



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

ESTUDIO DE RESPUESTA PEAK Y POST PEAK EN ROCAS ÍGNEAS.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
GEÓLOGO

JORGE IGNACIO VELÁSQUEZ NÚÑEZ

PROFESOR GUÍA:
KIMIE SUZUKI MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JAVIER VALLEJO MASSA
SOFIA REBOLLEDO LEMUS

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:GEOLOGO
POR: Jorge Ignacio Velásquez Núñez
FECHA: 2022
PROFESOR GUÍA: Kimie Suzuki.

Estudio de respuesta peak y post peak en rocas ígneas.

En el presente trabajo se realizaron 23 ensayos de compresión uniaxial en probetas cilíndricas de diámetro 50 y 60 *mm* de litologías ígneas provenientes de distintos depósitos del territorio nacional, además se incorporaron al análisis 9 ensayos del mismo tipo realizados por el investigador Carlos Zúñiga.

El objetivo general de esta investigación corresponde estudiar el comportamiento post-peak de rocas ígneas, encontrar sus respectivas curvas esfuerzo-deformación (axial y diametral) y determinar los parámetros elásticos: Módulo de Young (E), Razón de Poisson (ν), Módulo de Caída (M) y Resistencia a la Compresión (σ). Como objetivos específicos, se buscaron relaciones entre estos parámetros y magnitudes físicas de cada muestra con el fin de estudiar la influencia de características mineralógicas, estructurales, composicionales que afecten estos parámetros.

Los resultados obtenidos permiten establecer una relación entre Módulo de Young y la densidad de las muestras. Siendo éste mayor para muestras de origen máfico y menor en muestras de origen félsico. Se propone una ecuación polinomial con baja correlación entre el Módulo de Young y la Resistencia a la Compresión. Se propone una ecuación polinomial con buena correlación entre el Módulo de Caída y el Módulo de Young, concluyendo que para todas las muestras ensayadas el valor del primero es mayor que el del segundo. Se encontraron discrepancias en valores de Razón de Poisson, Resistencia a la Compresión y densidad geométrica con respecto a las referencias. Las posibles causas de estos valores son analizadas y además, se proponen estudios posteriores para poder robustecer los modelos propuestos.

Agradecimientos

A mi Martín, que sin él esto y miles de otras cosas no tendrían sentido. A mi familia y a la Dani por la paciencia, apoyo y cariño.

A mi hermano menor Alvaro quien me prestó su computador para poder trabajar con las enormes planillas de excel.

A Kimie Suzuki, por guiarme en todo este proceso, por el apoyo y el entusiasmo y compromiso para lograr completar esta investigación.

A Lorena Burgos, por la paciencia y la disponibilidad de enseñarme toda la metodología necesaria para poder realizar los ensayos.

A todo el equipo del Laboratorio de Mecánica de Rocas: David Veloz, Arturo García y Flavia Polanco por su enorme apoyo y buena onda por todas esas horas esperando que resultaran los ensayos.

A Blanca Baccola, por ser una de las personas más preocupadas por los estudiantes en la escuela.

A el profesor Javier Vallejos por conceder el espacio para poder trabajar en el laboratorio y realizar mi memoria.

A toda la gente que conocí a lo largo de la carrera y que me ayudaron, sobre todo en la especialidad: Tamara, Naty, Lukas, Alex, Mauri, Mati, Paula, Andres, Martin, Vicky y Cristobal.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Formulación del estudio.	1
1.2. Objetivos.	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivo Específico	2
1.3. Alcances del estudio	2
1.4. Contexto geológico.	2
1.4.1. Comportamiento mecánico con respecto a textura, estructura y fábrica	4
1.5. Estado del Arte	5
1.6. Estudios Previos realizados en el laboratorio de mecánica de rocas.	9
2. Metodología	12
2.1. Preparación de Muestras	12
2.2. Ensayos	14
3. Resultados de Ensayos	17
3.1. Caracterización geológica de las muestras	17
3.1.1. Descripción cortes transparentes	21
3.2. Ensayos	24
4. Discusión	31
4.1. Parámetros elásticos y litologías	31

5. Conclusiones	42
Bibliografía	46
Anexos	
Anexo A. Caracterización geológica de las muestras ensayadas	47
Anexo B. Registro fotográfico de muestras pre y post ensayo.	53
Anexo C. Curvas de esfuerzo deformación de cada muestra ensayada. yada.	69
Anexo D. Modos de falla y parámetros mecánicos elásticos de rocas ígneas.	77

Índice de Tablas

1.1. Resultados de ensayos de compresión uniaxial en muestras de Basaltos y Microgabros de 5 mm de diámetro.	8
1.2. Resultados ensayos de compresión uniaxial en Dacitas (Pollak et al. 2018). H = Altura; D= Diametro; σ_c = Uniaxial Compressive Strength; E= Módulo de Young; ν = Razón de Poisson; σ_r = Esfuerzo residual; M= Módulo de caída; N/A= No aplica; (1) Control por fuerza; (2) Control por deformación; NIA: No hay información disponible.	9
1.3. Resultados de estudio efecto escala en distintos diámetros de probetas cilíndricas.	10
2.1. Dimensiones de muestras ensayadas en este trabajo.(*). Muestras de Dacita fueron preparadas y ensayadas por Carlos Zúñiga. (Zúñiga et al. 2020) . . .	13
3.1. UCS para 5 sets de muestras.	24
3.2. Resumen parámetros elásticos de 6 sets de muestras ensayadas.	29
3.3. Resumen parámetros elásticos de 6 sets de muestras ensayadas escaladas . .	30
5.1. Rango de valores parámetros elásticos por litología. Para Granodioritas, Dacitas, Andesitas (IOCG) y Andesitas (Vetiforme) parámetros fueron calculados en curvas obtenidas de LVDT. Para Dioritas y Gabros parámetros fueron calculados en curvas obtenidas de Strain Gauges.	42
A.1. Descripción Petrológica muestras ANDIO provenientes de depósito tipo IOCG.	48
A.2. Descripción Petrológica muestras GRD provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.	49
A.3. Descripción Petrológica muestras AND-A,B provenientes de depósito tipo Vetiforme.	50
A.4. Descripción Petrológica muestras Dioritas provenientes de un depósito tipo Pórfido Cuprífero.	51

A.5. Descripción Petrológica muestras Gabro provenientes de un depósito tipo Pórfido Cuprífero.	52
D.1. Modos de falla de todos los sets ensayados, (Marambio et al 1999)	79
D.2. Resistencia a la compresión simple de rocas ígneas. (Modificado de Salinas, 2018. Extraído de Walthan 1999, Rahn 1986, Goodman 1989, Farmer 1968, Jiménez Salas y Justo Alpañés 1975, ; De los Santos 2012)	80
D.3. Módulo de Young de rocas ígneas. (Modificado de I.W.Farmer, 1968. Extraído de Nicholls, 1961;Coates y Parsons,1966; Salinas E, 2018)	81

Índice de Ilustraciones

1.1. Nombres, litología predominante, edades y depósitos asociados de cada periodo magmático andino (Maksaev, 2001)	3
1.2. Diagrama de Streickesen. QZ = Cuarzo, PL = Plagioclasa, AF = Feldespato alcalino.	4
1.3. Esquema de clasificación de rocas ígneas de acuerdo a la composición relativa de minerales en ellas.	4
1.4. Comportamientos post-peak Clase I y Clase II (Wawersik y Fairhurst (1970)).	6
1.5. Curva de esfuerzo-deformación completa.	6
1.6. Curva de esfuerzo-deformación axial en muestras de Basaltos y Microgabro de 5mm de diámetro. (Koshravi, 2016)	8
1.7. Curva de esfuerzo-deformación axial en muestras de Dacita de 5mm de diámetro. (Zuñiga, 2020)	10
1.8. Curva de esfuerzo-deformación diametral en muestras de Dacita de 5mm de diámetro. (Zuñiga, 2020)	11
2.1. Prensa servo-asistida MES300 (izquierda) y computador con software <i>Servosis</i> 2020 (derecha).	14
2.2. Prensa servo-asistida MES300 con muestra montada.	14
2.3. Montaje de LVDT en muestra de 5 mm diámetro en prensa servo-asistida MES300.	15
2.4. Esquemas representativos de método de calculo Módulo de Young y Razón de Poisson.	16
3.1. Fábrica anisótropa en muestras de Andesitas provenientes de depósito IOCG.	18
3.2. Estructuras en muestras de Andesitas provenientes de depósito IOCG. . . .	18

3.3. Textura y estructuras en muestras de Andesitas provenientes de depósito Vetiforme.	19
3.4. Textura y estructuras en muestras Gabro (2 probetas de la izquierda) y Dioritas (2 probetas de la derecha) provenientes de depósito tipo P+orfido Cuprífero.	20
3.5. Textura y estructuras en muestras Granodioritas provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.	21
3.6. Cortes transparentes de Andesitas provenientes de un depósito tipo IOCG.	22
3.7. Cortes transparentes de Granodioritas provenientes de un depósito tipo Pórfido Cuprífero.	23
3.8. Curvas de esfuerzo-deformación para muestras Andesitas provenientes de depósito tipo IOCG. Set de muestras con esfuerzo peak entre 80 y 120 MPa	25
3.9. Curvas de esfuerzo-deformación para muestras Andesitas provenientes de depósito tipo IOCG. Set de muestras con esfuerzo peak entre 30 y 60 MPa	25
3.10. Curvas de esfuerzo-deformación para muestras Granodioritas provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.	26
3.11. Curvas de esfuerzo-deformación para muestras Andesitas provenientes de depósito tipo Vetiforme.	27
3.12. Curvas de esfuerzo-deformación para muestras Dioritas provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.	27
3.13. Curvas de esfuerzo-deformación para muestras Gabros provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.	28
4.1. Esfuerzo máximo de compresión de distintas rocas igneas. (*) Extraído de Khosravi 2016. (**) Extraído de Tutluouglu 2014. Rectángulos morados obtenidos de Tabla D.2. Anexo D	31
4.2. Densidad de muestras de distintas litologías igneas. Rectángulos morados extraídos de Figura D.2. Anexo D. Para Dacita (Ransome F. 1909)	34
4.3. Módulo de Young de distintas rocas Igneas. Para Dacitas, Andesitas (IOCG), Granodioritas y Andesitas (Vetiforme) el cálculo fue hecho en curvas obtenidas de palpadores LVDT. Para Dioritas y Gabros el cálculo fue hecho en curvas obtenidas de Straing Gauges. (*) Extraído de Khosravi 2016. (**) Extraído de Tutluouglu 2014.	35

4.4. Coeficiente de Poisson para muestras ígneas. Para Dacitas, Andesitas (IOCG), Granodioritas y Andesitas (Vetiforme) el cálculo fue hecho en curvas obtenidas de palpadores LVDT. Para Dioritas y Gabros el cálculo fue hecho en curvas obtenidas de Straining Gauges. (*) Extraído de Khosravi 2016. (**) Extraído de Tutluouglu 2014.	36
4.5. Módulo de Young de distintas rocas ígneas con respecto a la Razón de Poisson. Mediciones hechas con datos obtenidos por LVDT.	37
4.6. Módulo de caída de distintas rocas ígneas.	38
4.7. Módulo de Young (E) con respecto a la densidad de rocas ígneas ensayadas.	39
4.8. Esfuerzo Peak (σ) con respecto a la densidad de rocas ígneas ensayadas.	39
4.9. Módulo de Young (E) con respecto a resistencia la compresión (σ) de rocas ígneas.(*) Extraído de Khosravi 2016. (**) Extraído de Tutluouglu 2014.	40
4.10. Módulo de Young (E) con respecto a resistencia la compresión (σ) de rocas ígneas.(*) Extraído de Khosravi 2016. (**) Extraído de Tutluouglu 2014.	41
4.11. Módulo de caída M con respecto a Módulo de Young (E) de rocas ígneas.	41
A.1. Muestra de Andesita proveniente de depósito tipo IOCG.	48
A.2. Granodiorita a muestra de mano.	49
A.3. Muestra de mano Andesita proveniente de depósito tipo Vetiforme.	50
A.4. Muestra de mano Diorita proveniente de depósito tipo Pórfido Cuprífero.	51
A.5. Gabro a muestra de mano.	52
B.1. GRD1 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.	54
B.2. GRD2 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.	55
B.3. GRD3 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.	56
B.4. GRD8 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.	57
B.5. GRD10 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.	58
B.6. ANDIO 1 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.	59
B.7. ANDIO 3 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.	60
B.8. ANDIO 4 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.	61
B.9. ANDIO 5 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.	62
B.10. ANDIO 6 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.	63

B.11. ANDIO 8 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.	64
B.12. ANDIO 9 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.	65
B.13. DIORITA 13 antes de ensayo de compresión uniaxial.	66
B.14. DIORITA 9 antes de ensayo de compresión uniaxial.	66
B.15. DIORITA 19 antes de ensayo de compresión uniaxial.	67
B.16. GABRO 13 antes de ensayo de compresión uniaxial.	67
B.17. GABRO 9 antes de ensayo de compresión uniaxial.	68
C.1. Curvas esfuerzo-deformación medidas con LVDT de Granodioritas provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.	70
C.2. Curvas esfuerzo-deformación medidas con LVDT de Granodioritas provenientes de depósito pórfido. Colores muestran las velocidades de deformación diametral usadas en cada ensayo	71
C.3. Curvas esfuerzo-deformación medidas con LVDT de Andesitas provenientes de depósito IOCG.	72
C.4. Curvas esfuerzo-deformación medidas con LVDT de Andesitas provenientes de depósito IOCG. Colores muestran las velocidades de deformación diametral usadas en cada ensayo.	73
C.5. Curvas esfuerzo-deformación medidas con LVDT de Andesitas provenientes de depósito tipo Vetiforme.	74
C.6. Curvas esfuerzo-deformación medidas con strain Gauge de Dioritas provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.	75
C.7. Curvas esfuerzo-deformación medidas con Strain Gauge de Gabros provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.	76
D.1. Distintos modos de fallas según Marambio et.al. 1999.	78
D.2. Densidad de rocas ígneas. (Jürgen H. Schön, 2015)	80
D.3. Razón de Poisson de distintas litologías. (H. Gercek, 2006)	81
D.4. Variaciones del Módulo de Young con respecto a Coeficiente de Poisson, Densidad y resistencia a la compresión. (Modificado de I.W.Farmer, 1968. Extraído de Judd y Huber 1961)	82

Capítulo 1

Introducción

1.1. Formulación del estudio.

La actividad minera subterránea está propensa a varios riesgos, siendo los más temidos aquellos que ocurren de manera inesperada como los estallidos de roca. Es por esto que, los diseños asociados a esta actividad y ante estas condiciones requieren contar con información del comportamiento mecánico del macizo rocoso sujeta a esfuerzos de compresión que permita predecir la respuesta del sistema ante las condiciones de esfuerzo presentadas en profundidades. En Chile, así como en otras partes del mundo, la explotación minera se está llevando a cabo y proyectando a profundidades mayores a 500 m, teniendo como consecuencia altos niveles de riesgo de potenciales desastres relacionados a grandes concentraciones de esfuerzos.

En ensayos de compresión uniaxial o triaxial, la obtención y estudio de la curva esfuerzo-deformación es relevante para poder describir el comportamiento mecánico de un material. (Fairhurst and Hudson 1999; Hashiba et al. 2006; Hudson et al. 1971; Okubo and Nishimatsu 1985 Wawersik and Fairhurst 1970). Los primeros estudios, a escala de laboratorio, que buscaron obtener esta curva, fueron realizados usando cargas cuasi-estáticas (Hudson et al. 1971; Rummel and Fairhurst 1970; Wawersik and Brace 1971; Wawersik and Fairhurst 1970) y clasificaron el comportamiento de las muestras ensayadas en dos clases. Clase I donde la propagación de las fracturas es estable, y clase II donde la propagación es inestable.

En escala de laboratorio, para obtener la curva esfuerzo-deformación completa, se requiere un equipo servo-asistido con alta rigidez como la prensa servo-asistida MES300, perteneciente al Advanced Mining Technology Center (AMTC) en conjunto con el Departamento de Ingeniería de Minas (DIMIN) de la Universidad de Chile. Este equipo cuenta con una capacidad de hasta 3.000 kN de carga a compresión, con sistema servo-asistido y una rigidez que supera la rigidez de las probetas a ensayar, permitiendo ejecutar ensayos mediante control de la deformación axial y diametral, que es la única manera de poder obtener la curva completa de esfuerzo-deformación

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo General

Caracterizar el comportamiento peak y post-peak de rocas ígneas, a través de la realización de ensayos de compresión uniaxial.

1.2.2. Objetivo Específico

1. Caracterizar las muestras ensayadas de acuerdo a su composición mineralógica, minerales de alteración y estructuras (composición, espesor, disposición) .
2. Descripción detalla de los parámetros geomecánicos (UCS, Módulo de Young, Razón de Poisson, Módulo de Caída y densidad geométrica) para cada muestra litología ígnea ensayada.
3. Buscar variaciones significativas en los parámetros geomecánicos de acuerdo a variaciones mineralógicas en las muestras ígneas ensayadas.

1.3. Alcances del estudio

Los resultados y estudio aquí pesentados se limitan a ensayos de compresión uniaxial en probetas cilíndricas, en los cuales se usaron sensores LVDT para medir deformaciones de las muestras. Estos ensayos se realizaron exclusivamente en muestras de origen ígneo, clasificadas de esta manera, usando el diagrama de ternario QAP (Streckeisen et al, 2002).

Los resultados y análisis expuestos en esta memoria, son en estricto rigor válidos para escala de laboratorio y para rocas de origen ígneo. Su extensión a muestras de otro tipo u origen sólo debería tomarse referencialmente.

1.4. Contexto geológico.

El magmatismo andino es un término que se refiere a los alforamientos plutónicos, volcánicos y volcans sedimentarios que pueden encontrarse en el borde oeste de la placa continental Sudamericana. Este magmatismo en la cadena andina es el producto de la subducción de la placa oceánica en la placa continental que se ha mantenido desde los 200 Ma hasta la actualidad (Mpodozis y Ramos 1989). El producto más abundante de este magmatismo son las Andesitas, litologías con un contenido intermedio de SiO_2 -alkali que comunmente exhiben texturas porfíricas con fenocristales de plagioclasas, clinopiroxenos y anfíbolos. Inmersas en una masa con vidrio, plagioclasas microlítica y titanomagnetita. (Gill. 1981). Producto también, de este largo proceso orogénico es la aparición de los depósitos minerales de interés económico tales cómo pórfidos cupríferos, IOCG, depósitos mantiformes y epitermales (Figura

1.1). El control estructural y la signatura geoquímica del magmatismo andino han permitido la aparición de estos depósitos dispuestos en una franja de orientación aproximadamente N-S donde la deformación de la corteza superior mediante estructuras dúctiles y frágiles actuaron como canales litosféricos de fluidos magmáticos e hidrotermales que generan un tipo de mineralización predominantemente en vetas, vetillas y boxworks.

	Units	Main Lithologies	Related Ore Deposits*	Age Range
Early Andean Magmatism	Sierra Laguna Beds, Agua Chica Fm, La Negra Fm, Cifuncho Fm, Pichidangui Fm	Basaltic andesite, Andesite		Rhaetian-Toarcian
	Oficina Viz Fm, La Negra Fm, Camaraca Fm, Los Tarros Fm, Punta Barranco Fm, Punta del Cobre Fm, Aeropuerto Fm, Agua Salada Volcanic Complex, Arqueros Fm, Ajjal Fm, Veta Negra Fm	Andesite	Stratabound Cu-Ag, IOCG, Magenite-Apatite	Aalenian-Aptian
	Morro Mejillones Tonalite, Algodones Granite, Carrizal Bajo Plutonic Complex, Talinay Plutonic Complex, Cobquecura Pluton, Hualpén Pluton	Tonalite, Granodiorite		212–200 Ma
	Coastal Batholith	Diorite, Tonalite, Granodiorite	IOCG, Magnetite-Apatite	200–145 Ma
	Coastal Batholith	Tonalite, Granodiorite	IOCG, Skarn	145–100 Ma
Late Cretaceous	Suca Fm, Pachica Fm, Cerro Empexa Fm, Cerro Cortina Fm, Quebrada Mala Fm, Paradero del Desierto/Los Trigos Fm, Cerro Azabache Fm, Llanta Fm, Cerrillos Fm, Hornitos Fm, Viñita Fm, Los Elquinos Fm, Salamanca Fm, Lo Valle Fm, Plan de los Yeuques Fm	Andesite, Dacite minor rhyolite; locally basaltic andesite	Epithermal Au-Cu, Porphyry Cu	Albian-Maastrichtian
	Sierra Buitre Batholith, Illapel Plutonic Complex, Caleu Pluton, minor plutonic bodies	Granodiorite, Granite	Porphyry Cu-Au	100–65 Ma
Paleocene-Eocene	Icanche Fm, Chincado Fm, Calama Fm, Augusta Victoria Fm, Chile-Alemania Fm, Venado Fm, Estero Cenicero Fm	Dacite, Rhyolite Andesite	Porphyry Cu-Mo Epithermal Au-Cu	Danian-Lutetian
	Columtuesa-Japu, El Bosque, Loma Colorada, Cuarto Chinchillero, Encanto, and Cuncumén granites. Minor porphyry plutonic bodies	Granite, Granodiorite	Porphyry Cu-Mo	65–42 Ma
Up Eocene-Low Miocene	North of 28°S: subvolcanic and caldera-type deposits	Dacite, Rhyolite	Porphyry Cu-Mo	Bartonian-Aquitian
	South of 28°S: Abanico Fm, Cura-Mallín Fm	Basaltic andesite, Basalt		
	Shallow intrusive complexes and porphyries	Granodiorite, Granite	Porphyry Cu-Mo	42–21 Ma
Miocene	North of 27°S: Ignimbrites Oxaya, Lupica, Altos de Pica (Fm), Tambillo, Río Frío, Lauca, Collacagua, La Pacana, Toconao, Atana, Tucúraró, Patao, Cajón Tuyajto, Llano Las Vicuñas, Inés Chica, Los Cristales, San Andrés, Wheelwright, Laguna Verde. San Bartolo Group	Rhyolite, Dacite	Epithermal Au-Ag Porphyry Au	Burdigalian-Messinian
	South of 28°S: Farellones Fm (and equivalents)	Andesite	Porphyry Cu-Mo	
	Shallow intrusives	Granodiorite, Granite	Porphyry Cu-Mo	21–5 Ma

*IOCG: iron oxide-copper-gold deposits, Cu: copper, Au: gold, Ag: silver, Mo: molybdenum

Figura 1.1: Nombres, litología predominante, edades y depósitos asociados de cada periodo magmático andino (Maksaev, 2001)

En particular, para el presente estudio se consideraran las rocas ígneas. Clasificadas de esta manera según el diagrama ternario de Streckeisen. (Streckeisen et al. 2002)

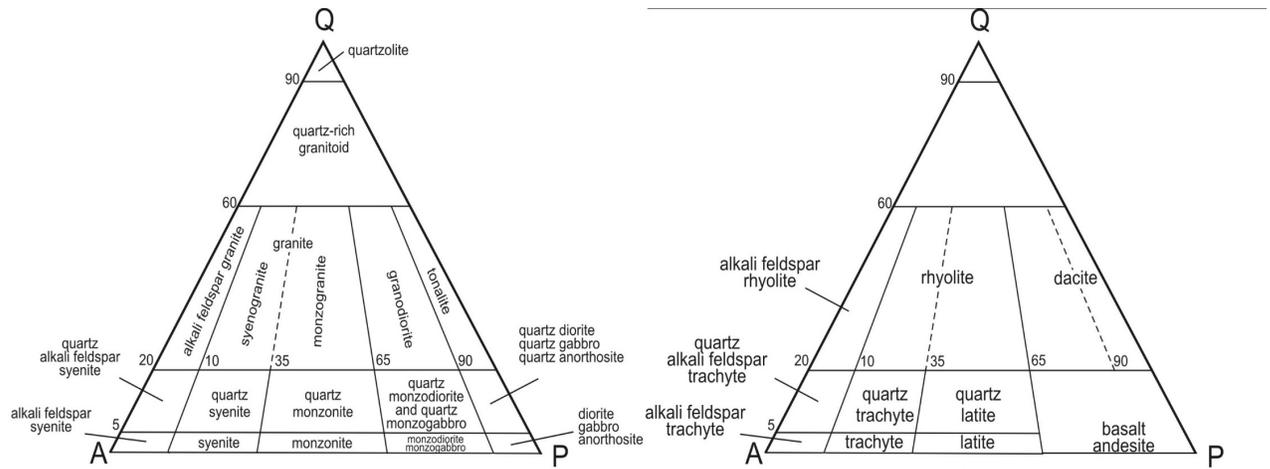


Figura 1.2: Diagrama de Streicksen. QZ = Cuarzo, PL = Plagioclasa, AF = Feldespato alcalino.

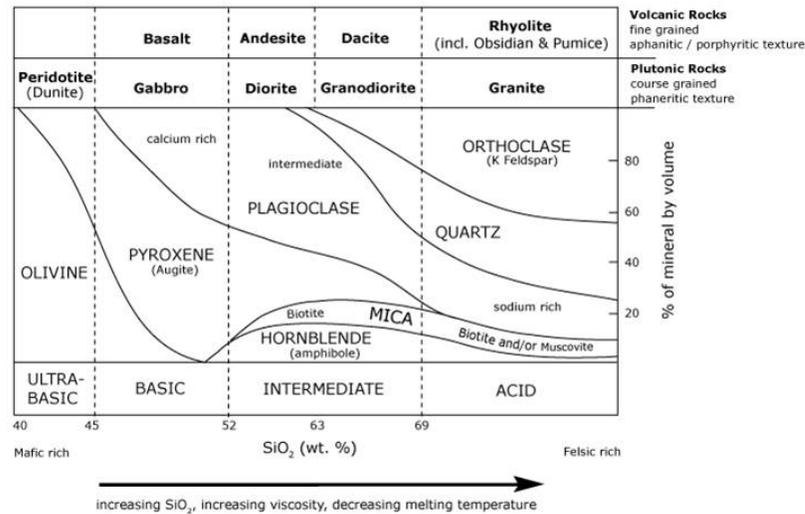


Figura 1.3: Esquema de clasificación de rocas ígneas de acuerdo a la composición relativa de minerales en ellas.

1.4.1. Comportamiento mecánico con respecto a textura, estructura y fábrica

Según Golodkovskaia et al (1975) y González de Vallejo (2002), el comportamiento mecánico del macizo rocoso depende de ciertos factores tales como: composición mineral, estructuras, texturas, fracturas, anisotropía, contenido de agua, tamaño y disposición de discontinuidades al igual que el contenido mineralógico de ellas. Con respecto a las texturas y el tamaño del grano, Brace (1961) concluyó que rocas cristalinas de grano fino presentaban mayor resistencia a la compresión con respecto a rocas de grano más grande. Willard and McWilliams (1969) explica este efecto debido a que microfrazas, clivaje, contacto entre granos y macas actuaban como planos de debilidad que controlaban la dirección de las microfallas en

la roca. Con respecto a este mismo efecto, VP Efimov (2018) realizó estudios en muestras ígneas intrusivas y extrusivas determinando una dependencia polinomial decreciente entre la resistencia a la compresión simple y el tamaño de grano de las muestras.

Variaciones en la proporción cuantitativa de minerales formadores de roca en las muestras también afecta directamente a las propiedades mecánicas de esta. Golodkovskaia et al (1975) concluye que lavas basálticas presentan mayor resistencia a la compresión en comparación con lavas andesíticas debido a la mayor presencia de piroxenos y plagioclasas básica (o cálcicas). Además, la disminución de este parámetro, para los basaltos, se atribuye a la disminución de piroxenos en ella y el aumento de olivino y vidrio volcánico.

Keikha et al (2013) realizaron un estudio similar en granitos encontrando una disminución a la compresión debido al aumento del tamaño de grano de cuarzo y plagioclasas, agregando además que un aumento en la proporción Qz/Pl significaba un aumento en la resistencia a la compresión para estos granitos.

En Chile, sobre todo en yacimientos tipo pórfidos cupríferos, el estilo de mineralización es predominantemente en vetillas. Siendo la orientación, el espesor y la mineralogía de estas otro factor determinante de las propiedades mecánicas del macizo rocoso. Turichshev A. & Hadjigeorgiou J. (2017) realizaron ensayos de compresión triaxial en gabros y lavas andesíticas provenientes de la mina El Teniente concluyendo que en vetas con orientaciones entre 20 a 40° con respecto al eje mayor, tendían a fallar las muestras. Siendo éstas de variadas composiciones mineralógicas y espesores. Así, estas dos variables no tenían un rol principal en la propagación del fallamiento pero si la mineralogía de las vetas presentaba una fuerte correlación con la resistencia a la compresión. El fallamiento por vetas con mayor presencia de minerales duros (> 4 en la escala de Mohs), tales como cuarzo, plagioclasas y feldespatos potásicos presentaba mayores valores de resistencia a la compresión en comparación con aquellas vetas con mayor presencia de minerales blandos como anhidrita, biotita, clorita, calcopirita y muscovita.

1.5. Estado del Arte

El comportamiento pre y post-peak de las rocas ha sido estudiado por varios investigadores mediante la realización de ensayos de compresión uniaxial y triaxial en rocas frágiles. En cada uno de estos estudios, distintos procedimientos fueron aplicados con el objetivo de obtener la curva de esfuerzo-deformación. A continuación se presentan algunos trabajos relevantes.

Cook (1965) realizó ensayos de compresión uniaxial en mármol y granitos con el objetivo de analizar la resistencia máxima de las muestras, la violencia de la fracturas y la pendiente de la curva esfuerzo-deformación. En este estudio, la carga fue en aumento para cada muestra y se concluyó que grandes cantidades de energía se pueden disipar durante el fallo, mediante la conversión de energía elástica hacia la superficie de la muestra.

Rumel y Fairhurst (1970) estudiaron el comportamiento post-peak de muestras de mármol aplicando velocidades constantes de deformación. Los resultados de este estudio mostraron que las deformaciones en la fase post-peak se desarrollarían lentamente si es que velocidades

de deformación aplicadas también lo fueran.

Wawersik y Fairhurst (1970) realizaron ensayos uniaxiales y triaxiales con el objetivo de obtener por completo la curva esfuerzo-deformación, aplicando un control de deformación axial e intervalos de descarga rápidas para distintos tipos de rocas. Distinguieron dos clases de comportamiento, basado en el estudio de la curva en la fase post-peak.

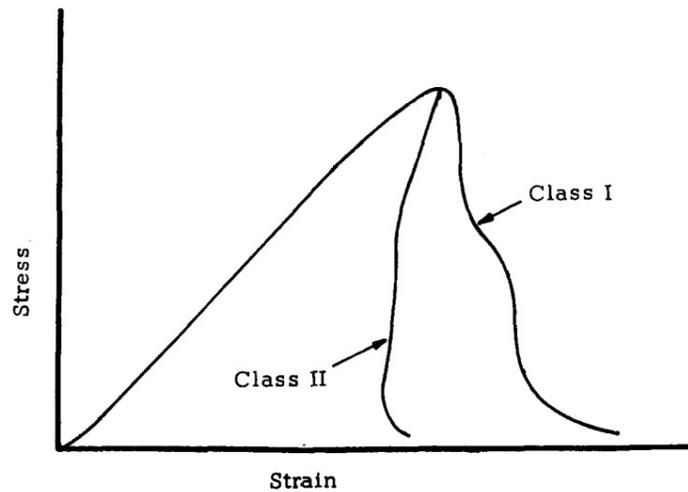


Figura 1.4: Comportamientos post-peak Clase I y Clase II (Wawersik y Fairhurst (1970)).

- **Clase I:** Representa un aumento monótono de la deformación axial en el proceso de falla.
- **Clase II:** La deformación axial no aumenta de modo monótono durante el proceso de falla. En el momento peak de resistencia, la probeta contiene una energía elástica mayor a la necesaria para continuar la falla, por lo que parte de la energía debe ser extraída mediante la reducción de la deformación axial para continuar con una falla progresiva no-violenta.

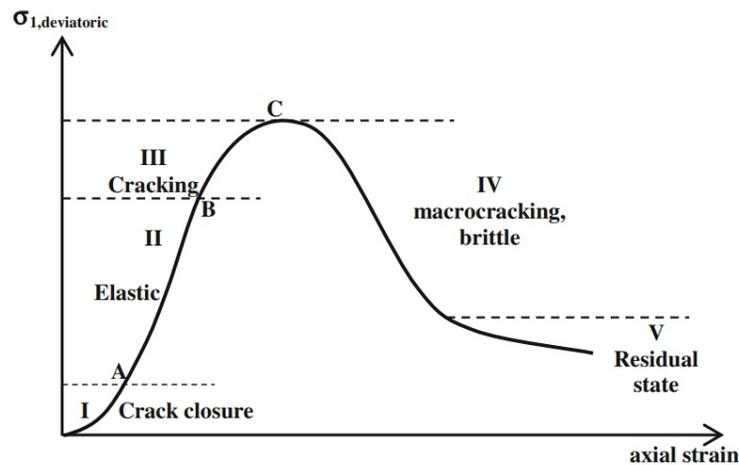


Figura 1.5: Curva de esfuerzo-deformación completa.

De la curva (Figura 1.5), en la Región I existe un comportamiento ligeramente cóncavo. En esta región, microfallas, grietas y poros comienzan a cerrarse. La muestra presenta un comportamiento predominantemente deformable. En la Región II, el comportamiento lineal de la curva es un indicador de una deformación lineal elástica. El módulo de elasticidad es generalmente un indicador de este comportamiento y es en esta zona donde es obtenido. La Región III comienza por sobre el 50 % de el esfuerzo máximo y llega hasta ese valor (punto C en Figura 1.5). Es en esta región donde aparecen grandes fallas a un ritmo de propagación estable. Estas fallas crecen hasta alcanzar un largo finito de acuerdo a un aumento del esfuerzo y los cambios experimentados en la estructura interna de la muestra son irreversibles en este punto, produciendo entonces una deformación dúctil en la muestra. Además, es en este estado donde comienza la expansión lateral de la muestra, asociada a un incremento en el volumen de la misma. En la Región IV, comienza una propagación de fallas inestables que se intersectan entre ellas y alcanzan los bordes de la muestra. La pendiente de la curva se vuelve negativa indicando que la muestra pierde la capacidad de mantener una carga, asociada a un aumento en la deformación. El comportamiento en esta región es característico de una deformación frágil. Por último, en la Región V, la deformación se mantiene a una nivel de esfuerzo constante, siendo este esfuerzo el esfuerzo residual.

En el presente estudio y anteriores realizados en el laboratorio, se usa la norma ISRM (Hudson. Fairhurst 1999) para realizar ensayos de compresión con deformación controlada o post-peak. Esta norma es una guía para poder encontrar la curva de esfuerzo-deformación completa. Modificaciones a esta se han realizado en estudios posteriores y en el presente de acuerdo a las características estructurales de las muestras estudiadas.

Los parámetros, extraídos de la curva de esfuerzo-deformación, que son usados en el análisis son los propuestos según los estándares de ASTM International.

- **Módulo de Young o Módulo de Elasticidad (E):** Se usa la parte más constante de la curva esfuerzo-deformación, en la zona pre-peak, en donde se define la zona elástica. Generalmente es la zona que bordea al 50 % de la carga máxima total.
- **Coefficiente de Poisson (ν):** Corresponde a la variación entre la pendiente de la curva esfuerzo-deformación axial con respecto a la pendiente de la curva esfuerzo-deformación diametral (Ulusay & Hudson 2007).
- **Resistencia Peak (σ):** Corresponde al esfuerzo máximo de compresión que tolera una muestra.
- **Módulo de caída (M):** Corresponde a la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la zona post-peak.

En las últimas dos décadas, el aumento de estudios para poder obtener la curva completa de esfuerzo-deformación ha sido significativo. Tal es el caso de Abdullah and Amin (2008), quienes realizaron ensayos de compresión en areniscas en un equipo servo-controlado y uno convencional. Concluyeron que el estallido violento de las muestras no era debido a una propiedad de las rocas. Sino, a la rápida liberación de energía de las partes del equipo de compresión al momento que la muestras alcanzaba su carga máxima. Así, es necesario el uso de prensas servo-asistidas para poder obtener la porción post-peak de la curva.

Por su parte, Palchik (2013) realizó 60 ensayos de compresión uniaxial en muestras de rocas carbonatadas con el fin de obtener una relación entre porosidad, constantes elásticas, y los parámetros elásticos pre-peak de la curva esfuerzo-deformación. Encontrando variaciones significativas en las curvas de deformación volumétrica. En el mismo año Baud et al. (2013) realiza un modelo, comprobando que la porosidad y el tamaño de poros son parámetros microestructurales que tienen una fuerte influencia en el UCS. Siguiendo el mismo objetivo, Tutluoglu et al (2014) realizó 73 ensayos de compresión uniaxial en muestras de origen volcánico, sedimentario y metamórfico con el fin de encontrar la curva de esfuerzo-deformación y realizar modelos analíticos predictivos de los parámetros post-peak en función de los parámetros pre-peak.

Khosravi (2016) realizó un trabajo similar, el cual tuvo como objetivo encontrar la curva esfuerzo-deformación en ensayos uniaxiales y triaxiales en muestras de Basaltos y Microgabros. Los ensayos fueron realizados en muestras cilíndricas de 50 mm de diámetro y razón altura-diámetro de 2:1. La composición mineralógica de los microgabros es: Plagioclasa (60%), Clinopiroxeno (30%) y Olivino (10%). Para los Basaltos: Sílice (45-50%), Olivino, Plagioclasas y Piroxenos (50-55%)

Los resultados obtenidos en este estudio se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1.1: Resultados de ensayos de compresión uniaxial en muestras de Basaltos y Microgabros de 5 mm de diámetro.

Litología	Esfuerzo Peak promedio (MPa)	E (GPa)	Número de test exitosos.
Microgabro	180	39	9
Basalto	280	45.4	11

Las curvas de esfuerzo-deformación axial para los ensayos realizados son las siguientes:

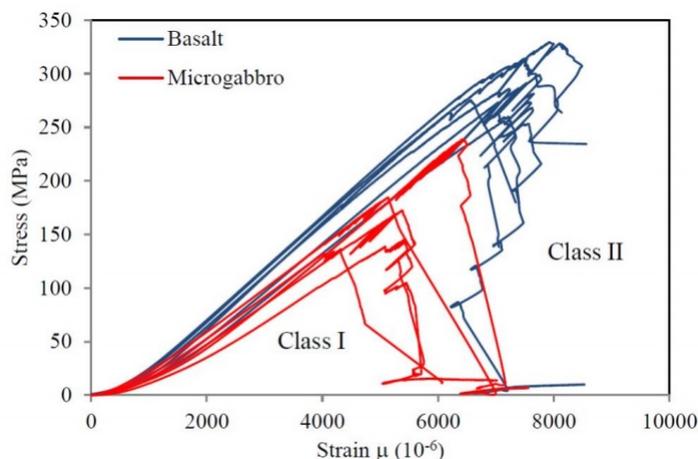


Figura 1.6: Curva de esfuerzo-deformación axial en muestras de Basaltos y Microgabro de 5mm de diámetro. (Koshravi, 2016)

1.6. Estudios Previos realizados en el laboratorio de mecánica de rocas.

El primer trabajo realizado en el Laboratorio de Rocas del Departamento de Ingeniería en Minas de las Universidad de Chile fue la investigación llevada a cabo por Daniela Pollak Aguiló (Pollak Vallejós 2018). Este trabajo resume las condiciones necesarias para realizar ensayos de compresión uniaxial y el comportamiento de las muestras en fase pre y post-peak. Específicamente, se realizaron ensayos en muestras de 143 mm de diámetro de origen volcánico, ígneo y sedimentario, que presentaron resistencia peak entre 90 y 118 MPa y su comportamiento post-peak fue clasificado como clase II. La tabla 1.2 resume los resultados obtenidos en esta investigación.

Tabla 1.2: Resultados ensayos de compresión uniaxial en Dacitas (Pollak et al. 2018).

H = Altura; D= Diámetro; σ_c = Uniaxial Compressive Strength; E= Módulo de Young;

ν = Razón de Poisson; σ_r = Esfuerzo residual; M= Módulo de caída; N/A= No aplica;

(1) Control por fuerza; (2) Control por deformación; NIA: No hay información disponible.

Muestra	H/D (mm/mm)	σ_c (MPa)	E (GPa)	ν	Velocidad ensayo	σ_r (MPa)	M (GPa)
CX-107-(11)	318/142.8	118.4	39	0.42	3.57 kN/s (1)	N/A	N/A
CX-12	317.5/142.4	94.1	29.3	0.37	3.57 kN/s(1)	N/A	N/A
B-1	287/143	98.8	19.8	NIA	1.5 kN/s(1)	N/A	N/A
B-2	2×302/143	2×90.5	2×22.5	2×0.29	1.5 kN/s (1)	2×61	2×38.5
					3.3×10^{-5} mm/s (2)		
DV-4	300.8/142.7	92.6	2×43.7	2×0.34	5 kN/s (1)	2×62	2×48.3
					3.3×10^{-5} mm/s (2)		

Otra investigación posterior es la realizada en el Laboratorio de Rocas del Departamento de Ingeniería en Minas de las Universidad de Chile por el investigador Carlos Zúñiga Núñez (Zúñiga et al 2020). Su trabajo tuvo como objetivo estudiar el efecto escala en los parámetros pre y post-peak, mediante la realización de ensayos de compresión uniaxiales en muestras de Dacita provenientes de la mina El Teniente, Codelco (Chile). Los ensayos fueron realizado en muestras de 50, 98 y 143 mm de diámetro con una razón altura-diámetro de 2:1. La composición mineralógica de las muestras conrresponde a: Cuarzo (30 %), Plagioclasas (35 %), Feldespatos (15 %) y Biotita (20 %).

Las muestras de 50 y 98 mm de diámetro fueron ensayadas en la prensa MES300 mientras que las muestras de 143 mm en la prensa MES800, la cual tiene una capacidad máxima de 8000 kN. Ambas prensas fueron controladas por el mismo software PCD2K (Servosis 2020).

Dado que las curvas obtenidas anteriormente en el trabajo de Daniela fueron clase II, el procedimiento que se siguió para cada ensayo fue el siguiente:

- Comenzar con control por fuerza hasta alcanzar 70% de resistencia máxima (UCS), que corresponde a 109 MPa.
- Luego, cambiar a control de deformación diametral para mantener las variaciones de deformación constantes.

- Finalmente, entrado en la fase post-peak, duplicar la velocidad de deformación diametral con objetivo de reducir el tiempo de ensayo.

Los resultados obtenidos en este estudio se resumen en la tabla 1.3 y las figuras 1.7 y figura 1.8

Tabla 1.3: Resultados de estudio efecto escala en distintos diámetros de probetas cilíndricas.

Parámetros	Diámetro de las muestras (mm)		
	50	98	143
Control por fuerza (kN/min)	5	10	15
Velocidad diametral pre-peak (mm/min)	0.0002	0.0004	0.0006
Velocidad diametral post-peak (mm/min)	0.0004	0.0008	0.0012
Esfuerzo Peak (MPa)	96.9	92.4	109.7
LVDT E (GPa)	22.4	23.0	25.9
LVDT Coef. de Poisson	0.18	0.38	0.37
Modulo de caída (GPa)	34.2	39.3	30.8
Esfuerzo Redidual (MPa)	73.8	63.0	56.6
Número de test exitosos.	9	7	5

Las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas en este estudio son las siguientes:

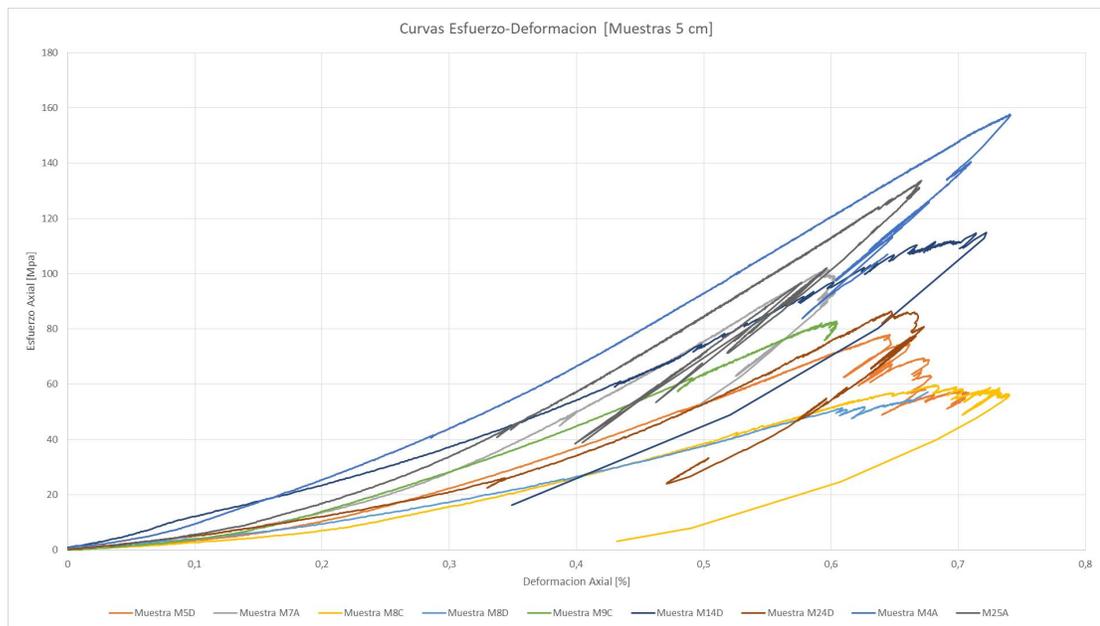


Figura 1.7: Curva de esfuerzo-deformación axial en muestras de Dacita de 5mm de diámetro. (Zuñiga, 2020)

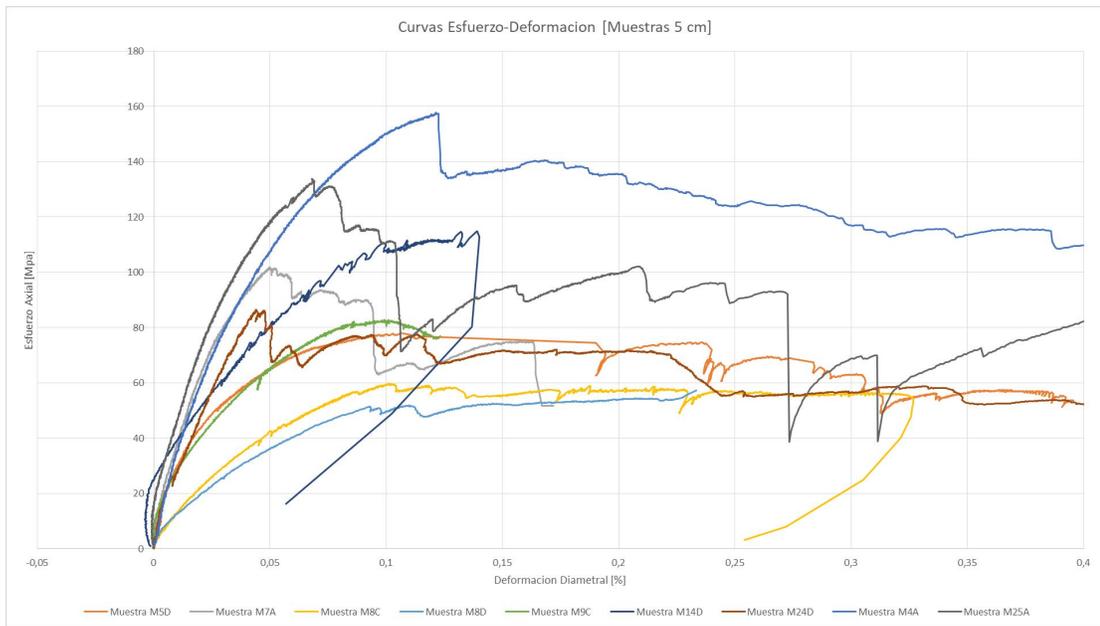


Figura 1.8: Curva de esfuerzo-deformación diametral en muestras de Dacita de 5mm de diámetro. (Zuñiga, 2020)

Cabe destacar que estos estudios son los primeros que se se han realizado en rocas chilenas. Por lo que es necesario la realización de más investigaciones, descubrir técnicas y metodologías que optimicen la realización y obtención de el comportamiento post peak en rocas chilenas.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Preparación de Muestras

Para cumplir con el objetivo de este trabajo se seleccionaron 6 sets de muestras de 5 tipos de depósitos: Andesitas de un IOCG de la región centro-norte de Chile, Andesitas de un depósito Vetiforme en la zona centro, Granodioritas de un depósito tipo Pórfido Cuprífero en la zona central y Dioritas y Gabros provenientes de un depósito tipo Pórfido Cuprífero en la zona centro-sur. A cada muestra se le realiza una pequeña descripción petrológica en escala de muestra de mano con el fin de seleccionar aquellas que presentaran la menor cantidad de discontinuidades visibles en la superficie y tamaño de grano relativamente homogéneo en toda la superficie. A las Andesitas de un IOCG y Granodioritas de un depósito tipo Pórfido Cuprífero se les realizaron descripción en cortes transparentes. El propósito de esta selección es realizar ensayos en muestras que sean consideradas roca intacta. Sin embargo, es casi imposible asegurar la ausencia total de discontinuidades en todas las muestras ya que estas pueden estar a escalas microscópicas o simplemente no se observan en la superficie. Además, dado el origen de todas las muestras (yacimientos minerales explotados), todas presentan mineralización de mena en vetillas y boxworks que se ha evidenciado que afectan las propiedades mecánicas de las rocas. (Turichshev & Hadjigeorgiou, 2017).

La tabla 2.1 resume las características generales de cada uno de los sets de muestras ensayadas.

Tabla 2.1: Dimensiones de muestras ensayadas en este trabajo.(*). Muestras de Dacita fueron preparadas y ensayadas por Carlos Zúñiga. (Zúñiga et al. 2020)

Litología - origen	Muestra	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Masa (gr)	Densidad (gr/cm3)
Granodiorita - Pórfido	GRD1	63.03	135.62	1139.73	2.69
	GRD2	63	131.98	1118.42	2.72
	GRD3	63.08	135.63	1142.26	2.69
	GRD8	63.05	136.19	1126.09	2.65
	GRD10	63.04	136.2	1144.52	2.69
Andesita - IOCG	ANDIO_1	47.46	98.84	482.58	2.76
	ANDIO_2	47.34	99.29	501.8	2.87
	ANDIO_3	47.42	98.88	486.1	2.78
	ANDIO_4	47.52	97.92	484.85	2.79
	ANDIO_5	47.4	98.54	469.11	2.70
	ANDIO_6	47.46	98.8	481.56	2.76
	ANDIO_7	47.34	99.72	514.86	2.93
	ANDIO_8	47.33	99.04	502.28	2.88
	ANDIO_9	47.38	99.55	477.51	2.72
Dacita - Pórfido (*)	M4A	49.98	95.69	477.07	2.54
	M5D	49.99	96.26	481.40	2.55
	M7A	49.93	98.49	495.36	2.57
	M8C	49.84	101.60	489.72	2.57
	M8D	49.84	100.10	484.84	2.48
	M9C	49.90	101.20	509.28	2.57
	M14D	49.92	98.86	488.50	2.53
	M24D	49.94	98.27	496.42	2.58
	M25A	49.93	99.41	500.73	2.57
Andesita - Vetiforme	AND-A01	49.35	100.24	535.04	2.79
	AND-A04	49.29	100.23	532.54	2.84
	AND-B05	49.35	99.87	532.02	2.79
Diorita - Pórfido	DIORITA 19	63.09	133.52	1109.77	2.66
	DIORITA 9	63.34	128.46	1099.57	2.72
	DIORITA 13	63.32	131.51	1113.99	2.67
Gabro - Pórfido	GABRO 9	62.99	131.73	1148.67	2.80
	GABRO 13	63.04	132.61	1160.01	2.80
	GABRO 26	63.27	133.14	1173.64	2.80

2.2. Ensayos

Los ensayos se llevaron a cabo en la una prensa servo-asistida MES300, con capacidad máxima de 3000 kN (Figura 2.1), perteneciente al Departamento de Ingeniería en Minas de la Universidad de Chile, la cual fue adquirida en conjuntos con el Advanced Mining Technology Center (AMTC). La prensa está controlada por el software PCD2K *Servosis* 2020.



Figura 2.1: Prensa servo-asistida MES300 (izquierda) y computador con software *Servosis* 2020 (derecha).



Figura 2.2: Prensa servo-asistida MES300 con muestra montada.

Los elementos usados para medir deformación en todos los ensayos UCS de cada set de muestra fueron Straing Gauges. Estos sensores tienen la ventaja de, al estar adheridos a la muestra, se considera que su deformación es la deformación directa de la muestra. Sin embargo, dada su desventaja que sólo realizan mediciones puntuales y están propensos a romperse cuando la muestra llegue al peak, es necesario usar sensores LVDT para poder obtener el comportamiento post peak. Estos sensores permiten obtener una medida global de deformación y no se ven afectados de manera directa por fallas en la muestra. Aún así, su principal desventaja es que la medida que realizan es indirecta. Por lo tanto, mediciones de deformación hechas por Straing Gauges y LVDT son diferentes y no considerar esto puede llevar a errores en la estimación de los parámetros geomecánicos.

Para Dacitas, Granodioritas y Andesitas (IOCG) se usaron 4 Linear Variable Differential Transformers o LVDT. Dos LDVT dispuestos de manera vertical para medir deformaciones axiales y dos de manera horizontal para medir deformaciones diametrales. Éstos últimos se montan sobre una anillo de aluminio que rodea la muestra que funciona como soporte.

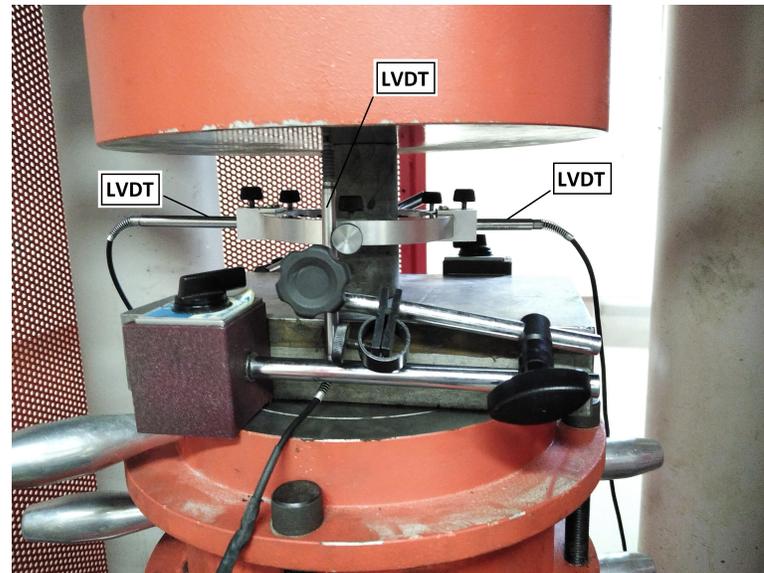


Figura 2.3: Montaje de LVDT en muestra de 5 mm diámetro en prensa servo-asistida MES300.

El procedimiento y las velocidades usadas para cada ensayo están basadas en las recomendaciones hechas por la ISRM (1983) y Fairhurst & Hudson (1999):

- Comenzar el ensayo con un control de carga de $10 \text{ kN}/\text{min}$ hasta alcanzar el 60% - 70% de resistencia peak.
- Pasar a control por deformación diametral con velocidades en un rango entre 0.0001-0.001 (mm/min).
- Mantener control por deformación diametral e ir variando las velocidades de tal manera de prevenir el fallo total de la muestra.
- Detener el ensayo cuando la carga sea lo suficientemente pequeña y la muestras no se deforme con ella o cuando el esfuerzo residual se mantiene constante en función de la deformación diametral.

Para cada ensayo se generaron las curvas de esfuerzo-deformación y de ellas se calcularon parámetros mecánicos pre y post-peak de acuerdo a los standards de ASTM (ASTM standards, 2017)



(a) Esquema método medición Módulo de Young. (b) Esquema deformación diametral y axial σ_u representan el 50 % del esfuerzo peak σ

Figura 2.4: Esquemas representativos de método de calculo Módulo de Young y Razón de Poisson.

El módulo de Young es calculado usando la porción más lineal, en la zona pre-peak, de la curva de esfuerzo-deformación axial. Esta porción, para todos los ensayos aparece en torno al 50 % del esfuerzo máximo de cada muestra.

Además, la Razón de Poisson se define como:

$$\nu = \frac{\text{pendiente curva axial}}{\text{pendiente curva diametral}} \quad (2.1)$$

Así como el cálculo del Módulo de Young, la Razón de Poisson se calcula considerando los valores en torno al 50 % del esfuerzo máximo de cada muestra.

Dado que las muestras ensayadas tienen distinto diámetro, se debe normalizar todos los resultados a una misma escala. Para esto, Hoek Brown (1980) propusieron una primera aproximación del esfuerzo peak para muestras de distintos diámetros, concluyendo que a mayor diámetro se reduce el valor de esfuerzo máximo aguantado por la muestra.

$$\sigma_{c,d} = \sigma_{c,50} \times \left(\frac{50}{d}\right)^{0,18} \quad (2.2)$$

Donde $\sigma_{c,d}$ corresponde al esfuerzo peak alcanzado por una muestra de d milímetros de diámetro. $\sigma_{c,50}$ corresponde al valor de este esfuerzo escalando a una muestra de 50 mm de diámetro.

El análisis de todos los parámetros, en esta investigación, será usando los valores escalados a $D = 50 \text{ mm}$ y $H/D = 2$

Capítulo 3

Resultados de Ensayos

3.1. Caracterización geológica de las muestras

En muestra de mano, las Andesitas provenientes de un depósito tipo IOCG tienen una textura fanerítica y una predominante fábrica anisotrópica donde máficos (predominantemente hornblenda) y abundantes biotitas se encuentran orientados en una dirección predominante. La gran abundancia de ésta mica es producto de una alteración bastante pervasiva. Algunos fenocristales de plagioclasas, hornblenda y en menor cantidad piroxenos se logran apreciar en algunas caras laterales de las muestras. Calcopirita y pirita se aprecia solamente diseminada y comunmente acompañada de magnetita en la matriz o en algunas vetillas de menor abundancia y tamaño en comparación con aquellas de feldespatos.

Con respecto a las estructuras. Estas muestras se separaron en dos poblaciones de acuerdo a su comportamiento mecánico. En la población con bajos valores de esfuerzo peak se apreciaron dos tipos de vetillas. El primer tipo entre 0.5 y 1 mm de espesor, rellenas de feldespatos y/o cuarzo, con bordes rectos y sin halos de alteración. Todas aparecen siguiendo la orientación de micas negras que dan la fábrica anisotrópica característica de esta población de muestras (Figura 3.1). La disposición de éstas es entre 30 a 45° de inclinación con respecto al eje longitudinal de las probetas. El segundo tipo de vetillas tienen espesores entre 1 a 2.5 mm, de largos variables entre 1 a 2 cm. De forma irregular a sinusoidal y son una orientación casi paralela al eje longitudinal de las probetas. De similar composición que las anteriores (feldespatos y/o cuarzo) (Figura 3.2).



Figura 3.1: Fábrica anisótropa en muestras de Andesitas provenientes de depósito IOCG.

Para la población de muestras que presentaron altos valores de esfuerzo peak. Estas tienen como característica principal la abundante presencia de vetillas de forma sinusoidal o irregulares de espesores entre 0.5 a 2.5 mm (Figura 3.2) . Rellenas con feldespatos y cuarzo. En algunas caras, calcopirita y magnetita se aprecia intercrecida con estas vetillas lo que puede sugerir que estas estructuras aparecieron producto del mismo evento de alteración.



Figura 3.2: Estructuras en muestras de Andesitas provenientes de depósito IOCG.

A muestra de mano, las Andesitas provenientes de un depósito tipo vetiforme son de color gris verdoso con textura porfídica conformada por fenocristales de plagioclasa epidotizados y anfíbulas euhedrales a subhedrales. La masa fundamental es granular fina y se constituye de gránulos ferromagnesianos y plagioclasas. Se parecía abundante mineralogía propia de alteración propilítica (epidota y clorita) en plagioclasas y en vetillas de feldespatos que son

abundantes en algunas muestras. Algunas muestras presentan un leve magnetismo. No se observó mineralogía de mena en ninguna de las muestras ensayadas.



Figura 3.3: Textura y estructuras en muestras de Andesitas provenientes de depósito Vetiforme.

Con respecto a las estructuras de estas muestras (Figura 3.3). Predominan vetillas que rodean toda la cara lateral de las probetas. Espesores por sobre los 0.5mm pero no más de 2 mm. Con bordes rectos a irregulares, presentando en algunas muestras formas sinusoidales. Rellenas de feldespatos y es muy típico verlas alteradas a epidota. La disposición de ellas varía de acuerdo a la probeta. Se pueden apreciar con orientación semi-horizontal con respecto a las caras basales de las probetas, oblicuas y hasta en algunos sectores verticales.

Los Gabros, a escala de muestra de mano corresponden a rocas de color gris oscuro a negro, de textura afanítica (Figura 3.4). Se observan fenocristales constituidos principalmente por plagioclasas subhedrales y tabulares, biotita y cantidades subordinada de anhidrita.

Con respecto a las estructuras. Estos Gabros presentan un denso enrejado polidireccional de vetillas. De espesores variables entre 1 a 2.5 mm. La mineralogía varía de acuerdo al tipo y el origen de esta. Esta mineralogía puede consistir en un mineral único o en grupos de minerales con proporciones variables entre los que destacan anhidrita, bornita, calcopirita, cuarzo, yeso, molibdenita y piritita. Halos de alteración potásica o fílica predominan en ellas al igual que bordes regulares, irregulares o hasta sinuosos en algunas muestras.



Figura 3.4: Textura y estructuras en muestras Gabro (2 probetas de la izquierda) y Dioritas (2 probetas de la derecha) provenientes de depósito tipo P+orfidó Cuprífero.

Las Dioritas, a escala de muestra de mano, presentan una textura fanerítica de fábrica isotrópica con abundantes vetillas, cuasi-perpendiculares con respecto al eje mayor de la probeta, rellenas con cuarzo, calcita y pequeñas cantidades de sulfuros (Figura 3.4). La masa cristalina es de color gris a gris claro con leves tonos verdosos producto de una cloritización de algunas micas. Se distinguen fenocristales de plagioclasas, cuarzo y biotitas. Todos ellos variando de subhedrales a euhedrales en todas las muestras.

Con respecto a las estructuras. De manera menos abundante que en los Gabros, se pueden apreciar set de vetillas semi paralelas a las caras basales de las probetas, de espesor entre 0.5 a 1.5 mm. Con bordes regulares y mineralogía de relleno variable. Aquellas de menor espesor presentan abundante cantidad de sulfuros como pirita y calcopirita. Aquellas de mayor espesor presentan nula cantidad de sulfuros y predominantemente feldespatos. No se logra apreciar halos de alteración en ninguna de ellas.

Por último, las Granodioritas son muestras de textura fanerítica con abundantes fenocristales de biotita y hornblenda, de grano medio a grueso. Una masa fundamental de cuarzo, feldespatos y micas leucocráticas equigranulares (Figura 3.5) .

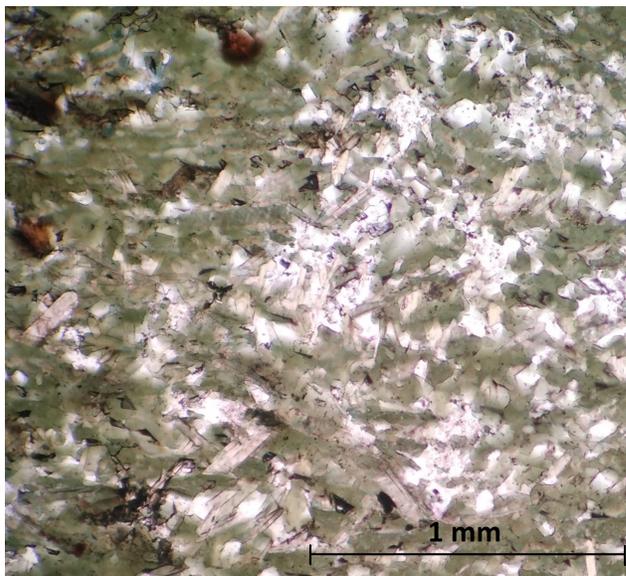


Figura 3.5: Textura y estructuras en muestras Granodioritas provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.

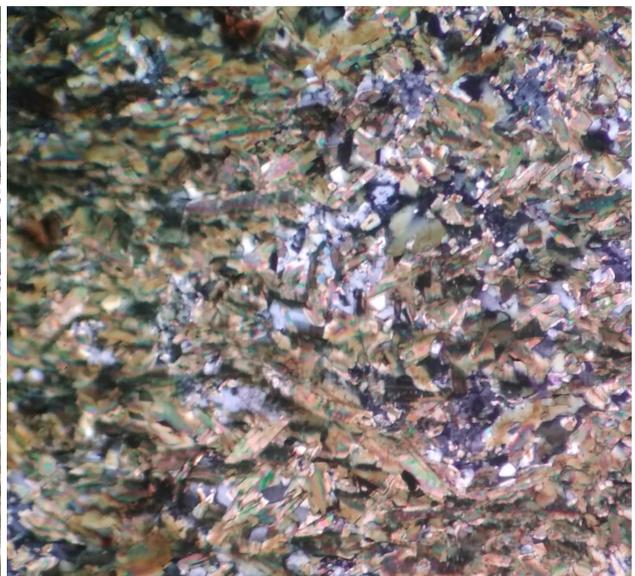
Con respecto a las estructuras. Las muestras presentan 2 tipos de vetillas: Vetillas de cuarzo, sin halo con espesor entre 1 a 2 mm. Con bordes predominantemente regulares y rectos. El segundo tipo corresponde a vetillas de cuarzo - biotita, con halo, de mayor espesor con valores entre 1 a 3 mm. Se presentan también rellenas por anhidrita, y calcopirita con trazas de bornita y molibdenita. El halo es generalmente silíceo y difuso, a veces biotítico y puede tener trazas de sulfuros diseminados como piritita, calcopirita y bornita (Figura 3.5).

3.1.1. Descripción cortes transparentes

La Figura 3.6 corresponde a cortes transparentes de Andesitas provenientes de depósito tipo IOCG. En todos los cortes a nicoles paralelos se observan abundantes cristales incoloros y verdosos claro con forma de prismas alargados casi fibrosos. Ambos con leve pleocroismo y un relieve medio a alto. A nicoles cruzados presentan colores de interferencia de segundo orden y extinción oblicua. Estos cristales corresponden a Actinolita y Tremolita. La cual es mineralogía típica de alteración en estos tipos de depósito. Intercrecidos con las Actinolitas y Tremolitas, pero en menor abundancia, se pueden ver a nicoles paralelos cristales palidos, sin pleocroismo, xenomorfos y con relieve medio. A nicoles cruzados presenta colores de interferencia grisaceos de primer orden y extinción recta. Este cristal corresponde a Apatito. En algunas zonas se observan cristales de otros Anfíboles de mayor tamaño en comparación con Actinolita, Tremolita y Apatitos. Además, plagioclasas macladas, en menor cantidad, se pueden observar además de cantidades subordinadas de biotita. Los sectores oscuros de los cortes corresponden a magnetita o sulfuros primarios como calcopirita.



(a) Muestra 1 a PPL



(b) Muestra 1 a XPL



(c) Muestra 2 a PPL

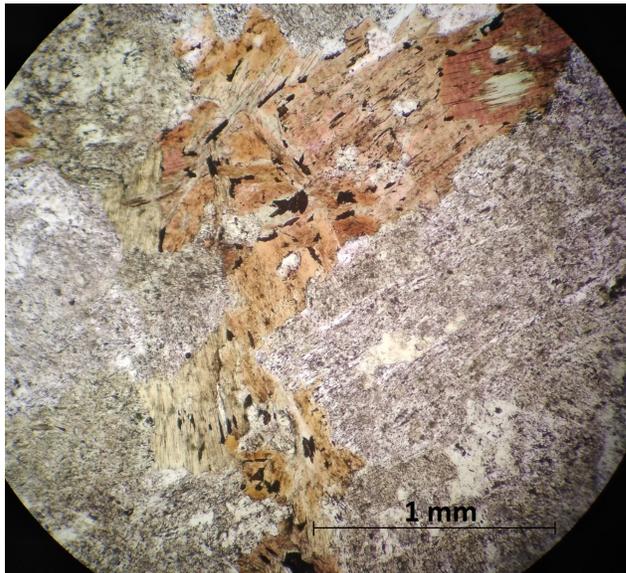


(d) Muestra 2 a XPL

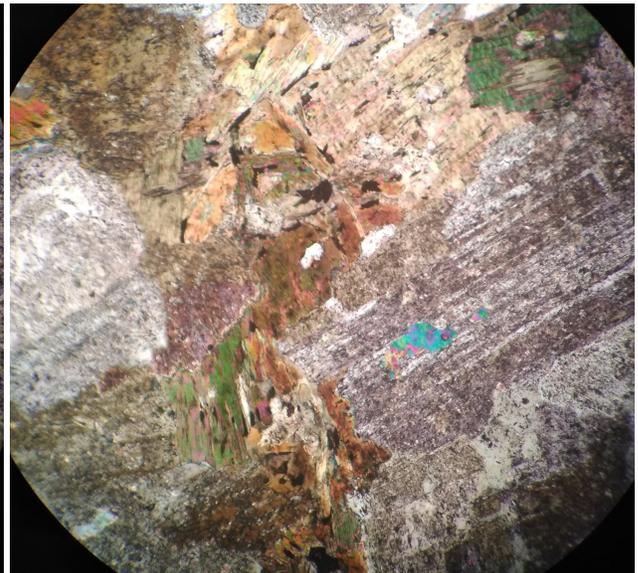
Figura 3.6: Cortes transparentes de Andesitas provenientes de un depósito tipo IOCG.

La Figura 3.7 corresponde a cortes transparentes de Granodioritas provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero. En todos los cortes, a nicoles paralelos, predomina la presencia de fenocristales automorfos de textura sieve y formas tabulares, algunos incoloros y otros marrón claro turbio producto de alteración. Relieve bajo y nulo pleocroismo. A nicoles cruzados se observan maclas polisintéticas y colores de interferencia marrones más oscuros y de bajo orden. Este cristal corresponde a Plagioclasas. En similar abundancia se pueden observar a nicoles paralelos cristales de forma tabular a prismática de colores marrón claro, pleocroismo moderado y un relieve medio. A nicoles cruzados presenta colores de interferencia desde primer a segundo orden con ángulos de extinción entre 20 y 30°. Este cristal fue identificado como Anfíbol. También se pueden observar biotitas alteradas a clorita en algunos sectores y en menor abundancia algunas micas blancas (Muscovita). Cristales de cuarzo también se

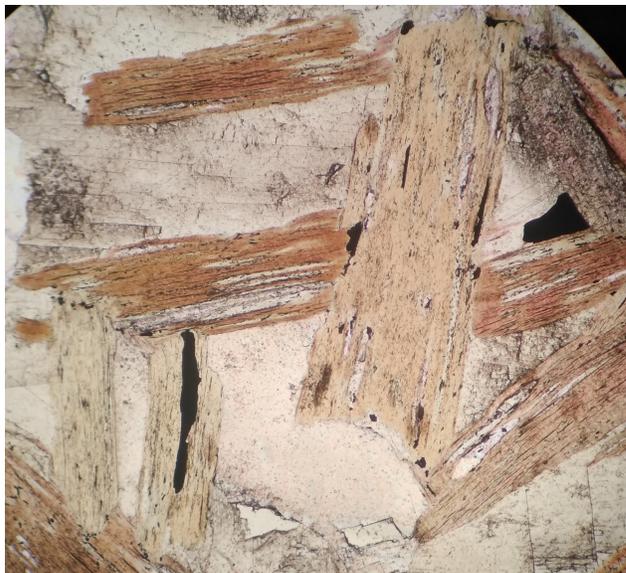
logran apreciar en todos los cortes observados, aunque en menor cantidad y tamaño con respecto a Plagioclasas y Anfíboles (no observables en Figura 3.7).



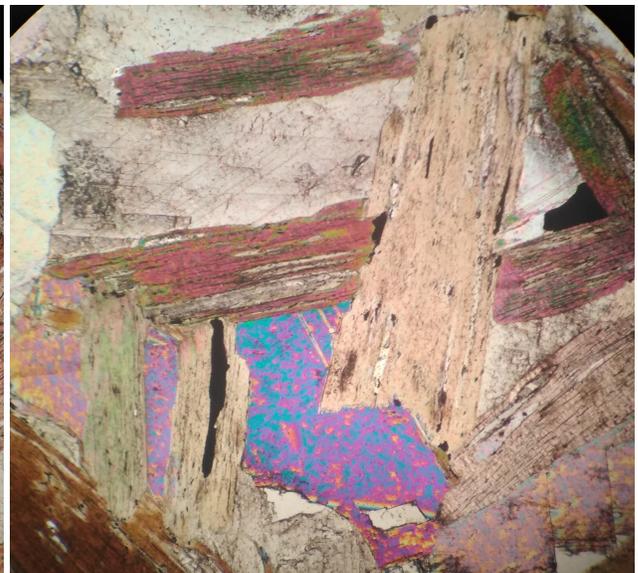
(a) Muestra 1 a PPL



(b) Muestra 1 a XPL



(c) Muestra 2 a PPL



(d) Muestra 2 a XPL

Figura 3.7: Cortes transparentes de Granodioritas provenientes de un depósito tipo Pórfido Cuprífero.

Los cortes transparentes se realizan a Andesitas y Granodioritas con el propósito de identificar mineralogía que a escala de mano no se podía identificar.

3.2. Ensayos

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en todos los ensayos de compresión uniaxial realizados. Cada ensayo fue realizado siguiendo la metodología anteriormente mencionada.

Los UCS encontrados para cada set de muestra se muestran en la Tabla 3.1

Tabla 3.1: UCS para 5 sets de muestras.

Muestra	Ensayos realizados	σ_{UCS}(Mpa) straing-gauge
Andesitas IOCG	4	42.7
	4	112
Granodioritas	3	90.25
Andesitas Vetiforme	4	94.11
Dioritas	3	232.43
Gabros	4	84.08

Las Figuras 3.8 y 3.9 muestran las curvas de esfuerzo-deformación axial y diametral obtenidas de 9 muestras de Andesitas provenientes de un depósito tipo IOCG. Todas ellas exhiben un comportamiento clase II en la zona post-peak. Se distinguieron dos poblaciones con un comportamiento distintivo entre ellas. Un grupo de 5 muestras tuvieron un esfuerzo peak promedio de 61.12 (MPa) y otro grupo de 4 muestras mostró en promedio un esfuerzo peak de 91.7 (MPa). Además, en las curvas de deformación axial no se logró obtener claramente un esfuerzo residual. Sin embargo, en las curvas de deformación diametral se logra ver un esfuerzo residual, sobre todo en la segunda población de mayor esfuerzo peak.

Determinar el modo de falla de las muestras no fue tan claro debido a la coloración negra de brillo vitreo que adquiría el plano de falla de cada muestra (Figura A.1). Todas las muestras ensayadas presentaron esta característica.

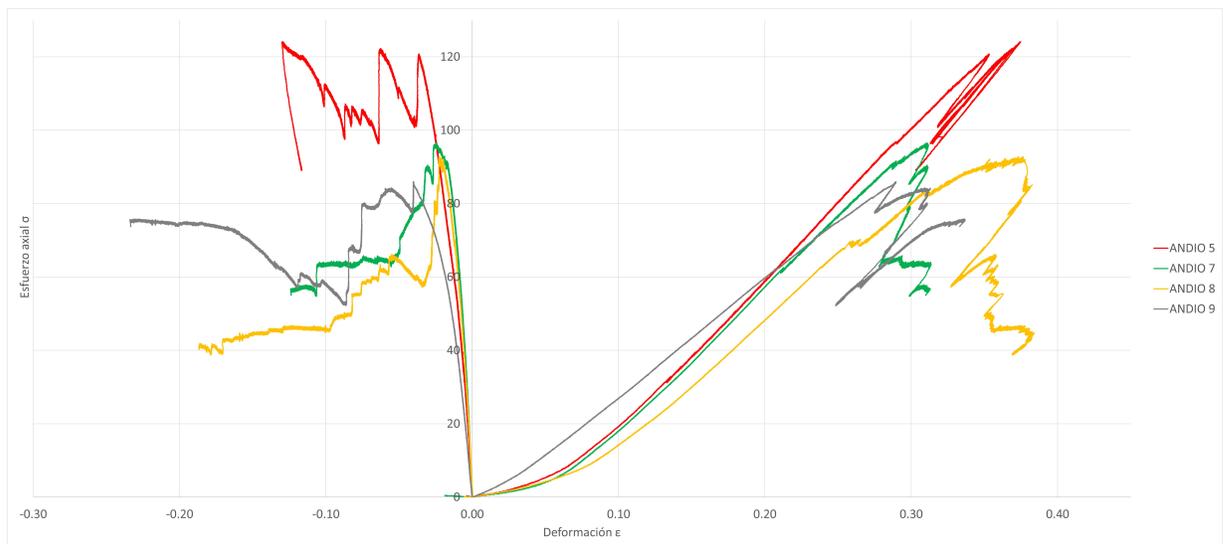


Figura 3.8: Curvas de esfuerzo-deformación para muestras Andesitas provenientes de depósito tipo IOCG. Set de muestras con esfuerzo peak entre 80 y 120 MPa

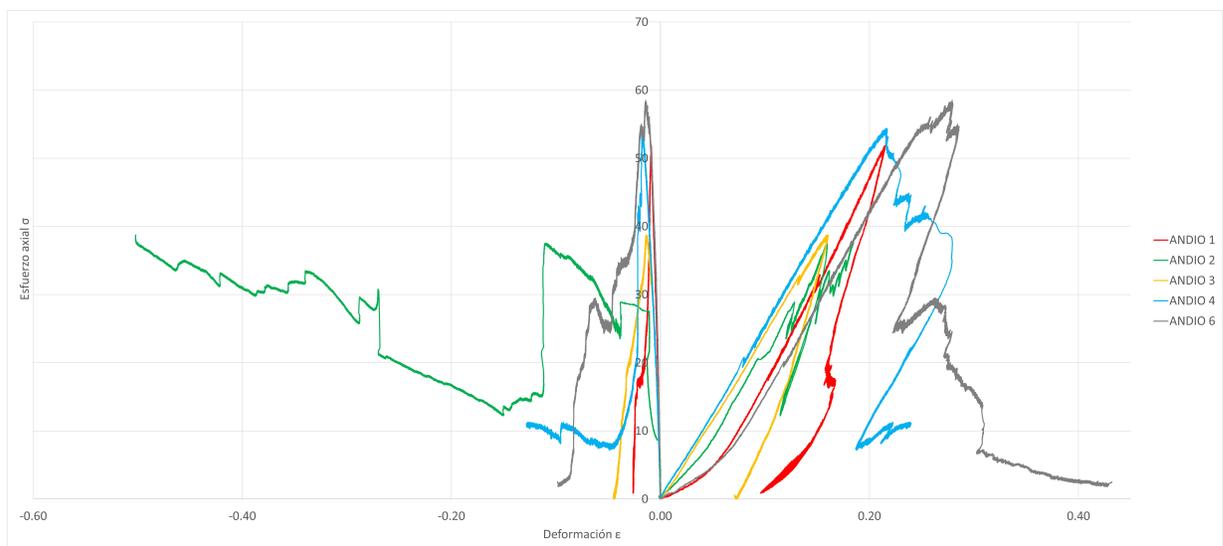


Figura 3.9: Curvas de esfuerzo-deformación para muestras Andesitas provenientes de depósito tipo IOCG. Set de muestras con esfuerzo peak entre 30 y 60 MPa

La Figura 3.10 muestra las curvas de esfuerzo-deformación axial obtenidas de 5 muestras de Granodioritas provenientes de un porfido. Todas ellas exhiben un comportamiento clase II en la zona post-peak. Al igual que las muestras anteriores, también se puede distinguir dos poblaciones con un comportamiento distintivo entre ellas. Dos muestras mostraron bajos valores de deformación axial, un comportamiento más frágil que conlleva a altos valores en el Módulo de Young y Módulo de Caída en la zona post-peak. El modo de falla de éstas es predominantemente en un sólo plano correspondiente a la dirección de la veta mineralizada mayor presente en las muestras. Este comportamiento es muy similar al estudiado por Basu et. al. 2013 que realizó ensayo de compresión uniaxial, obteniendo este tipo de falla en Granitos que alcanzaron valores a la compresión uniaxial entre 120 y 150 MPa.

Por otra parte, la otra población de 3 muestras presenta un comportamiento levemente más dúctil, valores más bajos en los Módulos de Young y Caída y un modo de falla predominantemente por múltiples fracturas en toda la muestra. Sin embargo, en ningún ensayo realizado se logró obtener un esfuerzo residual y una deformación axial constante en la zona post-peak.

Tres muestras tuvieron modos de falla predominantemente por vetillas sin o con halo y rellenas de mineralogía de sulfuros como calcopirita, pirita y bornita. Sólo dos muestras fallaron predominantemente por matriz (Figura 3.10). Estas últimas coinciden con aquellas de mayor valor para los módulos elásticos y aquellas que tenían vetillas orientadas casi horizontalmente con respecto a las caras basales de la muestra.

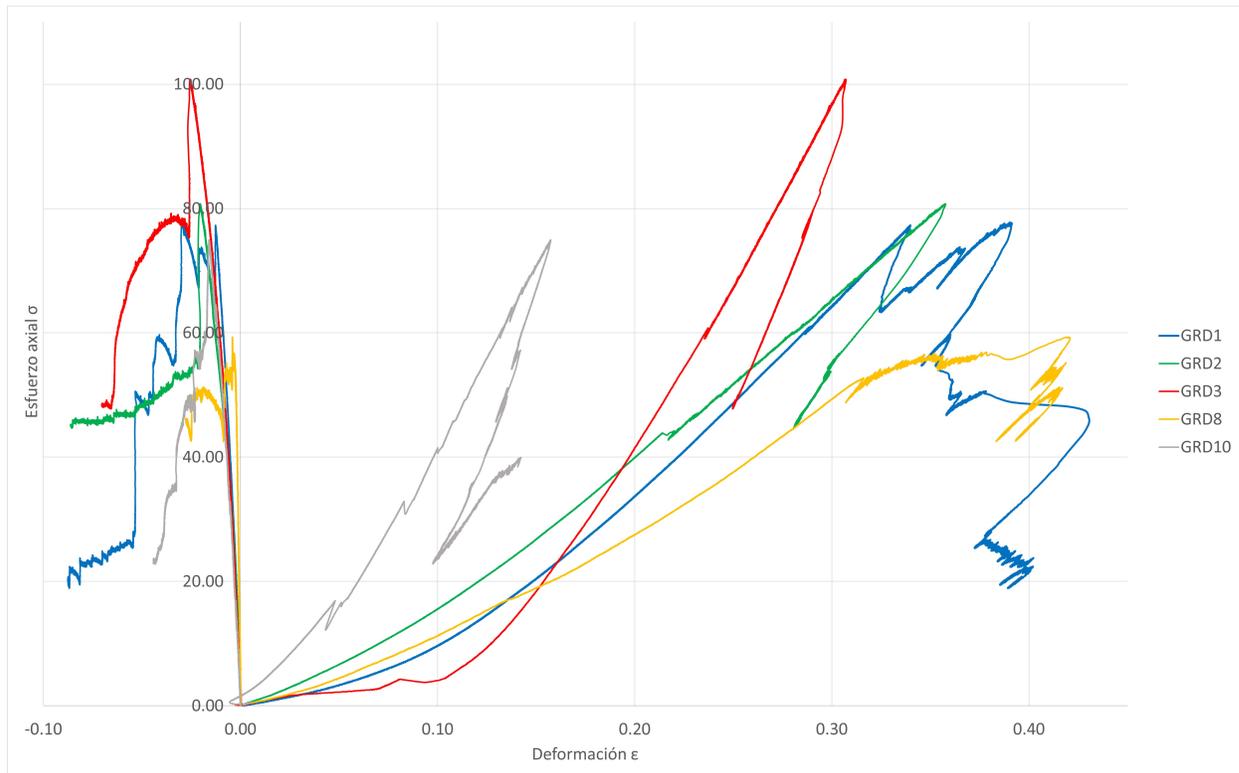


Figura 3.10: Curvas de esfuerzo-deformación para muestras Granodioritas provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.

La Figura 3.11 muestra las curvas de esfuerzo-deformación axial obtenidas de 3 muestras de Andesitas provenientes de un depósito tipo Vetiforme. Sólo una muestra logró llegar a la zona post-peak mostrando un comportamiento clase II. Las 2 muestras restantes estallaron al llegar al peak sin poder continuar con el ensayo. En general, las muestras alcanzaron una gran resistencia a la compresión, obteniendo en promedio 191.14 MPa de esfuerzo Peak donde el valor mayor fue de 249.46 MPa. El modo de falla para las 3 muestras fue predominantemente por matriz, siendo el único set de muestras que presentaba este tipo de fallamiento. Sólo la muestra con mayor grado de cloritización y alteración mineralógica fue posible lograr llegar a la zona post-peak. Además, con respecto a los set anteriores, estas 3 muestras presentaban mayor cantidad de vetas orientadas casi horizontales con respecto a las caras basales.

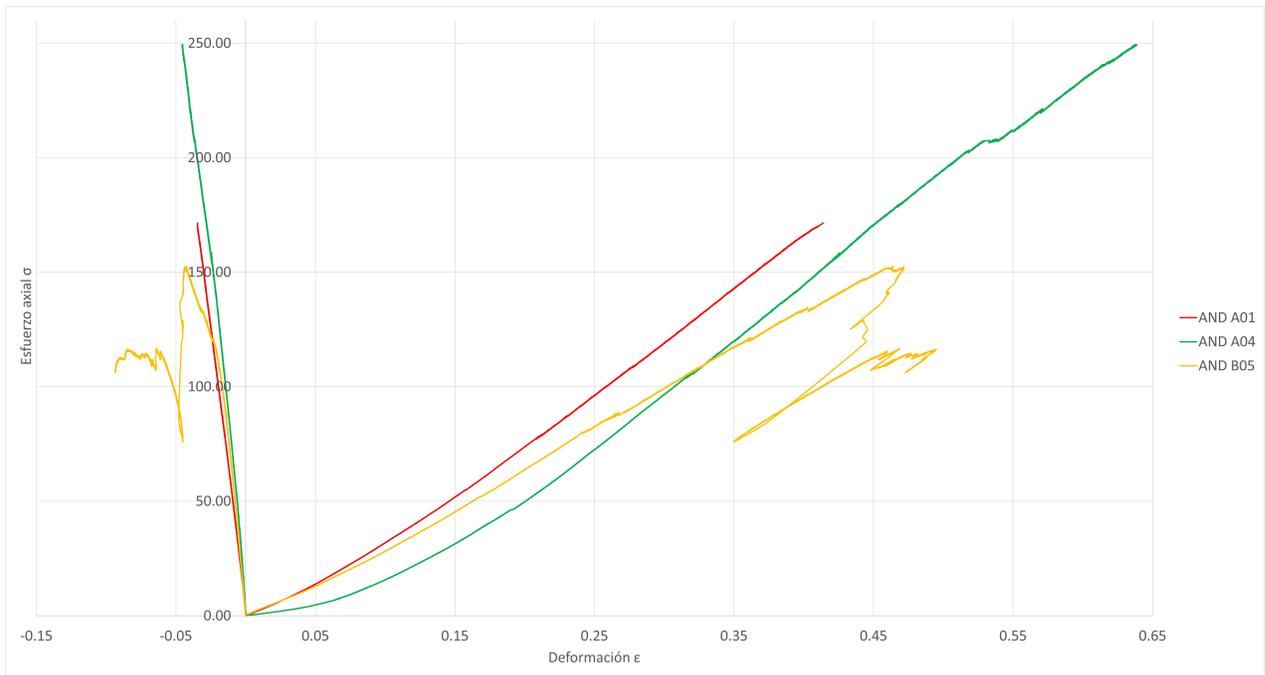


Figura 3.11: Curvas de esfuerzo-deformación para muestras Andesitas provenientes de depósito tipo Vetiforme.

La Figura 3.12 muestra las curvas de esfuerzo-deformación axial y diametral obtenidas de 3 muestras de Dioritas provenientes de un depósito tipo Pórfido Cuprífero. No se obtuvo completa la curva esfuerzo-deformación para este set. Cabe destacar el alto valor de resistencia máxima obtenida y el comportamiento bastante similar con respecto a las deformaciones axiales de las 3 muestras ensayadas.

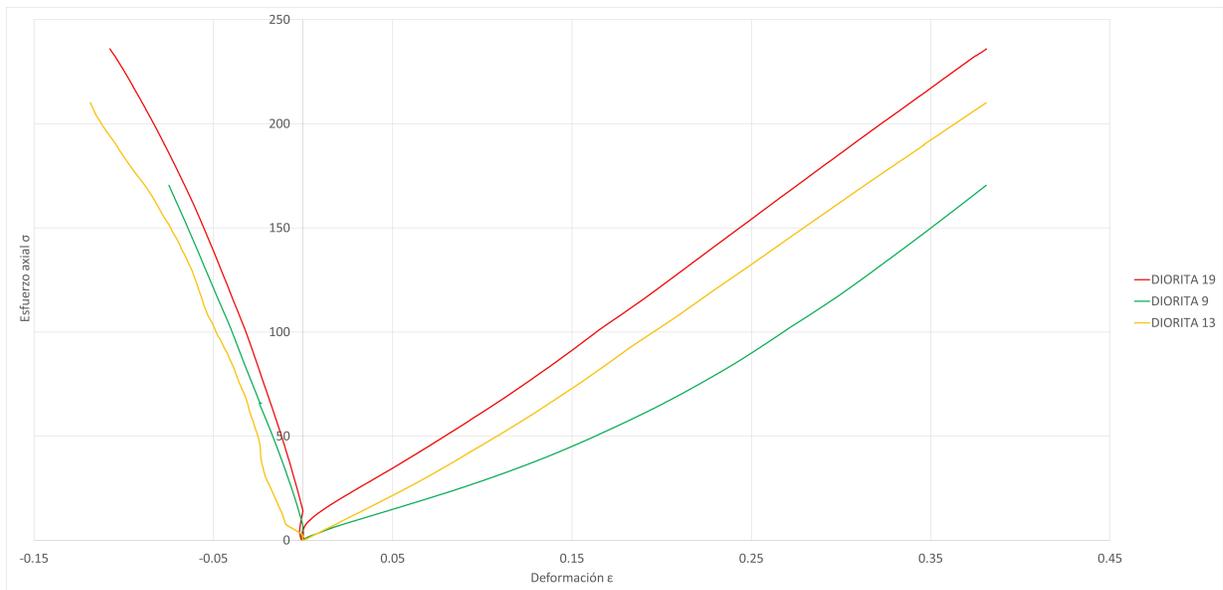


Figura 3.12: Curvas de esfuerzo-deformación para muestras Dioritas provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.

La Figura 3.13 muestra las curvas de esfuerzo-deformación axial obtenidas de 3 muestras de Gabros provenientes de un depósito tipo Pórfido Cuprífero. Al igual que las muestras de litología Diorita no se obtuvo completa la curva esfuerzo-deformación. También cabe destacar la variabilidad en los valores de resistencia máxima obtenida, y una variabilidad aún más significativa en la deformación diametral de las 3 muestras (Figura ??). Es este set el que presentaba mayor cantidad de vetillas mineralizadas, la orientación de ellas y la cantidad de ellas puede ser el causante de esta variabilidad.

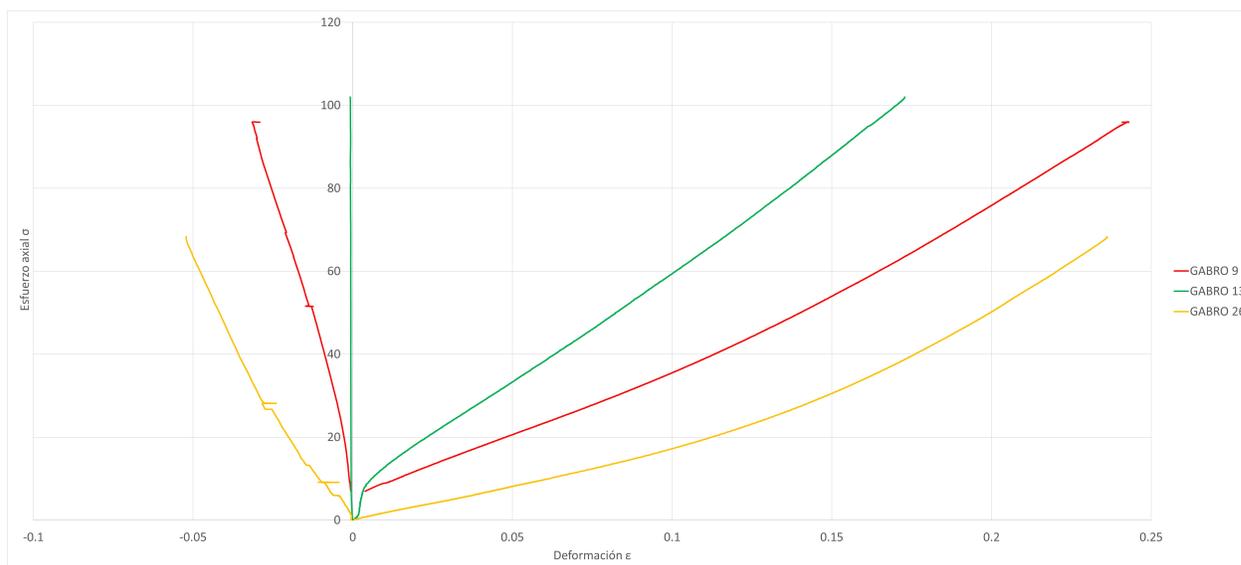


Figura 3.13: Curvas de esfuerzo-deformación para muestras Gabros provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.

El cálculo de los parámetros elásticos fue hecho siguiendo los estándares de ASTM y Eberhardt et al. (1998). La Tabla 3.2 resume el cálculo de estos parámetros para los 6 set de muestras incluidas en este estudio. El cálculo de todos los módulos para Andesitas - IOCG, Granodioritas - Pórfidos, Andesita - Vetiforme y Dacita - Pórfido fueron hechos con los datos entregados por los LVDT. Módulo de Diorita - Pórfido y Gabro - Pórfido fueron hechos con Straing Gauge.

Tabla 3.2: Resumen parámetros elásticos de 6 sets de muestras ensayadas.

Litología - origen	Muestra	Esfuerzo Peak (MPa)	Módulo de Young E (GPa)	Modulo de caída (GPa)
Dacita - Pórfido	M4A	157.70	25.40	41.20
	M5D	78.00	20.10	
	M7A	101.70	28.80	40.30
	M8C	59.60	21.50	31.00
	M8D	57.20	11.00	
	M9C	82.80	19.70	61.20
	M14D	116.30	24.70	28.40
	M24D	86.50	19.10	25.10
Andesita - IOCG	M25A	133.70	31.50	32.20
	ANDIO_1	51.89	25.83	24.00
	ANDIO_2	39.10	24.83	
	ANDIO_3	38.73	26.04	55.90
	ANDIO_4	54.41	28.22	27.66
	ANDIO_5	124.11	42.90	
	ANDIO_6	58.51	27.18	46.84
	ANDIO_7	96.41	42.31	85.26
Granodiorita - Pórfido	ANDIO_8	92.76	38.07	
	ANDIO_9	85.93	33.45	
	GRD1	77.80	30.21	44.03
Andesita - Vetiforme	GRD2	80.70	25.43	53.00
	GRD8	59.30	22.07	28.66
	AND-A01	171.48	45.85	
Diorita - Pórfido	AND-A04	249.46	50.31	
	AND-B05	152.50	36.03	
	DIORITA 19	235.99	63.79	
Gabro - Pórfido	DIORITA 9	230.76	61.39	
	DIORITA 13	230.56	59.69	
	GABRO 9	96.02	47.02	
	GABRO 13	102.02	53.91	
	GABRO 26	68.29	54.90	

Usando la ecuación (1.1) se pueden obtener los parámetros elásticos escalados a una muestra de $d = 50 \text{ mm}$ y $H/d = 2$

Tabla 3.3: Resumen parámetros elásticos de 6 sets de muestras ensayadas escaladas

d = 50 mm ; H/d = 2					
Litología - origen	Muestra	Esfuerzo Peak (MPa)	Módulo de Young E (GPa)	Modulo de caída (GPa)	Poisson (ν)
Dacita - Pórfido	M4A	157.69	25.40	41.20	0.15
	M5D	78.00	20.10		0.21
	M7A	101.68	28.79	40.29	0.12
	M8C	59.57	21.49	30.98	0.24
	M8D	57.17	10.99		0.17
	M9C	82.77	19.69	61.18	0.24
	M14D	116.27	24.69	28.39	0.2
	M24D	86.48	19.10	25.09	0.11
	M25A	133.67	31.49	32.19	0.16
Andesita - IOCG	ANDIO_1	51.41	25.59	23.78	0.33
	ANDIO_2	38.72	24.59		0.26
	ANDIO_3	38.36	25.79	55.37	0.33
	ANDIO_4	53.91	27.96	27.41	0.29
	ANDIO_5	122.92	42.49		0.33
	ANDIO_6	57.96	26.93	46.40	0.23
	ANDIO_7	95.47	41.90	84.43	0.28
	ANDIO_8	91.85	37.70		0.26
	ANDIO_9	85.10	33.13		0.28
Granodiorita - Pórfido	GRD1	81.11	32.13	45.90	0.05
	GRD2	84.13	26.28	55.25	0.08
	GRD8	61.83	24.34	29.88	0.01
	GRD3	105.10			
	GRD10	78.09			
Andesita - Vetiforme	AND-A01	171.08	46.52		0.10
	AND-A04	248.82	49.61		0.11
	AND-B05	152.14	34.53	88.38	0.10
Diorita - Pórfido	DIORITA 19	246.08	66.52		0.03
	DIORITA 9	240.80	64.06		0.03
	DIORITA 13	240.57	62.28		0.31
Gabro - Pórfido	GABRO 9	100.10	49.01		0.20
	GABRO 13	106.37	56.21		0.001
	GABRO 26	71.25	57.28		0.25

Capítulo 4

Discusión

4.1. Parámetros elásticos y litologías

La Figura 4.1 muestra valores de resistencia peak obtenidos para cada set de muestra ensayada en conjunto con valores encontrados de estudios anteriores. Se puede ver que Dacitas, Andesitas (IOCG), Granodioritas y Gabros tienen resistencias entre los 50 y 150 *MPa*. Andesitas (Vetiforme) y Dioritas entre 150 y 250 *MPa*.

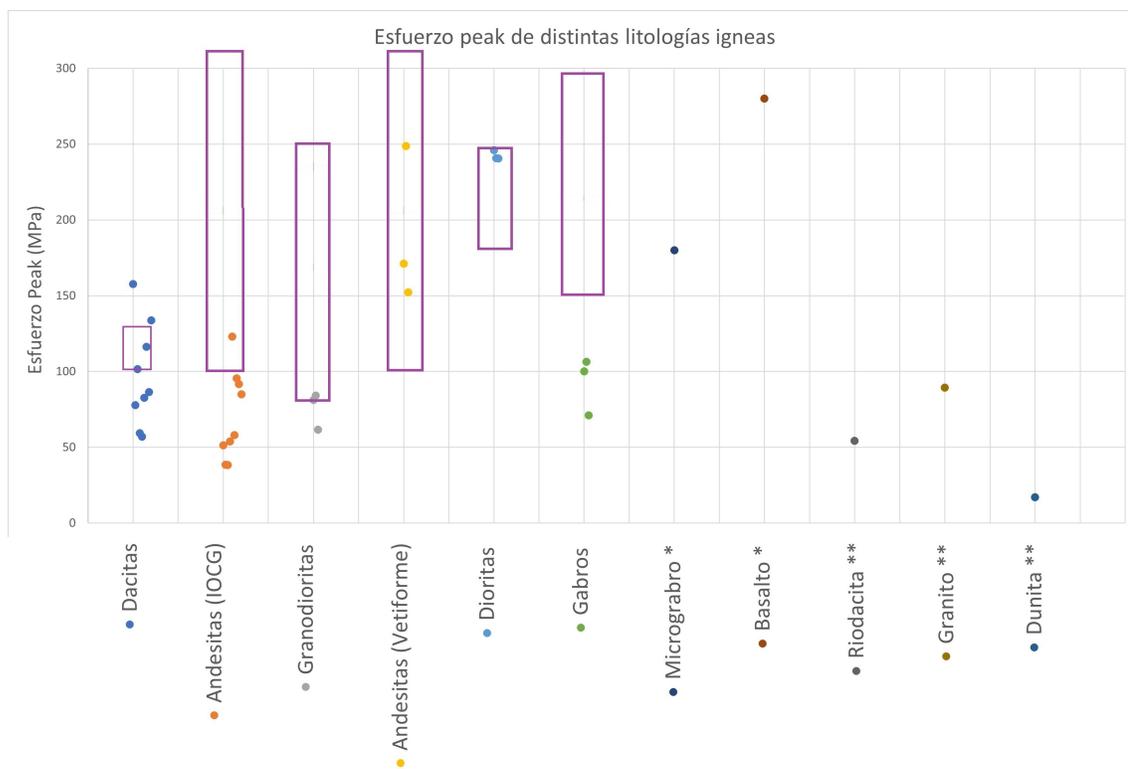


Figura 4.1: Esfuerzo máximo de compresión de distintas rocas ígneas. (*) Extraído de Khosravi 2016. (**) Extraído de Tutluouglu 2014. Rectángulos morados obtenidos de Tabla D.2. Anexo D

Se observa que el rango de valores promedio a la compresión simple, encontrado en la literatura, para las Dacitas es bastante acotado (Anexo D. Tabla D.2). Sin embargo, las muestras ensayadas están dentro de los rangos de estos valores y al tener casi todas un modo de falla A se considera que éstos son representativos de lo esperado para esta litología.

Con respecto a las muestras Andesitas (IOCG), El rango de valores a la compresión en la literatura oscila entre 100 y 500 *MPa*. Sólo 4 muestras, perteneciente al primer grupo (Figura 3.8), están cerca del mínimo de este rango mientras que aquellas pertenecientes al segundo grupo (Figura 3.9) tienen valores promedio de 48.56 *MPa*. (Tabla D.2). Dentro del primer grupo, las muestras ANDIO 8 Y ANDIO 9 son aquellas que presentan mayor presencia de mineralogía de alteración en vetillas: Cuarzo, Actinolita y Magnetita. Es por la presencia de este último mineral que estas muestras tienen altos valores de densidad. No comparte estas características la muestra ANDIO 5, que a pesar de ser la muestra con mayor resistencia peak, presenta menor cantidad de mineralogía de alteración y mayor cantidad de feldespático potásico. Además de ser la muestra con una fábrica de tendencia isótropa en comparación con las otras ensayadas.

Por otra parte, las muestras del segundo grupo, y a modo general para todas las muestras ensayadas, presentan una fábrica anisótropa donde minerales máficos, actinolita siguen una orientación en particular. Algunas vetillas de feldespatos, cuarzo y sulfuros de cobre siguen esta misma orientación, siendo estas estructuras los planos de falla de las muestras. (Figura A.1)

Con respecto a las densidades de estas Andesitas, los altos valores de estas muestras es debido al contenido de magnetita en ellas. Con respecto al contenido de este mineral, Inanloo et al (2018) realizaron ensayos de compresión uniaxial en muestras volcánicas e igneas provenientes de un depósito férrico encontrando un aumento de la resistencia a la compresión con respecto al aumento de la abundancia de magnetita. Una relación similar se encontró con respecto al módulo de young y el aumento de este mineral. Y una relación inversa del coeficiente de Poisson y el aumento en la abundancia de éste. Sin embargo, en estas muestras la proporción de magnetita en ellas no es posible cuantificarla en todas las muestras de manera de poder establecer una relación entre el contenido de este mineral y el esfuerzo peak.

Para las muestras de Granodioritas, las resistencias peak son valores más bajos con respecto a los encontrados en la literatura. En muestras de mano y cortes transparentes, se observa una baja presencia de mineralogía de alteración en la masa cristalina, bajo grado de meteorización pero abundante presencia de vetillas rellenas con mineralogía de sulfuros como calcopirita, piritita y bornita, además de cuarzo y mineralogía blanca de baja dureza y de grano muy fino. Así, de acuerdo al modo de falla, las discontinuidades y el relleno de estas podría ser un factor determinante en la variación de la compresión de estas muestras en comparación con la literatura. (Turichshev A. 2017)

Para los Gabros, los valores de densidad de cada muestra son prácticamente idénticos entre ellas (Figura 4.2) y están dentro de los valores esperados para este tipo de litología (Figura D.2). Además, las muestras presentan abundantes vetillas con mineralización de color claro (yeso y/o anhidrita) de baja dureza (< 3.5 en escala de Mohs) y abundante presencia de sulfuros de cobre como calcopirita. Lo que sería un factor determinante en la

variación significativa de la resistencia peak de esta litología (González de Vallejo, 2002). Luego del análisis de modo de falla de estas rocas, es posible afirmar que los bajos valores de resistencias a la compresión es debido a la abundancia de estas vetillas.

Con las Dioritas, ocurre un caso similar a las Dacitas. Todas ellas tienen una resistencia peak dentro del rango de valores encontrados en la literatura. Además, al tener todas las muestras ensayadas un modo de falla A, se considera que los valores encontrados son representativos de la litología.

Por último, para las Andesitas provenientes del un depósito tipo vetiforme, los valores del esfuerzo peak están dentro de los rangos esperados para esta litología. Todas ellas tienen vetillas de cuarzo y/o clorita, pero de acuerdo al modo de falla, no son estructuras determinantes en el fallamiento de las muestras. Sin embargo, se puede observar variaciones de este valor para esta litología. Las muestras AND-B05 y AND-A01, con valores más bajos de resistencia a la compresión, tienen mayor abundancia de clorita en su matriz y microvesículas en las caras laterales de las muestras. Por otro lado, la muestra AND-A04, que tienen una resistencia peak muy superior a las muestras anteriores, presenta mayor abundancia de mineralogía férrica como piroxenos y un leve magnetismo que también se ve reflejado en un valor superior de su densidad con respecto a las dos muestras. Además, no presenta microvesículas en ninguna cara de la muestra.

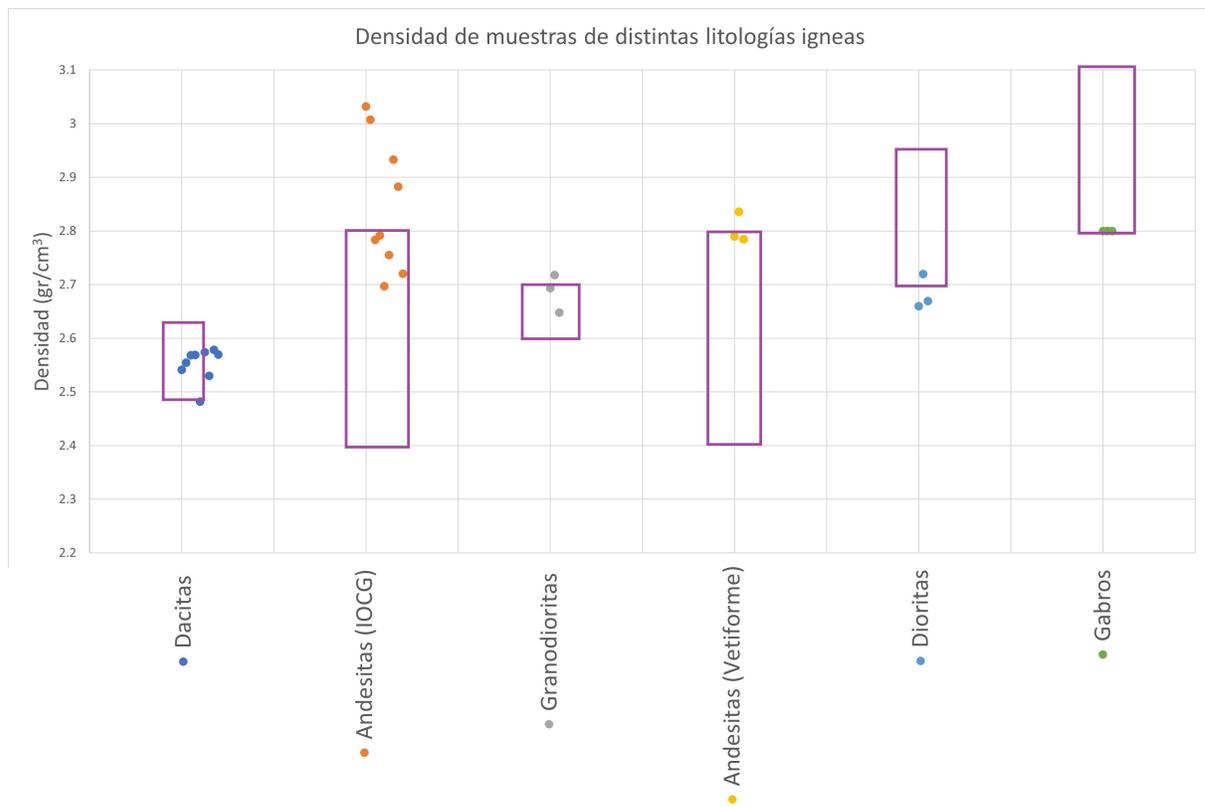


Figura 4.2: Densidad de muestras de distintas litologías igneas. Rectángulos morados extraídos de Figura D.2. Anexo D. Para Dacita (Ransome F. 1909)

La Figura 4.3 muestra los módulos de Young obtenidos de las muestras ensayadas. Es importante destacar que sólo para Dioritas y Gabros este parámetro fue calculado usando Strain Gauges. Para las litologías restantes, el cálculo fue hecho usando los valores obtenidos por medio de los LVDT. Así, sólo para Dioritas y Gabros es posible hacer una comparación directa entre estos valores y los encontrados en la literatura (Tabla D.3). El análisis para las otras litologías serán con respecto a variaciones entre ellas y con respecto a los valores de otros investigadores en los que se usa el mismo elemento de medición de deformación lineal o LVDT.

Para las Dacitas, no se aprecian grandes variaciones de este parámetro, salvo para la muestra M8D, que tiene un Módulo de Young de 10.9 (GPa) y que también es una de las muestras con un esfuerzo peak más bajo de 57.1 (MPa). Otra muestra que también tiene una resistencia peak baja es M8C, con un valor de 59.5 (MPa) pero éste módulo es más alto (21.4 GPa) y similar al resto de las muestras. El modo de falla de ambas muestras es A, por lo que el valor tan bajo de este parámetro para M8D debe estar justificado en otras características de la muestra o errores en la medición de éste mismo.

Para las Andesitas provenientes de un depósito tipo IOCG se pueden observar dos grupos. El primer grupo con valores de éste módulo entre 20 y 30 (GPa) y el segundo grupo con valores entre 30 y 45 (GPa). Esto también se observa en los valores de la resistencia peak, donde este primer grupo tiene resistencias entre 30 y 60 (MPa), mientras que el segundo grupo tiene resistencias peak entre 80 y 125 (MPa) (Figura 4.9). De esta manera, para esta litología

se puede afirmar que las muestras con mayor resistencia a la compresión son más frágiles. Aunque, de acuerdo al análisis previo, no es posible identificar con precisión los factores determinantes de este comportamiento para esta litología.

Para las Granodioritas, se puede observar una tendencia similar, pero no tan clara debido a la poca cantidad de muestras. Tendencia que es mucho más clara para las Andesitas provenientes de un depósito tipo vetiforme, donde muestras con mayor resistencia peak a la compresión tienen un Módulo de Young más alto (Figura 4.9), mostrando así un comportamiento más frágil.

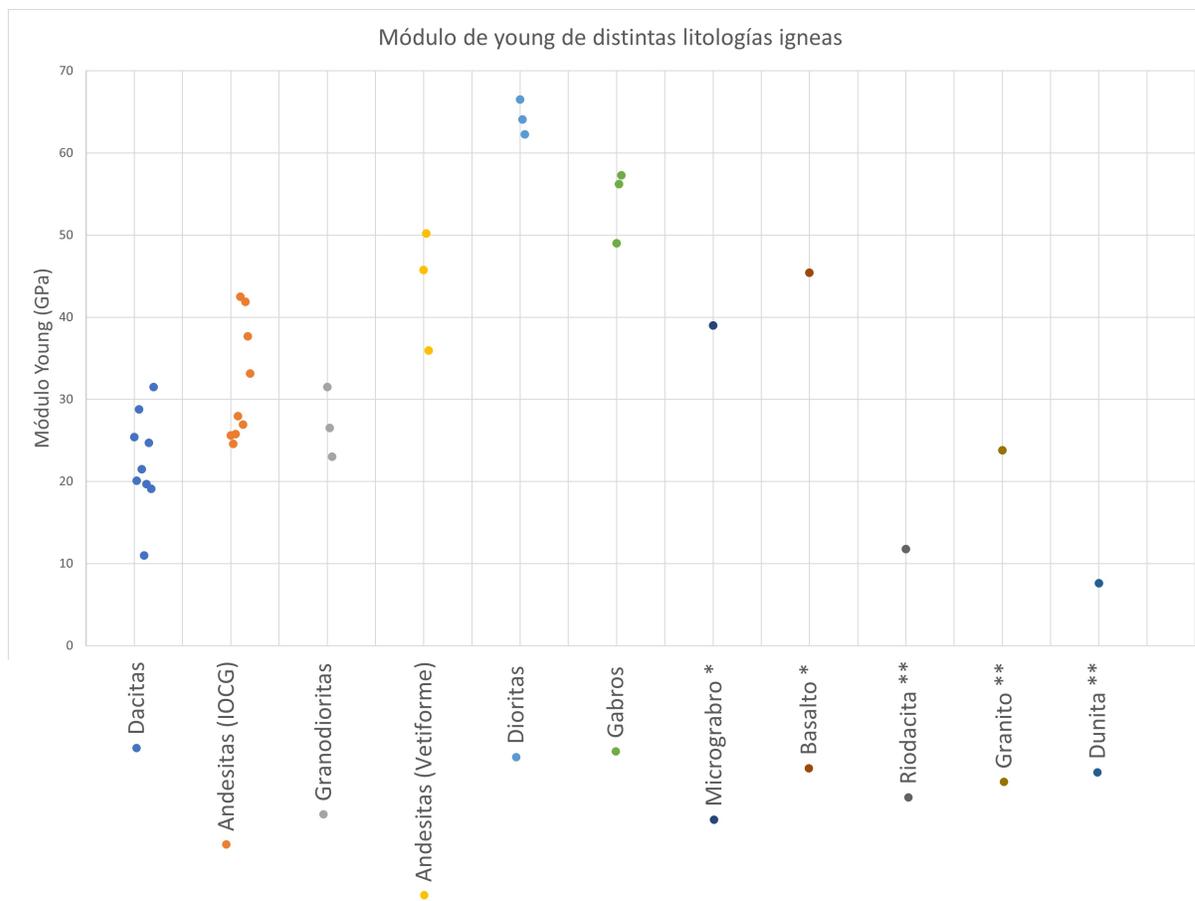


Figura 4.3: Módulo de Young de distintas rocas Igneas. Para Dacitas, Andesitas (IOCG), Granodioritas y Andesitas (Vetiforme) el cálculo fue hecho en curvas obtenidas de palpadores LVDT. Para Dioritas y Gabros el cálculo fue hecho en curvas obtenidas de Straing Gauges. (*) Extraído de Khosravi 2016. (**) Extraído de Tutluouglu 2014.

La Razón de Poisson de cada litología se muestra en la Figura 4.4. Los valores más altos los obtienen las Andesitas provenientes de depósito tipo IOCG, seguido de Dacita. Andesitas provenientes de depósito tipo Vetiforme y Granodioritas presentan valores relativamente bajos.

Con respecto a las Dioritas, dos muestras presentan valores extremadamente pequeños en comparación con lo esperado (Figura D.3). El modo de falla de estas dos muestras fue por matriz, sus módulos de Young, resistencia a la compresión y densidades son muy similares entre sí. Por lo tanto, esta variación de valores tan drástica de la razón de Poisson puede ser debida a factores intrínsecos de la muestra en sí o a errores en las mediciones de los Strain Gauges. Lo mismo ocurre con para una muestra de Gabros, donde su módulo de Poisson es 0.001, lo que puede corresponder a un error en la medición por parte de los Strain Gauges.

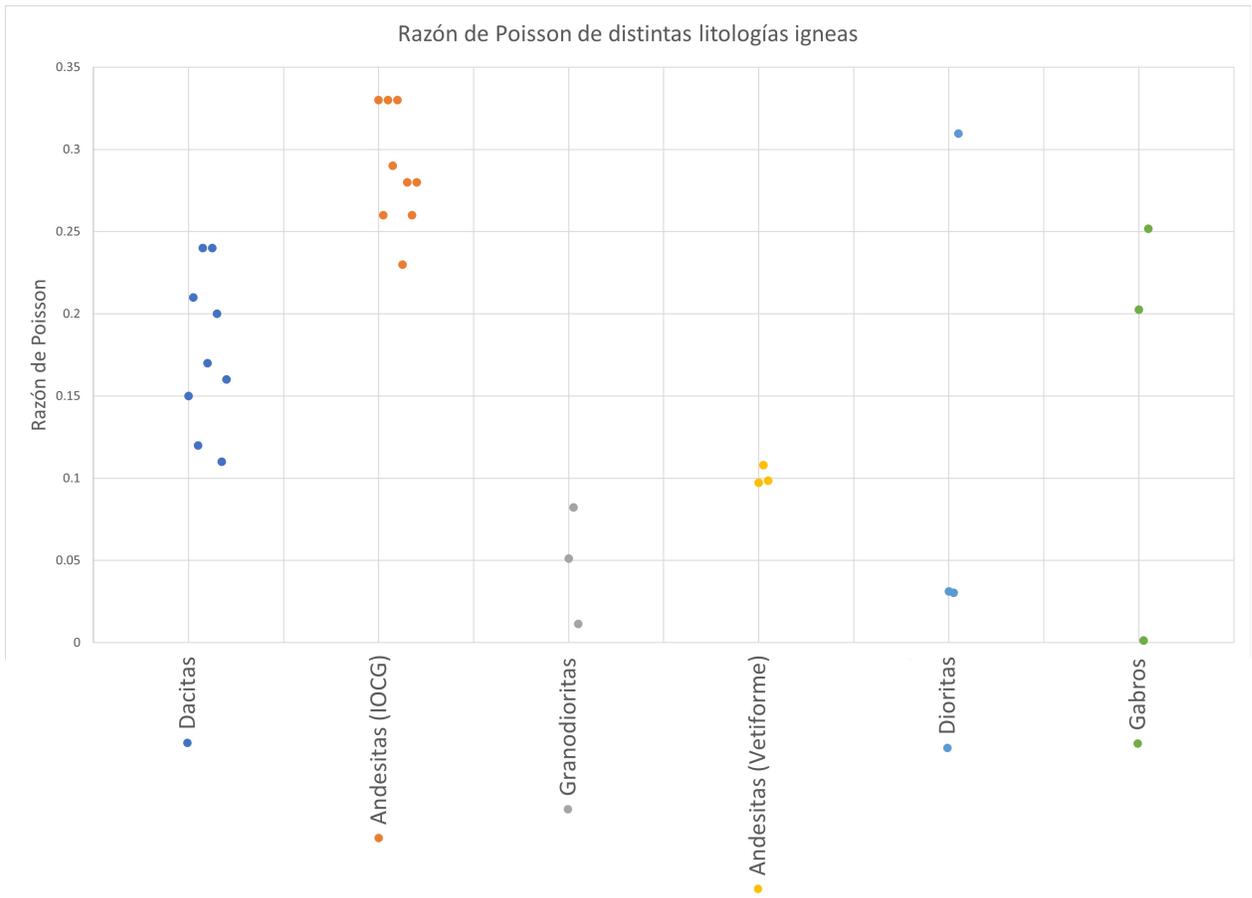


Figura 4.4: Coeficiente de Poisson para muestras igneas. Para Dacitas, Andesitas (IOCG), Granodioritas y Andesitas (Vetiforme) el cálculo fue hecho en curvas obtenidas de palpadores LVDT. Para Dioritas y Gabros el cálculo fue hecho en curvas obtenidas de Strain Gauges. (*) Extraído de Khosravi 2016. (**) Extraído de Tutluouglu 2014.

En la Figura 4.5 se compara el Módulo de Young con respecto a la Razón de Poisson y se puede ver que los datos están muy dispersos y no es posible encontrar una tendencia clara entre estos parámetros. Además, para los dos sets de Andesitas (provenientes de depósito tipo IOCG y vetiforme) a pesar de compartir una composición mineralógica en común no

tienen los mismos parámetros mecánico elásticos. Esta respuesta a la deformación, como ya se mencionó en el análisis, se debe a las estructuras presentes en cada litología, la mineralogía que rellena las estructuras, fábrica de la muestra, textura y alteración mineralógica a la que fue sometida la muestra debido al tipo de depósito al cual pertenece.

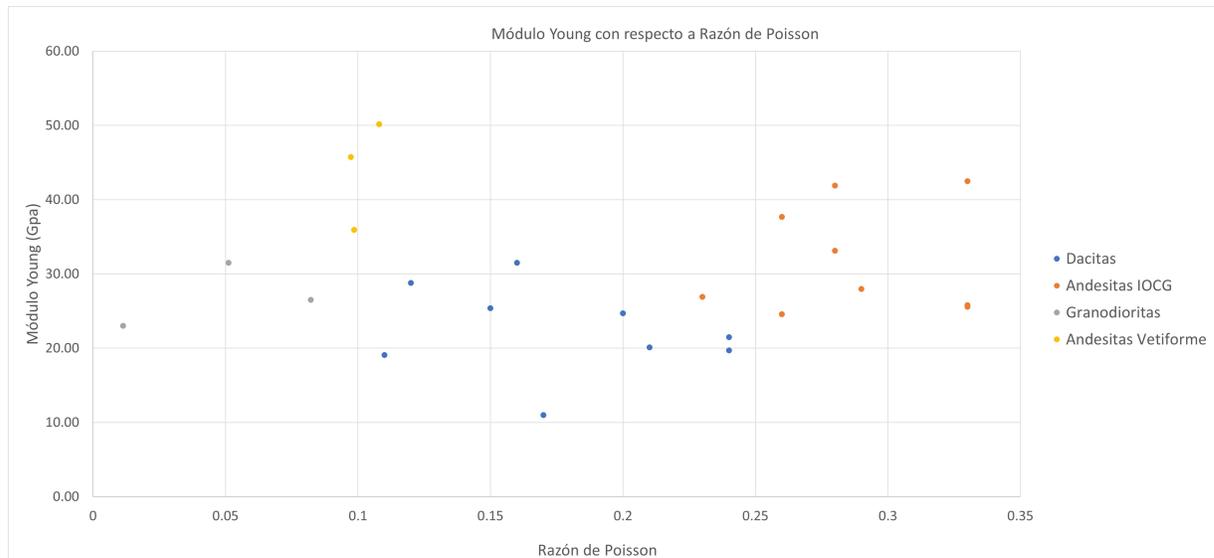


Figura 4.5: Módulo de Young de distintas rocas Igneas con respecto a la Razón de Poisson. Mediciones hechas con datos obtenidos por LVDT.

La Figura D.4 muestra los módulos de caída de distintas rocas ígneas ensayadas. Se aprecia que no existe una tendencia que caracterice a ningún set en particular, y los valores se encuentran dentro de rangos similares entre los sets y las litologías. Para muestras más dúctiles como Dacitas, Granodioritas y Andesitas (IOCG), obtener este módulo fue más sencillo debido a la poca energía acumulada en la zona peak que permitió continuar con los ensayos en la zona post-peak. En las Andesitas (IOCG) hay mayor dispersión del valor de este módulo ya que no todas las muestras se comportaron de la misma manera, debido a las razones antes mencionadas en los análisis anteriores. Por último, para las Andesitas provenientes de un depósito Vetiforme, el alto valor del módulo de Young y resistencia peak a la compresión indican un comportamiento más frágil y mayor capacidad para almacenar energía, resultando en el estallido violento de la muestra al momento de alcanzar el punto peak de resistencia.

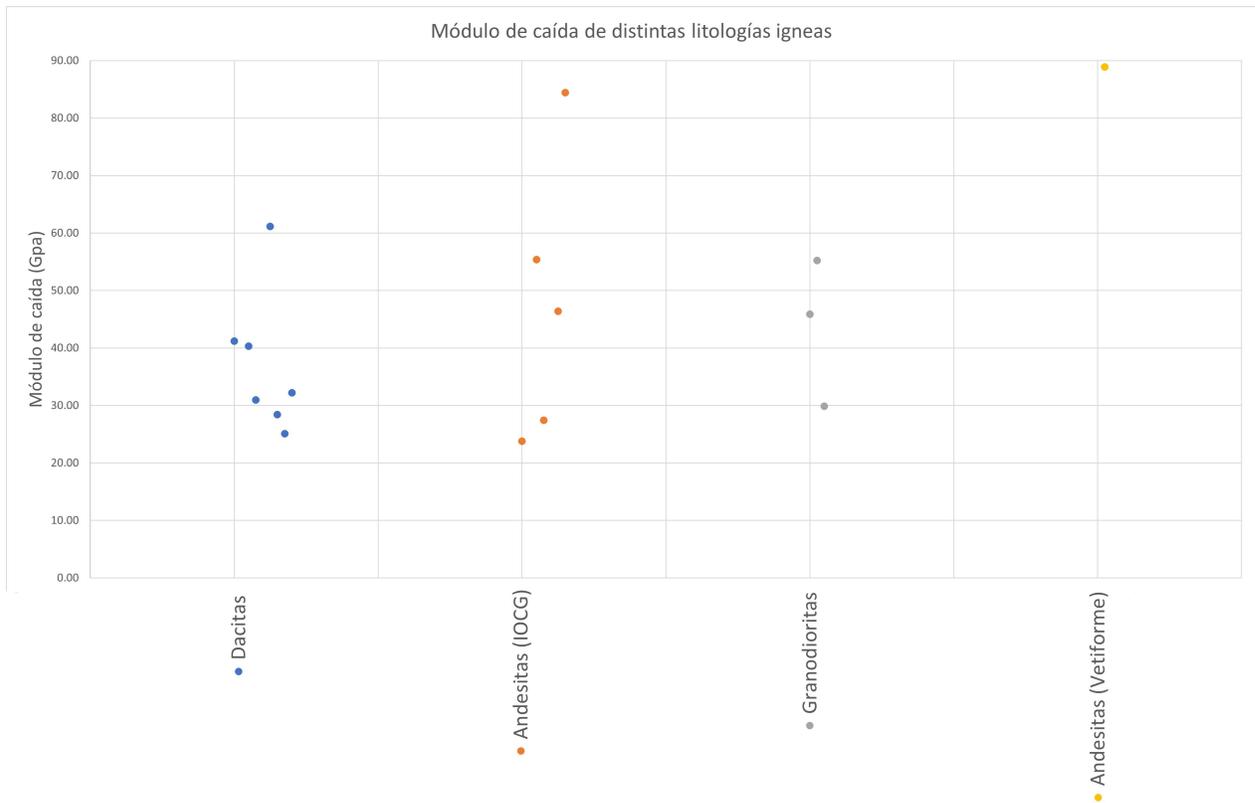


Figura 4.6: Módulo de caída de distintas rocas ígneas.

Numerosas investigaciones han estimado relaciones entre E , ν y otras constantes elásticas y físicas de las rocas sometidas a compresión. Judd y Huber 1961, establecieron estudios estadísticos de las variables elásticas de roca de distintas litologías proponiendo algunas relaciones entre ellas.

A continuación, se propone una relaciones entre los parámetros elásticos y algunas características físicas de las rocas ensayadas.

Comparando el Módulo de Young con la densidad de las muestras se obtiene la Figura (4.7). Muestras félsicas como Dacitas y Granodioritas presentan bajas densidades en comparación con muestras de tendencia máfica como Andesitas. La presencia de cuarzo en muestras félsicas reduce su masa y densidad en comparación con las muestras intermedias o máficas que tienen mayor contenido de minerales férricos como piroxenos y magnetita lo que las vuelve más densas. Una leve tendencia similar se observa en el Módulo de Young, donde Dacitas y Granodiorita presentan rangos de este módulo más bajos en comparación con Andesitas (IOCG y vetiforme). Pudiendo afirmar así, que para las muestras de composición de tendencia máfica tienen un comportamiento más frágil en comparación con aquellas de composición félsica.

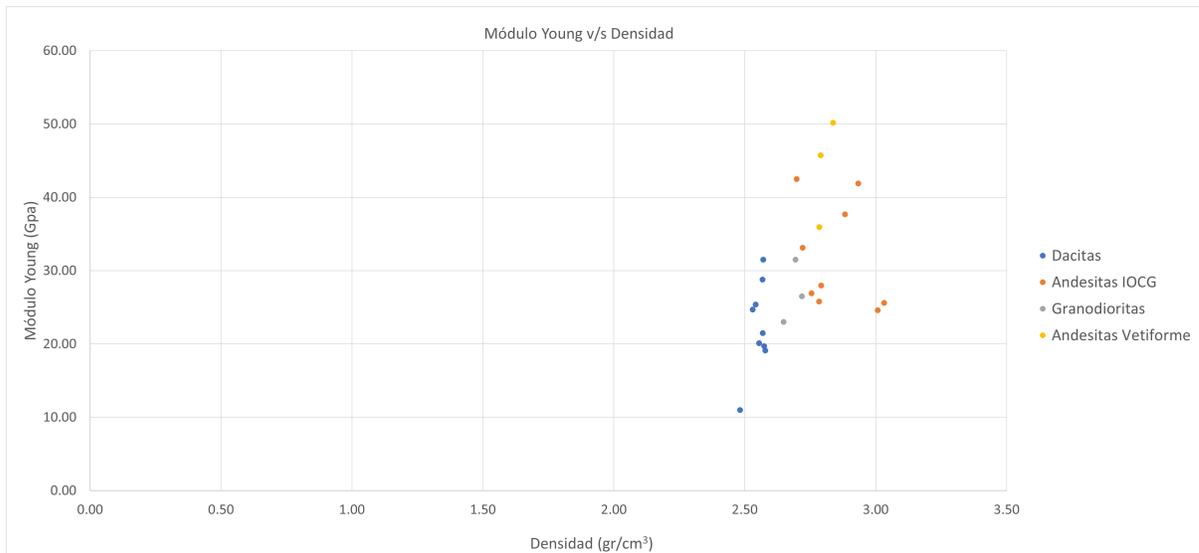


Figura 4.7: Módulo de Young (E) con respecto a la densidad de rocas igneas ensayadas.

En la Figura 4.8 se compara los valores de resistencia peak con respecto a las densidades de las muestras. En esta figura no es claro ver alguna tendencia de estos valores, lo que sugiere que no existe una relación entre la densidad y el esfuerzo peak de compresión. Esto puede ser debido a las abundantes estruclas presentes en las muestras que determinaron el comportamiento mecánico de ellas o las relaciones espaciales mútuas como textura, estructura y fábrica de cada litología.

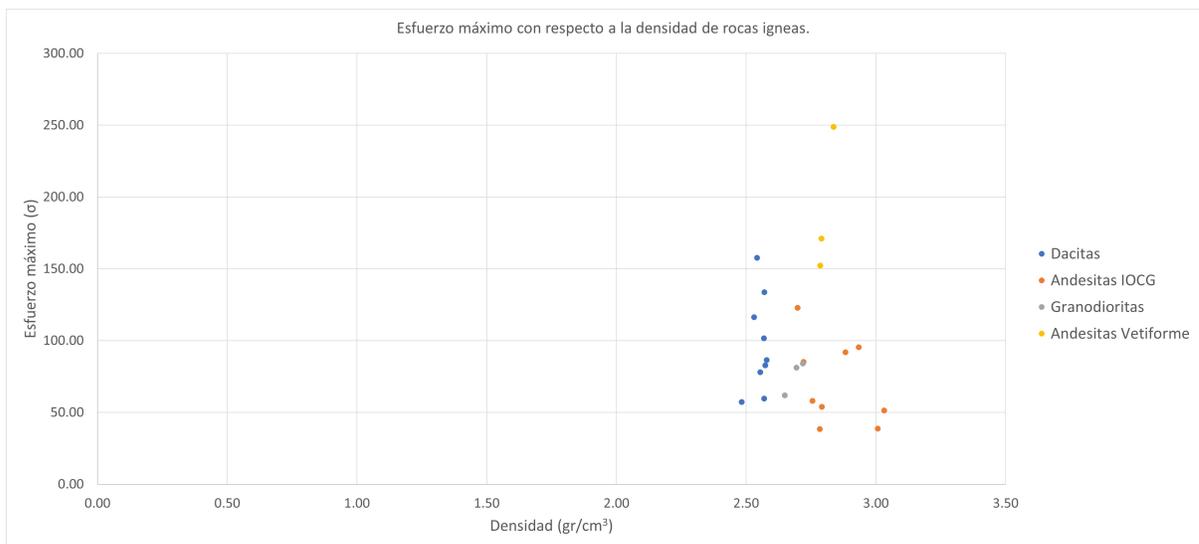


Figura 4.8: Esfuerzo Peak (σ) con respecto a la densidad de rocas igneas ensayadas.

Comparando el Módulo de Young con respecto a la resistencia peak de compresión, se obtiene la siguiente figura.

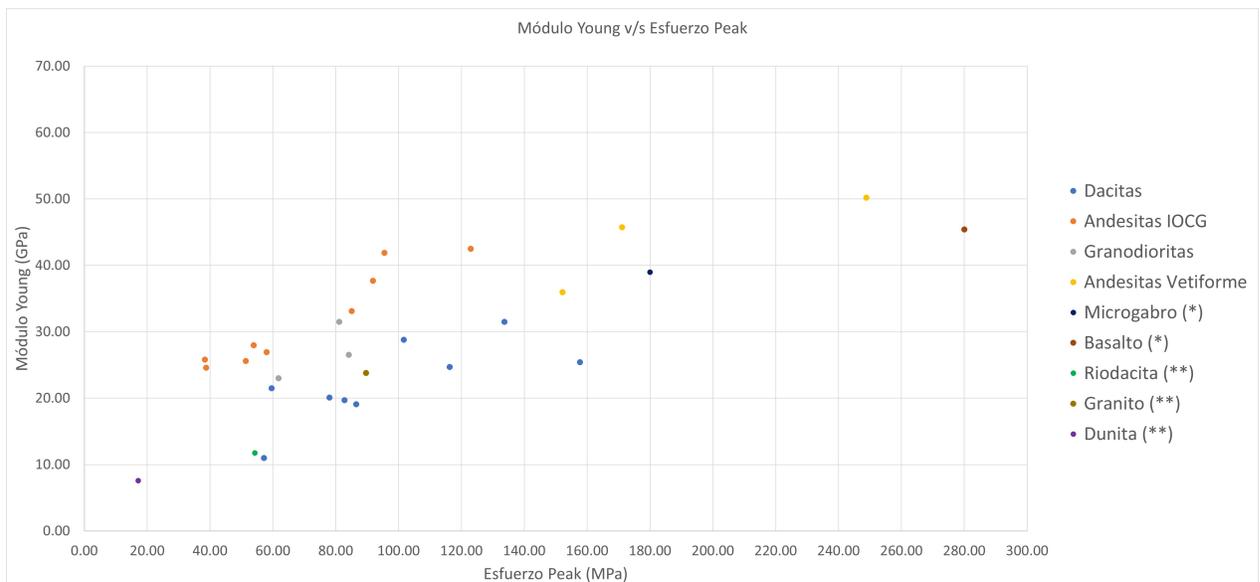


Figura 4.9: Módulo de Young (E) con respecto a resistencia la compresión (σ) de rocas ígneas. (*) Extraído de Khosravi 2016. (**) Extraído de Tutluouglu 2014.

Se propone una relación potencial entre estos parámetros (Figura 4.10) de ecuación:

$$E = 1,26\sigma^{0,66}; R^2 = 0,76 \quad (4.1)$$

El coeficiente de correlación no es lo suficientemente alto como para asegurar una dependencia potencial entre estos parámetros. Sin embargo, es el mejor ajuste encontrado para estos datos. Además, se ve que para las litologías ensayadas una relación entre estos parámetros no depende de la litología. Es decir, no se puede separar las litologías máficas de las felsicas por medio estos parámetros. Esto puede deberse a que la mayoría de las rocas ensayadas presentan estructuras y alteraciones composicionales y estructurales que afectan su comportamiento mecánico. Es por esto que para validar este modelo es necesario realizar más ensayos, aumentando el espectro de rocas ígneas y seleccionando muestras que presenten la menor cantidad de estructuras y anomalías composicionales posibles.

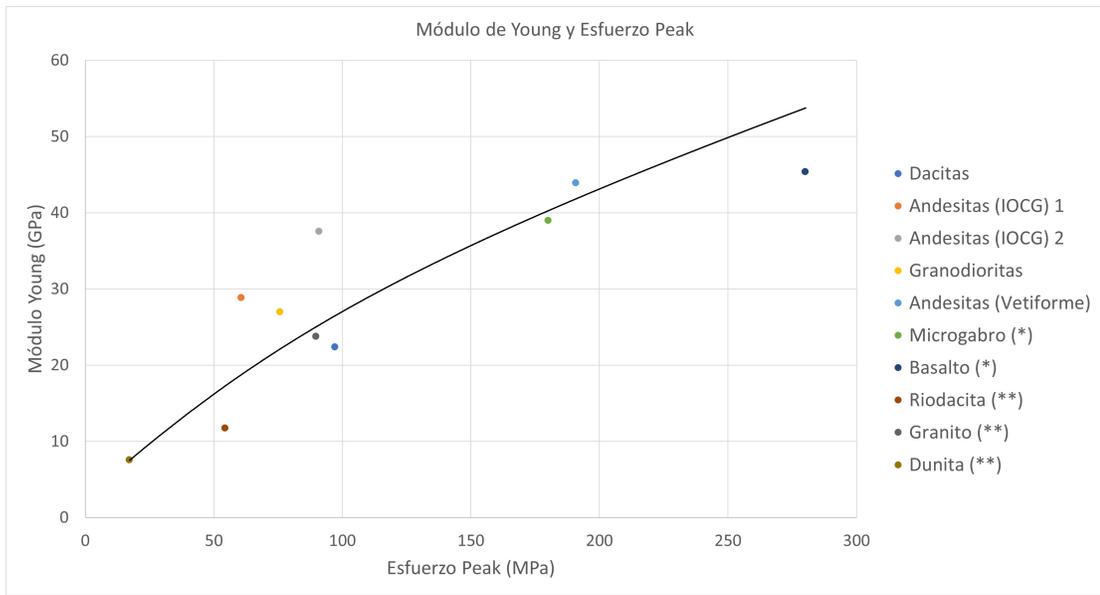


Figura 4.10: Módulo de Young (E) con respecto a resistencia la compresión (σ) de rocas igneas. (*) Extraído de Khosravi 2016. (**) Extraído de Tutluouglu 2014.

Tutluouglu 2014, estableció una relación potencial entre el Módulo de Caída y el Módulo de Young. De la misma manera, se puede encontrar una relación entre los promedios de estas variables para cada litología ensayada (Figura 4.11), obteniendo la ecuación:

$$M = 0,30E^{1,50}; R^2 = 0,89 \quad (4.2)$$

De acuerdo al coeficiente de correlación se puede estimar una buena correlación entre estas variables. Luego, de acuerdo a esta relación se puede ver que para rocas igneas el Módulo de Caída es mayor con respecto al Módulo de Young para cada litología.

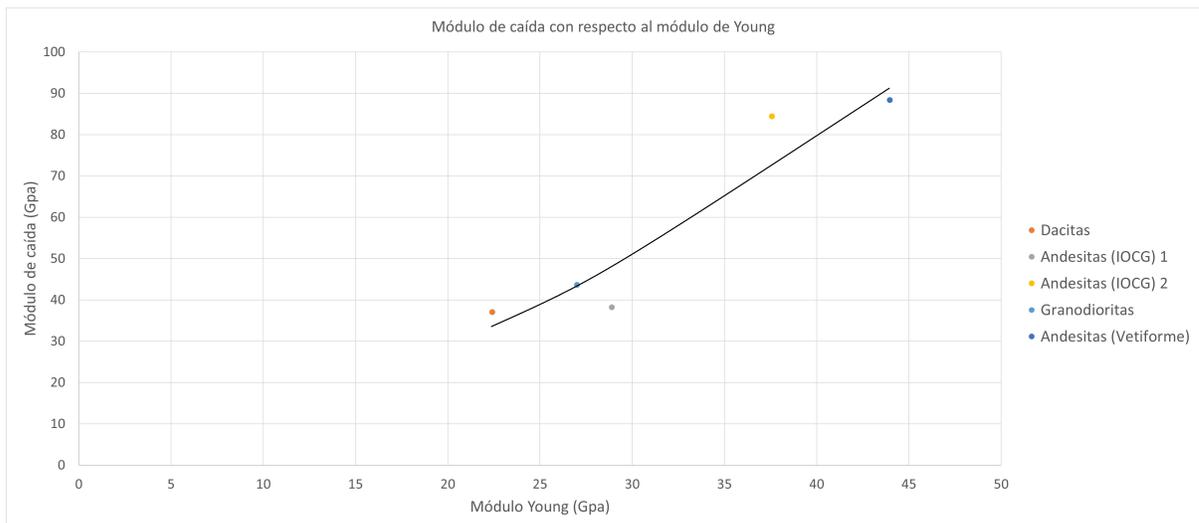


Figura 4.11: Módulo de caída M con respecto a Módulo de Young (E) de rocas igneas.

Capítulo 5

Conclusiones

El objetivo general de esta investigación es caracterizar el comportamiento post-peak de rocas ígneas, a través de la realización de ensayos de compresión uniaxial y encontrar sus respectivas curvas esfuerzo-deformación (axial y diametral). Así, determinar los principales parámetros elásticos que permitan describir el comportamiento de cada litología en cuestión.

Se ensayaron un total de 23 muestras, logrando 21 ensayos exitoso. En 15 de ellos se logró obtener la curva completa con zona pre y post-peak, las cuales corresponden a muestras Granodioritas, Andesitas (IOCG) y Andesitas (Vetiforme). De cada una de ellas se calcularon 4 parámetros elásticos: Módulo de Young (E), Razón de Poisson (ν), Módulo de Caída (M) y Resistencia a la Compresión (σ) y se agregaron 9 valores de estos parámetros obtenidos de estudios anteriores (Zuñiga et al 2020). Los rangos de valores obtenidos de cada uno, por litología son los siguientes:

Tabla 5.1: Rango de valores parámetros elásticos por litología. Para Granodioritas, Dacitas, Andesitas (IOCG) y Andesitas (Vetiforme) parámetros fueron calculados en curvas obtenidas de LVDT. Para Dioritas y Gabros parámetros fueron calculados en curvas obtenidas de Strain Gauges.

	Granodioritas	Dacitas	Andesitas (IOCG)	Andesitas (Vetiforme)	Dioritas	Gabros
Módulo de Young(E) (GPa)	24-33	10-29	25-43	34-50	62-67	49-58
Resistencia a la Compresión (σ) (MPa)	61-82	57-160	38-123	150-250	240-250	70-110
Razón de Poisson (ν)	0.01-0.08	0.11-0.24	0.23-0.33	0.1-0.11	0.3	0.001-0.25
Módulo de Caída (M) (GPa)	29-56	25-62	23-85	88		

La metodología usada para realizar cada uno de los ensayos y propuesta por la ISRM resultó ser adecuada para poder obtener la curva completa de esfuerzo-deformación. Sin embargo, leves modificaciones fueron hechas de acuerdo al comportamiento y características físicas de cada set de muestras. Estas modificaciones resultaron exitosas para muestras de Granodioritas y Andesitas (IOCG) pero no fue suficiente para muestras Andesitas (Vetiforme) donde sólo en una muestra se logró obtener la zona post-peak. Esto es debido a la gran cantidad de energía acumulada por estas muestras en la zona peak, lo que llevo a un estallido en el peak de resistencia. Todas las curvas que presentaron zona post-peak mostraron un comportamiento clase II.

Aunque unos de los alcances del estudio fue usar muestras de pequeños diámetros para reducir el efecto de discontinuidades, fue difícil encontrar muestras que fueran consideradas roca intacta, debido al gran número de discontinuidades producto de re-mineralización en la masa cristalina o estructuras mineralizadas presentes en ellas.

Luego del análisis de cada parámetro elástico y propiedades físicas propias de cada litología se encontraron ciertos valores anómalos que no correspondían con lo encontrado en la literatura. Andesitas (Vetiforme) y Dioritas presentaron resistencias a la compresión dentro del rango de valores esperados. Gabros y Granodioritas presentaron bajos valores, los cuales pueden ser causados por la alta presencia de vetillas con mineralogía blanda. Las cuales, de acuerdo al modo de falla, fueron determinantes en el comportamiento mecánico de estas litologías. Andesitas (IOCG) presentan valores bajos también lo cual puede ser debido a las relaciones espaciales mútuas como textura, estructura y fábrica de cada muestras.

El Módulo de Young de Dioritas y Gabros están dentro de los valores encontrados en la literatura. Para Dacitas, Andesitas (Vetiforme) y Andesitas (IOCG), este módulo fue calculado usando mediciones con LVDT por lo que no se encontró literatura para comparar los valores obtenidos.

La Razón de Poisson para Andesitas provenientes de depósito tipo IOCG y depósito tipo Vetiforme presentan grandes variaciones a pesar de ser la misma litología base. Estas variaciones pueden deberse a características estructurales, mineralógicas de cada muestras y/o grados de meteorización. Dioritas también presentan valores muy dispersos de este módulo, lo que puede deberse a características estructurales de cada probeta o mediciones erróneas de los sensores Strain Gauge.

Se proponen relaciones entre los parámetros elásticos y físicos con el fin de poder encontrar una clasificación que dependa de cada litología. Entre Módulo de Young (E) y Resistencia a la Compresión se determinó una relación polinomial de ecuación $E = 1,26 \times \sigma^{0,66}$, con coeficiente de correlación $R^2 = 0,76$. La baja correlación sugiere una baja dependencia entre estos dos parámetros. No obstante, se propone realizar más estudios a futuro para lograr robustecer ésta.

Estudiando la densidad de las muestras con respecto al Módulo de Young, se determinó el aumento de este parámetro a medida que las muestras tendían al espectro máfico o básico.

Se propone una relación polinomial de ecuación $M = 0,30 \times E^{1,5}$ con coeficiente de correlación $R^2 = 0,89$ entre el Módulo de Caída y el Módulo de Young. Un buen valor de correlación sugiere que para todas las litologías el Módulo de Caída es mayor con respecto al Módulo de Young. Sin embargo, es necesario realizar más ensayos y estudios para robustecer este módulo y poder incluir más rocas chilenas dentro del mismo espectro ígneo.

Finalmente, para poder mejorar y completar este estudio, se propone realizar más ensayos, expandiendo el espectro de litologías ígneas y seleccionando de mejor manera muestras que cumplan con la condición de roca intacta. Además, es necesario la búsqueda de modificaciones a la metodología propuesta por la ISRM. De tal manera de poder obtener la curva de esfuerzo deformación, evitando los estallidos de las muestras, y reducir los tiempos de realización de los ensayos.

Bibliografía

- [1] Mohd. Abdullah, Rini Mohd Amin. *Verification of post failure behaviour of rock using closed-circuit servo-controlled testing machine*, volume 54. pages 17-20. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 2008.
- [2] Zhu W. Baud P, Wong T-F. *Effects of porosity and crack density on the compressive strength of rocks*. Int J Rock Mech Min Sci., 2013.
- [3] W. F. Brace. *Dependence of Fracture Strength of Rocks on Grain Size* Penn. State Univ. Mineral Expt. Sta. Bull., 1961.
- [4] N.G.W. Cook. *A note on rockburst considered as a problem of stability*, volume 65, Pages 437-446. J. South Afr. Int. Min. Metallurgy, 1965.
- [5] Luis I. González de Vallejo. *Ingeniería geológica* Pearson Educación, 2002.
- [6] Stead D Stimpson B Read RS Eberhardt, E. *Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock*, volume 35, no. 2, pp. 222–233. Canadian Geotechnical Journal, 1998.
- [7] Viktor Efimov. *Tensile fracture of rocks under uniaxial compression*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science., 2018.
- [8] Hudson Fairhurst. *Discussion*, volume 36, Issue 3, Pages 279-289. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999.
- [9] Krasilova N.S. Ladygin V.M. Golodkovskaia, G.A. *Factors controlling solid rock strength*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1975.
- [10] A.Crouch S. L. Fairhurst C. Hudson, J. *'Soft, stiff and servo-controlled testing machines: a review with reference to rock failure*, volume 6 Issue 3, Pages 155-189. Engineering Geology, 1971.

- [11] Sereshki F. Ataei M. Inanloo Arabi Shad, H. *Effect of magnetite content on Bond work index and preconditioning: Case study on Chadormalu iron ore mine.*, volume 25. J. Cent. South Univ., 2018.
- [12] K. Fukui K. Hashiba, S. Okubo. *A new testing method for investigating the loading rate dependency of peak and residual rock strength*, volume 43, Issue 6, Pages 894-904. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006.
- [13] Roghanchi Pedram Kallu, Raj. *Correlations between direct and indirect strength test methods*.
- [14] Hamed. Keikha, T. Abdeh Keykha. *Correlation between mineralogical characteristics and engineering properties of granitic rocks.*, volume 18. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 2013.
- [15] Arash khosravi. *Estimation and validation of post-peak behavior of hard rocks*. Departement Des Genies Civil, Geologique Et Des Mines (CGM), 2016.
- [16] A. Zanettin B. Le Bas M. Bonin Bernard Bateman P. Maitre, R. Streckeisen. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002.
- [17] V Maksaev. *Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis Andina: Lecture Notes (Unpublished)*. Universidad de Chile, Santiago., 2001.
- [18] Victor. Mpodozis, Constantino Ramos. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*, volume 390 pp. 109. Minerals and Rocks. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag., 1981.
- [19] Victor. Mpodozis, Constantino Ramos. *The Andes of Chile and Argentina, in: Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources*, volume 11. pages 59-90. Earth Sciences Series, 1989.
- [20] Carlos Zuñiga Nuñez. *Scale effect on the post-peak behavior of Dacite Rock in uniaxial compression tests*. RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil de Minas y grado de Magister en Minería, 2020.
- [21] Nishimatsu Y. He C. K. Okubo, S. *Technical Note Loading Rate Dependence of Class II Rock Behaviour in Uniaxial and Triaxial Compression Tests - An Application of a Proposed New Control Method*, volume 27 No 6. Pages 559 – 562. Int.J.Rock Mecha.Min. Sci. Geomech, 1985.
- [22] Vallejos JA Pollak, D. *‘Consideraciones para ensayos de compresión uniaxial con medición de comportamiento postpeak y resultados preliminares’*. UMining: Congreso Iberoamericano en Minería Subterránea y a Cielo Abierto, Santiago, Chile., 2018.
- [23] Eial Salinas Riveros. *Análisis de propiedades geotécnicas de algunas rocas comunes en Chile*. Memoria para optar a título de Geólogo. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, 2018.
- [24] Fairhurst Rummel. *Brittle Fracture of Rocks*. in L Muller (ed.), Rock Mechanics, Springer Verlag, Wien, 1970.

- [29] Ibrahim Karpuz Celal. Tutluoglu, Levent Öge. *Relationship Between Pre-failure and Post-failure Mechanical Properties of Rock Material in Different Origin*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014.
- [26] R Hudson JA Ulusay. *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974– 2006. Prepared by the commission on testing methods*, volume 35, no. 2, pp. 222–233. ISRM Turkish National Group, Ankara, 2007.
- [27] Palchik. V. *Mechanical Behavior of Carbonate Rocks at Crack Damage Stress Equal to Uniaxial Compressive Strength*, volume 43. pages 497-503. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010.
- [28] Fairhurst C. Wawersik, W.R. *A Study of Brittle Rock Fracture in Laboratory Compression Experiments*, volume 7, Pages 561-575. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1971.
- [29] Robert J. Willard and John R. McWilliams. *Microstructural techniques in the study of physical properties of rock*, volume 6. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1969.

Anexo A

Caracterización geológica de las muestras ensayadas

Una descripción detallada de cada set se presenta a continuación en las siguientes tablas.

Tabla A.1: Descripción Petrológica muestras ANDIO provenientes de depósito tipo IOCG.

Descripción de la roca				
Características generales				
Grado de cristalinidad	Hipocristalina			
Textura	Porfídica			
Tamaño relativo de cristales	Inequigranular			
Tamaño de grano	Grano fino			
Estructura	Homogenea			
Morfologías especiales	Vesículas entre 0.5 y 1mm de largo			
Fábrica	Anisótropa			
Índice de color	Mesocrático			
Mineralogía				
Minerales en la roca	Cuarzo	Plagioclasa	Feldespato	Máficos
Hábito	Masivo	Masivo y tabulares	Masivo	Masivos y prismáticos
Microestructura	Anhedral	Subhedral	Anhedral	Subhedral
Tamaño	0.5-10mm	0.1-10mm	<1mm	<0.5mm
Abundancia total	5 %	40 %	20 %	35 %
Nombre de la roca	Andesita Basáltica			



Figura A.1: Muestra de Andesita proveniente de depósito tipo IOCG.

Tabla A.2: Descripción Petrológica muestras GRD provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.

Descripción de la roca	
Características generales	
Grado de cristalinidad	Holocristalina
Textura	Fanerítica
Tamaño relativo de cristales	Equigranular
Tamaño de grano	Grano medio
Estructura	Homogenea
Morfologías especiales	Vetas mineralizadas con Qz, sulfuros primarios y secundarios
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Leucocrático

Mineralogía				
Minerales en la roca	Cuarzo	Plagioclasa	Feldespato	Máficos
Hábito	Masivo	Masivo y tabulares	Masivo	Masivos y prismáticos
Microestructura	Anhedral	Subhedral	Anhedral	Subhedral
Tamaño	1mm	1mm	1mm	1-10mm
Abundancia total	30 %	35 %	15 %	20 %

Nombre de la roca	Granodiorita de Anfíboles
--------------------------	---------------------------



Figura A.2: Granodiorita a muestra de mano.

Tabla A.3: Descripción Petrológica muestras AND-A,B provenientes de depósito tipo Vetiforme.

Descripción de la roca	
Características generales	
Grado de cristalinidad	Hipocristalina
Textura	Porfídica
Tamaño relativo de cristales	Inequigranular
Tamaño de grano	Grano medio a fino
Estructura	Homogenea
Morfologías especiales	Vesículas rellenas con mineralogía de alteración
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Mesocrático

Mineralogía				
Minerales en la roca	Cuarzo	Plagioclasa	Feldespatos	Máficos
Hábito	Masivo	Masivo y tabulares	Masivo	Masivos y prismáticos
Microestructura	Anhedral	Subhedral	Anhedral	Subhedral
Tamaño	0.5-10mm	0.1-10mm	<1mm	<0.5mm
Abundancia total	<5 %	50 %	15 %	35 %

Nombre de la roca	Andesita
-------------------	----------



Figura A.3: Muestra de mano Andesita proveniente de depósito tipo Vetiforme.

Tabla A.4: Descripción Petrológica muestras Dioritas provenientes de un depósito tipo Pórfido Cuprífero.

Descripción de la roca	
Características generales	
Grado de cristalinidad	Holocristalina
Textura	Fanerítica
Tamaño relativo de cristales	Equigranular
Tamaño de grano	Grano medio
Estructura	Homogénea
Morfologías especiales	Vetas mineralizadas con Qz y sulfuros primarios
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Mesocrático

Mineralogía				
Minerales en la roca	Cuarzo	Plagioclasa	Feldespato	Máficos
Hábito	Masivo	Masivo y Tabulares	Masivo	Masivo
Microestructura	Anhedral	Subhedral	Anhedral	Anhedral
Tamaño	-	1 mm	1-2 mm	<1 mm
Abundancia total	<5 %	65 %	5 %	25 %

Nombre de la roca	Diorita
--------------------------	---------

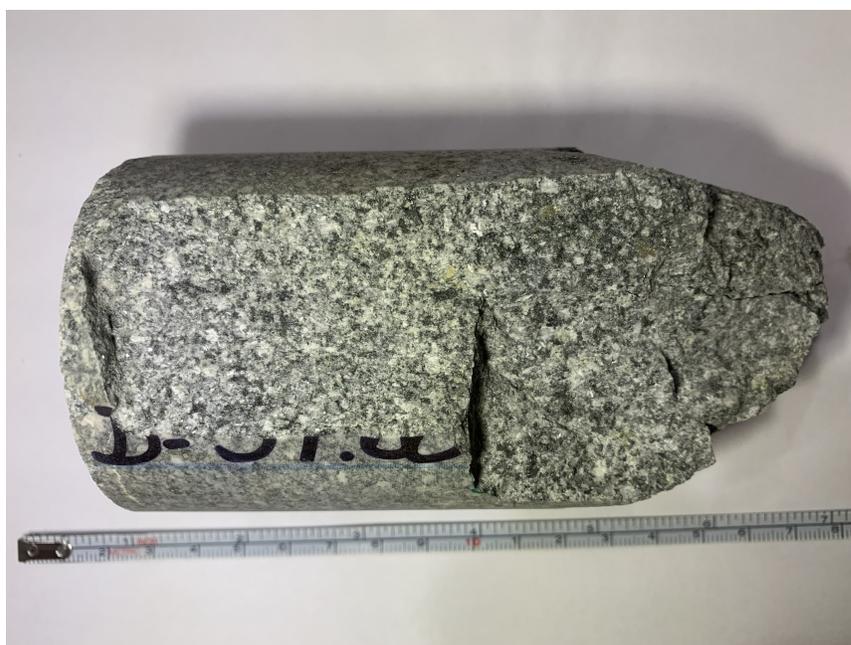


Figura A.4: Muestra de mano Diorita proveniente de depósito tipo Pórfido Cuprífero.

Tabla A.5: Descripción Petrológica muestras Gabro provenientes de un depósito tipo Pórfido Cuprífero.

Descripción de la roca	
Características generales	
Grado de cristalinidad	Holocristalina
Textura	Fanerítica
Tamaño relativo de cristales	Equigranular
Tamaño de grano	Grano medio a fino
Estructura	Homogénea
Morfologías especiales	Vetas mineralizadas con Qz y sulfuros primarios
Fábrica	Isótropa
Índice de color	Melanocrático

Mineralogía				
Minerales en la roca	Cuarzo	Plagioclasa	Feldespato	Máficos
Hábito	-	Tabulares	-	Masivo
Microestructura	-	Subhedral	-	Anhedral
Tamaño	-	1-3 mm	-	<1 mm
Abundancia total	-	65 %	-	45 %

Nombre de la roca	Gabro
--------------------------	-------

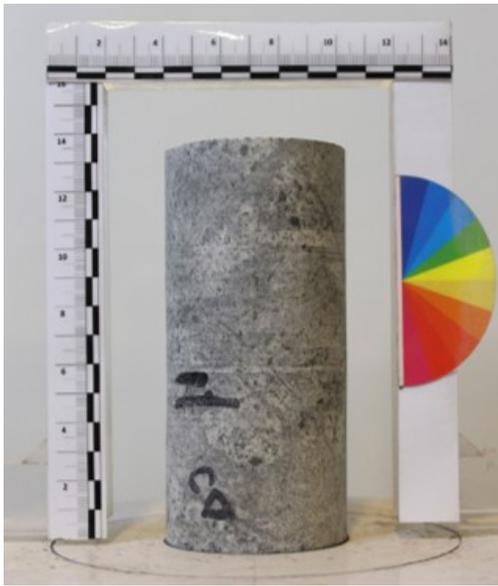


Figura A.5: Gabro a muestra de mano.

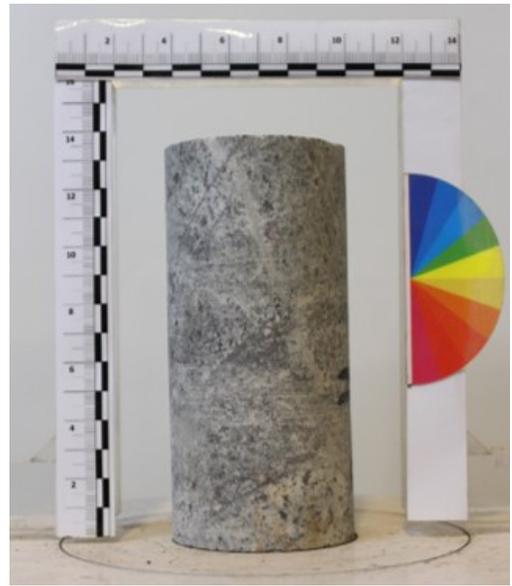
Anexo B

Registro fotográfico de muestras pre y post ensayo.

Se presentan a continuación el registro fotográfico de todos los ensayos exitosos realizados.



(a) GRD1 antes de ensayo



(b) GRD1 antes de ensayo



(c) GRD1 después de ensayo

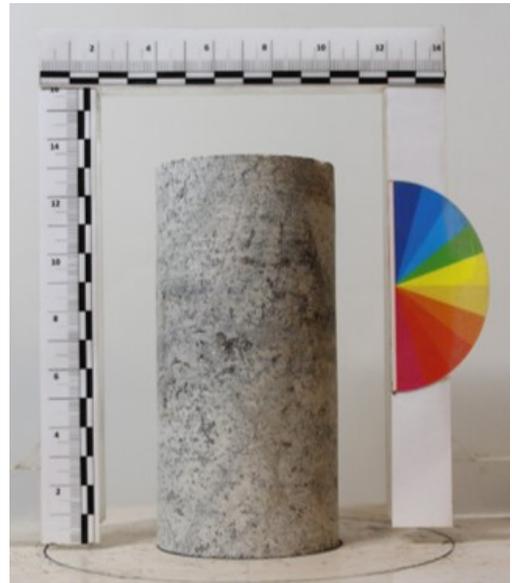


(d) GRD1 después de ensayo

Figura B.1: GRD1 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.



(a) GRD2 antes de ensayo



(b) GRD2 antes de ensayo



(c) GRD2 después de ensayo

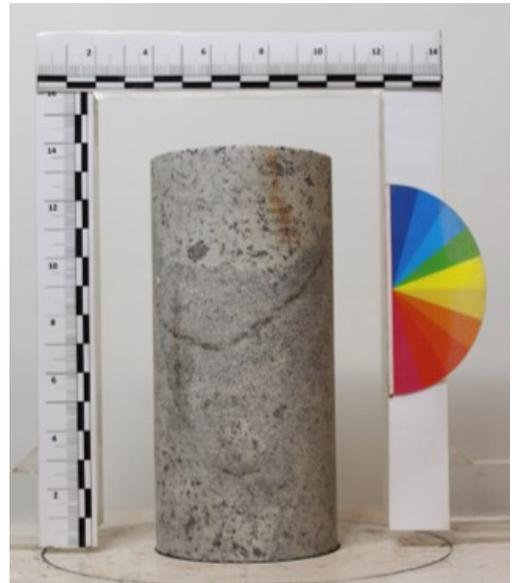


(d) GRD2 después de ensayo

Figura B.2: GRD2 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.



(a) GRD3 antes de ensayo



(b) GRD3 antes de ensayo



(c) GRD3 después de ensayo



(d) GRD3 después de ensayo

Figura B.3: GRD3 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.



(a) GRD8 antes de ensayo



(b) GRD8 antes de ensayo



(c) GRD8 después de ensayo



(d) GRD8 después de ensayo

Figura B.4: GRD8 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.



(a) GRD10 antes de ensayo



(b) GRD10 antes de ensayo



(c) GRD10 después de ensayo



(d) GRD10 después de ensayo

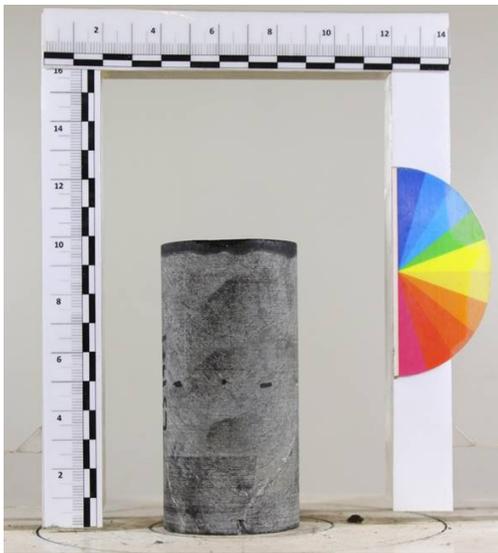
Figura B.5: GRD10 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.



(a) ANDIO 1 antes de ensayo



(b) ANDIO 1 antes de ensayo



(c) ANDIO 1 después de ensayo



(d) ANDIO 1 después de ensayo

Figura B.6: ANDIO 1 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.



(a) ANDIO 3 antes de ensayo



(b) ANDIO 3 antes de ensayo

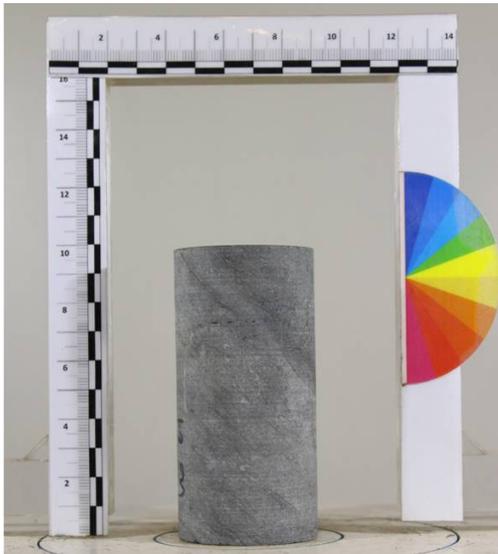


(c) ANDIO 3 después de ensayo

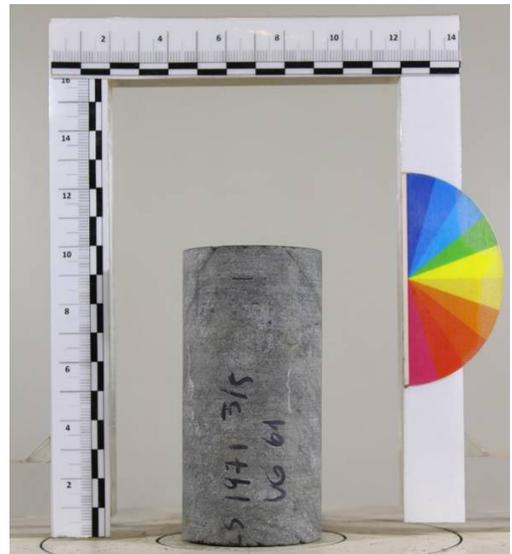


(d) ANDIO 3 después de ensayo

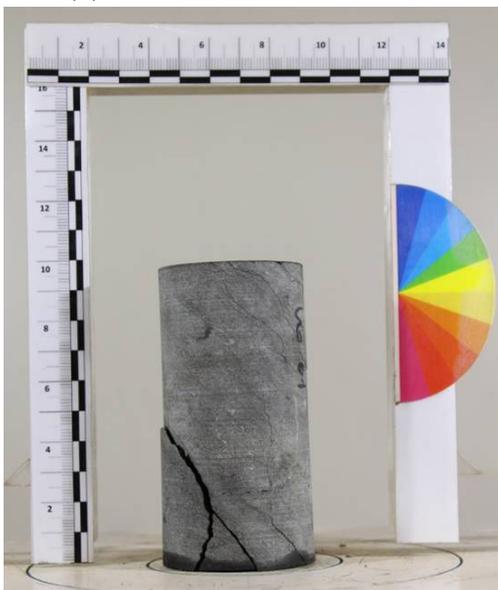
Figura B.7: ANDIO 3 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.



(a) ANDIO 4 antes de ensayo



(b) ANDIO 4 antes de ensayo

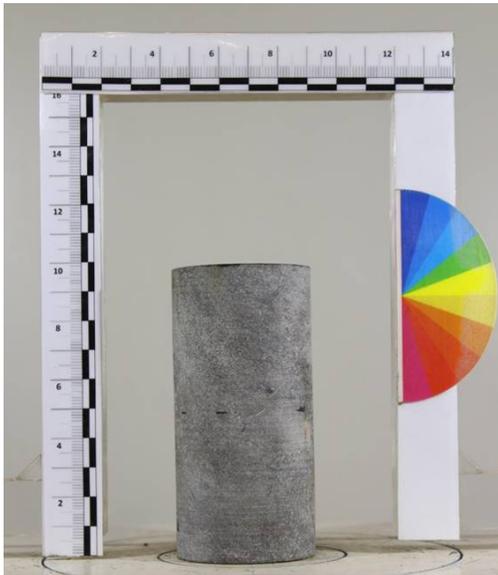


(c) ANDIO 4 después de ensayo



(d) ANDIO 4 después de ensayo

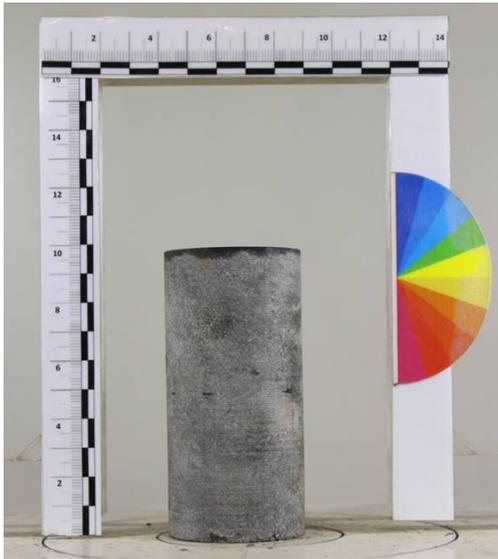
Figura B.8: ANDIO 4 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.



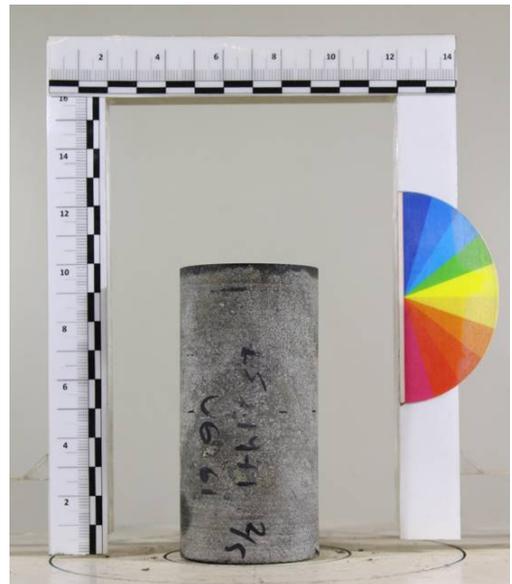
(a) ANDIO 5 antes de ensayo



(b) ANDIO 5 antes de ensayo

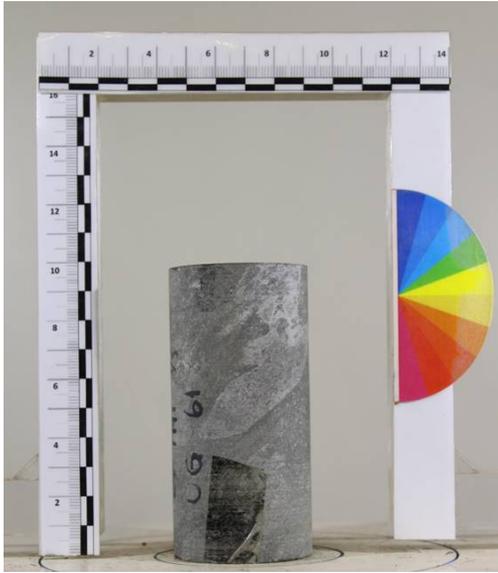


(c) ANDIO 5 después de ensayo



(d) ANDIO 5 después de ensayo

Figura B.9: ANDIO 5 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.



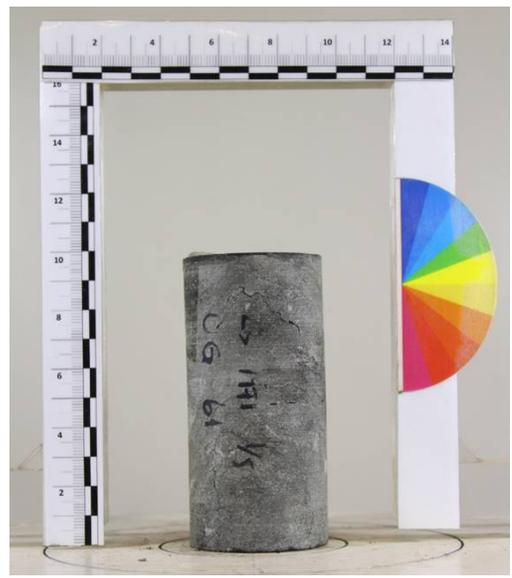
(a) ANDIO 6 antes de ensayo



(b) ANDIO 6 antes de ensayo



(c) ANDIO 6 después de ensayo



(d) ANDIO 6 después de ensayo

Figura B.10: ANDIO 6 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.



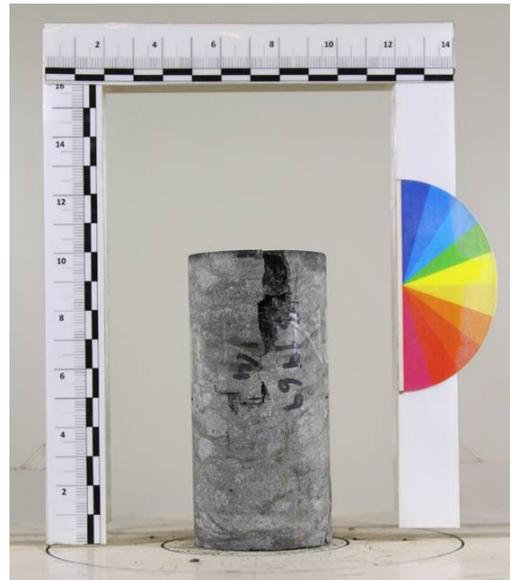
(a) ANDIO 8 antes de ensayo



(b) ANDIO 8 antes de ensayo

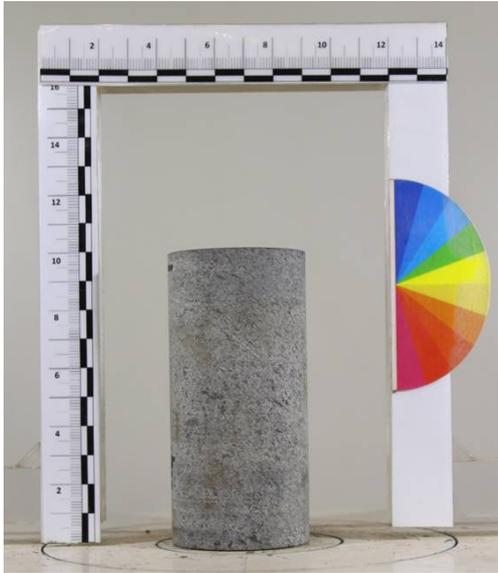


(c) ANDIO 8 después de ensayo

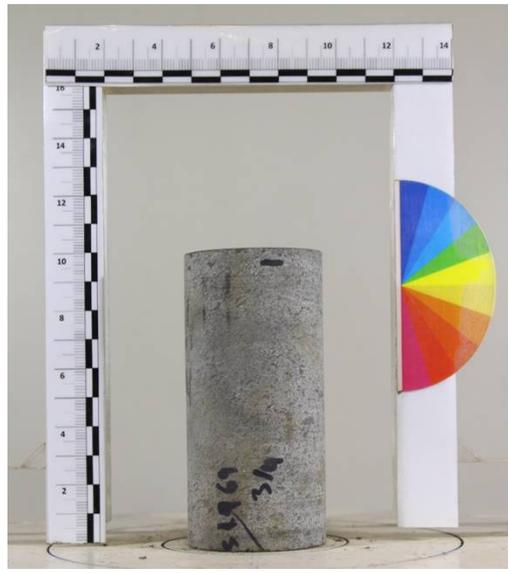


(d) ANDIO 8 después de ensayo

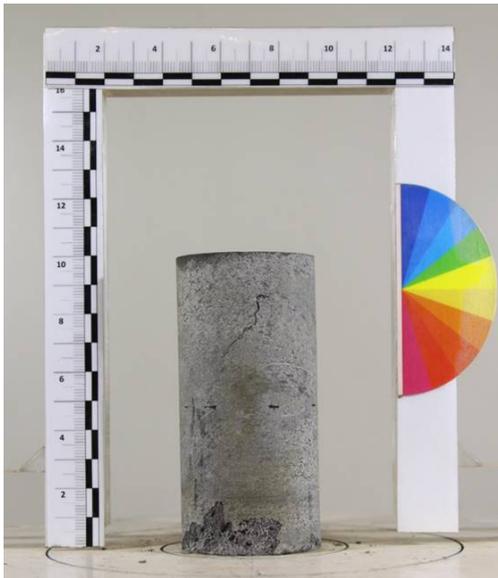
Figura B.11: ANDIO 8 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.



(a) ANDIO 9 antes de ensayo



(b) ANDIO 9 antes de ensayo



(c) ANDIO 9 después de ensayo



(d) ANDIO 9 después de ensayo

Figura B.12: ANDIO 9 antes y después de ensayo de compresión uniaxial.



(a) DIORITA 13 antes de ensayo.



(b) DIORITA 13 antes de ensayo

Figura B.13: DIORITA 13 antes de ensayo de compresión uniaxial.



(a) DIORITA 9 antes de ensayo.



(b) DIORITA 9 antes de ensayo

Figura B.14: DIORITA 9 antes de ensayo de compresión uniaxial.

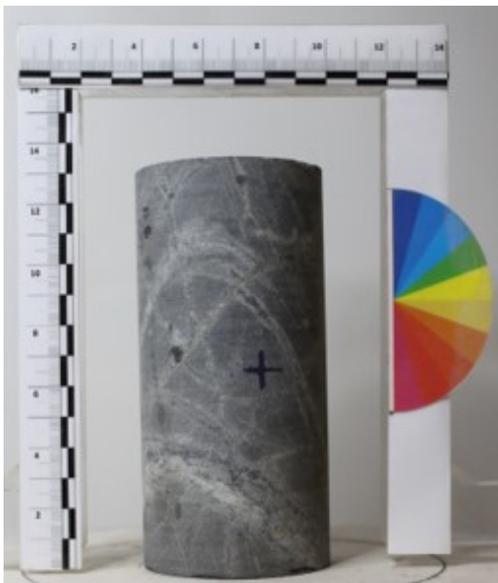


(a) DIORITA 19 antes de ensayo.



(b) DIORITA 19 antes de ensayo

Figura B.15: DIORITA 19 antes de ensayo de compresión uniaxial.



(a) GABRO 13 antes de ensayo.



(b) GABRO 13 antes de ensayo

Figura B.16: GABRO 13 antes de ensayo de compresión uniaxial.



(a) GABRO 9 antes de ensayo.



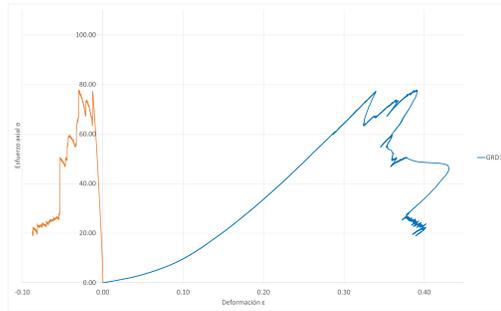
(b) GABRO 9 antes de ensayo

Figura B.17: GABRO 9 antes de ensayo de compresión uniaxial.

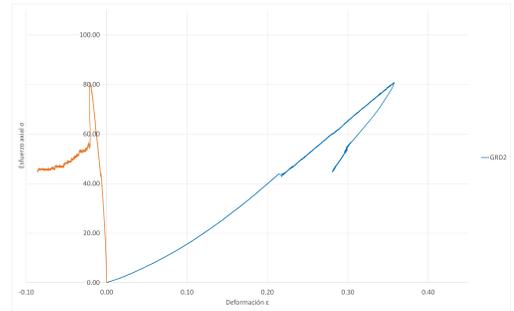
Anexo C

Curvas de esfuerzo deformación de cada muestra ensayada.

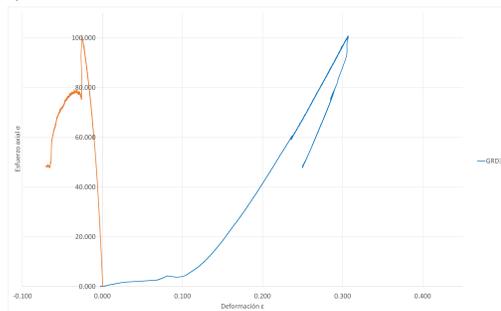
La Figura C.1 muestra las curvas de esfuerzo-deformación axial y diametral obtenidas de 5 muestras de Granodioritas provenientes de un depósito tipo Pórfido Cuprífero.



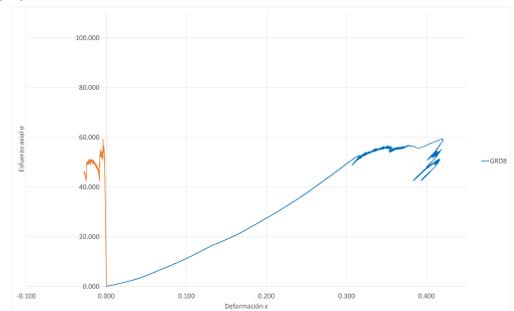
(a) Esfuerzo - deformación muestra GRD1



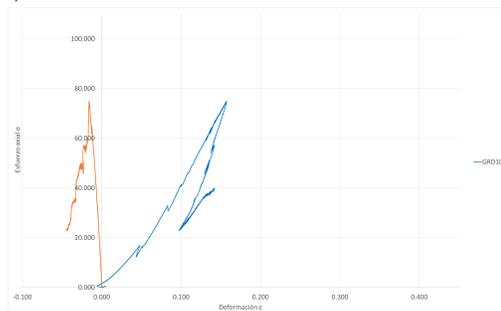
(b) Esfuerzo - deformación muestra GRD2



(c) Esfuerzo - deformación muestra GRD3



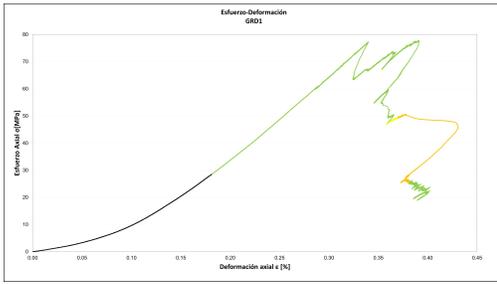
(d) Esfuerzo - deformación muestra GRD8



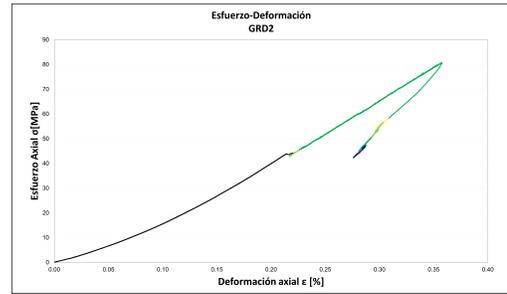
(e) Esfuerzo - deformación muestra GRD10

Figura C.1: Curvas esfuerzo-deformación medidas con LVDT de Granodioritas provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.

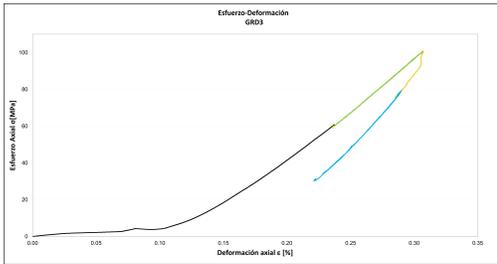
Además, se presentan las curvas de esfuerzo-deformación axial con las respectivas velocidades de deformación diametral usadas para cada ensayo.



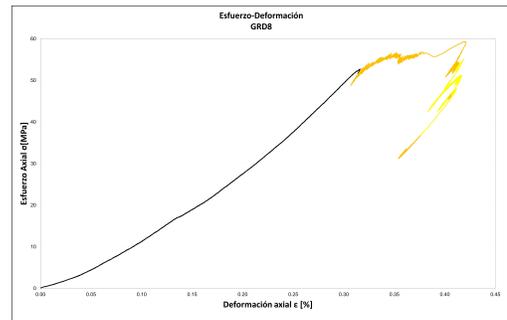
(a) Esfuerzo - deformación muestra GRD1



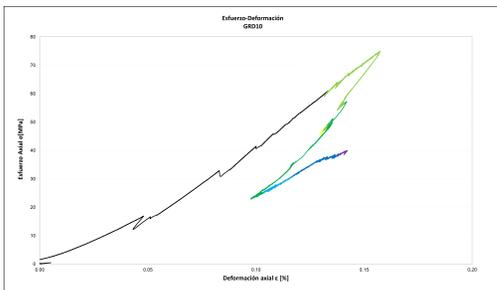
(b) Esfuerzo - deformación muestra GRD2



(c) Esfuerzo - deformación muestra GRD3



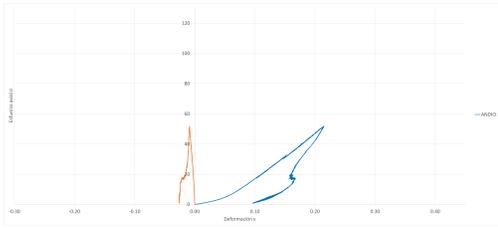
(d) Esfuerzo - deformación muestra GRD8



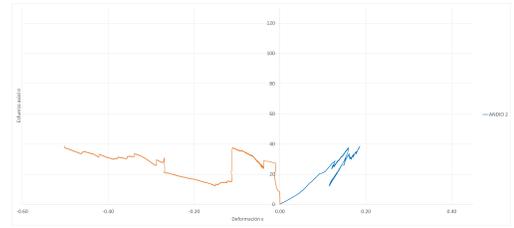
(e) Esfuerzo - deformación muestra GRD10

LEYENDA			
Velocidades control			
Rampa (kN/min)	Control diametral (mm/min)	Control axial (mm/min)	
5	0.0001	0.001	
10	0.0002	0.004	
15	0.0003		
	0.0004		
	0.0005		
	0.0006		
	0.0007		
	0.0008		
	0.0009		
	0.001		
	0.0015		

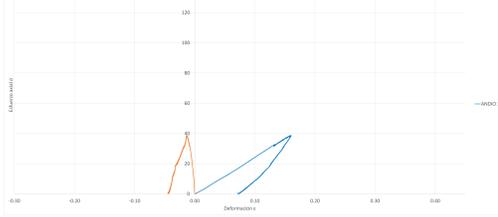
Figura C.2: Curvas esfuerzo-deformación medidas con LVDT de Granodioritas provenientes de depósito pórfido. Colores muestran las velocidades de deformación diametral usadas en cada ensayo



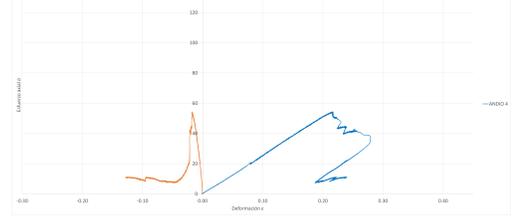
(a) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 1



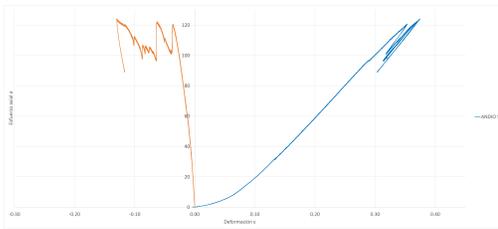
(b) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 2



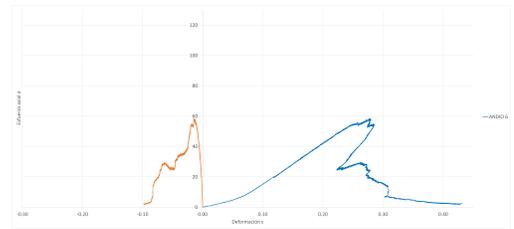
(c) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 3



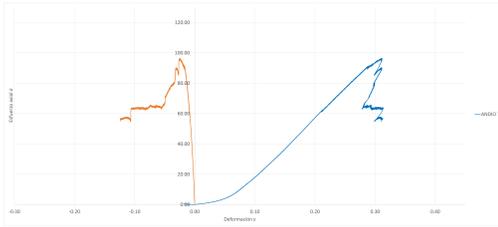
(d) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 4



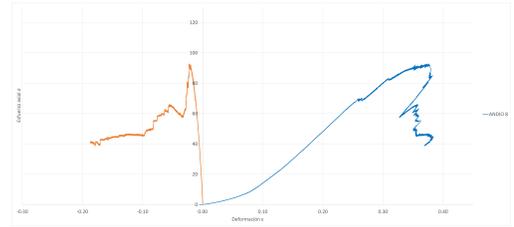
(e) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 5



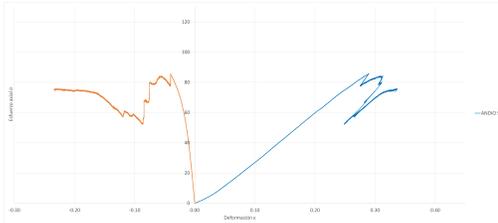
(f) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 6



(g) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 7

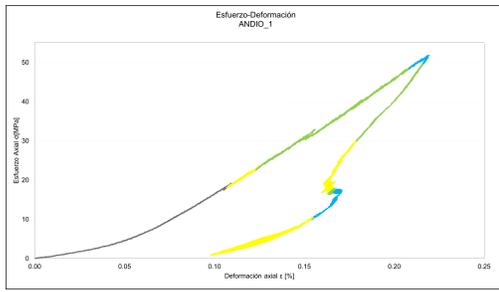


(h) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 8

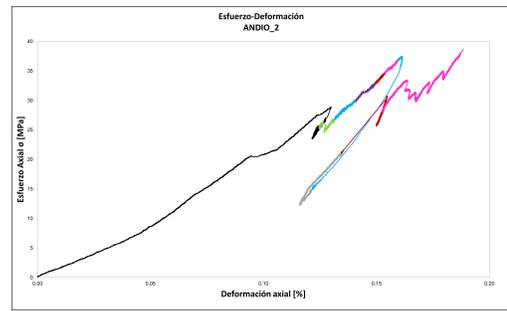


(i) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 9

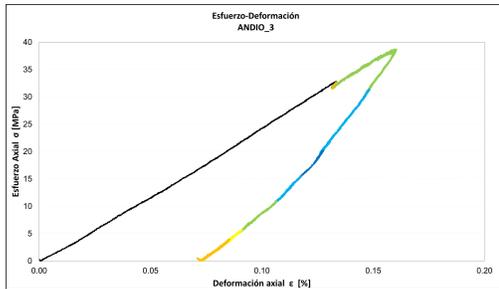
Figura C.3: Curvas esfuerzo-deformación medidas con LVDT de Andesitas provenientes de depósito IOCG.



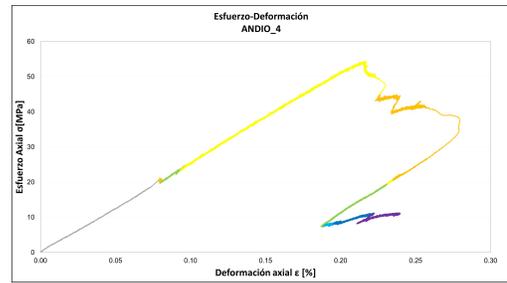
(a) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 1



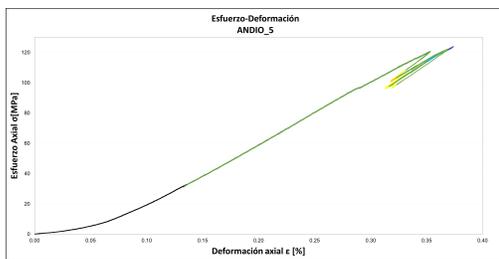
(b) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 2



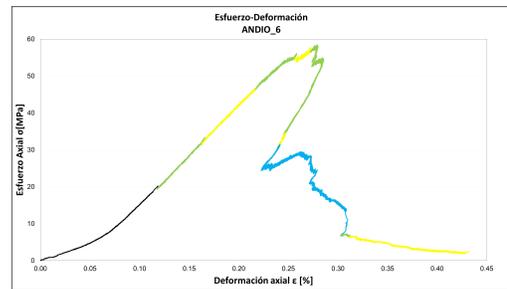
(c) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 3



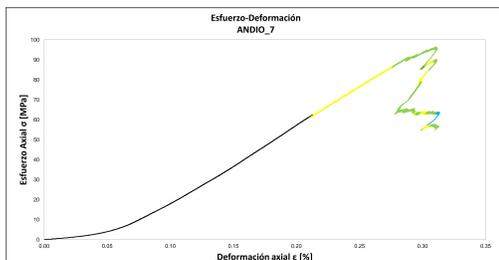
(d) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 4



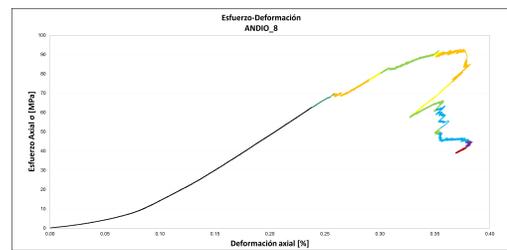
(e) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 5



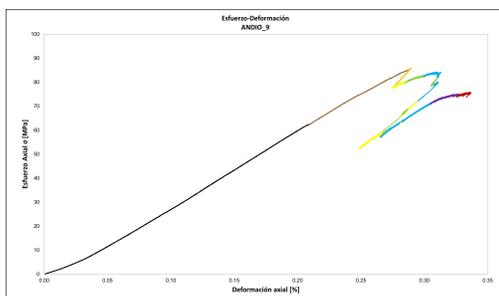
(f) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 6



(g) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 7



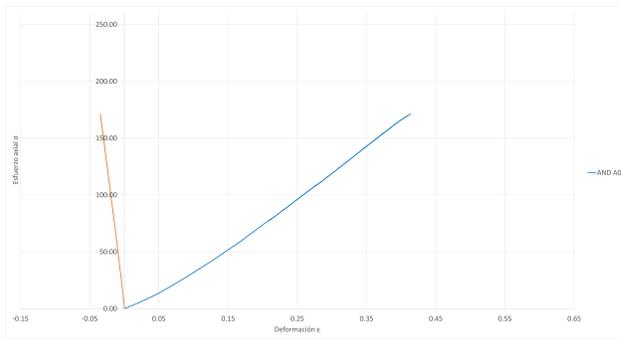
(h) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 8



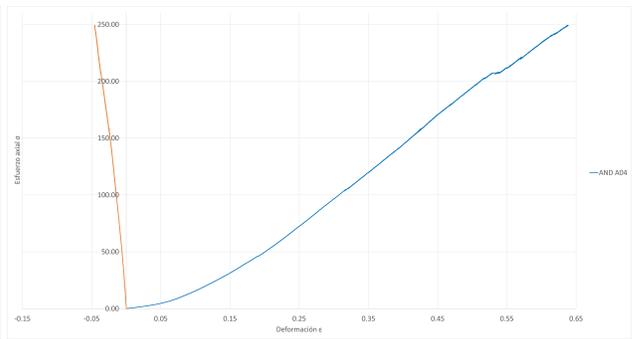
(i) Curva esfuerzo- deformación ANDIO 9

LEYENDA			
Velocidades control			
Rampa (kN/min)	Control diametral (mm/min)	Control axial (mm/min)	
5	0.0001	0.001	0.001
10	0.0002	0.004	0.004
15	0.0003	0.0004	0.0004
		0.0005	0.0005
		0.0006	0.0006
		0.0007	0.0007
		0.0008	0.0008
		0.0009	0.0009
		0.001	0.001
		0.0015	0.0015

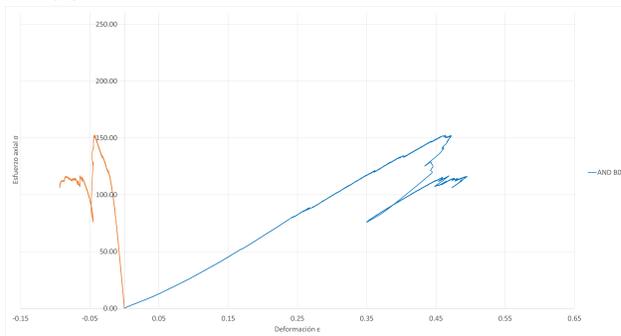
Figura C.4: Curvas esfuerzo-deformación medidas con LVDT de Andesitas provenientes de depósito IOCG. Colores muestran las velocidades de deformación diametral usadas en cada ensayo.



(a) Curva esfuerzo- deformación AND A01



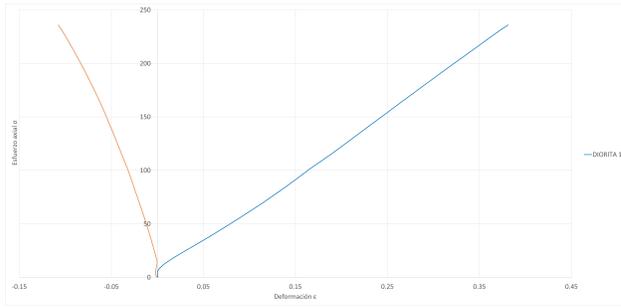
(b) Curva esfuerzo- deformación AND A04



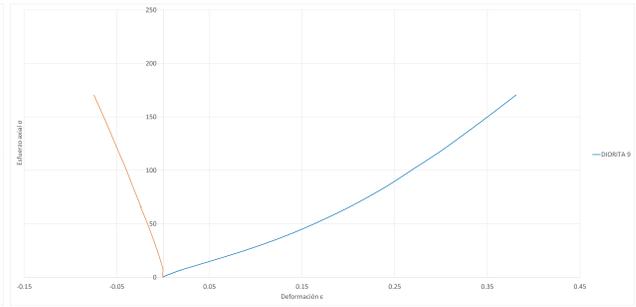
(c) Curva esfuerzo- deformación AND B05

Figura C.5: Curvas esfuerzo-deformación medidas con LVDT de Andesitas provenientes de depósito tipo Vetiforme.

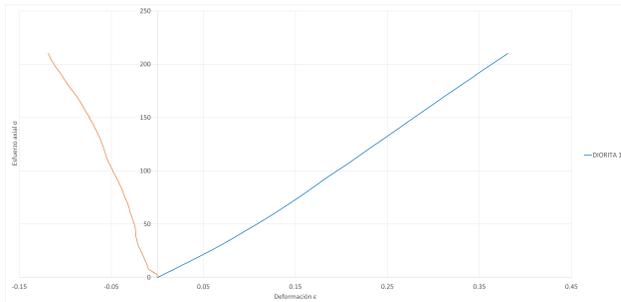
La Figura C.6 muestra las curvas de esfuerzo-deformación axial y diametral obtenidas de 3 muestras de Dioritas provenientes de un depósito tipo Pórfido Cuprífero.



(a) Curva esfuerzo- deformación DIORITA 19



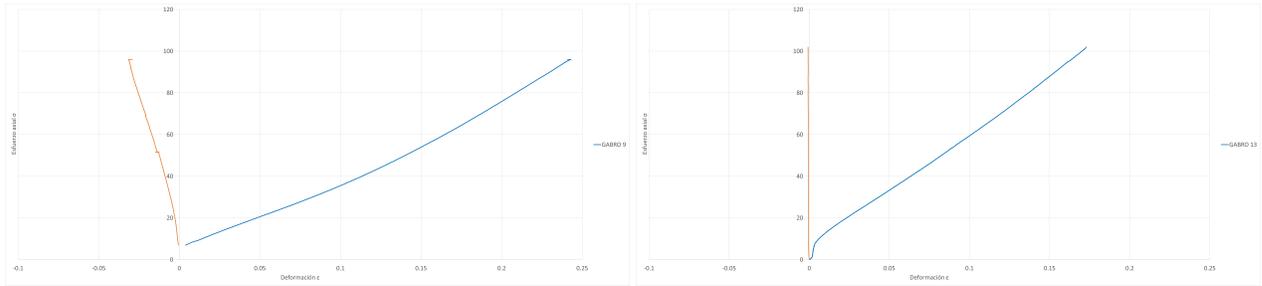
(b) Curva esfuerzo- deformación DIORITA 9



(c) Curva esfuerzo- deformación DIORITA 13

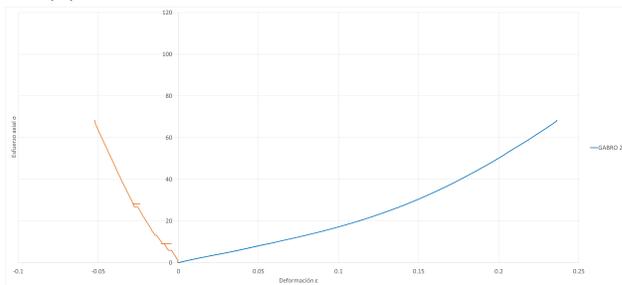
Figura C.6: Curvas esfuerzo-deformación medidas con strain Gauge de Dioritas provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.

La Figura C.7 muestra las curvas de esfuerzo-deformación axial y diametral obtenidas de 3 muestras de Gabros provenientes de un depósito tipo Pórfido Cuprífero.



(a) Curva esfuerzo- deformación GABRO 9

(b) Curva esfuerzo- deformación GABRO 13



(c) Curva esfuerzo- deformación GABRO 26

Figura C.7: Curvas esfuerzo-deformación medidas con Strain Gauge de Gabros provenientes de depósito tipo Pórfido Cuprífero.

Anexo D

Modos de falla y parámetros mecánicos elásticos de rocas ígneas.

El modo de falla de cada muestra fue de acuerdo a la clasificación de Marambio et. al., 1999.

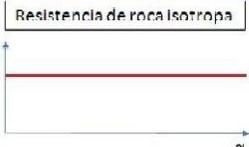
Tipo	Características	Esquema	Curva de resistencia
Tipo A	Ruptura por roca. Se caracteriza por definir una o más superficies irregulares que atraviesan indistintamente tanto la roca como las vetillas, sin desarrollarse a través de estas últimas, es decir no existe efecto de las vetillas en esta ruptura. Como resultado se genera una probeta fracturada en múltiples fragmentos.		Resistencia de roca isotropa 
Tipo B	Ruptura Mixta. La ruptura se propagada simultáneamente a través de la roca y la vetilla, se reconocen dos subtipos. B1: Superficie única mixta: Con solo una superficie de ruptura, la que se propaga por la roca y en parte por la vetilla, generando dos fragmentos en la probeta. B2: Superficie múltiples mixta: desarrolla varios superficie de ruptura, que se propagan por la roca y las vetillas, rompiendo la probeta en varios fragmentos.	B1  B2 	Resistencia de roca con discontinuidades múltiples 
Tipo C	Ruptura por varias vetillas La ruptura se propaga por más de una vetilla en forma simultánea, generando varios trozos de roca		Resistencia de roca con discontinuidades múltiples 
Tipo D	Ruptura por una vetilla. Probeta falla por una sola vetilla. Se reconocen dos subtipos. D1: Superficie Única: Se genera solo una superficie de ruptura desarrollada por una vetilla dividiendo la probeta en dos trozos. D2: Superficie múltiple: Presenta varias superficies de rupturas, uno principal desarrollado a través de una vetilla y los demás planos se ubican a un solo lados de la vetilla fallada interrumpiéndose contra ella.	D1  D2 	Resistencia de roca anisotropa 
Tipo E	Agrupar las rupturas anómalas, causada por defecto del ensayo y/o defecto en la preparación de la probeta. Puede deberse también a problemas intrínsecos del material ensayado por lo tanto los valores de resistencia obtenidos serán anómalos.	-	-
Simbología	— Vetillas — Curva de resistencia	σ : Resistencia axial α : Angulo entre la discontinuidad y el eje de longitudinal de la probeta.	 Probeta (Roca intacta)

Figura D.1: Distintos modos de fallas según Marambio et.al. 1999.

La tabla D.1 resume los modos de falla para cada muestra ensayada en este estudio.

Tabla D.1: Modos de falla de todos los sets ensayados, (Marambio et al 1999)

Litología - origen	Muestra	Modo de falla (Marambio et al 1999)
Dacita - Pórfido	M4A	A
	M5D	A
	M7A	A
	M8C	A
	M8D	A
	M9C	D1
	M14D	A
	M24D	A
	M25A	A
Andesita - IOCG	ANDIO 1	C
	ANDIO 2	C
	ANDIO 3	C
	ANDIO 4	B2
	ANDIO 5	A
	ANDIO 6	B2
	ANDIO 7	C
	ANDIO 8	B2
	ANDIO 9	A
Granodiorita - Pórfido	GRD1	B2
	GRD2	B2
	GRD3	A
	GRD10	A
	GRD8	B2
Andesita - Vetiforme	AND-A01	A
	AND-A04	A
	AND-B05	A
Diorita - Pórfido	DIORITA 19	A
	DIORITA 9	A
	DIORITA 13	A
Gabro - Pórfido	GABRO 9	B2
	GABRO 13	B2
	GABRO 26	B2

Tabla D.2: Resistencia a la compresión simple de rocas ígneas. (Modificado de Salinas, 2018. Extraído de Walthan 1999, Rahn 1986, Goodman 1989, Farmer 1968, Jiménez Salas y Justo Alpañés 1975, ; De los Santos 2012)

Litología (Roca intacta)	Resistencia a la compresión simple (Mpa)	
	Valores medios	Rango de valores
Andesita	210-320	100-500
Basalto	150-215	80-350
Diorita	180-245	120-335
Dolerita	200-300	100-350
Gabro	210-280	180-300
Granito	170-230	100-300
Dacita	109-130	90-150

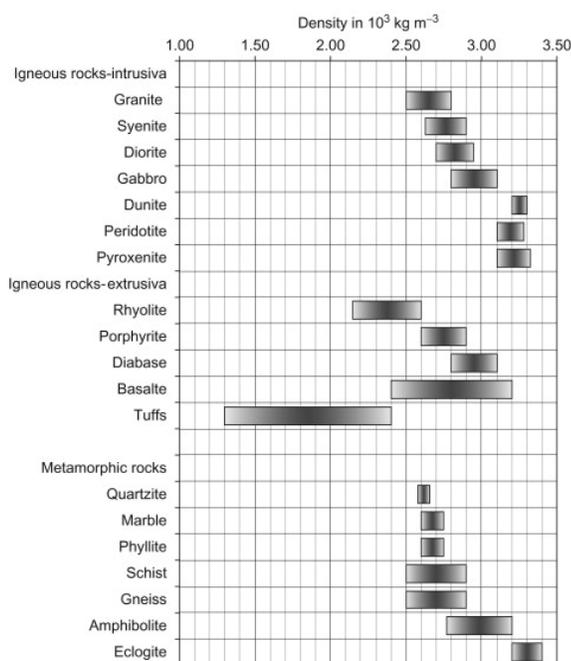


Figura D.2: Densidad de rocas ígneas. (Jürgen H. Schön, 2015)

Tabla D.3: Módulo de Young de rocas ígneas. (Modificado de I.W.Farmer, 1968. Extraído de Nicholls, 1961;Coates y Parsons,1966; Salinas E, 2018)

Litología (Roca intacta)	Módulo de Young E (Gpa)
Andesita	10-70
Basalto	60-100
Diorita	70-100
Dolerita	80-110
Gabro	40-100
Granito	30-70
Sienita	60-80
Riolita	10-50
Granodiorita	20-60

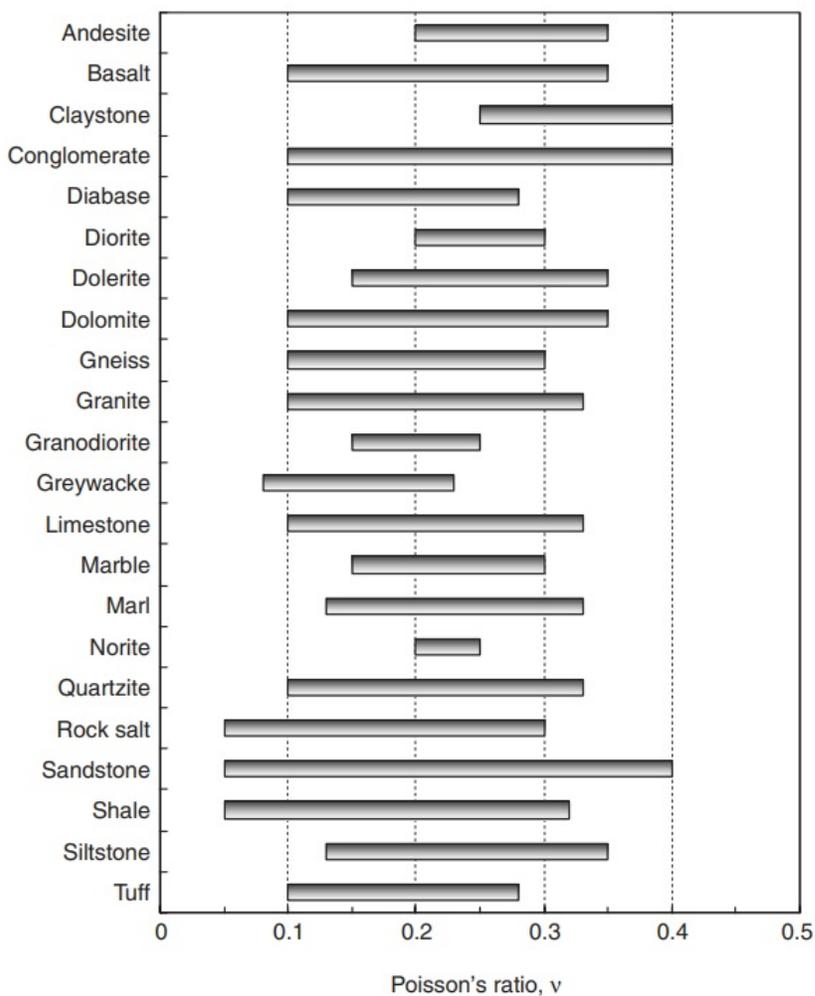


Figura D.3: Razón de Poisson de distintas litologías. (H. Gercek, 2006)

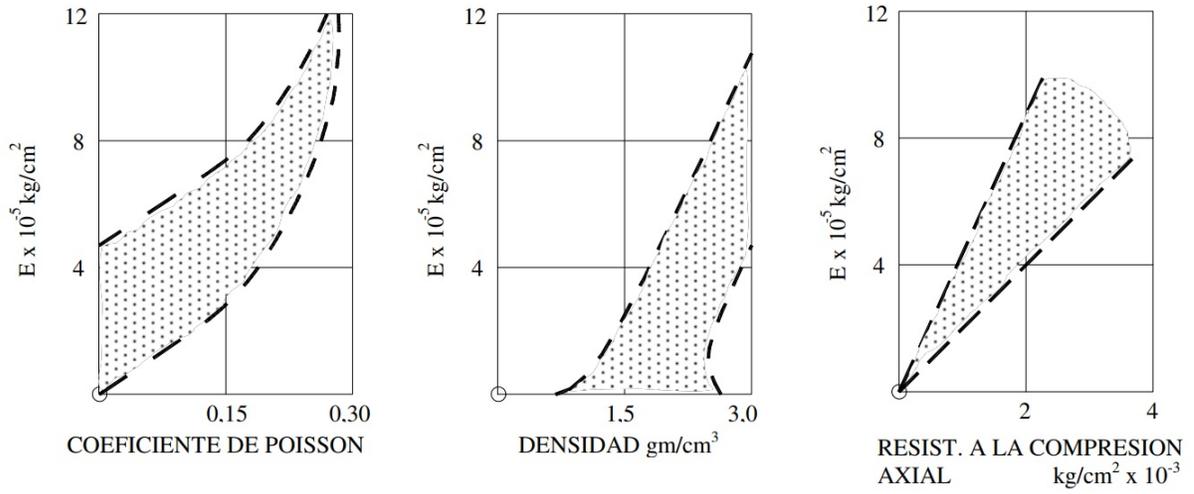


Figura D.4: Variaciones del Módulo de Young con respecto a Coeficiente de Poisson, Densidad y resistencia a la compresión. (Modificado de I.W.Farmer, 1968. Extraído de Judd y Huber 1961)