



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**INFLUENCIA DE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS EN EL
COMPORTAMIENTO POST-PEAK DE ROCAS FRÁGILES**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

SERGIO MATÍAS FLORES CURRUTEA

PROFESORA GUÍA:

KIMIE SUZUKI MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

PIA LOIS MORALES

JAVIER VALLEJOS MASSA

LORENA BURGOS CEDEÑO

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el fondo basal AFB220002 del Advanced Mining Technology Center

SANTIAGO DE CHILE

2023

Resumen

La profundización de operaciones mineras involucra nuevos desafíos relacionados a la geomecánica, donde es necesario anticipar y tomar acción para prevenir daños que pueden ser causados por eventos asociados a trabajar en áreas de altas concentraciones de esfuerzos, como los estallidos de roca. Para esto, la curva esfuerzo-deformación obtenida de ensayos permite tener un mejor entendimiento del comportamiento de la roca bajo condiciones de altos esfuerzo, y la parte post-peak puede ayudar a predecir el comportamiento de la roca una vez que se excede su resistencia máxima. Un inconveniente es que no siempre puede ser obtenida a escala de laboratorio, y esto depende, entre otras cosas, de la fragilidad de la muestra y sus propias características. Este estudio busca encontrar relaciones entre algunas propiedades mecánicas y geológicas para predecir la ocurrencia de fallas no controladas en laboratorio, y también estimar el módulo de caída a partir de los mismos parámetros. Se han realizado 28 ensayos UCS en distintas litologías dentro del Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad de Chile y el Centro de Tecnología Avanzada para la Minería (AMTC), siguiendo el procedimiento sugerido por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) y estudios previos, mientras que para los análisis geológicos se han utilizado técnicas de fotografía. Los resultados incluyen un modelo que predice la resistencia máxima a partir del Módulo de Young Dinámico y otro para predecir la probabilidad de capturar de manera exitosa la parte post-peak de la curva esfuerzo-deformación en rocas frágiles. También, se establece un modelo multivariable para estimar el módulo de caída usando propiedades mecánicas y porosidad. Respecto a los análisis de imágenes y la técnica utilizada no se ha obtenido información concluyente, por lo que se recomienda continuar las investigaciones para expandir el alcance de esta o alguna técnica similar. Adicionalmente, será de utilidad mejorar los modelos e incrementar el número de rocas analizadas para contar con información más robusta en comparación con los que actualmente está disponible.

Agradecimientos

A mi familia y pareja, por todo su apoyo en la vida y a la hora de realizar este postgrado.

A Kimie Suzuki, por ser una gran guía en el proceso, estar dispuesta a ayudar y comprometida con presentar una buena investigación. Aprendí mucho en mi formación del magíster y gran parte es gracias a ella.

A Pía Lois, quien se integró más tarde a mi comisión, pero aportó de gran manera con retroalimentación y comentarios a la hora de realizar este estudio.

A David Veloz, Arturo García, Flavia Polanco y Jorge Velásquez por todo su apoyo en el laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad de Chile a la hora de realizar ensayos, por el compromiso, dedicación y la buena onda a la hora de estar en el laboratorio.

A Miguel Vera y al equipo de ayudantes del laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad de Santiago de Chile, que me apoyaron con muestras para ensayar y también en facilitarme las dependencias para realizar ensayos no destructivos.

A Paulina y Nicolás, personas que conocí en mi paso por el postgrado y hoy puedo considerarlos como buenos amigos.

Finalmente, al fondo basal AFB220002 del Advanced Mining Technology Center, que aportó con fondos para la realización de este estudio.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General.....	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Alcances.....	2
1.3. Metodología.....	3
1.4. Estructura.....	3
2. Estado del Arte.....	5
2.1. Ensayos de compresión uniaxial sin obtención de curva completa	6
2.2. Ensayos de compresión uniaxial con obtención de curva completa	8
2.2.1. Requerimientos de los equipos para la obtención de la curva completa	9
2.2.2. Tipos de instrumentos utilizados para la obtención de la curva completa	11
2.2.3. Parámetros post-peak.....	12
2.3. Influencia del procedimiento en la obtención de la curva completa.....	15
2.3.1. Limitaciones de equipos e instrumentos.....	15
2.3.2. Metodologías alternativas para ensayos post peak.....	17
2.4. Influencia de algunas propiedades índices y de características geológicas en el comportamiento mecánico de las rocas	20
2.4.1. Influencia de propiedades índices en el comportamiento mecánico de las rocas....	21
2.4.2. Influencia de la composición mineralógica en el comportamiento mecánico de las rocas	22
2.4.3. Influencia del tamaño de granos en el comportamiento mecánico de las rocas	23
2.4.4. Influencia de parámetros pre-peak en parámetros post-peak	24
2.5. Brechas de la literatura	24
3. Trabajo Enviado a Rock Mechanics and Rock Engineering (RMRE): Influence of Index Properties and Semi-Quantitative Geological Characteristics of Brittle Rocks on Their Post-Peak Behavior	27
3.1. Introduction.....	28
3.2. Theoretical Background.....	28
3.2.1. Uniaxial Compression Tests With Complete Stress-Strain Curve	29
3.2.2. Effect Of Index Properties In The Mechanical Behavior Of Rocks	29
3.2.3. Quantification Of The Geological Properties In The Mechanical Behavior Of Rocks	30
3.3. Experimental Setup.....	31
3.1. Specimen Selection.....	31
3.2. Testing Procedure	32
3.4. Rock Characterization	34
3.5. Pre-Peak And Post-Peak Results	36
3.6. Effect Of Index Properties And Semi-Quantitative Geological Characteristics On The	

Mechanical Behavior	38
3.6.1. Effect Of Pre-Peak Properties	38
3.6.2. Effect On Post-Peak Properties.....	41
3.7. Conclusions.....	45
3.8. Acknowledgements.....	46
3.9. References.....	46
4. Conclusiones y recomendaciones	48
4.1. Conclusiones	48
4.2. Recomendaciones	49
5. Bibliografía	48
ANEXO A: Curriculum Vitae - Sergio Flores Currutea	57
ANEXO B: Certificado de envío.....	58
ANEXO C: Resultados de Ensayos UCS con Obtención de Curva Completa Realizados	59
C.1. Litología: Granito (GR).....	59
C.2. Litologías de Basalto (BA).....	60
C.3. Litología Pórfido Andesítico (PAN)	60
C.4 Litología Brecha Hidrotermal (BR)	60
C.5 Litología Pórfido Diorítico (PDIO).....	61
C.6 Litologías de Riolita (RIO)	61
C.7 Litología Tonalita (TN).....	61
ANEXO D: Información estadística de ensayos y matriz de correlación entre propiedades	97
ANEXO E. Estudio De Laboratorio Para Disminuir Tiempo De Obtención De Tramo Post – Peak 101	
ANEXO F. Resultados de Cortes Transparentes.....	111
ANEXO G. Modelos Predictivos	115

Índice de Figuras

Figura 2-1: Curva esfuerzo-deformación mostrando etapas del desarrollo de microfracturas, acompañada de esquemas de los diferentes niveles de esfuerzo que generan la iniciación, propagación y coalescencia de fracturas (Cai et al., 2004).	7
Figura 2-2: Curvas representativas de clase I y II. (Wawersik & Fairhurst, 1970).....	10
Figura 2-3: a) Ensayos llevando un control de aplicación de carga monótona de carga en el tiempo. b) Ensayos utilizando una tasa de deformación monótona en el tiempo. (Hudson et al., 1972)...	10
Figura 2-4: Instrumentación con palpadores (LVDT) y roseta de strain gauges para ensayo de compresión simple.....	11
Figura 2-5: Ilustración de la curva esfuerzo-deformación completa bajo carga uniaxial (Modificado de Tutluoglu et al., 2014).	13
Figura 2-6: Balance de energía para rocas que exhiben comportamiento de clase I y II. E: módulo de Young, y M: Módulo de caída. (Ye et al, 2020)	13
Figura 2-7: Relación esfuerzo-deformación en ensayos de compresión (Alejano & Alonso, 2005).	15
Figura 2-8: a) Ensayo de cargas cíclicas para muestra de Microgabro. b) Efecto de la metodología en la energía elástica almacenada comparado con ensayo UCS convencional (Khosravi, 2016). 19	19
Figura 3-1: a) Stress-strain curve drop modulus representation, Bukowska (2013). b) Stress-strain curve classes, Fairhurst & Hudson (1999)..	30
Figura 3-2: Samples of each lithology before being tested: (a) Rhyolite, (b) Andesite IOCG (Velásquez, 2022), (c) Dacite (Zúñiga, 2020), (d) Dioritic Porphyry, (e) Granodiorite (Velásquez, 2022), (f) Granite, (g) Hydrothermal Breccia, (h) Basalt, (i) Tonalite, (j) Andesite Porphyry.....	33
Figura 3-3: Testing configuration.....	33
Figura 3-4: Procedure of grain size measurement and percentage of mafic minerals in a granite and basalt sample in 3x3 cm: (a,b) image selection, (c, d) color segmentation, (e, f) grain size measurements using a software.	35
Figura 3-5: Difference in scales between a photograph at hand scale and what can be observed under a microscope.	35
Figura 3-6: Stress-strain curve of resulting tests in uncontrolled failure, LVDT measurement ..	37
Figura 3-7: Stress-strain curve of (a) class I and (b) class II resulting tests, LVDT measurement	38

Figura 3-8: Sample porosity and density vs UCS.	39
Figura 3-9: Dynamic Young's modulus vs UCS.	39
Figura 3-10: Model for predicting Maximum strength summary, obtained from Minitab software..	44
Figura 3-11: Average grain size of mafic minerals and percentage of mafic minerals vs UCS. .	41
Figura 3-12: Average grain size of mafic minerals and percentage of mafic minerals vs E	41
Figura 3-13: ROC curve related to model, obtained from Minitab software	42
Figura 3-14: (a) Drop modulus estimation, (b) Effect of the interaction between porosity and Young's modulus on the Drop Modulus	44
Figura 3-15: Model for estimating the Drop Modulus (M), obtained from Minitab Software	45
Figura A. 1: Currículum Vitae Sergio Flores.	57
Figura B. 1: Certificado de Envío.....	58
Figura C. 1: Resultados de ensayo en muestra GR03.	62
Figura C. 2: Resultados de ensayo en muestra GR05.	63
Figura C. 3: Resultados de ensayo en muestra GR06.	64
Figura C. 4: Resultados de ensayo en muestra GR07.	65
Figura C. 5: Resultados de ensayo en muestra BA05.	66
Figura C. 6: Resultados de ensayo en muestra BA08.	67
Figura C. 7: Resultados de ensayo en muestra PAN 04.....	68
Figura C. 8: Resultados de ensayo en muestra PAN 05.....	69
Figura C. 9: Resultados de ensayo en muestra BR 01.	70
Figura C. 10: Resultados de ensayo en muestra BR 02.	71
Figura C. 11: Resultados de ensayo en muestra BR 04.	72
Figura C. 12: Resultados de ensayo en muestra BR 05.	73
Figura C. 13: Resultados de ensayo en muestra BR 06.	74

Figura C. 14: Resultados de ensayo en muestra DIO 08.....	75
Figura C. 15: Resultados de ensayo en muestra DIO 09.....	76
Figura C. 16: Resultados de ensayo en muestra DIO 20.....	77
Figura C. 17: Resultados de ensayo en muestra DIO 12.....	78
Figura C. 18: Resultados de ensayo en muestra DIO 14.....	79
Figura C. 19: Resultados de ensayo en muestra DIO 01.....	80
Figura C. 20: Resultados de ensayo en muestra DIO 02.	81
Figura C. 21: Resultados de ensayo en muestra RIO M40-1.....	82
Figura C. 22: Resultados de ensayo en muestra RIO M40-2.....	83
Figura C. 23: Resultados de ensayo en muestra RIO M41-1	84
Figura C. 24: Resultados de ensayo en muestra RIO M42-1	85
Figura C. 25: Resultados de ensayo en muestra RIO M43-1	86
Figura C. 26: Resultados de ensayo en muestra RIO M47-1	87
Figura C. 27: Resultados de ensayo en muestra RIO M47-2.....	88
Figura C. 28: Resultados de ensayo en muestra RIO M48-1	89
Figura C. 29: Resultados de ensayo en muestra RIO M49-1	90
Figura C. 30: Resultados de ensayo en muestra RIO M49-2.....	91
Figura C. 31: Resultados de ensayo en muestra RIO M50-1	92
Figura C. 32: Resultados de ensayo en muestra TN 04.	93
Figura C. 33: Resultados de ensayo en muestra TN 05.	94
Figura C. 34: Resultados de ensayo en muestra TN 07	95
Figura C. 35: Resultados de ensayo en muestra TN 08.	96
Figura D. 1: Características mecánicas de cada litología estudiada, con (a) UCS, (b) módulo de Young estático, (c) razón de Poisson estática, (d) módulo de Caída.....	97
Figura D. 2: Propiedades índice de cada litología estudiada, con (a) Velocidad de ondas P, (b)	

Velocidad de ondas S, (c) Densidad, (d) porosidad.	98
Figura D. 3: Caracterización geológica de cada litología estudiada, con (a) tamaño de granos promedio medido a escala de mano a través de un software, y (b) Porcentaje de especies máficas medido a través de un software.	99
Figura E. 1: a) Representación módulo de caída en curva esfuerzo-deformación, Bukowska (2013). b) Clases de curva esfuerzo-deformación, Fairhurst & Hudson (1999).....	103
Figura E.2: a) Muestra de litología Pórfido Diorítico. b) Muestra de litología Brecha Hidrotermal.	104
Figura E.3: Configuración de medición utilizado en los ensayos	104
Figura E.4: Etapas de la metodología propuesta	105
Figura E.5: Curvas esfuerzo-deformación de muestras de Pórfido Diorítico medidas con LVDT	106
Figura E.6: Curvas esfuerzo-deformación de muestras de Brecha Hidrotermal medidas con LVDT	107
Figura E.7: Comparación de deformación volumétrica entre muestras 12N y 14N (Ambas de Pórfido Diorítico)	108
Figura E.8: Resultados por litología de (a) resistencia máxima, (b) módulo de Young, (c) razón de Poisson y (d) módulo de caída.....	109
Figura F. 1: Imagen a luz transmitida bajo A) nícoles paralelos y B) nícoles cruzados. Minerales en rojo, estructuras en azul.	111
Figura F. 2: Imagen a luz transmitida bajo A) nícoles paralelos y B) nícoles cruzados. Minerales en rojo, estructuras en azul.	112
Figura F. 3: Imagen a luz transmitida bajo A) nícoles paralelos y B) nícoles cruzados. Clastos en color amarillo, minerales secundarios en naranja y matriz en azul.....	112
Figura F. 4: Imagen a luz transmitida bajo A) nícoles paralelos y B) nícoles cruzados. Minerales en rojo.	113
Figura F. 5: Imagen a luz transmitida bajo A) nícoles paralelos y B) nícoles cruzados. Minerales en rojo.	114
Figura F. 6: Imagen a luz transmitida bajo A) nícoles paralelos y B) nícoles cruzados. Minerales en rojo.	114

Índice de Tablas

Tabla 2-1. Información de especies predominantes en 19 muestras de granito (Tugrul & Zarif, 1999).....	22
Tabla 3-1. Estimated UCS and number of successful post-peak tests performed by lithology (Lithologies tested in this study are marked with *).	34
Tabla 3-2. Summary of the average percentage of mafic minerals and average grain size for each lithology (Lithologies tested in this study are marked with *).	36
Tabla 3-3. Summary of average index properties for each lithology (Lithologies tested in this study are marked with *).	36
Tabla 3-4: Summary of average and standard deviation pre-peak and post-peak properties for each lithology (Lithologies tested in this study are marked with *).	37
Tabla 3-5: Models for predicting Maximum strength (UCS in MPa), based on Dynamic Young Modulus (<i>Edyn</i> in GPa), Young Modulus (E in GPa), Poisson ratio (ν), Porosity (n in %), and Density (ρ in g/cm ³). Variables in red are not significant (p-value>0.05), so they are not included in the model	40
Tabla 3-6: Models for predicting the likelihood of capturing successfully the post-peak, based on normalized UCS50 (UCS'), Young Modulus (E'), Poisson ratio (ν'), and Porosity (n'). Variables in yellow are not significant (p-value>0.05), but they are not included in the model since interaction are considered.	42
Tabla 3-7: Measured and estimated behaviour: correctly predicted results are marked in green, and errors are marked in red.....	43
Tabla 3-8: Models for predicting the Drop Modulus (M), based on Dynamic Young Modulus (<i>Edyn</i> in GPa), Young Modulus (E in GPa), Maximum strength normalized to 50 mm (UCS in MPa), Poisson ratio (ν), Porosity (n in %), and density (ρ in g/cm ³). Variables in red are not significant (p-value>0.05), so they are not included in the model.	44
Tabla D.1: Media y desviación estándar para muestras estudiadas.....	99
Tabla D.2: Correlación entre propiedades mecánicas y geológicas medidas.....	100
Tabla E.1: Velocidades utilizadas en cada etapa.....	105
Tabla E.2: Datos relevantes de los ensayos. Los ensayos sin cargas cíclicas son las muestras 6V y 9N y los con cargas cíclicas son las muestras 1V, 4V, 12N y 14N.....	107
Tabla G.1: Modelos predictivos para la resistencia máxima, UCS.....	116

Tabla G.2: Modelos predictivos para estimación de propensión a fallas no controladas.	116
Tabla G.3: Modelos predictivos para estimación del módulo de caída, M.....	117

1. Introducción

El tectonismo propio de Chile se traduce en entornos de trabajo que difieren del resto del mundo, especialmente para las operaciones mineras en profundidad, por las condiciones de esfuerzos in-situ que derivan de la subducción entre placas. En el país, se tiene un régimen de esfuerzos horizontales que es mayor al vertical (Heidbach et. al, 2008), lo que se traduce en mayores concentraciones de esfuerzos en los techos y pisos de las excavaciones subterráneas. Esto sumado a la profundización de operaciones se relaciona con la ocurrencia de estallidos de roca, que aún no pueden ser comprendidos y predichos de manera adecuada. Los estallidos de roca han provocado accidentes en la minería chilena y en el mundo, en la mina El Teniente (Chile) ha habido eventos de estallidos donde los niveles productivos Reno y Pilar Norte, entre otros, se han visto temporalmente inhabilitados (Pardo, 2015).

En este contexto, en la medida que se han profundizado las operaciones mineras, cada vez se vuelve más relevante comprender el comportamiento que exhibe la roca una vez que supera su resistencia máxima, y esto se puede estudiar a partir de la obtención de la curva esfuerzo-deformación completa en laboratorio. En ensayos de compresión uniaxial, las rocas frágiles son más propensas a presentar una ruptura violenta que rocas que presentan reblandecimiento, ya que acumulan mucha energía y la liberan de manera abrupta, y es en estos casos en donde cobra relevancia capturar adecuadamente esas diferencias. Sin embargo, existe una serie de limitantes a la hora de desarrollar ensayos de compresión con obtención de la curva completa relacionadas con los equipos utilizados, los instrumentos de medición de deformaciones, y a las propias propiedades de las rocas. A partir de ello, se han propuesto alternativas al procedimiento normado por la ISRM (Fairhurst & Hudson, 1999), en donde, los avances tecnológicos han sido un gran apoyo para estimar de mejor manera las propiedades de diferentes litologías de rocas frágiles.

Por otra parte, en general, las rocas se clasifican en función de las condiciones de formación y por la cantidad de algunos minerales dentro de su composición global. Sin embargo, dentro de una misma litología pueden existir rocas con comportamientos diferentes debido a que pueden existir alteraciones, estructuras o variaciones en los rangos de cada especie mineral. Por ejemplo, dos rocas clasificadas como Andesitas pueden tener comportamientos totalmente diferentes. Estudios realizados sobre Andesitas IOCG muestran que presenta resistencias a la compresión en promedio de 60 MPa (Velásquez, 2022), mientras que una litología de pórfido andesítico puede superar los 230 MPa. Este último caso puede ser riesgoso para una operación subterránea bajo altos esfuerzos por la energía que es capaz de acumular, y la forma que tiene de liberarla. En otro ejemplo, se han realizado ensayos sobre granitos con tamaños de cristales distintos, donde también se ha observado gran variabilidad en la respuesta mecánica (Arzúa & Alejano, 2013). Por lo tanto, existen más variables involucradas en explicar el comportamiento mecánico de una roca que solo la clasificación que se le asigna.

Este estudio tiene por objetivo cuantificar una serie de características geológicas, resultados de ensayos índices y propiedades mecánicas pre-peak para estimar propiedades post-peak. Para esta tarea, se han hecho ensayos en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad de Chile y

el Advanced Mining Technology Center (AMTC), usando la prensa servo-asistida MES300. Para trabajar con especímenes de roca en ensayos post-peak de laboratorio, es necesario sustraer energía de la prensa servo-asistida luego de alcanzar su resistencia máxima, de esta forma se puede conseguir captar el patrón de fracturamiento de manera controlada. Este procedimiento es altamente sensible a variaciones y difícil de llevar a cabo, lo cual genera ciertas limitaciones a la hora de definir un plan experimental.

Dentro de estudios pasados desarrollados en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad de Chile, se encuentran los trabajos de Pollak & Vallejos (2018), Zúñiga et al. (2020), Velásquez (2022) y Paredes (2022). Pollak & Vallejos (2018) establecieron las consideraciones que se deben tener en cuenta para realizar ensayos de compresión uniaxial con obtención de la curva esfuerzo-deformación completa como parte de la puesta en marcha de la prensa servo-asistida del Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad de Chile. Hasta antes de esto no se habían generado estudios sobre la zona post-peak en rocas frágiles chilenas. Por esto, se busca ampliar los estudios existentes sobre las litologías frágiles chilenas.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

- Estudiar la influencia de propiedades índice, mecánicas pre-peak, y parámetros geológicos en el comportamiento post-peak de rocas frágiles.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Definir ensayos índice y parámetros de geología relevantes para estimar el comportamiento mecánico de una roca.
- Cuantificar algunas características geológicas a escala de mano en muestras disponibles.
- Identificar qué parámetros de los recopilados son significativos en la estimación de la resistencia máxima de las rocas, la propensión de estallidos y el módulo de caída.

1.2. Alcances

- Se utiliza la prensa servo-controlada e instrumentos de medición pertenecientes al Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad de Chile.
- Se utilizan muestras de litologías pertenecientes en su mayoría al espectro rocas ígneas, que presentan un comportamiento frágil y son muy competentes, proviniendo de 4 lugares distintos. De la ubicación A: 6 muestras de Pórfido Diorítico, 4 muestras de Brecha Hidrotermal, 2 muestras de Tonalita y 1 muestra de Pórfido Andesítico), de la ubicación B: 10 muestras de Riolita, ubicación C: 4 muestras de Granito y de la ubicación D: 2 muestras de Basalto.
- Los tipos de roca ensayadas requieren tasas de control del orden de 0.0001 mm/min para

poder seguir el patrón de fracturamiento en la zona post-peak, lo que sumado a las altas resistencias que alcanzan, incrementa los tiempos de ejecución para cada ensayo. Es posible que se requiera de instrumentos que permitan controlar la deformación con una mayor precisión, ya que gran parte de los ensayos realizados en este estudio y en los anteriores (Zúñiga 2020, Velásquez 2022, Paredes 2022) estallaron de manera violenta luego de alcanzar la resistencia máxima. Por otro lado, existe la limitación respecto a los tiempos máximos de duración del ensayo. Debido a que es necesaria la supervisión de un operador del laboratorio, los ensayos en general no superan las 8 horas que corresponden a la jornada laboral chilena.

1.3. Metodología

Para cumplir con los objetivos, se ha realizado la caracterización a escala de mano del tamaño de granos y el porcentaje de especies máficas utilizando un software de procesamiento de imágenes de 29 muestras antes de ser ensayadas. A estas mismas muestras, se les han realizado ensayos no destructivos para obtener propiedades índices. Luego, mediante ensayos de compresión uniaxial se han definido las resistencias máximas de cada litología para posteriormente llevar a cabo ensayos también uniaxiales, pero con obtención de post-peak y con medición de módulos de deformación. Es importante mencionar que estos ensayos consideran control por deformación según las mediciones de los Palpadores LVDT y medición de los módulos de deformación según las mediciones de deformación capturadas por Strain Gauges. Finalmente, una vez que se ha recopilado la información de las muestras antes y después de ser ensayadas, se analizan estadísticamente los resultados para determinar cuál es la influencia de los parámetros medidos en la resistencia máxima, la propensión a estallidos de roca y el módulo de caída.

1.4. Estructura

En el capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica que se centra en dos ejes. El primero de ellos habla de los ensayos UCS con obtención de región post-peak, incluyendo historia, materiales, limitaciones, innovaciones y alternativas a las metodologías tradicionales. El segundo eje, se centra en una revisión sobre las propiedades mecánicas, índices, y las características geológicas que han mostrado tener relevancia dentro del comportamiento pre-peak y post-peak. A partir de estos antecedentes, se identifican las brechas existentes en la literatura.

En el capítulo 3 se presenta el estudio con los resultados de los ensayos realizados, este incluye las ecuaciones que permiten estimar la resistencia máxima, la propensión a estallidos de roca y el módulo de caída a partir de las características cuantificadas. En los anexos C, D, F y G se presenta el detalle los ensayos y resultados obtenidos. El anexo E incluye un estudio realizado que muestra una metodología alternativa para realizar ensayos UCS con obtención de post-peak, utilizando algunas de las muestras utilizadas en este trabajo.

En el capítulo 4 se presentan las conclusiones de este estudio, así como recomendaciones para

trabajos futuros.

2. Estado del Arte

La mecánica de rocas corresponde a la ciencia teórica y aplicada al comportamiento mecánico de macizos rocosos y que está relacionada con la respuesta de la roca frente a los campos de esfuerzo en su entorno físico (Hoek, 1966). Un macizo rocoso presenta propiedades mecánicas que se pueden medir o estimar a través de estudios en terreno y/o ensayos de laboratorio, las cuales deben conocerse para evaluar y diseñar obras de ingeniería para mantener un nivel de seguridad que no comprometa la estabilidad de las labores.

Un macizo rocoso corresponde a un medio discontinuo que está compuesto de roca intacta y planos de debilidad, fallas, juntas, y otras estructuras por lo que en general posee un comportamiento discontinuo, heterogéneo, anisótropo y no lineal (Brady 2006). En laboratorio, se ensayan muestras de roca intacta que comúnmente poseen una geometría cilíndrica y, por convención, diámetros de entre 27 y 150 mm de acuerdo con las limitaciones operacionales para obtener muestras a partir de perforaciones con recuperación de testigo (ASTM International, 2014^a). Sin embargo, para posteriormente estimar las propiedades del macizo rocoso es necesario escalar las propiedades de la roca intacta para incluir el efecto de las discontinuidades (Hoek & Brown, 1988). Una limitación importante respecto a cómo se escalan las propiedades es que al momento de realizar estudios geomecánicos se posee una cantidad de información acotada con respecto a la totalidad del macizo rocoso. En general, la información proviene de un número limitado de perforaciones de pequeño diámetro o de ventanas de mapeo en paredes expuestas que son un área pequeña si es que se comparan con las dimensiones del macizo rocoso en estudio.

Una de las propiedades mecánicas de una roca que más se utiliza corresponde a la resistencia a la compresión simple de roca intacta, ya que, además de servir para caracterizar un tipo de roca, en conjunto con el GSI permite escalar las propiedades resistivas a las de un macizo rocoso (Hoek & Brown, 1997). Esta propiedad se determina a través de una curva esfuerzo-deformación obtenida de ensayos de compresión sin confinamiento (UCS) realizados en laboratorio al aplicar una carga axial sobre probetas de roca, y midiendo en ellas las deformaciones con sensores en los ejes axial y diametral. A partir del análisis de la curva esfuerzo-deformación también es posible determinar los parámetros elásticos de la roca en la parte lineal de la curva: módulo de Young E y razón de Poisson ν . Estos parámetros, junto con la resistencia del material, son utilizados para clasificar rocas y como datos de entrada en herramientas de diseño. Es importante mencionar que los ensayos deben realizarse según recomendaciones entregadas por normas internacionales para poder comparar sus resultados. Hoy en día se utilizan las recomendaciones del ISRM y las ASTM. Ambas sociedades buscan normalizar el diseño y desarrollo de ensayos relacionados con mecánica de rocas que son realizados en laboratorio y en terreno.

La siguiente revisión bibliográfica tiene como objetivo revisar el estado actual de los estudios relacionados a comportamiento post-peak desde dos puntos de vista distintos. El primero considera las metodologías utilizadas para obtener este comportamiento en laboratorio, y el segundo, considera propiedades índice como porosidad, velocidad de ondas y densidad y parámetros que cuantifican la geología de las muestras como el tamaño de grano con el objetivo de ayudar a

entender mejor el comportamiento post-peak.

2.1. Ensayos de compresión uniaxial sin obtención de curva completa

Existen dos procedimientos diferentes que permiten obtener propiedades de roca a través del ensayo de compresión uniaxial, que difieren en cuanto a equipos e instrumentación. El primero de ellos es el recomendado por la ASTM International (2014b) y se centra en la obtención de la curva esfuerzo-deformación hasta el punto en que se alcanza la resistencia máxima. Por otra parte, el ensayo sugerido por la ISRM (Fairhurst & Hudson, 1999) se centra en registrar la curva completa. Ambos ensayos difieren en cuanto a los equipos e instrumentación requerida, por lo que en esta sección se describen las características más importantes del primero de ellos y en la próxima sección se describe el procedimiento y las propiedades que pueden obtenerse del segundo.

Para llevar a cabo el procedimiento sugerido por la ASTM, se requiere utilizar una prensa que permita incrementar de forma monótona en el tiempo la carga axial aplicada sobre la probeta, y, además, registrar la deformación a través de sensores. La preparación de la muestra es relevante, al punto de poder afectar negativamente el desarrollo del ensayo y, por consiguiente, los resultados obtenidos. La misma sociedad propone seguir las directrices especificadas en la norma D4543-19 (ASTM International, 2019) y así conseguir una probeta de roca apta para ser sometida a un ensayo de compresión uniaxial. Al llevar a cabo el procedimiento, se produce una deformación contractiva en el eje de aplicación de carga que tiene como consecuencia la creación y propagación de microfracturas en respuesta a la deformación que sufre la roca intacta ensayada. Estas microfracturas, al propagarse y coalescer, son un precursor del proceso de falla en rocas frágiles, por lo que su estudio cobra relevancia en el diseño de excavaciones mineras, estructuras civiles, y para diseñar métodos que permitan prevenir riesgos, como los estallidos de roca (Bieniawski, 1967).

El proceso de fracturamiento en ensayos de compresión puede estudiarse con emisiones acústicas y observando muestras en microscopio. Por mencionar algunos ejemplos, Fonseka et al. (1985) analizaron muestras de granodiorita, mármol y dolerita ensayadas con emisiones acústicas y utilizando un microscopio electrónico para determinar el patrón de propagación de microfracturas en una roca luego de ser sometida a ensayos de compresión. Estos autores encontraron que las grietas se propagan en la dirección del eje de aplicación de carga, produciendo esfuerzos de tracción. Además, se encontró que las emisiones acústicas se incrementan en la medida que se alcanza la resistencia máxima de la roca. Por otro lado, Martin and Chandler (1994) y Cai et al. (2004) analizaron la parte pre-peak de la curva esfuerzo-deformación de muestras de granito Lac du Bonnet para definir distintos umbrales en función de los distintos niveles de fracturamiento que se observan en la muestra durante un ensayo de compresión. La **Figura 2-1** muestra cuatro niveles de esfuerzo de interés (σ_0 , σ_{ci} , σ_{cd} , σ_{peak}).

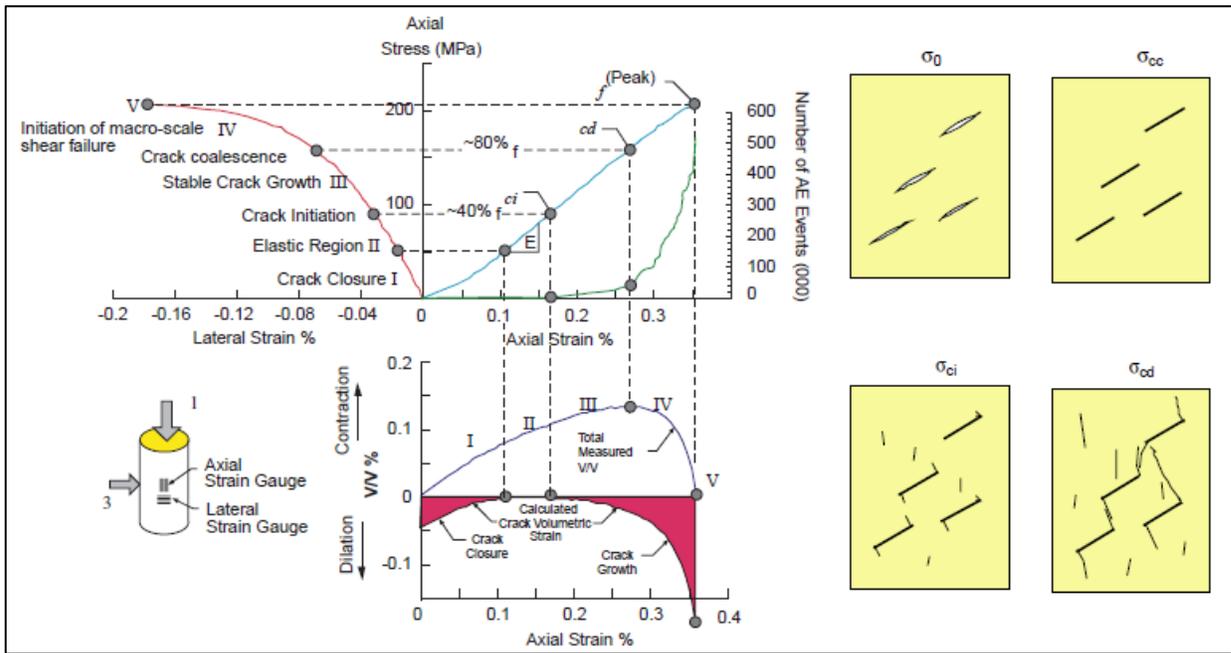


Figura 2-1: Curva esfuerzo-deformación mostrando etapas del desarrollo de microfracturas, acompañada de esquemas de los diferentes niveles de esfuerzo que generan la iniciación, propagación y coalescencia de fracturas (Cai et al., 2004).

A partir de la figura anterior, es posible destacar dos etapas:

- En la primera etapa existe una deformación no lineal en el eje axial provocada por el cierre de las grietas preexistentes en la roca, lo cual puede observarse en la curva volumétrica que muestra una contracción de volumen. Luego, una vez que ya se han cerrado las microfracturas se aprecia una zona lineal en la curva de deformación axial que llega hasta alrededor del 40% de la resistencia máxima, en donde existe una contracción volumétrica que también es lineal. En este tramo es posible determinar los módulos elásticos. Cerca del 40% del peak, se define el primer umbral de iniciación de daño (σ_{ci}) que indica el momento en que se comienzan a crear nuevas microfracturas en la muestra. En este punto se perciben emisiones acústicas que dan cuenta de la creación de las grietas que se propagan de manera controlada.
- El comportamiento continúa de la misma forma hasta alcanzar alrededor del 80% de la resistencia peak, el cual representa el segundo umbral de daño σ_{cd} , en donde la creación y propagación de fracturas se descontrola. Lo anterior se nota en el incremento de los eventos acústicos, la pérdida de la linealidad en la curva de deformación diametral que da cuenta de la deformación plástica en la roca, y además por una expansión volumétrica en lugar de contracción. Esta propagación descontrolada de grietas eventualmente ocasionará la rotura de la muestra de roca, por lo que la duración del ensayo tiene un efecto sobre la resistencia peak de la roca observada en un ensayo de compresión simple. Martin and Chandler (1994) establecieron que la resistencia peak se ve influenciada por la duración del ensayo producto de este fenómeno, no así los umbrales de iniciación y daño.

2.2. Ensayos de compresión uniaxial con obtención de curva completa

El procedimiento anterior es el más utilizado debido a que la resistencia a la compresión uniaxial es el parámetro comúnmente más utilizado para describir el comportamiento mecánico de una roca. Lo anterior, principalmente porque los diseños de estructuras en rocas consideran solo el límite de falla del macizo rocoso. Sin embargo, no solo es relevante conocer lo que ocurre antes del peak. En la medida que han profundizado las excavaciones subterráneas, cada vez se ha vuelto más necesario tener un entendimiento general del comportamiento de la roca una vez que supera su resistencia máxima, lo cual queda descrito por la región post-peak. Según Hudson et al. (1972), el comportamiento post-peak ha sido menos estudiado que la zona pre-peak por las dificultades técnicas que se tienen en el laboratorio. Sin embargo, entender este comportamiento permite describir la transición de la resistencia peak a una residual junto con las deformaciones implicadas en el proceso, lo cual puede mejorar, por ejemplo, el diseño de sistemas de soporte (Crowder and Bawden, 2004).

Los parámetros que definen la zona post-peak corresponden al módulo de caída, la resistencia residual y el ángulo de dilatancia. El módulo de caída refleja la dinámica de liberación de la energía acumulada durante el proceso de carga en la roca, información que podría ser de utilidad para estimar la propensión y riesgo de estallidos de roca (Bukowska, 2013). Bukowska (2013) y Hou & Cai (2022) señalan que el mecanismo de destrucción de un pilar puede ser representado por el comportamiento de una probeta de roca a escala de laboratorio en un ensayo de compresión, por lo que el módulo de caída cobra relevancia también en el diseño de pilares. Se han realizado pruebas in situ a gran escala para estimar parámetros post-peak relacionados con la estabilidad de pilares, pero en general son difíciles de llevar a cabo por los costos y tiempo requeridos (Bieniawski 1968, Bieniawski & Van Heerden 1975, Cook et al. 1971).

Otro parámetro que se puede obtener de la curva esfuerzo-deformación que considere el post-peak es la energía transmitida a la roca que está representada por el área bajo la curva (Alejano et al., 2020). Esta información puede ser directamente utilizada para comparar lo que ocurre durante el ensayo con lo que ocurre durante un estallido de roca, el cual se produce cuando la energía elástica acumulada se libera de forma repentina y brusca (Khosravi, 2016). Dentro de los métodos o criterios a partir de los que se puede estudiar este fenómeno, se han desarrollado índices para estimar la cantidad de energía que se almacena en el proceso de carga y la forma en que se libera durante el proceso de fractura. Dentro de ellos se tiene el W_{et} (Strain energy storage index) introducido por Neyman et al. (1972) que relaciona la energía elástica retenida en una etapa de descarga de un ensayo de compresión, con la energía disipada al realizar la descarga, y el BIM (Brittleness index modified) propuesto por Aubertin & Gill (1988), que indica el potencial de una fractura violenta en función de la forma de la curva esfuerzo deformación y el módulo de Young calculado al 50% de la resistencia peak. Keneti & Sainsbury (2018) realizaron una recopilación extensa de índices que entregan una noción de la propensión a un estallido de rocas.

Debido a la relevancia de la información que se puede obtener de este tipo de ensayos, la ISRM ha sugerido una metodología de ensayos que permite obtener la curva esfuerzo-deformación completa

en ensayos de laboratorio (Fairhurst & Hudson, 1999). Las diferencias con respecto al propuesto por la sociedad ASTM radican principalmente en el tipo de prensa utilizada, las velocidades utilizadas y los sensores que pueden captar la zona posterior al peak. A continuación, se presentan los requerimientos, instrumentos requeridos, y una descripción de los parámetros post peak.

2.2.1. Requerimientos de los equipos para la obtención de la curva completa

En ensayos de compresión, los equipos utilizados pueden ser una limitante para poder obtener la curva esfuerzo-deformación completa, existiendo dos requerimientos mínimos: la rigidez de la prensa utilizada y la variable que controla el ensayo. A continuación, se presentan más detalles sobre la relevancia de ambos puntos en la obtención de la curva completa.

El primer requerimiento mínimo para la obtención de la curva completa es la rigidez del equipo utilizado. Esto fue observado por Cook (1965), quien indicó que la rigidez de la prensa utilizada podía ser una limitación en ensayos UCS para no obtener más información de lo que ocurre luego de superado el peak. Posteriormente, Rummel & Fairhurst (1970) describieron la importancia de la rigidez de la prensa, notando que ésta incide en si será posible seguir el patrón de fracturamiento de la roca una vez que se supera su resistencia máxima. Una prensa más rígida que la probeta va a ser capaz de ceder la energía necesaria a la probeta para que pueda deformarse de manera controlada luego de alcanzar la resistencia máxima. Cuando la rigidez de la roca es superior a la del equipo, la máquina entregará más energía al espécimen de lo realmente necesita para continuar con el proceso de deformación, por lo que tendrá lugar una rotura violenta y la zona post-peak de la curva esfuerzo-deformación no podrá ser obtenida (Hudson et al. 1972). Mas recientemente, Abdullah & Amin (2008) compararon las curvas esfuerzo-deformación obtenidas utilizando máquinas convencionales y servo-asistidas para muestras de arenisca, llegando a la conclusión de que una fractura violenta no es una característica intrínseca de la roca.

Uno de los primeros trabajos que reportó una solución fue el de Waversik & Fairhurst (1970), quienes realizaron ensayos de compresión uniaxial utilizando una prensa de alta rigidez que permitió utilizar flujos de agua para controlar la contracción o expansión de los platos que aplican carga sobre la muestra. De esta forma, estos autores pudieron llevar un control por deformación a una tasa relativamente constante en los ensayos que realizaron y así obtuvieron la curva esfuerzo-deformación completa para litologías de granito, caliza, basalto y mármol. En este estudio se reconocieron dos clases de comportamiento en la zona post-peak de la curva (**Figura 2-2**): la clase I está asociada a que se debe continuar añadiendo energía al sistema para continuar con la deformación plástica, mientras que en la clase II parte de la energía debe ser retirada para prevenir una rotura violenta (González y otros, 2004).

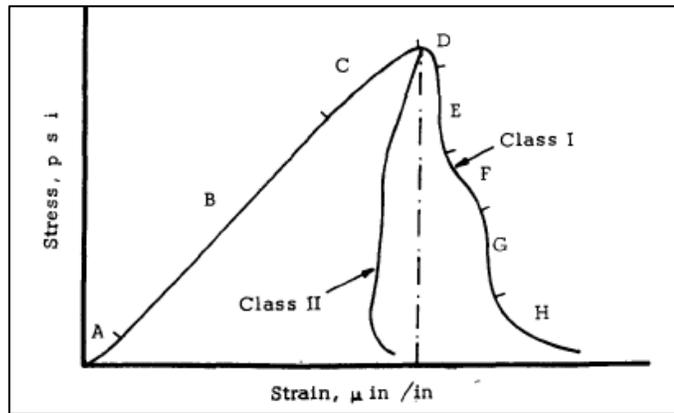


Figura 2-2: Curvas representativas de clase I y II. (Wawersik & Fairhust, 1970).

El segundo requerimiento es la variable que controla el ensayo. Hudson et al. (1972) establecen que al incrementar la fuerza de forma monótona en el tiempo no será posible obtener la curva esfuerzo-deformación completa, ya que se tendrá una ruptura violenta cuando la roca alcance su resistencia peak (**Figura 2-3.a**). Una alternativa a esto es utilizar una tasa de deformación constante como variable de control independiente en el ensayo, que si permite obtener la curva completa. De esta manera, la prensa deberá realizar correcciones en la carga aplicada con el objetivo de mantener la tasa de deformación deseada (**Figura 2-3.b**).

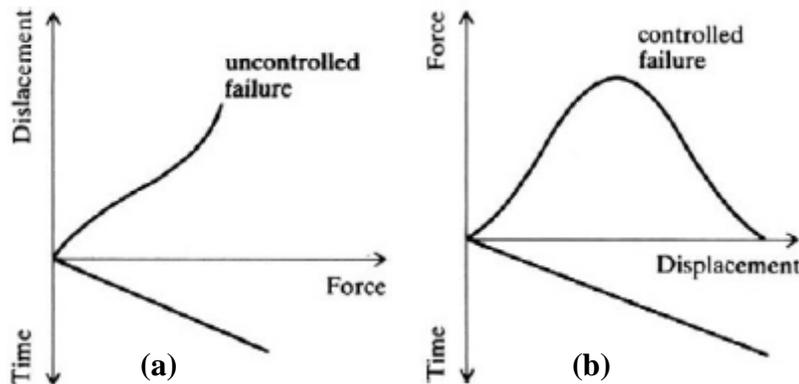


Figura 2-3: a) Ensayos llevando un control de aplicación de carga monótona de carga en el tiempo. b) Ensayos utilizando una tasa de deformación monótona en el tiempo. (Hudson et al., 1972)

Algunos investigadores (Martin & Chandler 1994, Fairhust & Hudson 1999, Khosravi 2016, Zhang & Li 2019, Pollak & Vallejos 2018, Zúñiga et al. 2020, Paredes 2022) han realizado ensayos de compresión simple utilizando ambos mecanismos de control en distintas partes de la curva. Estos estudios mostraron que incrementar la carga de manera monótona en el tiempo hasta alcanzar el umbral de daño σ_{cd} (Figura 1) es conveniente, ya que la cantidad de emisiones acústicas hasta este punto sigue una tendencia relativamente lineal. En otras palabras, en el resto de la curva es posible utilizar la aplicación de carga como mecanismo de control en los umbrales previos porque hasta entonces, las grietas se propagan de manera estable. Sin embargo, después de alcanzado ese punto, los estudios indican que se hace necesario pasar a un control por deformación para conseguir controlar el proceso de falla.

Otro aporte importante del estudio de Hudson et al. (1972) es que establece las bases del servo-control. El operador puede definir cuál es la variable que desea controlar y que va a sufrir un cambio durante el ensayo, la cual cambia comúnmente de forma monótona en el tiempo. Posteriormente, la prensa recoge variaciones de esta variable a intervalos de tiempo pequeños (del orden de 2-50 ms), y a través de un circuito de control cerrado, se van aplicando correcciones a la válvula que inyecta y extrae fluidos a alta presión dentro del actuador de la prensa para mantener la tasa de cambio en la variable a la predefinida. Entonces, en un ensayo que tenga control por deformación, además, se requerirá de un sistema servo-controlado, sensores de desplazamiento que entregarán las variaciones producidas en función de la aplicación de carga, y un grupo hidráulico capaz de agregar o restar presión sobre la prensa a modo de respuesta y de forma automática en función de alcanzar la tasa de deformación deseada. Los avances tecnológicos y computacionales que ha habido en las últimas décadas han permitido la construcción de prensas servo-controladas más sofisticadas y precisas, pero se siguen basando en los puntos aquí señalados.

2.2.2. Tipos de instrumentos utilizados para la obtención de la curva completa

Además de los requerimientos de equipo mencionados anteriormente, otro elemento importante para obtener la curva esfuerzo-deformación corresponde a los sensores que deben ser capaces de registrar la deformación propia de la roca. Existen diversos instrumentos disponibles: galgas extensiométricas (strain gauges), palpadores LVDT, compresómetros, e incluso, pueden medirse deformaciones a través del análisis de imágenes (Taheri & Muñoz, 2017). Sin embargo, en este estudio se analizan los dos primeros, que se muestran en la **Figura 2-4**. Ya que son los que comúnmente se utilizan dentro de los ensayos de laboratorio.

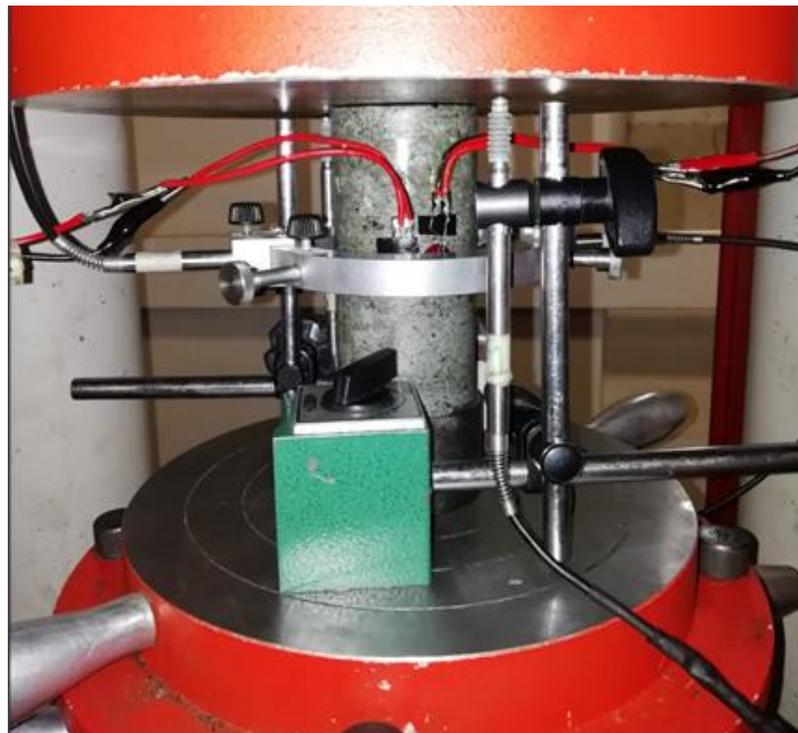


Figura 2-4: Instrumentación con palpadores (LVDT) y roseta de strain gauges para ensayo de compresión simple.

Un strain gauge corresponde a un circuito eléctrico montado sobre una resina flexible que se pega a la superficie de la probeta, posee una componente metálica y, al sufrir deformaciones, su resistencia eléctrica va a variar debido al principio piezorresistivo (Idrovo & Quintanilla, 2010). Se asume que, al estar unida a la probeta, la deformación medida en el extensómetro es la propia de la roca. Una desventaja de este instrumento es que su registro será local, solo en la zona en la cual se ha instalado y no en toda la probeta. En otras palabras, cuando se produce una fractura que no pasa por la zona del strain gauge la deformación producida no será registrada, mientras que, si la fractura pasa por el strain gauge la deformación no se continuará midiendo (Carvajal Marambio, 2018). De esto se desprende otro problema, y que es que en la mayoría de los casos este instrumento no será capaz de capturar información de la zona post-peak producto del daño acumulado en la probeta (Muñoz et al., 2016).

Por otro lado, un palpador LVDT (Linear Variable Differential Transformer) corresponde a un sensor electromagnético que transforma el movimiento en señales eléctricas (Carvajal Marambio, 2018) gracias a la acción de tres bobinas separadas por secciones plásticas y que envuelven un núcleo capaz de desplazarse en su eje axial (Coca, 2020). Estos sensores pueden utilizarse dentro del ensayo de compresión simple para medir la deformación diametral en la probeta y el desplazamiento del plato de la prensa servo-controlada en la medida que aplica la carga axial. De este último punto se desprende que el palpador no mide de manera directa la deformación en la roca al considerar una medición que incluye a los componentes del equipo servo-controlado. Respecto a este punto, Alejano et al. (2020) realizó ajustes para corregir las deformaciones medidas por el palpador y, así, poder estimar las del strain gauge en función de la energía transmitida en especímenes de rocas metamórficas gneis.

En rocas que exhiben un comportamiento de clase I, la deformación axial aumenta de manera monótona en la zona post-peak, por lo que utilizar la deformación axial como variable de control es suficiente para obtener la curva esfuerzo-deformación completa (Fairhurst & Hudson, 1999). Por otra parte, como se mencionó anteriormente, en las curvas que presentan un comportamiento de clase II, se debe retirar energía del sistema para continuar con el proceso de deformación. En este caso, si la variable de control que aumenta de manera monótona en el tiempo fuera la deformación axial, se tendría en rocas frágiles una fractura violenta al agregar energía de forma continua al sistema debido a que en realidad parte de ella debe ser sustraída (Okubo & Nishimatsu 1985, Fairhurst & Hudson 1999, González et al. 2004, Cai et al. 2021). Lo anterior imposibilita obtener la curva esfuerzo-deformación completa, por lo que se debe utilizar la deformación diametral como variable de control del ensayo en rocas que exhiben un comportamiento de clase II para liberar energía de forma de que el patrón de fracturamiento en la probeta pueda ser registrado.

2.2.3. Parámetros post-peak

La obtención de la curva esfuerzo-deformación completa permite determinar no solo los parámetros elásticos de la parte lineal de la curva, sino que también los relacionados con la zona post-peak. Estos son el módulo de caída, la resistencia residual de la roca y el ángulo de dilatancia (Tutluoglu et al., 2014). Es importante destacar que la norma ISRM (Fairhurst & Hudson, 1999)

recomienda realizar un ciclo de carga y descarga en la zona posterior al peak, y determinar un módulo local de Young asociado a esta zona como la pendiente positiva que ocurre en la etapa de carga (Figura 2-5). Sin embargo, no establece lineamientos de cómo obtener el resto de los parámetros mencionados, solo recomienda estimar un módulo de Young local determinado a partir de la realización de un ciclo de carga y descarga en la zona post-peak. Tampoco existe una norma ASTM que indique como determinar estos parámetros.

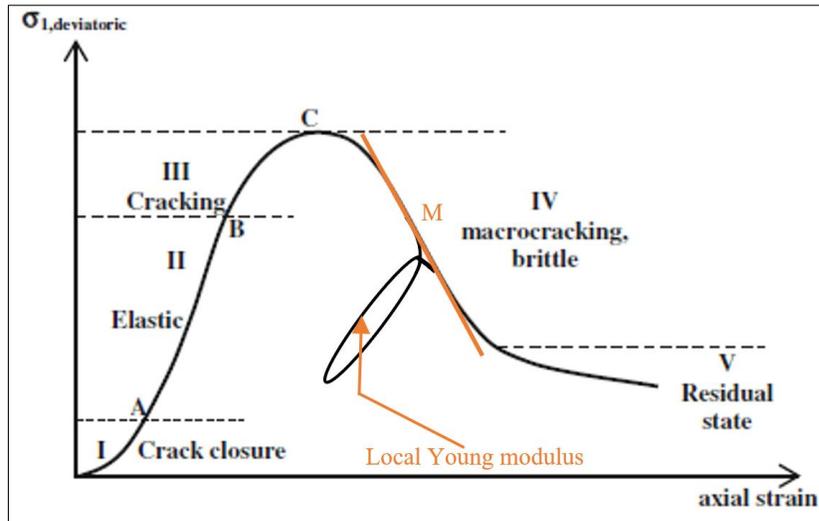


Figura 2-5: Ilustración de la curva esfuerzo-deformación completa bajo carga uniaxial (Modificado de Tutluoglu et al., 2014).

Respecto al módulo de caída, Farmer (1983) observó en laboratorio que la roca es incapaz de resistir el mismo estado tensional luego de generarse la rotura, por lo que luego de ese punto la roca se reblandece, y por consiguiente un macizo rocoso también debería hacerlo. En la región IV de la Figura 2-5 se aprecia una pendiente negativa que refleja el reblandecimiento, donde el material pierde su habilidad de mantener carga a la medida que incrementa su deformación (Tutluoglu et al., 2014). El módulo de caída (M) queda representado por esa pendiente, el cual refleja la fragilidad de la roca al marcar el modo de transición desde la condición peak a una residual (Bukowska 2013, Rodríguez Dono 2012) y sus implicancias se relacionan con la forma de liberación de la energía acumulada (Hou et al., 2022). En la Figura 2-6 se muestran los comportamientos típicos de rocas clase I y II, y la energía elástica que debe ser retirada o agregada al sistema en función del módulo de caída.

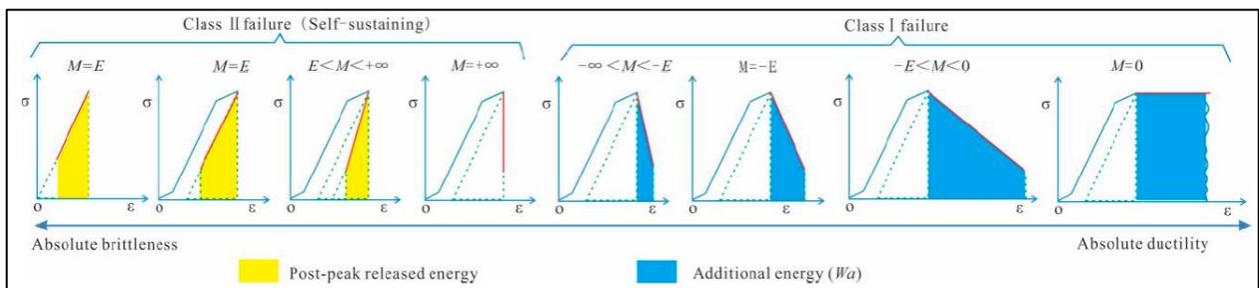


Figura 2-6: Balance de energía para rocas que exhiben comportamiento de clase I y II. E: módulo de Young, y M: Módulo de caída. (Ye et al, 2020)

Respecto a la resistencia residual, esta ha sido descrita por algunos investigadores (Krsmanovic, 1967, Hudson et al., 1971, 1972, Barton & Choubey, 1977) que mencionan que, si luego de alcanzada la resistencia máxima en un ensayo de corte o triaxial se continúa forzando al espécimen a cortarse o deformarse, eventualmente se alcanzará un punto en que la resistencia es constante, y ese punto se ha denotado como resistencia residual. Esta resistencia, al igual que el peak, es una característica del tipo de roca (Kovari and Tisa, 1975). Bajo un estado de carga axisimétrico ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$), al llevarse a cabo un ensayo de compresión uniaxial, la resistencia residual debería ser baja (del orden de pocos MPa), mientras que al incrementar el confinamiento esta resistencia va a incrementar paulatinamente, y el comportamiento que exhibe la roca pasa por una transición paulatina de frágil a dúctil (Kovari and Tisa, 1975, Hudson & Harrison, 1997, Taheri & Chanda, 2013).

Por último, la dilatancia se define como el cambio volumétrico producto de la distorsión producida por el esfuerzo de corte en un material, mientras que el ángulo de dilatancia (ψ) representa la relación entre el cambio de volumen plástico y la deformación plástica por corte (Alejano & Alonso, 2005). En ensayos de laboratorio, la dilatancia se puede observar a partir del punto en que se produce una expansión en la curva volumétrica de la curva esfuerzo-deformación (**Figura 2-1**). La utilidad del ángulo de dilatancia es que permite tener un acercamiento al comportamiento que la roca experimenta una vez comienza su expansión volumétrica producida por deformaciones plásticas (Zhao & Cai, 2010), ya que normalmente los modelos y parámetros elásticos solo consideran contracción en la roca. Este ángulo depende en gran medida de la plasticidad que experimenta el material y la presión de confinamiento. En la **Figura 2-7** se presenta la relación entre esfuerzo-deformación para curvas de laboratorio, que consideran ensayos triaxiales, con los parámetros post-peak y la ecuación que permite obtener el ángulo de dilatancia en ensayos de laboratorio.

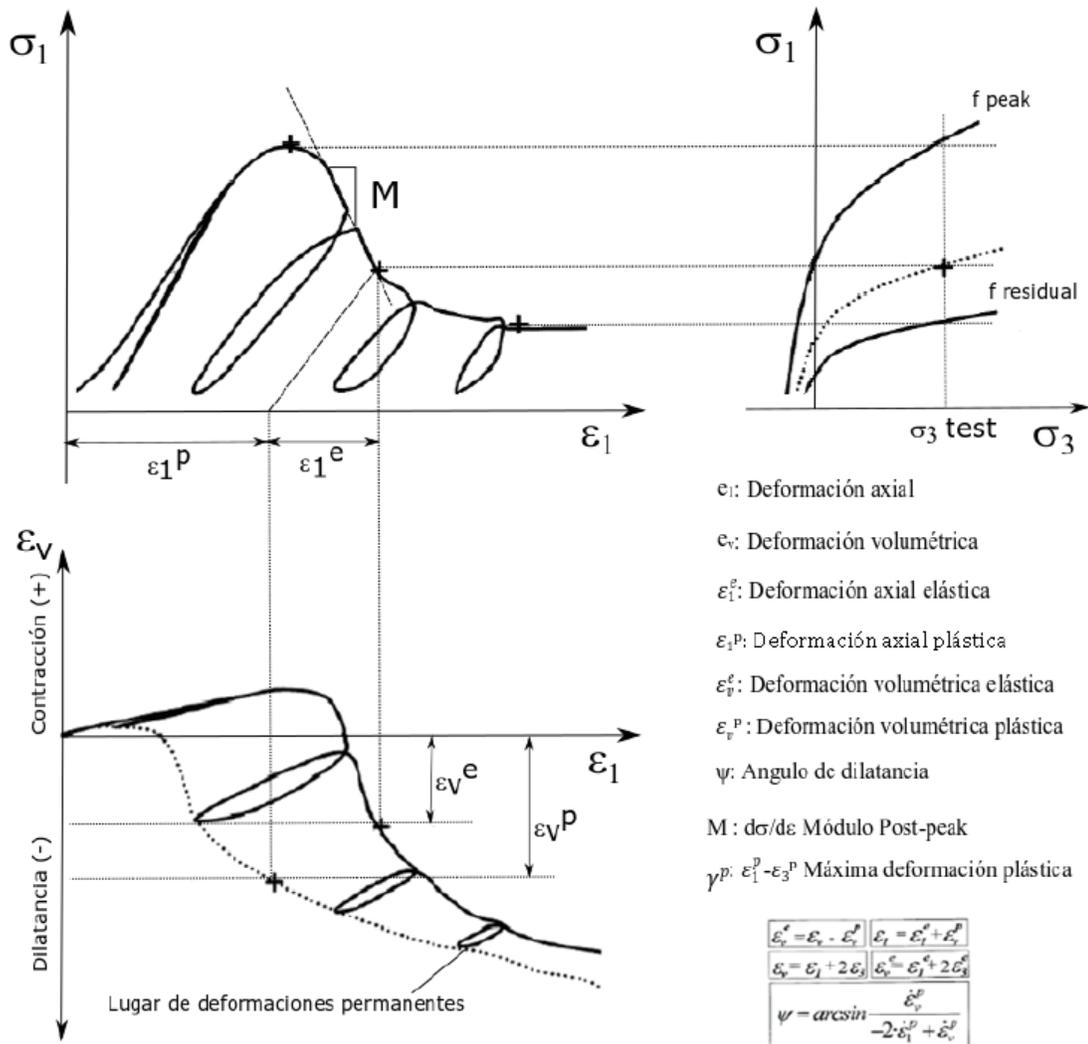


Figura 2-7: Relación esfuerzo-deformación en ensayos de compresión (Alejano & Alonso, 2005).

2.3. Influencia del procedimiento en la obtención de la curva completa

2.3.1. Limitaciones de equipos e instrumentos

Tal como se mencionó anteriormente, la ISRM ha desarrollado un estándar para la realización de ensayos UCS con obtención de la curva esfuerzo-deformación completa (Fairhurst & Hudson, 1999), la cual entrega recomendaciones distintas para situaciones donde la roca exhibe comportamientos de clase I o clase II. Las principales diferencias están en el uso de deformación axial o diametral como variable de control. Sin embargo, las tasas de incrementos monotónicos sugeridos no se encuentran estandarizadas para cada litología, si no que más bien se recomienda una única velocidad para cada clase. Lo anterior supone un problema, puesto que la forma de la curva esfuerzo-deformación varía en función de las propiedades físicas y mecánicas de la roca. Diversos autores han realizado ensayos utilizando tasas de deformación que han tenido que calibrar según cada tipo de litología (Sano et al. 1982, Okubo et al. 1990, Martin & Chandler 1994, Kumar & Sharma 2016, Zhang & Li 2019, Hashiba et al. 2006, Khosravi 2016, Pollak & Vallejos 2018,

Zúñiga et al. 2020), pero aún no hay guías claras con respecto a las tasas adecuadas para cada litología. La principal consecuencia de que no existan guías claras se relaciona a que utilizar velocidades inadecuadas puede traducirse en la generación de una falla violenta al alcanzar la resistencia máxima (Komurlu, 2018) y a que cada ensayo puede llegar a tomar varias horas (Khosravi, 2016), por lo que hacer ensayos de prueba hace aún más demorosa la obtención de los parámetros post-peak. Se hace relevante generar guías sobre qué velocidades de control utilizar para cada litología con el objetivo de evitar estos problemas.

Respecto a las tasas de deformación, la sugerencia de la ISRM (Fairhurst & Hudson, 1999) es que luego de alcanzar el 70% de la resistencia peak, para rocas frágiles se debe utilizar una tasa de deformación lateral de 10^{-4} /s, y para rocas que presentan comportamiento de reblandecimiento se recomienda utilizar tasas de deformación axial de 10^{-6} /s. Sin embargo, ensayos realizados por Zúñiga et al. (2020), Velásquez (2022) y Paredes (2022) en rocas frágiles mostraron que fue necesario utilizar tasas de deformación lateral de hasta 8×10^{-7} /s para intentar registrar el comportamiento post-peak en rocas muy frágiles, y pese a que se usaron velocidades muy bajas, algunas muestras estallaron de forma violenta.

En un intento por conseguir curvas esfuerzo-deformación completas en rocas frágiles, Sano et al. (1982) utilizaron la deformación volumétrica como variable de control del ensayo a partir de las mediciones de deformación axial y lateral. Posteriormente, Okubo & Nishimatsu (1985) propusieron una metodología donde incluyen una combinación entre esfuerzo y deformación como variables para controlar los ensayos, y posteriormente la utilizaron para realizar ensayos sobre muestras de Sajome andesite, Izumi sandstone, Inada granite y Kawasu Tuff (Okubo et al. 1990). En estos ensayos, utilizaron tasas de deformación de 10^{-3} a 10^{-6} /s, notando que no existen variaciones considerables en el módulo de caída, pero si en la resistencia máxima, donde esta incrementa en la medida que la tasa es más alta. La influencia del tipo de control en el comportamiento mecánico es algo que aún no se ha investigado de forma exhaustiva y no se comprende del todo.

Otra limitación importante es la rigidez de las prensas utilizadas en los ensayos. Existe una gran discusión acerca de si la clase II refleja el verdadero comportamiento de las rocas frágiles o no al presentar un módulo de caída positivo (Hou et al. 2021), lo que simboliza que el fracturamiento de la roca puede continuar propagándose sin la adición de fuerzas externas. A modo de contraste, Wong et al. (2020) atribuyen el comportamiento de clase II a rebotes en la roca en la medida que se reduce la resistencia luego de alcanzada la resistencia peak. Estudios recientes se han centrado en construir celdas cuya rigidez sea variable (Hou et al. 2021, Cai et al. 2021, Hou & Cai 2022), de manera tal que permitan desarrollar ensayos de compresión utilizando la deformación axial como variable de control, incluso para rocas que normalmente exhiben un comportamiento de clase II. Estos autores realizaron ensayos sobre distintas litologías utilizando la nueva prensa Stiffman, y a partir de los resultados obtenidos en ensayos de compresión considerando un control axial como variable de control, aseveran que el comportamiento de clase II es atribuido a las descompresiones que se generan en la prensa servo-asistida para mantener un nivel de deformación lateral constante, y que no es una propiedad intrínseca de la roca.

Estos últimos estudios son un indicio de que aún queda mucho por comprender con respecto al comportamiento mecánico de las rocas, ya que es probable que exista una limitación asociada al procedimiento empleado dentro de los ensayos desarrollados. Si bien el comportamiento de clase II permite describir cual es la energía que debe ser retirada del sistema para que la roca continúe su proceso de fractura, el hecho de que no sea una propiedad intrínseca de las rocas da pie para pensar que las sugerencias de la ISRM para desarrollar ensayos sobre las rocas frágiles deben ser reformuladas. Los avances tecnológicos suponen una gran ayuda para tener un acercamiento y un mejor entendimiento de las propiedades que poseen las rocas, por lo que es esperable que próximamente se generen nuevos estudios que se enfoquen en este punto.

2.3.2. Metodologías alternativas para ensayos post peak

Considerando todas las limitaciones mencionadas anteriormente, diversos autores se han visto en la obligación de plantear metodologías alternativas para distintos tipos de roca con el objetivo de que estas metodologías capturen el comportamiento mecánico de la curva completa sin ver afectados los parámetros de interés. Para esto, se han estudiado los efectos que se observan sobre distintas litologías al realizar ciclos de carga y descarga, alternar velocidades o utilizar diferentes mecanismos de control dentro de un mismo ensayo. Estas metodologías abarcan litologías de todo tipo, que van desde rocas de baja a alta competencia. A continuación, se describen algunas de estas propuestas.

Uno de los primeros estudios que destaca es de Martin & Chandler (1994), quienes proponen el uso de ciclos de carga y descarga. Estos autores analizaron la evolución del daño acumulado en muestras de granito Lac du Bonnet, en la zona pre y post-peak para obtener la curva esfuerzo-deformación completa. Uno de los principales puntos que destacan es que el umbral de iniciación de daño es independiente del daño que presenta la probeta (evidenciado al realizar descargas), mientras que el umbral de propagación de fracturas de forma descontrolada es dependiente del daño existente y se asocia al punto en que se supera la cohesión de la roca, que ocurre alrededor del 75-80% del valor de la resistencia máxima de la roca. En este punto, el uso de ciclos permite que una parte de la energía elástica acumulada se disipe. El daño puede ser descrito como la degradación de las propiedades del material, como la rigidez y la resistencia residual (Shirani et al. 2021). Otro estudio que utilizó ciclos de carga y descarga es el de Shirani et. al. (2020), quienes realizaron ensayos utilizando un gran número de cargas cíclicas para simular el efecto de fatiga producida, por ejemplo, por actividades humanas o por sismicidad, tanto en el pre y post-peak de limonitas porosas. Estos autores notaron aumentos leves en la resistencia al incrementar la fatiga, a la vez que el comportamiento clase II se vuelve más prominente. Un inconveniente de la metodología es que puede tomar más de 8 horas en ser llevada a cabo, y al requerir de una persona para supervisar el ensayo existen dificultades para capturar la curva completa cuando el ensayo se prolonga más de eso, por la jornada laboral al ser ensayos que requieren supervisión constante.

Otra metodología propuesta considera alternar dos tasas de carga en un mismo ensayo a intervalos de deformación constantes para incrementar la información obtenida en ensayos post-peak cuando se poseen pocas muestras, la cual fue propuesta por Hashiba et al. (2006) en un estudio sobre el

efecto de la tasa de carga en la etapa pre-peak y post-peak. Estos autores realizaron pruebas en rocas de tipo Toba Taje, Andesita Sanjome, Arenisca Kimachi, Mármol Akiyoshi y Cuarcita Honorobe. La Andesita es una roca ígnea que muestra características de clase II y presenta una resistencia máxima de alrededor de 70 MPa, mientras que el resto de las litologías exhiben comportamientos de clase I. En la medida que la velocidad del ensayo es mayor, la resistencia de todas las litologías incrementa, y, por ende, acumulan más energía. Un inconveniente es que los tipos de roca analizados no se asemejan a las rocas frágiles que se utilizarán en este estudio, ya que la gran mayoría de las rocas ensayadas presentan resistencias a la compresión simple superiores a 180 MPa.

Como alternativa a la metodología propuesta por Martin & Chandler (1994), Khosravi (2016) creó una metodología para disminuir el tiempo requerido en desarrollar ensayos con obtención de zona post-peak en rocas frágiles. En ella, el ensayo es separado en tres etapas que consideran un tipo de control y velocidades diferentes. Cada etapa se describe a continuación:

- Primera etapa: se lleva un control por fuerza a 0.5 kN/s, hasta alcanzar un valor entre el 60-70% de la resistencia peak.
- Segunda etapa: se cambia a control por deformación a una tasa de 4×10^{-2} mm/min hasta un valor entre el 70-80% de la resistencia peak.
- Tercera etapa: se continúa llevando un control por deformación, pero la tasa disminuye a 10^{-2} mm/min, y se comienza con la aplicación de ciclos de carga y descarga hasta finalizar el ensayo.

La principal diferencia con la alternativa de Martin & Chandler (1994) corresponde a que no se realizan descargas completas, si no que se establece una descarga máxima de 40 MPa para cada ciclo (**Figura 2-8.a**). Con esta modificación el ensayo pasa a durar un máximo de 2.5 horas, lo que es alrededor de tres veces más rápido que la alternativa anterior. Esta disminución se debe a que en los ciclos no realiza descargas completas, y a que en la etapa post-peak la carga axial cae a casi cero en un intervalo pequeño de tiempo, como se muestra en la curva roja de la (**Figura 2-8.a**). Por otro lado, a partir del aporte de Hashiba et al. (2006), Khosravi (2016) comparo resultados de ensayos UCS con y sin obtención de la curva completa y obtuvo que la energía disipada al utilizar esta metodología fue alrededor de un 13% (**Figura 2-8.b**). Sin embargo, no provee más información sobre la composición interna de las rocas utilizadas para cada ensayo.

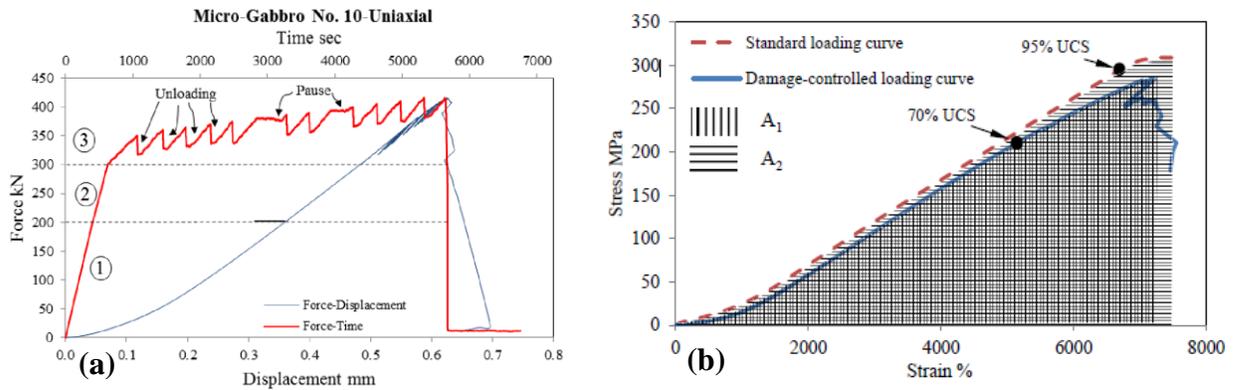


Figura 2-8: a) Ensayo de cargas cíclicas para muestra de Microgabbro. b) Efecto de la metodología en la energía elástica almacenada comparado con ensayo UCS convencional (Khosravi, 2016).

Recientemente, Paredes (2022) implementó una metodología de cargas cíclicas basada en la de Khosravi (2016) en la etapa pre-peak en ensayos de compresión simple, con el objetivo de mitigar parte de la energía acumulada durante la fase de carga en rocas frágiles chilenas para obtener la curva esfuerzo-deformación completa. Este estudio considera muestras de pórfido diorítico y brecha. Dentro de los resultados se reporta que no fue posible obtener resultados positivos para las muestras de pórfido diorítico debido a que son demasiado frágiles. Pese a que utilizó la tasa de control más baja admisible por una prensa servo-controlada, no se logró capturar la región post-peak de la curva ni siquiera con velocidades del orden de 0.0001 mm/min. Otro objetivo del estudio fue disminuir la duración de los ensayos a partir de lo propuesto por Khosravi (2016), quien indica que la extensión de cada prueba se reduce de 8 horas a un máximo de 2.5. Sin embargo, Khosravi (2016) utilizó velocidades de entre 2 a 6 veces más altas en las rocas que ensayó en comparación con las velocidades usadas en rocas similares a las del estudio de Paredes (2022). Por lo tanto, se deben hacer más estudios para definir un procedimiento adecuado para obtener las curvas completas de esfuerzo deformación en cada caso en particular.

También hay evidencia en la literatura de ensayos triaxiales con cargas cíclicas. Taheri & Chanda (2013) realizaron ensayos con diferentes confinamientos y cargas cíclicas en la zona pre-peak y post-peak, y notaron que el desarrollo de ciclos con descargas completas no afecta de forma significativa la resistencia peak y residual de rocas frágiles. En base a esto, se pueden utilizar diferentes confinamientos dentro de un mismo ensayo, mediante la aplicación de cargas cíclicas, en lugar de llevar a cabo un gran número de ensayos triaxiales sobre muestras de roca con distintos confinamientos. Taheri & Muñoz (2017) realizaron pruebas con ciclos de carga y descarga en la zona post-peak en un intento de representar el comportamiento de la roca en la medida que sus grietas se van propagando, registraron la deformación utilizando correlación de imágenes digitales en tres dimensiones (3D DIC) y notaron que alrededor de la futura zona de falla se observan mayores deformaciones.

2.4. Influencia de algunas propiedades índices y de características geológicas en el comportamiento mecánico de las rocas

Una roca posee propiedades físicas (o índice) y mecánicas. Las propiedades físicas vienen dadas por su génesis y los procesos de alteración y meteorización que sufre a lo largo de su historia. Las propiedades que tienen una mayor influencia dentro del comportamiento mecánico son la porosidad, el peso específico, permeabilidad, alterabilidad y la velocidad de ondas (González de Vallejo et al., 2004). Por otro lado, las propiedades mecánicas están definidas por la resistencia y deformabilidad de la roca. El comportamiento mecánico de las rocas observado en laboratorio difiere del registrado in-situ por el efecto tamaño y la heterogeneidad que se agrega al aumentar la propia escala, incluyendo la composición mineral, textura, estructuras, estado de esfuerzos, contenido de aguas y anisotropía (Krasilova et al. 1975).

A la fecha hay estudios que han investigado la influencia de las discontinuidades y de la anisotropía en las propiedades mecánicas de muestras de roca en laboratorio. Respecto al efecto de las discontinuidades en la curva esfuerzo-deformación completa, Arzúa et al (2014) utilizaron muestras de granito con discontinuidades artificiales y notaron que las discontinuidades afectan de forma considerable la resistencia máxima, pero no así la resistencia residual. Por otro lado, Askaripour (2022) menciona que el grado de anisotropía depende del clivaje, estructuras, micro y macro fisuras, o cualquier característica que sea producto de variaciones en la composición mineral, tamaño de cristales, fábrica, porosidad y grado de alteración; y que las propiedades mecánicas se ven influenciadas por la anisotropía. Saeidi et. al. (2013) indica que al realizar ensayos mecánicos variando el plano de debilidad desde 0 a 90°, la menor resistencia se da cuando el ángulo es de 30 a 40° en relación con la dirección de carga.

Por otro lado, y considerando que los ensayos índices son no destructivos, se considera que estos pueden ser útiles para obtener información que pueda ayudar a entender de mejor forma la respuesta mecánica de un material. Algunos investigadores han analizado relaciones entre algunas características geológicas medibles y las propiedades mecánicas de diferentes tipos de rocas ígneas (Brace 1961, Eberhardt et al. 1999, Prikryl 2001). Sin embargo, la mayor parte de los estudios se centran en análisis en microscopio, al menos para la obtención de tamaño de granos y composición mineralógica. Un punto por mejorar importante corresponde a que estos análisis están orientados principalmente a la zona pre-peak de la curva esfuerzo-deformación, por ende, aún hacen falta estudios que ahonden en posibles relaciones de la geología con parámetros post-peak de la curva.

Es importante destacar que, de los estudios publicados, el granito corresponde a la litología de roca ígnea que presenta una mayor cantidad de estudios post-peak, y se observa que incluso dentro de la misma litología existen variaciones importantes en los resultados de acuerdo con algunas propiedades geológicas. Investigadores chilenos (Pollak & Vallejos 2018, Zúñiga et al. 2020, Velázquez 2022, Paredes 2022) han desarrollado ensayos de compresión simple con medición post-peak para rocas frágiles, buscando encontrar relaciones entre propiedades físicas y mecánicas, analizar el factor escala o implementar metodologías alternativas. En el caso del estudio de Zúñiga et al. (2020) se encontró que, en muestras de Dacita sin discontinuidades visibles, los parámetros

pre y post peak no varían significativamente con la escala. Sin embargo, estos estudios son recientes siendo necesario potenciar las investigaciones sobre rocas frágiles chilenas.

Respecto a las condiciones en que se desarrollan los ensayos, existe un mayor número de estudios en ensayos triaxiales que uniaxiales. Walton et al (2014) estudiaron el comportamiento post-peak en muestras de mármol Carrara, limonitas Indiana y Limonitas de Toral de Los Vados en ensayos de compresión uniaxial y triaxial. Estos autores notaron que al realizar ciclos de carga y descarga durante todo el ensayo y registrar el módulo de Young en cada etapa de carga, existe una disminución progresiva en la rigidez en función de las deformaciones plásticas. También observaron que la rigidez crece de manera lineal con el confinamiento y diferencias en los modos de falla entre las distintas litologías. En otro estudio, Zhang & Li, (2019) estudiaron el efecto del confinamiento en rocas de mármol Fauske y granito Iddefjord, en relación con el comportamiento post-peak y en el ángulo de fractura. El granito mostró comportamiento clase II, y el mármol clase I. El estudio relacionó el ángulo de fractura con el confinamiento, el valor UCS y una constante de roca, pero no entregaron una mayor descripción geológica sobre los tipos de roca estudiados.

En este contexto y dado que los estudios con medición de curva completa son mucho más recientes que los tradicionales con solo medición de módulo y resistencia máxima, se destacan a continuación las conclusiones más importantes obtenidas de estudios realizados en los últimos diez años respecto a cómo afectan las propiedades índices, la composición mineralógica, y el tamaño de grano al comportamiento mecánico de las rocas en ensayos de compresión uniaxial. Por último, también se incluye un estudio reciente en el que se relacionan propiedades pre-peak y post-peak.

2.4.1. Influencia de propiedades índices en el comportamiento mecánico de las rocas

Con respecto a la porosidad, Ündül (2016) al estudiar rocas de origen volcánico indicó que el incremento en este parámetro disminuye la resistencia a la compresión simple de manera lineal según la Eq. (1) con un $R^2 = -0.64$. Entwisle & Hoobs. (2005) estudió la porosidad y su influencia con el UCS en rocas volcánicas, donde consiguieron resultados similares para espectros de roca muy competente, considerando rangos de porosidad entre 0.1 a 6%. A la misma conclusión llegaron Palchik & Hatzor (2004) al estudiar rocas de caliza, notando que un incremento en la porosidad de la roca disminuye la resistencia a la compresión.

$$UCS = -13.531 * n_t + 243.23 \quad (1)$$

Con respecto a las velocidades de ondas, la ISRM (2013) dice que la velocidad de ondas P y S sirven para predecir y establecer correlaciones con resistencia, módulos estáticos y porosidad, teniendo la ventaja de obtenerse a partir de un ensayo índice que no destruye la roca. Tugrul & Zarif (1999) notaron que existe una correlación aceptable (0.8) entre la velocidad de ondas P y la resistencia máxima a la compresión en rocas de granito que resisten en promedio 160 MPa. Entwisle et. al. (2005) notaron que las velocidades de onda inciden en una mayor resistencia a la compresión simple en rocas volcánicas, donde la relación encontrada es de forma logarítmica. En general no hay estudios tan exhaustivos en diferentes litologías sobre la relación entre velocidades de ondas y la resistencia, pero existe información relativa a los granitos y cómo se comportan en

base a esta propiedad.

2.4.2. Influencia de la composición mineralógica en el comportamiento mecánico de las rocas

En cuanto a la composición mineralógica, Vutukuri et. al. (1974) señalan que existe una fuerte dependencia entre las propiedades mecánicas y las características mineralógicas, donde las especies que contienen cuarzo, calcita o minerales féreos como matriz son los más resistentes. Sin embargo, no entregan resultados que cuantifiquen este efecto. En rocas ígneas, Tugrul & Zarif (1999) relacionaron la razón de cuarzo con feldespatos en 19 muestras de granito, versus la resistencia a la compresión, tracción y el peso unitario. Según sus resultados, que se presentan en las Eq. (2) y (3), las propiedades mecánicas aumentan a medida que el contenido de cuarzo aumenta con $R^2 = 0.79$. Los granitos estudiados presentan contenidos variables en cuanto a composición mineral según lo presentado en la **Tabla 2-1**.

$$\sigma_c = 121.02 * QFR + 115 \quad (2)$$

$$\sigma_t = 19.54 * QFR + 15 \quad (3)$$

Tabla 2-1. Información de especies predominantes en 19 muestras de granito (Tugrul & Zarif, 1999)

Especie mineral	Rangos de contenido (promedio) [%]	Rango de tamaño de granos [mm]
Cuarzo	9.5 - 33 (22)	0.1 – 3.8
Plagioclasas	5.5 - 75.3 (41)	0.1 – 4.4
Feldespatos	5.3 – 75.3 (30)	0.2 – 8.8
Biotitas	1.5 – 4.2 (2.5)	0.1 – 1.8

En otro estudio, Ündül (2016) detectó que en 35 rocas de composición andesítica la presencia de biotita (entre un 1% y 13%) disminuye la resistencia a la compresión con una correlación de -0.56. Este mismo autor también encontró que el porcentaje de plagioclasas y anfíboles se correlacionan con el UCS y la razón de Poisson; donde un mayor contenido de estos elementos se traduce en mejores características resistivas. El mismo autor realizó regresiones multivariantes considerando, además: la porosidad (n_t), el contenido de cuarzo en porcentaje (M_q) medido mediante difracción de rayos X, y el diámetro de Feret en mm (distancia entre dos tangentes paralelas en los lados opuestos de una partícula) en minerales opacos (F_{opa}) y en biotitas (F_{bio}), con el objetivo de estimar el módulo de Young y el UCS. Algunas de las relaciones multivariantes encontradas para estimar el UCS y el módulo de Young, en MPa y GPa respectivamente se presentan en las Eq. (4) y (5). Los R^2 son 0.81 en ambos casos.

$$UCS = 191887 * \left(\frac{C_{plg} + C_{anf}}{C_{grm}} \right) + 155341 * M_{felds} + 836322 * M_q - 147.441 \quad (4)$$

$$E = 7690 * \left(\frac{C_{plg} + C_{anf}}{C_{grm}} \right) - 11618 * F_{bio} + 42543 * F_{opa} + 54776 \quad (5)$$

Otros estudios también han considerado estimar los umbrales de daño. Cowie & Walton (2018) relacionaron el tamaño de grano, porcentajes de mineral, densidad y dureza de Mohs con las

propiedades mecánicas pre-peak de 58 muestras de granito que presentan tamaños de grano del orden de 0.4 mm en promedio. Dentro de los resultados relevantes, establecieron que el contenido de micas se correlaciona inversamente con los umbrales de iniciación y daño. Estos autores también desarrollaron modelos predictivos univariados de estos parámetros a partir del tamaño de granos, cantidad de micas y dureza de Mohs. En este estudio no se analizó la influencia de la geología en la región post-peak. Algo importante de mencionar es que existe poco consenso a la hora de definir modelos predictivos, resultando en un gran número de ecuaciones que intentan describir la misma variable, como se puede observar en la recopilación bibliográfica de Askaripour (2022).

Velásquez (2022) realizó ensayos de compresión uniaxial sobre varias litologías de rocas ígneas chilenas de distintos orígenes. Dentro de los resultados obtenidos de sus 23 ensayos encontró que, las rocas de origen máfico presentan una mejor relación entre la densidad y el módulo de Young que las félsicas. En Chile, los tipos de rocas volcánicas que existen en la cordillera de la costa, principalmente andesítica y andesítica basáltica, indican la existencia de depósitos estratoligados de cobre y tienen características mecánicas particulares (Vivallo y Henríquez, 1998).

2.4.3. Influencia del tamaño de granos en el comportamiento mecánico de las rocas

Uno de los parámetros más estudiados corresponde al tamaño de grano, o bien, tamaño de cristales en rocas ígneas y metamórficas. Para cuantificarlo, existe una serie de metodologías que apuntan a diferentes escalas, pasando desde varios metros a fracciones de milímetro. En el caso de las rocas ígneas, el tamaño de granos se relaciona al ambiente de formación de cristales, donde un mayor tiempo de residencia y temperaturas adecuadas pueden permitir que los cristales crezcan hasta tamaños de hasta algunos centímetros (clasificados como muy gruesos). De forma cualitativa, existe la siguiente clasificación para describir cristales (Gavasci 1989, Askaripour 2022):

- Grano muy fino : tamaños inferiores a 0.25 mm.
- Grano fino : tamaños entre 0.25 a 1 mm.
- Grano medio : tamaños entre 1 y 5 mm.
- Grano grueso : tamaños entre 5 mm y 3 cm
- Grano muy grueso : tamaños superiores a 3 cm

Para medir tamaños de grano muy finos se pueden utilizar métodos electrónicos (SEM, EMP, TEM), mientras que para registrar tamaños a un menor nivel de detalle pueden emplearse técnicas como cortes transparentes, análisis de imágenes o incluso descripciones de mano (Higgins, 2006). Los estudios sobre el tamaño de granos y su influencia en la resistencia máxima se centran en comparaciones con el valor promedio, que ha demostrado influir en las características mecánicas (Askaripour, 2022).

Pasando a su relación con el comportamiento mecánico, Brace (1961) notó que las rocas que presentan tamaños de grano fino poseen una mayor resistencia mecánica que las rocas que poseen tamaños de grano mayores, lo mismo fue evidenciado por Mendes et. al. (1966) y Arzúa & Alejano (2013) en muestras de granito. Efimov (2018) obtuvo una relación decreciente entre la resistencia a la compresión y el tamaño de granos promedio para rocas ígneas. Por otra parte, Eberhardt et. al.

(1999) notó que el tamaño de granos medido bajo microscopio en rocas cristalinas tiene un pequeño efecto en el punto en que las microfracturas se crean (σ_{ci}), y, estas fracturas, poseen una mayor influencia en el comportamiento de la muestra una vez que comienzan a propagarse. Se observó que un mayor tamaño de granos incide en una mayor coalescencia de las fracturas.

Arzúa & Alejano (2013) desarrollaron 36 ensayos de compresión uniaxial y 54 triaxiales en tres tipos de granitos: Amarelo país, Blanco Mera y Vilachán, con el objetivo de capturar los parámetros de la curva esfuerzo-deformación y el ángulo de dilatancia. Estas litologías difieren en tamaños de grano promedio y composición mineralógica. Los autores encontraron comportamientos similares en los 3 tipos de roca para la dilatancia, y variaciones en los resultados de los ensayos de compresión en cuanto a propiedades resistivas, parámetros elásticos y la resistencia residual. El granito Blanco Mera es el que presenta mayores propiedades resistivas. En cuanto al módulo de caída, este no pudo ser estimado en los ensayos de compresión uniaxial por la fragilidad de las muestras, mientras que al incrementar el confinamiento se observa un decrecimiento progresivo del módulo de caída.

2.4.4. Influencia de parámetros pre-peak en parámetros post-peak

Tutluoglu et al. (2014) ensayaron 73 muestras de roca pertenecientes a distintas litologías provenientes de todo Turquía. Se establecieron ocho agrupaciones de roca (granito, riodacita, dunitas, cuarcita, glauberita, argilita, mármol y lignita) de acuerdo con el origen de las muestras. A partir de los resultados concluyeron que en la medida que crece la resistencia a la compresión, también lo hace el módulo de caída, destacando que las litologías de granito y riodacita son las que presentan mayor fragilidad. Los autores establecieron relaciones exponenciales entre el módulo de caída, el módulo de Young y la resistencia peak, y también generaron relaciones logarítmicas para estimar la resistencia residual para algunas de las litologías. Sus resultados pueden ser utilizados para generar estimaciones de los parámetros post-peak ya que existe una buena correlación para la mayor parte de las litologías estudiadas, aunque para el caso del granito y la riodacita se observa alta variabilidad con respecto a los ajustes obtenidos. El resto de los estudios que relacionan parámetros pre-peak con los post-peak están enfocados a ambientes de confinamiento, por lo que no se han agregado dentro de esta revisión bibliográfica que se enfoca en ensayos de compresión uniaxial.

2.5. Brechas de la literatura

A partir de la revisión bibliográfica ha sido posible identificar una serie de brechas en la literatura, que pueden dar pie para desarrollar mejoras en los procedimientos empleados actualmente, y también para mejorar el entendimiento que se tiene sobre los parámetros post-peak en ensayos de laboratorio a partir de propiedades geológicas. Estos puntos se discuten a continuación.

Una de las principales limitaciones mencionadas es que, tal como se ha mencionado, la norma que señala los lineamientos para obtener la curva esfuerzo-deformación completa (Fairhurst & Hudson, 1999) indica dos procedimientos dependiendo si la roca exhibe un comportamiento de clase I o II,

y el principal problema que surge de las recomendaciones es que sugieren velocidades demasiado altas para rocas frágiles chilenas (de clase II). De hecho, varios investigadores han utilizado tasas de control que en general son más bajas que las sugeridas en función de lograr capturar la curva completa en distintos tipos de roca. Estandarizar las velocidades utilizadas acorde a litologías diferentes podría ser un punto importante de mejora, especialmente en cuanto a la comparación de resultados obtenidos por distintos laboratorios, ya que la tasa de incremento puede significar que se tenga proceso de fractura controlado o un estallido violento (Komurlu, 2018). Existen estudios acerca de las tasas de control monótono utilizadas en los ensayos y su influencia en la respuesta mecánica de las rocas, por ende, se hace necesario buscar metodologías, instrumentación y tasas que favorezcan la realización ensayos con obtención de la curva completa en rocas muy frágiles, como las abarcadas en este estudio, que en muchas ocasiones estallan de manera violenta sin una explicación del todo clara, y sin poder capturar la curva completa.

También se ha evidenciado que las características geológicas visibles en muestras de mano y las propiedades índices repercuten en las propiedades mecánicas. Dado que cada litología difiere en cuanto a su génesis se esperan comportamientos mecánicos diferentes para cada roca, incluso cuando han sido clasificadas bajo una misma especie al haber sido formadas por el mismo mecanismo y poseer contenidos de mineral similares. Estudios mencionados previamente muestran que existe una clara influencia de la composición mineralógica, tamaño de granos, porosidad y la presencia de discontinuidades sobre la resistencia en la roca. En rocas ígneas, también se ha observado que la variabilidad en la cantidad de algunos minerales que las componen repercute en las propiedades mecánicas pre-peak, por lo que se podría pensar que ocurre algo similar con los parámetros post-peak. Teniendo esto en consideración, se recomienda recopilar la mayor cantidad de información posible referente a las características de las rocas y a las propiedades índice de cada tipo de roca, ya que muchos estudios comprueban que afectan el comportamiento mecánico. Por ende, tener una noción previa de las características geológicas que son significativas en la estimación de sus propiedades mecánicas podría permitir desarrollar proyectos, prevenir peligros y mitigar riesgos de manera más eficiente al tener un indicador que señale si habrá rupturas violentas o no.

Finalmente, un estudio reciente de Cai et al. (2021) muestra que es posible realizar ensayos de compresión, incluso en rocas que comúnmente exhiben comportamiento de clase II, bajo un régimen de control por deformación axial. Este trabajo usa una prensa servo-controlada diseñada por el añade componentes rígidos que se deforman en conjunto con la roca, de modo que al momento de producirse la fractura no hay una pérdida de rigidez considerable en el sistema roca-equipo. Esta configuración no es replicable en cualquier laboratorio, a menos que se adquiera una nueva prensa servo-controlada con las características que se describen en su publicación. Por esto, los ensayos sobre rocas que exhiben un comportamiento de clase II deben continuar realizándose de la manera en que se han llevado hasta ahora (utilizando la deformación lateral como variable de control), pese a que el mismo investigador aseveró que el comportamiento de clase II no es una propiedad intrínseca de la roca. Es recomendable esperar que se publiquen más artículos al respecto, además de probar metodologías de ensayo que faciliten obtener la curva esfuerzo deformación completa. Por el momento, realizar ensayos con medición de post-peak sirve para

medir la fragilidad de las rocas y comparar así distintas litologías. Como alternativa, se han publicado distintas opciones de la literatura respecto a cambios en el procedimiento de laboratorio para obtener curvas de esfuerzo-deformación completas. Se destaca la implementación reciente de cargas cíclicas dentro de los ensayos de compresión del laboratorio por Paredes (2022). Si bien no hubo una disminución notoria en la energía acumulada por la aplicación de cargas y descargas, da pie para probar otras metodologías de ensayo alternativas que involucren cargas cíclicas.

Dada la reciente adquisición de dos prensas servo-controladas por parte del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile, ahora es posible ampliar en el conocimiento que se tiene sobre el comportamiento mecánico post-peak de litologías frágiles encontradas en Chile. En Turquía, por ejemplo, se realizó un estudio extenso sobre diferentes litologías y relaciones entre sus propiedades mecánicas (Tutluoglu et al., 2014), y sería importante que estudios similares se desarrollen en lugares donde existe gran actividad minera para estimar propiedades de roca mineralizada. Dadas las condiciones cada vez más desfavorables de explotación, es necesario generar nuevos estudios que ayuden a entender de mejor forma el comportamiento mecánico de las rocas. Lo anterior cobra relevancia en operaciones cada vez más profundas, lo que genera, por ende, un aumento en el riesgo asociado con estallidos de roca.

3. Trabajo Enviado a Rock Mechanics and Rock Engineering (RMRE)

Influence of index properties and semi-quantitative geological characteristics of brittle rocks on their post-peak behavior

Sergio Flores ^{a,b}, Kimie Suzuki Morales ^{a,b}, Pía Lois-Morales ^{a,b}

^a Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile

^b Department of Mining Engineering, Universidad de Chile

HIGHLIGHTS

- Post-peak tests in very brittle rocks require a servo-testing machine and specific methodologies that reduce testing time while avoiding uncontrolled failure.
- Three models are proposed for predicting UCS, the likelihood of capturing successfully the post-peak and drop modulus as a function of mechanical and index properties.
- Non-destructive P-S wave velocities test is a useful alternative to have a preliminary estimation of UCS to define the stages for carrying out post-peak tests.
- Results indicate that UCS plays a role in predicting the likelihood of capturing successfully the post-peak at laboratory when testing brittle rocks in a given laboratory.
- UCS, Young Modulus and porosity can be used to estimate drop modulus in very brittle rocks.

ABSTRACT

The deepening of mining operations involves new challenges regarding geomechanical events, where it is necessary to anticipate and take actions to avoid damages that can be caused by working in a high-stress environment such as rock bursts. For this, uniaxial compression tests with complete stress-strain curves allow a better understanding of rock behavior under high stress situations. A disadvantage is that the outcome of the tests is unknown, that is, whether the post-peak region can be captured on a laboratory scale, which depends, among other things, on the brittleness of the sample and its own characteristics. This study looks for some relationships between mechanical and geological variables to predict the likelihood of capturing successfully the post-peak behavior in the laboratory, and estimate drop modulus from index and mechanical parameters in brittle rocks. For this purpose, tests have been conducted at the Rock Mechanics Laboratory of the University of Chile and the Advanced Mining Technology Center (AMTC), using the MES300 servo-assisted testing machine. The procedure applied in the 28 UCS tests carried out on different lithologies is based on the recommendation of the International Society for Rock Mechanics (ISRM) and previous studies, while for the geological analysis, photography techniques have been used. The results include a model that predicts UCS using the Dynamic Young's modulus and another that predict the likelihood of capturing successfully the post-peak behaviour with UCS. Also, a multivariable model was established to estimate the drop modulus using mechanical properties and porosity. As for the geological analyses at the scale of photography, there is no conclusive information, so it is recommended to continue research to expand the scope of this or similar techniques. Additionally, it will be useful to improve the models and broaden the number of rocks analyzed in the study to have more robust information compared to what is currently available.

KEYWORDS: BRITTLE ROCKS, POST-PEAK, QUANTITATIVE GEOLOGY, UCS TEST

1 INTRODUCTION

In Chile, three tectonic boundaries meet, resulting in working environments in which the horizontal in-situ stresses are higher than vertical stresses (Heidbach et. al. 2008), so higher stress concentrations are expected on the back and floor of underground excavations. In this context, operating deep mines can be challenging. One of the consequences of operating deeper is associated with the occurrence of rockburst, a spontaneous and violent failure of rock, which is not yet be adequately understood and predicted. Rockburst has caused accidents and even stopped mining production (Pardo, 2015). Therefore, it becomes increasingly important to understand the rock mass behavior once it exceeds its maximum strength, including how it fails.

The rock mass behaviour can be studied by studying the stress-strain curve with laboratory testing. For example, in uniaxial compression tests results have shown that brittle rocks are more prone to show uncontrollable failure than rocks that exhibit strain softening as they accumulate more energy and release it abruptly. Therefore, capturing these differences becomes relevant. Some of the limitations for obtaining the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression are related to the characteristics of the equipment and the instruments for strain measurement and to the inherent properties of the rocks. Because of this, improvements to the standard method recommended by the ISRM (Fairhurst & Hudson, 1999) have been proposed, where technological advancements have provided great support in better estimating the properties of brittle rocks.

On the other hand, rocks are generally classified based on formation conditions and the abundance of certain minerals in their overall composition. However, even within the same type of rock, variations in behaviour can occur due to factors such as alterations, structures, or different ranges of mineral species. For example, rocks classified as Andesites can exhibit contrasting behaviors. Studies on IOCG Andesites from Chile show an average compressive strength of 60 MPa (Velásquez, 2022), and andesites from Hungary can vary in a range of 50 to 270 MPa (Czinder, 2021). Higher strengths can be risky for an underground operation under high stresses due to the energy it can accumulate and how to release it. Studies on granites with different crystal sizes have also shown significant variability in the mechanical response (Arzúa & Alejano, 2013). Therefore, more variables are involved in explaining the mechanical behavior of rocks than just the assigned classification, which highlights the relevance of having a better characterization of geological to interpret the mechanical properties of rocks.

This paper aims to use quantitative geological characteristics, index test results, and pre-peak mechanical properties to estimate post-peak properties. For this purpose, tests have been conducted at the Rock Mechanics Laboratory of the University of Chile and the Advanced Mining Technology Center (AMTC), using the MES300 servo-assisted testing machine. It is important to note that when working with brittle rock specimens in post-peak laboratory tests, it is necessary to extract energy from the servo-assisted press after reaching maximum strength. This procedure is challenging and highly sensitive to variations, leading to limitations in defining the experimental plan due to extended testing times and the risk of uncontrolled failure.

2 THEORETICAL BACKGROUND

As underground excavations have become increasingly deeper, understanding rock mass behavior has become more necessary. Unfortunately, there is uncertainty about the rock mass behavior once it exceeds its maximum strength, which is described by the complete stress-strain curve, including the post-peak region. According to Hudson et al. (1972), the post-peak behavior has been less studied than the pre-peak zone due to the technical difficulties involved in laboratory testing, and consequently, most studies relate geology to pre-peak mechanical properties rather than post-peak region. It is important to note that the understanding of post-peak properties is still limited at the laboratory scale, which generates more uncertainty at the mine scale. However, understanding this behavior is required to describe the transition

from peak to residual strength, which can improve the design of support systems (Crowder and Bawden, 2004) and can be used to estimate the propensity and risk of rock bursts (Bukowska, 2013). Given the relevance of understanding rock behavior, this section explains the differences between traditional tests and tests that focus on obtaining the complete stress-strain curve. Additionally, studies that relate index properties and geological factors with mechanical properties of rocks are presented.

2.1 UNIAXIAL COMPRESSION TESTS WITH COMPLETE STRESS-STRAIN CURVE

Two different procedures allow obtaining rock properties through the uniaxial compression test, which differ in equipment and instrumentation. The ASTM International (2014) and Bieniawski & Bernede (1979) recommend a procedure that obtains the stress-strain curve until maximum resistance is reached. One of the limitations of the traditional procedure was identified by Hudson et al. (1972), who indicate that the test must be performed in a servo-controlled testing machine that allows the control of any independent variable to undergo monotonic increases and has a quick feedback response. Rummel & Fairhurst (1970) suggest that the overall press's stiffness must exceed that of the sample to capture the complete stress-strain curve. These recommendations are incorporated in the ISRM suggested method that focuses on recording the complete curve (Fairhurst & Hudson, 1999).

The mechanical properties of rocks in the pre-peak zone are the maximum strength and deformability properties. By obtaining the complete stress-strain curve, it is also possible to estimate in the post-peak part the drop modulus (M), the residual strength and dilatancy angle (Tutluoglu et al., 2015). The focus of this study is the drop modulus, which can be quantified as the slope of the linear section of the post-peak zone, if any, which marks the transition from a peak to a residual state (Dono, 2012). It can be represented by the slope (M) in Figure 1a. From the shape of the curve in the post-peak region, Fairhurst and Hudson (1999) identify two types of rocks: class I and class II (Figure 1b). Class I rocks present curves that maintain an increasing deformation as axial loading continues to be applied, whereas class II rocks show a behavior where axial strain is not increasing. Class II rocks accumulate more energy than they need to deform, so this energetic surplus must be released to continue the deformation process (ABDCA polygon in Figure 1b). This type of curve has the particularity of having a positive drop modulus and a trend that is not entirely linear.

Depending on the rock class type, ISRM (Fairhurst & Hudson, 1999) suggests different control mechanisms to carry out the test. A Class I rock should be tested under axial deformation control, whereas Class II rocks should be under diametral control, both at suggested velocities.

2.2 EFFECT OF INDEX PROPERTIES IN THE MECHANICAL BEHAVIOR OF ROCKS

Index tests have the advantage of being a non-destructive method. One of the most significant index properties affecting mechanical properties is porosity measured according to ASTM standard (ASTM international, 2015). Ündül (2016) indicated that the increase of porosity decreases the UCS linearly, according to Eq. 1 with a correlation coefficient of -0.64, when studying rocks of volcanic origin. Entwisle et. al (2005) studied porosity and its influence on UCS in volcanic rocks, achieving similar results for very competent rock spectra and considering porosity ranges between 0.1 to 6%. The same conclusion was reached by Palchik & Hatzor (2004) in limestone rocks, who noted that an increase in rock porosity decreases compressive strength.

$$UCS = -13.53 * n_t + 243.23$$

Eq. 1

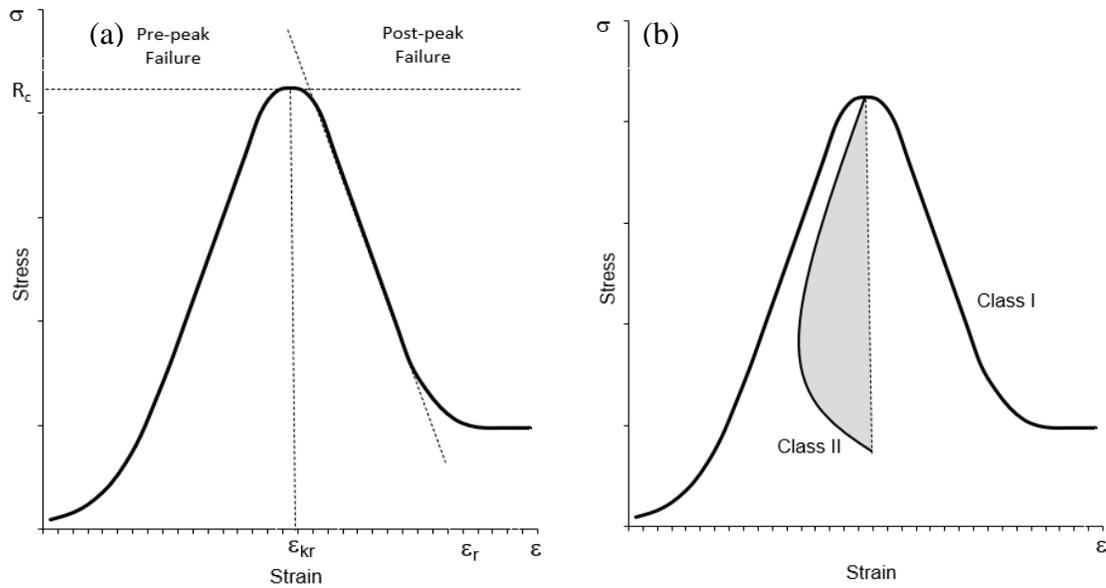


Figure 1: a) Stress-strain curve drop modulus representation, modified from Bukowska (2013). b) Stress-strain curve classes, modified from Fairhurst & Hudson (1999).

The ISRM suggested method for determining sound velocity (Aydin, 2014) indicates that P and S-wave velocities can predict and establish correlations with strength, static moduli and porosity. Tugrul & Zarif (1999) noted a correlation of $R^2 = 0,80$ between P-wave velocity and the UCS in granite rocks, whereas Entwisle et al. (2005) noted that a greater wave velocity is related with higher UCS in volcanic rocks, where the relationship found is in logarithmic scale. Another interesting application of wave velocities is the estimation of the degree of anisotropy (Tsidzi, 1997). However, there are only a few exhaustive studies in different lithologies using wave velocities; most tests have been developed in granites.

2.3 QUANTIFICATION OF THE GEOLOGICAL PROPERTIES IN THE MECHANICAL BEHAVIOR OF ROCKS

Rocks are natural aggregates composed of minerals. Geologists typically estimate some geological characteristics such as by percentages of minerals and grain sizes observing rocks hand samples by logging. While more detailed analyses can be performed to improve the rock characterization, they often require time and resources, which is rarely considered when doing a mechanical test. The following section presents a review that identifies the impact of grain size, mineralogical composition, and sample anisotropy on the mechanical behaviour of rocks.

One of the most studied parameters in geology in its relationship with mechanical properties is grain size in igneous and metamorphic rocks. There are several methodologies to quantify grain size, which range from fractions of a millimeter to several meters, as mentioned by Higgins (2006). The following classification divides the grain size of igneous rocks into four categories (Gavasci, 1989): fine grained (sizes smaller than 1 mm), medium grained (sizes between 1 and 5 mm), coarse grained (sizes between 5 mm and 3 cm) and very coarse grained (sizes larger than 3 cm). Electronic methods, such as SEM (*Scanning Electron Microscopy*), and TEM (*Transmission Electron Microscopy*) can be used to measure very fine grains, while techniques such as thin sections, image analysis, or even hand descriptions can be employed to register sizes at a lower level of detail (Higgins, 2006). Studies on grain size and its influence on maximum strength typically focus on comparisons with the average value (Askaripour, 2022). Studies show that rocks with smaller grain sizes exhibit greater strength than those with larger grain sizes (Brace, 1961, Mendes et al., 1966, Onodera & Asoka, 1980, Arzúa & Alejano, 2013).

Regarding the type of lithologies, Salinas (2018) noted a variability in UCS, E, ν , cohesion, and friction angle after tested 41 samples from nine different lithologies (Toba, Andesites, Granite, Granodiorite, Diorite,

Shale, Sandstone, Conglomerate, and Breccias), where Andesites show the strongest mechanical properties with UCS values above 200 MPa, and Shales were the weakest with UCS up to 40 MPa.

Regarding mineralogical composition of igneous rocks, Tugrul & Zarif (1999) related the quartz to feldspar ratio (QFR) in 19 granite samples to compressive, tensile strength and unit weight. In Eq. 2 and 3, their results indicate that mechanical properties increase as quartz content increases, with a correlation coefficient of 0.79 in both cases.

$$\sigma_c = 121.02 * QFR + 115 \quad \text{Eq. 2}$$

$$\sigma_t = 19.54 * QFR + 15 \quad \text{Eq. 3}$$

Ündül (2016) studied the mineral composition of 35 igneous rock samples. This author found that the presence of biotite (between 1% and 13%) in rocks of andesitic composition decreases the UCS, while a higher percentage of plagioclase and amphibole content translates into a higher UCS and Poisson's ratio. The same author performed multivariate regressions to estimate Young's modulus and UCS, considering porosity (n_t), quartz content in percentage (M_q) measured by X-ray diffraction, Feret diameter in mm (distance between two parallel tangents on opposite sides of a particle) in opaque minerals (F_{opa}) and biotites (F_{bio}). The multivariate relationships found for UCS (in MPa) and Young's modulus (in GPa) are presented in Eq. 4 and 5, respectively, with a correlation coefficient of 0.81 in both cases.

$$UCS = 191887 * \left(\frac{C_{plg} + C_{anf}}{C_{grm}} \right) + 155341 * M_{felds} + 836322 * M_q - 147.441 \quad \text{Eq. 4}$$

$$E = 7690 * \left(\frac{C_{plg} + C_{anf}}{C_{grm}} \right) - 11618 * F_{bio} + 42543 * F_{opa} + 54776 \quad \text{Eq. 5}$$

Another parameter that also influences the geomechanical response is the degree of anisotropy of the sample. Anisotropy can be given by cleavage, structures, micro and macro cracks, or any feature that is a product of variations in mineral composition, crystal size, factory, porosity and degree of alteration (Askaripour, 2022). The UCS can vary significantly as a function of anisotropy. Mechanical tests have been conducted to quantify it by varying the angle of the plane of weakness from 0 to 90°, and results indicate that the lowest resistance occurs when the angle is between 30 to 40° with respect to the loading direction (Saeidi et. al, 2013). In conclusion, none of the variables mentioned above has total control of the results and several studies have been developed to estimate mostly pre-peak mechanical properties using different approaches.

3 EXPERIMENTAL SETUP

3.1 SPECIMEN SELECTION

The lithologies considered in this study are Rhyolite, Andesite IOCG, Dacite, Dioritic porphyry, Granodiorite, Granite, Hydrothermal breccia, Basalt, Tonalite, and Andesite porphyry, and were obtained from four different locations. Hydrothermal Breccias, Dioritic porphyry, Andesitic porphyry, Tonalites were obtained from diamond core-drilled boreholes and Granites, Basalt, Rhyolites from blocks. The samples with mineralization were selected to have a minimum number of veins and defects visible on the surface. Rock specimens are cylindrical (NX: 50 mm, and HQ: 63,5 mm) and have an L/D ratio above 2. All samples were prepared according to ASTM standard D4543-19. All the samples included in this study exhibit brittle behavior in their unconfined condition.

For the lithologies mentioned above, 28 tests were added by this study and 23 were collected from previous analyses. For the first part of them, 12 are plutonic igneous rocks (four Granites, two Tonalites, and six Diorites), 12 are volcanic igneous rocks (10 Rhyolites, 1 Basalt, 1 Andesite porphyry), and four were Hydrothermal Breccias. The 23 remaining samples were tested by three authors using the same laboratory equipment: Zúñiga et al. (2020) tested nine Dacites to study the effect of scale on post-peak behavior;

Velásquez (2022) tested nine Andesite IOCG samples and five Granodiorite samples to study the effect of geological and mechanical pre-peak properties in the drop modulus; and Paredes (2022) tested six Hydrothermal Breccia samples and four Dioritic Porphyry samples to investigate new methodologies to carry out post-peak UCS tests and control the fracture pattern in brittle rocks. This study aims to complement the previous ones, including five new lithologies, index tests and image processing of the rocks before testing. Unfortunately, previous studies only considered visual characterization of rocks; therefore, some parameters from those rocks were not available.

To investigate the influence of index properties, porosity (ASTM Standard C97/C97M-18), density (ASTM Standard C97-18) and P and S-wave velocity (ASTM Standard E494-20) are measured. Young's dynamic modulus (E_{dyn}) represents the elasticity along the sample. Eq. 6 presents an equation to estimate its value in GPa using density (ρ) in kg/m³, P and S wave velocities (V_p and V_s , respectively) in m/s (ASTM Standard E494-20).

$$E_{dyn} = \frac{\rho * V_s^2 * (3 * V_p^2 - 4 * V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad \text{Eq. 6}$$

On the other hand, geological characteristics are quantitatively estimated for the 28 samples tested in this study. Mafic percentage and grain size are estimated by using hand-scale photography techniques representing the surface of the sample from pictures of all samples. Figure 2 presents examples of pictures for each lithology, illuminated by two light bulbs, that were tested.

The 23 tests from previous studies (Dacites, Granodiorites and Andesite IOCG) did not capture all the information collected in this study (e.g., Dynamic modules, porosity, image analysis, density). However, those studies are relevant because they also aimed to investigate the post-peak region in brittle rocks. Those studies were conducted in the same laboratory with the same equipment and instrumentation.

3.2 TESTING PROCEDURE

The Rock Mechanics Laboratory of the University of Chile has a servo-controlled press available to obtain the complete stress-strain curve for brittle rocks in uniaxial compression. The axial and diametral strains are measured using linear variable differential transformers (LVDTs) attached to the press' lower platen and the sample, respectively. Deformability parameters are estimated using the strains measured by strain gauges. The configuration is shown in Figure 3.

The ISRM suggested method (Fairhurst & Hudson, 1999) focuses on obtaining class II curves, where it is necessary to subtract energy from the servo-assisted testing machine. For that purpose, the lateral deformation controls the test to obtain the stress-strain curve. This study considers 28 new tests that are performed using the following three stages, according to Zúñiga (2020) and Velásquez (2022) recommendations:

1. Start with monotonic force control up to 70% of the estimated UCS of each lithology at a rate of 5 kN/min. The estimated UCS for each lithology is presented in Table 1, in which two to five conventional UCS tests (Bieniawski & Bernede, 1979) were performed for each lithology to have a preliminary average value. Table 1 also presents the number of post-peak tests performed for each lithology using the estimated UCS.
2. Switch to diametral deformation control at 0.0001 to 0.0003 mm/min, depending on the tested lithology. This stage usually takes about one to two hours.
3. When moving to the post-peak zone, maintain control by diametral deformation, increasing it only if variations in the oscilloscope are small in a significant time.

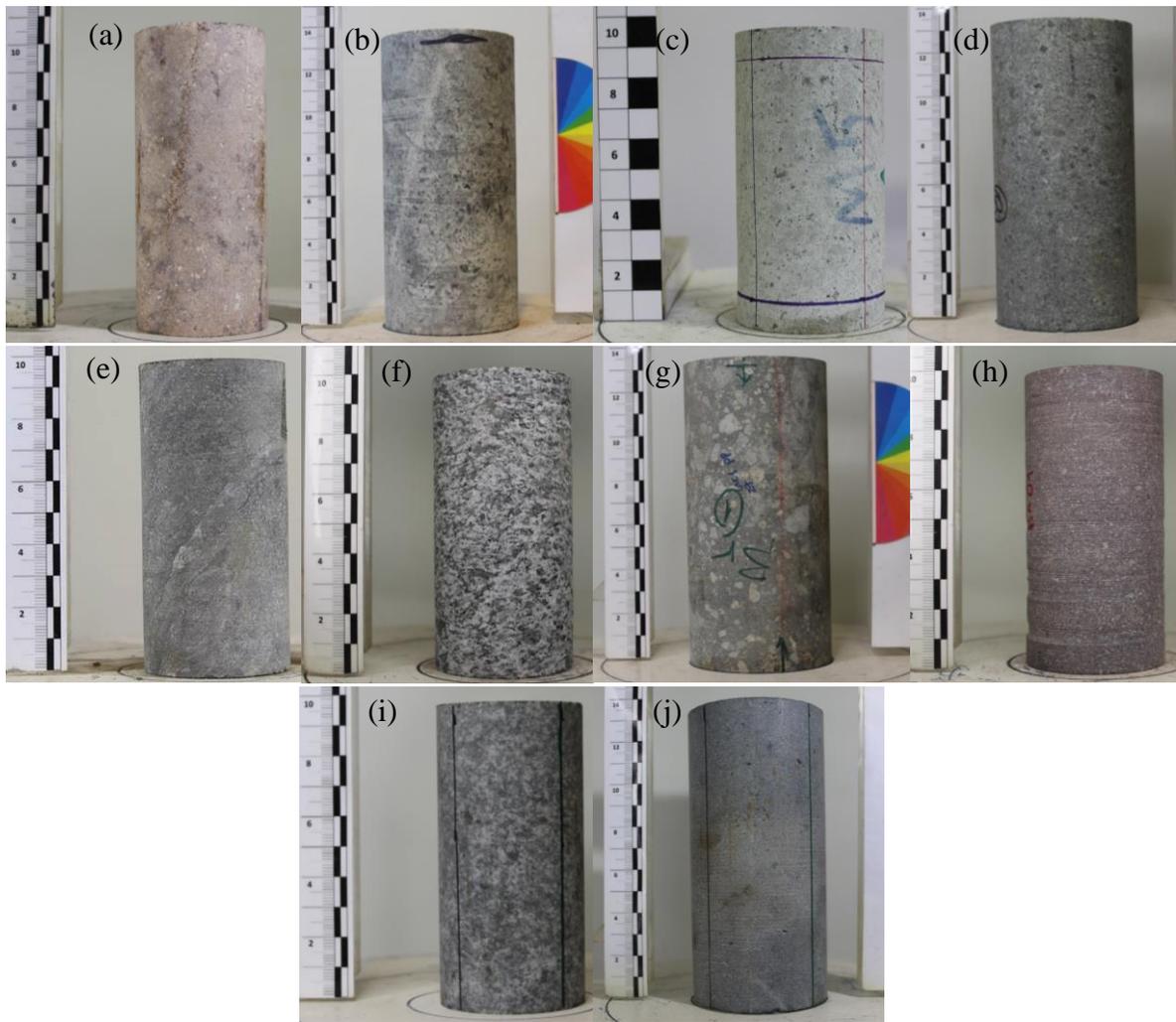


Figure 2: Samples of each lithology before being tested: (a) Rhyolite, (b) Andesite IOCG (Velásquez, 2022), (c) Dacite (Zúñiga, 2020), (d) Dioritic Porphyry, (e) Granodiorite (Velásquez, 2022), (f) Granite, (g) Hydrothermal Breccia, (h) Basalt, (i) Tonalite, (j) Andesite Porphyry

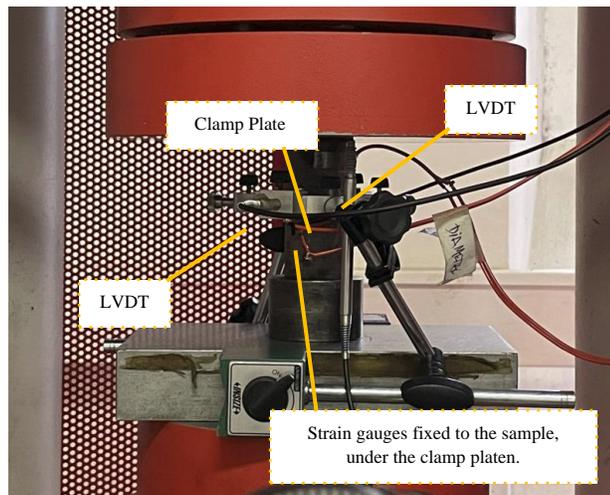


Figure 3: Testing configuration.

Table 1: Estimated UCS and number of successful post-peak tests performed by lithology (Lithologies tested in this study are marked with *).

ID	Lithology	Average Diameter (mm)	Estimated UCS to carry out post-peak test (MPa)	Number of post-peak tests performed
1	Rhyolite*	NX	72	10
2	Andesite IOCG	-	-	9
3	Dacite	-	-	9
4	Dioritic porphyry*	HQ	249	6
5	Granodiorite	-	-	5
6	Granite*	NX	178	4
7	Hydrothermal breccia*	HQ	191	4
8	Basalt*	NX	141	1
9	Tonalite*	NX	188	2
10	Andesite porphyry*	HQ	223	1

Once tests are completed, the modulus of elasticity (E and ν) are estimated from the linear part of the slope of the stress-strain curve using strain gauges (Figure 3), according to ASTM standard D7012-14, and the drop modulus (M) is calculated through LVDTs as the linear part of the slope of the axial stress-strain curve in the post-peak region when class II behavior is evidenced.

Each test was carried out for approximately eight hours. It is important to note that six tests in Rhyolite samples were stopped earlier because the post-peak behavior showed a clear tendency after five hours of testing. These rocks exhibited lower strengths compared to other types. On the other hand, some tests were run for more than ten hours because the post-peak region had no clear tendency earlier. In each test, it was important to check that LVDTs were aligned since any change could affect results. It is recommended to redesign the clamp plate for LVDTs (presented in Figure 3) to avoid movements during the test.

4 ROCK CHARACTERIZATION

Figure 4 presents an example of the procedure used to estimate grain size and mafic percentage. For this purpose, a 3x3 cm section with representative mineral distribution and no structures is selected to perform color segregation and determine the percentage of mafic minerals and their grain size distribution. The mafic minerals, such as olivine, biotite, amphibole, are assumed to correspond to the darker pixels of the image, and each grain's size is estimated by the measurement of its largest vertical or horizontal dimension. These minerals have been chosen because some authors have found that the larger content of mafic minerals can weaken the rock strength (Ündül, 2016, Askaripour 2022). This procedure has limitations due to the scale and a resolution of 4.5 MPxl of the original picture. However, it is important to recognize that this procedure is cheaper and faster than analyzing thin sections. In this study, thin sections are also used to verify lithology and mineral composition, but the analysis does not include those results. As mentioned, results from previous studies are used.

Figure 5 presents a picture taken to the sample at hand size and a picture captured by the optical microscope, which shows details that are not clearly identifiable at larger scale. The analyzed thin sections of the rocks included in this work confirm that rocks are mostly fine-grained with granite having the largest grain sizes. Based on this finding, and considering the resolution of the camera used, grain sizes measured from large scale pictures taken for this work should not be as good as results reported in the literature, where grain sizes were estimated from microscope analysis and then correlated with mechanical properties. The main limitation of larger scale picture is that color segregation is not completely accurate to distinguish each mineral from others at hand scale (e.g., plagioclases are very similar to quartz and difficult to separate based only in hand scale images). However, large scale pictures could still give useful information to better understand what could be expected from a post-peak test.

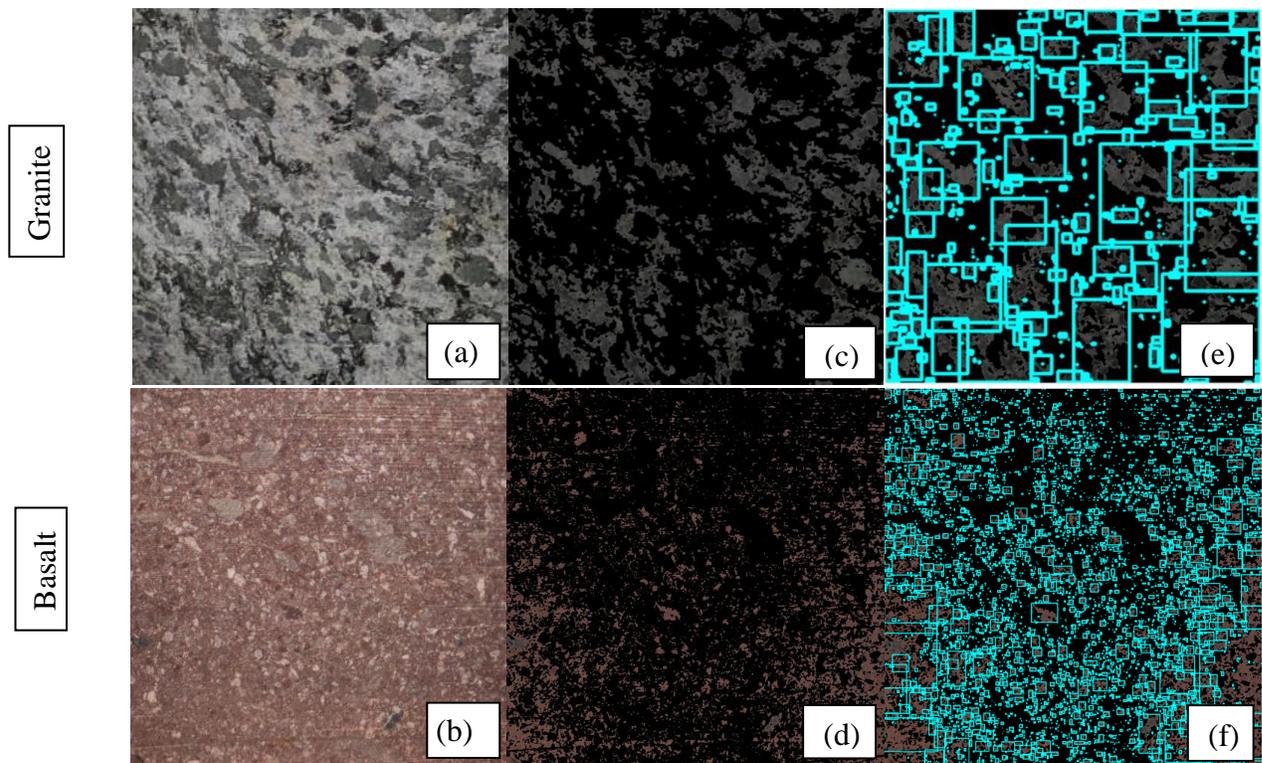


Figure 4: Procedure of grain size measurement and percentage of mafic minerals in a granite and basalt sample in 3x3 cm: (a,b) image selection, (c, d) color segmentation, (e, f) grain size measurements using a software.

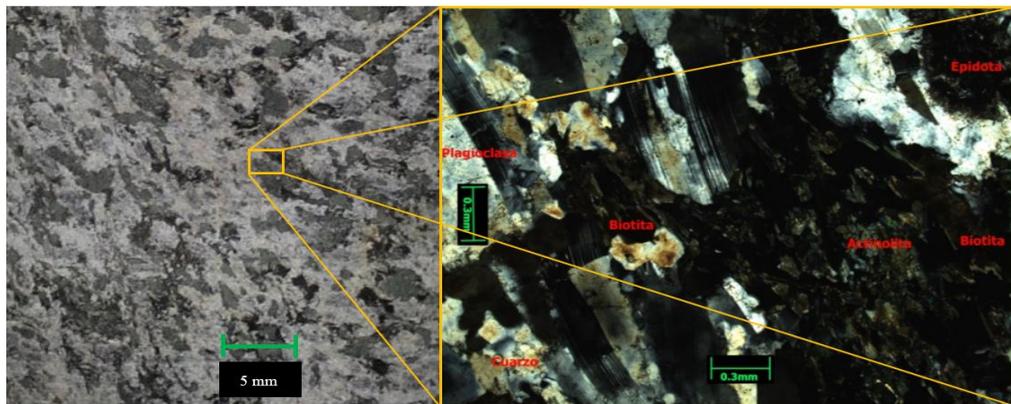


Figure 5: Difference in scales between a photograph at hand scale and what can be observed under a microscope.

The geological characteristics measured from hand size pictures and the index properties are presented in Table 2 and Table 3, respectively. Average mafic percentage and average grain size are measured using the methodology presented in Figure 4. Unfortunately, there is no information on geological characteristics and index properties for andesites IOCG, dacite, granodiorite and hydrothermal breccia samples, given that those studies focused mostly on post-peak results.

Results indicate that all lithologies exhibit a fine grain size based on average values, but all samples have grains that range from fine to medium grain size. For instance, granite samples display grains that are larger than 3 mm in hand scale. This limitation indicates that the average grain sizes measured may not be a good indicator. On the other hand, basalt grain sizes measured (Figure 4f) show that a large number of particles are barely perceptible at hand scale, which affects the average grain size measured.

Table 2: Summary of the average percentage of mafic minerals and average grain size for each lithology (Lithologies tested in this study are marked with *).

ID	Lithology	Average mafic percentage measured via software	Average grain size (minimum – maximum), mm
1	Rhyolite*	8%	0.18 (0.05 – 2.64)
2	Andesite IOCG	-	-
3	Dacite	-	-
4	Dioritic porphyry*	21.8%	0.25 (0.01 – 3.09)
5	Granodiorite	-	-
6	Granite*	31.9%	0.26 (0.01 – 3.92)
7	Hydrothermal breccia*	11.5%	-
8	Basalt*	44.4%	0.08 (0.01 – 4.37)
9	Tonalite*	8.7%	0.23 (0.05 – 4.42)
10	Andesite porphyry*	8.7%	0.21 (0.06 – 1.82)

Table 3: Summary of average and standard deviation of index properties for each lithology (Lithologies tested in this study are marked with *).

ID	Lithology	Porosity (%)	Density (g/cm ³)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	E _{dyn} (GPa)
1	Rhyolite*	10.48 ± 5.31	2.20 ± 0.13	4424 ± 295	2490 ± 179	34.88 ± 6.36
2	Andesite IOCG	-	2.80 ± 0.08	-	-	-
3	Dacite	-	2.55 ± 0.03	-	-	-
4	Dioritic porphyry*	0.78 ± 0.38	2.69 ± 0.03	5094 ± 66	2927 ± 48	56.55 ± 1.36
5	Granodiorite	-	2.69 ± 0.02	-	-	-
6	Granite*	0.61 ± 0.16	2.84 ± 0.02	4812 ± 279	2624 ± 110	50.45 ± 4.84
7	Hydrothermal breccia*	-	2.67 ± 0.05	5112 ± 64	2502 ± 48	43.93 ± 1.64
8	Basalt*	0.41	2.71	5698	3031	66.34
9	Tonalite*	1.59 ± 0.07	2.56 ± 0.00	5117 ± 16	2947 ± 67	55.21 ± 1.69
10	Andesite porphyry*	0.51	2.76	5038	2771	53.64

In some cases, the resolution of the picture is not good enough to identify single grains, and clusters that represent a group of minerals are identified instead. As a result, representative segregation between mafic and felsic species has not been achieved. Despite this, basalt samples clearly show grains finer than granite samples at hand scale. On the other hand, the percentage of mafic minerals may have been affected by light conditions and dirt on rock surfaces despite attempts to reduce these effects. For instance, plagioclase exhibits a different brightness than quartz in the presence of light, and this phenomenon was not recorded at hand scale images even though an attempt was made to control the light.

5 PRE-PEAK AND POST-PEAK RESULTS

Table 4 summarizes the strength and deformation properties of the mechanical tests for each lithology. Additionally, there were instances where the tests ended due to structural failures, and therefore, they were not included as valid results. UCS values were normalized to 50 mm. After testing, failure modes are classified in type A (matrix) or B (mix between matrix and structures).

Table 4: Summary of average and standard deviation pre-peak and post-peak properties for each lithology (Lithologies tested in this study are marked with *).

ID	Lithology	UCS ₅₀ (MPa)	E (GPa)	ν	M (GPa)	Failure mode	Uncontrolled failure
1	Rhyolite*	55.73 ± 29.05	37.2 ± 13.78	0.16 ± 0.05	30.85 ± 6.84	A / B	1/10
2	Andesite IOCG	70.6 ± 29.33	32.5 ± 7.34	0.29 ± 0.04	47.48 ± 24.46	A / B	4/9
3	Dacite	97.0 ± 33.69	22.4 ± 6.04	0.18 ± 0.05	37.05 ± 12.17	A / B	2/9
4	Dioritic porphyry*	238.86 ± 26.37	61.5 ± 5.91	0.21 ± 0.05	-	A / B	6/6
5	Granodiorite	82.1 ± 15.50	27.2 ± 11.13	0.09 ± 0.05	43.68 ± 12.83	A / B	2/5
6	Granite*	116.38 ± 20.91	73.0 ± 22.28	0.24 ± 0.09	52.82 ± 7.96	A	0/4
7	Hydrothermal breccia*	137.54 ± 19.30	45.3 ± 3.95	0.24 ± 0.09	42.06 ± 4.87	A	1/4
8	Basalt*	173.36	84.45	0.22	-	A	1/1
9	Tonalite*	223.24 ± 8.13	74.8 ± 1.89	0.24 ± 0.03	-	A	2/2
10	Andesite porphyry*	223.11	71.50	0.24	-	A	1/1

Results indicate that the original estimation of UCS, presented in Table 1, is within the range of UCS obtained from post-peak tests, but in some cases, the original estimation was not close enough. The main implication of a bad estimation of UCS is related to the duration of the test. If the estimated UCS is higher than the real UCS, most of the tests are controlled by lateral strain, which is the most time-consuming stage. It is important to note that most of the samples failed through intact rock (A), but some tests also showed mixed failure (B). Even though the suggested method by ISRM was used to obtain the complete curve, which considers using a servo-controlled press and low strain rates, some of the tests resulted in uncontrolled rock failure. The number of samples that failed in an uncontrolled manner is also included for each lithology.

Twenty of all the samples showed uncontrolled failure despite following the established procedure and even using the lowest allowable rate by the servo-controlled testing machine. Figure 6 shows some of the stress-strain curves normalized to 50 mm that resulted in uncontrolled failure at the end of the pre-peak stage; particularly, the 12 rocks tested in this study are presented. Stress-strain curves for post-peak tests in andesites IOCG and granodiorite samples can be found in Velásquez (2022). In most of these specimens, a predominant factor is the high compressive strength achieved, in average $UCS > 160 MPa$, and $E > 60 GPa$.

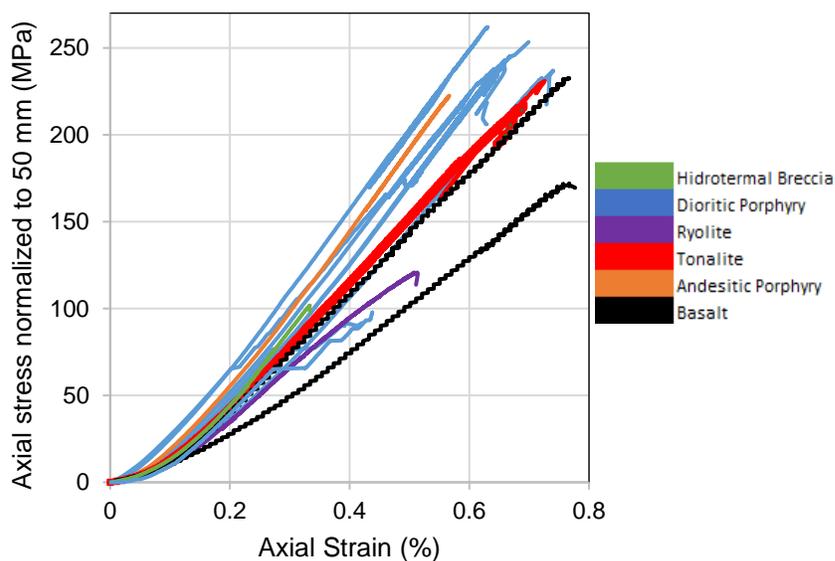


Figure 6: Stress-strain curve of resulting tests in uncontrolled failure, LVDT measurement.

On the other hand, successful tests resulted in class I and class II curves, according to Figure 1, even though they are far from representing ideal curves. Most of the samples resulted in class II curves, but four of the ten rhyolite samples had class I curves and a negative drop modulus (Figure 7a). Generally, rocks of the same lithology exhibit similar behavior in the post-peak region, except for rhyolite samples. Regarding rock samples that exhibited class II behavior, the maximum UCS at which this behavior was captured was up to 160 MPa (Figure 7b).

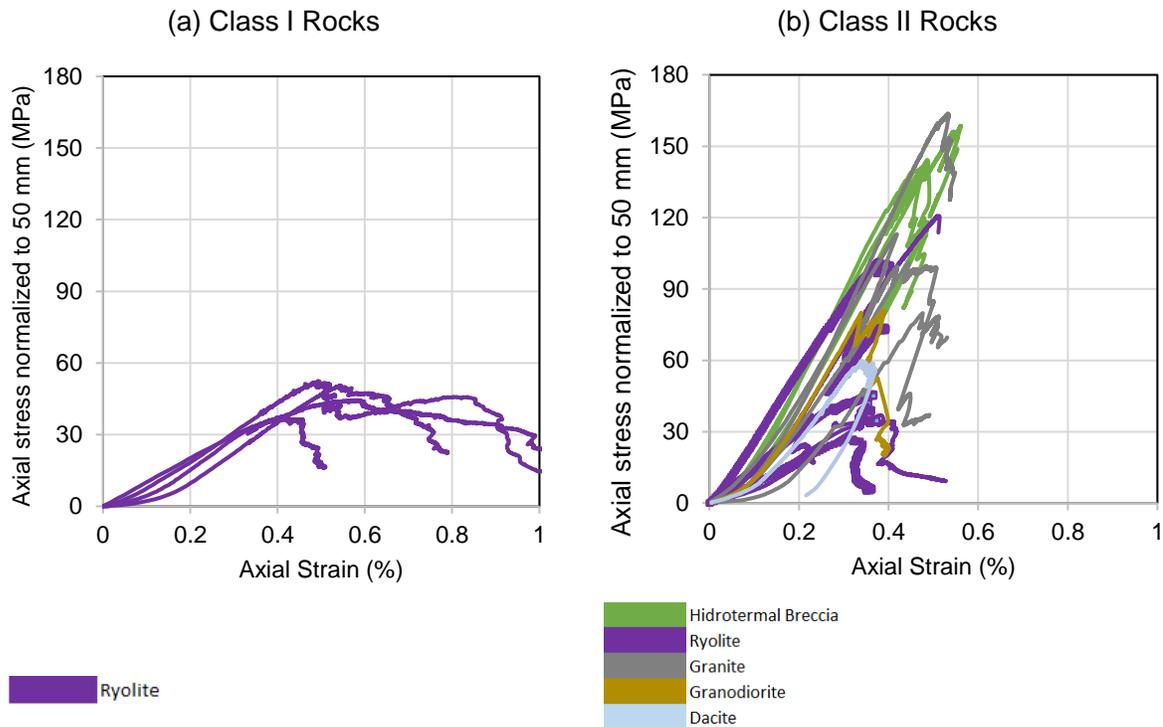


Figure 7: Stress-strain curve of (a) class I and (b) class II resulting tests, LVDT measurement.

6 EFFECT OF INDEX PROPERTIES AND SEMI-QUANTITATIVE GEOLOGICAL CHARACTERISTICS ON THE MECHANICAL BEHAVIOR

6.1 EFFECT OF PRE-PEAK PROPERTIES

Figure 8 presents the UCS as a function of porosity and density. As seen in Figure 8, the porosity is inversely related to the UCS, where rocks with porosities below 1% resist more than 100 MPa (Figure 8a). The granite samples presented the lowest strength of the group of low porosity samples, and it is believed to be due to the presence of alteration minerals such as epidote, actinolite and white micas, which together make up more than 40% of the rock. Granites and rhyolites showed a complete stress-strain curve, while the rest of the lithologies did not. Although some breccias successfully showed a post-peak behavior, their porosity was not recorded and, consequently, not included in this analysis. On the other hand, the density is directly related to UCS, where rocks with densities between 2.6 and 2.8 g/cm³ have the highest UCS. The lower density in rhyolite samples is related to their high porosity.

Even though results are highly influenced by rhyolites samples, porosity and density show similar tendencies compared to other studies found in literature. Figure 8a includes Eq. 5, proposed by Ündül (2016), that only shows significant differences in the intercept and similar slopes in the linear regression.

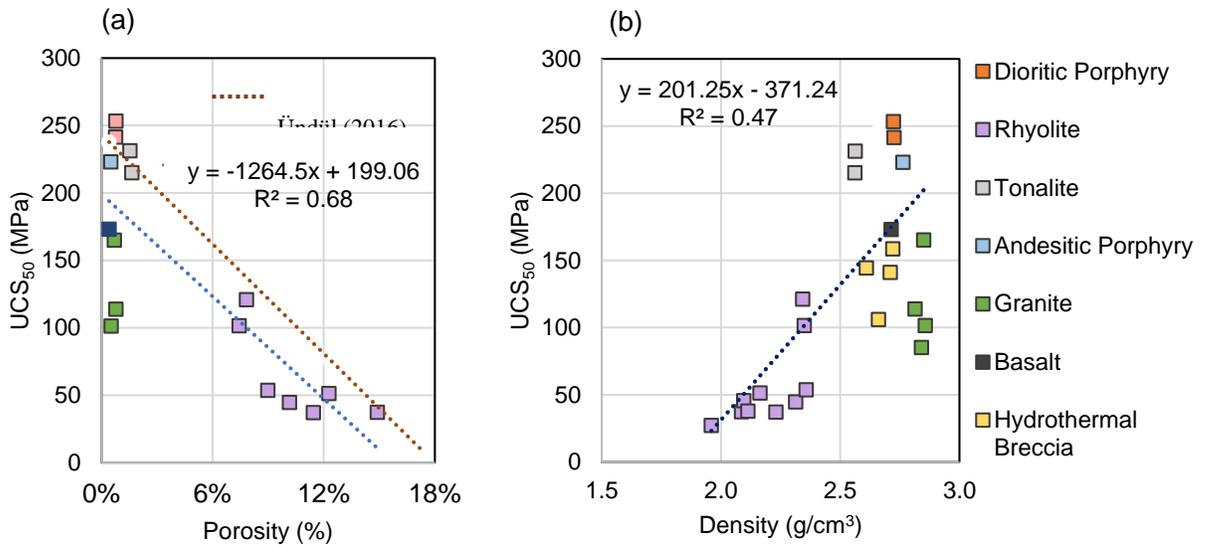


Figure 8: Sample porosity and density vs UCS

Figure 9 presents the UCS as a function of the dynamic Young's modulus, which is estimated from P and S wave velocities. The dynamic modulus is directly related to the UCS. It is important to note that results are valid for rocks with $E_{din} > 26$ (GPa). Results can be classified into three groups. Groups 1 and 2 include rocks where it was possible to capture the complete stress-strain curve. In fact, group 1 also includes tests in rhyolite samples that showed class I curves. Unfortunately, there are not enough class I curves to study further the effect of index properties in the post-peak response.

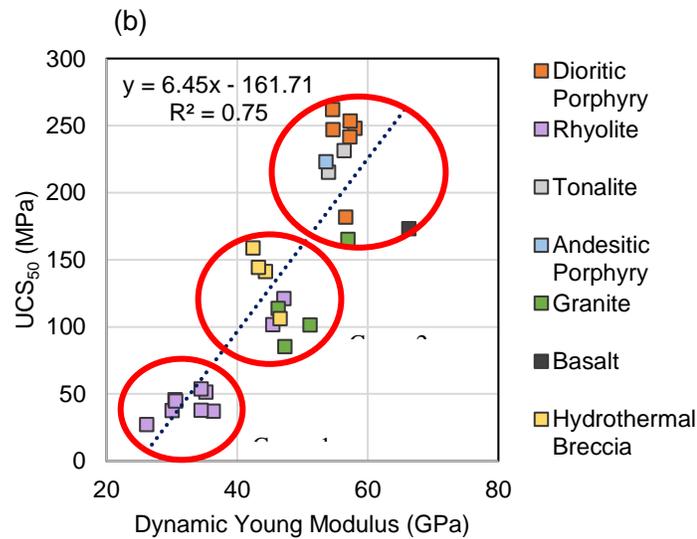


Figure 9: Dynamic Young's modulus vs UCS

From these results, models can be adjusted to predict UCS. The relevance of predicting UCS is that this parameter is required to define all the stages of a post-peak test, as previously presented in the methodology. Table 5 presents the models that have been adjusted based on the previous parameters. These models are organized according to their resulting R-squared value. In all cases, the model only includes parameters that are considered significant at a significance level of 0.05.

Table 5: Models for predicting Maximum strength (UCS in MPa), based on Dynamic Young Modulus (E_{dyn} in GPa), Young Modulus (E in GPa), Poisson ratio (ν), Porosity (n in %), and Density (ρ in g/cm^3). Variables in red are not significant (p -value >0.05), so they are not included in the model.

#	X1	X2	X3	Equation, UCS=	p-value global	R ²
1	E_{dyn}	ν	ρ	$-196.1 + 6.01 \cdot X_1 + 262 \cdot X_2$	<0.001	0.80
2	E_{dyn}	n	ρ	$-161.7 + 6.45 \cdot X_1$	<0.001	0.75
3	n	E		$199.1 - 1264.5 \cdot X_1$	<0.001	0.68

The best model includes the Dynamic Young's modulus and the Poisson ratio, and the other two models only include one parameter. Even though the first model shows a better R-squared value, it has the disadvantage it needs an elastic parameter that needs to be obtained from a destructive test. Figure 8 and Figure 9 present linear models that adjust the UCS based on index properties obtained through non-destructive tests. Dynamic Young's modulus shows the best adjustment with an R-squared value of 0.75 and porosity with an R-squared value of 0.68. Residual analysis does not show clusters or strong curvatures; but there is a large residual associated with the unique basalt sample tested. Statistical analysis shows no significant effect when the interaction between Dynamic Young's modulus and porosity. Therefore, the best model is presented in model 2 (Table 5), where the p-value of parameter E_{dyn} is < 0.005 . A summary is presented in Figure 10.

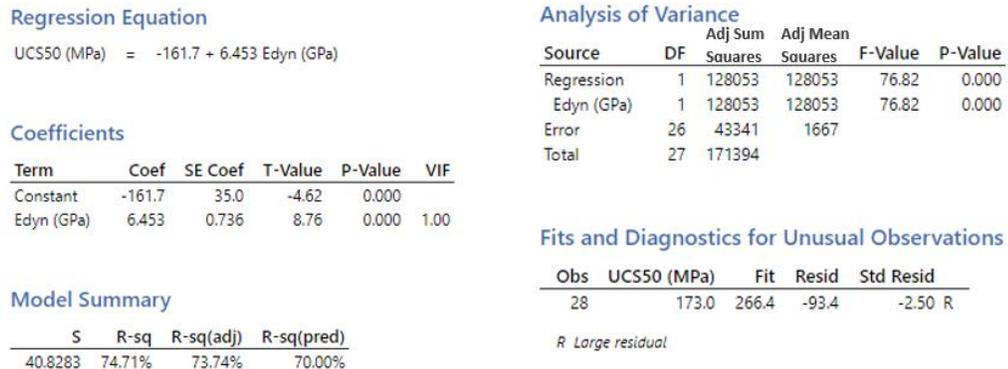


Figure 10: Model for predicting Maximum strength summary, obtained from *Minitab* software.

Figure 11 and Figure 12 present the UCS and Young's modulus as a function of the average grain size of mafic minerals and the percentage of mafic minerals, respectively. Results do not show a clear relationship between the UCS and geological characteristics, although a strong correlation between this property and strength is mentioned in the literature. The poor correlation might be explained by the scale used to measure the grain size, which might not be adequate to quantify this parameter in rocks with fine or coarse grains, and there is no single parameter that controls the behavior since the phenomenon is multivariable. Therefore, it might be necessary to use other techniques at microscopic scale. However, the percentage of mafic minerals can be useful to estimate the Young's modulus, but other variables are more relevant for this study. In fact, this study aims to find characteristics that help predict the maximum strength, and none of these characteristics is significant at $p < 0.001$ in the estimation of UCS.

The next section studies if there is an influence of these variables with post-peak properties.

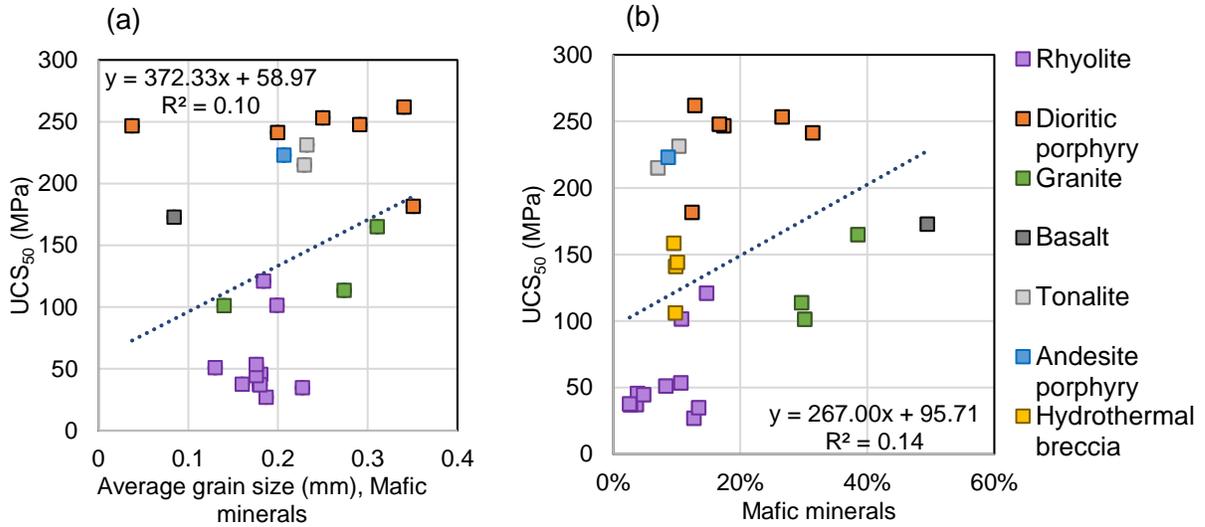


Figure 11: Average grain size of mafic minerals and percentage of mafic minerals vs UCS₅₀

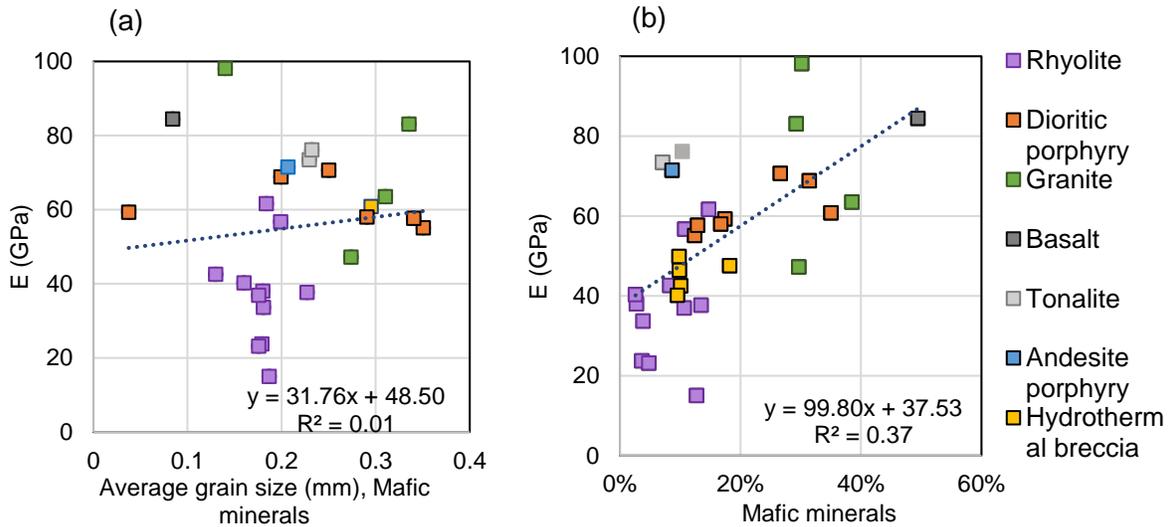


Figure 12: Average grain size of mafic minerals and percentage of mafic minerals vs E

6.2 EFFECT ON POST-PEAK PROPERTIES

A predictive model has been created to determine the likelihood of successfully capturing the post-peak region in UCS tests based on index and mechanical properties, using Minitab software. Since this problem can only have two possible outcomes, a logistic regression is used.

$$P(1) = \frac{e^{Yr}}{1+e^{Yr}} \quad \text{Eq. 7}$$

Where P (1) is the probability of capturing the post-peak region, and takes a value of 0 if it is not possible to capture the complete stress-strain curve and 1 if it is possible.

Table 6 presents the models that have been adjusted based on pre-peak properties that have been normalized. These models are organized according to their resulting R-squared value. In all cases, the model only includes parameters that are considered significant at a significance level of 0.05.

Table 6: Models for predicting the likelihood of capturing successfully the post-peak, based on normalized UCS₅₀ (UCS'), Young Modulus (E'), Poisson ratio (ν'), and Porosity (n'). Variables in yellow are not significant (p-value>0.05), but they are not included in the model since interaction are considered.

#	X ₁	X ₂	Equation, Y' =	global p-value	R ²
1	UCS'	ν'	15.9 - 59.6 * X ₁ + 30.6 * X ₂	Unreliable model	0.99
2	UCS'	n'	0.3 - 5.6 * X ₁ - 2.2 * X ₂	0.060	0.65
3	UCS'	n'	0.3 - 5.6 * X ₁ - 2.2 * X ₂ + 0.1 * X ₁ * X ₂	0.131	0.65
4	UCS'	E'	0.8 - 2.9 * X ₁ - 1.0 * X ₂ - 1.3 * X ₁ * X ₂	0.068	0.65
5	UCS'	E'	0.7 - 3.1 * X ₁ - 0.6 * X ₂	0.027	0.63
6	UCS'		0.6 - 3.1 * X₁	0.005	0.59
7	n'		0.8 + 2.1 * X ₁	0.008	0.35
8	E'		0.4 - 1.5 * X ₁	0.010	0.24
9	ν'		0.3 - 0.1 * X ₁	0.848	0.09

Results indicate that the two most significant factors predicting this probability are the UCS' and porosity (n') of the samples. By combining both variables, there is a slight improvement with respect to a model that only considers each of them independently. However, the p-value associated with porosity is greater than 0.05, the designated significance level, indicating that it is no longer considered statistically significant if combined with the UCS. The best model to estimate the probability for a test to show the post-peak region is presented in model 6 (Table 6), where the p-value of parameter E_{dyn} is < 0.001 and the UCS was normalized using a Mean: 137.45 MPa and Std.Dev: 78.23 MPa.

Figure 13 presents the ROC curve, which shows the performance of the UCS and the outcome according to Eq. 9., 28 test results are used to build the model using ten folds, so in each iteration, nine of the folds are used as training data (90% of the results) and the remaining fold are used as test data (10% of the results). This process is repeated ten times, with each fold serving as the test data once. In Figure 12, the training and 10-fold curves show similar areas under the curve (AUC) with a value greater than 0.9 in both cases. This indicates that the model is generalizing well and is good at classifying different data, allowing it to distinguish between two scenarios based on input data. This model predicts the outcome of 38 out of 51 tests (Table 7). Considering the results of the samples tested in this study, 24 out of 28 test results are estimated, resulting in an 86% accuracy rate. On the other hand and considering the samples from previous studies (Andesites IOCG, Granodiorites, Dacites), the model estimates 14 out of 23 test results resulting in a 63% accuracy rate.

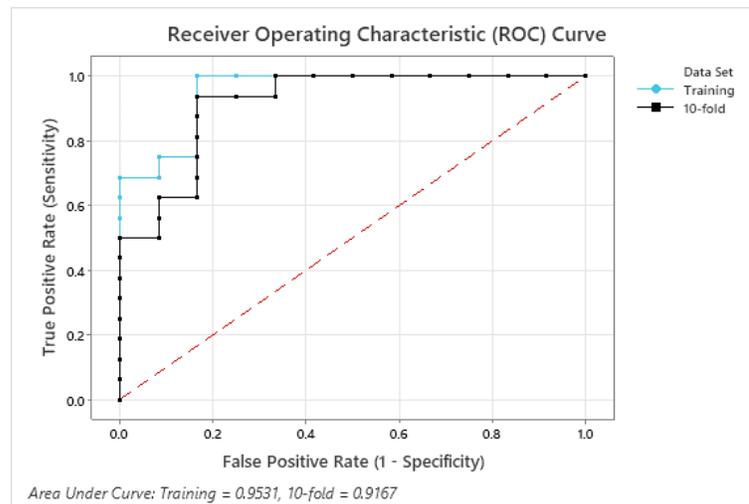


Figure 13: ROC curve related to model, obtained from Minitab software.

Table 7: Measured and estimated behavior: correctly predicted results are marked in green, and errors are marked in red.

		Estimated behaviour		
		Uncontrolled failure: 0	Post-peak region: 1	Total
Measured behaviour	Uncontrolled failure: 0	10	10	20
	Post-peak region: 1	3	28	31
	Total	13	38	51

Results indicate that the pre-peak region of the curve could be useful to estimate what will happen after exceeding the maximum strength. This model can be useful for the laboratory using the MES 300 press since it attempts to define if a brittle rock is susceptible to uncontrolled failure during UCS tests capturing the post-peak region, which is unknown before carrying out the tests. It is useful to have notions regarding the instrumentation to be used in each test since irreversible damage may occur in the LVDTs due to an uncontrolled failure. It is also useful to know in advance what to expect from each test, and define an appropriate strain rate accordingly. A test that is prone to fail in uncontrolled form has to be performed at the lowest strain rate allowed by the equipment, whereas higher strain rates can be used with caution if rocks are expected to exhibit controlled failure and all the conditions to capture the complete curve are met.

One consequence of anticipating the expected behaviour of the rock is related to the duration of the tests. For example, two rhyolite samples could be tested in a day, but only one tonalite sample in the same period of time. Regarding to failure cases in the presented model, are mainly from Dacites, Andesites IOCG and Granodiorites tested by Zúñiga (2020) and Velásquez (2022), and no exhaustive information is available to understand why the MES300 testing machine was not able to capture the complete stress-strain curve for those very brittle rocks, because until then only information related to mechanical properties and density was collected.

Finally, the last model aims to investigate the possibility of establishing an estimator for the drop modulus of brittle rocks based on index and mechanical properties. To achieve this, only samples in which tests exhibited post-peak behaviour classified as class II and that also have geological information available are considered: hydrothermal breccia, rhyolite, and granite tests. It is important to note that only 12 tests meet these conditions.

Table 8 presents the models that have been adjusted based on the index and pre-peak properties. These models are organized according to their resulting R-squared value. In all cases, the model only includes parameters that are considered significant at a significance level of 0.05. Models 7 and 8, and 9 and 10 are the same since including new parameters does not improve the model.

The best model to estimate the Drop Modulus (M) is presented in model 2 (Table 8). Figure 14a presents this model, which results in an R-squared value of 0.9. The adjusted best model is multivariable and includes three main effects and one interaction effect between the Young's Modulus and porosity. The interaction between these two parameters means that the effect of one parameter on the drop modulus depends on the value of the other parameter. In other words, the relationship between them is not independent. Figure 14b presents the interaction between Young modulus and porosity, which produces a reversal in the direction of their effects. For lower porosities, there is an increase in the drop modulus as Young's modulus increases. For higher porosities, there is a decrease in the drop modulus as Young's modulus increases. Residual analysis does not show clusters or strong curvatures; but there is a large residual associated with a granite sample that had an UCS of 80 MPa. However, to achieve a more robust estimation, it is imperative to test more rocks, which is limited due to the significant number of tests that resulted in uncontrolled failure as a result of testing brittle rocks. A summary is presented in Figure 15.

Table 8: Models for predicting the Drop Modulus (M), based on Dynamic Young Modulus (E_{dyn} in GPa), Young Modulus (E in GPa), Maximum strength normalized to 50 mm (UCS in MPa), Poisson ratio (ν), Porosity (n in %), and density (ρ in g/cm^3). Variables in red are not significant (p -value >0.05), so they are not included in the model.

#	X ₁	X ₂	X ₃	Equation, M=	p-value global	R ²
1	E	ρ		$97.1 - 3.4 X_1 - 20.3 X_2 + 1.3 X_1 * X_2$	<0.001	0.91
2	UCS	E	n	$11.9 + 0.1 X_1 + 0.4 X_2 + 314.0 X_3 - 9.7 X_2 * X_3$	<0.001	0.90
3	E_{dyn}	n	ρ	$-122.0 + 0.8 X_1 + 840 X_2 + 47.4 X_3 - 19.1 X_1 * X_2$	0.004	0.87
4	E	n		$39.5 + 0.3 X_1 + 133.0 X_2 - 8.1 X_1 * X_2$	0.002	0.84
5	n	ρ		$-178.4 + 1624 X_1 + 82.1 X_2 - 621 X_1 * X_2$	0.009	0.84
6	E_{dyn}	n		$5.7 + 1.0 X_1 + 549 X_2 - 18.2 X_1 * X_2$	0.0006	0.77
7	ρ	n		$-12.7 + 21.7 X_1$	0.016	0.46
8	ρ	E	UCS	$-12.7 + 21.7 X_1$	0.016	0.46
9	n	E	UCS	$49.9 - 131.0 X_1$	0.025	0.41
10	n	E		$49.9 - 131.0 X_1$	0.025	0.41
11	E			$28.4 + 0.3 * X_1$	0.044	0.35
12	UCS			$33.0 + 0.1 * X_1$	0.176	0.17

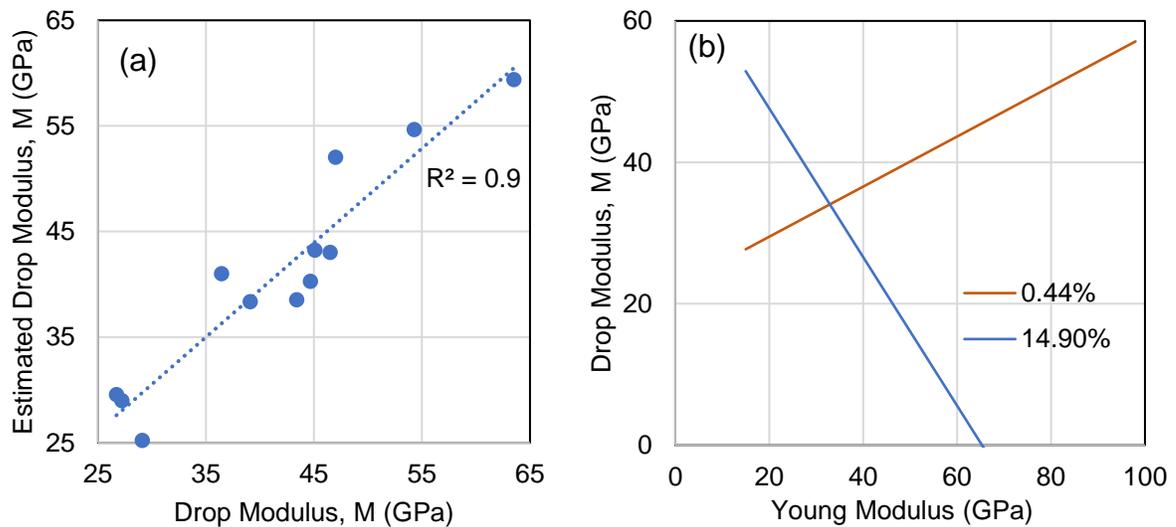


Figure 14: (a) Drop modulus estimation, (b) Effect of the interaction between porosity and Young's modulus on the Drop Modulus

Testing very brittle rocks under uniaxial compression to obtain the post-peak behaviour is challenging, mainly due to the small strain rates required to avoid violent failure. In this work, long testing time and the likelihood of not successfully capturing the post-peak after several hours created uncertainty since a minimum number of tests are required to obtain acceptable conclusions. Results indicate that non-destructive tests can be used to predict the UCS for each sample before testing and that pre-peak properties can be used to predict whether the tests can be successful, which can be used when planning future tests of similar rocks.

Regression Equation

$$M \text{ (GPa)} = 11.9 + 0.1195 \text{ UCS50 (MPa)} + 0.394 \text{ E (GPa)} + 314 \text{ Porosity} - 9.66 \text{ E (GPa)*Porosity}$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	11.9	14.6	0.82	0.439	
UCS50 (MPa)	0.1195	0.0565	2.11	0.072	4.75
E (GPa)	0.394	0.121	3.25	0.014	4.83
Porosity	314	103	3.05	0.019	18.24
E (GPa)*Porosity	-9.66	1.67	-5.79	0.001	3.87

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.31824	90.23%	84.64%	63.80%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj Sum		F-Value	P-Value
		Squares	Squares		
Regression	4	1205.11	301.28	16.16	0.001
UCS50 (MPa)	1	83.36	83.36	4.47	0.072
E (GPa)	1	197.07	197.07	10.57	0.014
Porosity	1	173.11	173.11	9.28	0.019
E (GPa)*Porosity	1	624.65	624.65	33.50	0.001
Error	7	130.53	18.65		
Total	11	1335.64			

Figure 15 Model for estimating the Drop Modulus (M), obtained from Minitab Software.

On the other hand, and given the difficulties in integrating microscopic analyses when doing a UCS test, image analysis could have been a good alternative. Results indicate that granite samples have less strength than basalt samples, which is expected from other studies that found that grain sizes are significant in defining the maximum strength. However, the technique used in this study could not differentiate finer grains, and consequently, grain size is not a significant parameter in any models adjusted. It is then recommended to refine the technique presented in this study and develop tools that allow for a more accurate estimation of grain size in pictures to identify each mineral grain accurately.

7 CONCLUSIONS

This research presents results from 28 new tests and considered 23 tests that were collected from previous analyses to study the influence of some geological characteristics, index and mechanical pre-peak properties on the post-peak behavior of brittle rocks. Results considered the development of three models with statistical significances of less than 0.05. The first model predicts the maximum strength in UCS tests in brittle rocks based on dynamic Young's modulus, which is aligned with literature in estimating UCS from index properties. Porosity also showed to be a good indicator estimating UCS, as reported by authors in the literature. In post-peak tests, deformation rates are relevant due to its influence in allowing to control the fracture pattern and obtaining complete stress-strain curves. Unfortunately, in this study, the smallest strain rate allow by LVDTs were not always enough to control failure in very brittle rocks. Then, the second model estimates if capturing the post-peak region is possible using the MES300 servo-assisted testing machine based on the maximum strength obtained from UCS tests. This model can be useful for taking preventive actions when studying very brittle rocks. The third model estimates the drop modulus based on the UCS, Young's modulus, and porosity. These results indicate that it is recommended to estimate index and mechanical properties to have a better interpretation of the behaviour of the rock before carrying out a post-peak test.

To improve the accuracy and reliability of these models it is essential to incorporate a larger number of tests in a wider number of lithologies. According to the suggested methods for testing rocks, at least five tests

are required. However, the realization of tests is mostly limited by the strain rate required when testing brittle rocks, which is the lowest admissible by the testing equipment used, and that results in long duration time. For this reason, it is necessary to deepen into better techniques to reduce the required time to perform each test without altering results. In addition, other limitations are related to the fact that instruments can be affected by uncontrolled failure, which needs to be avoided, and uncontrolled failures frequently occur in very brittle rocks. Therefore, further studies are needed to improve the methodology for testing high-strength brittle rocks.

These results could be used in future studies to explore how post-peak properties might influence the rockburst proneness in deep operations.

ACKNOWLEDGEMENTS

The Authors gratefully acknowledge financial support from the basal project AFB220002 of the Advanced Mining Technology Center (AMTC), University of Chile. Special thanks to Jorge Velásquez, David Veloz, Arturo García and Flavia Polanco for their support in carrying out destructive laboratory tests, Javiera Pérez and Fernando Reveco for helping with the geological analysis, and Javier Vallejos and Lorena Burgos for their comments. Special thanks to Miguel Vera for providing samples of two lithologies and granting access to conduct non-destructive tests at the Rock Mechanics laboratory of USACH.

REFERENCES

- Arzúa J.; Alejano L.R. & Walton, G.** Strength and dilation of jointed granite specimens in servo-controlled triaxial tests, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, Volume 69, Pages 93-104, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.04.001>
- Askaripour, M.; Saeidi, A.; Mercier-Langevin, P.; Rouleau, A.** A Review of Relationship between Texture Characteristic and Mechanical Properties of Rock. *Geotechnics 2022*, 2022, Volume 2, Pages 262-296. <https://doi.org/10.3390/geotechnics2010012>
- ASTM International**, D4531-15 Standard Test Methods for Bulk and Dry Density of Peat and Peat Products. West Conshohocken, Pennsylvania. <https://doi.org/10.1520/D4531-15>
- ASTM International**, C97/C97M-18 Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone. 2018. https://doi.org/10.1520/C0097_C0097M-18
- ASTM International**, D4543-19 Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances. 2019. <https://doi.org/10.1520/D4543-19>
- ASTM Standard**, E494-20 Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials by Comparative Pulse-Echo Method. 2020. <https://doi.org/10.1520/E0494-20>
- Aydin, A.** Upgraded ISRM Suggested Method for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique. *Rock Mech Rock Eng.* 47, 255–259 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0454-z>
- Bieniawski. Z.T. & Bernede, M.J.,** Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Volume 16, issue 2, 1979, Pages 138-140, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)91451-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)91451-7)
- Brace, W.F.** Dependence of fracture strength of rocks on grain size. *In Proceedings of the 4th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, University Park, PA, USA, 30 March–1 April 1961; Volume 76, Pages 99–103.
- Bukowska, M.** Post-peak failure modulus in problems of mining geo-mechanics. *Journal of Mining Science*. 2013. Vol 49, pp. 731–740 <https://doi.org/10.1134/S1062739149050067>
- Crowder, J. & Bawden, W.** Review of post-peak parameters and behaviour of rock masses: current trends and

research. Rocnews. 2004. **Eberhardt, E., Stimpson, B. & Stead, D.** Effects of Grain Size on the Initiation and Propagation Thresholds of Stress-Induced Brittle Fracture. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1999. Vol 32. Pages. 81-99. <https://doi.org/10.1007/s006030050026>.

Czinder, B., Török, Á. Strength and abrasive properties of andesite: relationships between strength parameters measured on cylindrical test specimens and micro-Deval values—a tool for durability assessment. *Bulletin of Engineering, Geology and Environment*. Vol 80, pages 8871–8889 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01983-9>

Entwisle, D.C., Hoobs, P.R.N., The relationships between effective porosity, uniaxial compressive strength and sonic velocity of intact Borrowdale Volcanic Group Core samples from Sellafeld. Springer Science and Business Media LLC. 2005. <https://doi.org/10.1007/s10706-004-2143-x>.

Fairhurst, C. E., & Hudson, J. A. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1999. 36(3), 279-289. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00006-6)

Gavasci, A.T. Textures of igneous rocks. In: Petrology. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Boston, MA. 1989. https://doi.org/10.1007/0-387-30845-8_240.

Higgins, M.D. Quantitative Textural Measurements in Igneous and Metamorphic Petrology; *Cambridge University Press*: Cambridge, UK, 2006; Pages. 7–9.

Khosravi, A. Effect of Pre-Peak Loading Condition on Post-Peak Behaviour of Brittle Rocks. Estimation and Validation of Post-Peak Behaviour of Hard Rocks, *École Polytechnique De Montréal*. 2016. Pages 121–141. <https://publications.polymtl.ca/2257/>

Mendes, F.M.; Aires-Barros, L.; Rodrigues, F.P. The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock masses. *Proceedings of the 1st ISRM Congress*, Lisbon, Portugal, 25 September–1 October 1966.

Onodera, T.F.; Asoka Kumara, H.M. Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* 1980, Vol. 22, Pages 173–177.

Paredes, I. Adaptación de metodología basada en la aplicación de cargas cíclicas para la obtención de curva completa esfuerzo-deformación. Memoria de título de Ingeniero Civil en Minas, Universidad de Santiago de Chile. 2022.

Saeidi, O. & Geranmayeh V., Gholami, R. & Torabi, S. A modified failure criterion for transversely isotropic rocks. *Geoscience Frontiers*. 2014. Vol 5. Pages 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.05.005>.

Salinas, E. Análisis de Propiedades Geotécnicas de Algunas Rocas Comunes en Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, 2018.

Tsidzi, K.E. Propagation characteristics of ultrasonic waves in foliated rocks. *Assoc. Eng. Geol.* 1997, Volume 56, Pages 103–113

Tugrul, A.; Zarif, I.H. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Eng. Geol.* 1999, Vol 51, Pages 303–317. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.001>.

Ündül, Ö. Assessment of mineralogical and petrographic factors affecting petro-physical properties, strength and cracking processes of volcanic rocks. *Eng. Geol.* 2016, Volume 210, Pages 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.001>

Velásquez, J. Estudio de la Influencia de la Litología en la Respuesta Post-Peak en Muestras de Origen Ígneo a Escala de Laboratorio. Memoria de título de geólogo, Universidad de Chile. 2022. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/187258>

Zúñiga, C., Vallejos, J.A., Suzuki, K., Orellana, LF., Arzúa, J. Scale effect on the post-peak behavior in uniaxial compression in dacite samples. *MassMin 2020- Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining. Virtual Conference*. 2020.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

Actualmente, dado que las operaciones se profundizan de forma paulatina la propensión a estallidos de roca ha ido en incremento, debido en parte a que, al existir una mayor acumulación de energía por parte de las rocas su liberación tiende a ser abrupta cuando se superan sus capacidades resistivas. En este trabajo se ha estudiado la influencia de algunas características geológicas y mecánicas pre-peak en el comportamiento post-peak de rocas frágiles, generando tres modelos: uno para predecir la resistencia máxima en rocas frágiles, una relación que puede ser utilizada para predecir fallas no controladas a escala de laboratorio, y una regresión para estimar el módulo de caída a partir de la resistencia máxima, el módulo de Young y la porosidad. Los resultados indican que es posible estimar a partir de propiedades índices la resistencia máxima esperable en una muestra, el cual es un parámetro de entrada para poder configurar un ensayo con obtención de curva completa. Por otro lado, los resultados también indican que es posible estimar el comportamiento post-peak de una muestra a partir de propiedades índice y mecánicas pre-peak.

Sin embargo, es necesario robustecer la información utilizada en este estudio mediante la realización de más ensayos de laboratorio en rocas resistentes y frágiles. Es importante destacar que contar con suficiente información se ve dificultado por la propia duración de ensayos, exposición de los instrumentos de medición de alta precisión ante fallas no controladas, y el hecho de que se producen fallas no controladas de roca en una gran parte de los ensayos sobre litologías comportamiento frágil a pesar de utilizar las recomendaciones para obtener la curva completa. Dado que en estudios anteriores se identificaron problemas en la realización de ensayos en rocas resistentes y frágiles, este estudio considera modificaciones en las velocidades recomendadas por la metodología propuesta por la ISRM puesto que las sugeridas son elevadas para el tipo de rocas incluidas en este estudio. Los ensayos se controlan por la tasa admisible más baja por la instrumentación disponible, con el objetivo de captar la curva esfuerzo deformación completa, siendo insuficiente en algunas ocasiones. Como referencia en base a los ensayos realizados en la prensa MES300 utilizada en este estudio junto a los palpadores con precisión 0.0001 mm, las rocas que tienen un UCS > 160 MPa son más propensas a fallar de manera no controlada que las muestras que resisten menos que ese valor. Es recomendable revisar otras recomendaciones que puedan mejorar la realización de los ensayos en rocas resistentes y frágiles.

Los resultados indican que las propiedades índices son útiles para estimar el comportamiento mecánico de una roca ensayada en laboratorio. La porosidad es una característica importante en el comportamiento pre-peak y post-peak. Es importante recalcar que la literatura hace mención de que en la medida que la porosidad aumenta, las propiedades mecánicas y la propensión a estallidos disminuyen. Los mismos hallazgos se han encontrado en este estudio, observando además que el módulo de caída se ve afectado por la porosidad. Se recomienda calcular la porosidad por método sumergido a todas las muestras que se desea ensayar, ya que es una característica relevante y su obtención no es compleja. Por otro lado, la velocidad de ondas y los módulos dinámicos también

son útiles para estimar la resistencia máxima, teniendo como ventaja que se obtienen de un método no destructivo. Por último, la densidad ha mostrado tener relación con las propiedades pre-peak al ser una variable significativa en los modelos ajustados.

Respecto a características de la geología que pueden cuantificarse en fotografías de muestras a escala de mano, los resultados indican que no es posible cuantificar el tamaño de granos con esta técnica porque las segregaciones realizadas muestran cúmulos de partículas en vez de granos individuales. Es recomendable utilizar mejores instrumentos y ahondar en este punto para tener una clasificación más detallada de acuerdo con cada mineral, ya que tampoco se ha logrado tener una segregación representativa entre especies máficas y félsicas. Lo anterior no se condice con la información bibliográfica que indica que el tamaño de grano es una característica relevante dentro del comportamiento mecánico de una roca. Es importante destacar que, en general y dada la cantidad de ensayos que se realizan comúnmente, es difícil que los análisis en microscopio se integren para caracterizar en detalle las muestras que se van a ensayar. Teniendo esto en mente, los análisis de fotografías podrían ser una alternativa viable pero aún no existe suficiente respaldo en la literatura sobre qué información puede rescatarse de análisis de imágenes a esta escala con la calidad de cámaras utilizadas, donde un píxel mide 0.1 mm.

Por último, la resistencia máxima es una variable significativa a la hora de estimar parámetros post-peak. Por ende, se hace necesario realizar ensayos UCS tradicionales para tener una noción de cómo se puede comportar la roca en el post-peak.

4.2. Recomendaciones

La principal recomendación de este estudio es realizar ensayos en distintas litologías. La mayor parte de las muestras ensayadas corresponden a una parte del espectro de rocas ígneas, pero aún queda un grupo pendiente por analizar. Sería importante contar con al menos cinco ensayos post-peak por cada tipo de litología para tener resultados más robustos, y en lo posible, crear una clasificación de propensión a fallas no controladas según litologías para tomar medidas preventivas al estudiar rocas consideradas como resistentes y muy frágiles.

Otro punto importante es que se ha trabajado con rocas de clase II, consideradas como muy frágiles, por lo que se recomienda a futuro expandir este estudio a rocas que exhiben comportamiento de clase I, y que necesitan la adición de energía por parte de la prensa al alcanzar la región post-peak. En este estudio solo cuatro de los ensayos realizados sobre muestras de riolita que pasaron a post-peak entregando curvas de clase I, y esto puede dar hincapié a la realización de estudios que tengan por objetivo analizar qué características geológicas y/o mecánicas inciden en esta respuesta.

A partir de este estudio se identificaron limitaciones a la hora de analizar granos individuales producto de la resolución de una cámara fotográfica. Al comparar fotografías con lo observado y medido en el microscopio, existe un espectro de elementos que no se aprecian en la fotografía debido a que la mayor parte de las muestras tiene granos finos que no se pueden individualizarse a simple vista. Al igual que las clasificaciones realizadas por geólogos expertos, utilizar imágenes

en muestras a escala de mano en algunos casos puede llevar incluso a clasificar y caracterizar rocas erróneamente. En futuros estudios, se sugiere potenciar el uso de cámaras con mejor resolución junto a configuraciones con focos de luz que permitan mantener un nivel de luz constante en toda la superficie de la muestra, y ahondar en técnicas de medición a partir del procesamiento de imágenes que puedan entregar información relevante a esta escala. Lo anterior puede servir para rescatar, por ejemplo, la composición mineral de mejor forma, variable que también ha mostrado ser significativa de acuerdo con varios estudios que emplean técnicas más sofisticadas. Se han realizado pruebas preliminares con una mejor cámara y el alcance de captura ha mejorado a 0.03 mm, pero se requiere un estudio posterior que detalle lo que es posible capturar con esta mejora.

Otra limitación detectada durante la realización de los ensayos tiene que ver con el sistema de sujeción que se utiliza en los palpadores LVDT que miden la deformación diametral, que corresponde a un disco metálico que rodea a la probeta y se ajusta mediante tres sujeciones hacia la muestra. Se sugiere diseñar un sistema cuyo armazón sea fijado a la prensa servo-asistida en vez de a la misma probeta, y que solamente los palpadores LVDT estén en contacto con la roca.

5. Bibliografía

- Abdullah RA, & Amin MFM (2008).** Verification of post failure behaviour of rock using closed-circuit servo-controlled testing machine. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*. Vol. 54, pp. 17–20.
- Alejano, L.R. & Alonso, E. (2005).** Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 42(4), pp. 481-507, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.01.003>.
- Alejano, L.R., Arzúa, J., Estévez-Ventosa, X, & Suikkanen, J. (2020).** Correcting indirect strain measurements in laboratory uniaxial compressive testing at various scales. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 79, 4975–4997. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01853-4>.
- Arzúa. J. & Alejano. L.R. (2013).** Dilation in granite during servo-controlled triaxial strength tests, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61, pp. 43-56, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.02.007>.
- Arzúa J., Alejano L.R. & Walton, G. (2014).** Strength and dilation of jointed granite specimens in servo-controlled triaxial tests, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 69, pp. 93-104, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.04.001>.
- Askaripour, M.; Saeidi, A. ; Mercier-Langevin, P.; Rouleau, A (2022).** A Review of Relationship between Texture Characteristic and Mechanical Properties of Rock. *Geotechnics*.2, pp. 262-296.
- ASTM International. (2014a).** *Standard Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Exploration 1*. <https://doi.org/10.1520/D2113-14>.
- ASTM International. (2014b).** *D7012-14 – Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*. <https://doi.org/10.1520/D7012-14>.
- ASTM International. (2019).** *D4543-19 – Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances*. <https://doi.org/10.1520/D4543-19>.
- Aubertin, M., & Gill, D. E. (1988).** Une méthodologie d'évaluation du potentiel de coups de terrain dans les mines d'Abitibi. *Colloque sur le Contrôle de Terrain (AMMQ)*, 47-77.
- Barton, N., & Choubey, V. (1977).** The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. 10 (1), pp. 1–54.
- Bieniawski, Z.T. (1967).** Mechanism of brittle fracture of rock: Part I—theory of the fracture process, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 4(4), pp. 395-406, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(67\)90030-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(67)90030-7).
- Bieniawski, Z.T. (1968).** In situ strength and deformation characteristics of coal, *Engineering Geology*, 2(5), pp. 325-340, [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(68\)90011-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(68)90011-2).
- Bieniawski Z.T. & Van Heerden W.L. (1975).** The significance of in situ tests on large rock specimens, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 12(4), pp. 101-113, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(75\)90004-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(75)90004-2).
- Brace, W. (1961).** Dependence of fracture strength of rocks on grain size. In Proceedings of the 4th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), University Park, Estados Unidos, 76, pp. 99–103.
- Brady, B. & Brown, E. (2006).** *Rock Mechanics For Underground Mining*. Chapman and Hall. 1993.
- Bukowska, M. (2013).** Post-peak failure modulus in problems of mining geo-mechanics. *Journal of Mining Science*.49, pp. 731–740 <https://doi.org/10.1134/S1062739149050067>
- Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y., Maejima, T., Morioka, H., Minami, M. (2004).** Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41(5), pp. 833-847, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.02.001>.

- Cai, M. Hou, P.Y. Zhang, X.W. & Feng, X.T. (2021).** Post-peak Stress–Strain curves of brittle hard rocks under axial-strain-controlled loading, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 147, 104921, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104921>.
- Carvajal Marambio, S. (2018).** *Estudio del proceso de ruptura en probetas de rocas sometidas a carga uniaxial mediante técnicas DIC*. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168457>
- Coca, I. (2020).** Correlación entre instrumentos de medición de deformación strain gauges y linear variable differential transducers (LVDTs). Memoria de título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad Católica del Norte.
- Cook, N. G. (1965).** A note on rockburst considered as a problem of stability. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 65(8), pp. 437–446. https://doi.org/10.10520/AJA0038223X_4914
- Cook, N. G., K Hodgson, K., Hojem J. (1971).** A 100-MN jacking system for testing coal pillars underground. *International Journal of Rock Mechanics, Mining, Science & Geomechanics*, Vol. 12, pp. 101-113.
- Cowie & Walton (2018).** The effect of mineralogical parameters on the mechanical properties of granitic rocks. *Engineering Geology*, 240, pp. 204-225, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.021>.
- Crowder, J. & Bawden, W. (2004)** Review of post-peak parameters and behaviour of rock masses: current trends and research.
- Eberhardt, E., Stimpson, B. & Stead, D. (1999).** Effects of Grain Size on the Initiation and Propagation Thresholds of Stress-Induced Brittle Fracture. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 32, pp. 81-99. <https://doi.org/10.1007/s006030050026>.
- Efimov, VP. (2018).** Tensile fracture of rocks under uniaxial compression. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. P. 134 012014
- Entwisle, D. & Hoobs, P. (2005),** The relationships between effective porosity, uniaxial compressive strength and sonic velocity of intact Borrowdale Volcanic Group Core samples from Sellafeld. *Geotechnical & Geological Engineering*, 23, pp. 793–809 <https://doi.org/10.1007/s10706-004-2143-x>
- Fairhurst, C. E., & Hudson, J. A. (1999).** Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression. *ISRM suggested methods (sms): second series*.
- Farmer, I. (1983).** Engineering Behaviour of Rocks. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5753-4>
- Fonseka, G., Murrelli, S. & Barnesj, P. (1985).** Scanning Electron Microscope and Emission Studies of Crack Development in Rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22(5), pp. 273–289. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)92060-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)92060-1)
- Francus, P (1998).** An image-analysis technique to measure grain-size variation in thin sections of soft clastic sediments. *Sedimentary Geology*, 121(3–4), pp. 289-298, [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00078-5).
- Gavasci, A.T (1989).** Textures of igneous rocks. In: *Petrology. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/0-387-30845-8_240
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2004).** *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson
- Hashiba, K., Okubo, S., & Fukui, K. (2006).** A new testing method for investigating the loading rate dependency of peak and residual rock strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(6), 894–904. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.12.005>
- Heidbach, O., M. Tingay, A. Barth, J. Reinecker, D. Kurfieb, and B. Müller (2008).** The World Stress Map database release. <https://doi.org/10.1594/GFZ.WSM.Rel2008>.
- Higgins, M. (2006)** Quantitative Textural Measurements in Igneous and Metamorphic Petrology; Cambridge University Press: Cambridge, UK; Pages. 7–9.
- Hoek, E. (1966).** Rock Mechanics-an introduction for the practical engineer Parts I, II and III. *Mining Magazine*.

- Hoek, E. & Brown, E. (1988).** The Hoek–Brown failure criterion -a 1988 update. In Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada.
- Hoek, E. & Brown, E.T. (1997).** Practical Estimates of Rock Mass Strength. *International Journal Rock Mechanics Mining Science*, 34, pp. 1165-1186.
- Hou, P.Y. & Cai, M. (2022).** Post-Peak Stress–Strain Curves of Brittle Hard Rocks Under Different Loading Environment System Stiffness. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02839-2>
- Hou, P.Y., Cai, M., Zhang, X.W, Feng X.T. (2021).** Post-peak Stress–Strain Curves of Brittle Rocks Under Axial- and Lateral-Strain-Controlled Loadings. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55, pp. 855–884. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02684-9>
- Hudson, J.A., Brown, E.T., & Fairhurst, C. (1971).** Shape of the complete stress–strain curve for rock. In Proc. Of the 13th Symposium on rock mechanics.
- Hudson, J. A., Crouch, S. L., & Fairhurst, C. (1972).** Soft, stiff and servo-controlled testing machines: a review with reference to rock failure. *Engineering Geology*, 6(3), 155–189. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(72\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(72)90001-4)
- Hudson, J.A. & Harrison, J.P, (1997).** Engineering Rock Mechanics. An Introduction to the Principles. <https://doi.org/10.1016/B978-008043864-1/50007-0>
- Idrovo, P. X., & Quintanilla, L. M. (2010).** *Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas.* <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4482/1/UPS-CT001920.pdf>
- ISRM (2013).** Suggested method for determining sound velocity by ultrasonic pulse transmission technique. Lisboa: ISRM International 2013. International standard ISRM.
- Khosravi, A. (2016).** Effect of Pre-Peak Loading Condition on Post-Peak Behaviour of Brittle Rocks. Estimation and Validation of Post-Peak Behaviour of Hard Rocks. Tesis de doctorado, École Polytechnique De Montréal. <https://publications.polymtl.ca/2257/>
- Keneti, A., & Sainsbury, B.A. (2018).** *Review of published rockburst events and their contributing factors.* *Engineering Geology*, 246, 361–373. <https://doi.org/10.1016/J.ENGCEO.2018.10.005>
- Komurlu, E. (2018).** Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression. *International Journal of Geo-Engineering*. 9. 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0085-z>.
- Krasilova N.S. Ladygin V.M. & Golodkovskaia, G.A. (1975).** *Factors controlling solid rock strength.* Bulletin of the International Association of Engineering Geology.
- Krsmanovic, D., (1967).** Initial and residual shear strength of hard rocks. *Geotechnique* 17(2), 145–160.
- Kumar, R., Sharma, K. G., & Varadarajan, A. (2016).** Effect of confining pressure on post peak behaviour of igneous rock. *Indian Geotechnical Conference IGC 2016*.
- Martin, C. D., & Chandler, N. A. (1994).** The Progressive Fracture of Lac du Bonnet Granite. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Geomechanics.*, Vol. 31(6), 643–659.
- Mendes, F.M.; Aires-Barros, L. & Rodrigues, F.P. (1966)** The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock masses. In Proceedings of the 1st ISRM Congress, Lisbon, Portugal.
- Muñoz, H., Taheri, A., & Chanda, E. K. (2016).** Pre-Peak and Post-Peak Rock Strain Characteristics During Uniaxial Compression by 3D Digital Image Correlation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(7), 2541–2554. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0935-y>
- Neyman, B., Szczowka, Z., Zuberek, W. (1972).** *Effective methods for fighting rock burst in Polish collieries.* Proc. 5th Int. Strata Control Conf., 23.1-23.9.

- Okubo, S. & Nishimatsu, Y. (1985).** Uniaxial compression testing using a linear combination of stress and strain as the control variable, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 22(5), pp. 323-330, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)92064-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)92064-9).
- Okubo, S. Nishimatsu, Y. & He, C. (1990).** Loading rate dependence of class II rock behaviour in uniaxial and triaxial compression tests—an application of a proposed new control method, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 27(6), pp. 559-562, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)91007-T](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)91007-T).
- Palchik, V. & Hatzor, YH. (2004).** The Influence of Porosity on Tensile and Compressive Strength of Porous Chalks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 37. 331-341. <https://doi.org/10.1007/s00603-003-0020-1>.
- Pardo, C. (2015).** Back analysis of intensive rock mass damage at the El Teniente mine. *Thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy of Curtin University*.
- Paredes, I. (2022).** Adaptación de metodología basada en la aplicación de cargas cíclicas para la obtención de curva completa esfuerzo-deformación. Memoria de título de Ingeniero Civil en Minas, Universidad de Santiago de Chile.
- Pollak, D., & Vallejos, J. (2018).** Consideraciones para ensayos de compresión uniaxial con medición de comportamiento post-peak y resultados preliminares. www.umining2018.com
- Přikryl (2001).** Some microstructural aspects of strength variation in rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(5), pp. 671-682, <https://doi.org/10.1016/S1365-1609>
- Rodríguez Dono, A. (2012).** Comportamiento post-rotura de los macizos rocosos y su aplicación al diseño de excavaciones subterráneas. Editorial académica española.
- Rummel, F., & Fairhurst, C. (1970).** Determination of the Post-Failure Behavior of Brittle Rock Using a Servo-Controlled Testing Machine. In *Rock Mechanics* (Vol. 2).
- Saeidi, O., Geranmayeh V., Gholami, R. & Torabi, S. (2014)** A modified failure criterion for transversely isotropic rocks. *Geoscience Frontiers*. 2014. 5, pp. 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.05.005>.
- Sano, O. Terada, M. Ehara, S. (1982).** A study on the time-dependent microfracturing and strength of Oshima granite, *Tectonophysics*, 84(2–4), pp. 343-362, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(82\)90167-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(82)90167-6).
- Shirani Faradonbeh, R., Taheri, A. & Karakus, M. (2021).** Post-peak behaviour of rocks under cyclic loading using a double-criteria damage-controlled test method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. 80, pp. 1713–1727. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02035-y>
- Taheri, A. & Chanda, E. (2013).** Effects of cyclic loading on pre-peak and post-peak behaviour of a brittle rock. *First International Conference on Rock Dynamics and Applications*.
- Taheri, A. & Muñoz, H. (2017).** Post-peak rock strain localization during monotonic and cyclic loading. *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Tugrul, A. & Zarif, I.H. (1999).** Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51, pp. 303–317.
- Tutluoglu, L., Oge, İ. F., & Karpuz, C. (2014).** Relationship Between Pre-failure and Post-failure Mechanical Properties of Rock Material of Different Origin. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(1), 121–141. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0549-1>
- Ündül, Ö. (2016).** Assessment of mineralogical and petrographic factors affecting petro-physical properties, strength and cracking processes of volcanic rocks. *Engineering Geology*. 210, pp. 10–22.
- Velásquez, J. (2022).** *Estudio de la Influencia de la Litología en la Respuesta Post-Peak en Muestras de Origen Ígneo a Escala de Laboratorio*. Memoria de título de geólogo, Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/187258>

- Vivallo, W. & Henríquez, F. (1998).** Génesis común de los yacimientos estratoligados y vetiformes de cobre del jurásico medio a superior en la cordillera de la costa, Región de Antofagasta, Chile. *Andean Geology*. Vol. 25(2), pp. 199-228.
- Vutukuri, V., Lama, R. & Saluja, S. (1974).** Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Testing Techniques and Results; *Trans Technical Publications*: Clausthal, Germany, p. 280.
- Walton, G., Arzúa, J., & Alejano, L.R. (2014).** A Laboratory-Testing-Based Study on the Strength, Deformability, and Dilatancy of Carbonate Rocks at Low Confinement. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. 48, pp. 941–958. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0631-8>
- Wawersik, W. R., & Fairhurst, C. (1970).** A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 7. pp. 561-564. Porgamou Press. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0148-9062\(70\)90007-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0148-9062(70)90007-0)
- Wong, L.N.Y., Meng, F., Guo, T & Shi X. (2020).** The Role of Load Control Modes in Determination of Mechanical Properties of Granite. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Vol. 53, pp. 539–552. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01924-3>
- Ye, Y., Tang, S., & Xi, Z. (2020).** Brittleness Evaluation in Shale Gas Reservoirs and Its Influence on Fracability. *Energies*, 13(2), 388. <https://doi.org/10.3390/en13020388>
- Zhang, H., & Li, C. C. (2019).** Effects of Confining Stress on the Post-Peak Behaviour and Fracture Angle of Fauske Marble and Iddefjord Granite. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(5), 1377–1385. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1695-7>
- Zhao X.G. & Cai, M. (2010).** A mobilized dilation angle model for rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(3), pp. 368-384, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.12.007>.
- Zúñiga, C., Vallejos, J.A., Suzuki, K., Orellana, L.F., Arzúa, J. (2020).** Scale effect on the post-peak behavior in uniaxial compression in dacite samples. *MassMin 2020- Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining*. Virtual Conference.

ANEXOS

ANEXO A: Curriculum Vitae - Sergio Flores Currutea



ACERCA DE MÍ

Persona proactiva, responsable, propositiva y comprometida, Domino el lenguaje de programación Python y trabajo como consultor estratégico para minería. Me desenvuelvo de buena forma dentro de equipos y poseo capacidad de liderazgo.

DATOS DE CONTACTO

 segio.floresc@outlook.cl

 Sergio Flores Currutea

EDUCACIÓN

Universidad de Chile

Magister en Minería, 2023

Tema de Tesis: Influencia de Propiedades Índice y características geológicas semi-cuantitativas en el Comportamiento Post-Peak de Rocas Frágiles

Universidad de Santiago de Chile

Ingeniero Civil en Minas, 2022

Lic. en Ciencias de la Ingeniería, 2022
Tema de Tesis: Digitalización de Ensayo de Corte Directo para el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad de Santiago de Chile

PUBLICACIONES

Flores, S., Suzuki, K. Lois-Morales, P. (2023). Influence of index properties and semi-quantitative geological characteristics of brittle rocks on their post-peak behavior, *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Enviado.

Paredes, I., Flores, S., Suzuki, K. (2023). Estudio de Laboratorio para Disminuir Tiempo de Obtención de Tramo Post - Peak. *1° Congreso Chileno de Mecánica de Rocas*. Enviado.

REFERENCIAS

Miguel Vera Barrientos

MSc, Profesor en Universidad de Santiago
miguel.vera@usach.cl

Kimie Suzuki Morales

PhD, Profesor en Universidad de Chile
Investigadora Asociada en AMTC
ksuzuki@uchile.cl

SERGIO FLORES CURRUTEA

CONSULTOR ASOCIADO EN BAIN
INGENIERO CIVIL EN MINAS
MAGISTER EN MINERÍA

EXPERIENCIA

CARRERA PROFESIONAL

Bain & Company, Abr 2023 - Actualidad

Mining Associate Consultant, en una de las empresas líderes de consultoría estratégica a nivel mundial

DESARROLLOS DE SOFTWARE

Advanced Mining Technology Center (AMTC),

Mar 2022 - Dic 2022

Software "RoMeclab" para procesar información de ensayos UCS, triaxiales y post-peak

Centro de Geomecánica USACH (CGEM),

Mar 2021 - Dic 2021

Software "ECD" para digitalizar ensayo Direct Shear Test

AYUDANTÍAS

Universidad de Chile, Mar-2022 - Jun 2022

Profesor Auxiliar en el primer módulo de Postítulo en Geomecánica Aplicada al Diseño Minero: Fundamentos de Mecánica de Rocas

Universidad de Santiago, Mar 2019 - Dic 2019

Ayudante del laboratorio de mecánica de rocas

OTRAS EXPERIENCIAS

Gira Profesional Minera USACH, Oct 2022.

Gira profesional en el norte de Chile, visitando distintas faenas de la mediana y gran minería

Profesor particular, 2014 - 2020

Clases de matemática y ciencias físicas para alumnos de enseñanza media, en jornadas libres.

IDIOMAS / CURSOS

Idiomas

Inglés: oral Intermedio, escrito avanzado
Español nativo

Cursos

Python Avanzado, LinkedIn Learning, 2023.
Bases de Datos SQL, Udemy, 2022- presente
Machine Learning, Stanford Online through Coursera, 2020

ANEXO B: Certificado de envío

Rock Mechanics and Rock Engineering

Influence of index properties and semi-quantitative geological characteristics of brittle rocks on their post-peak behavior

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:		
Full Title:	Influence of index properties and semi-quantitative geological characteristics of brittle rocks on their post-peak behavior	
Article Type:	Original Paper	
Keywords:	Brittle Rocks; Post-peak; Quantitative geology; UCS test	
Manuscript Classifications:	100.020: Laboratory testing; 100.060: Mechanical properties	
Corresponding Author:	Kímie Suzuki Morales, PhD Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Santiago, Región Metropolitana CHILE	
Corresponding Author Secondary Information:		
Corresponding Author's Institution:	Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas	
Corresponding Author's Secondary Institution:		
First Author:	Sergio Flores	
First Author Secondary Information:		
Order of Authors:	Sergio Flores Kímie Suzuki Morales, PhD Pía Lois-Morales, PhD	
Order of Authors Secondary Information:		
Funding Information:	Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (basal project AFB220002)	Not applicable
Abstract:	<p>The deepening of mining operations involves new challenges regarding geomechanical events, where it is necessary to anticipate and take actions to avoid damages that can be caused by working in a high-stress environment such as rock bursts. For this, uniaxial compression tests with complete stress-strain curves allow a better understanding of rock behavior under high stress situations. A disadvantage is that the outcome of the tests is unknown, that is, whether the post-peak region can be captured on a laboratory scale, which depends, among other things, on the fragility of the sample and its own characteristics. This study looks for some relationships between mechanical and geological variables to predict the occurrence of violent rockbursts in the laboratory, and estimate drop modulus from the same parameters. The procedure applied in the 28 UCS tests carried out on different lithologies is based on the recommendation of the ISRM and previous studies, while for the geological analysis, photography techniques have been used. The results include correlations between the index and mechanical properties and the ability to estimate uncontrolled ruptures from maximum strength. Also, a multivariable model was established to estimate the drop module considering mechanical properties and porosity. As for the geological analyses at the scale of photography, there is no conclusive information, so it is recommended to continue research to expand the scope of this or similar techniques. Additionally, it will be useful to improve the models and broaden the number of rocks analyzed in the study to have more robust information compared to what is currently available.</p>	

ANEXO C: Resultados de Ensayos UCS con Obtención de Curva Completa Realizados

El siguiente anexo presenta las fichas que describen la geometría de las muestras, las propiedades mecánicas y las curvas esfuerzo deformación. La información sobre las muestras de Granodiorita y Andesitas IOCG se pueden encontrar en el estudio de Velásquez (2022).

A continuación, se presenta la descripción de las muestras por cada una de las siete litologías ensayadas: granito (GR), basalto (BA), pórfido andesítico (PAN), brecha hidrotermal (BR), pórfido diorítico (PDIO), riolita (RIO) y tonalita (TON). Luego, se presentan las fichas para cada ensayo. Las muestras que tuvieron un modo de falla Tipo A rompieron solo por matriz, mientras que las que presentan el modo de falla B tuvieron una rotura mixta, que combina matriz y estructuras. Los modos de falla tipo C (rotura por varias vetillas) o D (rotura por una vetilla) no han sido considerados dentro del análisis de resultados, pero si se presentan las fichas de dichos ensayos. Las muestras PAN05, DIO08, TON04 y TON05 presentaron falla tipo D.

Dentro de los gráficos obtenidos, se ha denotado con ‘SG’ a la medición registrada por strain gauges, mientras que los palpadores LVDT corresponden a ‘PP’. En dos muestras de basalto (BA05, BA08) la medición “PP” corresponde a una realizada con el sensor incorporado en la prensa servo asistida MES300, que posee menos sensibilidad que los palpadores LVDT y provoca que el gráfico de la curva esfuerzo-deformación se vea levemente escalonado. Se optó por no utilizar LVDT en estos casos en un intento por protegerlos ante un eventual estallido por las propias características de la litología, y el resultado de esa medición no ha sido utilizado puesto que no se ha logrado captar la región post-peak para ninguna muestra de la litología Basalto.

En la mayoría de los casos se presenta la curva axial, diametral y volumétrica medidas con strain gauges y palpadores. Sin embargo, para los ensayos que han resultado en estallidos se ha omitido esta última.

También hubo ocasiones en donde la medición de Strain Gauges presentó datos anómalos, con saltos bruscos que indican expansión en vez de contracción. Para solucionarlo, se asumió que los movimientos fueron contractivos para poder corregir las curvas, lo cual en ningún caso ha influenciado la medición de módulos elásticos. En los gráficos de las muestras GR06 y BR02 se presenta la leyenda “SG Corregido” haciendo alusión a este problema.

C.1. Litología: Granito (GR)

Descripción: Roca holocristalina con tamaño relativo de cristales inequigranular, con textura fanerítica y alteración pervasiva. Tamaño fino a medio en cuanto a sus cristales, siendo estos hipidiomorfos. En general se observa una estructura homogénea, con una foliación que oscila entre sub horizontal a 45° entre el espectro de especímenes analizados.

En cuanto a su composición mineralógica, se observan altos contenidos de cuarzo (50%), con un 40% de cristales pertenecientes a actinolitas y biotitas. Existen pequeños contenidos de

plagioclasas, pirita y algunos cristales máficos residuales. En general las muestras no presentan vetillas observables, y la foliación se evidencia en la variación en los resultados de velocidades de ondas.

Se describen los cuatro ensayos UCS con obtención de post-peak: GR03 (**Figura C. 1**), GR05 (**Figura C. 2**), GR06 (**Figura C. 3**) y GR07 (**Figura C. 4**).

C.2. Litologías de Basalto (BA)

Descripción: Roca hipocristalina con tamaño relativo de cristales inequiangular, textura porfírica y alteración pervasiva. Tamaño fino a medio en cuanto a sus cristales, siendo estos hipidiomorfos. En general se observa una estructura masiva de carácter isótropa para el espectro de especímenes analizados.

En cuanto a su composición mineralógica, se observan altos contenidos de calcita (40%), con un 45% de cristales pertenecientes a actinolitas y epidota. Existen contenidos de cuarzo, plagioclasas y piroxenos. También, en algunas muestras se observan vetillas pequeñas con grosores de 0.01 a 1 mm aproximadamente.

Se describen los dos ensayos UCS con obtención de post-peak BA05 (**Figura C. 5**) y BA08 (**Figura C. 6**).

C.3. Litología Pórfido Andesítico (PAN)

No se cuenta con descripción a escala de mano para esta litología. Se describen los dos ensayos UCS con obtención de post-peak PAN04 (**Figura C. 7**) y PAN05 (**Figura C. 8**).

C.4 Litología Brecha Hidrotermal (BR)

Descripción mineralógica: Brecha Hidrotermal de matriz-soportada que se encuentran distribuidos homogéneamente en la roca con fragmentos correspondientes a fragmentos líticos y en menor proporción a cristales de cuarzo. Los fragmentos líticos varían su tamaño entre 0.1 cm a 6 cm de diámetro, conteniendo clastos subredondeados como angulosos de origen ígneo con composiciones más bien félsica, algunos de estos presentan mineralización de sulfuros primarios en su interior. En cuanto a su matriz, parece estar compuesta de turmalina con dureza entre 6 – 7 en la escala de Mohs, no presenta magnetismo y tampoco efervesce al contacto con HCl.

En cuanto a la alteración, se observan clastos con alteración potásica gradando a propilítica que se encuentran mineralizadas con pirita y calcopirita. A parte de los sulfuros descritos anteriormente, se observa pirita diseminada en la roca y rellenando cavidades milimétricas y presencia de clastos félsicos que se encuentran rodeados por calcosina. Finalmente, no se observan vetillas.

Se describen los cinco ensayos UCS con obtención de post-peak. BR01 (**Figura C. 9**), BR03 (**Figura C. 10**), BR04 (**Figura C. 11**), BR05 (**Figura C. 12**) y BR06 (**Figura C. 13**).

C.5 Litología Pórfido Diorítico (PDIO)

Descripción mineralógica: Roca ígnea intrusiva holocristalina, equigranular que contiene una textura fanerítica. Algunos de los cristales tienen desarrolladas sus caras por lo que se clasifica como subhedral, además su estructura es homogénea y no presenta orientación preferencial de los cristales por lo cual se clasifica como isótropa, teniendo un índice de color leucocrático, es decir con un índice de máficos menor al 35%.

La mineralogía corresponde a Plagioclasa (40%), Feldespato potásico (16%), Magnetita (20%), biotita (12%). Esta mineralogía primaria pareciera tener alteración hidrotermal asociada a epidota (20%), con menor proporción de pirita (4%) y calcopirita (4%). La epidota se encuentra afectando selectivamente a las plagioclasas y la mineralización de pirita se observa diseminada junto a la magnetita. Presenta una estructura sub vertical en uno de los extremos de la muestra. Según lo descrito anteriormente la roca se considera una Diorita fanerítica de Biotita.

Se describen los siete ensayos UCS con obtención de post-peak: PDIO01 (**Figura C. 14**), PDIO02 (**Figura C. 15**), PDIO08 (**Figura C. 16**), PDIO09 (**Figura C. 17**), PDIO10 (**Figura C. 18**), PDIO12 (**Figura C. 19**), y PDIO14 (**Figura C. 20**).

C.6 Litologías de Riolita (RIO)

Descripción: Roca hipocristalina con tamaño relativo de cristales inequigranular y textura fanerítica. Tamaño fino a medio en cuanto a sus cristales, siendo estos hipidiomorfos. En general se observa una estructura homogénea e isótropa.

En cuanto a su composición mineralógica, el feldespato potásico es abundante, observándose fenocristales de cuarzo inmersos en la matriz. En general no se observan plagioclasas a escala de mano. Se observan óxidos de hierro de forma diseminada en las caras de los especímenes.

Se describen los once ensayos UCS con obtención de post-peak: RIO M40-1 (**Figura C. 21**), RIO M40-2 (**Figura C. 22**), RIO M41-1 (**Figura C. 23**), RIO M42-2 (**Figura C. 24**), RIO M43-1 (**Figura C. 25**), RIO47-1 (**Figura C. 26**), RIO M47-2 (**Figura C. 27**), RIO M48-1 (**Figura C. 28**), RIO M49-1 (**Figura C. 29**), RIO M49-2 (**Figura C. 30**) y RIO M50-1 (**Figura C. 31**).

C.7 Litología Tonalita (TN)

No se cuenta con descripción a escala de mano para esta litología. Se describen los cuatro ensayos UCS con obtención de post-peak TN04 (**Figura C. 32**), TN05 (**Figura C. 33**), TN07 (**Figura C. 34**) y TN08 (**Figura C. 35**).

- GR03:

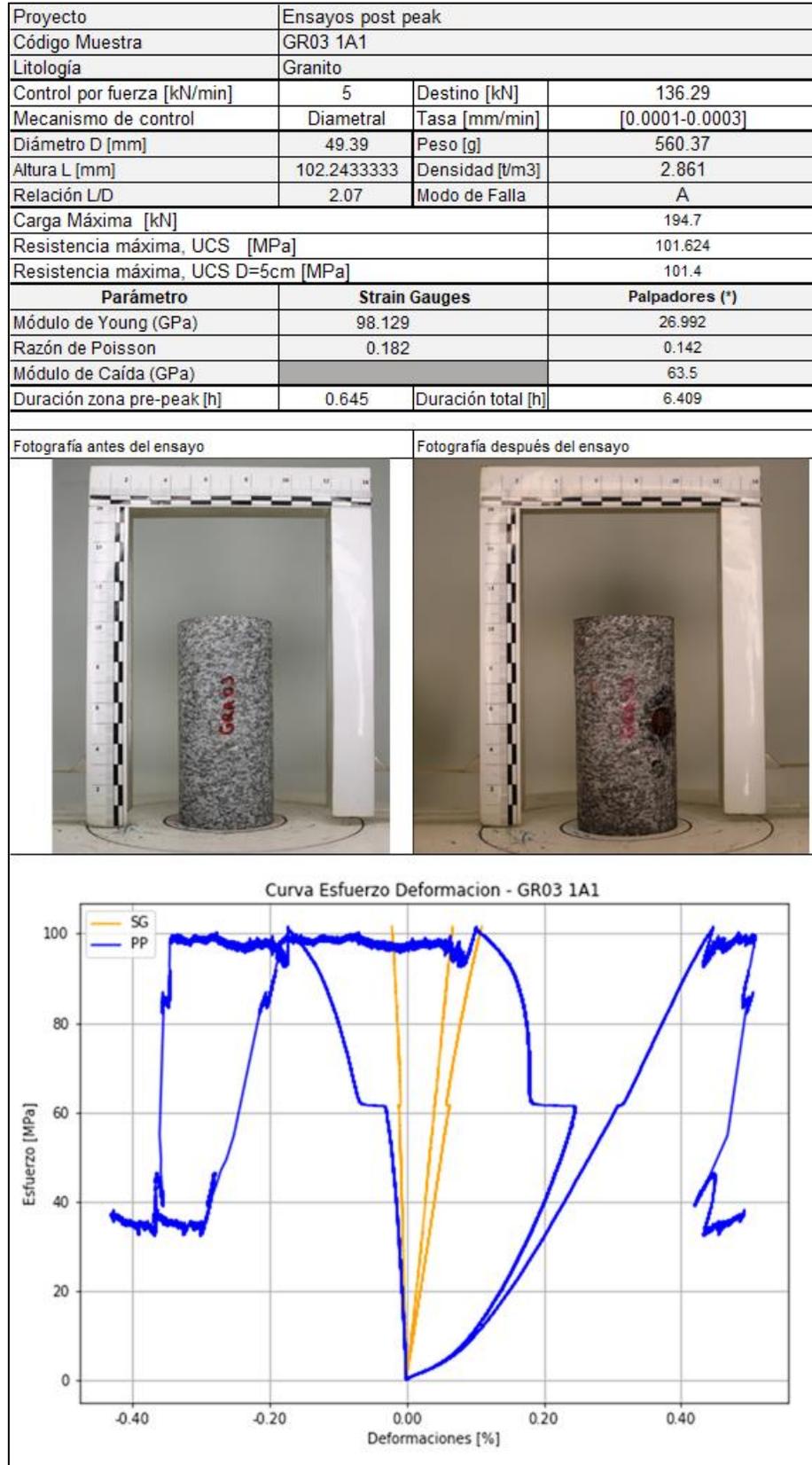


Figura C. 1: Resultados de ensayo en muestra GR03.

- GR05:

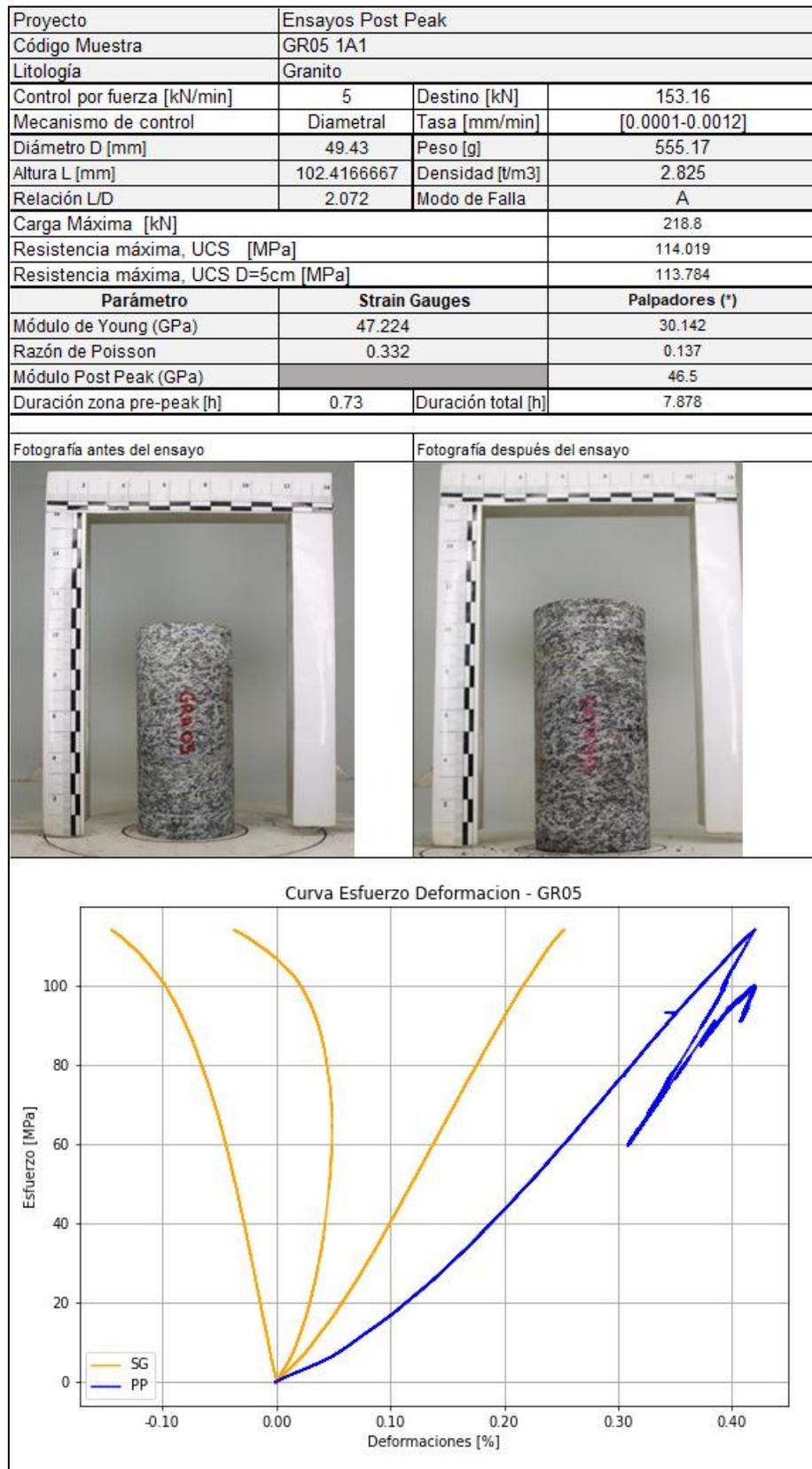


Figura C. 2: Resultados de ensayo en muestra GR05.

- GR06:

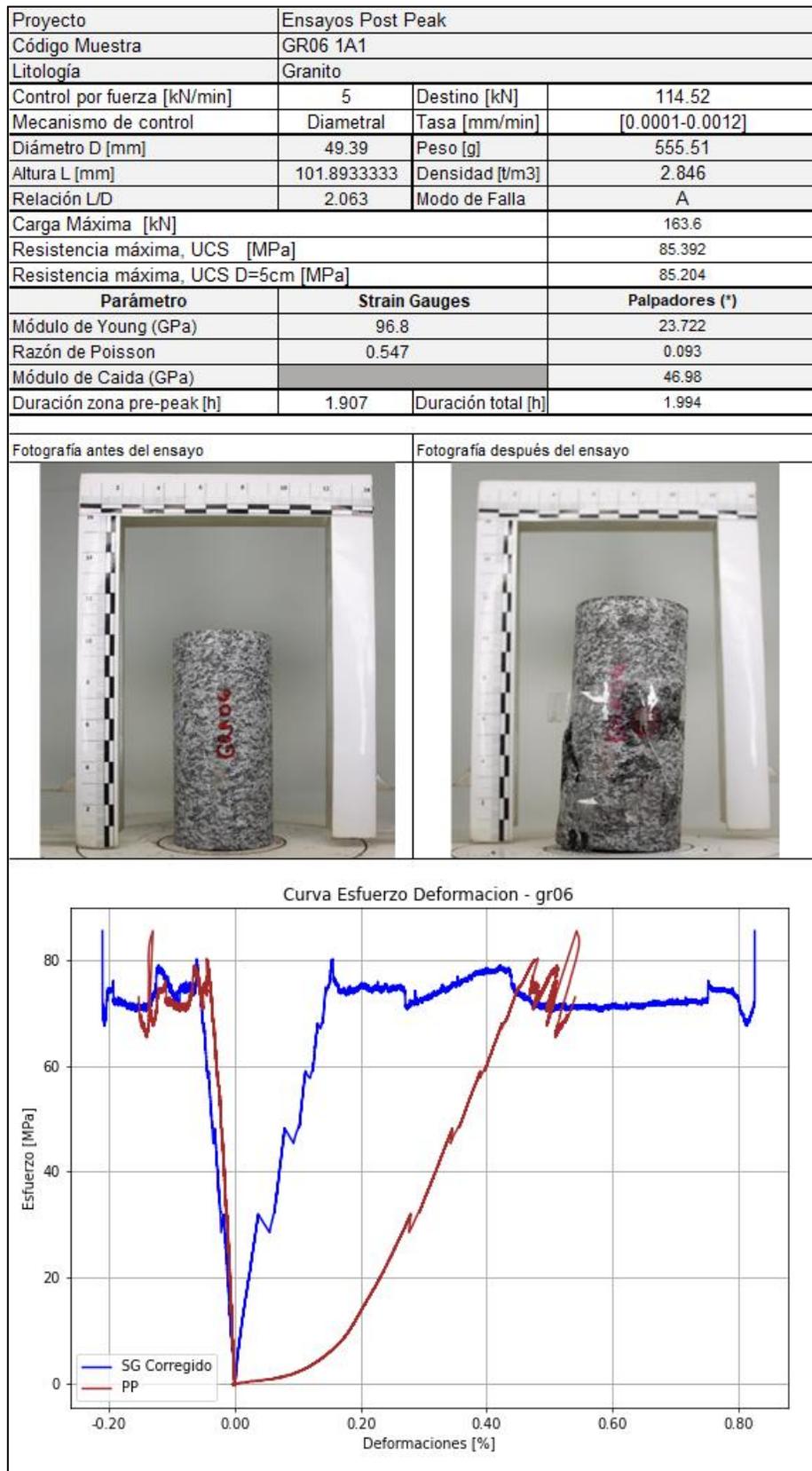


Figura C. 3: Resultados de ensayo en muestra GR06.

- GR07:

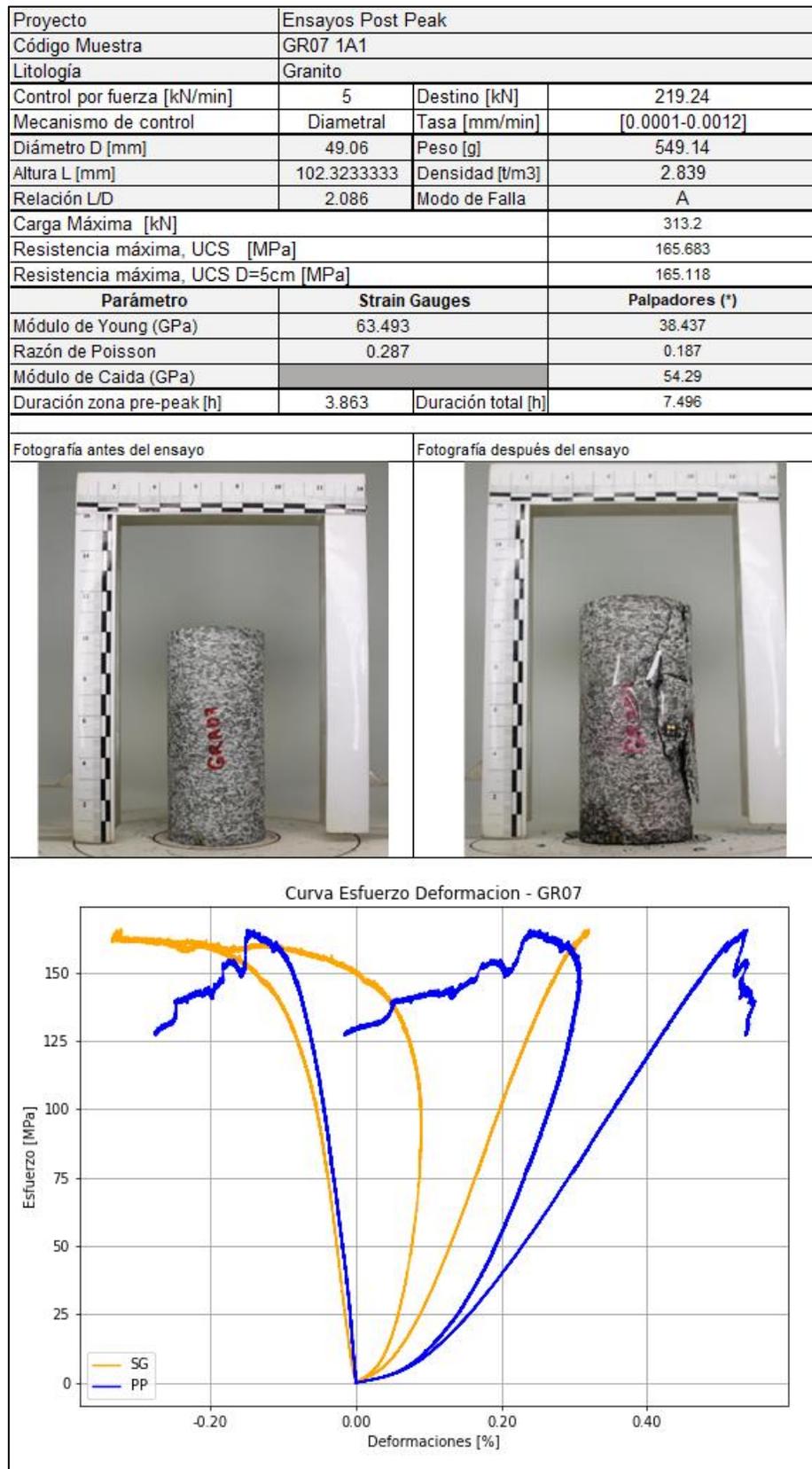


Figura C. 4: Resultados de ensayo en muestra GR07.

- BA05:

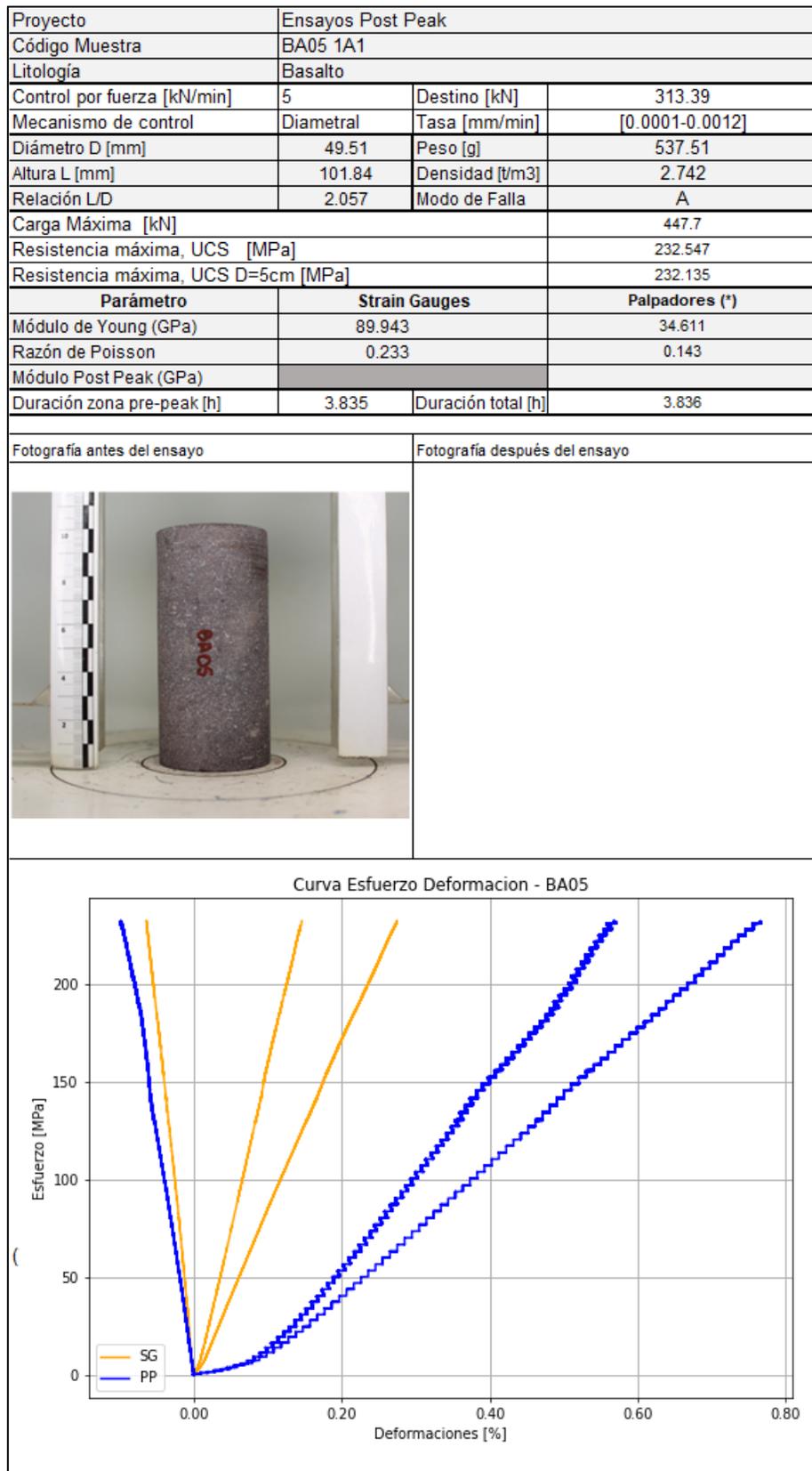


Figura C. 5: Resultados de ensayo en muestra BA05. “PP” incluye a la medición del plato en el eje axial.

- BA08:

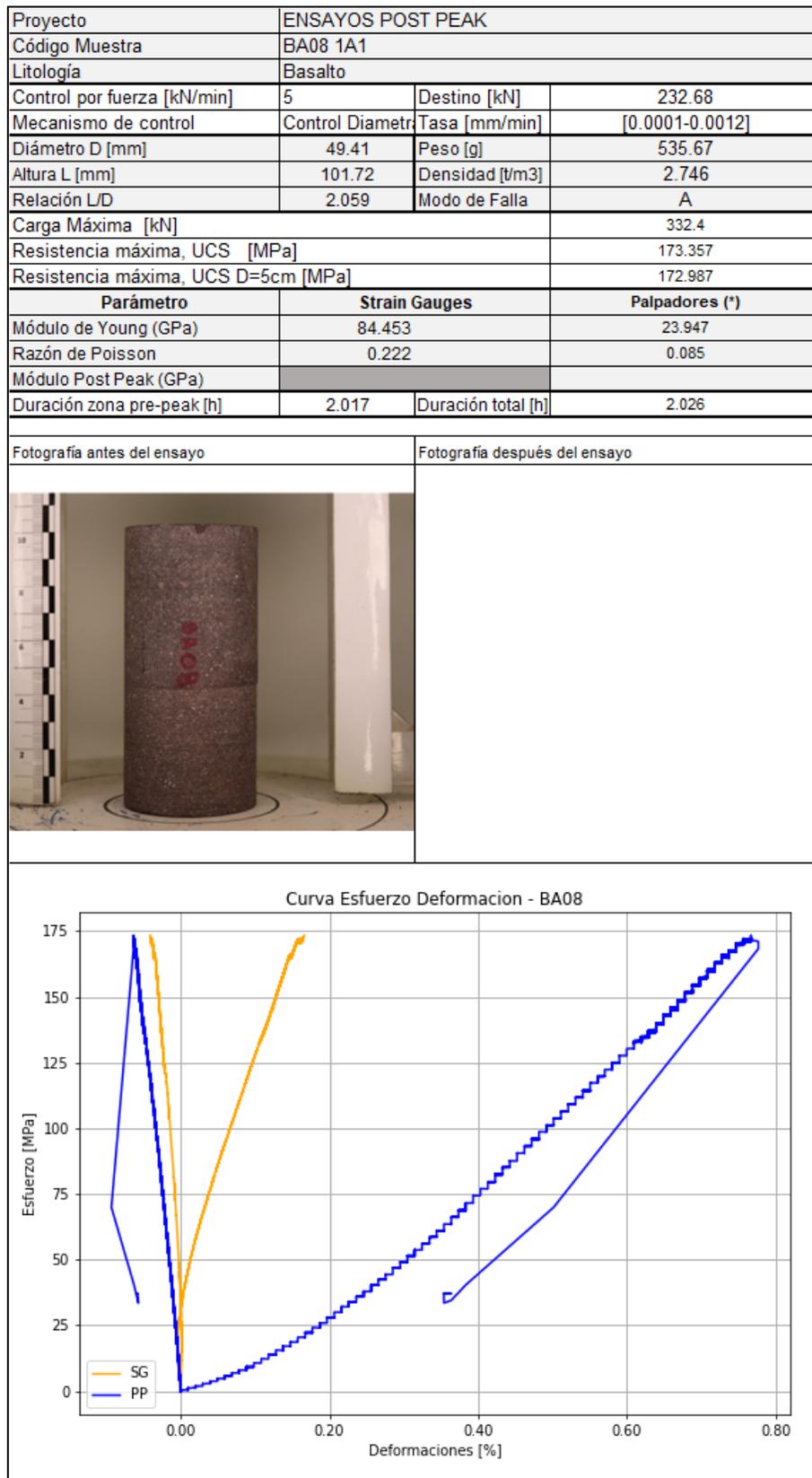


Figura C. 6: Resultados de ensayo en muestra BA08. “PP” incluye a la medición del plato en el eje axial.

- PAN 04:

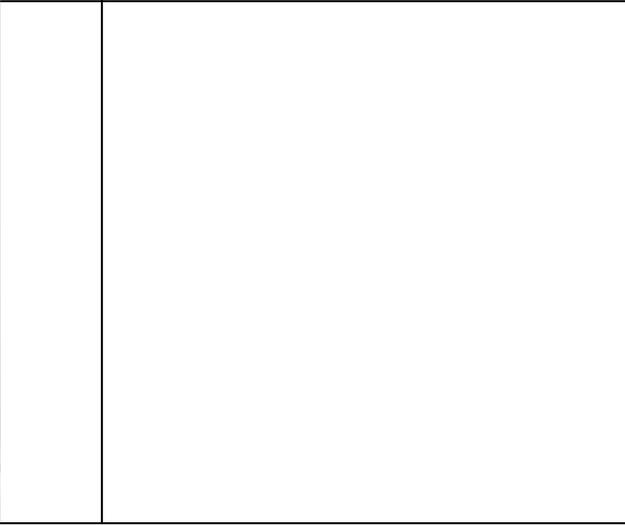
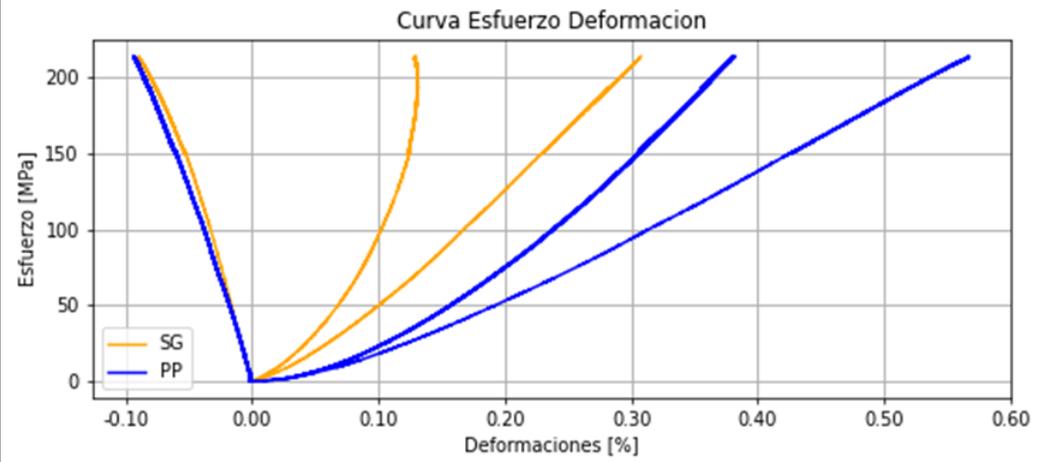
Proyecto	Ensayos Post Peak		
Código Muestra	PAN 4V 1A1		
Litología	Pórfido Andesítico		
Control por fuerza [kN/min]	5	Destino [kN]	472
Mecanismo de control	Diametral	Tasa [mm/min]	[0.0001-0.0001]
Diámetro D [mm]	63.23	Peso [g]	1142.25
Altura L [mm]	131.65	Densidad [t/m ³]	2.763
Relación L/D	2.082	Modo de Falla	A
Carga Máxima [kN]	671.6		
Resistencia máxima, UCS [MPa]	213.882		
Resistencia máxima, UCS D=5cm, H/D=2 [MPa]	223.113		
Parámetro	Strain Gauges		Palpadores (*)
Módulo de Young (GPa)	71.497		40.679
Razón de Poisson	0.238		0.166
Módulo Post Peak (GPa)			-
Duración zona pre-peak [h]	5.145	Duración total [h]	5.17
Fotografía antes del ensayo		Fotografía después del ensayo	
			
<p style="text-align: center;">Curva Esfuerzo Deformacion</p> 			

Figura C. 7: Resultados de ensayo en muestra PAN 04.

- PAN 05:

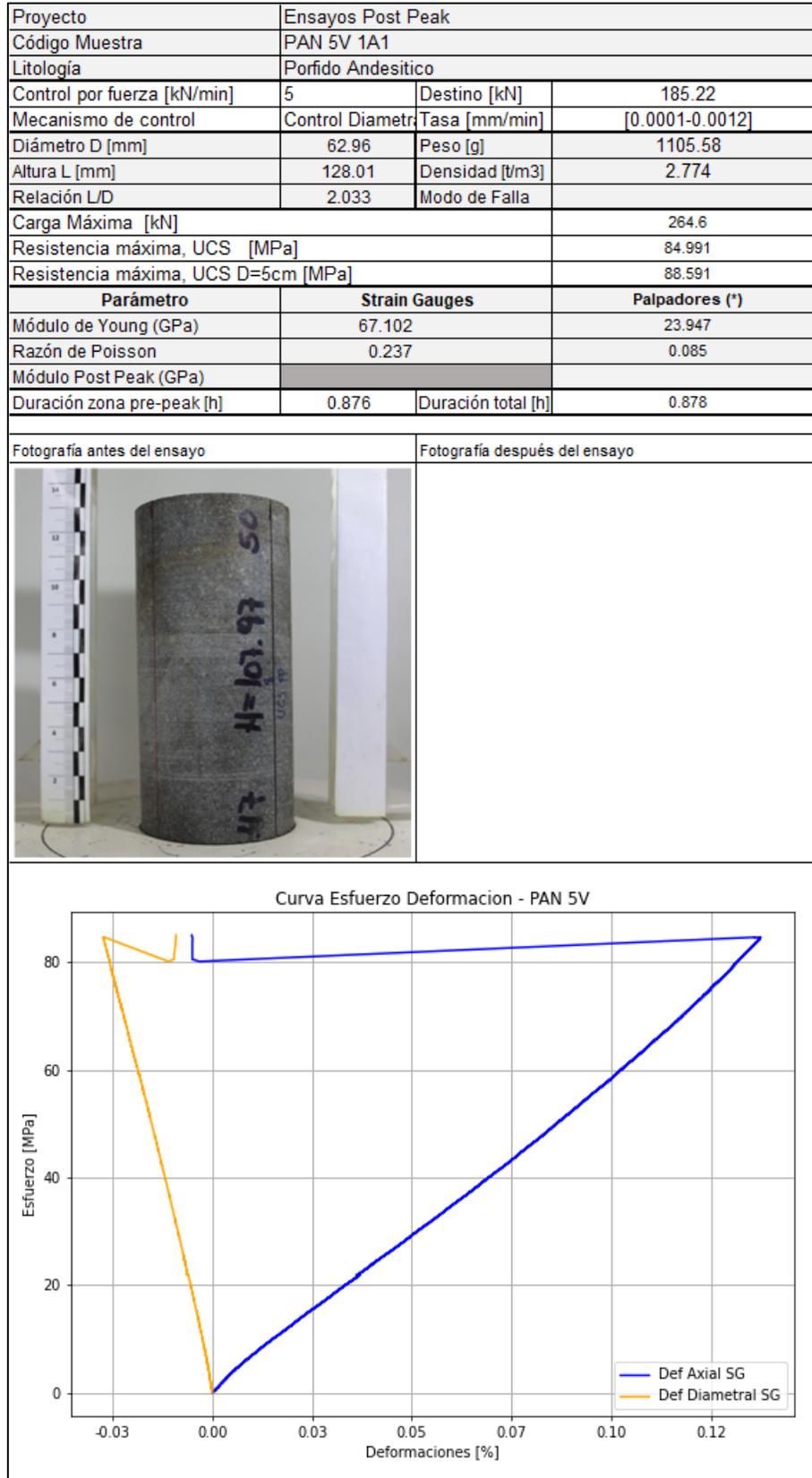


Figura C. 8: Resultados de ensayo en muestra PAN 05.

- BR 01:

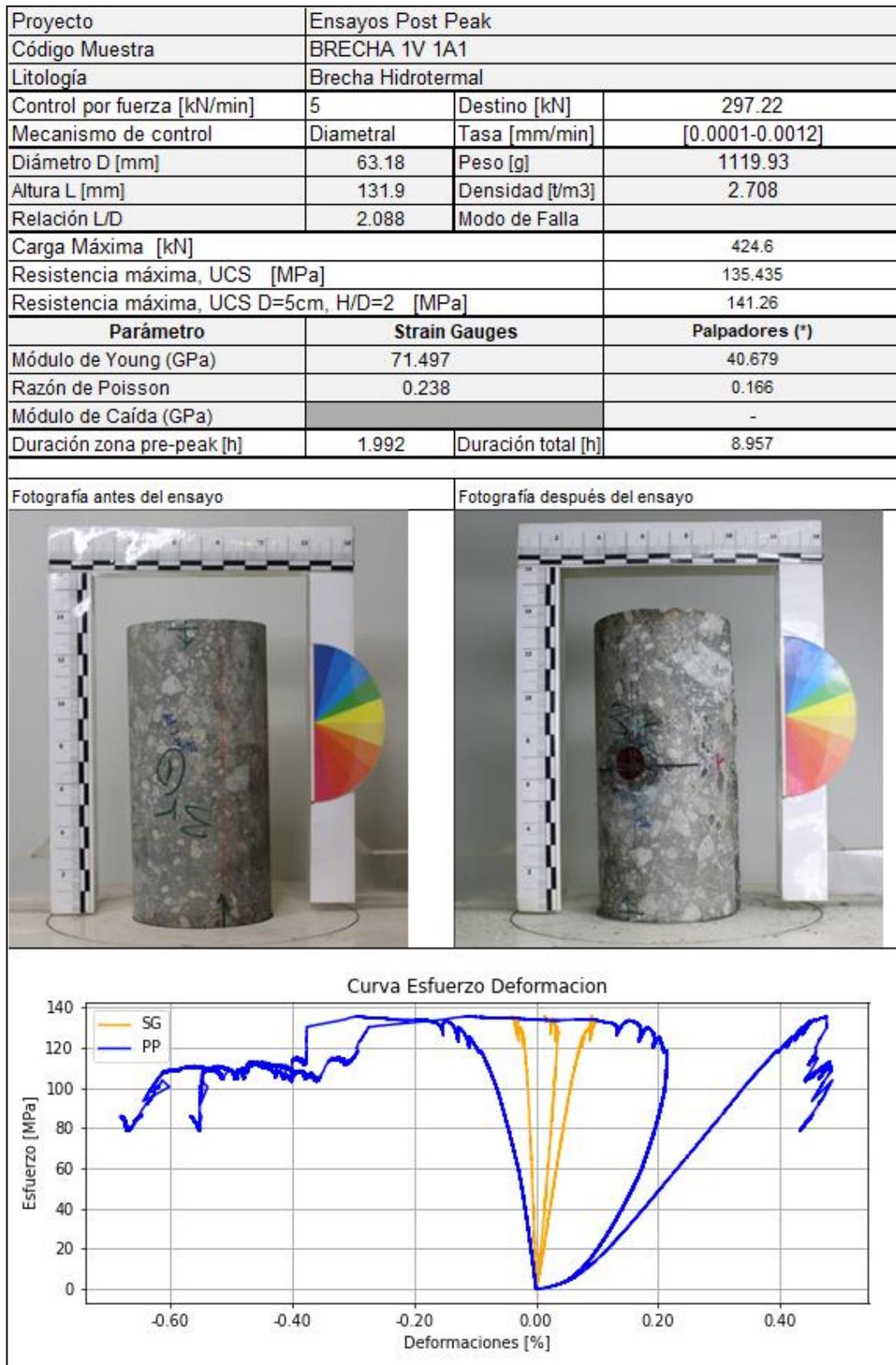


Figura C. 9: Resultados de ensayo en muestra BR 01.

- BR 03:

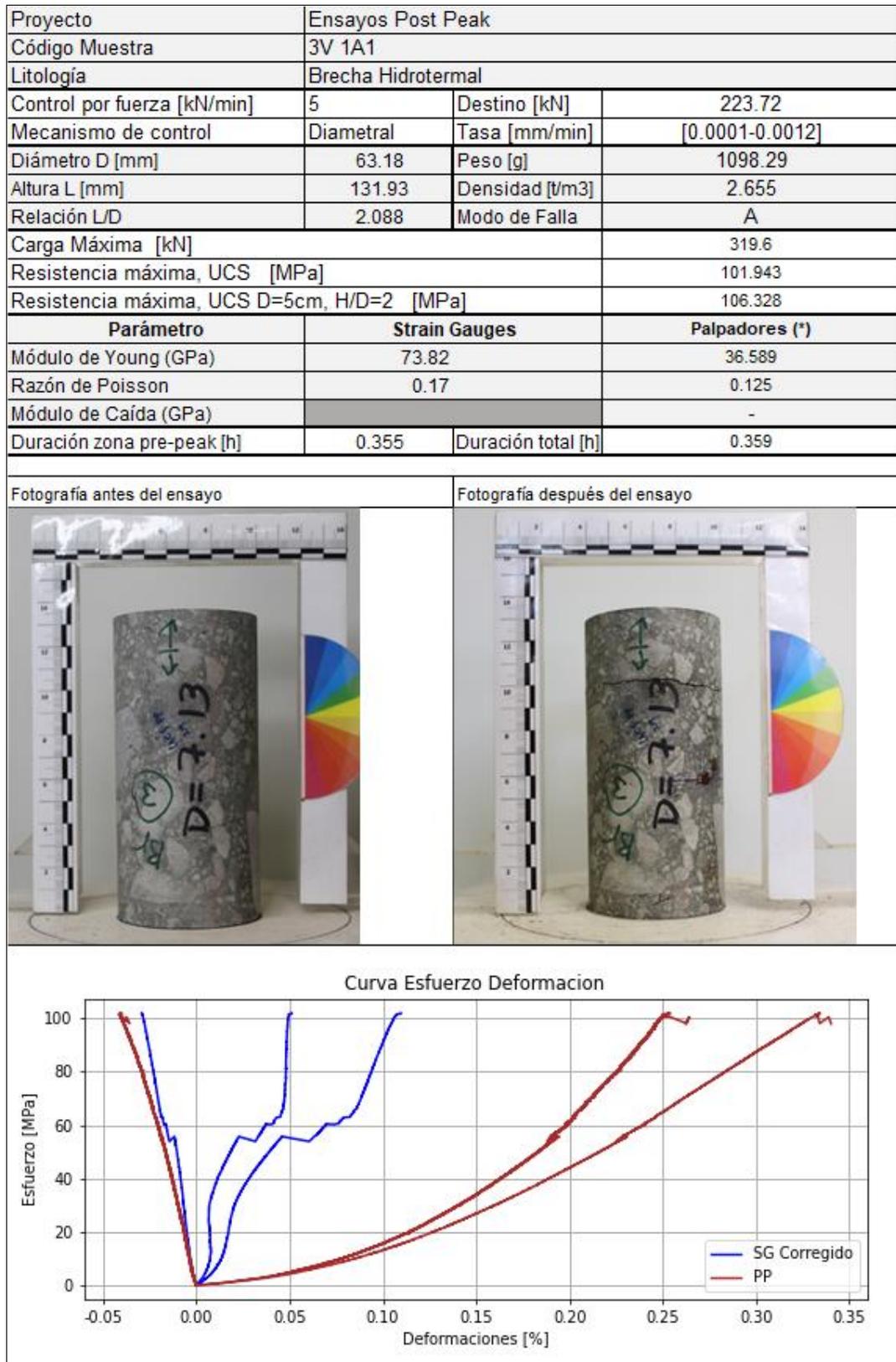


Figura C. 10: Resultados de ensayo en muestra BR 02.

- BR04:

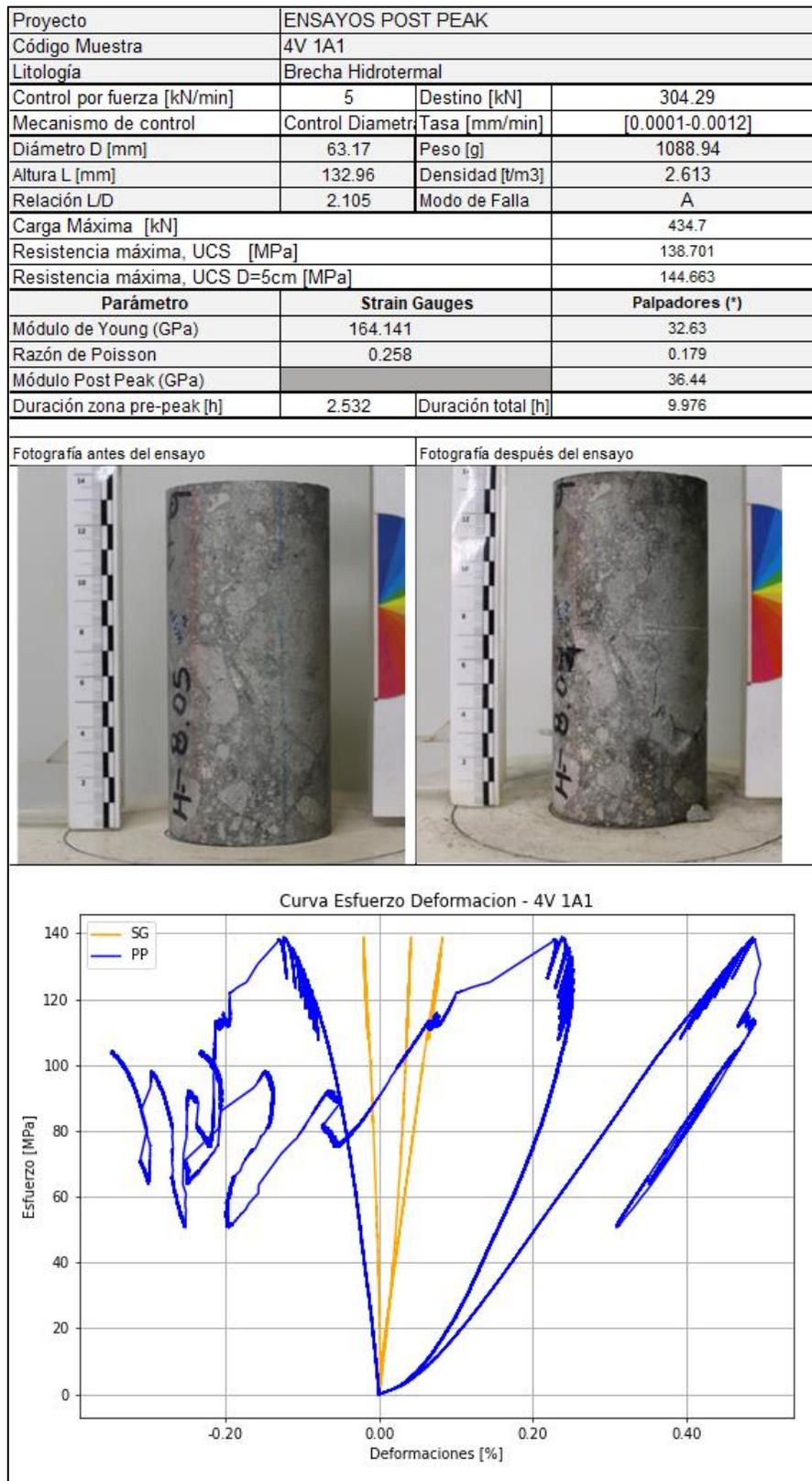


Figura C. 11: Resultados de ensayo en muestra BR 04.

- BR05:

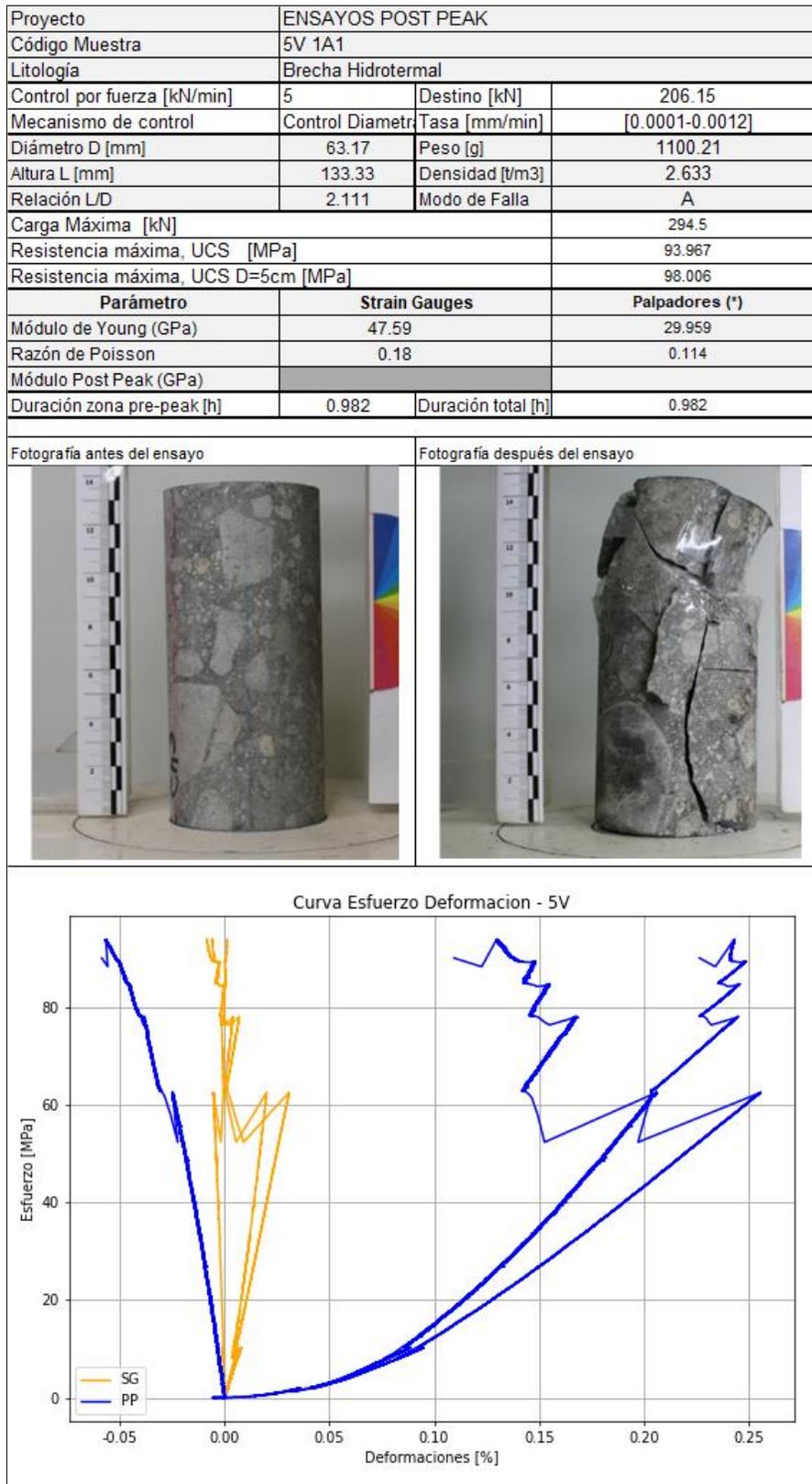


Figura C. 12: Resultados de ensayo en muestra BR 05.

- BR06:

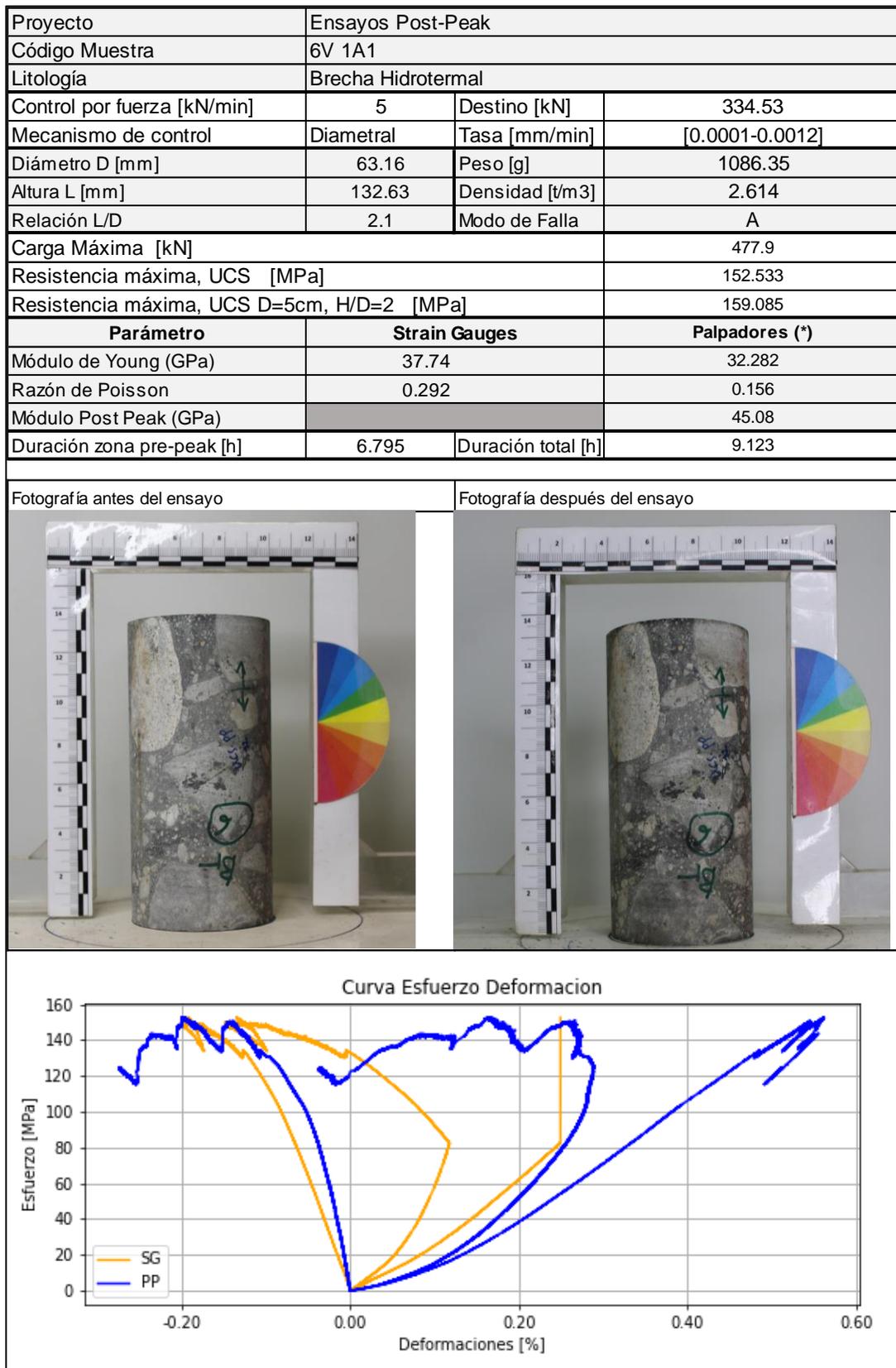


Figura C. 13: Resultados de ensayo en muestra BR 06.

- PDIO 01:

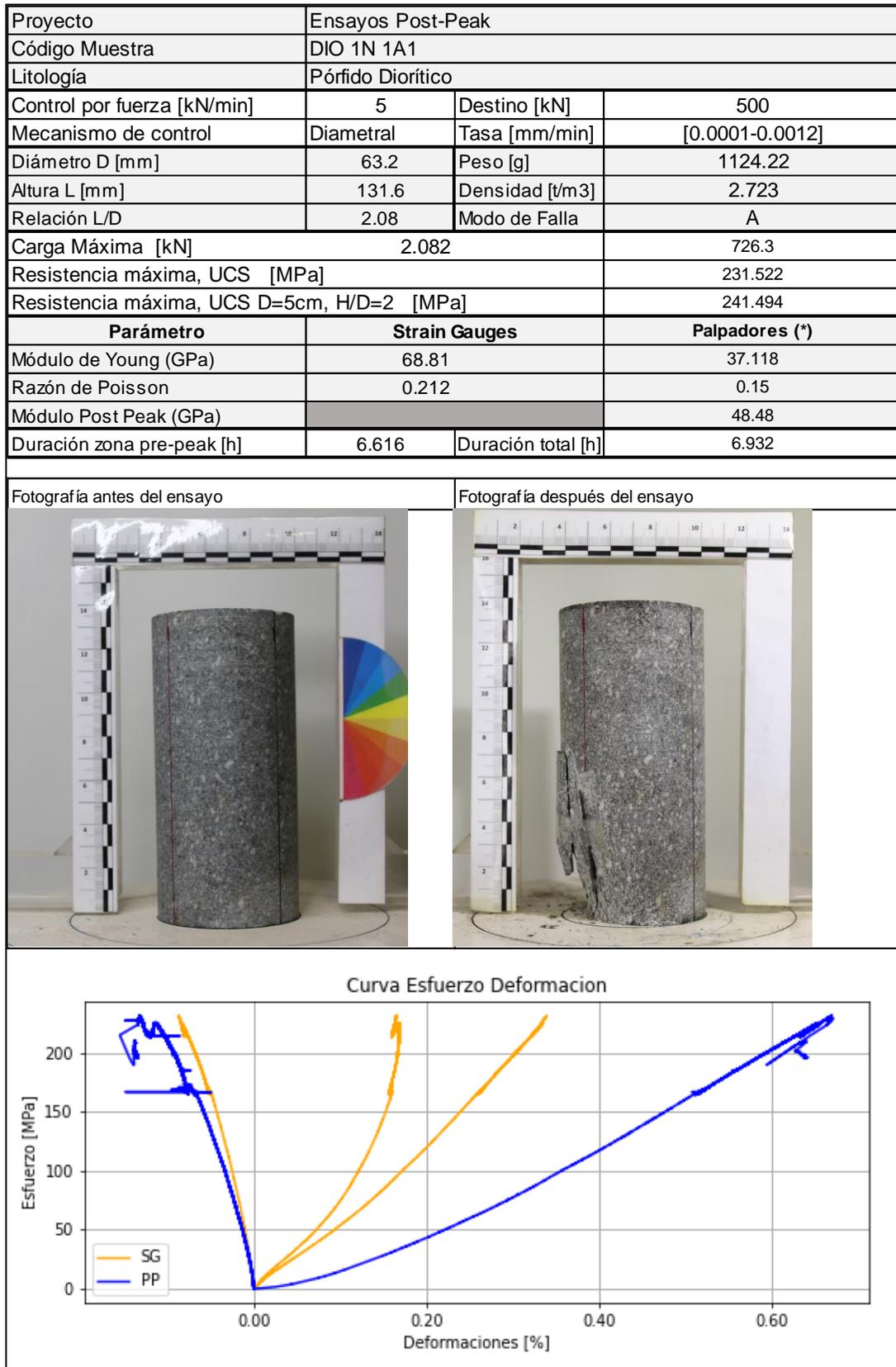


Figura C. 14: Resultados de ensayo en muestra DIO 01.

- PDIO 02:

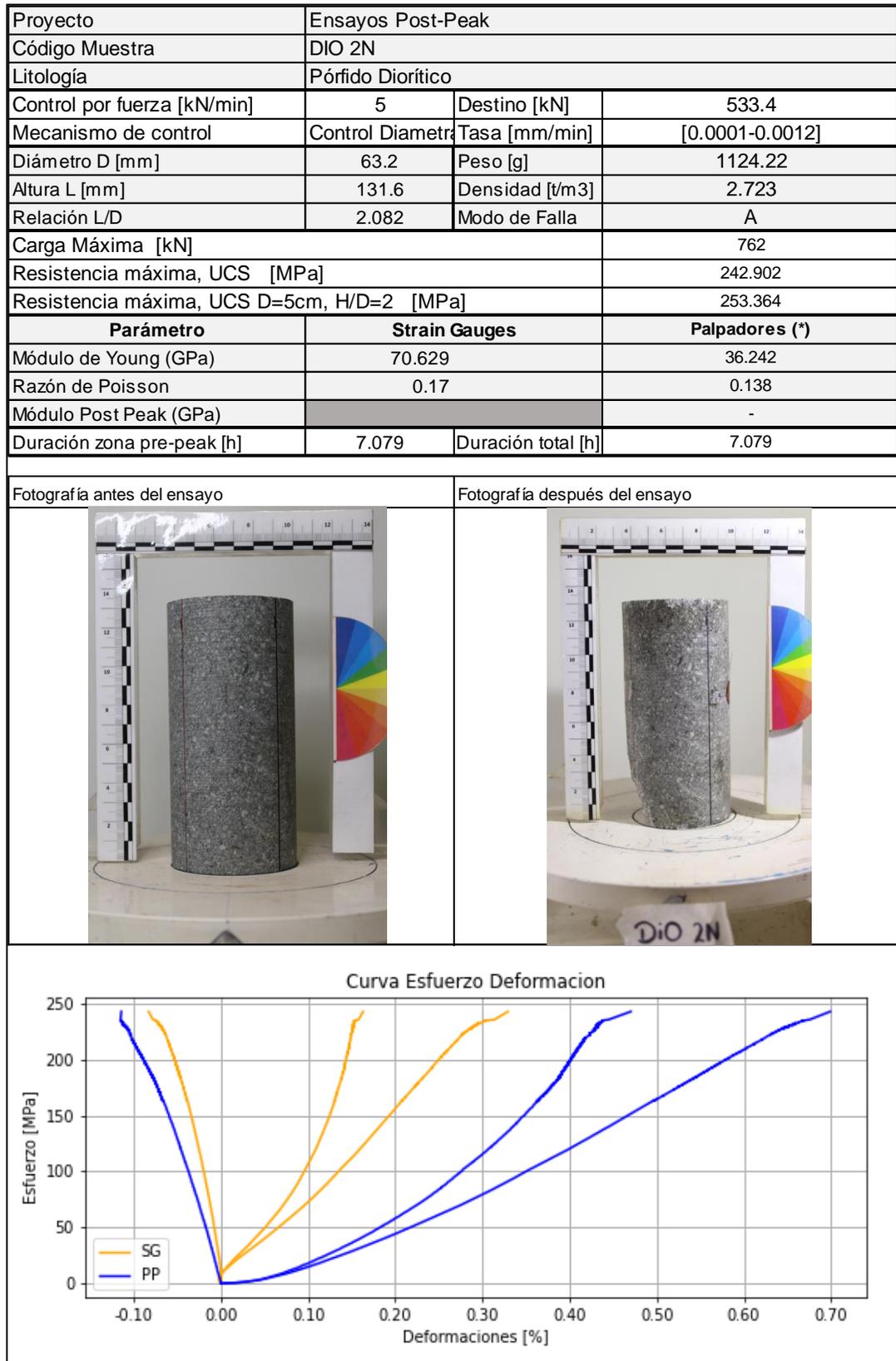


Figura C. 15: Resultados de ensayo en muestra DIO 02.

- PDIO 08:

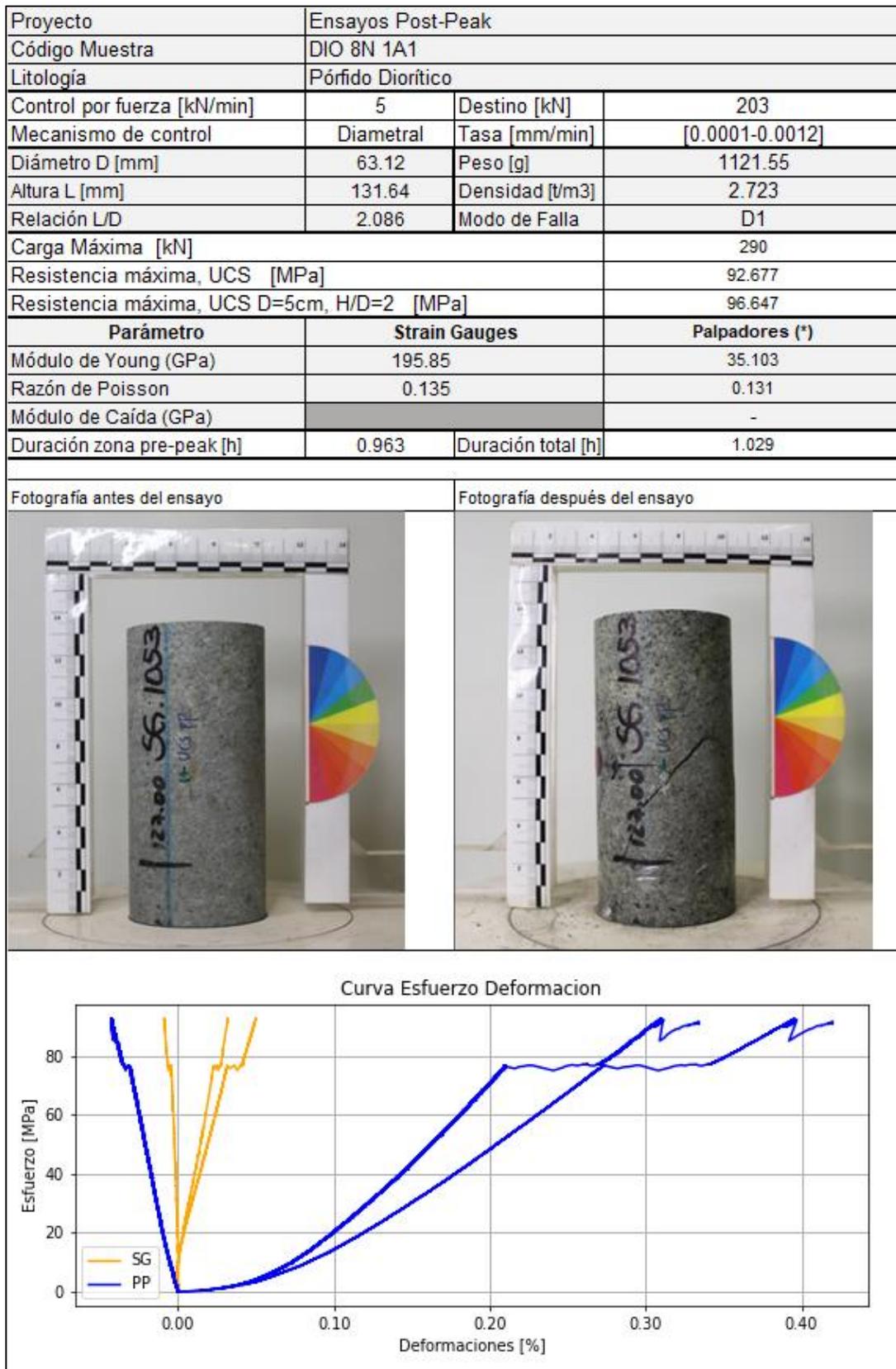


Figura C. 16: Resultados de ensayo en muestra DIO 08.

- PDIO 09:

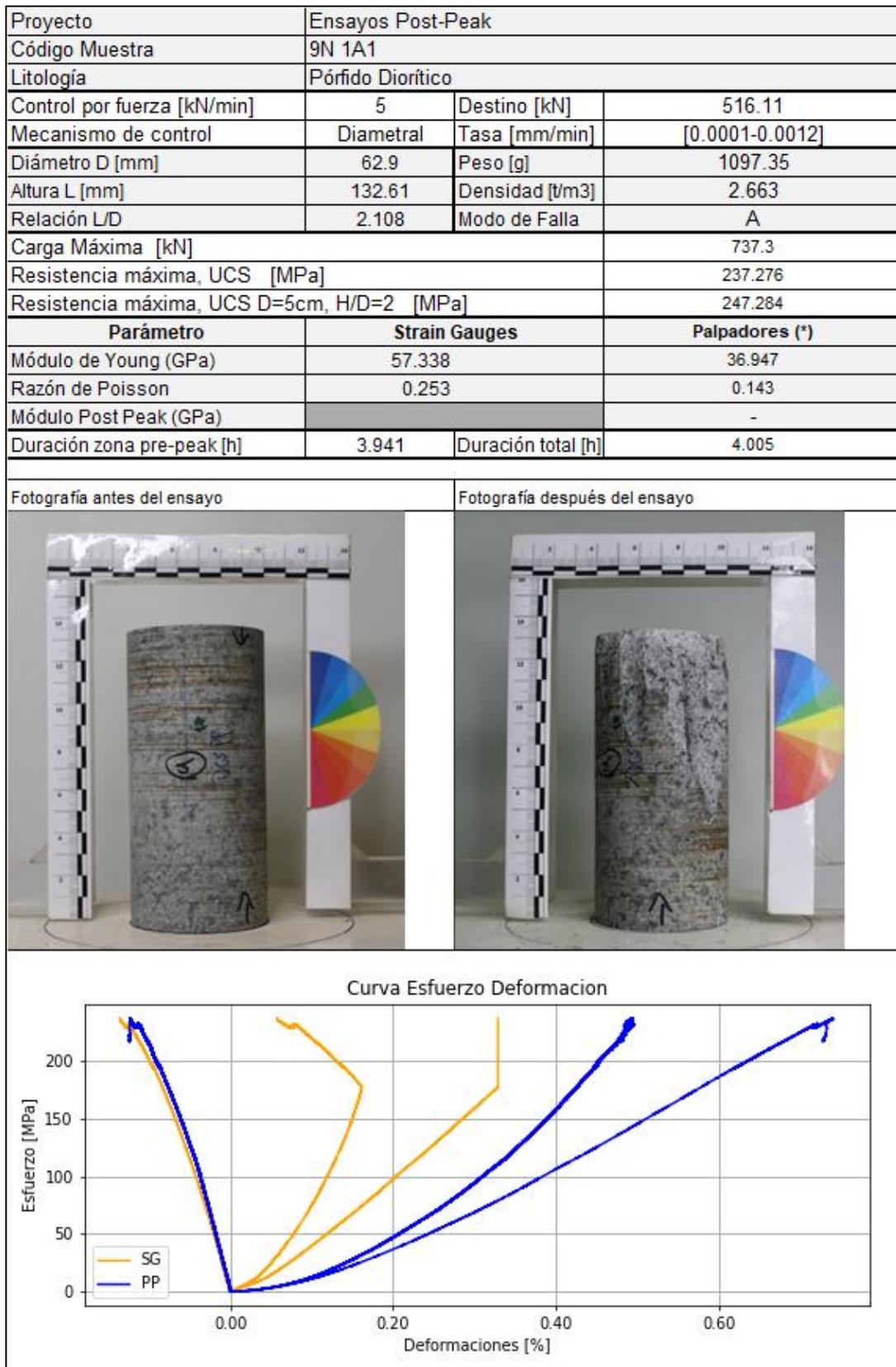


Figura C. 17: Resultados de ensayo en muestra DIO 09.

- PDIO 10:

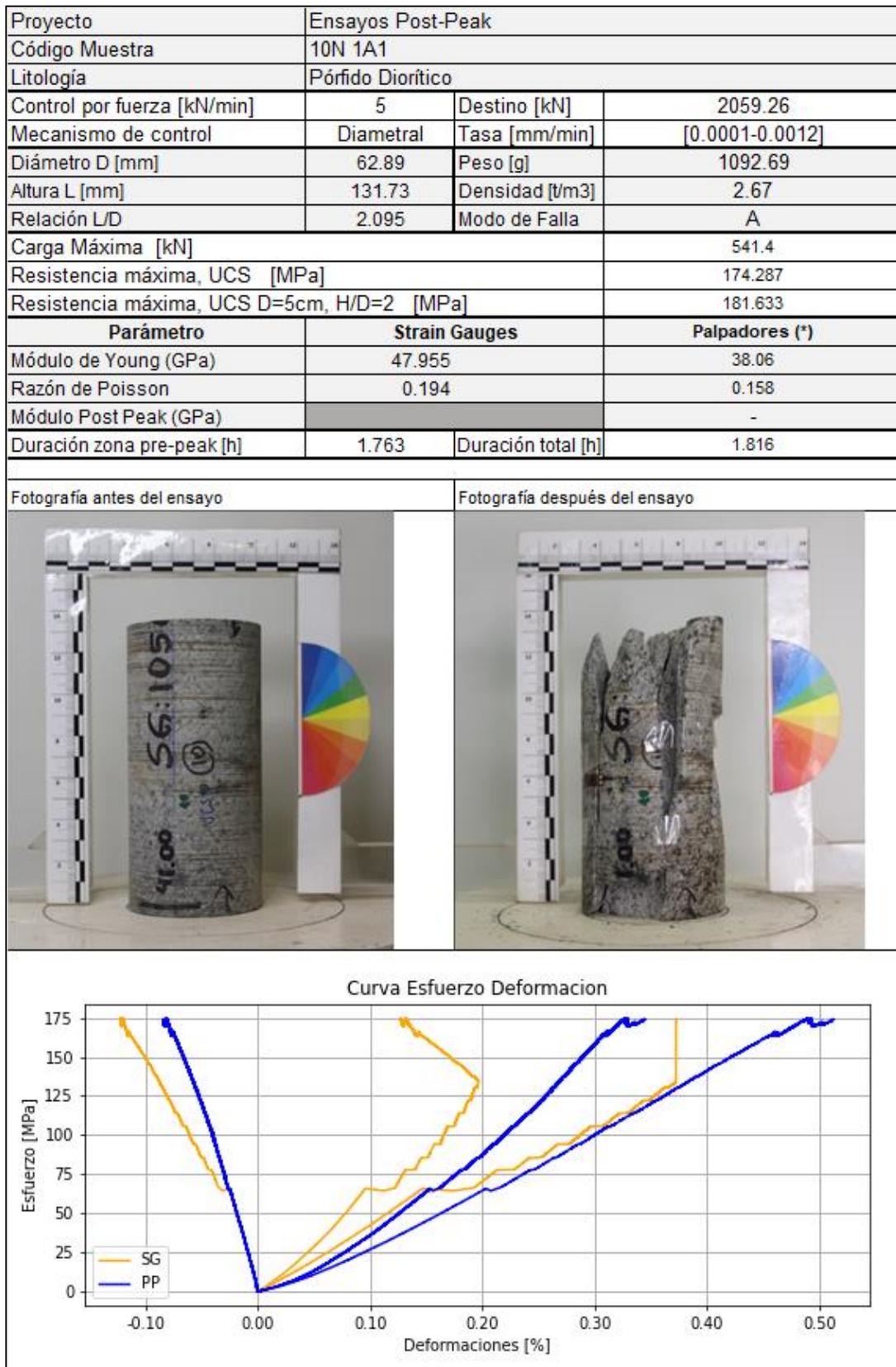


Figura C. 18: Resultados de ensayo en muestra DIO 10.

- PDIO 12:

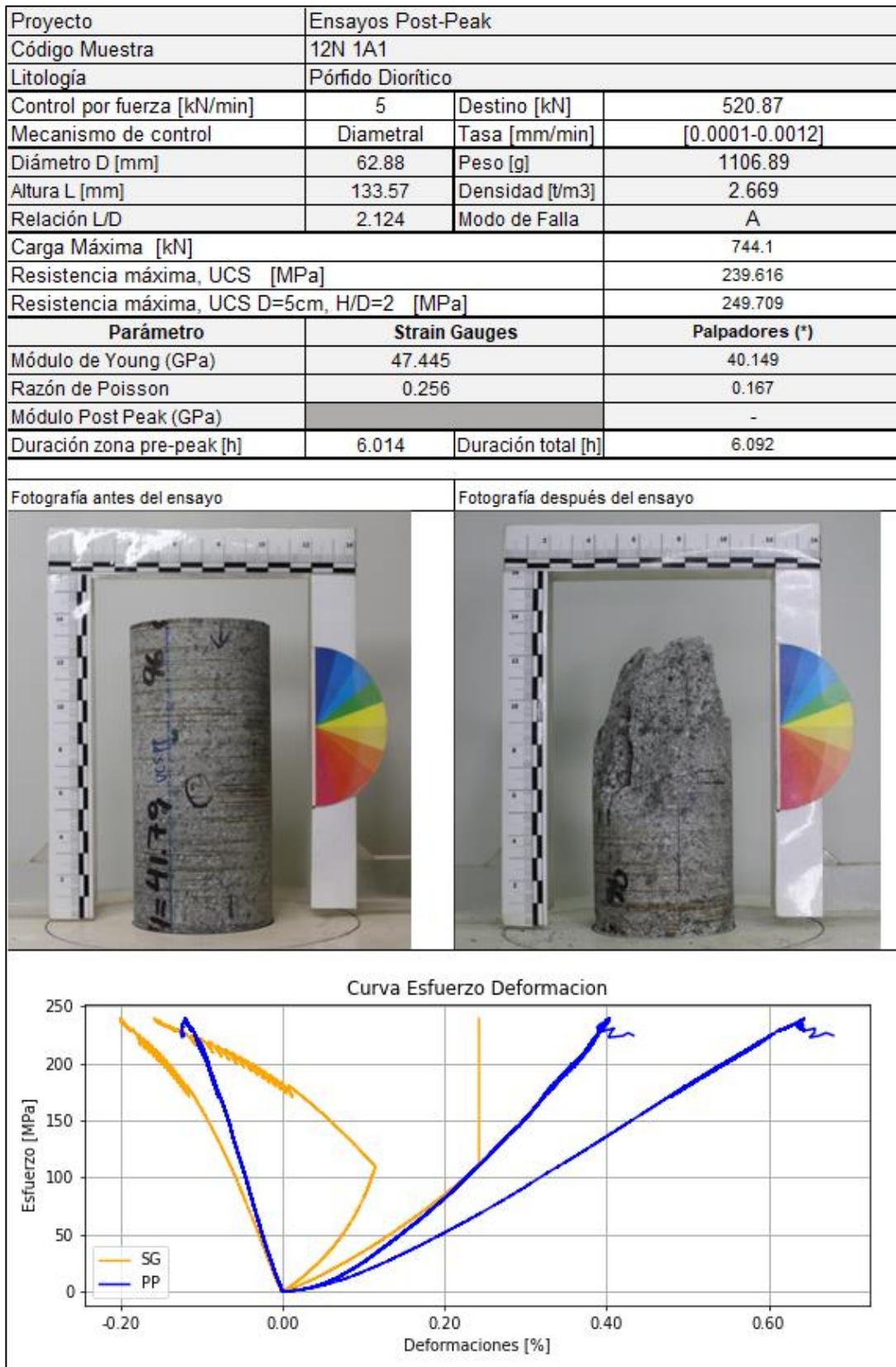


Figura C. 19: Resultados de ensayo en muestra DIO 12.

- PDIO 14:

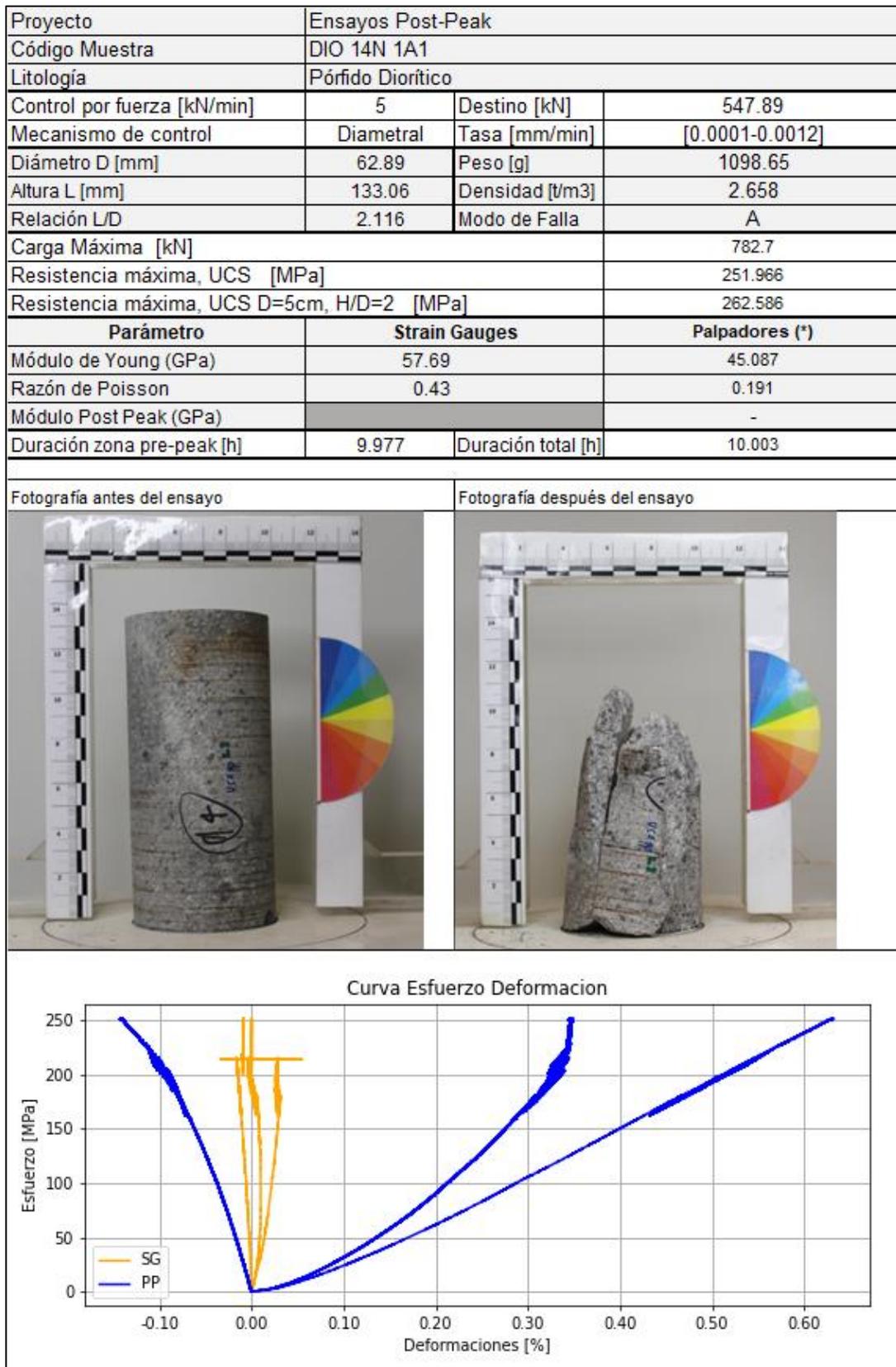


Figura C. 20: Resultados de ensayo en muestra DIO 14.

- RIO M40-1:

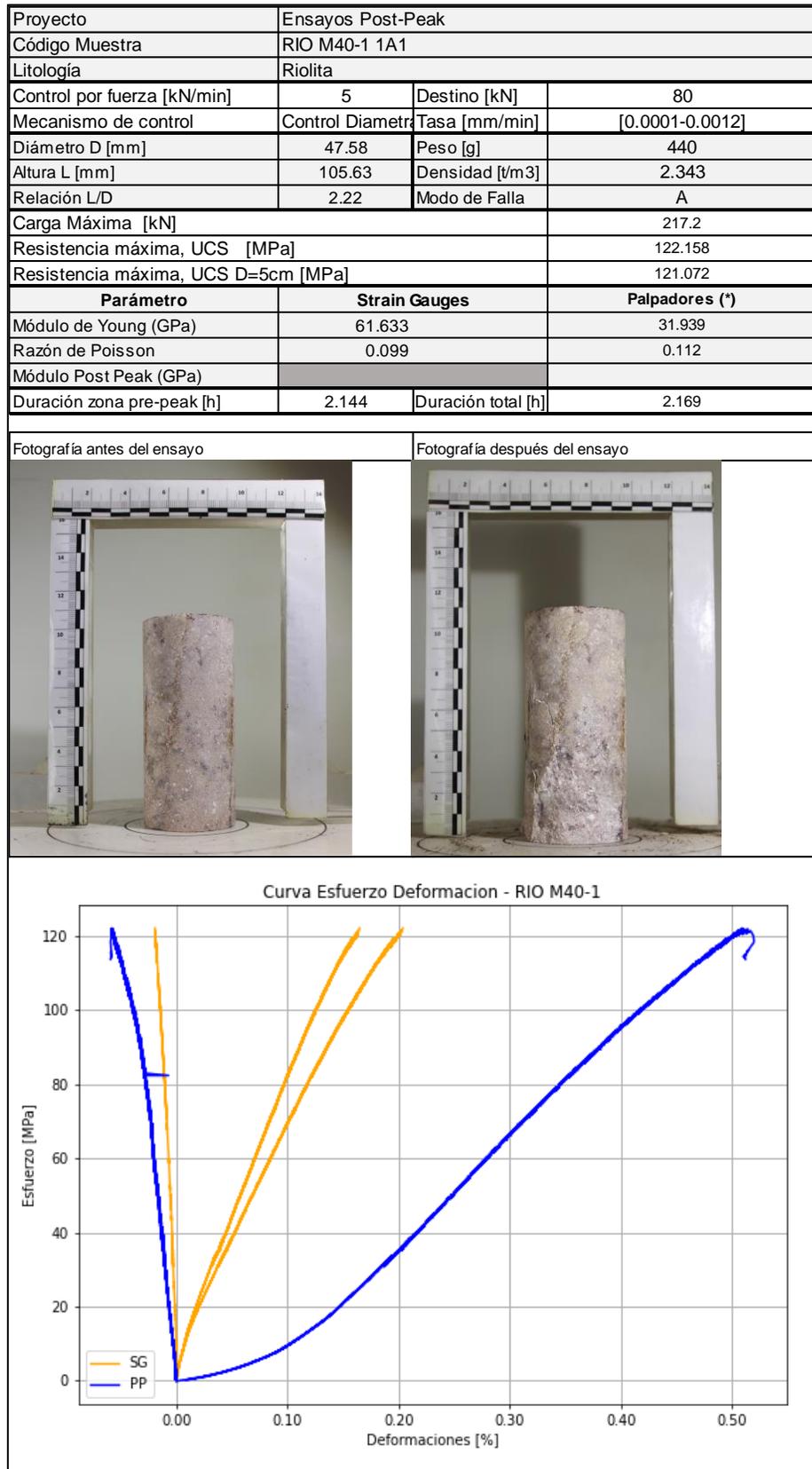


Figura C. 21: Resultados de ensayo en muestra RIO M40-1.

- RIO M40-2:

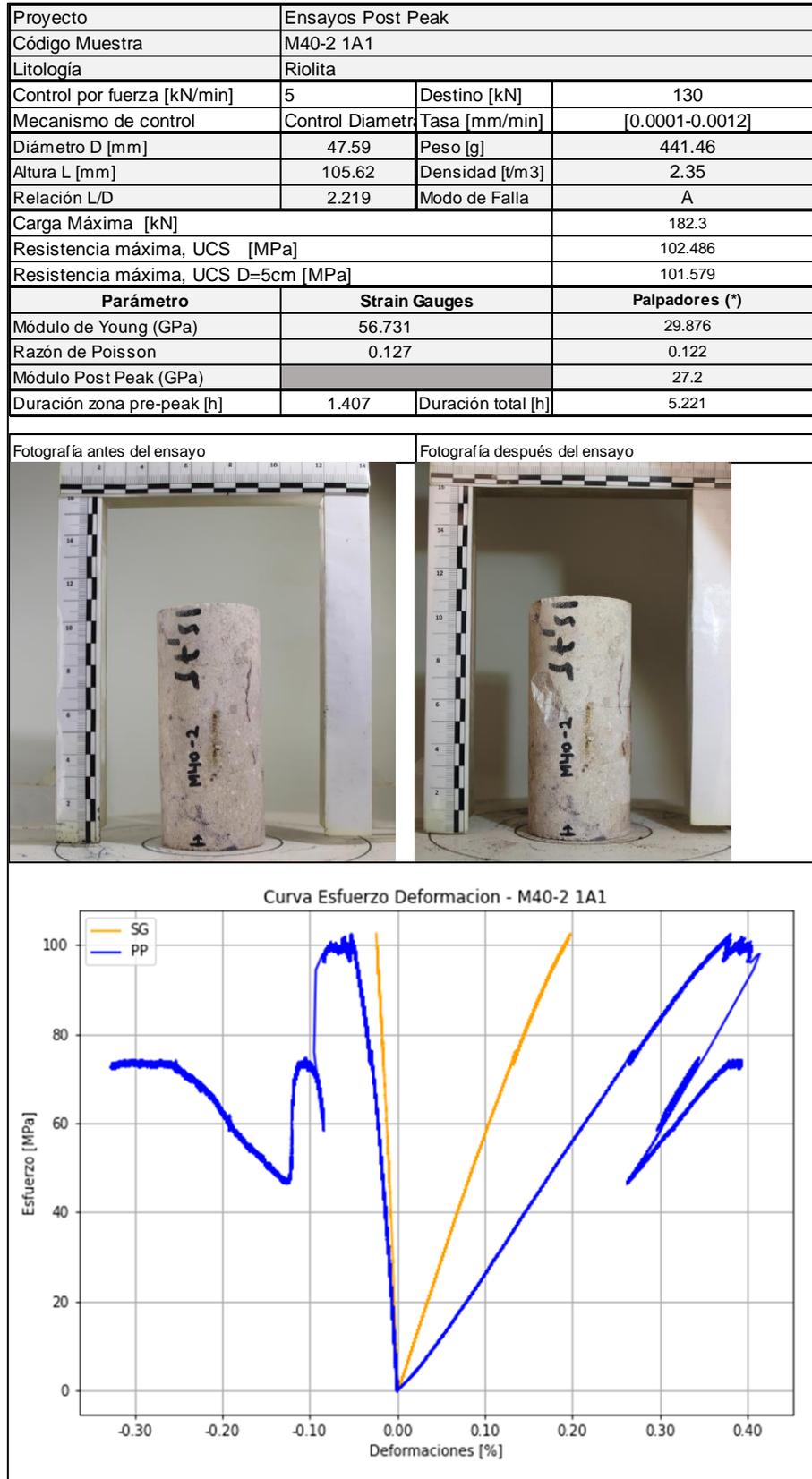


Figura C. 22: Resultados de ensayo en muestra RIO M40-2.

- RIO M41-1:

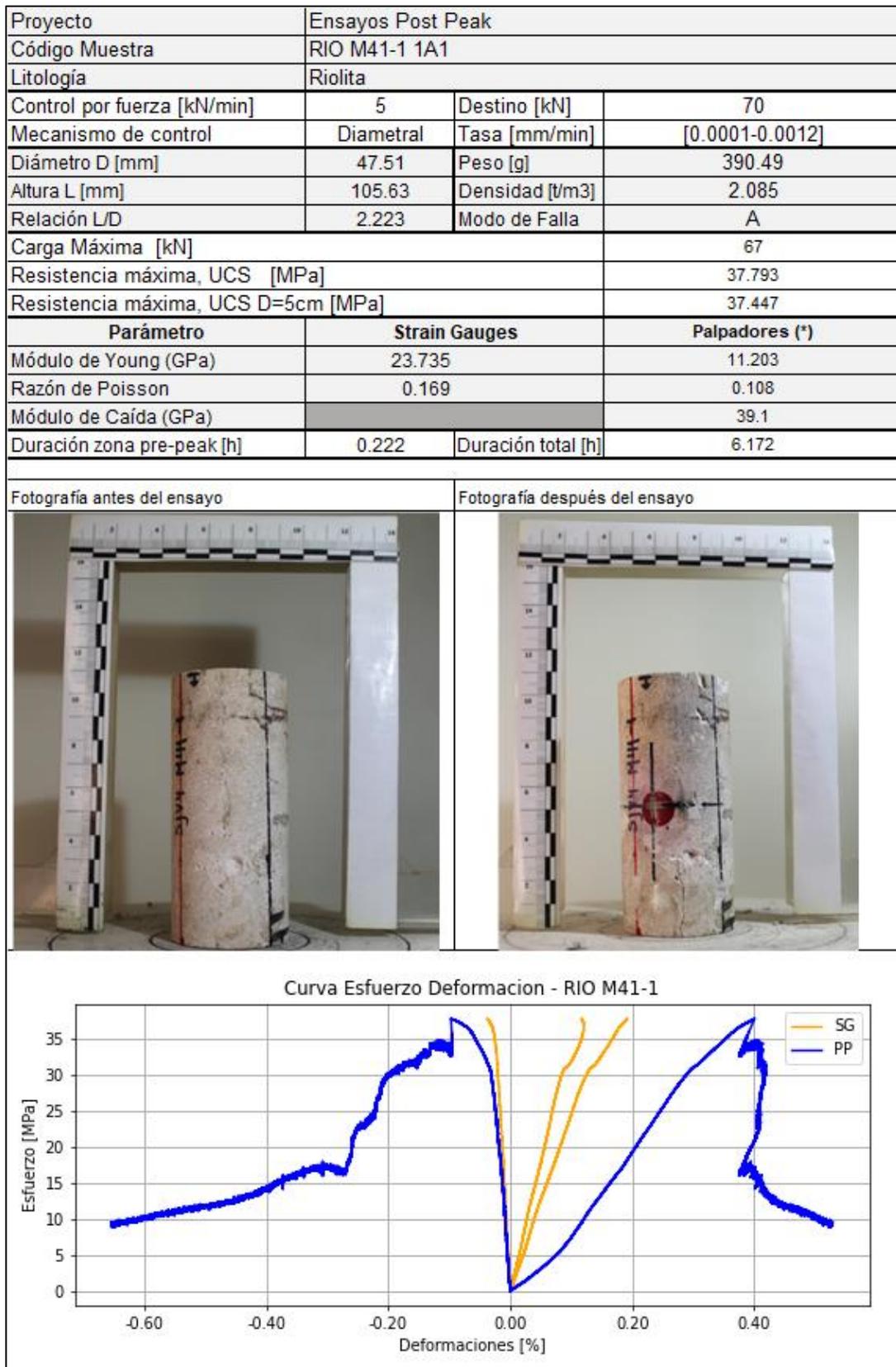


Figura C. 23: Resultados de ensayo en muestra RIO M41-1

- RIO M42-1:

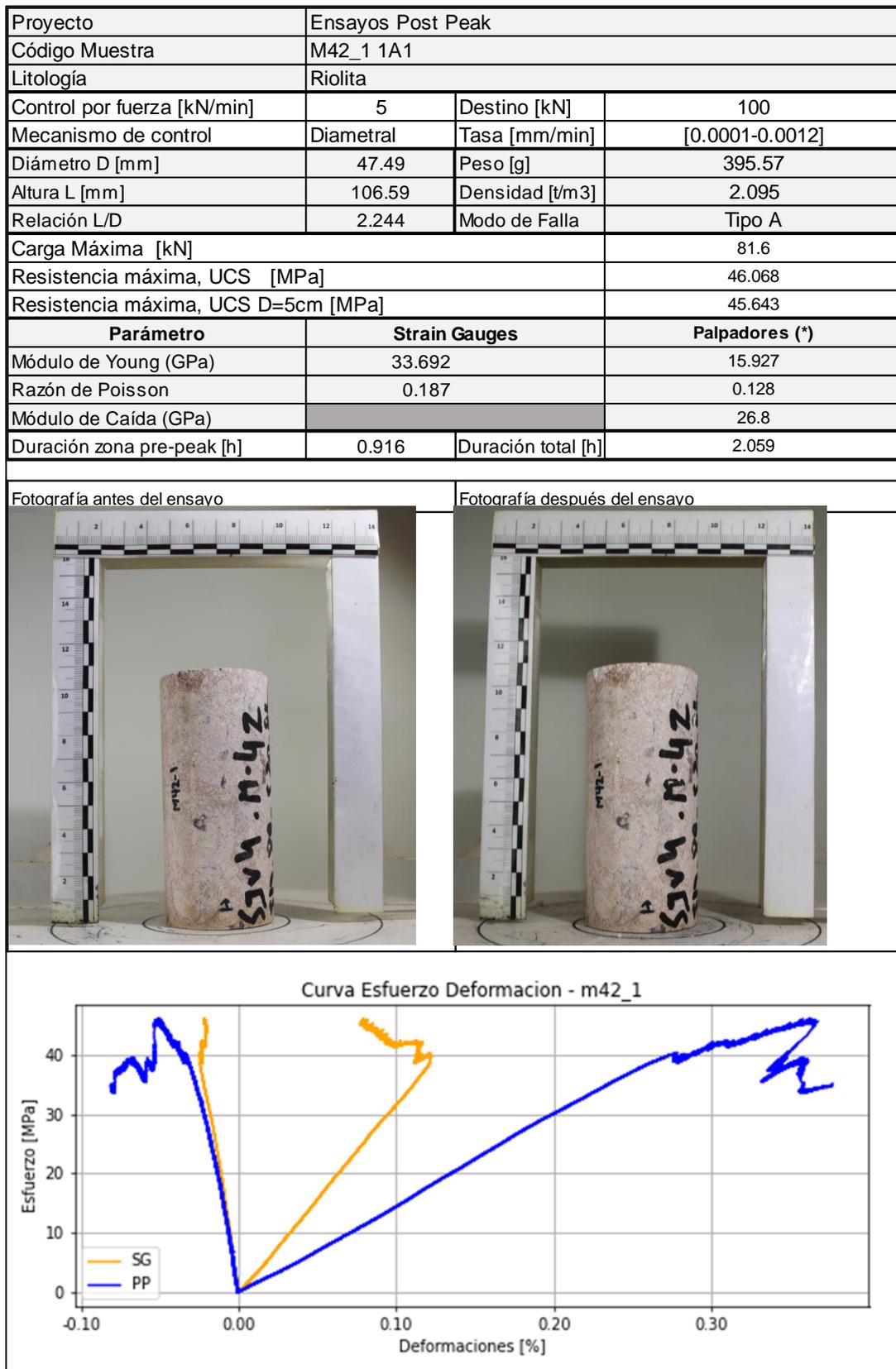


Figura C. 24: Resultados de ensayo en muestra RIO M42-1

- RIO M43-1:

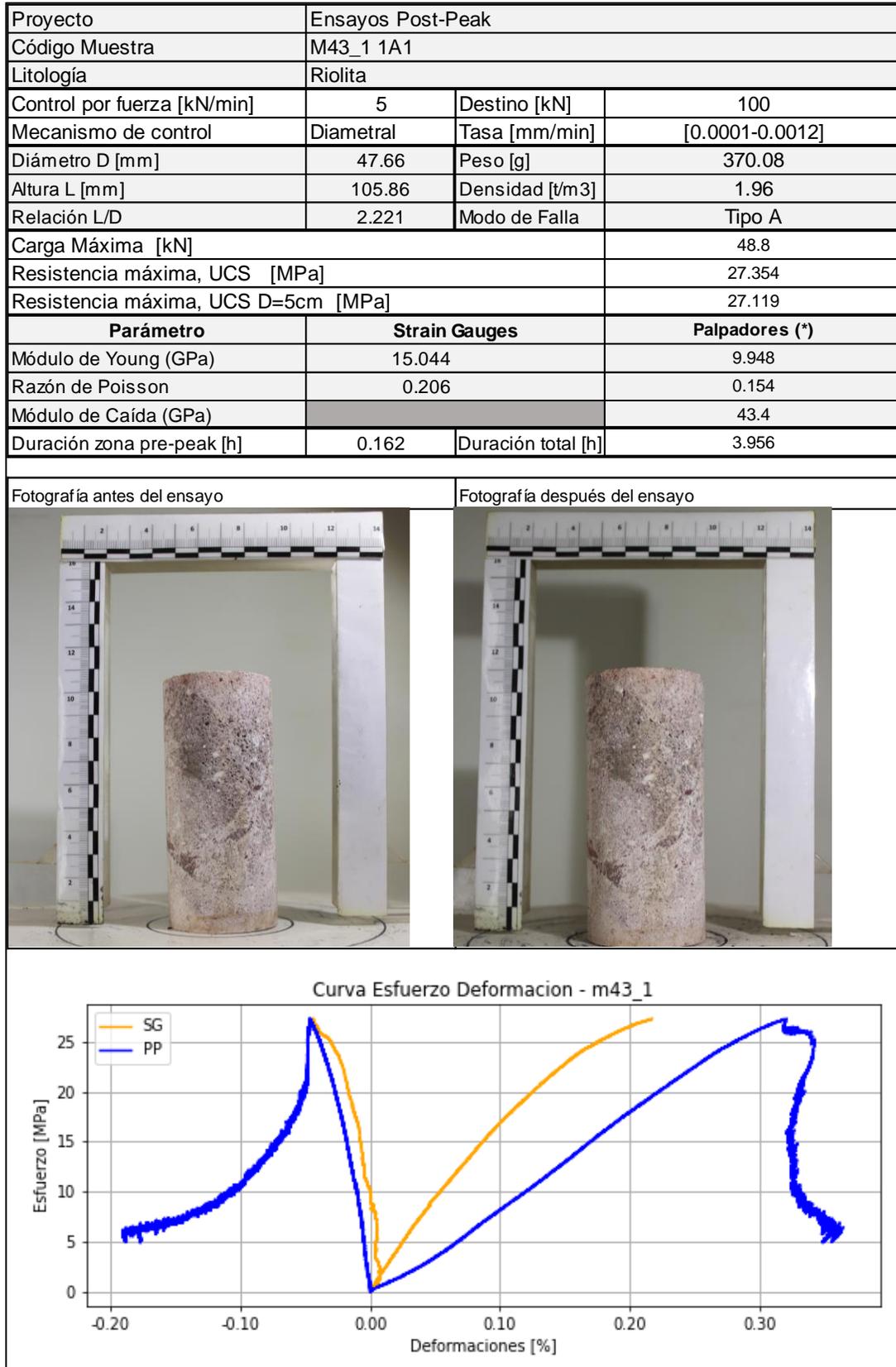


Figura C. 25: Resultados de ensayo en muestra RIO M43-1

- RIO M47-1:

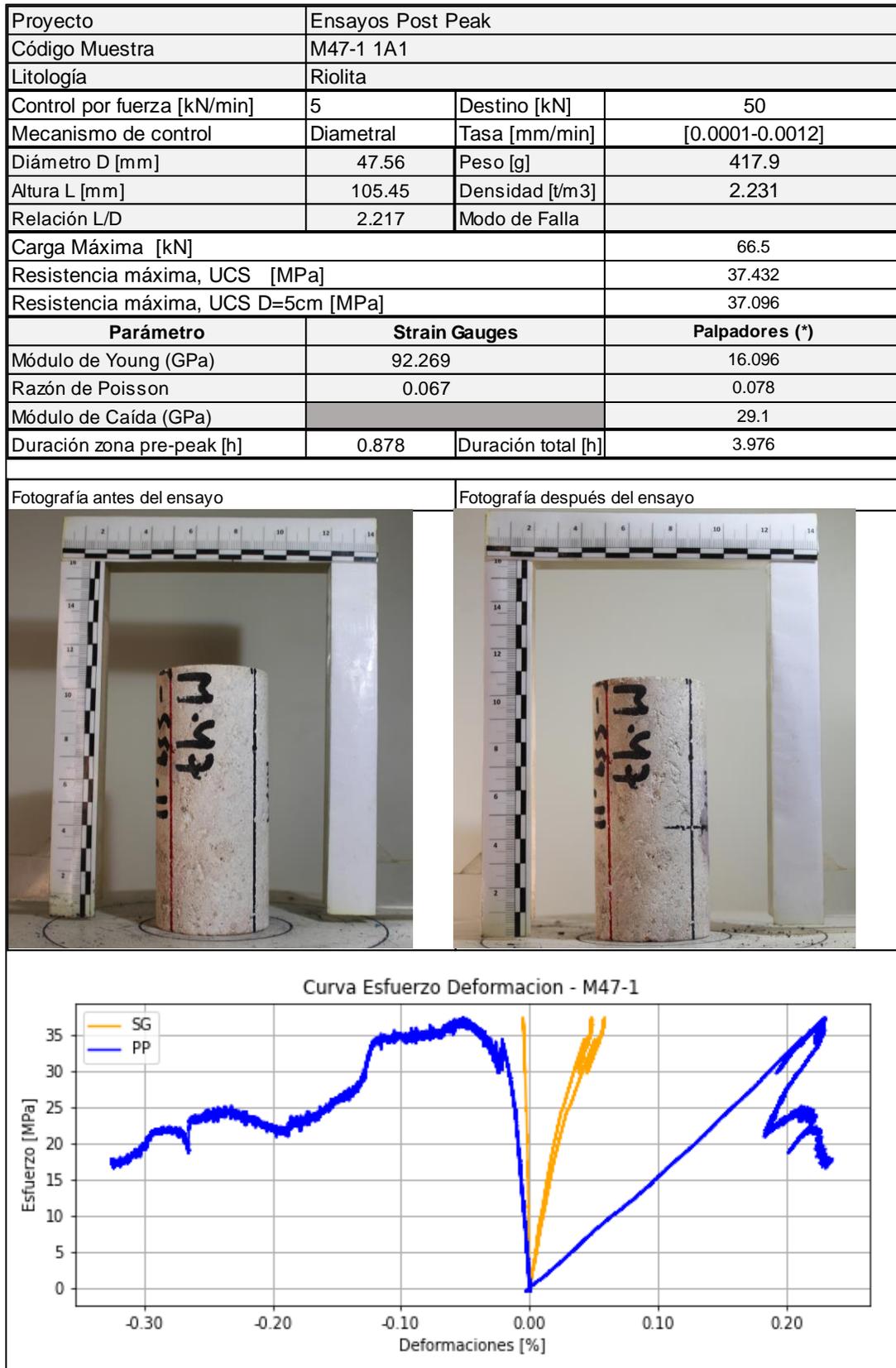


Figura C. 26: Resultados de ensayo en muestra RIO M47-1

- RIO M47-2:

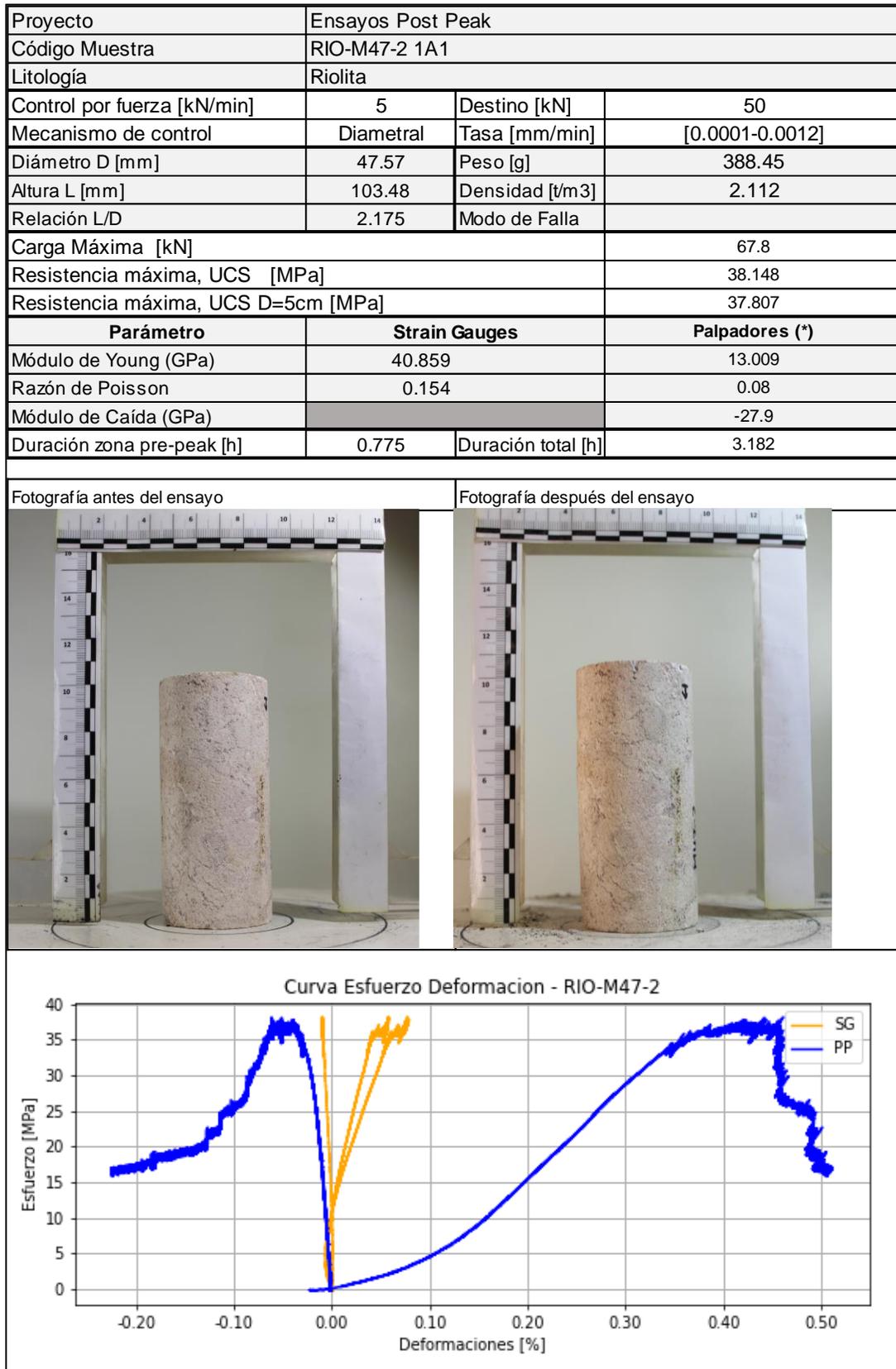


Figura C. 27: Resultados de ensayo en muestra RIO M47-2

- RIO M48-1:

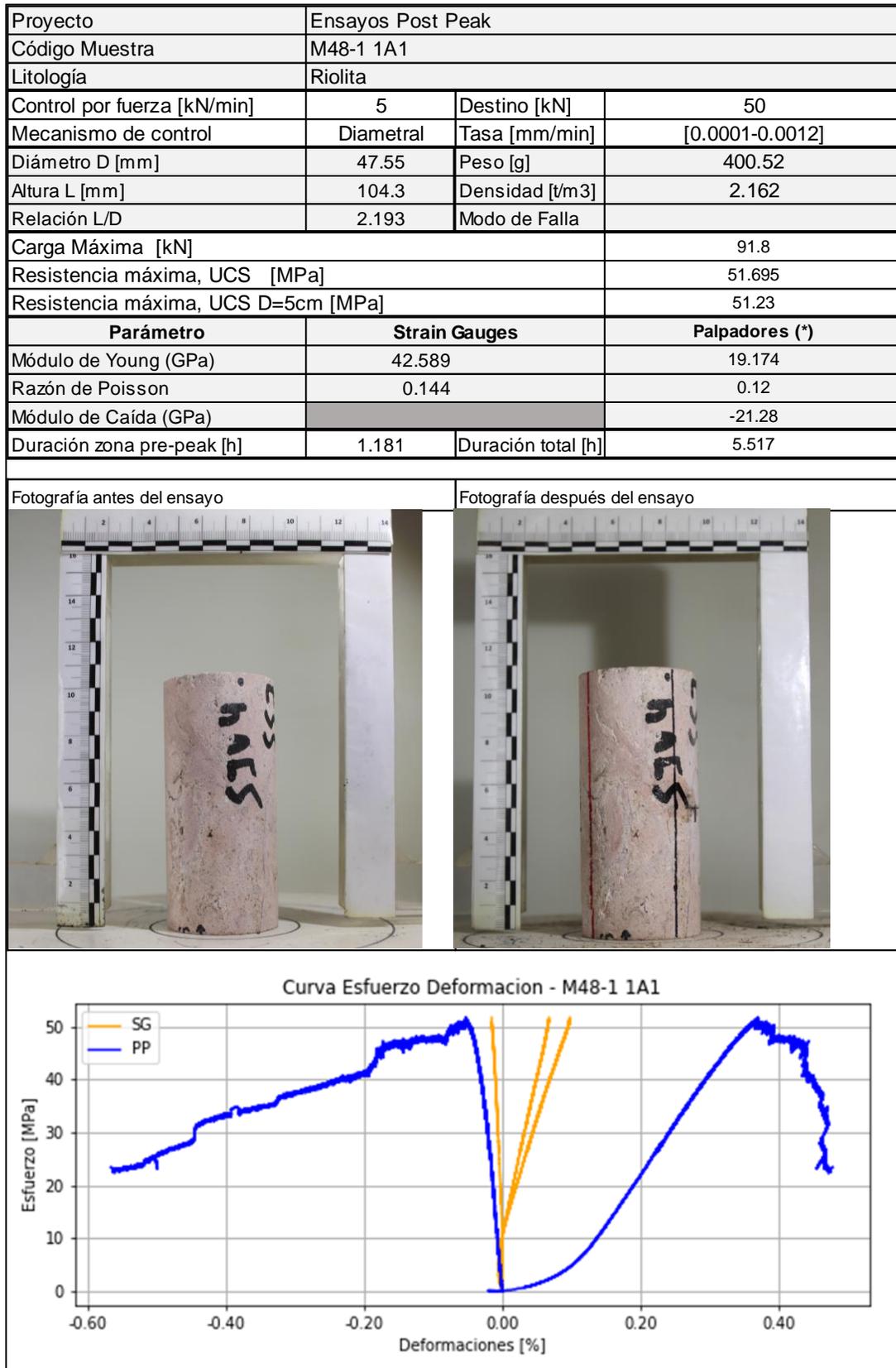


Figura C. 28: Resultados de ensayo en muestra RIO M48-1

- RIO M49-1:

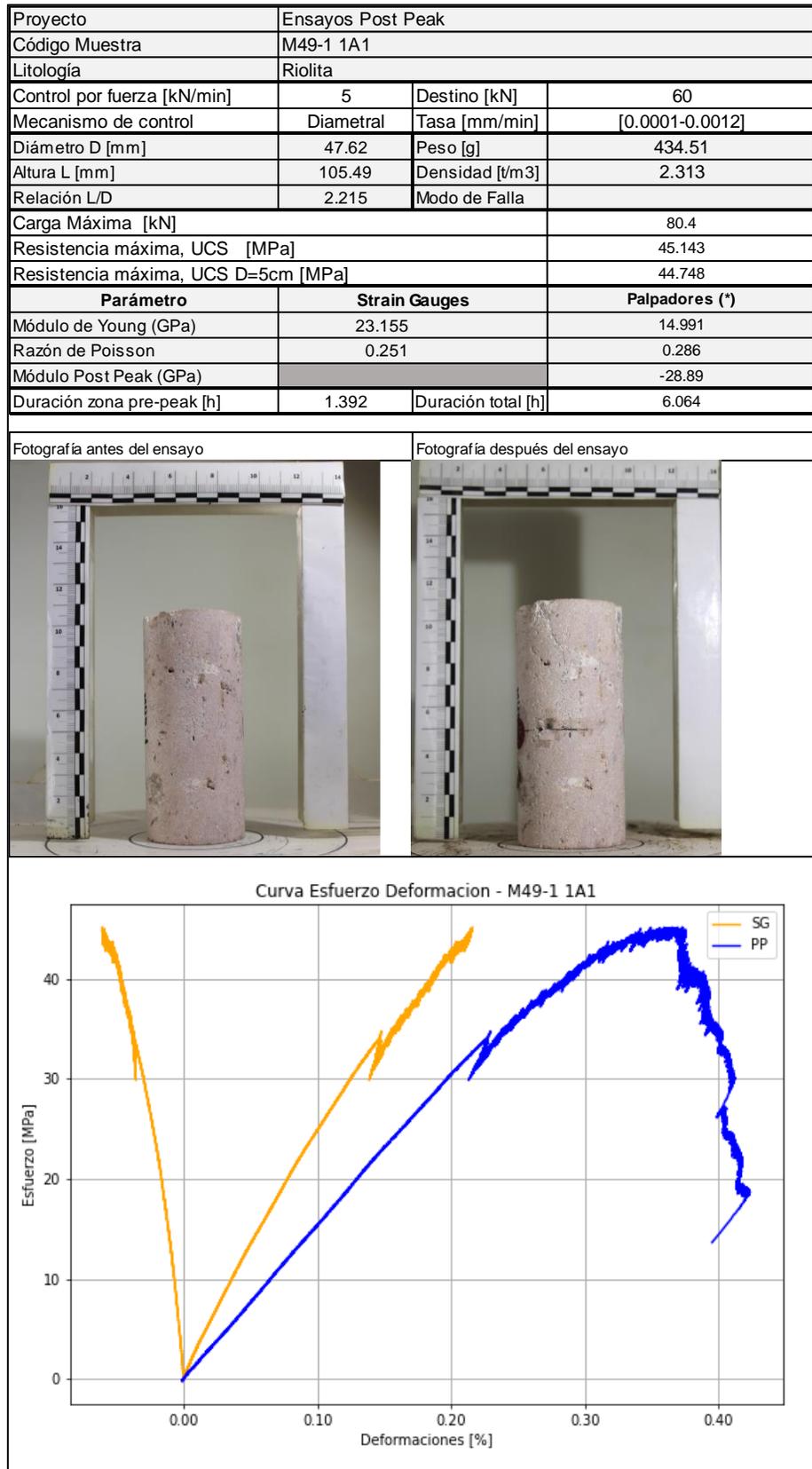


Figura C. 29: Resultados de ensayo en muestra RIO M49-1

- RIO M49-2:

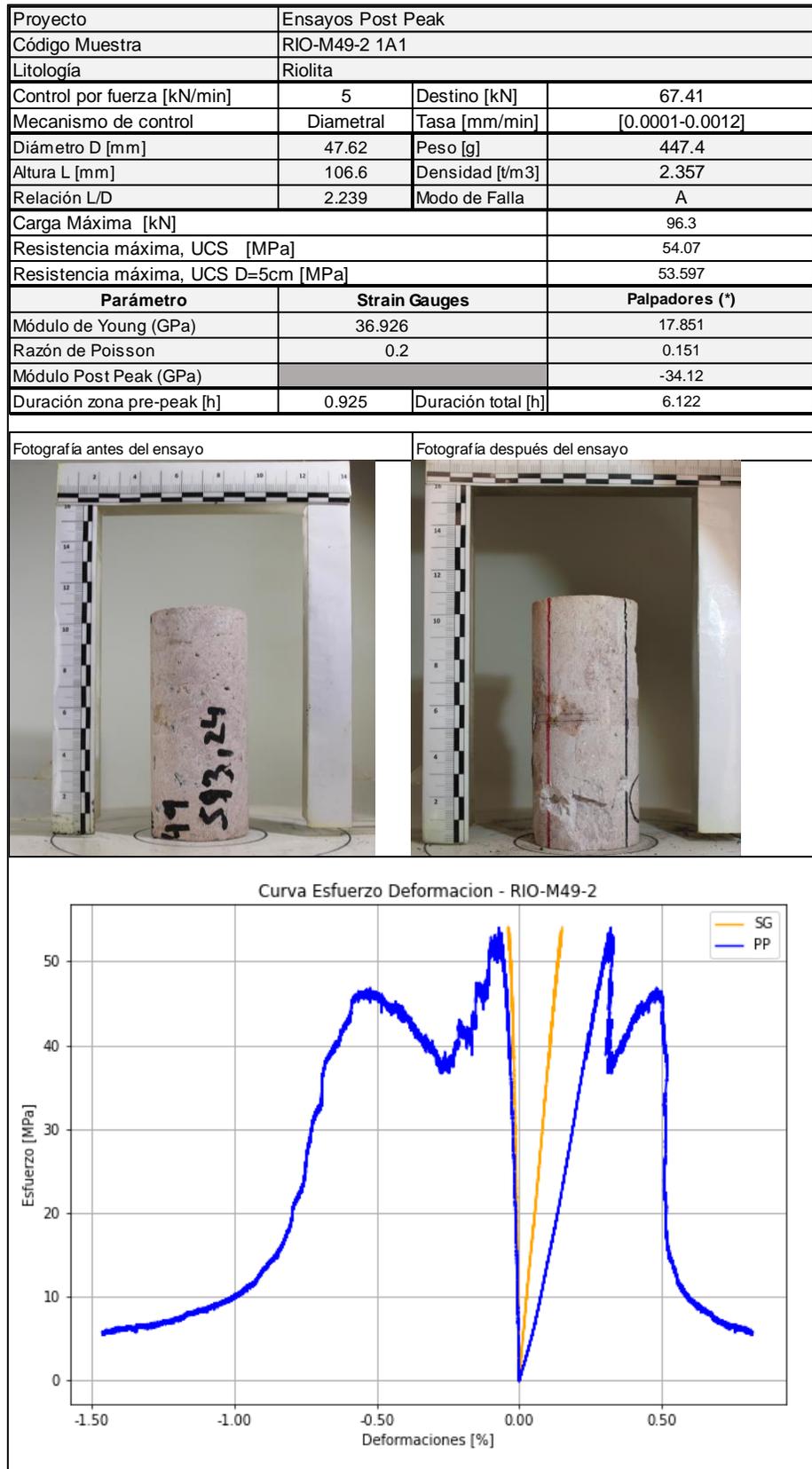


Figura C. 30: Resultados de ensayo en muestra RIO M49-2

- RIO M50-1:

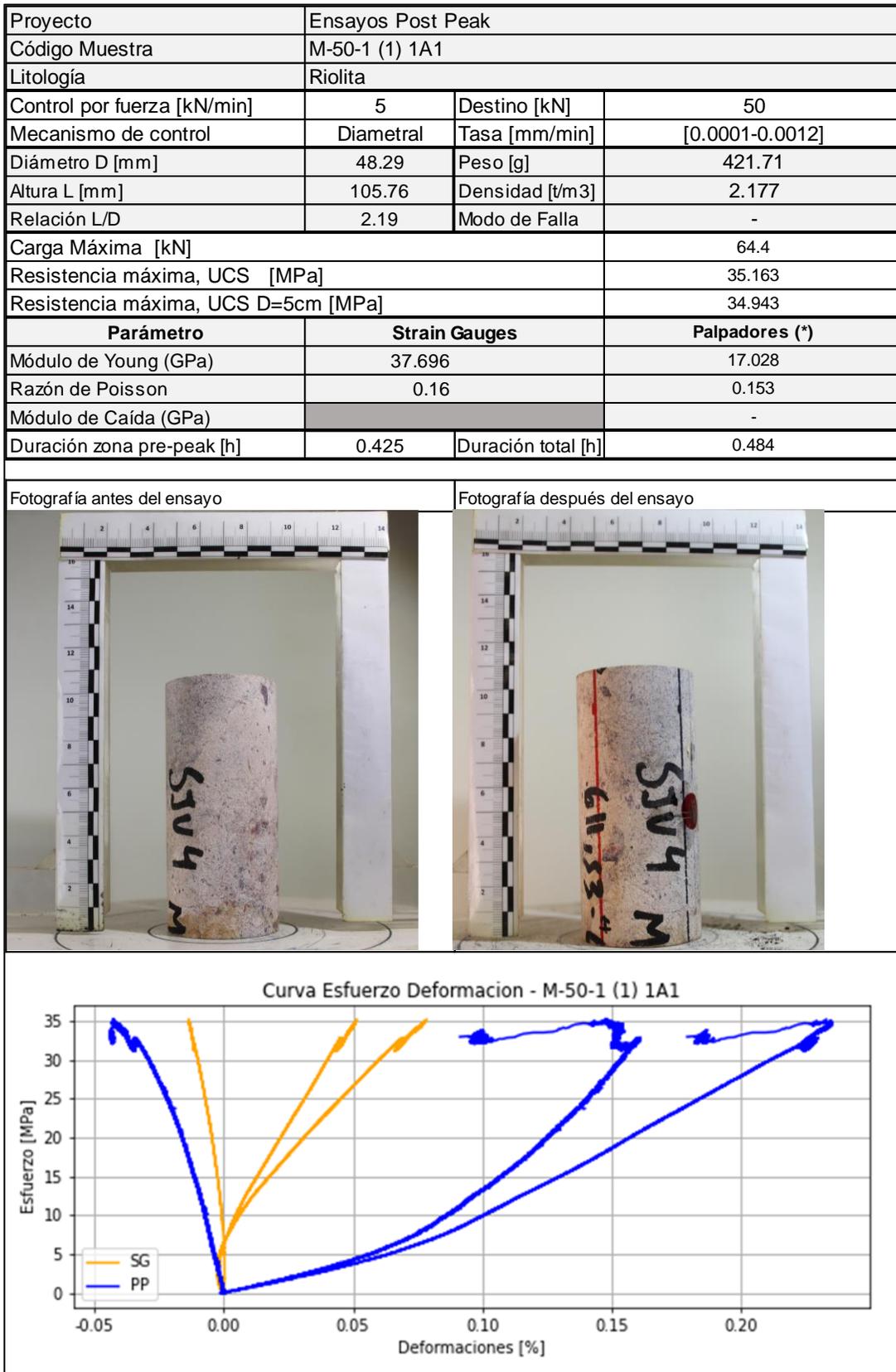


Figura C. 31: Resultados de ensayo en muestra RIO M50-1

- TN 04:

Proyecto	Ensayos Post Peak		
Código Muestra	TN-4V 1A1		
Litología	Tonalita		
Control por fuerza [kN/min]	5	Destino [kN]	180
Mecanismo de control	Diametral	Tasa [mm/min]	[0.0001-0.0012]
Diámetro D [mm]	47.51	Peso [g]	480.12
Altura L [mm]	99.29	Densidad [t/m ³]	2.728
Relación L/D	2.09	Modo de Falla	D1
Carga Máxima [kN]	218.9		
Resistencia máxima, UCS [MPa]	123.477		
Resistencia máxima, UCS D=5cm [MPa]	122.347		
Parámetro	Strain Gauges	Palpadores (*)	
Módulo de Young (GPa)	70.018	35.038	
Razón de Poisson	0.239	0.134	
Módulo Post Peak (GPa)	-		
Duración zona pre-peak [h]	3.02	Duración total [h]	7.84

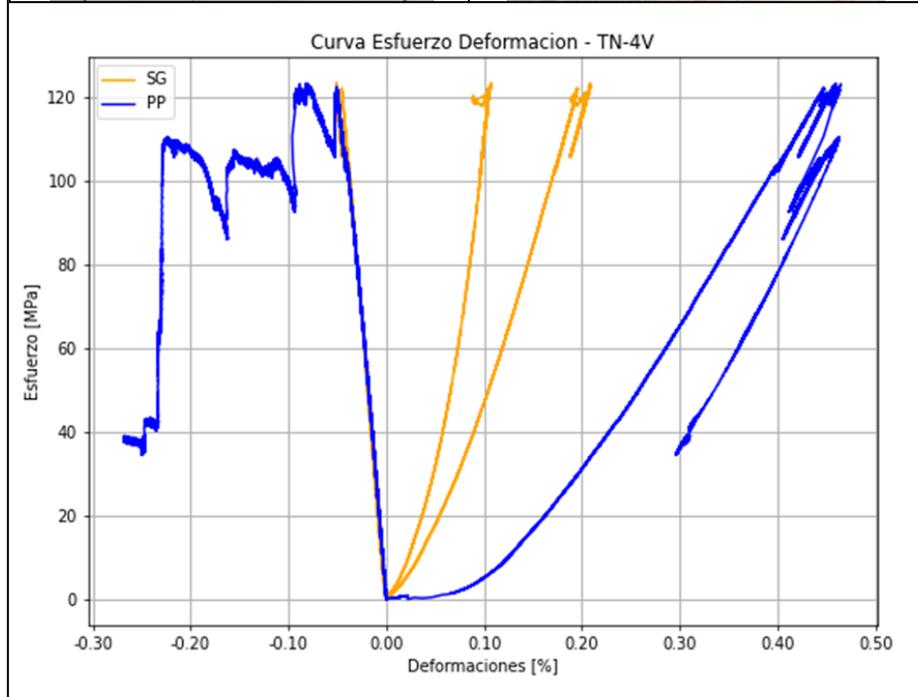
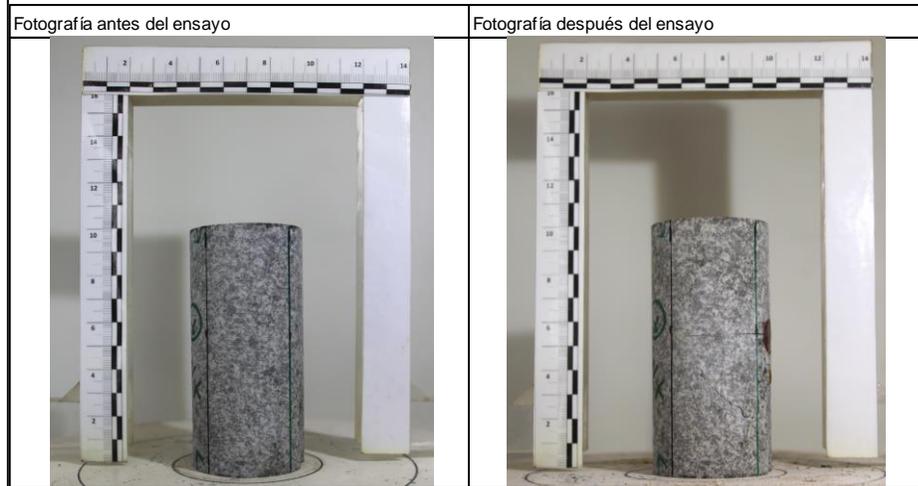


Figura C. 32: Resultados de ensayo en muestra TN 04.

- TN 05:

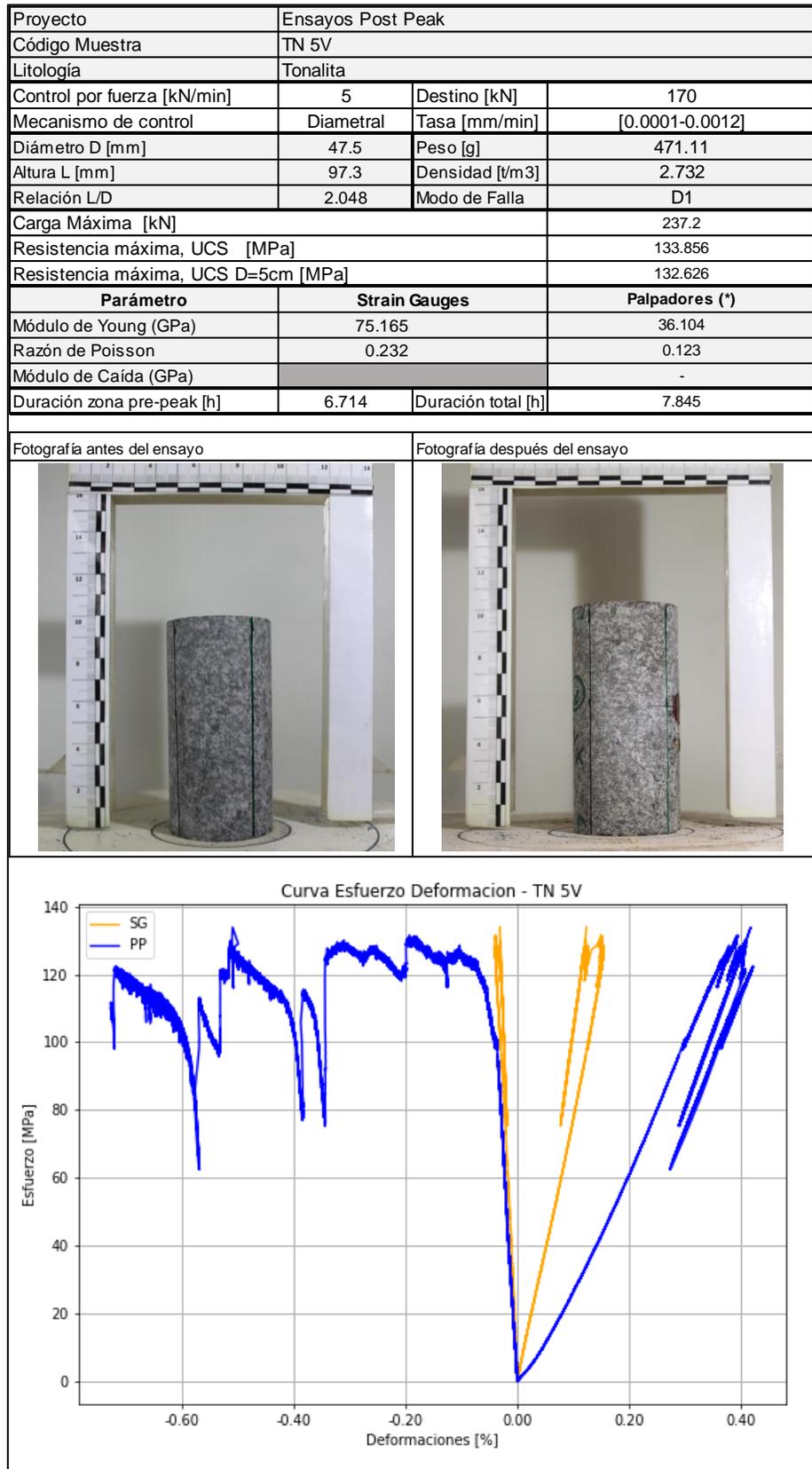


Figura C. 33: Resultados de ensayo en muestra TN 05.

- TN 07:

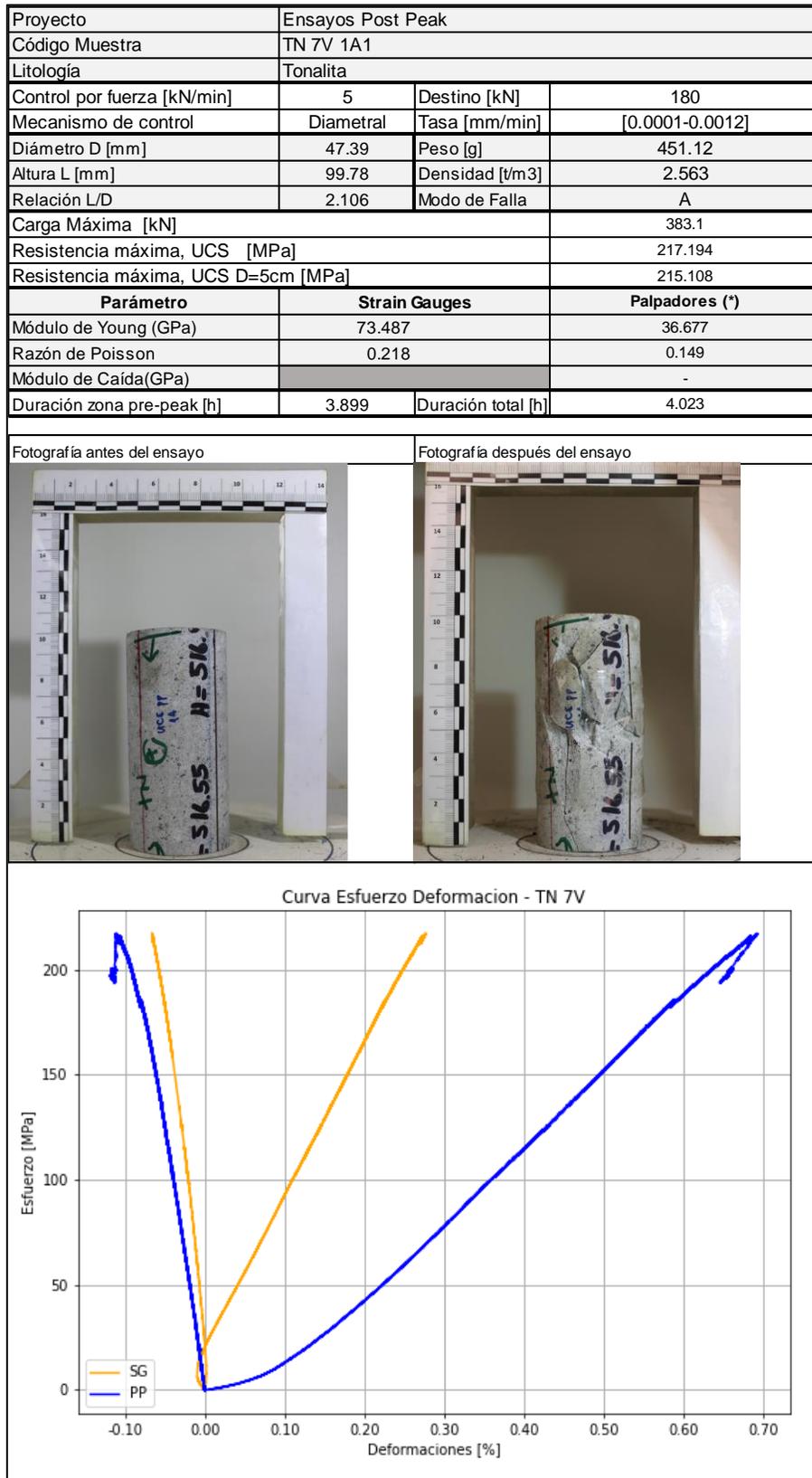


Figura C. 34: Resultados de ensayo en muestra TN 07

- TN 08:

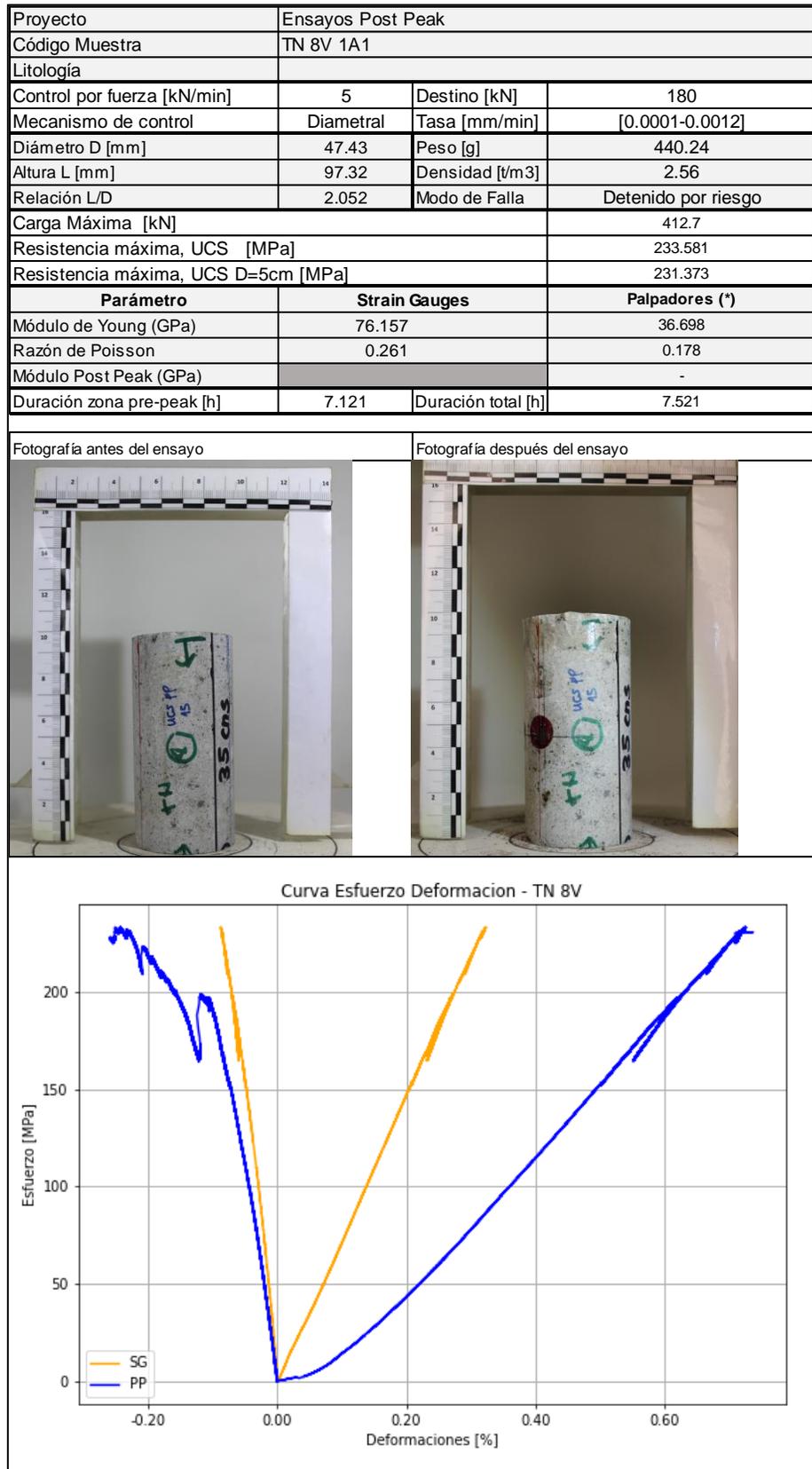


Figura C. 35: Resultados de ensayo en muestra TN 08.

ANEXO D: Información estadística de ensayos y matriz de correlación entre propiedades

Es importante mencionar que los resultados de este Anexo se basan en los resultados de ensayos presentados en el Anexo C que tuvieron un modo de falla por roca intacta (tipo A) o mixto (tipo B). La **Figura D.1** presenta los boxplots con propiedades mecánicas para cada litología.

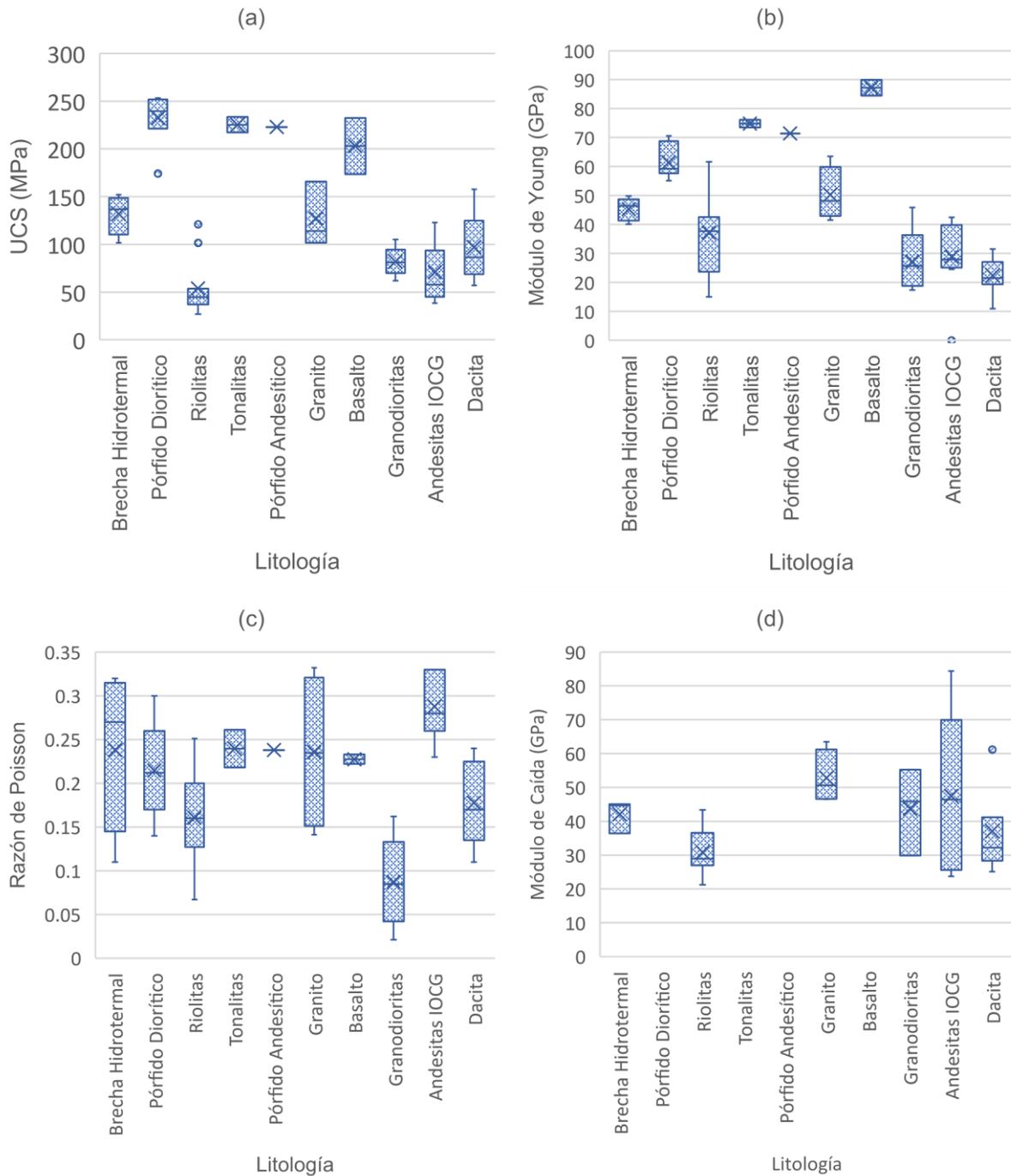


Figura D.1: Características mecánicas de cada litología estudiada, con (a) UCS, (b) módulo de Young estático, (c) razón de Poisson estática, (d) módulo de Caída.

Con respecto a las propiedades índice, se presentan en la **Figura D.2** por litología:

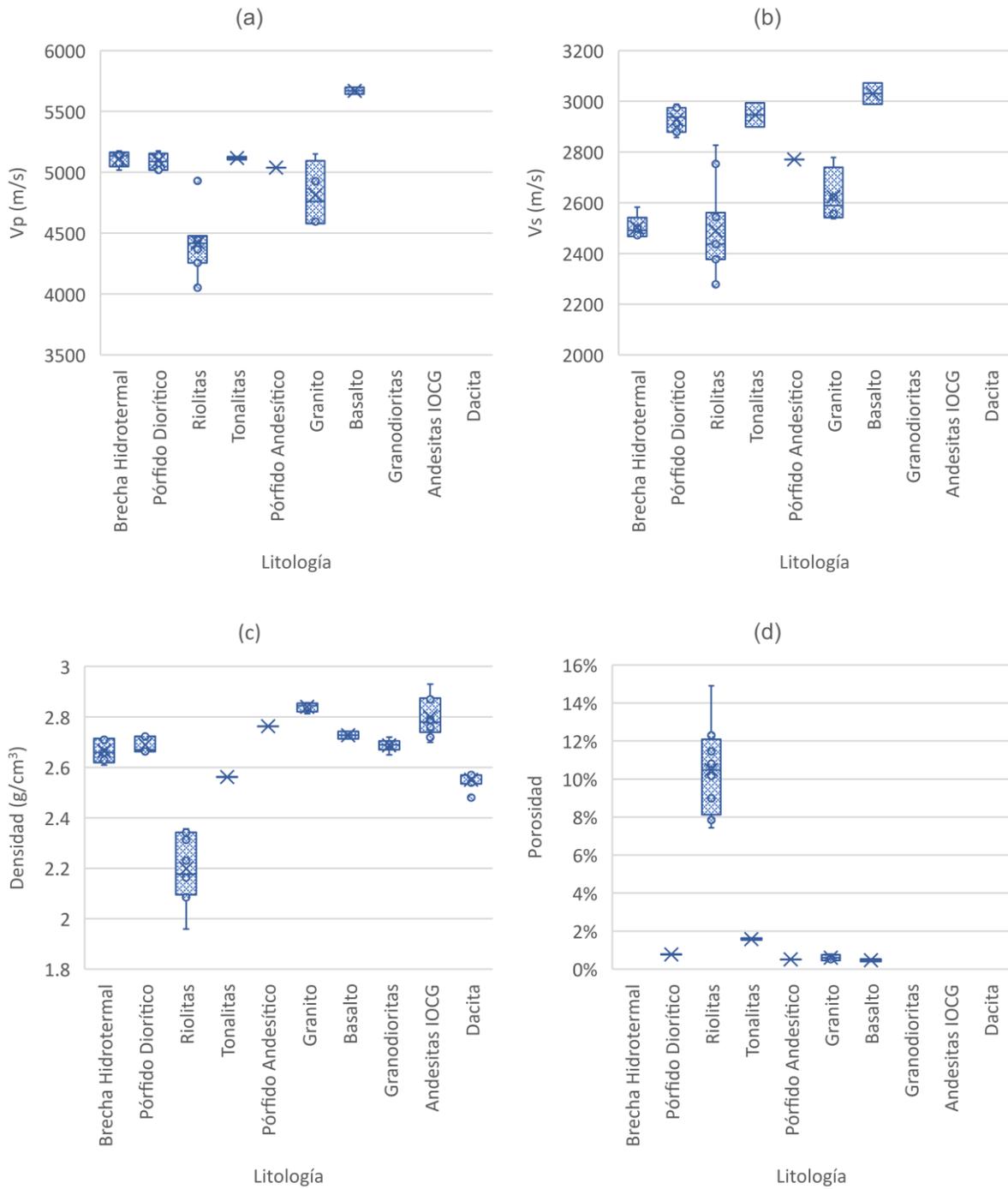


Figura D.2: Propiedades índice de cada litología estudiada, con (a) Velocidad de ondas P, (b) Velocidad de ondas S, (c) Densidad, (d) porosidad.

En cuanto al tamaño de grano promedio y al porcentaje de especies máficas, se presentan en la **Figura D.3** por litología:

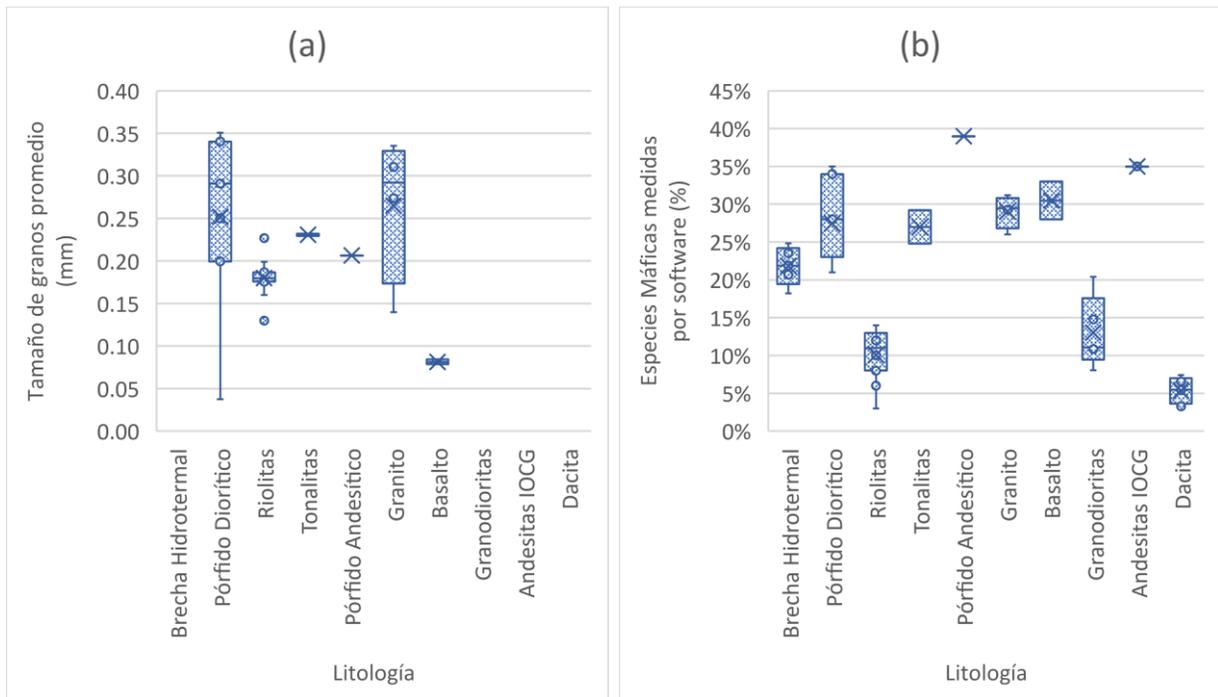


Figura D.3: Caracterización geológica de cada litología estudiada, con (a) tamaño de granos promedio medido a escala de mano a través de un software, y (b) Porcentaje de especies máficas medido a través de un software.

A continuación, se presentan la media y desviación estándar de las variables involucradas en este estudio en la **Tabla D.1**, para poder realizar la normalización de datos e introducirlas al modelo. La **Tabla D.2** presenta la correlación entre las variables analizadas en este estudio, las que presentan un R^2 entre 0.25 y 0.7 han sido destacadas en verde.

Tabla D.1: Media y desviación estándar para muestras estudiadas.

Estadístico	UCS (MPa)	UCS ₅₀ (MPa)	Módulo de Young Estático (GPa)	Razón de Poisson	Porosidad (%)
Promedio	135.2	137.5	54.9	0.21	5.1
Desviación Estándar	78.5	78.2	20.2	0.07	4.8

Tabla D.2: Correlación entre propiedades mecánicas y geológicas medidas.

Correlaciones	UCS (MPa)	E Estático (Gpa)	E Dinámico (Gpa)	Razón de Poisson	Densidad	Porosidad	Velocidad P	% Máficos
UCS (MPa)	1.00							
E Estático (Gpa)	0.63	1.00						
E Dinámico (Gpa)	0.88	0.85	1.00					
Razón de Poisson	0.38	0.03	0.25	1.00				
Densidad	0.71	0.72	0.81	0.42	1.00			
Porosidad	-0.82	-0.75	-0.87	-0.47	-0.96	1.00		
Velocidad P	0.80	0.72	0.89	0.27	0.74	-0.81	1.00	
% Máficos	0.41	0.67	0.68	0.20	0.61	-0.58	0.52	1.00

Estudio de laboratorio para disminuir tiempo de obtención de tramo post – peak

I. Paredes ^{a, c}, S. Flores ^{a, b}, K. Suzuki ^{a, b}

^a *Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile, Santiago, Chile*

^b *Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile, Santiago, Chile*

^c *Departamento de Ingeniería en Minas, Universidad de Santiago, Santiago, Chile*

RESUMEN

La minería realiza actividades en profundidades cada vez mayores producto del agotamiento de los yacimientos superficiales. En este contexto, el estudio del comportamiento mecánico de las rocas en laboratorio toma relevancia considerando que es necesario anticiparse a eventos geomecánicos en ambientes de altos esfuerzos. Para esto, pueden hacerse ensayos de compresión uniaxial con obtención de la curva esfuerzo-deformación completa. Una de las dificultades de realizar este tipo de ensayo en rocas frágiles es que se requieren velocidades de carga muy bajas, lo que resulta en ensayos que pueden demorar varias horas. Por otro lado, gran parte del éxito del ensayo depende de la fragilidad de la muestra y su capacidad para deformarse, de hecho, un ensayo podría fallar antes de haberse podido obtener información alguna de la zona post-peak. El presente estudio busca estudiar el efecto de hacer cambios en la metodología para obtener la curva esfuerzo-deformación completa con el fin de disminuir el tiempo de realización de un ensayo en rocas frágiles. Para cumplir esto, se estudia el efecto de implementar cargas cíclicas en un tramo cerca del peak realizando variaciones en la tasa de deformación. El procedimiento aplicado en los ensayos se basa en la recomendación del ISRM y en estudios previos. Se obtuvieron resultados de ensayos en dos litologías distintas de rocas frágiles, en los cuales efectivamente se logró disminuir el tiempo del tramo post-peak obteniendo una falla controlada. Sin embargo, la disminución no es tan considerable como la obtenida por otros autores en otros tipos de rocas. Como conclusión, este trabajo otorga indicios de qué variables influyen en el tiempo de realización de los ensayos. Se recomienda continuar haciendo investigaciones para determinar si el comportamiento mecánico de rocas frágiles se puede representar con metodologías alternativas a la propuesta por el ISRM.

PALABRAS CLAVE

Ensayos; Post-Peak; Rocas Frágiles.

1 INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento mecánico de las rocas sirve para entender cuál será la respuesta del material rocoso frente a fuerzas externas. Este comportamiento puede estudiarse a partir de una curva esfuerzo–deformación obtenida de un ensayo de compresión con o sin confinamiento. Actualmente, los procedimientos y equipos necesarios para desarrollar estos ensayos están dados por la norma ISRM (Fairhurst y Hudson, 1999), los cuales son necesarios para tener un control sobre la deformación de la

muestra y así obtener una ruptura controlada en todos los tramos de la curva, en la zona previa y posterior a la resistencia máxima. De la curva esfuerzo–deformación es posible rescatar las propiedades mecánicas de las rocas, las cuales ayudan a caracterizar y clasificar una muestra de roca. Un parámetro relevante es el módulo de caída, que se mide en ensayos con obtención de la curva completa en la parte post-peak, y el cual es útil para evaluar el proceso de fracturamiento de una roca y la propensión de que ocurra un estallido de roca en un sector dado (Bukowska, 2013).

La norma actual que se utiliza para ensayos con obtención de curva completa presenta recomendaciones basándose en la clase de comportamiento mecánico esperado en la región post-peak sin hacer hincapié en que existen litologías más frágiles que otras. Este hecho se traduce en que en ocasiones no es posible obtener la curva esfuerzo-deformación completa pese a que los ensayos se llevan a cabo tomando todas las precauciones posibles. Debido a esto, algunos investigadores (Martin & Chandler 1994, Taheri 2013, 2017, Khosravi 2016, entre otros) han probado metodologías de ensayo alternativas con el fin de captar la curva completa, Yi Liu (2021) presenta una revisión exhaustiva de algunas metodologías de cargas cíclicas elaboradas. También se ha pensado en utilizar mecanismos de control distintos a los tradicionales, Sano et al (1982) probó utilizar la deformación volumétrica como variable de control, a la vez que Okubo & Nishimatsu (1990) realizaron ensayos utilizando una combinación entre esfuerzo y deformación para controlar cada prueba.

En el presente estudio se muestra un estudio del efecto de hacer cambios en la metodología aplicada a rocas frágiles con el fin de disminuir el tiempo de obtención de la curva completa. La motivación del estudio está dada por que este tipo de ensayo requiere el uso de velocidades de deformaciones pequeñas, por lo que actualmente requieren mucho tiempo. Por último, para revisar más detalles con respecto a estos ensayos, se recomienda revisar el estudio realizado por Paredes (2022).

2 COMPORTAMIENTO DE LAS ROCAS BAJO COMPRESIÓN UNIAXIAL

Una roca en un ensayo de compresión responde con una deformación propia que ayuda en su clasificación y al conocimiento de cómo podría ser su comportamiento en terreno. De la curva esfuerzo – deformación es posible estimar propiedades mecánicas como el módulo de Young y la razón de Poisson. La obtención de la curva completa esfuerzo–deformación no es sencilla, sobre todo cuando se trabaja con una roca que exhibe un comportamiento frágil, dado que estas rocas que no soportan cambios bruscos de deformación. Peng (1973) y Hashiba et al. (2006) muestran que las variaciones en la tasa de deformación inciden en la forma de la curva esfuerzo-deformación, donde tasas más elevadas permiten alcanzar una mayor resistencia máxima. Komurlu (2018) menciona que la tasa de deformación escogida es crucial, marcando la diferencia entre lograr capturar la curva completa o conseguir un estallido violento al alcanzar la resistencia máxima. Por esto, las velocidades de carga que se aplican en este ensayo deben ser bajas y adecuadas para permitir una ruptura controlada, con el fin de obtener el tramo después de su resistencia máxima.

Para poder obtener el comportamiento post-peak de las rocas bajo compresión, Hudson et al. (1972) y Rummel & Fairhurst (1970) mencionan que en el ensayo se requiere cumplir con ciertas condiciones. El primer autor hace alusión a que este tipo de ensayo se debe realizar en una prensa servo–asistida que permita el control de cualquier variable independiente controlada bajo un sistema “ciclo cerrado” mediante un software instalado en computador con tal de obtener una deformación controlada, además de contar con un tiempo de respuesta de entre 2-50 ms. El segundo autor establece que la rigidez global de la prensa debe superar a la rigidez de la probeta para conseguir capturar la curva esfuerzo-deformación completa.

Con la obtención de la curva completa esfuerzo–deformación, es posible estimar una serie de parámetros en la parte post-peak: el módulo de caída (M), la resistencia residual y el ángulo de dilatación (Tutluoglu, 2015). El enfoque de este estudio es hacia el primero de ellos. El módulo de caída se puede cuantificar como

la pendiente del tramo lineal de la zona post-peak, en caso de que exista, el cual marca la transición de una condición peak a una residual (Dono, 2012) como se observa en la Figura E.1.a. A partir de la forma del tramo post-peak, Fairhurst y Hudson (1999) clasifican dos tipos de comportamientos: clase I y clase II. Las rocas con clase I presentan curvas que mantienen una deformación creciente y que tienen mayor propensión a la deformación, mientras que las rocas con clase II muestran un comportamiento en donde la deformación axial no es creciente (Figura E.1.b). Las rocas clase II acumulan una mayor cantidad de energía de la que necesita para deformarse, por lo que este excedente energético se libera para posteriormente continuar con su deformación (polígono ABDCA de la Figura E.1.b). Estas últimas tienen la particularidad de presentar un módulo de caída positivo, además cabe destacar que existen circunstancias tanto como para las rocas de clase I y II donde es posible observar una tendencia no del todo lineal en la curva, por lo que el cálculo del módulo de caída se dificulta.

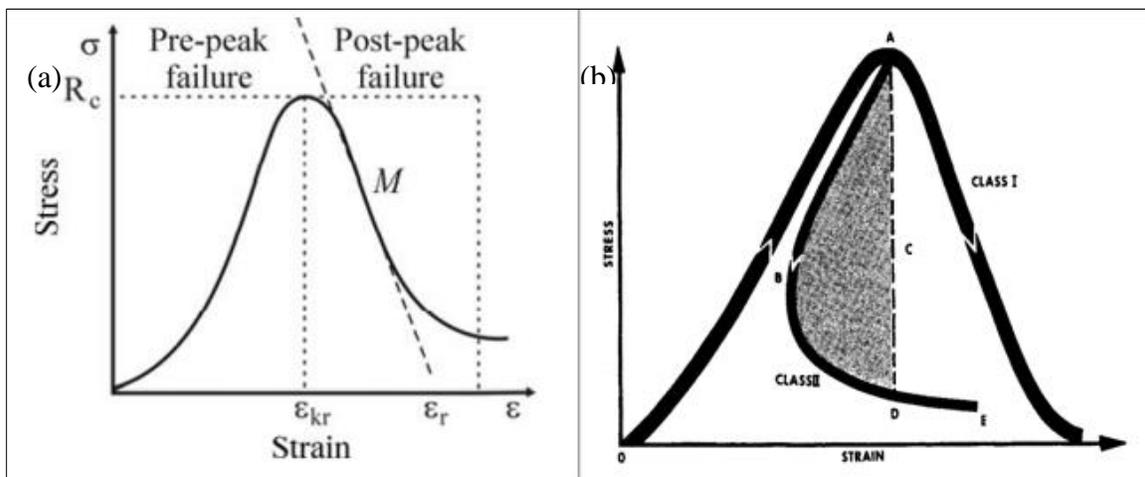


Figura E.1: a) Representación módulo de caída en curva esfuerzo-deformación, Bukowska (2013). b) Clases de curva esfuerzo-deformación, Fairhurst & Hudson (1999).

La norma ISRM (Fairhurst y Hudson, 1999) recomienda formas de controlar el ensayo dependiendo del tipo de clase que presenta la roca. Si se observa un comportamiento clase I, el control de velocidad en la zona post-peak debe ser mediante la deformación axial, mientras que si es clase II el control de velocidad debe ser mediante la deformación diametral. Debido a que no es posible saber qué tipo de comportamiento tendrá la muestra antes de hacer el ensayo, se deben hacer ensayos de prueba.

3 DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

Para el estudio, se realizaron 10 ensayos de compresión uniaxial con obtención de la curva completa. Se utilizaron 2 litologías con comportamiento frágil, ambas provenientes de la mina El Teniente, Chile. Cinco de las muestras son Pórfidos Dioríticos y 5 son Brechas Hidrotermales (Figura E.2). Todas las muestras tienen aproximadamente 63 mm de diámetro y una relación Largo/Diámetro de aproximadamente 2.1. Para la preparación de cada muestra se utilizó la norma ASTM D4543-19 (2019). Algunas muestras poseen vetillas, pero en mínimas proporciones, a pesar de que las muestras extraídas provienen de sondajes realizados en sectores de baja mineralización por lo que la dificultad de obtener un tramo de roca sin la presencia de estructuras es alta. Debido a la alta presencia de vetillas en las rocas de la mina El Teniente, la obtención de un fragmento de roca “intacto” representa una difícil actividad, aunque el concepto de roca intacta ha sido ajustado de tal forma que una probeta posea estructuras las cuales cumplan ciertas condiciones mencionadas por Marambio et al. (2000).



Figura E.2: a) Muestra de litología Pórfido Diorítico. b) Muestra de litología Brecha Hidrotermal.

Por un lado, las muestras de Pórfido Diorítico tienen características similares respecto a su grado de cristalinidad, forma de cristales y orientación de cristales. Las principales características que muestran variación son su composición mineralógica, la cual considera minerales como epidotas, plagioclasas, feldespatos, magnetita, biotita, cuarzo, actinolita, pirita y calcopirita. Por otro lado, las muestras de Brecha Hidrotermal tienen gran variación en composición interna, habiendo muestras donde los clastos exhiben un tamaño de 3 cm mientras que en otras llegaban a los 8 cm. En general, todas las muestras son heterogéneas. Los ensayos de compresión uniaxial se realizaron en la prensa servo–asistida modelo MES300 ubicada en el Laboratorio de Mecánica de Rocas del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile, con una capacidad de 3000 kN, y la cual se controla mediante el uso de un software “PCD2K”. En todos los ensayos se utilizó un soporte metálico para dar altura a la muestra con el fin de que el montaje de soportes quedara bien posicionado. Para medir los desplazamientos tanto axiales como diametrales se utilizaron dos LVDTs y una roseta de strain gauge en el centro de las probetas (Figura E.3).

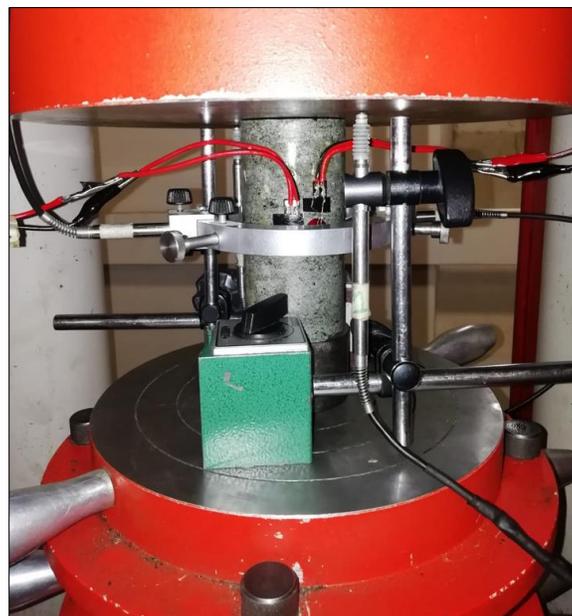


Figura E.3: Configuración de medición utilizado en los ensayos.

4 METODOLOGIA APLICADA

La metodología aplicada en los ensayos se basa en las recomendaciones de la norma ISRM (Fairhurst y Hudson, 1999) y los estudios de dos autores, Khosravi (2016) y de Zúñiga (2020). Khosravi (2016) hace referencia a la aplicación de cargas cíclicas en una zona cercana a la resistencia máxima dado que de esta forma es posible realizar una liberación parcial de la energía elástica almacenada por la probeta (Wawersik y Fairhurst, 1970). Por otro lado, Zúñiga (2020) presenta ensayos exitosos con la obtención del tramo post-peak en muestras de dacita, que son rocas frágiles con comportamiento post-peak clase II. En base a esto, los ensayos consideran 4 etapas (Figura E.4): Las etapas 1, 2 y 3 se basan en la propuesta de Khosravi (2016) y para la etapa 4 se basa en los estudios de Zúñiga (2020).

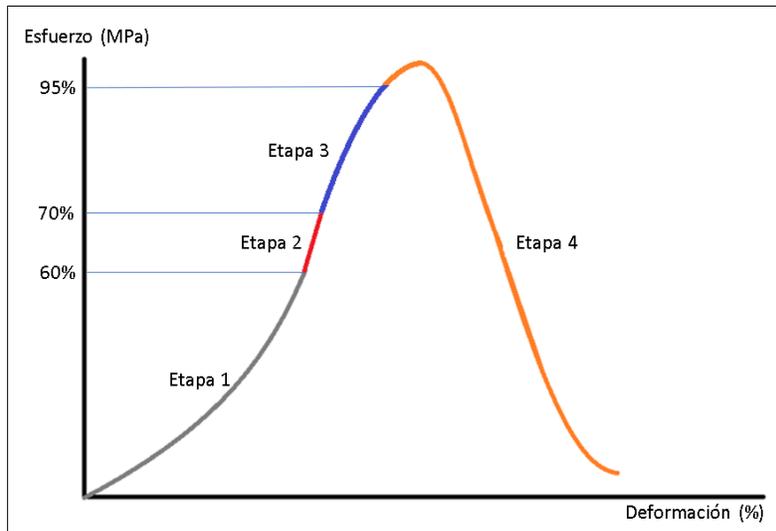


Figura E.4: Etapas de la metodología propuesta.

Las velocidades utilizadas en cada ensayo difieren de las utilizadas por los investigadores, por lo que ha sido necesario hacer uso de tasas de control monótono más bajas de acuerdo con la competencia de las rocas estudiadas. En la Tabla E.1 se presentan las velocidades utilizadas en cada tramo de la curva esfuerzo-deformación, de acuerdo con la Figura E.4.

Tabla E.1: Velocidades utilizadas en cada etapa.

Etapa	Tipo de control monótono	Tasa
Etapa 1	Fuerza	5 kN/min
Etapa 2	Desplazamiento en eje axial	0.005 mm/min
Etapa 3	Desplazamiento axial en fase de carga (FC). Fuerza en fase de descarga (FD)	0.005 mm/min en FC. 5 kN/min en FD.
Etapa 4	Desplazamiento en eje diametral	0.0001 mm/min

Se planteó utilizar la metodología diseño de experimento (DOE por sus siglas en inglés, Design Of Experiment), con el fin de buscar una planificación estratégica para la realización de ensayos que permitan obtener resultados que puedan ser analizados e interpretados de mejor forma. Básicamente, esta metodología consiste en determinar variables o factores que sean de relevancia y que tengan gran impacto en la respuesta del experimento. Existieron algunos inconvenientes que hicieron que el diseño de experimento propuesto se encontrara lejos de ser aceptable, en primer lugar, se contaba con un número limitado y bajo de muestras

y, en segundo lugar, algunos ensayos tuvieron que ser descartados debido a su modo de falla. En el estudio se propone variar 5 factores los cuales variarán para ver su efecto en la respuesta, estas son:

- X1 : Velocidad controlada por fuerza, carga (Etapa 1)
- X2 : Velocidad controlada por deformación axial, carga (Etapa 2 y 3)
- X3 : Velocidad controlada por fuerza, descarga (Etapa 3)
- X4 : Descarga de cada ciclo (Etapa 3)
- X5 : Incrementos entre ciclos (Etapa 3)

De las 5 probetas disponibles por litología, se destinaron dos a ser ensayadas mediante la metodología de Zúñiga (2020) con el fin de obtener una curva de referencia y las demás se ensayaron con la metodología propuesta en este estudio para analizar cambios con respecto a la curva de referencia obtenida.

5 RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

De los ensayos realizados se rescatan 6 curvas medidas con LVDT donde no hubo influencia de estructura (caso de litología Pórfido Diorítico) ni de clastos (caso de litología Brecha Hidrotermal). En la Figura E.5 se observan las curvas esfuerzo-deformación de las muestras de Pórfido Diorítico, es posible observar que la resistencia máxima esperada se encuentra bien estimada debido a que se contaba con más información con respecto a la otra litología, además de que en términos de composición esta resultó ser más homogénea, de esta forma fue posible realizar con éxito los ciclos planificados (aplicación de cargas cíclicas en muestra 12N y 14N). En la litología Pórfido Diorítico no fue posible obtener la zona post-peak aun utilizando la aplicación de cargas cíclicas y la velocidad controlada por deformación más baja lograda por la prensa (0.0001 mm/min), demostrando ser una roca de gran competencia y fragilidad. De la muestra 9N es posible observar un pequeño retroceso de la curva indicando que la litología tendería a ser clase II.

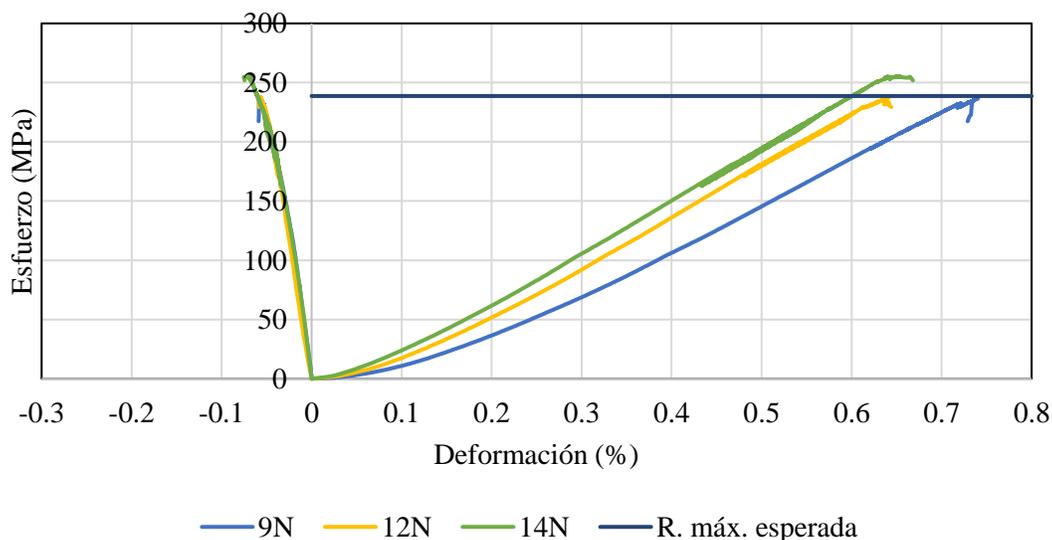


Figura E.5: Curvas esfuerzo-deformación de muestras de Pórfido Diorítico medidas con LVDT.

De las muestras de Brecha Hidrotermal fue posible observar su comportamiento post-peak (Figura E.6) con tendencia a ser clase II. La resistencia máxima esperada se encuentra muy por encima de los peak obtenidos en los ensayos, dada que la estimación se basó solamente en un ensayo previo realizado en esta litología, provocando que los ciclos planificados para las muestras 4V y 1V no se cumplan de forma correcta, de los 13 planificados para ambos casos, en uno se realizaron 3 y en otro 8. El comportamiento irregular de la zona

post-peak es provocado debido a la presencia de clastos, aunque a pesar de dicho comportamiento, los módulos de caída obtenidos poseen poca dispersión entre un rango de 45 – 36 GPa.

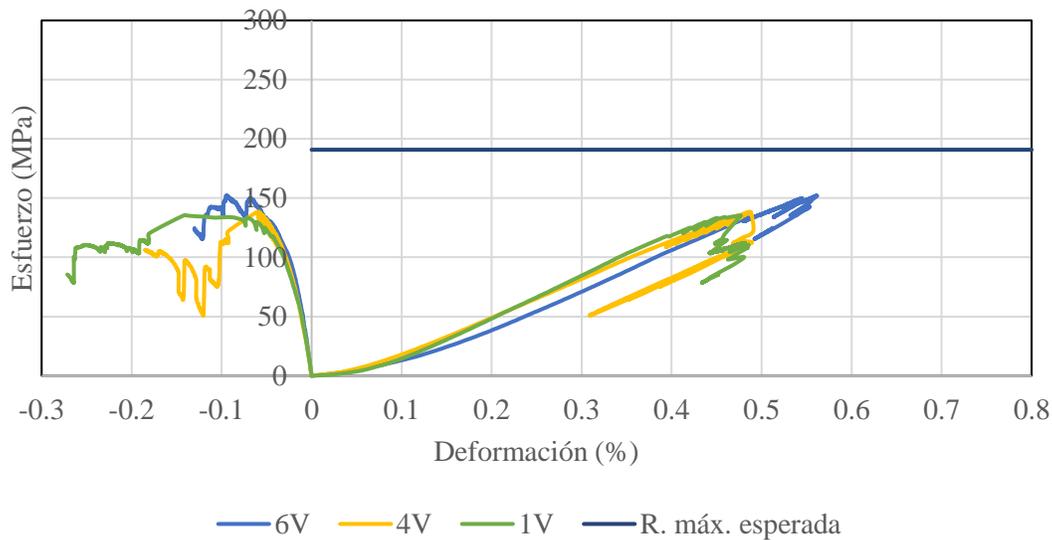


Figura E.6: Curvas esfuerzo-deformación de muestras de Brecha Hidrotermal medidas con LVDT.

Se obtuvieron resultados favorables en ambas litologías. En las muestras de Brechas Hidrotermales se observó una disminución en la obtención de la curva lo que se traduce como una obtención de un esfuerzo menor en la zona post-peak en una menor cantidad de tiempo. Si bien en las muestras de Pórfido Diorítico no fue posible la obtención de la zona post-peak, se evidenció una ruptura más controlada una vez registrada la resistencia máxima. La Tabla E.2 presenta los resultados obtenidos para todas las muestras. Al comparar los resultados obtenidos de las muestras 1V y 4V se observa que, en la última muestra mencionada, la resistencia mínima de la zona post-peak fue de 51.02 MPa llegando a este punto en 4.26 hr, mientras que en la 1V la resistencia mínima fue de 78.56 MPa obtenida luego de 6.49 hr, por lo que se obtuvo una representación más completa de la curva esfuerzo deformación con una diferencia de 2hr aproximadamente. Por otro lado, comparando las muestras 9N y 12N, si bien ambas presentan resistencias máximas similares, en la muestra 9N (sin aplicación de cargas cíclicas) se observa una bajada más abrupta en una menor cantidad de tiempo (de 237.89 MPa a 217.42 en 3 min) con respecto a la muestra 12N (con aplicación de cargas cíclicas).

Tabla E.2: Datos relevantes de los ensayos. Los ensayos sin cargas cíclicas son las muestras 6V y 9N y los con cargas cíclicas son las muestras 1V, 4V, 12N y 14N.

Litología	Brecha Hidrotermal			Pórfido Diorítico			
	ID muestra	6V	1V	4V	9N	12N	14N
Resistencia máxima (R _{máx}) (MPa)		152.09	135.24	138.48	236.89	237.81	255.38
Resistencia mínima en post-peak (R _{mín}) (MPa)		115.44	78.56	51.02	217.42	229.31	251.84
Tiempo entre R _{máx} y R _{mín} (hr)		1.47	6.49	4.26	0.05	0.07	0.003
Cantidad de ciclos realizados		0	3	8	0	15	15

Por último, en la Figura E.7 se realiza una comparación entre las muestras 12N y 14N, ambas con aplicación de cargas cíclicas. Se observa que la deformación volumétrica de la muestra 12N, medida con LVDT, alcanzó el punto de inicio de la dilatancia luego de aplicar las cargas cíclicas, y el ensayo finalizó de manera violenta al alcanzar el peak. Por otro lado, la muestra 14N fue capaz de expandirse volumétricamente

después de aplicar cargas cíclicas, por lo que la red de grietas se propagó de mejor forma antes de alcanzar el peak.

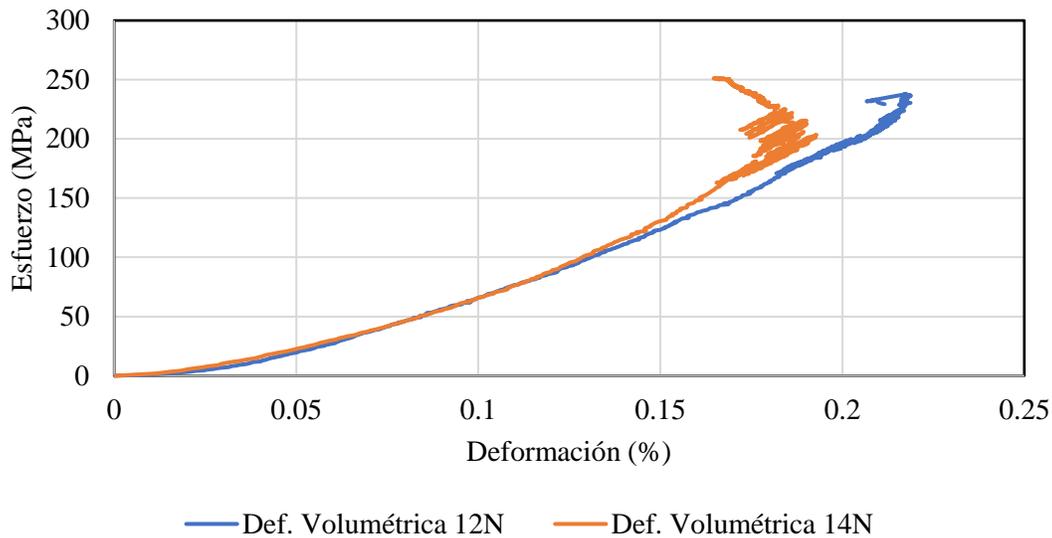


Figura E.7: Comparación de deformación volumétrica entre muestras 12N y 14N (Ambas de Pórfido Diorítico).

En base a los parámetros mecánicos obtenidos de los ensayos, es posible mencionar que las rocas poseen un comportamiento similar entre muestras de la misma litología (Figura E.8). Sin embargo, el rango de la razón de Poisson demostró presentar gran variabilidad en ambos casos, lo cual es un resultado no esperado por parte de las muestras de litología Pórfido Diorítico dado que estas representaban de mejor forma el concepto de una roca tipo “CHILE”. Además, fue posible la obtención del módulo de caída con la metodología propuesta en las Brechas Hidrotermales presentando valores entre 36 – 45 GPa a pesar del comportamiento irregular en la zona post – peak. Tomando en cuenta la dispersión de los módulos de caída obtenidos es posible mencionar que las cargas cíclicas no alteran el valor del módulo dado que estos no presentan gran variabilidad, aunque para asegurar lo mencionado y considerar que el valor sea característico de la roca se recomienda de al menos 5 ensayos con obtención de datos favorables.

6 CONCLUSIONES

La obtención de la curva completa esfuerzo-deformación puede representar una alta dificultad en rocas que demuestran un comportamiento frágil debido a la incertidumbre del comportamiento que tendrá la roca. El diseño experimental propuesto carece de robustez dado que no fue posible observar la influencia entre todos los factores propuestos en su nivel alto y bajo. Sin embargo, en base a los resultados obtenidos en ambas litologías, se identificaron 2 factores que influyeron en los resultados favorables: el factor X3, que representa la velocidad de descarga controlada por fuerza en kN/min, y el factor X4, que representa el porcentaje de descarga. Ambos factores entregaron resultados favorables utilizando su respectivo nivel alto, los cuales del factor X3 Y X4 fueron 20 kN/min y 150% respectivamente. Respecto a los demás factores (X1, X2 Y X5) no es posible generar conclusiones debido a que en todos los casos se usó el mismo valor. En estos casos, no fue posible realizar una comparación.

Se recomienda en estudios futuros realizar más ensayos variando el procedimiento en un mismo tipo de roca. Considerando el largo tiempo que tomaron los ensayos en las rocas ensayadas, se recomienda utilizar muestras más pequeñas manteniendo la relación Largo/Diámetro de 2.0 a 3.0 para que de esta forma las muestras tiendan a soportar menos carga y se pueda disminuir de forma considerable el tiempo del ensayo.

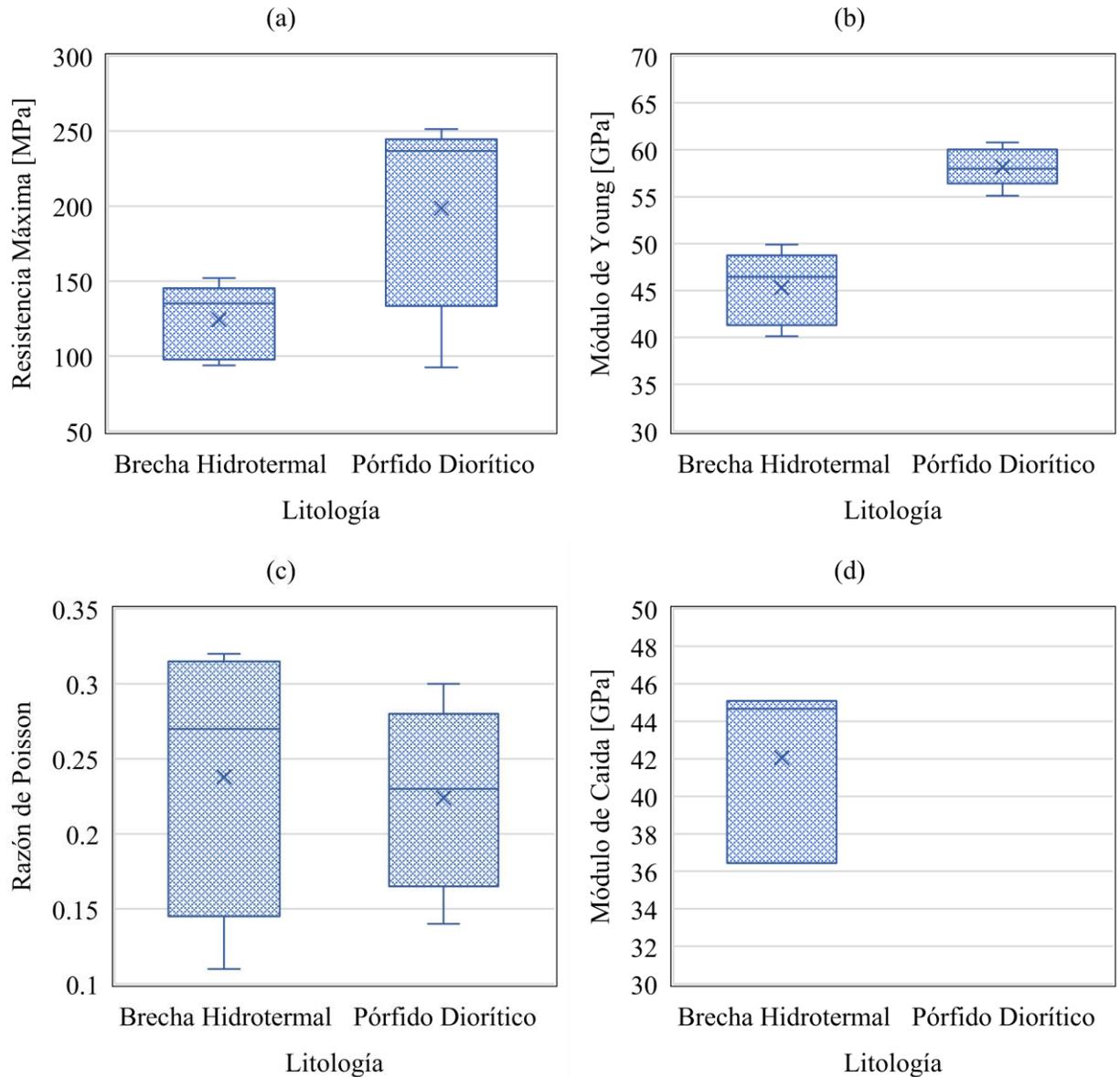


Figura E.8: Resultados por litología de (a) resistencia máxima, (b) módulo de Young, (c) razón de Poisson y (d) módulo de caída.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo financiero del proyecto basal AFB220002 del Centro Avanzado de Minería (AMTC).

REFERENCIAS

ASTM International. (2019). Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances. West Conshohocken, PA: *ASTM International. International Standard ASTM D4543-19.*

- Bukowska, M. (2013). Post-Peak Failure Modulus in Problems of Mining Geo-Mechanics. Pleiades, 2013, *Journal of Mining Science*, Vol. 49, pp. 731-740.
- Fairhurst, C & Hudson, J. (1999). Draft ISRM Suggested Method for the Complete Stress-Strain Curve for Intact Rock in Uniaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 36, pp. 279-289.
- Hashiba, K., Okubo, S., & Fukui, K. (2006). A new testing method for investigating the loading rate dependency of peak and residual rock strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 43(6), pp. 894–904.
- Hudson, J, Crouch, S & Fairhurst, C. (1972). Soft, stiff and servo-controlled testing machines: A review with reference to rock failure. *Engineering Geology*. Amsterdam: Elsevier, Vol. 6, pp. 155-189.
- Khosravi, A. (2016). Estimation and Validation of Post-Peak Behaviour of Hard Rocks. Montréal : École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines, pp. 121-139, Tesis para optar al grado de Doctorado.
- Komurlu, E. (2018). Loading rate conditions and specimen size effect on strength and deformability of rock materials under uniaxial compression. *International Journal of Geo-Engineering*. Vol 9, pp. 1-11.
- Liu Y. & Dai F. (2021). A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 13(5), pp.1203-1230.
- Marambio et al. (2000). Metodología para seleccionar y analizar resultados de ensayos geotécnicos representativos de la roca intacta. *IX Congreso Geológico Chileno. Puerto Varas: Sociedad Geológica de Chile*, 2000, Vol. 1, págs. 283-287.
- Martin, C. D., & Chandler, N. A. (1994). The Progressive Fracture of Lac du Bonnet Granite. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics*, Vol. 31(6), pp. 643–659.
- Okubo, S. Nishimatsu, Y. & He, C. (1990). Loading rate dependence of class II rock behaviour in uniaxial and triaxial compression tests - an application of a proposed new control method, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 27(6), pp. 559 – 562.
- Paredes, I. (2022). Adaptación de metodología basada en la aplicación de cargas cíclicas para la obtención de curva completa esfuerzo - deformación en rocas frágiles. Santiago: Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería. Memoria para optar al grado de Ingeniero en Minería.
- Peng, S. (1973), 'Time-Dependent Aspects of Rock Behavior as Measured by a Servocontrolled Hydraulic Testing Machine', *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics*. Vol. 10, pp. 235-246. Pergamon Press.
- Rodríguez Dono, A. & Alejano, L. (2012). Comportamiento post-rotura de los macizos rocosos: y su aplicación al diseño de excavaciones subterráneas. Editorial Académica Española.
- Sano, O. Terada, & M. Ehara, S. (1982). A study on the time-dependent microfracturing and strength of Oshima granite, *Tectonophysics*, Vol. 84(2-4), pp. 343-362.
- Rummel, F., & Fairhurst, C. (1970). Determination of the Post-Failure Behavior of Brittle Rock Using a Servo-Controlled Testing Machine. In *Rock Mechanics*, Vol. 2.
- Taheri, A. & Chanda, E. (2013). Effects of cyclic loading on pre-peak and post-peak behaviour of a brittle rock. First International Conference on Rock Dynamics and Applications, Lausanne, Switzerland.
- Taheri, A. & Munoz, H. (2017). Post-peak rock strain localization during monotonic and cyclic loading. International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Korea.
- Tutluoglu, L., Oge, İ. F., & Karpuz, C. (2015). Relationship Between Pre-failure and Post-failure Mechanical Properties of Rock Material of Different Origin. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 48(1), pp. 121–141.
- Wawersik, W & Fairhurst, C. (1970). A Study of Brittle Rock Fracture in Laboratory Compression Experiments. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics*. Vol. 7, pp. 561-575.
- Zúñiga, C., Vallejos, J.A., Suzuki, K., Orellana, LF., & Arzúa, J. (2020). Scale effect on the post-peak behavior in uniaxial compression in dacite samples. MassMin - Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining. Virtual Conference.

ANEXO F. Resultados de Cortes Transparentes

- **Muestra PDIO 1N, ubicación A**

Las muestras que a escala de mano fueron clasificadas como diorita. A escala microscópica (**Figura F. 1**), la muestra analizada corresponde a una roca intrusiva compuestas por cristales de plagioclasas de gran tamaño versus un remanente de cuarzo y clorita, donde esta última es resultado de un reemplazo de biotita primaria. La muestra posee unas cuantas fracturas casi sin relleno, textura isótropa, holocristalina, inequigranular, fanerítica y de grano fino, y posee un 26% de cuarzo y 41% de plagioclasas dentro del mineral primario, y 18% de clorita y un 4% de epidota dentro del secundario.

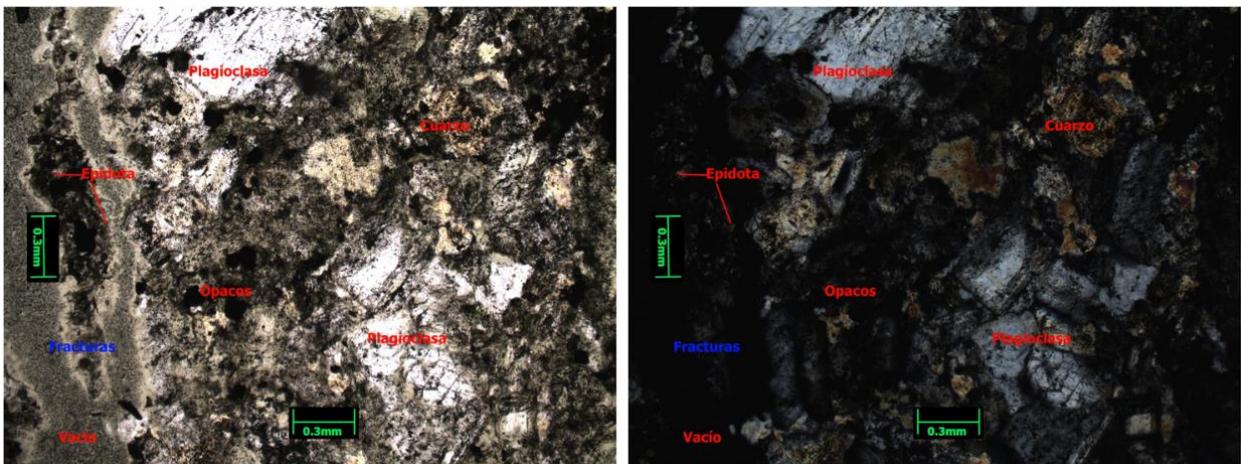


Figura F. 1: Imagen a luz transmitida bajo A) nícoles paralelos y B) nícoles cruzados. Minerales en rojo, estructuras en azul.

- **Muestra RIO M47-2, ubicación B**

Las muestras que a escala de mano fueron clasificadas como riolita. A escala microscópica (**Figura F. 2**), la muestra analizada corresponde a roca alterada pervasivamente con cuarzo Vuggy, óxidos y opacos granulares. El cuarzo parece ser el material original de la roca y los óxidos una disposición posterior, agrupándose en una especie de manchas sin una distribución particularmente homogénea. En la roca suelen aparecer vetillas de grosor variable conteniendo principalmente Vuggy y óxidos. La roca es relativamente homogénea, con grano extremadamente fino, con cristales de tamaño submicrométricos. No se observa una orientación particular. Los cristales se observan comúnmente mal formados y sin forma particular. Composición de 44% cuarzo Vuggy, y el resto corresponden a óxidos que no han sido identificados.

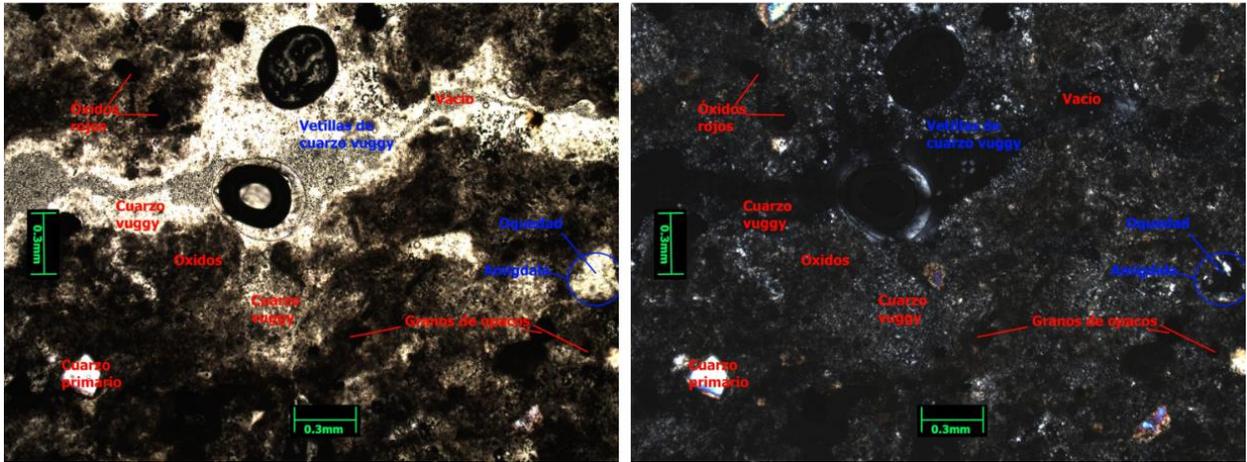


Figura F. 2: Imagen a luz transmitida bajo A) nícoles paralelos y B) nícoles cruzados. Minerales en rojo, estructuras en azul.

- **Muestra BA RT, ubicación C**

Las muestras que a escala de mano fueron clasificadas como basalto. A escala microscópica (**Figura F. 3**), la muestra analizada corresponde a una arenisca fuertemente oxidada, con una matriz de óxido y fragmentos finos de cuarzo. Presenta clastos de origen volcánico junto con cristales de plagioclasas y chert. La roca es relativamente homogénea, masiva e isótropa, tiene depósito secundario de calcita y, se observa un origen sedimentario considerando la aparición de glauconita. La roca es masiva, homogénea y con clastos irregulares, tabulares o alargados, con una madurez media, es clastosoportada. Los clastos de la muestra están compuestos por un 18% de plagioclasas, fragmentos volcánicos y piroclásticos dentro de sus componentes primarios, mientras que la matriz contiene óxidos y fragmentos de cuarzo. Dentro de las especies secundarias se observa Chert, Calcita y Glauconita.

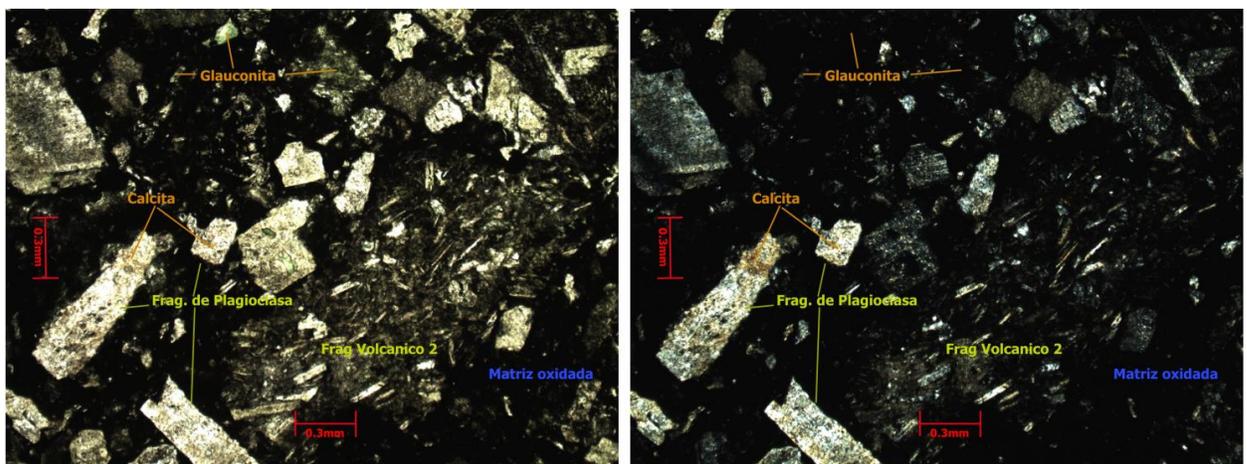


Figura F. 3: Imagen a luz transmitida bajo A) nícoles paralelos y B) nícoles cruzados. Clastos en color amarillo, minerales secundarios en naranja y matriz en azul.

- **Muestra BR RT, ubicación A**

Las muestras que a escala de mano fueron clasificadas como brecha. A escala microscópica (**Figura F. 4**), la muestra analizada coincide con la clasificación anterior, correspondiendo a una brecha homogénea sin estructuras importantes, constituida por una serie de clastos, en especial volcánicos en una matriz de óxidos de tonalidad levemente rojiza. La roca posee gránulos dentro de una matriz muy fina. Los clastos suelen variar de subredondeados a subangulosos, aunque hay excepciones. Los clastos varían bastante en forma, siendo los más comunes los redondeados o tabulares. La muestra es de una roca clastosoportada, con clastos compuestos de fragmentos líticos volcánicos y sedimentarios, cristales de cuarzo y feldespato. Dentro de su matriz se observan óxidos que no se logran identificar correctamente.

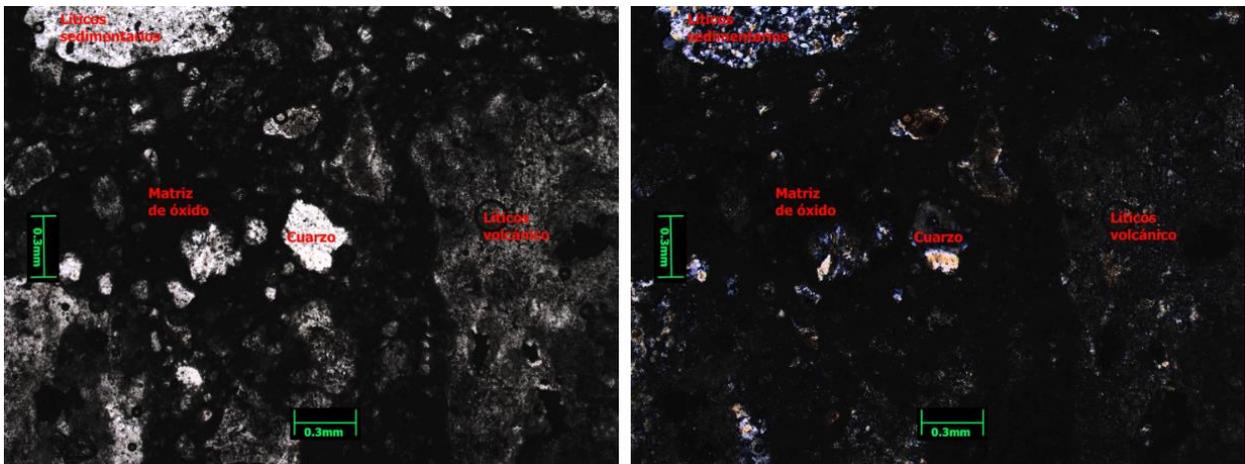


Figura F. 4: Imagen a luz transmitida bajo A) nícoles paralelos y B) nícoles cruzados. Minerales en rojo.

- **Muestra GR RT, ubicación D**

Las muestras que a escala de mano fueron clasificadas como graneodiorita. A escala microscópica (**Figura F. 5**), la muestra analizada es una roca félsica fanerítica, constituida por feldespatos, cuarzo y biotita, en lo que aparente ser un paso a una roca metamórfica con la aparición de actinolita, micas y epidota en un proceso de bandeamiento. Lo anterior, evidencia el posible paso hacia una roca metamórfica. Pero también se identifica la aparición de Sericita, implicando un proceso de meteorización o alteración hidrotermal leve. Presenta una textura general bandeada, aunque sin borde regular, presenta planos rellenos principalmente con mineralogía secundaria de actinolita y epidota, las bandas con cristales se encuentran orientadas y alargadas. La muestra corresponde a una roca holocristalina, inequigranular, fanerítica, con textura acumulada de grano fino a grueso, con cristales hipidiomórficos. Presenta feldespatos en un 32%, cuarzo en un 10% y biotita en un 10%, el resto de las especies son minerales secundarios.

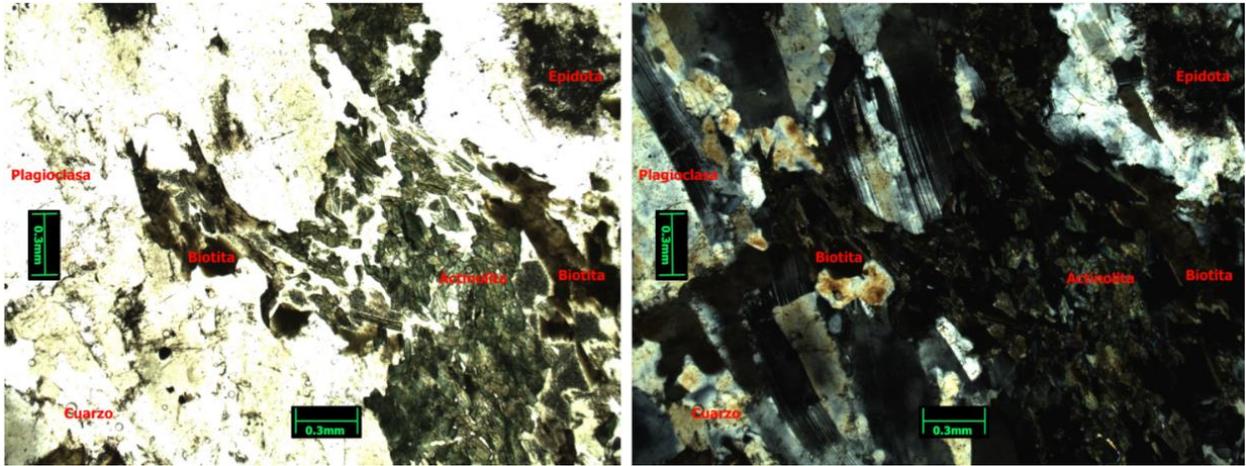


Figura F. 5: Imagen a luz transmitida bajo A) nícoles paralelos y B) nícoles cruzados. Minerales en rojo.

- **Muestra TN RT, ubicación A**

Las muestras que a escala de mano fueron clasificadas como tonalita. A escala microscópica (Figura F. 6), la muestra corresponde a una roca Fanerítica compuesta originalmente por plagioclasa, cuarzo y biotita. La muestra se encuentra medianamente alterada, mostrando claros signos de sericitización de plagioclasas y cloritización de biotita. Con la aparición de epidota en ciertos sectores pequeños. Se puede notar la aparición tanto de vetillas de clorita-cuarzo-sericita como de fracturas en plagioclasa por donde surge la sericita. También hay amígdalas de tamaño intermedio rellenas con opacos, biotita, clorita y cuarzo. Posee un 21% de plagioclasas, 7% de ortoclasa, 14% de biotita, 15% de cuarzo y 12% de micas blancas.

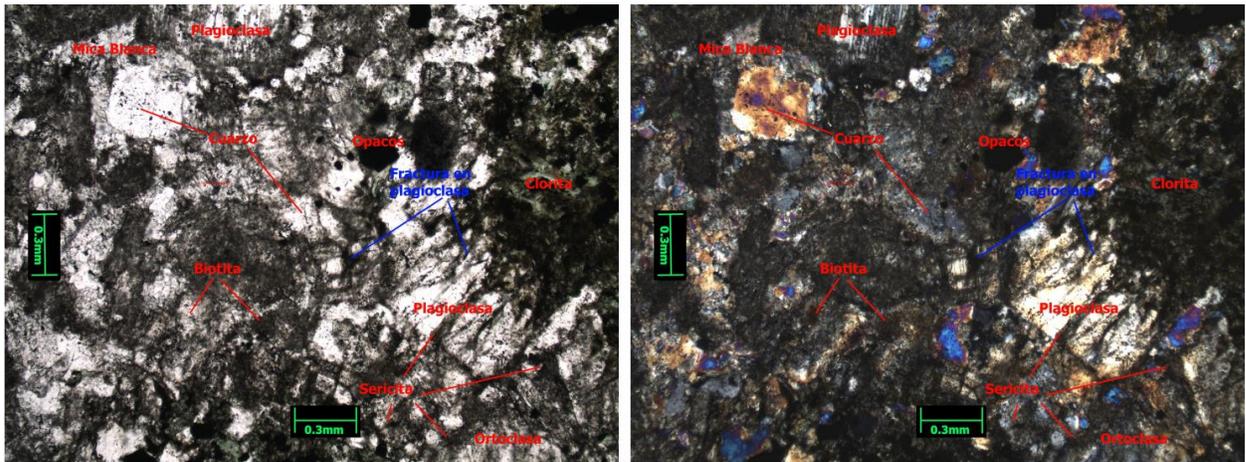


Figura F. 6: Imagen a luz transmitida bajo A) nícoles paralelos y B) nícoles cruzados. Minerales en rojo.

ANEXO G. Modelos Predictivos

A continuación, se presentan modelos para estimar la resistencia máxima, la propensión a fallas violentas y para estimar el módulo de caída. La resistencia y el módulo de caída se ajustan con regresiones lineales y la propensión a fallas violentas con una regresión logística debido a que solo puede haber dos resultados: captar la región post-peak o no. Es importante mencionar que existen diferencias al hacer regresiones lineales o logísticas. En el caso de la regresión logística, se han normalizado las variables de acuerdo con los estadísticos presentados en el Anexo D. Para cada una de las variables dependientes que se buscan predecir, se presentan distintos modelos que incluyen características geológicas, propiedades índices, y propiedades mecánicas pre-peak. Los modelos se ordenan según el R^2 del ajuste y se presenta también el p-value global, y en todos los casos, se considera un nivel de significancia α de 0.05 para determinar si un parámetro es significativo o no.

Estos modelos usan la siguiente simbología para las variables independientes:

UCS:	Resistencia máxima, en MPa.
UCS':	Resistencia máxima, normalizada
E :	Módulo de Young, en GPa.
E' :	Módulo de Young, normalizado.
v :	Razón de Poisson.
v' :	Razón de Poisson, normalizado.
n :	Porosidad.
n' :	Porosidad normalizada.
E _{din} :	Módulo de Young dinámico, en GPa.
ρ :	Densidad, en g/cm ³ .
V _p :	Velocidad de ondas P, en m/s.
Maf:	Porcentaje de especies máficas medido con software de procesamiento de imágenes, en %.

- **Modelo para resistencia máxima**

La **Tabla G.1** presenta una serie de modelos predictivos que permiten estimar la resistencia máxima (variable independiente) a partir de propiedades índice y/o mecánicas (variables dependientes). En naranja se muestran las variables que no fueron incluidas en la regresión porque no son significativas ($p > 0.05$). En este caso, no se incluyen interacciones a los modelos por no ser significativas. En verde se presenta la ecuación con mejor R^2 utilizada para realizar la estimación.

Tabla G.1: Modelos predictivos para la resistencia máxima, UCS.

#	X1	X2	X3	Ecuación, UCS=	p-value global	R ²
1	E _{dyn}	v	ρ	-196.1 + 6.01*X ₁ + 262*X ₂	<0.001	0.80
2	E _{dyn}	n	ρ	-161.7 + 6.45*X₁	<0.001	0.75
3	n	E		199.1 - 1264.5 * X ₁	<0.001	0.68

- **Modelo para estimación de propensión a fallas violentas**

La **Tabla G.2** presenta una serie de modelos predictivos para estimar la propensión a estallidos de roca en los ensayos de laboratorio. Se utilizan regresiones logísticas porque este tipo de modelos permite estimar variables que solo poseen dos estados, representados como 0 y 1. La regresión logística se representa de la siguiente manera:

$$P(1) = \exp(Y') / (1 + \exp(Y')) \quad \text{Ec. G.1}$$

Donde Y' corresponde a la ecuación que compone a P(1), la cual toma el valor de 0 si es que hay una falla violenta y con 1 si es que es posible capturar de la curva esfuerzo-deformación completa en función de las variables mecánicas, índice y/o geológicas. En amarillo se presentan los modelos que poseen una variable no significativa (p > 0.05) pero que, si ha sido incluida dentro de la ecuación. En estos casos, se observa que al incluir una variable no significativa al modelo resulta en un aumento en el p-value global. En verde se presenta la ecuación con mejor R² utilizada para realizar la estimación tal que el p-value de cada variable sea menor a 0.05. En azul se muestra la interacción entre variables. De los resultados presentados en la **Tabla G.2**, destaca que el primer modelo no es confiable porque genera una segregación completa de los datos y no es posible tener estimadores de máxima verosimilitud.

Tabla G.2: Modelos predictivos para estimación de propensión a fallas no controladas.

#	X ₁	X ₂	Ecuación, Y' =	p-value global	R ²
1	UCS'	v'	15.9 - 59.6 * X ₁ + 30.6 * X ₂	Unreliable model	0.99
2	UCS'	n'	0.3 - 5.6 * X ₁ - 2.2 * X ₂	0.060	0.65
3	UCS'	n'	0.3 - 5.6 * X ₁ - 2.2 * X ₂ + 0.1 * X ₁ * X ₂	0.131	0.65
4	UCS'	E'	0.8 - 2.9 * X ₁ - 1.0 * X ₂ - 1.3 * X ₁ * X ₂	0.068	0.65
5	UCS'	E'	0.7 - 3.1 * X ₁ - 0.6 * X ₂	0.027	0.63
6	UCS'		0.6 - 3.1 * X₁	0.005	0.59
7	n'		0.8 + 2.1 * X ₁	0.008	0.35
8	E'		0.4 - 1.5 * X ₁	0.010	0.24
9	v'		0.3 - 0.1 * X ₁	0.848	0.09

- **Modelo para estimación del módulo de caída**

La **Tabla G.3** presenta una serie de modelos predictivos para estimar el módulo de caída (variable independiente) a partir de propiedades índice y/o mecánicas (variables dependientes). En naranja

se presentan las variables que no fueron incluidas en la regresión porque no son significativas (esto es, $p > 0.05$). Los modelos 7, 8 y 9 son iguales, lo que indica que agregar nuevas variables al modelo no mejora el ajuste. Lo mismo ocurre con los modelos 10 y 11. En azul se presenta la interacción entre variables. En verde se presenta la ecuación con mejor R^2 utilizada para realizar la estimación.

Tabla G.3: Modelos predictivos para estimación del módulo de caída, M.

#	X ₁	X ₂	X ₃	Equation, M=	p-value global	R ²
1	E	ρ		$97.1 - 3.4 X_1 - 20.3 X_2 + 1.3 X_1 * X_2$	<0.001	0.91
2	UCS	E	n	$11.9 + 0.1 X_1 + 0.4 X_2 + 314.0 X_3 - 9.7 X_2 * X_3$	<0.001	0.90
3	E _{dyn}	n	ρ	$-122.0 + 0.8 X_1 + 840 X_2 + 47.4 X_3 - 19.1 X_1 * X_2$	0.004	0.87
4	E	n		$39.5 + 0.3 X_1 + 133.0 X_2 - 8.1 X_1 * X_2$	0.002	0.84
5	n	ρ		$-178.4 + 1624 X_1 + 82.1 X_2 - 621 X_1 * X_2$	0.009	0.84
6	E _{dyn}	n		$5.7 + 1.0 X_1 + 549 X_2 - 18.2 X_1 * X_2$	0.0006	0.77
7	ρ	n		$-12.7 + 21.7 X_1$	0.016	0.46
8	ρ	E	UCS	$-12.7 + 21.7 X_1$	0.016	0.46
9	n	E	UCS	$49.9 - 131.0 X_1$	0.025	0.41
10	n	E		$49.9 - 131.0 X_1$	0.025	0.41
11	E			$28.4 + 0.3 * X_1$	0.044	0.35
12	UCS			$33.0 + 0.1 * X_1$	0.176	0.17

