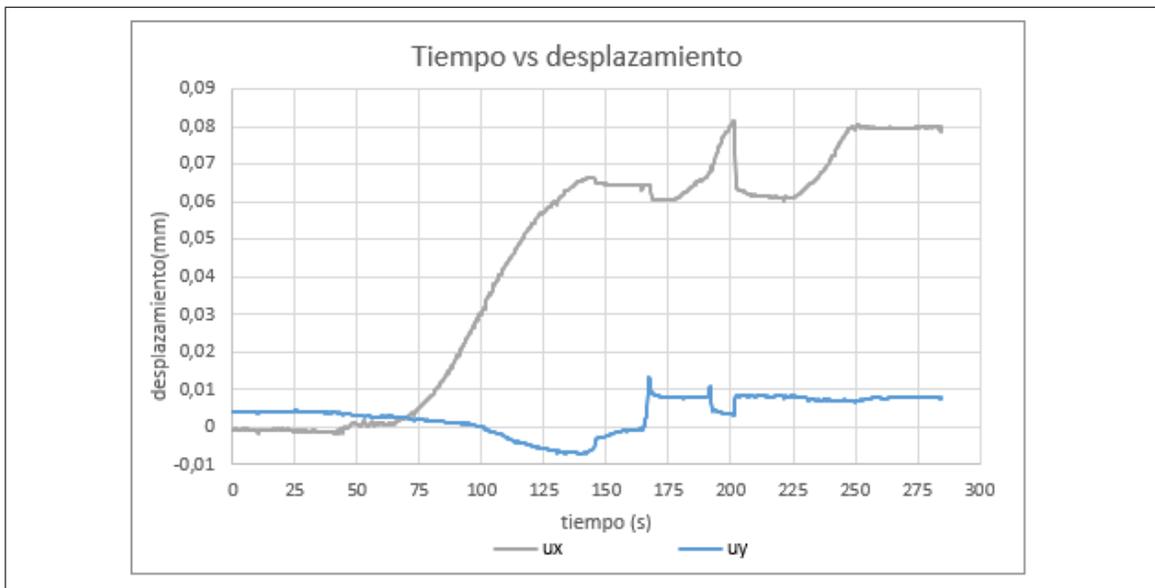


Figura 6.23. Ensayo 3. Gráfico Desplazamiento-tiempo. $\sigma_2=0.2$ MPa

6.3.2. Discusión de resultados Ensayo 3

En la Figura 6.24, se puede apreciar que el recorrido que tiene el pistón del transductor de desplazamiento es bastante corto, por lo que cuando este se desplazó hasta cierto límite, dejó de registrar el desplazamiento del ensayo.

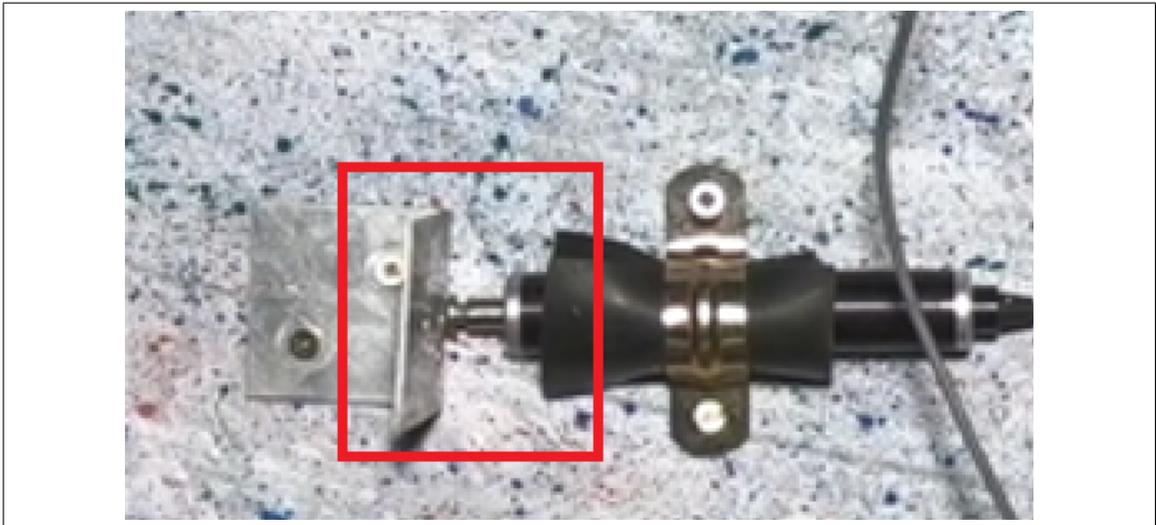


Figura 6.24. Recorrido corto de transductor de desplazamiento

En la Figura 6.25, puede verse a través de MatchID, como se concentra la tensión en una de las esquinas de la probeta, producto de que el contacto placas metálicas, es puntual y no continuo. Para el siguiente ensayo, se intercambiarán los suples con la placa metálica para ver su comportamiento durante el ensayo. Es decir, en el ensayo 3 se tiene, en orden: gatos hidráulicos-suples-placas metálicas-probeta. Se intentará intercambiar el orden a: gatos hidráulicos-placas metálicas-suples-probeta.

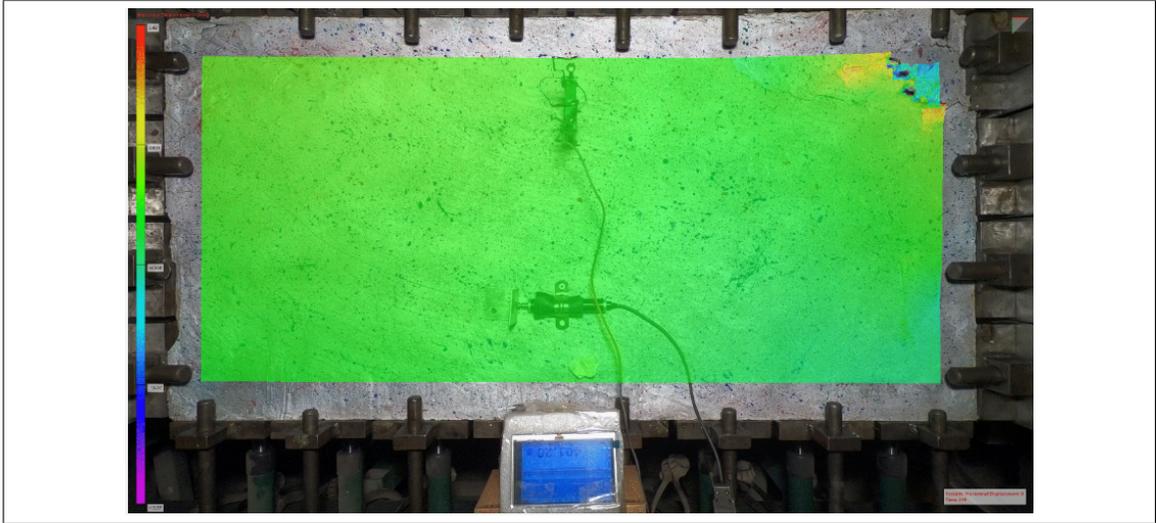


Figura 6.25. Concentración de tensiones en esquina de probeta

En la Figura 6.26, se puede apreciar claramente que se distorsionó la cara del eje \hat{z} , afectando las fijaciones de ambos transductores de desplazamiento. Si bien este comportamiento es esperable, es difícil de solucionar y los datos hasta el momento antes de que esto ocurra son utilizables (2.6 MPa y 0.14 % de deformación del eje \hat{x}).

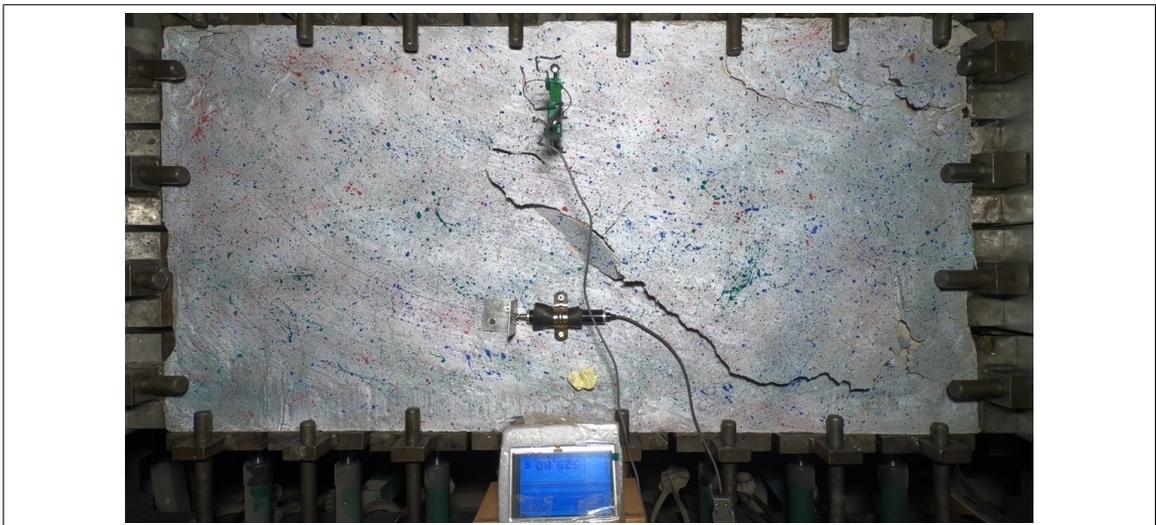


Figura 6.26. Concentración de tensiones en esquina de probeta

6.3.3. Correlación de imágenes Ensayo 3

La correlación de imágenes realizada en el programa MatchID para el ensayo 3 en el eje \hat{x} , consistió en obtener los desplazamientos para cada pixel en cada *frame* a lo largo del ensayo.

La Figura 6.27 muestra la zona de donde se extrajeron los desplazamientos, donde es posible determinar el desplazamiento relativo a través de la resta de los puntos señalados. Este resultado es comparable a lo obtenido por el transductor de desplazamiento mediante el *software* CATMAN.

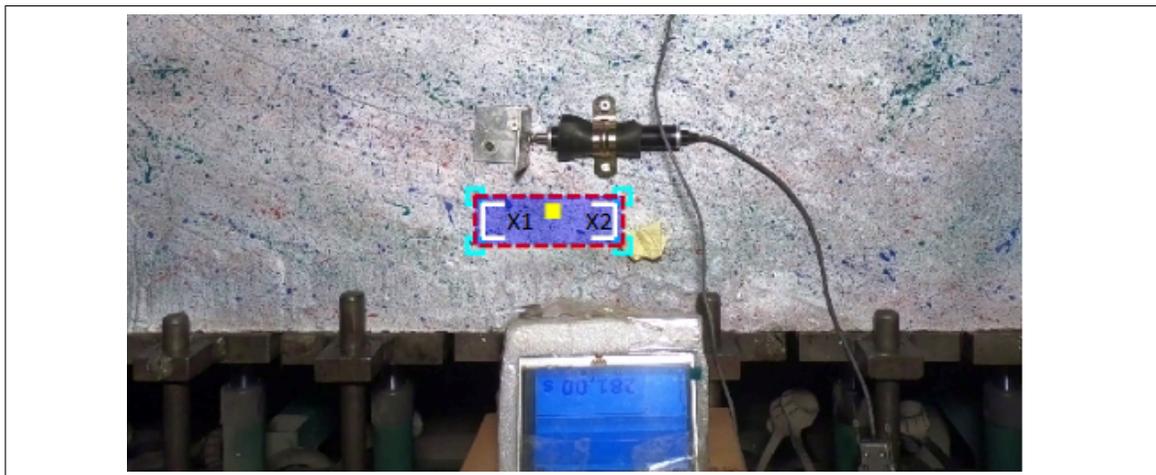


Figura 6.27. Zona de obtención de desplazamientos mediante MatchID en eje \hat{x} para ensayo 3

El Gráfico 6.28 muestra la comparación entre los desplazamientos obtenidos por la correlación de imágenes (MatchID) y los obtenidos por el transductor de desplazamiento (CATMAN) en el eje \hat{x} . Las curvas verde y naranja son bastante parecidas en su forma durante todo el ensayo. La curva de color verde (MatchID) tiene bastante ruido dado que se analizaron alrededor de 500 *frames*, teniendo una amplitud de aproximadamente 0,04 mm. Existe una diferencia de aproximadamente 0,07 mm entre ambas curvas, siendo un valor muy bueno para comparar las técnicas utilizadas, considerando que el valor de la diferencia es a nivel de una fracción de milímetros y bastante baja. Además, los lugares

de donde se sacaron los desplazamientos de la Figura 6.27 son bastante cercanos a los del transductor de desplazamiento pero no son los mismos. Las ventajas de la técnica de imágenes es que se obtiene un campo y no valores locales.

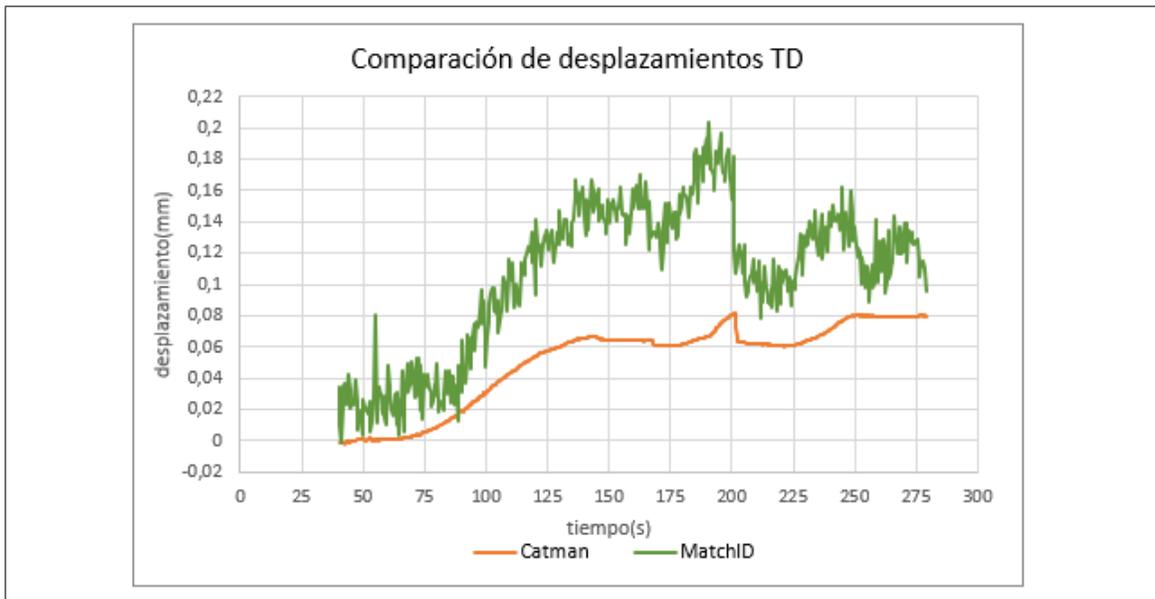


Figura 6.28. Comparación de desplazamientos entre transductor de desplazamiento (TD) y correlación de imágenes para ensayo 3

Respecto al eje \hat{y} , el escenario es similar. En la Figura 6.29, se ven los lugares de donde se obtuvieron los desplazamientos relativos (MatchID), para ser comparados por los obtenidos mediante *Epsilon* (CATMAN).

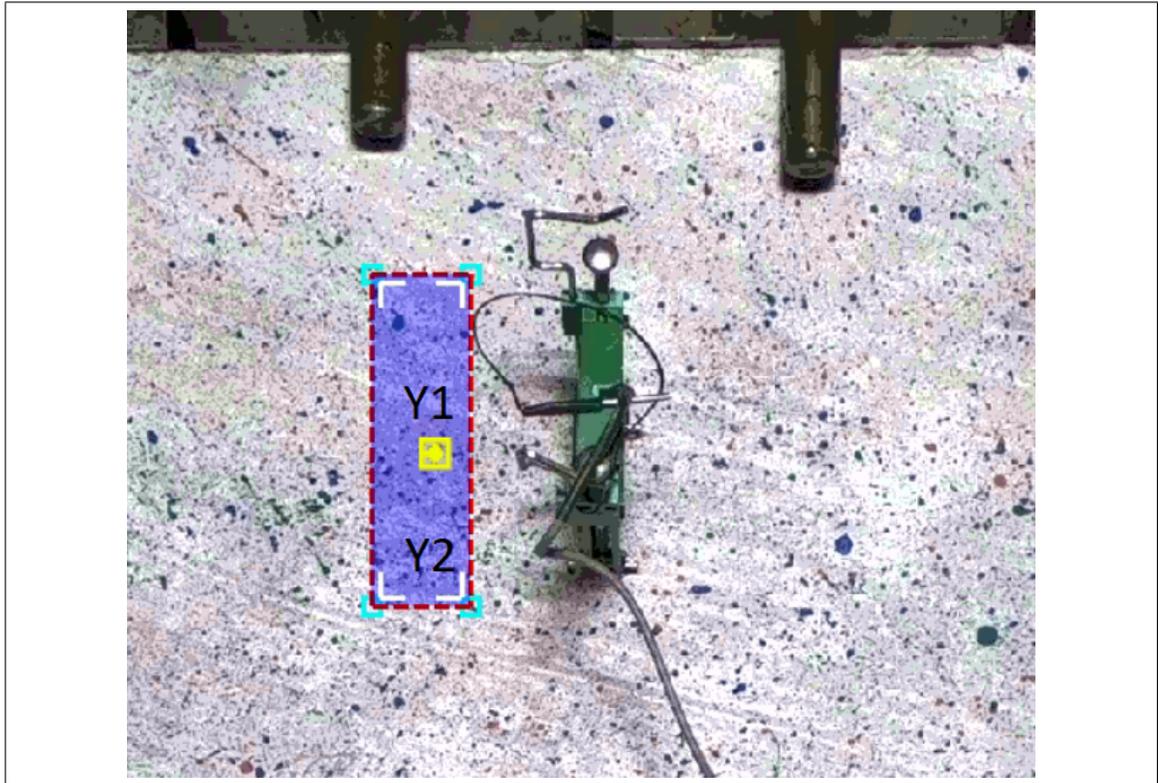


Figura 6.29. Zona de obtención de desplazamientos mediante MatchID en eje \hat{y} para ensayo 3

En el Gráfico 6.30, se ven ambas curvas del ensayo, donde es posible ver que la diferencia entre ellas es de 0,01 mm aproximadamente. Además, su forma es bastante similar hasta alrededor de los 200 s.

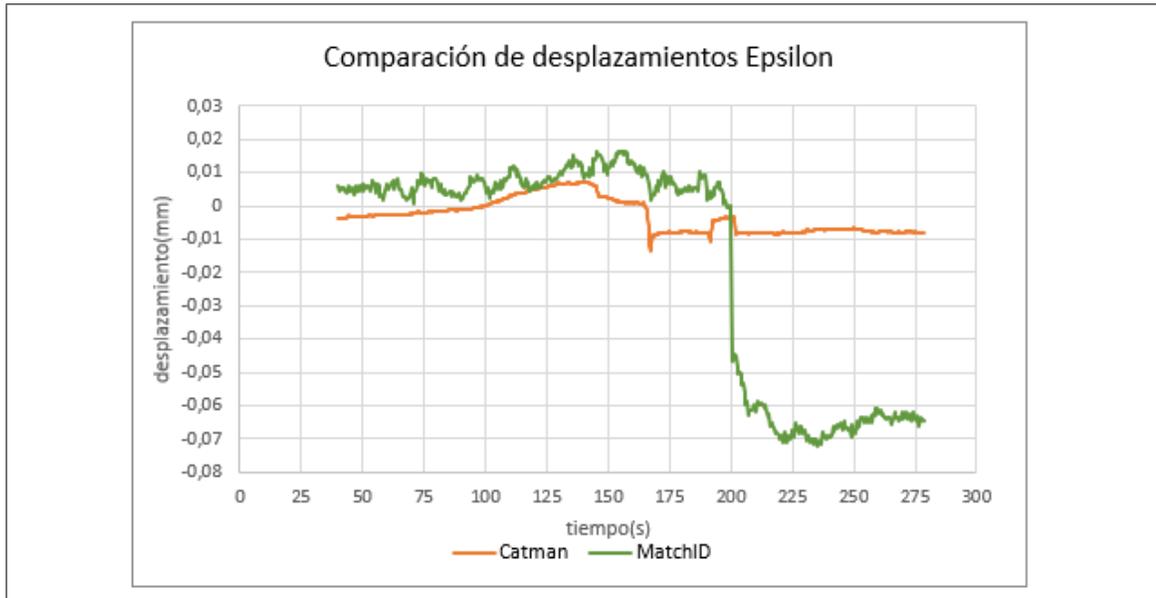
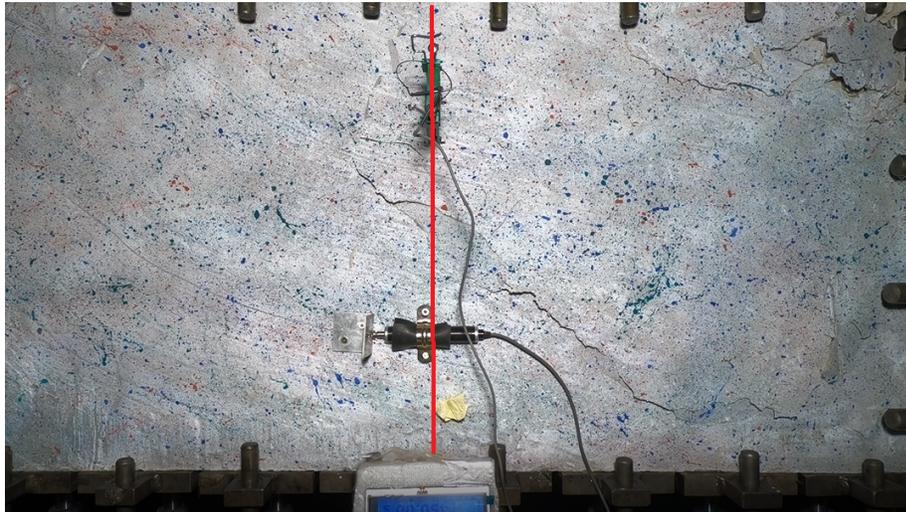
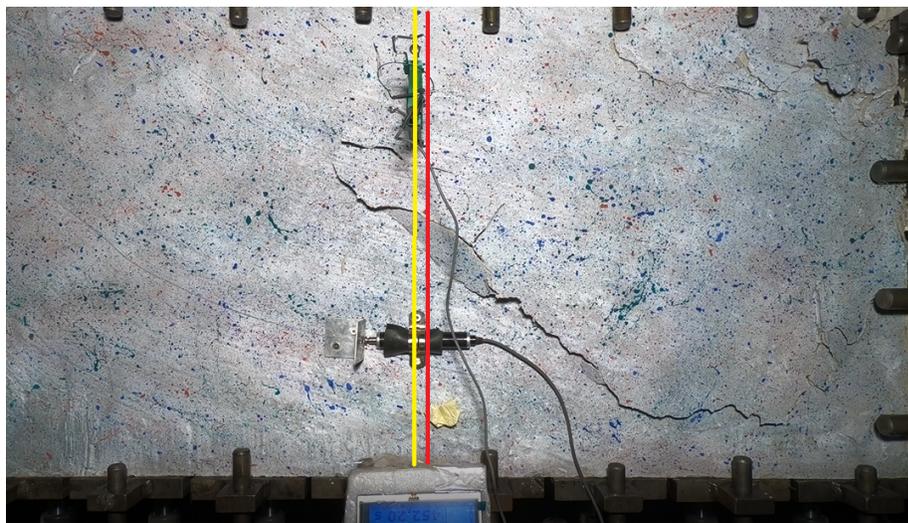


Figura 6.30. Comparación de desplazamientos entre *Epsilon* y correlación de imágenes para ensayo 3

Luego de los 200 s, ocurre un cambio brusco en la curva verde, producto de una fractura grande en la cara libre del ensayo. En la Figura 6.22 puede verse que para ese tiempo, existe una *peak* de tensión y luego una caída brusca. A continuación, se muestra un antes y después de aquel tiempo donde se evidencia una clara traslación del *Epsilon*. Se dibujaron líneas rojas de posición inicial y línea amarilla de posición final, cuyo desplazamiento es alrededor de 8,5 mm.



(a) Posición inicial de transductor de desplazamiento



(b) Posición final de transductor de desplazamiento

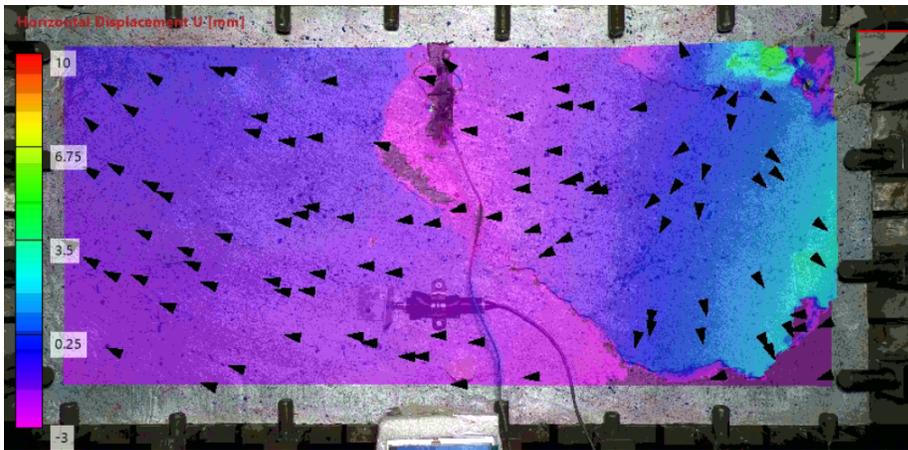
Figura 6.31. Movimiento de *Epsilon* durante ensayo 3

Se puede concluir que el *Epsilon* no es capaz de reconocer este movimiento dado que es una medición local de desplazamientos, mientras que la correlación de imágenes es una medición global y permite monitorear grandes movimientos.

Es posible medir los desplazamientos en el eje \hat{x} en la probeta completa para ver la distribución de las deformaciones en ella y evaluar su uniformidad. De la Figura se aprecia que existe una acumulación de tensiones en la esquina superior derecha.



(a) Posición inicial de transductor de desplazamiento



(b) Posición final de transductor de desplazamiento

Figura 6.32. Evaluación de la distribución de deformaciones en ensayo 3

Los triángulos negros reflejan el campo de vectores de desplazamiento horizontal en la probeta.

6.3.4. Conclusiones Ensayo 3

Las conclusiones obtenidas a partir del Ensayo 3, son las siguientes:

- (i) Los suples utilizados para disminuir el recorrido de los gatos hidráulicos funcionó muy bien. Habría que ver la posibilidad de intercambiar el orden y hacer que el contacto sea homogéneo y global y no solo mediante las placas metálicas.
- (ii) El módulo de Poisson fue de 0.32 y el módulo de Young fue de 1.4 GPa. Estos son adecuados y consistentes con las pruebas de compresión uniaxial UCS para el material de yeso, agua y RP.
- (iii) La tasa de velocidad obtenida fue de 30 kPa/s, siendo levemente mayor que los ensayos anteriores pero dentro del mismo rango.
- (iv) Para este ensayo, se corrigió la parte en voladizo del carro habilitado mediante las ruedas pequeñas. Además, se utilizó la placa y el marco de 1 cm para emparejar y nivelar antes de ensayar.
- (v) Hay que fijar mejor el recorrido del transductor de desplazamiento para evitar que este choque con su parte fija antes de que termine el ensayo.
- (vi) Se realizó la correlación de imágenes mediante el sistema de grabación de video durante el ensayo, donde para el eje \hat{x} existe una buena relación para las deformaciones obtenidas. Ocurre lo mismo para el eje \hat{y} , donde la diferencia es menor pero existe un traslación a nivel global de la cara libre que es percibida por la correlación de imágenes pero no por el transductor local *Epsilon*. Para temas de uniformidad, se puede ver que no es uniforme la transferencia de tensión en la cara de la probeta, por lo que el primer aspecto mencionado podría solucionarse.

6.4. Ensayo 4

A continuación, se presentan los resultados y conclusiones del ensayo 4 realizado a una probeta de material yeso, agua y RP. El fin de este ensayo es ver el comportamiento a

un confinamiento mayor del ensayo 3 para analizar tanto el comportamiento de la probeta como la ejecución del marco biaxial a confinamientos mayores a los realizados.

6.4.1. Resultados Ensayo 4

La fase de carga de este ensayo se dividió en tres etapas:

- (i) Se confinó la probeta en el eje \hat{x} y eje \hat{y} a la vez hasta 1 MPa de confinamiento, teniendo un desviador muy cercano a cero durante esta etapa.
- (ii) Se comenzó la carga desviadora desde 1 MPa hasta la falla y se continuó ensayando hasta lograr mayores desplazamientos.
- (iii) Descarga axial hasta presión de 1 MPa y luego descarga global del ensayo hasta presión igual a cero.

En el Gráfico 6.33 se puede notar que la tensión máxima alcanzada en el eje \hat{x} es similar al ensayo 3 (Figura 6.20), sin embargo, las deformaciones alcanzadas son mucho mayores. Luego de alcanzado el peak en 3.14 MPa, la curva decrece linealmente conforme al aumento de la deformación.

Respecto al estudio de módulo de Poisson y Young, siguiendo la lógica descrita, se tiene que para δt entre 150 y 200 s aproximadamente, se obtuvo $\nu=0.24$ y $E=1.5$ GPa. De manera similar al ensayo 3, los valores son parecidos, teniendo una disminución en Poisson pero bastante similar en módulo de Young, tanto al ensayo 3 como a los valores de la tabla 4.4.

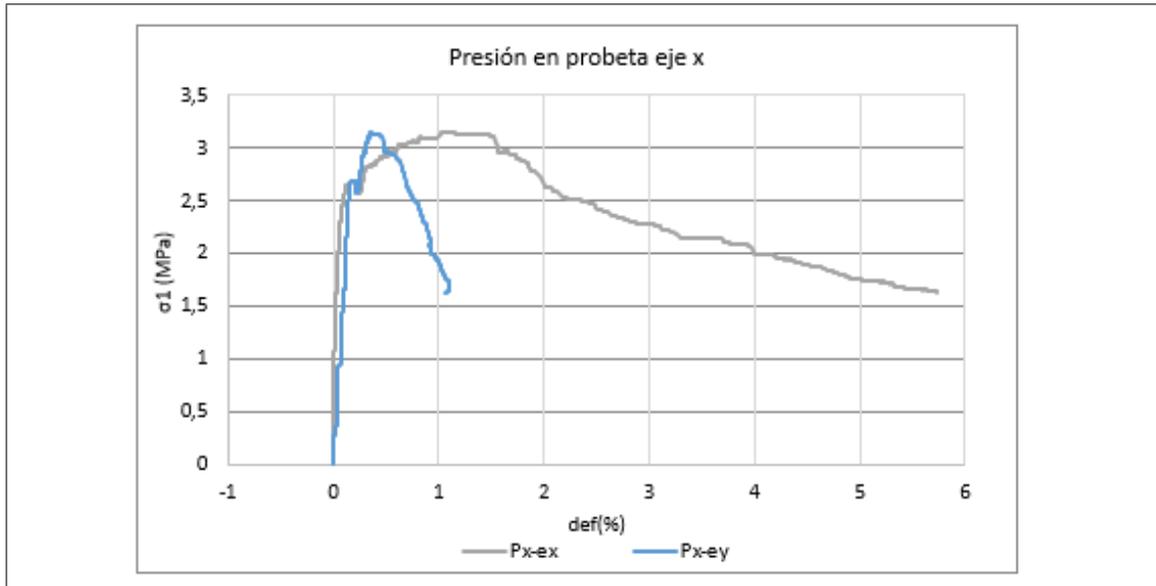


Figura 6.33. Ensayo 4. Gráfico Tensión-deformación. Presión en probeta eje \hat{x} . $\sigma_2=1$ MPa

En el Gráfico 6.34, puede verse y comprobarse la uniformidad de la tensión durante todo el ensayo de 1 MPa, desde la fase de confinamiento hasta la descarga global.

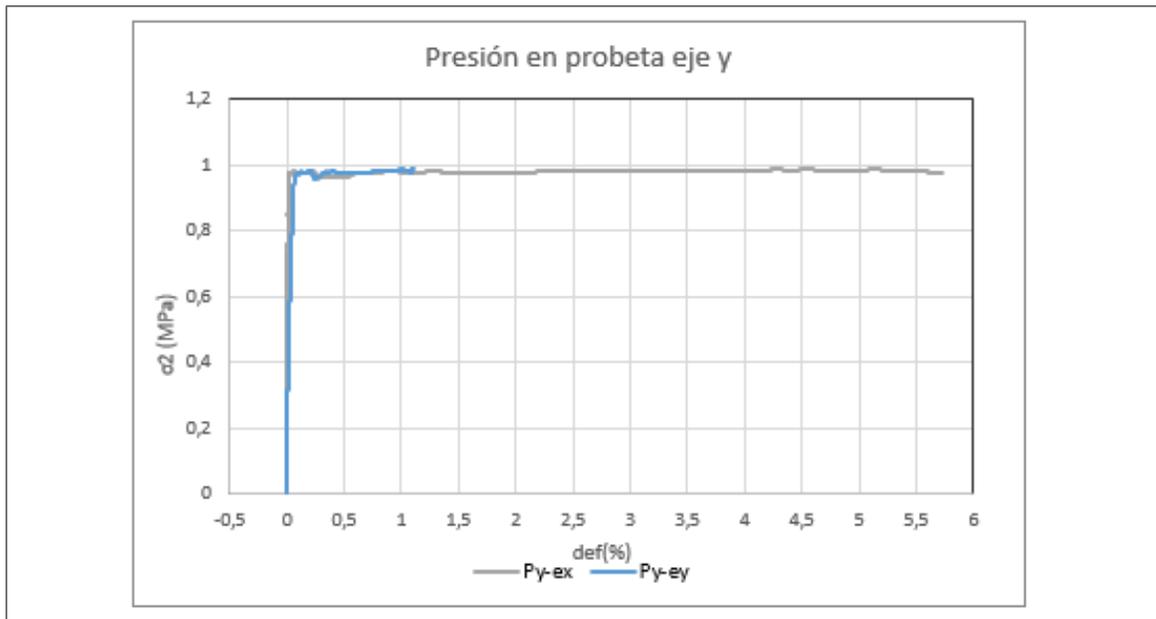


Figura 6.34. Ensayo 4. Gráfico Tensión-deformación. Presión en probeta eje \hat{y} . $\sigma_2=1$ MPa

En el Gráfico 6.35 se puede ver que el confinamiento logrado teniendo un desviador bastante cercano a cero, mediante la manipulación de bomba manual y automática al mismo tiempo. entre los 120 y 165 s, se pudo obtener la tasa de carga controlada obtenida a través de la bomba manual, siendo de 33 kPa/s. Este valor es bastante parecido al del ensayo 3.

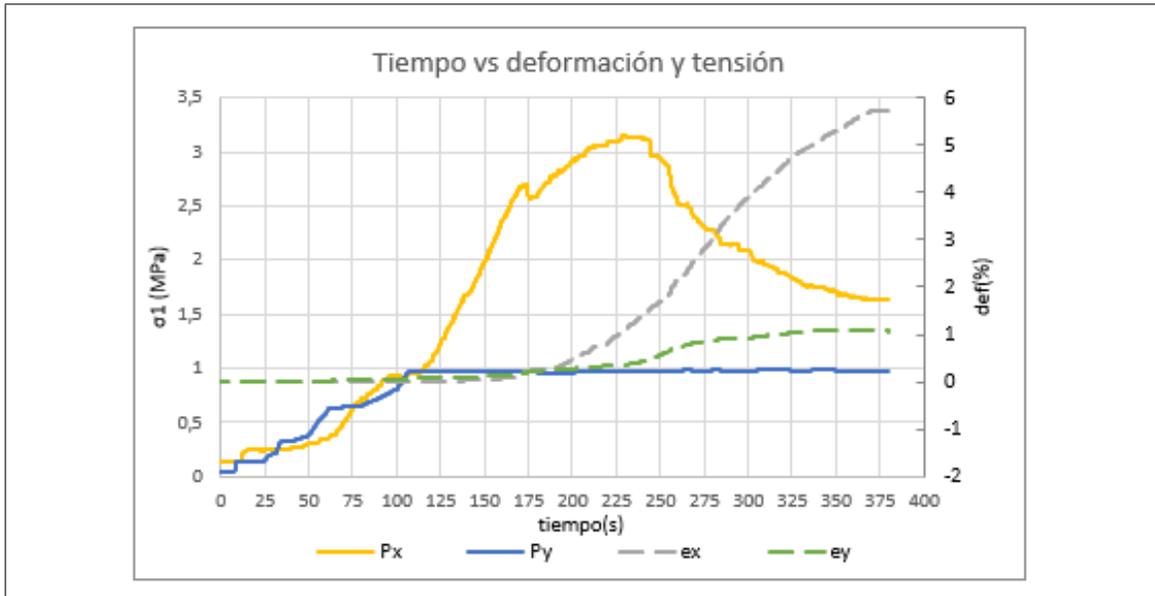


Figura 6.35. Ensayo 4. Gráfico Tensión-deformación-tiempo. $\sigma_2=1$ MPa

Los desplazamientos obtenidos son bastante altos en comparación a cualquier otro ensayo, teniendo un máximo de 5.72 mm en el eje \hat{x} según puede verse en el Gráfico 6.36.

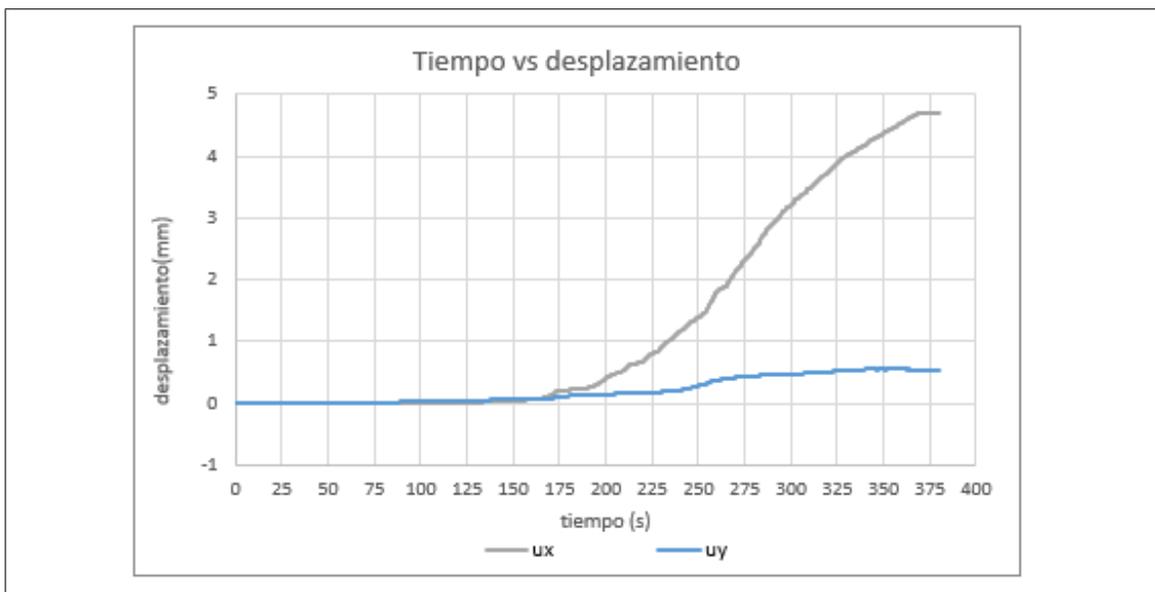


Figura 6.36. Ensayo 4. Gráfico Desplazamiento-tiempo. $\sigma_2=1$ MPa

6.4.2. Discusión de resultados Ensayo 4

En la Figura 6.37 y 6.38 se puede ver que al finalizar el ensayo, la cara libre de la probeta se destruyó, sin embargo, esto no afectó a la zona donde se anclan los transductores de desplazamiento durante el ensayo. Sin embargo, al analizar las figuras puede verse que estas zonas si son afectadas, pero este efecto ocurrió durante la fase de descarga global y no durante la ejecución del ensayo.



Figura 6.37. Vista en cara libre luego del ensayo. Parte a



Figura 6.38. Vista en cara libre luego del ensayo. Parte b

Otro hecho importante del ensayo, es que la probeta se rompió por completo en dos grandes partes. La Figura 6.39 muestra la probeta luego del ensayo donde se ve claramente

que al centro sufrió más daño y la Figura 6.40 es luego de limpiar los trozos pequeños y ver que existen dos grandes partes de la probeta, aproximadamente en la mitad.



Figura 6.39. Vista lateral eje \hat{y} luego del ensayo

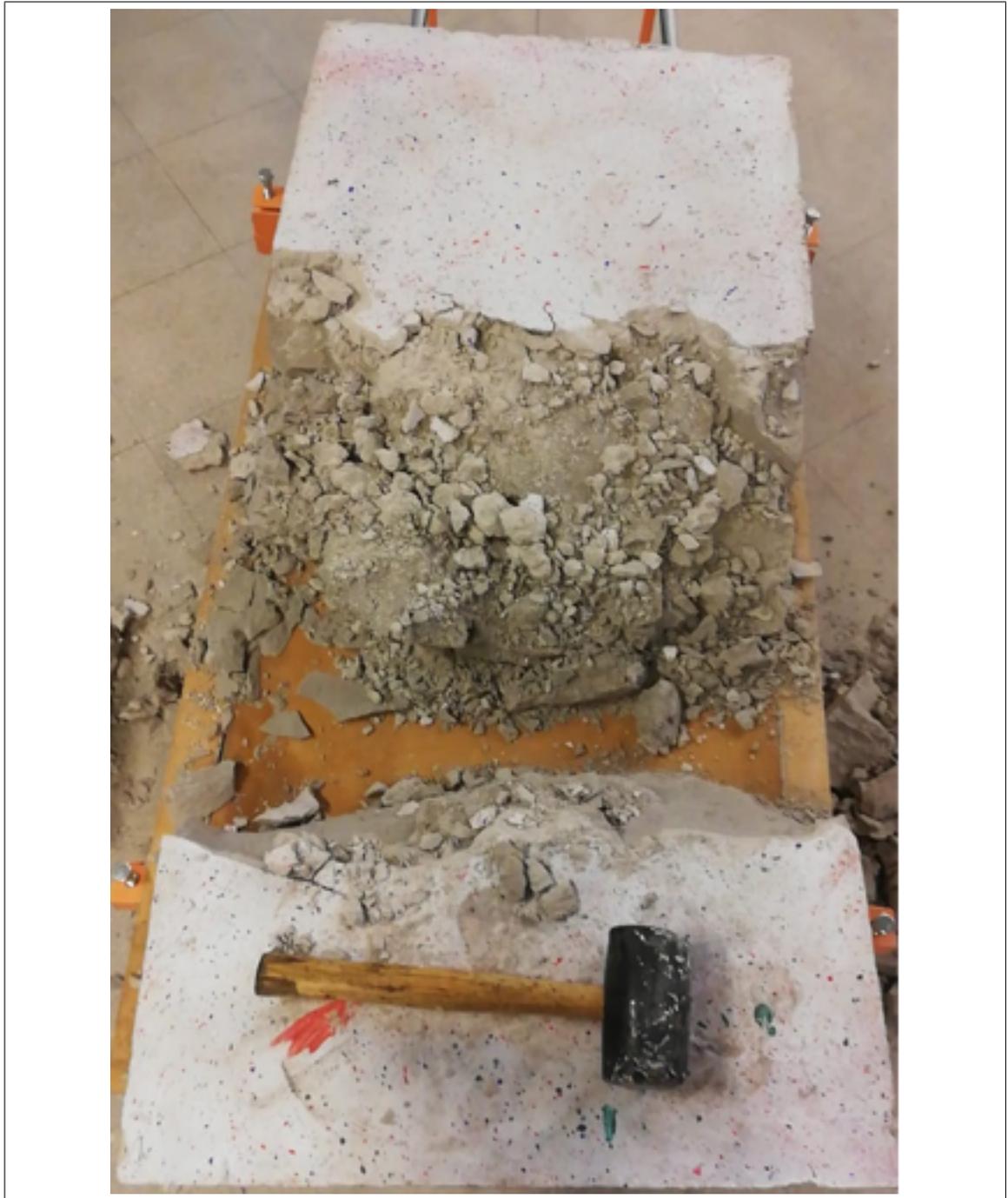


Figura 6.40. Vista en cara libre luego del ensayo. Parte c

6.4.3. Correlación de imágenes Ensayo 4

La correlación de imágenes realizada en el programa MatchID para el ensayo 4 en el eje \hat{x} , se realizó usando el mismo procedimiento del ensayo 3. La Figura 6.41 muestra la zona de donde se extrajeron los desplazamientos para poder comparar a lo obtenido por el transductor de desplazamiento mediante el *software* CATMAN.

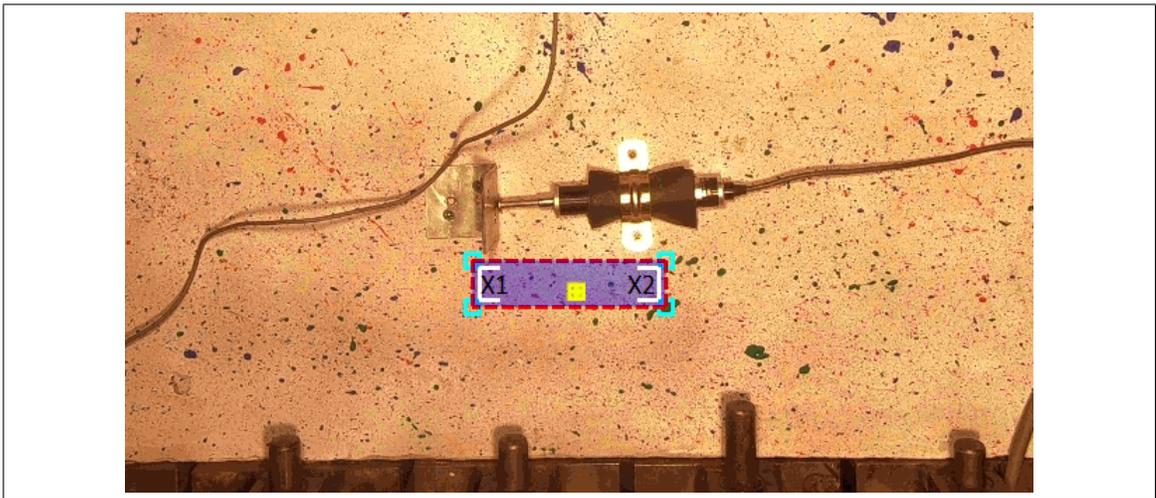


Figura 6.41. Zona de obtención de desplazamientos mediante MatchID en eje \hat{x}

El Gráfico 6.42 muestra la comparación entre los desplazamientos obtenidos por la correlación de imágenes (MatchID) y los obtenidos por el transductor de desplazamiento (CATMAN) en el eje \hat{x} . Si bien las curvas son bastante parecidas hasta alrededor de los 225 s a 0,5 mm de desplazamiento, luego de esto la curva naranja (Catman) aumenta drásticamente en comparación a la azul.

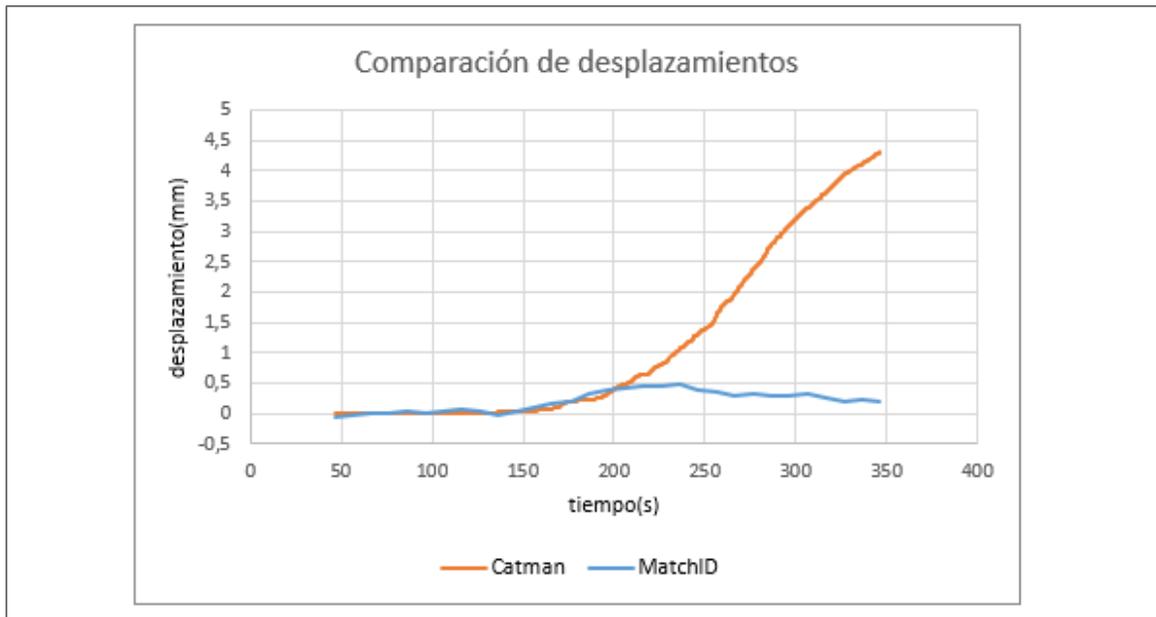
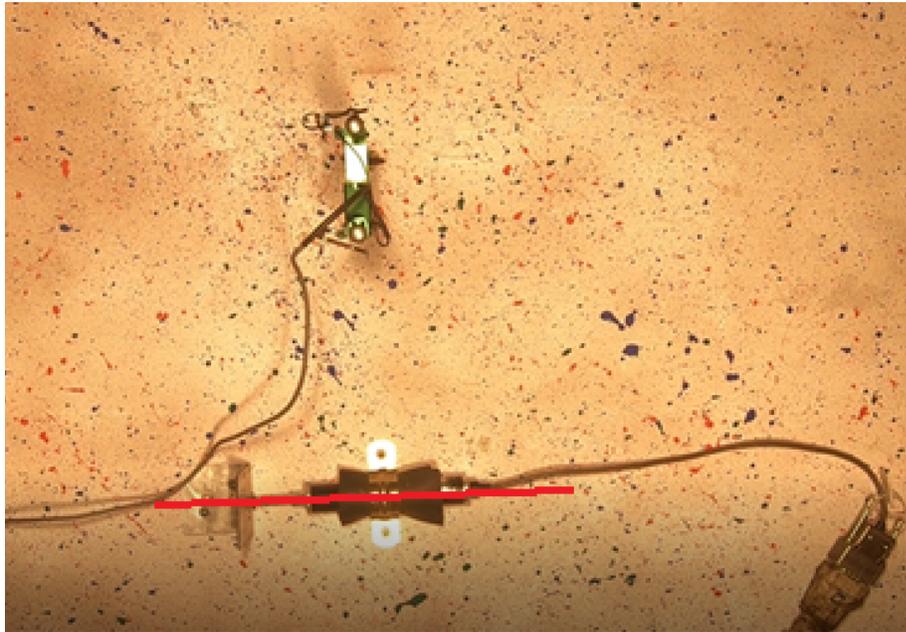
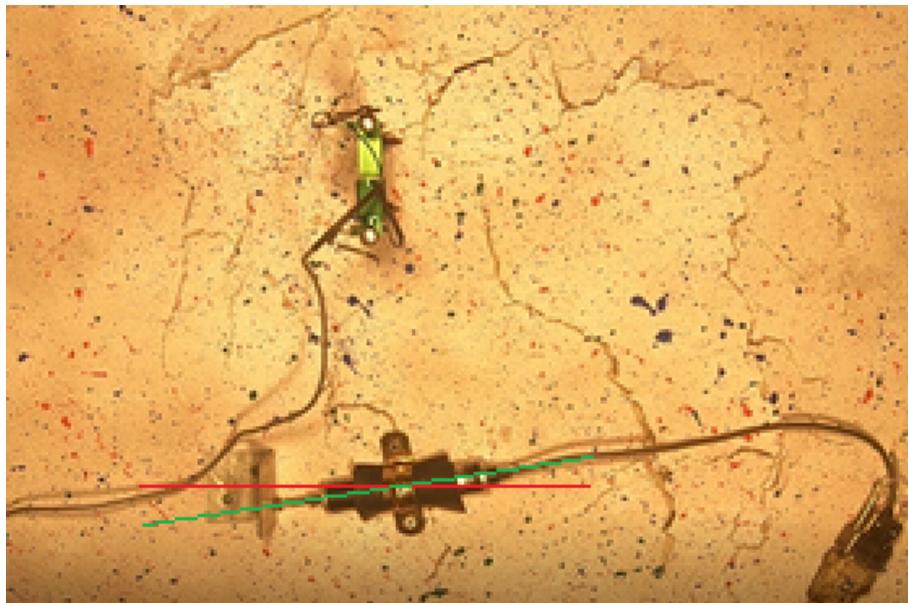


Figura 6.42. Comparación de desplazamientos entre transductor de desplazamiento y correlación de imágenes para ensayo 4

En las figuras a y b siguientes, es posible ver como el transductor de desplazamiento rota en torno a una de sus fijaciones. La línea roja muestra el eje al comienzo del ensayo, mientras que la verde muestra la rotación del eje al final del ensayo. Esto se debe a que la cara libre de la probeta se deforma producto de la ruptura de la probeta, es decir, existe una componente fuera del plano que no es posible medir mediante imágenes. Este tiempo de 225 s es coherente a la Figura 6.22, donde a tiempo similar, existe *peak* de la tensión.



(a) Posición inicial de transductor de desplazamiento



(b) Posición final de transductor de desplazamiento

Figura 6.43. Rotación de fijación de transductor de desplazamiento en ensayo 4

En la Figura 6.44, puede verse un transportador encima de las líneas verde y roja para evaluar la rotación. Se determina que la rotación es cercana a los 10° en sentido antihorario.

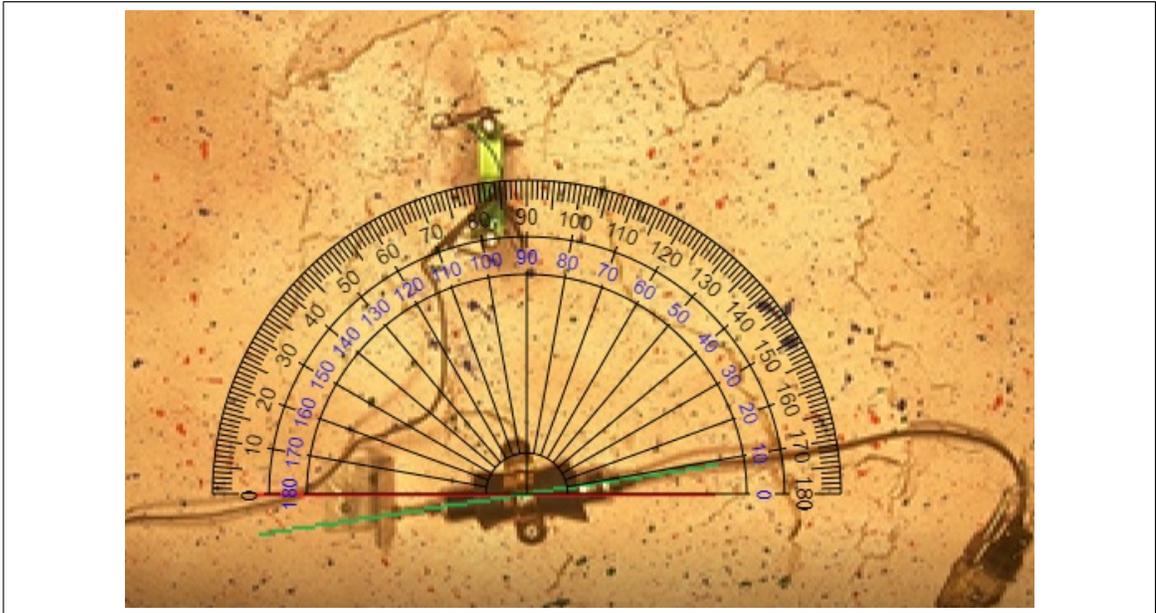


Figura 6.44. Rotación de fijación de transductor de desplazamiento en ensayo 4

Respecto al eje \hat{y} , el escenario es similar. En la Figura 6.45, se ven los lugares de donde se obtuvieron los desplazamientos relativos (MatchID), para ser comparados por los obtenidos mediante *Epsilon* (CATMAN).

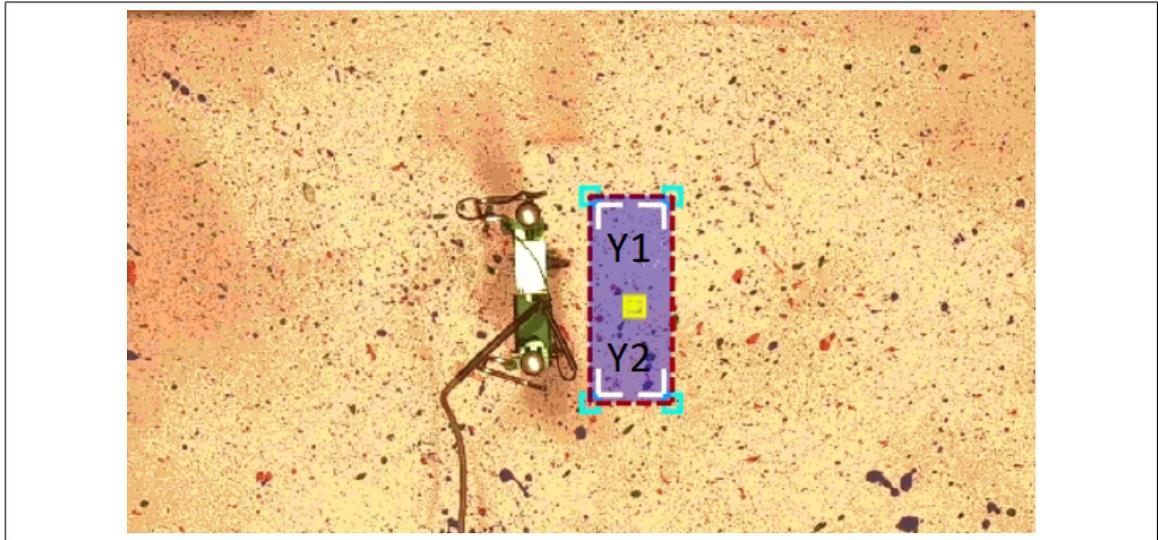


Figura 6.45. Zona de obtención de desplazamientos mediante MatchID en eje \hat{y} para ensayo 4

En el Gráfico 6.46, se ven ambas curvas del ensayo, donde es posible ver que la diferencia entre ellas es de 0,02 mm aproximadamente y su forma es bastante similar hasta los 220 s aproximadamente.

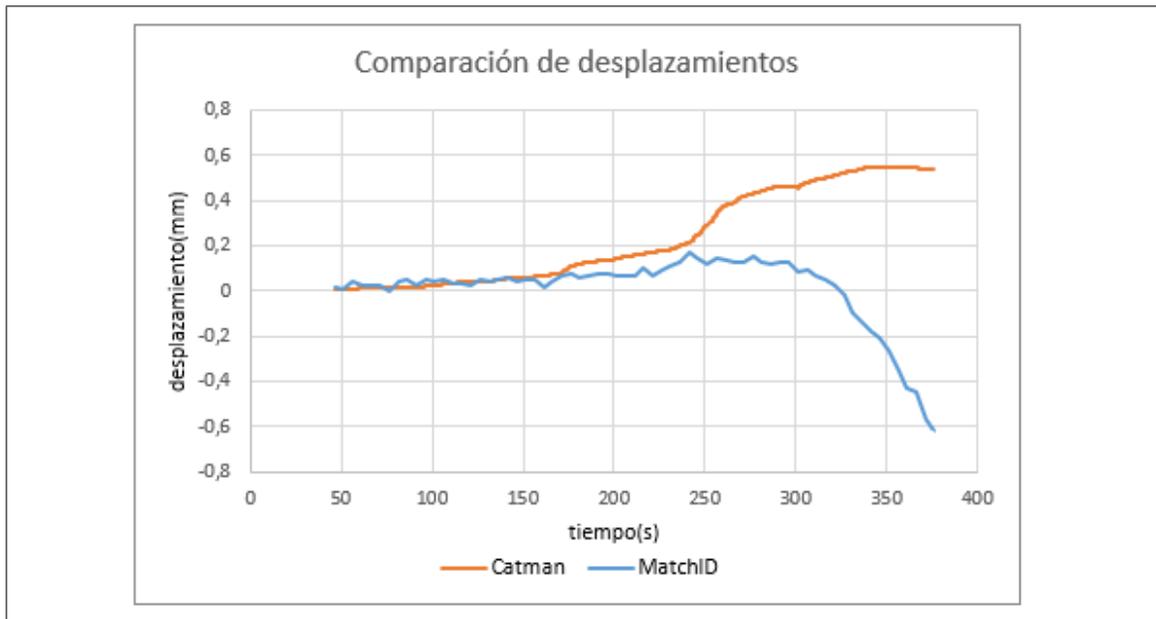
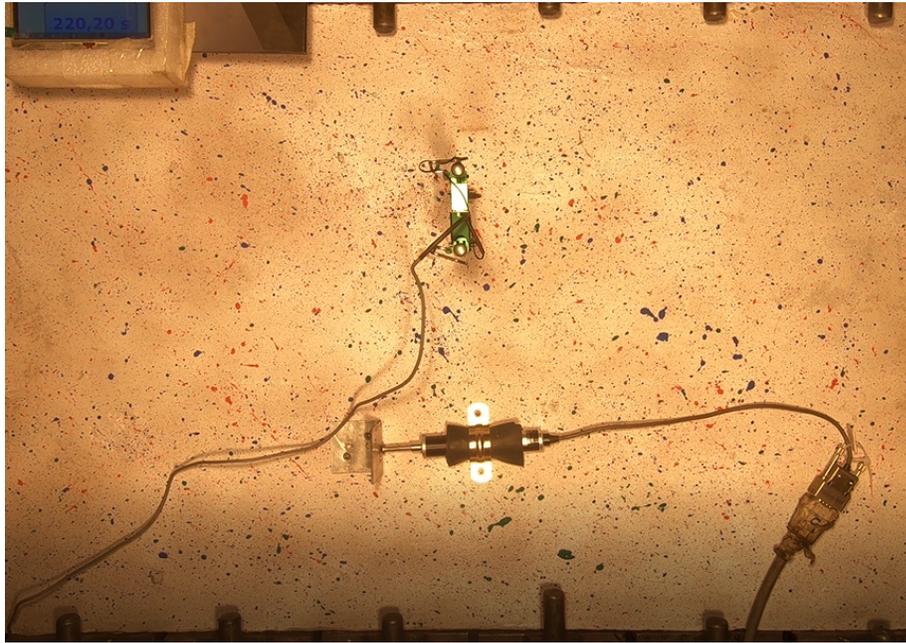
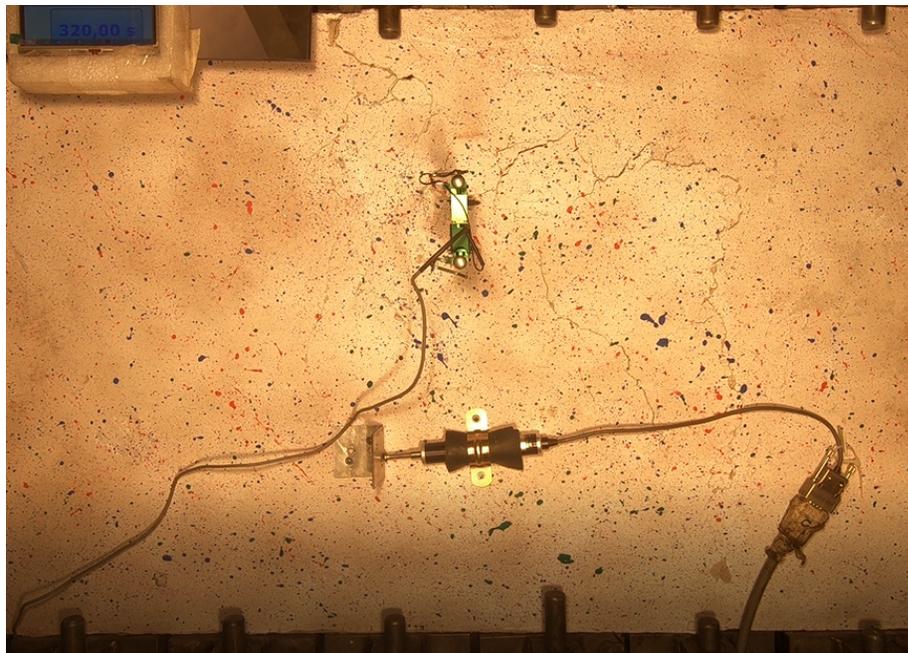


Figura 6.46. Comparación de desplazamientos entre *Epsilon* y correlación de imágenes para ensayo 4

Luego de los 220 s, ocurre un cambio en el sentido del desplazamiento entre ambas curvas. Esto se debe a que se van dando movimientos pequeños en las fijaciones del *Epsilon* debido a las pequeñas fisuras de la cara libre del ensayo. En otras palabras, el dispositivo *Epsilon* se mueve como cuerpo rígido, cuyo movimiento es captado por la medición global de la correlación de imágenes (MatchID) y no por la medición local (*Epsilon*).



(a) Posición inicial de transductor de desplazamiento

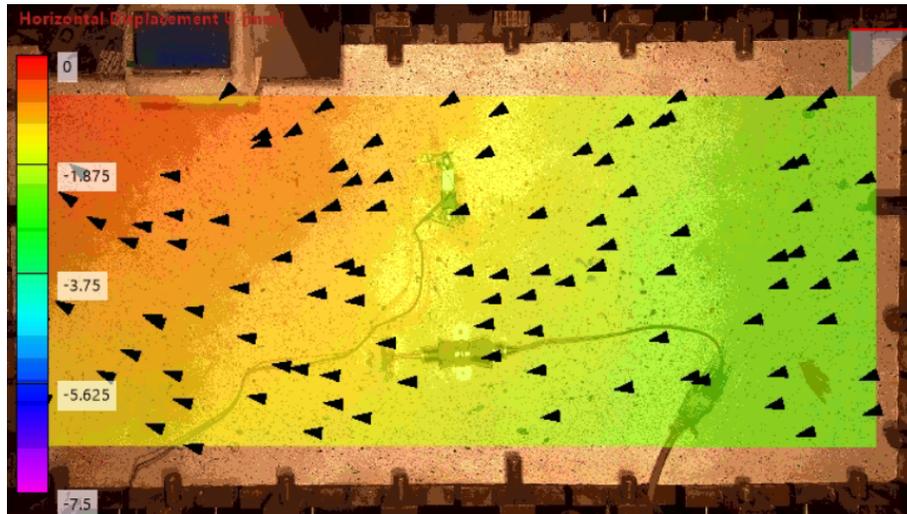


(b) Posición final de transductor de desplazamiento

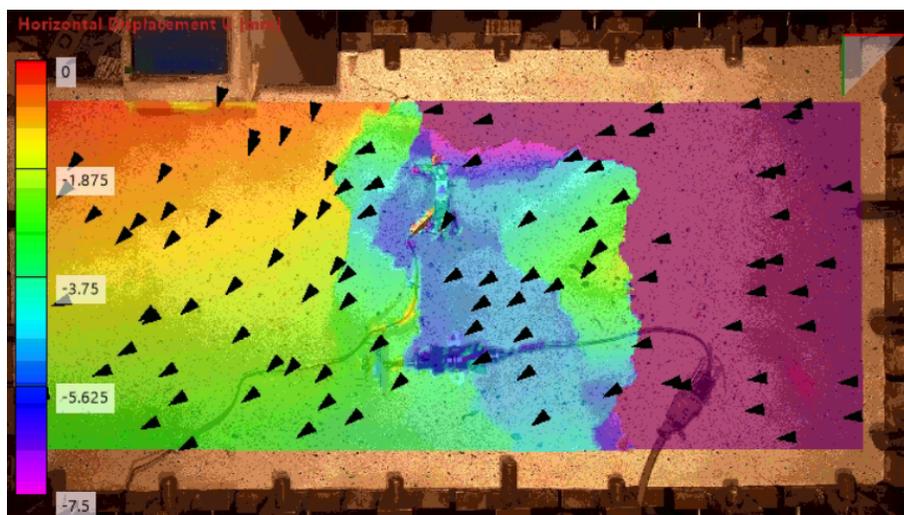
Figura 6.47. Movimiento de *Epsilon* durante ensayo 4

Se puede concluir que el *Epsilon* no es capaz de reconocer este movimiento dado que es una medición local de desplazamientos. Mientras que la correlación de imágenes es una medición global.

Es posible medir los desplazamientos en el eje \hat{x} en la probeta completa para ver la distribución de las deformaciones en ella y evaluar su uniformidad. Se puede apreciar que se mejoró la uniformidad en gran medida durante el ensayo hasta la falla y se altera la cara libre de la probeta.



(a) Posición inicial de transductor de desplazamiento



(b) Posición final de transductor de desplazamiento

Figura 6.48. Evaluación de la distribución de deformaciones en ensayo 4

Los triángulos negros reflejan el campo de vectores de desplazamiento horizontal en la probeta.

6.4.4. Conclusiones Ensayo 4

Las conclusiones obtenidas a partir del ensayo 4, son las siguientes:

- (i) Se adaptaron los suples para que en la cara en que actúan los gatos hidráulicos, el contacto con la probeta sea a través de los suples de manera global y homogénea, evitando concentración de tensiones en alguna zona.
- (ii) El transductor de desplazamiento y el equipo del marco biaxial fue capaz de obtener desplazamientos de hasta 4,7 mm.
- (iii) El módulo de Poisson fue de 0.24 y el módulo de Young fue de 1.5 GPa. Estos son adecuados y consistentes con las pruebas de compresión uniaxial UCS para el material de yeso, agua y RP. El módulo de Poisson puede ser algo bajo respecto al ensayo anterior pero está dentro del rango entre 0.1 y 0.3 que proporciona Heuer and Hendron (1969).
- (iv) La tasa de carga controlada obtenida fue de 33 kPa/s casi idéntica a la del ensayo anterior.
- (v) El manejo de las dos bombas en la etapa de confinamiento fue exitosa, aún cuando una era manual y la otra automática, el desviador fue prácticamente cero.
- (vi) Se podría corregir el sistema hidráulico mediante la adición de un manifold para que la bomba de confinamiento en eje \hat{y} sea manual y la de rotura en el eje \hat{x} sea automática. Habría que evaluar la comodidad y funcionalidad durante el ensayo.
- (vii) El marco biaxial cumplió de manera exitosa los objetivos planteados, donde la probeta comienza a disminuir la tensión aún cuando la deformación aumenta luego de la falla, siendo fases de comportamiento bastante lineales.
- (viii) La correlación de imágenes mediante el sistema de grabación de video usando MatchID fue exitoso. En primera parte, para el eje \hat{x} , ambas curvas fueron muy parecidas hasta que por temas de fisuración superficial de la muestra, el transductor de desplazamiento rotó en 10° en sentido antihorario. Para el eje \hat{y} , hubo muy poca diferencia entre las curvas hasta las primeras fisuras que se manifestaron nuevamente en la cara libre de la probeta. Respecto a la uniformidad

del ensayo, se mejoró en gran medida mediante el contacto probeta-suple ya planteado, logrando una distribución de deformaciones bastante uniforme.

7. CONCLUSIONES

La presente investigación consistió en la habilitación de un marco de carga biaxial para realizar ensayos de laboratorio en probetas prismáticas de $120 \times 60 \times 20$ cm capaces de reproducir el estado tensional de una roca hasta 5.1 MPa. Para ello, se realizaron diferentes ensayos uniaxiales de probetas de 5×11 cm evaluando propiedades reducidas de una roca dura frágil.

Luego de obtener el material análogo, se elaboró un protocolo de probetas en base a revisión bibliográfica pero principalmente ensayo y error para la confección de estas probetas grandes.

Los cuatro ensayos realizados permitieron evaluar el protocolo de confección de probetas, el comportamiento del marco biaxial, instrumentación y monitoreo durante la ejecución de cada ensayo, así como sus limitaciones y recomendaciones.

Todo lo anterior permite obtener las siguientes conclusiones:

- (i) Las propiedades reducidas de los ensayos uniaxiales realizados encajan perfectamente a los rangos de valores que proponen Heuer and Hendron (1969) para que un material simule una roca.
- (ii) El protocolo realizado para la confección de probetas grandes fue exitoso. Se logró mediante el RP aumentar el tiempo de fraguado a 60 min aproximadamente, tiempo suficiente para una completa elaboración de probeta y limpieza de materiales. Además, el tiempo de curado mínimo de 14 días que se había previsto, funcionó perfectamente en el ensayo 4.
- (iii) El espacio para la elaboración de probetas, debe ser amplio con conexión eléctrica, desagüe competente y salida de agua con manguera.
- (iv) La habilitación del marco biaxial se basó principalmente en evaluar el estado de todas la mangueras (alrededor de 30 unidades), lubricación de estas y de placas

metálicas, estado de manifolds y bombas. Además, el funcionamiento global y general del marco biaxial.

- (v) La instrumentación utilizada para el ensayo se dividió en grabación de video y almacenamiento de datos de tensión y desplazamiento. Del primero se pudo concluir que las luces halógenas eran débiles y debían ser reemplazadas por dos focos de alta potencia. Para la obtención de datos de tensión y deformaciones, se utilizaron celdas de carga de 50 y 5 ton con marcos de cargas respectivos y competentes a cada caso. El transductor de desplazamiento debe tener un recorrido de ejecución de ensayo de mínimo 5 cm, cuya extensión total sea igual o mayor a esta cifra, mientras que el *Epsilon* funcionó de manera perfecta, confirmando los confinamientos constantes durante el ensayo. Sin embargo, estas mediciones locales están afectadas a movimientos producto de la fisuración superficial de la probeta.
- (vi) El carro habilitado para el ensayo es capaz de levantar y mantener a la probeta en altura durante la ejecución del ensayo, con capacidad máxima de 350 kg, siendo de 160 kg aprox el peso de la probeta del ensayo 3 y 4.
- (vii) Los gatos hidráulicos debieron ser ayudados mediante suples para no limitar su recorrido máximo de 6cm. Cabe destacar que el contacto con la probeta debe ser de una pieza, tal y como se detalló en el ensayo 4.
- (viii) Las propiedades obtenidas a partir de los ensayos biaxiales de módulo de Poisson, módulo de Young y curvas de tensiones principales, se asemejan bastante a las respectivas de ensayos uniaxiales. Esto permite concluir que el material modelo conserva sus cualidades tanto en las probetas de 5×11 cm como en las grandes de $20 \times 60 \times 120$ cm.
- (ix) El sistema de correlación de imágenes permite evaluar con mediciones globales lo que ocurre durante el ensayo, mientras que la instrumentación local lo hace de manera más precisa mientras la fijación del dispositivo no se mueva. Ambas mediciones se complementan bastante bien y muestran resultados concordantes.

8. PERSPECTIVAS

Obtenidas las conclusiones de la presente tesis, es importante nombrar algunas posibles extensiones del marco de trayectorias biaxiales. A continuación se muestra un listado de posibles mejoras.

- (i) Es posible caracterizar un cubo de material modelo utilizado (yeso, agua y RP) en un ensayo triaxial para obtener las tres tensiones principales. Este cubo sería de dimensiones menores a la de la probeta utilizada para el marco biaxial, siendo de las dimensiones del ensayo triaxial a ensayar, por lo que los protocolos utilizados pueden variar ligeramente. Se podría proponer realizar tales pruebas en el aparato triaxial utilizando cubos de dimensiones de 50 mm de longitud (Browning et al., 2017) o muestras paralelepípedas con dos lados de 50 mm y una de 100 mm de longitud (Chang & Haimson, 2000).
- (ii) En el laboratorio de Geotecnia Experimental existe un *cubo* que se conecta con una bomba similar a las utilizadas en esta investigación y es capaz de representar la excavación a la que se ve sometida una roca durante el proceso de *block caving*. Este implemento manifiesta una relajación de tensiones localizada cuando la roca alcanza la falla. La aplicación a este método de diseño es muy importante y uno de los grandes objetivos de la habilitación del marco biaxial.
- (iii) Sería interesante comparar las deformaciones registradas durante los ensayos del marco biaxial con las deformaciones registradas en áreas sometidas a *block caving*. Es importante recopilar datos relacionados a la deformación de monitoreo local y global de dichas áreas.
- (iv) Es posible monitorear la respuesta sísmica de la probeta frente a la deformación mediante una matriz de emisiones acústicas para determinar tasa y ubicación de la microsismicidad y así, obtener el tamaño y liberación de la energía de los eventos sísmicos. Teniendo esta información, sería interesante compararla con la sismicidad que ocurre en áreas sometidas a *block caving* que tienen monitoreo sísmico.

- (v) Es posible añadir discontinuidades de propiedades conocidas en el proceso de fraguado de la probeta para evaluar diferentes escenarios y el comportamiento de la muestra durante la ejecución del ensayo mediante el método de Prudencio (2002) o algún otro método que sea compatible.
- (vi) Mediante la incorporación de otro manifold, es posible evaluar el desempeño de utilizar la bomba manual solo al proceso de confinamiento en el eje \hat{y} y dejar la bomba automática para la carga desviadora en el eje \hat{x} . Esto ayudaría a que una persona no este toda la duración del ensayo manipulando la bomba y pueda atender a los detalles de la probeta y el marco biaxial.
- (vii) Cuando la probeta falla, es probable que dañe la cara libre de esta, pudiendo alterar las fijaciones de los transductores de carga. Para poder tener datos de comparación, es posible instalar *strain gages* entre el marco biaxial y las placas metálicas para obtener el desplazamiento final obtenido durante la ejecución del ensayo.
- (viii) Es posible instalar transductores láser de desplazamiento que pueden instalarse por sobre la probeta en un soporte externo, al igual que la cámara y los focos y medir desplazamientos en forma externa. Así se podría evitar movimientos en las fijaciones de los transductores de desplazamiento.
- (ix) Es posible escalar los resultados de laboratorio a las condiciones de una mina real, considerando variables como tamaño medio de partícula, deformaciones de la probeta o sismicidad.
- (x) Pueden usarse los protocolos establecidos para elaborar una probeta con materiales de diferente módulo de Young que representen dos estratos distintos. Así sería posible analizar el inicio de propagación de fracturas y su trayectoria en el contacto entre estos (Li et al., 2014).
- (xi) Sería interesante poder comparar las deformaciones obtenidas por correlación de imágenes mediante satélites a niveles superficiales en una mina por *Interferometric SAR* (InSAR) (Woo et al., 2012); con las obtenidas por el marco biaxial

desarrollado en esta tesis con una probeta de características similares a la roca de aquella mina.

REFERENCIAS

- Browning, J., Meredith, P. G., Stuart, C. E., Healy, D., Harland, S., & Mitchell, T. M. (2017). Acoustic characterization of crack damage evolution in sandstone deformed under conventional and true triaxial loading. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(6), 4395–4412.
- Chang, C., & Haimson, B. (2000). True triaxial strength and deformability of the German Continental Deep Drilling Program (KTB) deep hole amphibolite. , 105, 18,999–19,013.
- Cochilco. (2005). Reseña de la Innovación Tecnológica en la Minería del Cobre: El Caso Codelco.
- García, F. (2005). Diseño y construcción de un equipo de laboratorio para realizar ensayos a probetas de hormigón simulando roca fracturada. Tesis de magíster no publicada, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Heuer, R. E., & Hendron, A. J. (1969). Geomechanical Model Study of the Behavior of Underground Openings in Rock Subjected To Static Loads - 3. Tests on Lined Openings in Jointed and Intact Rock. *US Waterw Exp Stn Contract Rep N-69-1*.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Estimación de la resistencia de macizos rocosos en la práctica. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*(C), 28.
- Jamil, S. M. (1992). Strength of non-persistent rock joints. Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois.
- Li, L. C., Tang, C A., Zhao, X D., & Cai, M. (2014). Block caving-induced strata movement and associated surface subsidence: a numerical study based on a demonstration model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(4), 1165–1182.
- Liu, X.-w., Liu, Q.-s., Huang, S.-b., Wei, L., & Lei, G.-f. (2016). Fracture Propagation Characteristic and Micromechanism of Rock-Like Specimens under Uniaxial and Biaxial Compression. *Shock and Vibration*, 2016.
- Prudencio, M. (2002). Estudio de la resistencia y modo de falla de macizos rocosos con fracturamiento no persistente. Tesis doctoral no publicada, Pontificia Universidad

Católica de Chile. Santiago, Chile.

- Prudencio et al., M. (2007). Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(6), 890–902.
- Woo, K. S., Eberhardt, E., Rabus, B., Stead, D., & Vyazmensky, A. (2012). Integration of field characterisation, mine production and InSAR monitoring data to constrain and calibrate 3-D numerical modelling of block caving-induced subsidence. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 53, 166–178.
- Zegpi, N. (2014). Estudio experimental del efecto de las propiedades resistentes de las estructuras en macizos rocosos con fracturas no persistentes.
- Zhong et al., Z. (2018). Fracture mechanism of naturally cracked rock around an inverted U-shaped opening in a biaxial compression test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 103(April), 242–253.

ANEXO

A. ANEXO A

En los siguientes *hyperlinks* se han subido los videos correspondientes a cada ensayo realizado, con el fin de poder los detalles que se han descrito en la presente tesis en la plataforma *YouTube*.

Ensayo 1. Fase de carga 1. [Click aquí.](#)

Ensayo 1. Fase de carga 2. [Click aquí.](#)

Ensayo 2. Fase de carga 1. [Click aquí.](#)

Ensayo 2. Fase de carga 2. Parte A. [Click aquí.](#)

Ensayo 2. Fase de carga 2. Parte B. [Click aquí.](#)

Ensayo 3. [Click aquí.](#)

Ensayo 4. [Click aquí.](#)

B. ANEXO B

A continuación se presentan algunas fotos de interés para probetas de material modelo. Principalmente se muestra cómo se altera la cara libre antes y después del ensayo y el proceso de elaboración y fraguado de una probeta.



(a) Cara libre para antes del ensayo 3



(b) Cara libre para después del ensayo 3

Figura B.1. Cara libre para antes y después del ensayo 3



(a) Cara libre para antes del ensayo 4



(b) Cara libre para después del ensayo 4

Figura B.2. Cara libre para antes y después del ensayo 4



(a) Probeta 4 en proceso de fraguado



(b) Área de trabajo para elaboración de probetas

Figura B.3. Elaboración de probeta 4