



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y GEOTÉCNICA DE UN DEPÓSITO
COLUVIAL DE LA REGIÓN DE PILBARA, AUSTRALIA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

ULISSE AGUIRRE SOTO

PROFESOR GUÍA:
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FELIPE OCHOA CORNEJO
NESTOR GUTIERREZ DUARTE

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Ulisse Aguirre Soto
FECHA: 20/12/2018
PROFESOR GUÍA: Sofía Rebolledo Lemus

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y GEOTÉCNICA DE UN DEPÓSITO COLUVIAL DE LA REGIÓN DE PILBARA, AUSTRALIA

En la región de Pilbara, Australia, hay una gran cantidad de depósitos de hierro. En la zona destaca un depósito coluvial, cuyo material está siendo estudiado para ser utilizado en obras civiles. El objetivo de este estudio es caracterizar mineralógica y geotécnicamente el material.

Para caracterizar el material se hizo una clasificación granulométrica, se describió geológicamente el material y se analizó los datos de un triaxial gigante realizados por IDIEM que aún no han sido publicados. A modo de entender los procesos internos de lo que ocurre en el triaxial, se hizo dos ensayos especiales: un corte directo entre dos rocas y un corte directo entre roca y suelo.

La caracterización del material granular grueso se basó en descripciones macroscópicas de partículas, descripciones microscópicas de cortes transparentes y pulidos y determinación de propiedades físicas (densidad, absorción y porosidad). La resistencia de las partículas se estimó mediante ensayos de carga puntual y martillo de Schmidt. Adicionalmente, el material grueso se sometió a un ensayo de desgaste (slake). La mineralogía del material fino se caracterizó a través de un análisis de difracción de rayos x y espectrometría por infrarrojo (FTIR).

Las principales conclusiones de este estudio son: el material se clasificó como gravas bien graduadas, GW, el ángulo de fricción del material es 30°, el ángulo de fricción entre roca-roca varía entre 11° y 15°, y el ángulo de fricción entre roca-suelo varía entre 15° y 19° dependiendo de la humedad. La mineralogía del material granular grueso está compuesta en mayor parte por hematita, magnetita y cuarzo. La resistencia a la compresión simple de las partículas es 101 Mpa. La mineralogía del material fino está compuesta por magnetita, hematita, cuarzo, goethita, muscovita, caolín y rutilo. El material grueso resultó resistente al desgaste.

A mi familia

***Carola, Benjamín,
Mauricio, Lolita,
Romina, Gianfranco***

***amigos, polola y
toda la gente que
quiero***

Agradecimientos

Para comenzar agradezco a los profesores que me guiaron en este trabajo de título. A Sofía Rebolledo por ser una excelente profesora guía, por su voluntad para siempre recibirme y enseñar, su paciencia y su comprensión. Agradecer al profesor Felipe Ochoa, quien me entendió y apoyo con sabios consejos. Agradecer a Néstor Gutiérrez, Geólogo encargado del área de geotecnia de IDIEM, quien me guio, enseñó y aconsejo durante los meses que estuve en IDIEM.

Agradecer a IDIEM que sin ellos esta memoria no hubiera sido posible, por proveer de materiales y permitirme utilizar sus laboratorios y datos. Gracias a Carolina Smith por su buena disposición, al Lucas, José, Héctor, Pamela, Cote y al Jose2 por la buena onda y enseñarme todo acerca de cómo realizar cada uno de los ensayos.

Agradezco a los funcionarios de Beauchef, a todos los profesores que tuve a lo largo de la carrera. Agradecer en especial a Blanca, que siempre me está ayudando y la paso metiendo en problemas. Agradezco a los encargados de laboratorios en especial a Cristian Nievas, Roberto, Omar y Mario. Agradecer los a los guardias y tíos y tías del aseo. Agradecer al pelao y a la hermanita (Katy) por siempre atender bien y su buena onda, y por los envases que en paz descasan.

Agradecer a mi familia en especial a mis padres por estar siempre conmigo y confiar en mí, pese a que el proceso se ha extendido más de la cuenta y me siguen apoyando, que ellos saben que uno no estaría acá si no fuera por ellos. También a mis hermanos Mauricio, Lolita, Romina y Gianfranco. Agradecer a mi abuela, tíos , primos, padrino, y toda la familia que vive en Italia.

Agradezco a mis amigos de la vida el Pipeta, Zavaleta, Gurito, Gily, luchazo y fony. Finalmente agradecer a quienes me acompañaron durante toda la carrera acá en la U, quienes hicieron que estos fueran de los mejores años vivido al Gurito, Sergiolo, Menarites, Cata, Javi, Claudia, y al Sergio (trolazo). Agradecer a mis amigos Rusio, Mati, Diego, Danton, Claudio, la Gise, la Larita, Migue. Agradezco al Skate, a mis perros y gatas que me reciben contentos todos los días. Agradezco a Medicina, Usachita, a las ulisianas y ulisianos.

Finalmente Agradecer a una personita especial que apareció en mi vida este último tiempo, mi polola Karla, gracias por su apoyo y amor.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Formulación de problema.....	1
1.2	Ubicación	2
1.3	Objetivos Generales.....	3
1.4	Objetivos Específicos	3
1.5	Metodología y limitaciones	3
1.5.1	Análisis bibliográfico	3
1.5.2	Evaluación del material y planificación	3
1.5.3	Caracterización del material	4
1.5.4	Caracterización mineralógica y geotécnica de material granular grueso.....	8
1.5.5	Caracterización mineralógica de material fino.	12
1.5.6	Trabajo de gabinete.....	12
1.5.7	Limitaciones.....	12
2	Antecedentes	13
2.1	Marco geológico.....	13
2.1.1	Geología regional de la provincia Hamersley	13
2.1.2	Basamento	15
2.1.3	Estratigrafía de la Provincia de Hamersley	15
2.1.4	Geología estructural Hamersley	19
2.1.5	Clima de la Provincia de Hamersley.....	21
2.1.6	Depósitos de interés económico predominantes en la provincia de Hamersley.....	21
3	Resultados	23
3.1	Caracterización del material.....	23
3.1.1	Granulometría.....	23
3.1.2	Descripción del material	26
3.1.3	Triaxial gigante	27
3.1.4	Corte directo en roca-roca	29
3.1.5	Corte directo en roca-suelo	37
3.1.6	Carga puntual	44
3.2	Caracterización mineralógica y geotécnica de partículas del material granular grueso.....	47
3.2.1	Descripción macroscópica.....	48
3.2.2	Descripción microscópica	53

3.2.3	Propiedades físicas	57
3.2.4	Grado de meteorización	58
3.2.5	Estimación resistencia a la compresión simple	59
3.2.6	Carga puntual	60
3.2.7	Slake.....	62
3.3	Caracterización mineralógica de material fino.....	66
3.3.1	Difracción de RX y FTIR	66
4	Discusiones.....	70
5	Conclusiones y recomendaciones.....	74
5.1	Conclusiones.....	74
5.2	Recomendaciones.....	75
6	Bibliografía	76
Anexos	78

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Clasificación USCS para suelos, información extraída del libro Ingeniería geológica González de Vallejos (2002).	4
Tabla 1.2 Perfiles de rugosidad propuesto por Barton y Choybey (1977).	7
Tabla 1.3 Clasificación de resistencia, carga puntual (Norma ASTM D 5731-08).	8
Tabla 1.4 Estimación del grado de meteorización ISRM (1981).	9
Tabla 1.5 Criterio para la estimación de resistencia a la compresión simple. Modificada de ISRM (1981).	10
Tabla 1.6 Clasificación para Slake y durabilidad (Gamble, 1971).	11
Tabla 3.1 Granulometría saco N°1.	24
Tabla 3.2 Peso específico, índice de plasticidad, Cc y Cu.	24
Tabla 3.3 p y q máximos.	27
Tabla 3.4 Rugosidad de cada cara según perfil de rugosidad de Barton y Choybey (1977) para cada cara.	29
Tabla 3.5 Área de contacto menor para cada ensayo.	29
Tabla 3.6 Área de contacto efectiva, después de aplicar las cargas normales.	29
Tabla 3.7 Tensión de corte máxima y ángulo de fricción, muestra A15-A16.	30
Tabla 3.8 Tensión de corte máxima y ángulo de fricción, muestra A17-A19.	32
Tabla 3.9 Tensión de corte máxima y ángulo de fricción, muestra A26-A29.	34
Tabla 3.10 Resumen de stress normal aplicado, tensión de corte máxima y ángulos de fricción interna para cada para de muestras.	36
Tabla 3.11 Ángulo de fricción muestra a 2,34% humedad.	38
Tabla 3.12 Ángulo de fricción a 5% de humedad.	40
Tabla 3.13 Ángulo de fricción roca-suelo 8%.	42
Tabla 3.14 Resumen ángulos de fricción para todos los ensayo roca-suelo.	44
Tabla 3.15 Resultado de carga puntual y estimación de la resistencia a la compresión simple.	45
Tabla 3.16 Resumen características material completo.	46
Tabla 3.17 Resultados densidad, absorción y porosidad.	57
Tabla 3.18 Estimación resistencia a la compresión simple a través del martillo Schmidt.	59
Tabla 3.19 Carga puntual a las distintas bandas Mg (magnetita), Qz (cuarzo), Hm (hematita) y Hmr (hematita roja).	61
Tabla 3.20 Muestra el porcentaje de desgaste y la durabilidad para cada ensayo.	63
Tabla 3.21 Resumen caracterización material granular grueso.	65

Tabla 3.22 Resumen de mineralogía encontrada en material fino en RX y FTIR.....	68
Tabla 3.23, Resumen de las características de material coluvial del sector de Pilbara, Australia.	69
Tabla 5.1 Resumen de las características del material.	75

Índice de ilustraciones

Ilustración 1.1 Ubicación del depósito coluvial (Cuadrado verde) ubicado en región de Pilbara, Australia.	2
Ilustración 1.2 Secuencia de armado de probeta triaxial gigante en IDIEM. Extraída de De la Hoz (2007).	5
Ilustración 1.3 Esquema de procesos interno triaxial gigante, A) corte directo roca-suelo B) corte directo roca-roca C) carga puntual.	6
Ilustración 1.4 Abaco de Schmidt (Lima y Menezes, 2008).....	11
Ilustración 2.1 Mapa geológico del cratón de Pilbara, el área de estudio está en el cuadrado rojo. Modificado de Kneeshaw y Morris, 2014.	14
Ilustración 2.2 Columna estratigráfica del cratón Pilbara, con énfasis en el Grupo Hamersley. Deposito coluvial se encuentra en el grupo Hamersley Modificada de Morris et al, 2011.....	18
Ilustración 2.3. Eventos compresivos y extensivos en el tiempo (Dalstra,2006).	20
Ilustración 3.1 Comparación curvas granulométricas para los 4 sacos de material.	25
Ilustración 3.2 Foto del material descrito	26
Ilustración 3.3 q v/s deformación unitaria	27
Ilustración 3.4 Regresión lineal p v/s q.....	28
Ilustración 3.5. Graficos resultados de ensayo de corte directo para la muestra A15-A16, A) Desplazamiento horizontal v/s tension de corte, B) Desplazamiento horizontal v/s desplazamiento vertical, C) Tension de corte maxima v/s tension normal.....	31
Ilustración 3.6. Foto de antes y después del corte directo, muestra A15-A16.....	32
Ilustración 3.7. Graficos resultados de ensayo de corte directo para la muestra A17-A19. A) Desplazamiento horizontal v/s tension de corte. B) Desplazamiento horizontal v/s Axial. C) Tension de corte v/s tension normal.....	33
Ilustración 3.8. Foto de antes y después del corte directo, muestra A17-A19.....	34
Ilustración 3.9. Graficos resultados de ensayo de corte directo para la muestra A26-A29. A) Desplazamiento horizontal v/s tension de corte. B) Desplazamiento horizontal v/s vertical. C) Tension de corte v/s tension normal.	35
Ilustración 3.10. Foto de antes y después del corte directo, muestra A26-A29.....	36
Ilustración 3.11 Foto que muestra la roca y celda para ensayar suelo.....	37
Ilustración 3.12 Foto antes y después de ensayar suelo a 2,34%.....	38
Ilustración 3.13 A) Grafico tension de corte v/s deformacion horizontal. B) deformacion horizontal v/s deformacion vertical. C) tension de corte v/s tension normal. Muestra suelo 2,34% humedad.....	39
Ilustración 3.14 Antes y después de ensayo roca-suelo 5% humedad.	40

Ilustración 3.15 Grafico tensión de corte v/s deformación horizontal. B) deformación horizontal v/s deformación vertical. C) tensión de corte v/s tensión normal. Muestra suelo 5% humedad.....	41
Ilustración 3.16 Antes y después roca-suelo humedad al 8%	42
Ilustración 3.17 Grafico tensión de corte v/s deformación horizontal. B) deformación horizontal v/s deformación vertical. C) tensión de corte v/s tensión normal. Muestra suelo 8% humedad.....	43
Ilustración 3.18. Ensayo carga puntual perpendicular a las bandas, muestra A12.	44
Ilustración 3.19. Foto carga puntual antes (A) y después (B) donde se observa como las rocas fallan por matriz.....	45
Ilustración 3.20 Roca D-01 y su corte trasversal.....	48
Ilustración 3.21 Roca D-02 su corte trasversal.....	49
Ilustración 3.22 Roca D-03 y su corte trasversal.....	50
Ilustración 3.23 Roca D-04 y corte trasversal.....	51
Ilustración 3.24 Roca D-05 y corte trasversal.....	52
Ilustración 3.25 Foto de corte pulido de la muestra CP-01. Se observan intercalaciones de bandas de magnetita (Mt), hematita gris (Hmr) y roja (Hmr), además una vetilla de hematita y una de cuarzo. También se puede ver plegamiento de las bandas de hematita con cuarzo.	53
Ilustración 3.26 Foto corte pulido de la muestra CP-02. Se observan bandas de magnetita (Mt), hematita gris (Hmg), cuarzo (Qz) y hematita roja (Hmr),.....	54
Ilustración 3.27 Corte transparente a nicoles paralelos (A) y cruzados (B) de la muestra CT-01. Se observan bandas de hematita gris (Hmg), arcillas color marrón deformadas con arcillas blancas y cuarzo micro cristalino (Ar+Qz), y vetillas de cuarzo (Qz).....	55
Ilustración 3.28. Corte transparente a nicoles paralelos (A) y cruzados (B) de la muestra CT-2. Se observan bandas de hematita gris (Hmg) con arcillas de color marrón y arcillas blancas (Ar). No hay vetillas.....	56
Ilustración 3.29. Foto donde se aprecia el grado de meteorización de la muestra D-01. A) Exterior de la roca. B) Corte trasversal.....	58
Ilustración 3.30. Utilizando el martillo de Schmidt, muestra D-07.....	59
Ilustración 3.31 Carga puntual en banda de magnetita.....	60
Ilustración 3.32 Mosaico de fotos que muestran cómo se fracturan los minerales en las bandas. A) Carga puntual en magnetita B) Fractura en banda de magnetita C) Carga puntual en hematita D) Fractura en banda de hematita, E) Carga puntual en cuarzo con hematita, F) Fractura en cuarzo con hematita, G) y H) fractura en contacto magnetita y hematita.....	62
Ilustración 3.33. Slake, Antes (A) y después (B), muestra SL-01.....	63
Ilustración 3.34. Slake, Antes (A) y después (B), muestra SL-02.....	64
Ilustración 3.36 Difracción de rayos x, muestra M1U.	66

Ilustración 3.37. Espectrometría infrarroja de la muestra M1U. En azul la espectrometría de la muestra, en verde la espectrometría obtenida.	67
Ilustración 3.38, Cuantificación de porcentajes de minerales en FTIR, M1U.	67

1 Introducción

1.1 Formulación de problema

La gran cantidad de depósitos de hierro encontrados en la región de Pilbara en Australia Occidental, hacen que este país sea uno de los mayores productores de hierro del mundo. En este sector se encuentran grandes minas de hierro como Tom Price, Brockman, Paraburdoo, Rober River, etc.

Entre todos los depósitos de hierro, hay uno en particular que está cubierto localmente por material coluvial. Este material no tiene valor económico, debido al alto porcentaje de sílice que posee, por lo tanto, es desecho.

El material coluvial se caracteriza por ser un material granular grueso, materiales que generalmente son utilizados para obras civiles como vías férreas (balasto), material de empréstito de enrocado, muros de gaviones, drenes en muros de relaves, etc.

El problema de caracterizar geotécnicamente un material grueso mediante los ensayos estándar (corte directo y triaxiales), determina que, en general, se opte por métodos alternativos como el método de curvas paralelas u homotéticas (método que escala la granulometría a ensayos convencionales), ensayos que no siempre son representativos. Otros simplemente optan por los datos que ya se encuentran en la literatura.

Dado lo anterior, con el fin de determinar las características geotécnicas de este tipo de material, IDIEM, en el año 2000, creó una herramienta llamada triaxial gigante. Este ensayo utiliza una probeta de 100x180cm, que sirve para evaluar material granular grueso de hasta 7 pulgadas a presiones de confinamiento de hasta 3 MPa. El ensayo entrega valores de resistencia y el ángulo característico del material.

Actualmente IDIEM está realizando triaxiales gigantes al material coluvial mencionado. A modo de complementar y caracterizarlo de manera detallada, surge la idea de determinar las propiedades geotécnicas y mineralógicas.

1.2 Ubicación

El material por estudiar se encuentra en un depósito en la región de Pilbara, ubicado al noroeste de Australia Occidental (Ilustración 1.1).

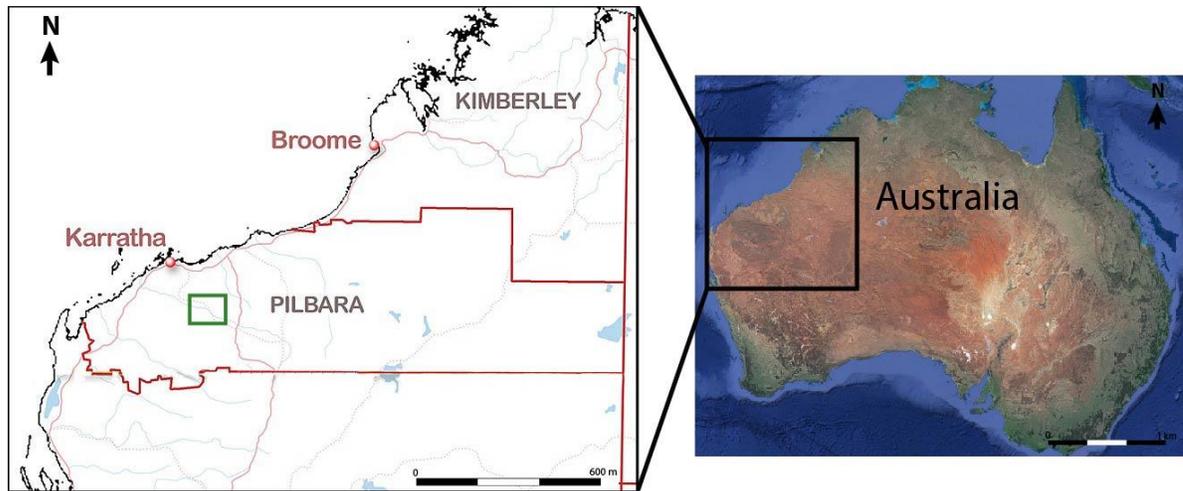


Ilustración 1.1 Ubicación del depósito coluvial (Cuadrado verde) ubicado en región de Pilbara, Australia.

1.3 Objetivos Generales

- Caracterizar mineralógica y geotécnicamente el material de un depósito coluvial localizado en la región de Pilbara, Australia

1.4 Objetivos Específicos

- Clasificar el material mediante el sistema de clasificación USCS.
- Definir los parámetros de resistencia del material.
- Determinar la mineralogía, definir las propiedades físicas, estimar la resistencia a la compresión simple y el desgaste de las partículas gruesas.
- Determinar la mineralogía del material fino.

1.5 Metodología y limitaciones

1.5.1 Análisis bibliográfico

Para comenzar, se hizo un análisis bibliográfico para caracterizar la litología del sector, y la geología estructural. Como el agua es un factor que influye de manera importante en la resistencia de la roca, también se estudia el clima de la región de Pilbara. Debido a que el material se encuentra en depósitos de hierro, se estudió los conceptos básicos tales como el origen, la composición y edad de los yacimientos de hierro que predominan en la región, destacando los BIF (*Banded Iron Formation*) y CID (*Channel Iron Deposits*).

1.5.2 Evaluación del material y planificación

En primer lugar, se fue a buscar el material a estudiar a las dependencias de IDIEM en la sede de Cerrillos, debido al tamaño y cantidad de muestra (toneladas) y también a la capacidad de transporte a la que tenía acceso solo se obtuvieron 5 sacos de material de aproximadamente 25 Kg cada uno.

Lo siguiente fue realizar una descripción macroscópica del material, como el tamaño de partículas, litología, grado de selección, forma, redondez, etc. Luego se realizó una granulometría a un saco de material y se hizo una clasificación de acuerdo al sistema de clasificación para suelos USCS mostrado en la Tabla 1.1. A partir de estos resultados, se elaboró una carta Gantt y un plan de ensayos a seguir.

Tabla 1.1 Clasificación USCS para suelos, información extraída del libro Ingeniería geológica González de Vallejos (2002).

Sistema de clasificación USCS						
Gruesos [50%<queda retenido en malla #200(0,075mm)]						
Tipo de Suelo	Símbolo	% pasa malla #4	% pasa malla #200	CU	CC	Descripción
Gravas	GW	< 50	< 5	> 4	1 a 3	Gravas bien graduada, mezcla de gravas, arenas y pocos finos.
	GP			≤ 6	<1ó>3	Gravas mal graduadas, mezcla de gravas, arenas y pocos finos.
	GM		> 12			Gravas limosas, mezcla mal graduada de gravas, arenas y limos.
	GC					Gravas arcillosas, mezcla mal graduada de gravas, arenas y arcillas.
Arenas	SW	> 50	< 5	> 6	1 a 3	Arenas bien graduadas, mezcla de arena con gravas y pocos finos.
	SP			≤ 6	<1ó>3	Arenas mal graduadas, mezcla de arena con gravas y pocos finos.
	SM		> 12			Arenas limosas, mezcla de arenas y limo mal graduadas.
	SC					Arenas arcillosas, mezcla mal graduada de arenas y arcillas.
Finos [>50% pasa malla #200(0.075mm)]						
Tipo de Suelo	Símbolo	Lim. Liq. w _l	Descripción			$C_c = (D_{30}^2) / (D_{60} \cdot D_{10})$ $C_u = (D_{60}) / (D_{10})$
limos inorgánicos	ML	< 50	Limos inorganicos y arenas muy finas, ligera plasticidad.			
	MH	> 50	Limos inorganicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos			
arcillas inorgánicas	CL	< 50	Arcillas inorganicas de plasticidad baja a media.			
	CH	> 50	Arcillas inorganicas de plasticidad alta, arcillas grasas.			
limos y arcillas orgánicos	OL	< 50	Limos y arcillas limosas orgánicas de plasticidad baja.			
	OH	> 50	Arcillas organicas de plasticidad media a alta.			
Suelo orgánico	Pt		Turba y otros suelos altamente orgánicos.			

1.5.3 Caracterización del material

Como punto de partida, se procedió con el análisis del material. Para ello, se hizo 4 granulometrías, se calculó el peso específico, se determinó el comportamiento del material fino, y con ellos se hizo una clasificación de suelo basado en el sistema USCS (Tabla 1.1).

Posteriormente se describió el material de manera detallada, el color, los clastos, matriz, tamaño de grano, la madurez textural, forma y redondeamiento de las partículas, etc.

También se analizaron los resultados de un triaxial gigante realizado por IDIEM que aún no han sido publicados.

El triaxial gigante es un ensayo que permite determinar los parámetros de resistencia de suelos granulares gruesos. Esta herramienta se encuentra en solo seis países, siendo uno de ellos en Chile, específicamente en IDIEM en las dependencias de la Universidad de Chile. Lo interesante de este, es su capacidad para ensayar material granular grueso de tamaño de partícula hasta 17cm y presiones de confinamiento de hasta 3 MPa.

En la Ilustración 1.2 se puede apreciar la secuencia de armado de una probeta y sus dimensiones.



Ilustración 1.2 Secuencia de armado de probeta triaxial gigante en IDIEM. Extraída de De la Hoz (2007).

Con el fin de comparar resultados con el triaxial gigante, se crearon dos ensayos especiales de procesos que estarían ocurriendo dentro de la probeta de un triaxial gigante al momento del ensayo (Ilustración 1.3).

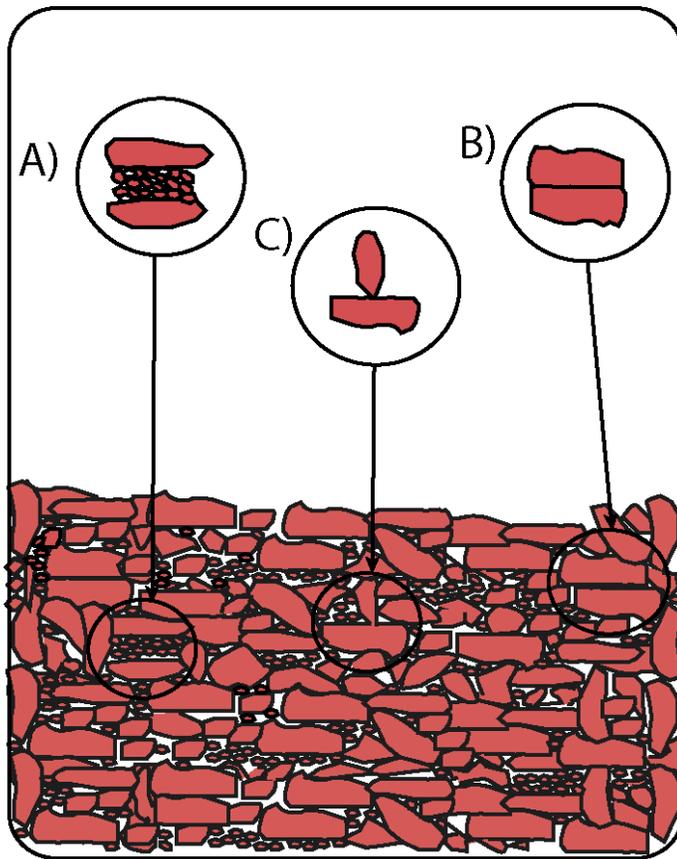
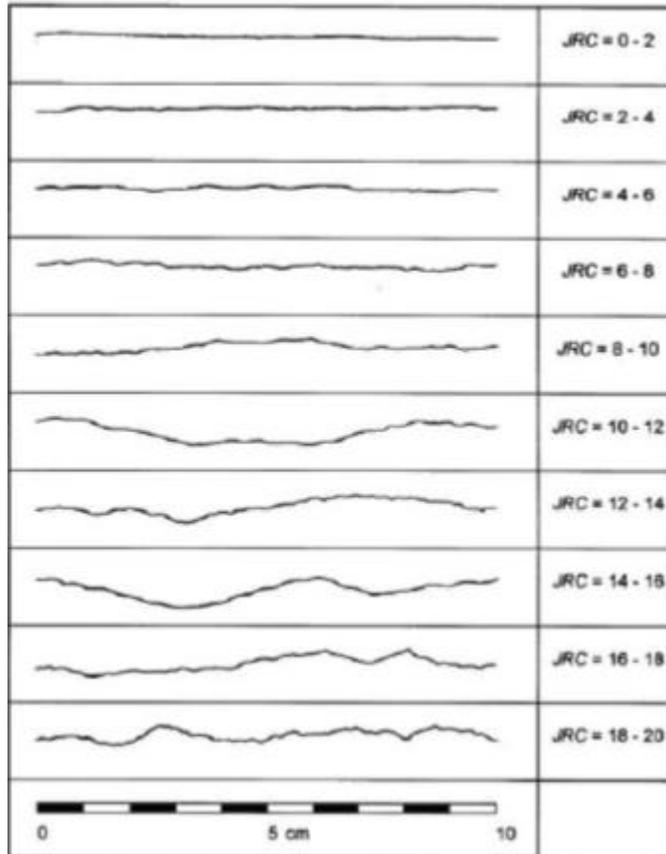


Ilustración 1.3 Esquema de procesos interno triaxial gigante, A) corte directo roca-suelo B) corte directo roca-roca C) carga puntual.

Un ensayo directo entre roca-roca (Caso B de la Ilustración 1.3), donde las partículas al intentar acomodarse generan un esfuerzo de cizalle entre dos rocas. Se armó pares de rocas con la mayor superficie de contacto y se escogió los tres pares de mayor contacto. Previo al ensayo se estimó la rugosidad de las caras de contactos, para ello se utilizó el perfil de rugosidad (Barton y Choybey, 1977) mostrado en la Tabla 1.2. Posteriormente se midió el área de contacto menor entre ambas caras con el software AxionLE. Luego de ejecutar los tres ensayos, se registró la fuerza normal y de corte, así como el desplazamiento de horizontal y vertical. Con estos datos se obtuvo el ángulo de fricción roca-roca.

Tabla 1.2 Perfiles de rugosidad propuesto por Barton y Choybey (1977).



También se hizo un ensayo de corte directo entre suelo y roca (caso A en la Ilustración 1.3). Para ello fue necesario crear un molde donde se compactó el suelo a una cierta densidad y humedad. Se utilizó la densidad a la que fue sometido el triaxial gigante y se varió la humedad.

El caso C de la Ilustración 1.3, se representó mediante ensayos de carga puntual. Este consiste en romper una roca entre dos puntas cónicas metálicas las cuales son accionadas por una prensa, con ello se obtiene el índice de resistencia a la carga puntual y se clasifica según la Tabla 1.3. Para este ensayo se escogieron una gran cantidad de rocas de diferente diámetro, basados en la norma ASTM D 5731-16. Estas se agruparon en cinco grupos de diez rocas cada uno. Se calcularon los distintos índices de carga puntual, los cuales fueron corregidos de acuerdo con un factor de correlación que depende del diámetro de la partícula. También se obtuvo un valor aproximado de la resistencia a la compresión simple donde se multiplica el índice de carga puntual por un factor de 24 ($I_{s(50)} \cdot 24$) tal como lo su indica la norma ASTM D 5731-16.

Tabla 1.3 Clasificación de resistencia, carga puntual (Norma ASTM D 5731-08).

Tabla de Clasificación de Resistencia, carga puntual D 5731 – 08 [MPa]
0,03 a 0,1 = Muy Baja.
0,1 a 0,3 = Baja.
0,3 a 1,0 = Media.
1.0 a 3.0 [MPa] = Alta.
3.0 a 10.0 = Muy Alta.
Mayor a 10.0 = Extremadamente Alta.

1.5.4 Caracterización mineralógica y geotécnica de material granular grueso

Se comenzó por descripción macroscópica de 5 partículas del material, donde se describió el color, tamaño, la mineralogía y la estructura de la roca.

Se escogieron cuatro rocas representativas del material, de las cuales se realizó dos cortes transparente y dos pulidos en el laboratorio de cortes y pulidos del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, Luego se describió microscópicamente la mineralogía y estructuras de cada sección delgada.

Luego de terminar con la mineralogía se procedió a determinar propiedades físicas de las rocas. Con un método del mismo nombre que consiste en pesar la muestra inicial, sumergirla en agua durante 24 horas para que se sature, luego se pesa la muestra de manera superficial y se vuelve a pesar, inmediatamente después se pesa la muestra en un canasto sumergido en agua, finalmente dejar secar al horno por 24 horas a una temperatura de 110°C y pesar. Con este ensayo se determinaron características físicas de las rocas, como la densidad, absorción y porosidad. Se realizó a 6 rocas escogidas de acuerdo la norma ASTM C9-02.

Se estimó el grado de meteorización de las partículas a través de la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Estimación del grado de meteorización ISRM (1981).

Termino	Descripción	Grado
Roca Fresca	No presenta signos visibles de meteorización en la roca: tal vez una leve decoloración en las superficies de las discontinuidad mayores.	I
Levemente Meteorizada	La decoloración indica meteorización de la roca y en las superficies de las discontinuidades. La roca en su tonalidad puede estar decolorada por la meteorización y puede estar extremadamente algo más débil, que en su condición fresca.	II
Moderadamente Meteorizada	Menos de la mitad de la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos continuos.	III
Muy Meteorizada	Más de la mitad de la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La roca fresca o decolorada se uede presentar como colpas o testigos discontinuos.	IV
Completamente Meteorizada	Toda la roca esta descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La estructura original del macizo aún se mantiene en gran parte intacta.	V
Suelo Residual	Toda la roca está convertida como suelo. La estructura del macizo y la fábrica del material están destruidas. Existe un gran cambio de volumen, sin embargo el suelo no ha sido transportado significativamente.	VI

Posteriormente se calculó la resistencia de varias partículas a través del criterio propuesto en ISRM (1981) mostrado en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5 Criterio para la estimación de resistencia a la compresión simple. Modificada de ISRM (1981).

Clase	Descripción	Identificación en testigos	Aproximación resistencia a la compresión simple [Mpa]
S1	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	<0,025
S2	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0,025-0,05
S3	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para penetrar el dedo.	0,05-0,1
S4	Arcilla rígida	Fácilmente marcada por el pulgar, solamente puede ser penetrada con gran esfuerzo.	0,1-0,25
S5	Arcilla muy rígida	Fácilmente marcada por la uña.	0,25-0,5
S6	Arcilla dura	Se marca con dificultad por la uña.	>0,5
R0	Roca extremadamente débil	Se puede marcar con la uña.	0,25-1
R1	Roca muy débil	Se disgrega fácilmente con presión. Se talla fácilmente con una cortaplumas.	1-5
R2	Roca débil	Puede rayarse con dificultad con una cortaplumas. Se pueden hacer marcas profundas con la punta del rayador.	5-25
R3	Roca moderadamente fuerte	No se puede rayar con una cortaplumas la muestra en mano, se pueden hacer marcas con la punta del rayador.	25-50
R4	Roca fuerte	Difícilmente se puede rayar con rayador. Se necesita un golpe con el martillo de geólogo para romper el testigo.	50-100
R5	Roca muy fuerte	El testigo requiere de muchos golpes del martillo geológico para ser fracturado.	100-250
R6	Roca extremadamente fuerte	El testigo solo puede ser astillada con el martillo geológico.	>250

Para complementar el ensayo de resistencia anterior, se utilizó el martillo de Schmidt para estimar una resistencia a la compresión simple. Para la estimación se utilizó el ábaco de Schmidt (Ilustración 1.4), en el cuál se intercepto el valor dado por el martillo con el peso específico de las partículas (calculado con densidad medida en el capítulo 3).

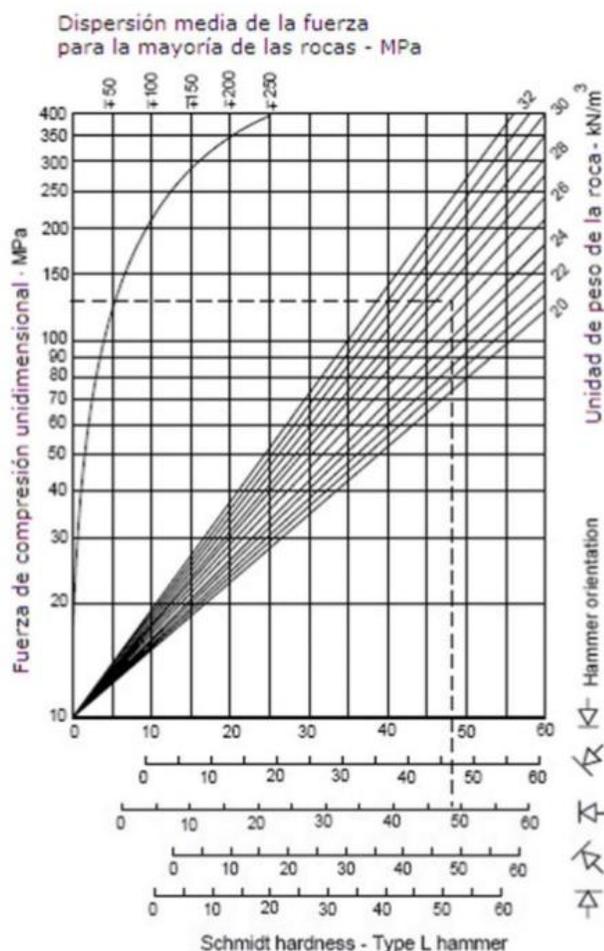


Ilustración 1.4 Abaco de Schmidt (Lima y Menezes, 2008).

Se realizaron dos ensayos de desgaste (Slake). Este es un ensayo utilizado para determinar la durabilidad de una roca con presencia de arcillas. Las rocas pasan por dos ciclos de 10 minutos cada uno, donde es sometida a humedecimiento y rotación al mismo tiempo, al final del primer y segundo ciclo pasan por un secado de 24 horas a 110°C. Luego se mide el índice de durabilidad y se clasifica mediante la Tabla 1.6.

Tabla 1.6 Clasificación para Slake y durabilidad (Gamble, 1971).

Tabla de clasificación de Gamble para slake					
Grupo	% Retenido	1º Ciclo	10	% Retenido	2º Ciclo
		min.			min.
Durabilidad Extremadamente Alta		>99			>98
Durabilidad Alta		98-99			95-98
Durabilidad Media Alta		95-98			85-95
Durabilidad Media		85-95			60-85
Durabilidad Baja		60-85			30-60
Durabilidad Extremadamente Baja		<60			<30

1.5.5 Caracterización mineralógica de material fino.

Se procedió a realizar el análisis mineralógico de las arcillas, Se obtuvieron cuatro muestras de arcillas provenientes de la granulometría de los cuatro sacos de material, siendo el material resultante que pasó la malla #200. Se realizaron dos tipos de ensayos distintos los cuales se complementan entre sí, en primer lugar, análisis FTIR (Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier) en el área de sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, ensayo que entrega un espectro único característico de cada mineral, y que por comparación se obtiene la composición de las arcillas. En segundo lugar, realizaron cuatro difracciones de rayos x en departamento de Física de la Universidad de Chile, ensayo que entrega un espectro único característico de la muestra, el cual se comparó con una base de datos del software EVA, donde se obtuvo la mineralogía de cada muestra.

1.5.6 Trabajo de gabinete

Luego de finalizar todos los ensayos, se procesaron los datos obtenidos de todos los ensayos geotécnicos. Esto se ve reflejado en el capítulo 3 de este trabajo y en anexos (capítulo 7). Para caracterizar el suelo, se hicieron curvas granulométricas, elaboración de tablas con las propiedades geotécnicas básicas, gráficos de stress-strain, tablas de índices de carga puntual, tablas de degaste (slake) y tablas resumen.

En la mineralogía el trabajo de gabinete consistió en el procesamiento de datos, se hizo tablas de descripciones para cada corte descrito, se realizó una serie de gráficos circulares y cuantificación de las arcillas, y finalmente una tabla resumen de la mineralogía encontrada para material fino. Estos resultados están plasmados en el capítulo 3.

Finamente se obtuvieron las discusiones para ambas partes y sus conclusiones, las cuales se ven reflejadas en el capítulo 4 y 5 respectivamente.

1.5.7 Limitaciones

Debido a la ubicación y alcance de este trabajo, no se pudo realizar una visita de terreno, instancia necesaria para una descripción geomorfológica del depósito.

En el caso de los ensayos de FTIR (espectrometría por infrarrojo), la biblioteca de minerales es bastante acotada, por lo que no es posible obtener un resultado completo.

Para el caso de la difracción de rayos X, no se pudo realizar cuantificación, ya que en el laboratorio ya no realizan ese servicio por problemas de hardware y a que el error es muy grande.

2 Antecedentes

2.1 Marco geológico

Ya que el material coluvial proviene de un depósito de la región de Pilbara localizada en Australia Occidental, se procede a describir la geología regional.

2.1.1 Geología regional de la provincia Hamersley

La Provincia de Hamersley ocupa aproximadamente 80.000 km² de la región de Pilbara al Noroeste de Australia occidental. En este sector se reconoce (Ilustración 2.1) un basamento de granito y rocas metamórficas muy antiguas, de edad arcaica (>3000 Ma) y cuatro grupos de unidades (el Grupo Fortescue, el Grupo Hamersley, el Grupo Turee Creek y el Grupo Wyloo).

El Grupo Fortescue es el más antiguo y está compuesto por rocas sedimentarias y volcánico-clásticas. El Grupo Hamersley está compuesto de varias unidades de BIF (Banded Iron Formation) intercaladas con lutitas, carbonatos y material volcánico (Morris, 1980). El Grupo Turee Creek está formado por intercalaciones de rocas sedimentarias clásticas con carbonatos. En conjunto estos tres grupos forman el Súper Grupo Mount Bruce.

Junto a ellos se encuentra el Grupo Wyloo, que es el más joven y está compuesto por rocas sedimentarias clásticas, carbonatadas y volcánicas (Harmsworth et al., 1990).

Estructuralmente las rocas ubicadas al norte de la provincia están plegadas suavemente, en cambio al sur se pliegan ampliamente apretándose desde el oeste al este (Horwitz, 1987).

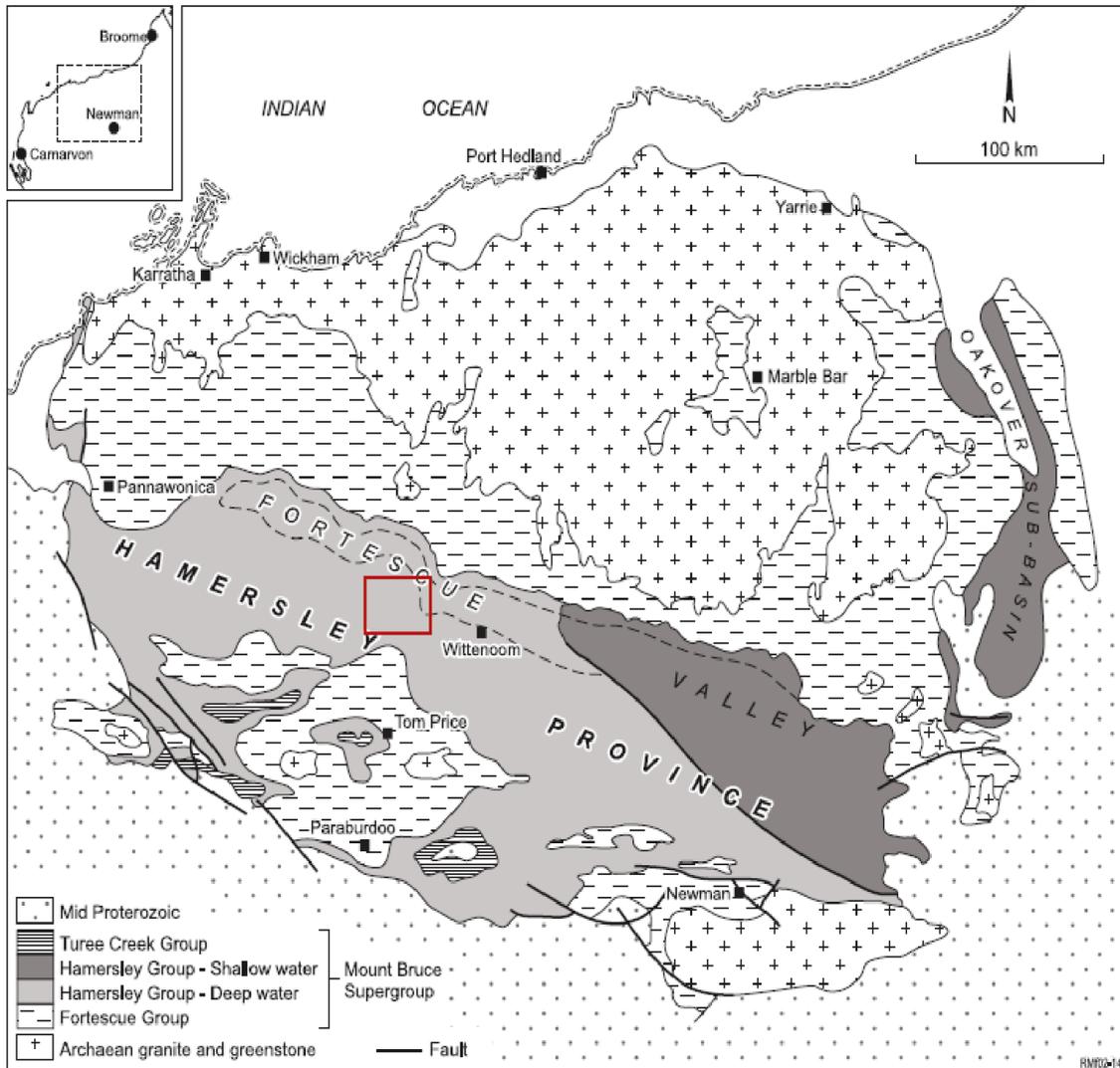


Ilustración 2.1 Mapa geológico del cratón de Pilbara, el área de estudio está en el cuadrado rojo. Modificado de Kneeshaw y Morris, 2014.

2.1.2 Basamento

El basamento está compuesto por un granito y cinturones de rocas metamórficas verdes, de edad arcaica (más de 3000 Ma). Hickman et al. (2001) dividen esta unidad en dos: el Basamento oeste, donde sus rocas más antiguas tienen una edad de 3270 Ma, y el Basamento este, con gneises de edad de 3660–3590 Ma, granitos de 3480–3300 Ma y rocas metamórficas de edad de 3515–3325 Ma ().

Los dos terrenos también exhiben diferentes estilos tectónicos. El Basamento oeste se caracteriza por complejos granitoides con orientaciones hacia el noreste y cinturones de rocas metamórficas verdes con numerosas fallas al este y norte. En contraste, el basamento del este está dominado por domos de granitoides que están separados por fallas, en los cinturones de rocas verdes las estructuras no tienen orientación preferencial (Hickman et al., 2001).

2.1.3 Estratigrafía de la Provincia de Hamersley

A continuación, se describe la estratigrafía de la provincia de Hamersley, representada en la columna estratigráfica de la Ilustración 2.2.

Grupo Fortescue (2770- 2630 Ma)

Este grupo está constituido por 4 formaciones, con un espesor de 4,5 Km.

La Formación Bellary consiste en rocas sedimentarias clásticas y volcánicas máficas. Sobre esta se encuentra, de manera discordante, la Formación Hardy, que consiste en conglomerados basales y areniscas, hacia el sur aparecen intrusiones máficas. Luego de manera concordante se encuentra la Formación Tumbiana, que se compone de intercalaciones de rocas sedimentarias y rocas volcánicas. Finalmente, de manera concordante, se encuentra la Formación Jeerinah que se compone principalmente de rocas sedimentarias clásticas con un alto contenido orgánico, mientras que hacia el sur tiene más del 50% de rocas volcánicas máficas (Harmsworth et al, 1990).

Grupo Hamersley (2630-2450 Ma)

Este Grupo tiene un espesor estratigráfico de 2,5 Km. Este se sobrepone de manera concordante al Grupo Fortescue con una secuencia de grandes unidades de BIF que se interponen con unidades de dolomitas y lutitas con algunos cherts y BIF menores.

Las formaciones que conforman este grupo son: La Formación de hierro Marra Mamba que se compone por el miembro de Nammuldi, el miembro de MacLeod y el miembro de Mount Newman. El miembro de Nammuldi consiste en un BIF intercalado con bandas delgadas de lutitas. El miembro de MacLeod consiste en intercalaciones de chert, BIF, carbonatos y lutitas. El miembro de Mount Newman consiste en BIF intercalado con carbonatos y lutitas. Este miembro es el que contiene los minerales más enriquecidos en hierro, por ende, es ampliamente explotable.

La Formación Wittenoon se ubica concordantemente y se compone del miembro de lutitas West Angelas, que en su base está formado por lutitas con dolomitas y algunos BIF, hacia la zona central intercalación de chert con dolomita y finalmente en la unidad superior, lutitas y dolomitas y en menor cantidad chert y BIF.

La Formación Mount Sylvia se ubica concordantemente sobre la anterior. Esta contiene 3 BIF prominentes y unidades de chert separadas por capas de chert con lutitas.

La Formación Mount McRae se ubica concordantemente sobre la Formación Mount Sylvia. Esta posee una base formada por carbonatos oscuros intercalados de chert y lutitas, la capa intermedia consiste en intercalaciones de chert, lutitas negras y lutitas dolomíticas, esta unidad está enriquecida con pirita. La unidad superior consiste en intercalaciones de chert con lutitas.

La formación de hierro Brockman se ubica concordantemente a la Formación Mount McRae. Es la formación más valiosa económicamente en torno a la producción de mineral de hierro de la provincia Hamersley. Esta se compone de los miembros Dales Gorge, Whaleback, The Joffre y Yandicoogina. El Miembro Dales Gorge consiste en intercalaciones de BIF y lutitas, se reconocen 16 unidades de lutitas y 17 de BIF con macro bandas. El Miembro Whaleback se compone de 5 unidades, donde 4 son intercalaciones de lutitas y BIF y una unidad superior de intercalaciones de Chert y lutitas.

El Miembro Joffre se conforma principalmente de BIF con numerosas bandas de lutitas que no son continuas en toda la provincia. El Miembro Yandicoogina consiste en intercalaciones de lutitas con chert.

La Formación Weeli Wolli es concordante a la anterior. Se compone de intercalaciones de BIF, lutitas e intrusiones de dolerita.

La Formación Woongarra que se ubica sobre la Formación Weeli Wolli. Esta es principalmente volcánica y consiste en intrusiones ácidas especialmente de riolita y depósitos de toba, también se encuentran algunos BIF.

Finalmente la formación de hierro Boolgeeda que superpone a la Formación Woongarra, consta de 3 unidades. La unidad inferior que es una intercalación de BIF, chert y lutitas. La unidad del medio se compone de intercalaciones de BIF y lutitas. La unidad superior en una base de chert y algunas intercalaciones de BIF con lutitas (Harmsworth et al, 1990).

Grupo Turee Creek (2450-2300 Ma)

Es la formación más alta del Súper Grupo Mount Bruce. Esta se encuentra de manera concordante a la Formación Boolgeeda y su espesor estratigráfico es de 5 Km. Este grupo está formado por la Formación Kungarra y una unidad superior. La Formación Kungarra está compuesta por limolita, grauvaca y areniscas. La unidad superior se conforma de cuarcita, carbonatos y lutitas (Trendall, 1983).

Grupo Wyloo

Se encuentra de manera discordante con el Súper Grupo Mount Bruce, este grupo se divide en dos partes, el Grupo Wyloo Inferior y el Grupo Wyloo Superior, los cuales se dividen por una discordancia.

El Grupo Wyloo Inferior es una secuencia de hasta 12km y está formado en la base por la Formación Rio Beasley y en la superior por la Formación Cheela Springs. La Formación Rio Beasley consiste en areniscas de cuarzo con algunos canales de conglomerados BIF. La Formación Cheela Spring consiste en basaltos.

El Grupo Wyloo Superior tiene un espesor estratigráfico de hasta 13km y está formado por 4 formaciones en la base la Formación Mount McGrath, luego la Formación Duck Creek, a Formación June Hill y en la parte más arriba la Formación Ashburton. La Formación Mount MCGrath se forma de argilitas y areniscas férricas con conglomerados de hematita. La Formación Duck Creek consiste en intercalaciones de dolomita y chert. La Formación June Hill es una secuencia de rocas volcánicas. Finalmente, la Formación Ashburton que consiste en intercalaciones de argilitas, conglomerados, areniscas y limolita (Harmsworth et al, 1990).

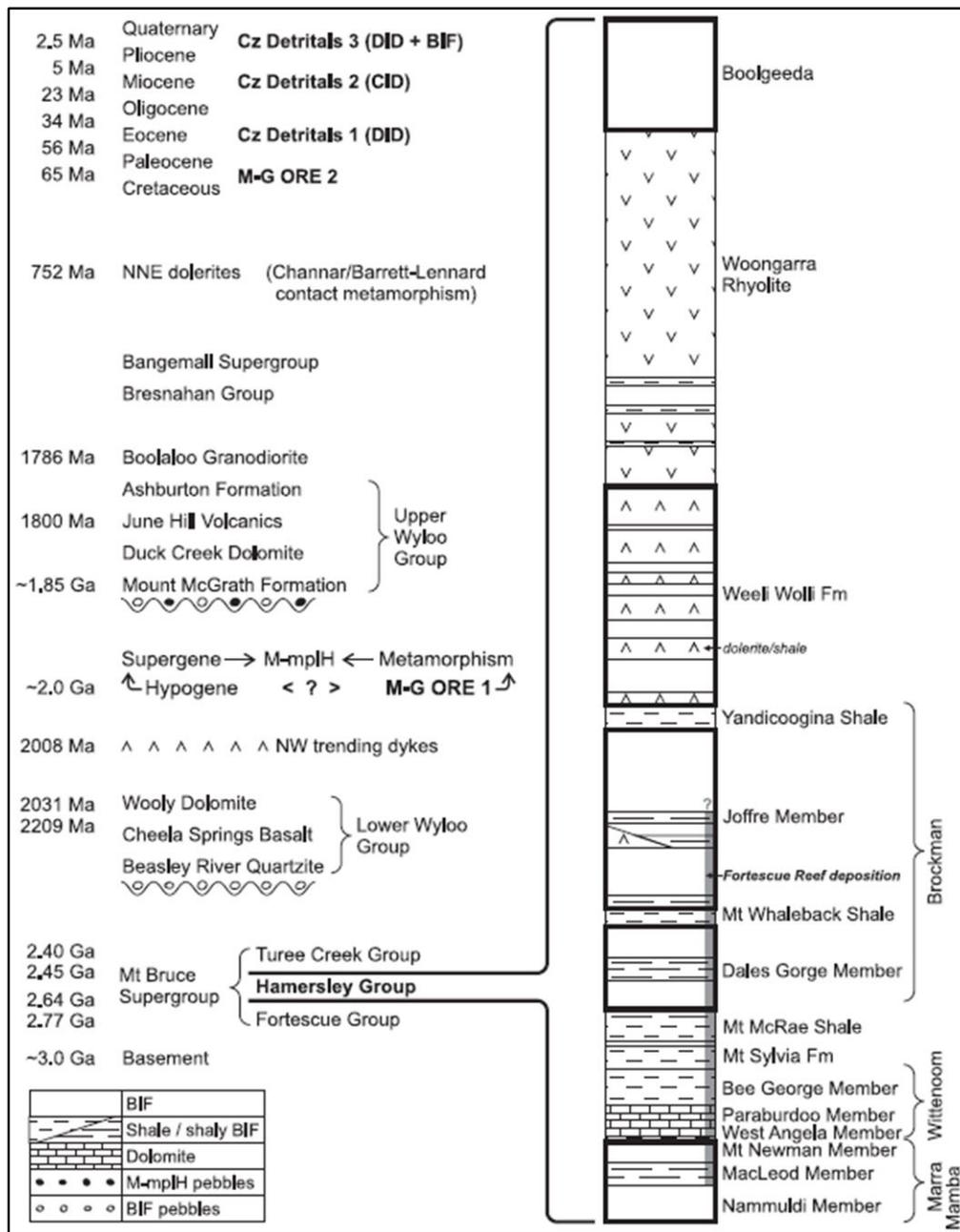


Ilustración 2.2 Columna estratigráfica del cratón Pilbara, con énfasis en el Grupo Hamersley. Deposito coluvial se encuentra en el grupo Hamersley Modificada de Morris et al, 2011.

2.1.4 Geología estructural Hamersley

La historia estructural de deformación de la provincia se divide en varios eventos, 4 de carácter compresivo que forman importantes pliegues y 3 de carácter extensional, se asocian a fallas normales, se pueden relacionar a la mineralización de hierro de alto grado. Estos se detallan a continuación y se pueden ver en la Ilustración 2.3, modificada de Daltra (2006).

Eventos Compresivos

Son 4 eventos compresivos que forman estructuras tipo pliegues. El primer evento es F1 que se produce durante la formación del Grupo Hamersley creando pliegues isoclinales. El segundo evento es F2 (orogenia Ophthalmia) que se produjo después de la formación del Grupo Turee Creek, pero antes de la formación del Grupo Wyloo (Tyler y Thorne., 1990).

La edad de las rocas en la provincia de Hamersley arrojó una estimación de la edad de la Orogenia Ophthalmia entre 2208 y 2031 Ma (Muller et al., 2005). En el sudoeste de la provincia, la orogenia Ophthalmia creó grandes domos y estructuras de cuenca con una vergencia NW, en el sureste de la provincia se crearon una serie de pliegues cortos y apretados de vergencia este (Tyler y Thorne., 1990). La Orogenia del Panhandle (F3) precedió a la formación del Grupo Wyloo superior (Taylor et al, 2001) y se estima a partir de la datación de rocas, que ocurrió entre 2.031 y 2.008 Ma (Muller et al., 2005). La orogenia Capricornio F4, se produjo después que se depositó el Grupo Wyloo superior y tiene una edad de 1.680 a 1.786 Ma (Krapez y McNaughton, 1999).

Eventos Extensivos

En la Provincia de Hamersley se reconocen tres grandes eventos extensionales que crearon varias fallas normales. El primer evento extensional, la extensión de Fortescue (E1), se llevó a cabo durante la formación del Grupo Fortescue, que se cree que se depositó durante el desplazamiento continental hace unos 2.700 Ma (Eriksson et al, 2002). El segundo evento de extensión (E2), tuvo lugar después de la orogenia Ophthalmia y se cree que se formó a los 2.100 Ma (Muller et al., 2005). El tercer evento extensivo (E3) tuvo lugar después de la orogenia Panhandle y antes de que se depositara la Formación Monte McGrath. Este evento creó fallas normales con orientación NW, las cuales tienen desplazamientos de hasta 2.100 m (Dalstra, 2006) y provocaron la reactivación de fallas E2 creando un sistema de horst y graben a lo largo del margen sur de la Provincia de Hamersley.

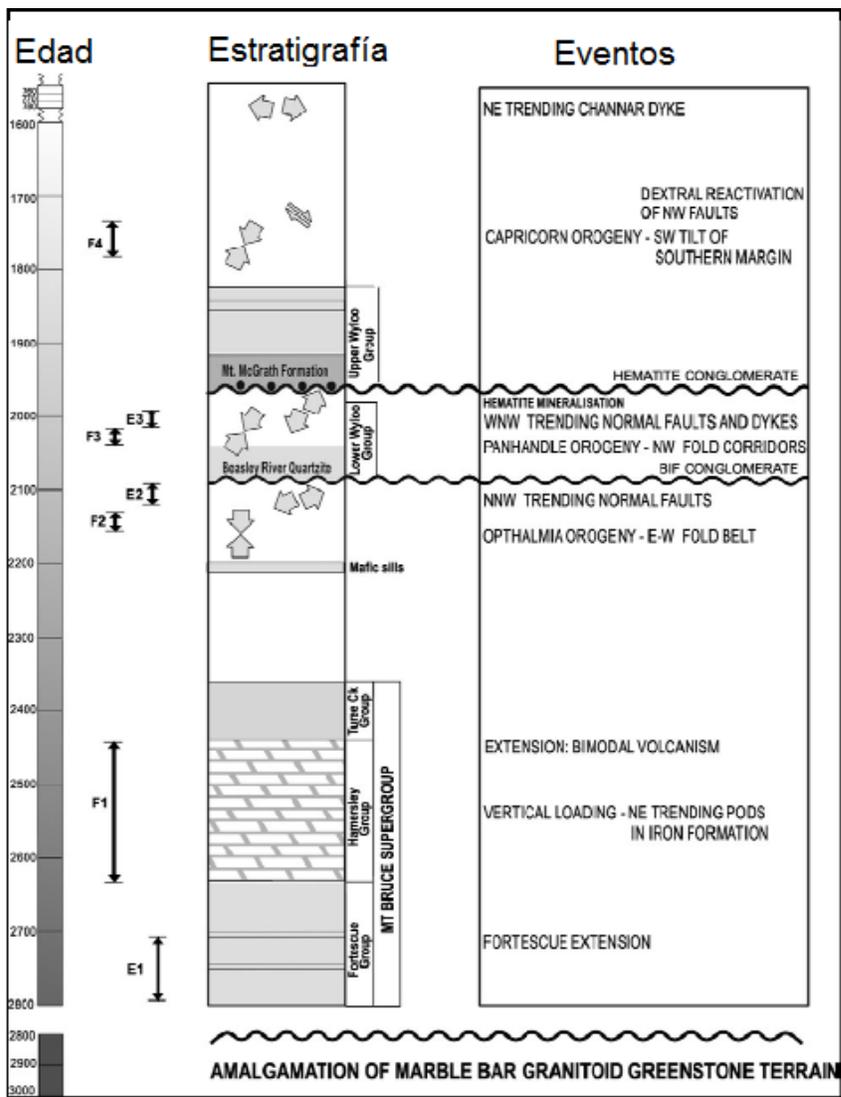


Ilustración 2.3. Eventos compresivos y extensivos en el tiempo (Dalstra, 2006).

2.1.5 Clima de la Provincia de Hamersley

Se estudia el clima, ya que el agua es un factor que afecta de manera importante la resistencia de las rocas.

La provincia de Hamersley está clasificada como desértica, donde el clima varía desde caluroso todo el año a caluroso con veranos secos (de octubre a abril) e inviernos suaves (de mayo a septiembre). La precipitación anual es baja haciendo que la provincia se clasifique como una región árida a semiárida (<http://www.bom.gov.au/wa/>). Durante el verano, las temperaturas máximas alcanzan más de 40 ° C y las precipitaciones oscilan entre 0 y 200 mm por mes dependiendo de los ciclones de verano. El invierno reduce las temperaturas a menos de 10 ° C y hasta alrededor de 27° C durante el día. La lluvia de invierno varía de 5 a 50 mm por mes.

2.1.6 Depósitos de interés económico predominantes en la provincia de Hamersley

Como el material coluvial cubre localmente depósitos de hierro en el sector de Pilbara en Australia, se estudió los depósitos de hierro que predominan en esta región.

Existen 3 tipos de rocas con minerales de hierro que se extraen y exportan de la región de Pilbara, especialmente en el Grupo Hamersley (Ramanaidou et al., 2003).

- (i) BIF (Formación de hierro bandeado)
- (ii) CID (Depósitos de hierro de canal de goetita y hematita)
- (iii) Depósitos de detritos menores de hierro hematita-goetita.

Nos enfocaremos en los primeros dos, que son los más importantes económicamente y se encuentran en el área de estudio.

2.1.6.1 BIF

Banded Iron Formation (BIF): Son depósitos sedimentarios químicos muy antiguos que están finamente estratificados. Están formados por intercalaciones de capas de minerales de hierro (óxidos como hematita y magnetita), chert y carbonatos. Sus bandas se caracterizan por la variaciones de espesor desde milímetros a centímetros, La mayor parte de estos depósitos ocurrió hace más de 2500 Ma (precámbricas). Su contenido de hierro varía entre un 25-45% (Morris, 1993).

El origen de estas rocas está asociado a los primeros mares del planeta (precámbricos) en ambiente de aguas someras de plataforma continental, esto se explica debido a la ausencia de elementos detríticos, donde el hierro, el chert y los carbonatos se depositaron netamente por precipitación química (Benedetto, 2010). El Fe se habría depositado debido a la acción de bacterias fotosintéticas y a las algas azules y verdes que crearían un ambiente rico en oxígeno (oxidante), lo cual oxidaría el hierro, y este, al estar oxidado, no es soluble en el agua obligándolo a precipitar (Klein, 2005). Las bandas características se deberían a las variaciones estacionales (Morris, 1993).

Estos depósitos se encuentran prácticamente en todo el mundo, en las Minas Gerais en Brasil, el Súper Grupo Transvaal en Sudáfrica, Luke Superior en Canadá, EEUU y de los más importantes, los depositados en el Cratón Pilbara en la provincia Hamersley, la cual abarca un área de más de 80.000 km² (Morris, 1993).

Actualmente se ha publicado en diversas revistas evidencias que pondrían en duda el origen marino tipo plataforma continental de estos depósitos. Estos se habrían formado en lagos pocos profundos, de aguas hidrotermales cálidas ubicados en los continentes que se desplazaban por regiones polares. (Lewis et al., 2012).

2.1.6.2 CID

Chanel iron deposits (CID): son depósitos sedimentarios fluviales de edad del Mioceno, estos se caracterizan por tener anomalía positiva de hierro y además son de bajo costo de extracción (Ramanaidou et al., 2003).

Este tipo de depósito es uno de los tres principales tipos de mineral de hierro explotable en la provincia de Hamersley y representa el 40% de la producción actual. Los depósitos de hierro del canal incluyen la Formación Robe, La Formación Marillana, Formación Poondano, y pequeños yacimientos del Yilgarn, así como los grandes yacimientos de Kazajstán. Los depósitos de hierro del canal se producen en paleocanales de 1 a 5 km de ancho y de 1 a 100m de espesor, siendo el paleocanal Robe el más largo. Los depósitos de hierro en el canal son acumulaciones detríticas, ricas en hierro que comprenden gránulos de arena gruesa a grava fina que incluyen: pelletoides (ooides y pórides); peloides, madera ferruginizada (madera goetitizada en la matriz y madera hematitizada en el núcleo) y una matriz porosa que envuelve los gránulos (Ramanaidou et al, 2003).

3 Resultados

A partir de los antecedentes recopilados en el capítulo 2 y a la ubicación del material coluvial, se determinó que las partículas del material coluvial son derivadas de un depósito tipo BIF, es decir, formaciones de hierro bandeado. Ya con esta información, se procedió a realizar los ensayos para caracterizar el material coluvial de la región de Pilbara, Australia.

Primero se presentan los resultados realizados al material, cuatro granulometrías, descripción macroscópica del material, resultados de un triaxial gigante realizado por IDIEM que aún no han sido publicados, ensayos especiales de corte directo en roca-roca y corte directo roca-suelo creados con el fin de comparar con triaxial gigante.

Posteriormente se presenta los resultados de los ensayos realizados al material granular grueso, ya que como veremos en este capítulo, este representa la mayor parte del material. Estos fueron: Descripción macroscópica de muestra de mano y descripción microscópica de cortes transparentes y pulidos, propiedades físicas (densidad, absorción y porosidad), estimación de resistencia a la compresión simple a través de Tabla 1.4 (ISRM, 1981) y martillo Schmidt, carga puntual en bandas de minerales y slake (ensayo de desgaste).

También se analizó la mineralogía del material fino (material que pasa malla #200). Se realizó análisis de difracción de rayos x y análisis de espectrometría por infrarrojo (FTIR).

3.1 Caracterización del material

3.1.1 Granulometría

Se realizaron cuatro granulometrías, donde cada una corresponde a un saco de material de aproximadamente 25 Kg. En la Tabla 3.1, se presenta el resultado de la granulometría al saco N°1, ya que todas son similares, se considera esta como la base para análisis posteriores (para ver la granulometría de los demás sacos, ver en anexos 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 y 7.6). En la Tabla 3.2, se indica el Cu (coeficiente de uniformidad) y Cc (coeficiente de curvatura) de la curva granulométrica N°1, el peso específico, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

Tabla 3.1 Granulometría saco N°1.

Tamiz [N°]	Diámetro [mm]	Pesos [Kg]	Peso retenido acumulado [%]	Porcentaje retenido [%]	Porcentaje que pasa [%]
3''	75	0	0	0	100,00
2 1/2''	63	0,45	0,45	1,88	98,12
2''	50	1,3	1,75	7,29	92,71
1 1/2''	37,5	1,34	3,09	12,88	87,12
1''	25	3,1	6,19	25,80	74,20
3/4''	19	2,78	8,97	37,39	62,61
1/2''	16	3,68	12,65	52,73	47,27
3/8''	9,5	1,89	14,54	60,61	39,39
#4	4,75	3,13	17,67	73,66	26,34
#8	2,36	2	19,67	81,99	18,01
#10	2	0,43	20,1	83,78	16,22
#18	1	1,5	21,6	90,04	9,96
#40	0,425	1,17	22,77	94,91	5,09
#50	0,3	0,32	23,09	96,25	3,75
#100	0,15	0,44	23,53	98,08	1,92
#200	0,075	0,23	23,76	99,04	0,96
Platillo		0,23	23,99	100,00	0,00

Tabla 3.2 Peso específico, índice de plasticidad, Cc y Cu.

Peso específico [gr/cm ³]	3,83
Limite liquido (LL)	19
Limite Plástico (LP)	10
Índice de Plasticidad (IP)	9
Coefficiente de uniformidad (Cu)	2,49
Coefficiente de curvatura (Cc)	25,41

De acuerdo con la Tabla 3.1, el porcentaje de material sobre los 2mm representa un 83,7% (Material tamaño gravilla y grava), el material que pasa los 2mm hasta la malla #200 es material tamaño arena y representa un 16,2%, finalmente el porcentaje de material fino (material que pasa malla #200) es aproximadamente un 1%.

En la Tabla 3.2, se observa que el peso específico del material es 3,83 [gr/cm³], lo cual es bastante alto. Con respecto al comportamiento del material fino, su límite liquido es 19, el límite plástico es 10, resultando un índice de plasticidad 9, que de acuerdo con la carta de plasticidad (Tabla 1.1) el suelo fino tiene un comportamiento CI y MI, es decir, limos y arcillas no plásticas.

En la Ilustración 3.1, se muestra una comparación de las cuatro curvas granulométricas. Notar que todas las curvas son similares.

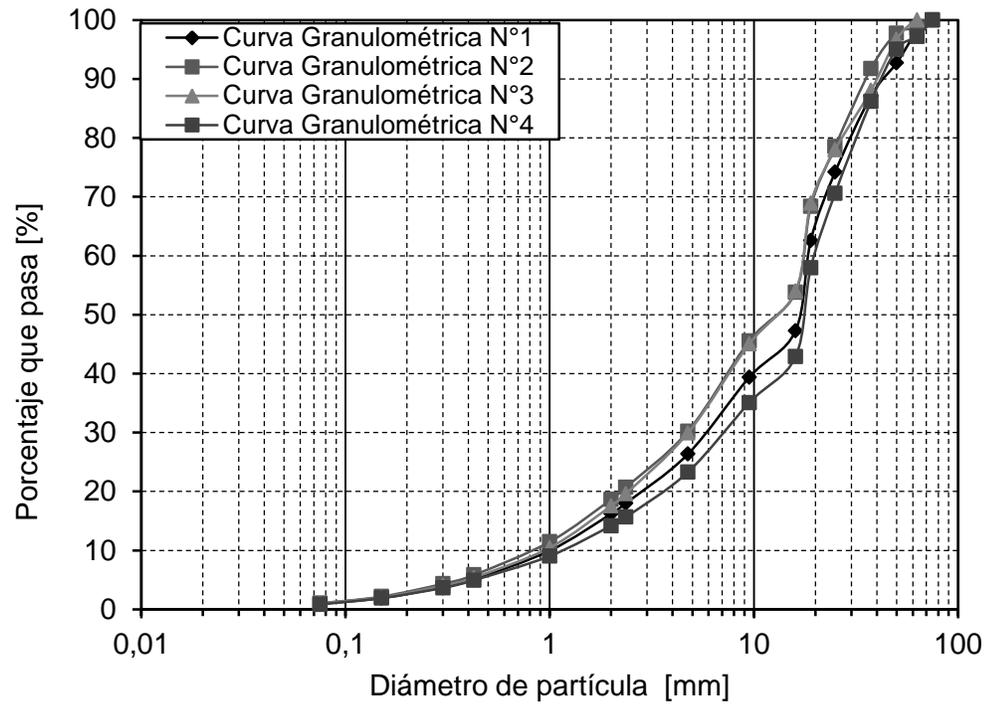


Ilustración 3.1 Comparación curvas granulométricas para los 4 sacos de material.

Con el porcentaje retenido en malla #4 y porcentaje de material retenido en malla #200, el coeficiente de curvatura (C_c) y coeficiente de uniformidad, en base al sistema de clasificación USCS (Tabla 1.1), el suelo se clasifica como GW, es decir, gravas bien graduadas mezcladas con arenas y pocos finos.

3.1.2 Descripción del material

A partir de la clasificación granulométrica, se definió una relación clasto y matriz de 84/16%, resultando un material clasto soportado. En la Ilustración 3.2, se presenta una descripción macroscópica del material.

Clastos (84%)

- Color rojo
- Tamaño desde gravilla (>2mm) hasta tamaño grava (4 a 256 mm).
- Mala selección
- Baja esfericidad y grado de redondeamiento anguloso a sub-anguloso
- Forma: Principalmente planar, algunas prismáticas
- Composición: Rocas tipo BIF con bandas de cuarzo, hematita y magnetita

Matriz (16%)

- Color rojo
- Tamaño desde arcilla (<0,002mm) hasta tamaño arena (2mm)
- Buena selección
- Esfericidad media y grado de redondeamiento anguloso a sub-anguloso
- Forma: planar y cubicas
- Composición: Hematita y arcillas

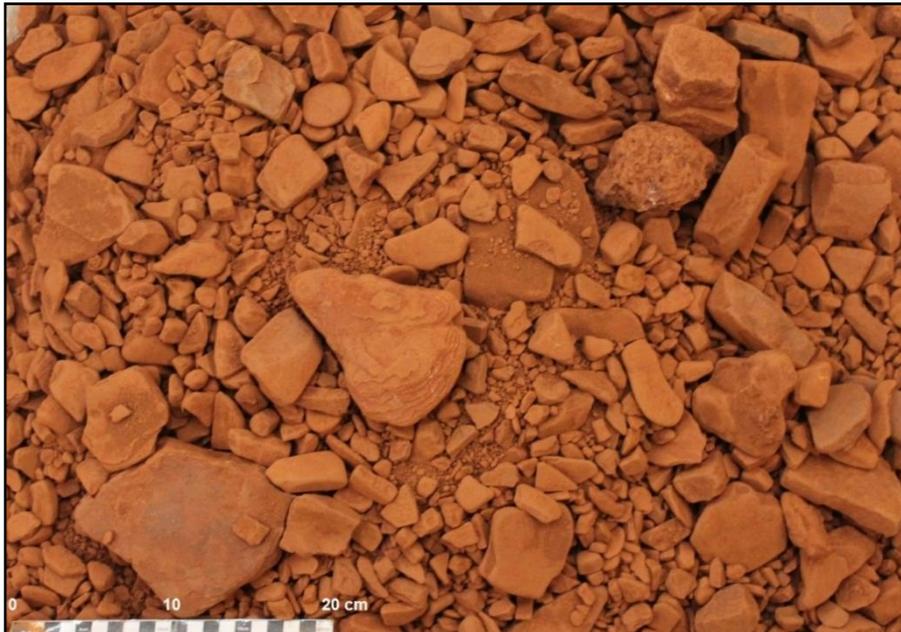


Ilustración 3.2 Foto del material descrito

3.1.3 Triaxial gigante

Para definir los parámetros de resistencia del material, se presentan resultados de un ensayo triaxial gigante CID (consolidado isotrópico drenado) realizado por IDIEM, los cuales aún no han sido publicados.

Se armaron cuatro probetas, las cuales fueron compactadas a una densidad de $2,19 \text{ gr/cm}^3$ y a una humedad natural de un 2,34%. Estas fueron ensayadas a una presión de cámara efectiva de 0,25, 0,5, 1 y 2 MPa respectivamente.

En la ilustración 3.3, se observa los valores de resistencia máxima alcanzada por cada probeta, en general todas las curvas ascienden hasta alcanzar un valor relativamente constante, donde la probeta 4 llega al máximo de 3,11 MPa. Se registró el p y q máximo (Tabla 3.3) con los cuales se realizó un gráfico p v/s q (Ilustración 3.4) y con ello se calculó un ángulo de fricción $\Phi=30^\circ$.

Tabla 3.3 p y q máximos.

	p máximo [MPa]	q máximo [MPa]
Probeta 1	0,89	0,64
Probeta 2	1,61	1,11
Probeta 3	2,81	1,81
Probeta 4	5,11	3,11

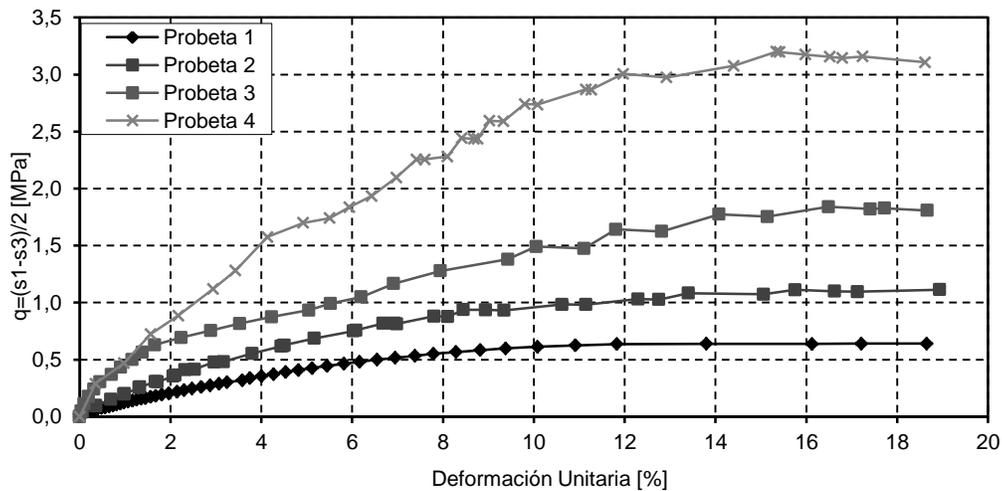


Ilustración 3.3 q v/s deformación unitaria

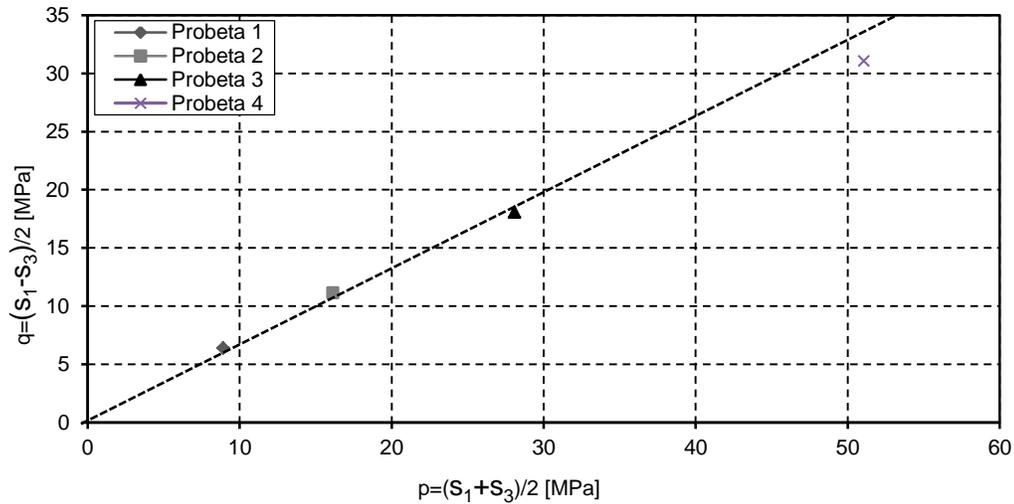


Ilustración 3.4 Regresión lineal p v/s q

Como se vio anteriormente en la granulometría, el material es clasto soportado (84 % de clastos), pero igual posee aproximadamente un 16% de matriz (material tamaño <2mm). Como se observó en el esquema representado en la Ilustración 1.3, entre de todos los procesos que pueden ocurrir, se destacan tres:

- A) Esfuerzo de corte entre rocas: En este proceso, al intentar acomodarse las partículas, se genera un esfuerzo de corte entre dos rocas.
- B) Esfuerzo de corte entre roca y suelo: En este caso, al ser sometidas a esfuerzo e intentar acomodarse las partículas, se genera un esfuerzo de cizalle entre suelo y rocas.
- C) Carga puntual: se da el caso donde rocas generan esfuerzos de carga puntual en otra.

Con el fin de entender lo que ocurre dentro de la probeta del triaxial gigante al momento del ensayo, se inventaron dos ensayos especiales para representar los procesos A y B, un ensayo de corte directo roca-roca y un ensayo corte directo roca-suelo.

3.1.4 Corte directo en roca-roca

Este es un ensayo especial, debido a que se creó para representar un proceso que ocurre en el triaxial gigante y así obtener el ángulo de fricción interna con el fin de compararlo con el ángulo dado por el triaxial. Se utilizaron dos rocas relativamente planas que tuvieran gran superficie de contacto. Este ensayo se realizó para tres pares de rocas. Las tensiones normales escogidas fueron 1, 3, 6 y 12 MPa. Para se calculó el JRC de acuerdo con la Tabla 1.2 (Barton y Choybey, 1977), los resultados se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Rugosidad de cada cara según perfil de rugosidad de Barton y Choybey (1977) para cada cara.

Ensayo	Muestra	JRC	Observaciones
N°1	A15	4	Rugosidad levemente escalonada. Poca arcilla.
	A16	4	Rugosidad levemente escalonada. Poca arcilla.
N°2	A17	2	Cara de contacto de magnetita con poca arcilla.
	A19	3	Cara de contacto de hematita sin arcillas.
N°3	A26	1	Cara de contacto con hematita arcillosa.
	A29	1	Superficie lisa con hematita arcillosa.

Posteriormente se midió el área de contacto para cada una de las caras y se seleccionó las con menor área como se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Área de contacto menor para cada ensayo.

Ensayo	Área de contacto menor [cm ²]
N°1	30,14
N°2	45,40
N°3	44,19

Mientras se ejecutó el ensayo, entre cada tensión normal aplicada se midió un área de contacto efectiva con papel calco entre ambas caras, luego se calculó esta área de manera exacta son un software llamado AxionLe. Todo esto con el fin de ver una evolución en el área de contacto. El resultado se presenta en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Área de contacto efectiva, después de aplicar las cargas normales.

Ensayo	Área menor [cm ²]	Área efectiva para 1 MPa [cm ²]	Área efectiva para 3 MPa [cm ²]	Área efectiva para 6 MPa [cm ²]	Área efectiva para 12 MPa [cm ²]
N°1	30,14	0,69	0,71	1,19	1,24
N°2	45,40	0,92	0,63	0,60	0,58
N°3	44,19	0,60	0,52	0,76	1,42

Como se puede observar en la Tabla 3.6, el área efectiva es bastante poco comparada con el área de la cara de contacto. En el ensayo N°1, el área efectiva varía de 0,69 a 1,24 cm², mientras que en el ensayo N°2 el área de contacto efectiva va disminuyendo conforme se le aplica más carga normal, en contraste con el ensayo N°3, este también aumenta el área efectiva conforme aumenta la carga normal.

Luego de ejecutar los ensayos, se graficó la tensión de corte v/s deformación horizontal y de deformación vertical v/s deformación horizontal. Con los datos de tensión de corte máxima, se graficó la tensión de corte v/s la tensión normal y se obtuvo la pendiente y con ella el ángulo de fricción roca-roca.

A continuación, se presentan los resultados para cada ensayo:

Ensayo N°1(A15-A16): se puede notar en la Ilustración 3.5 (grafico A), que para la tensión normal de 1,3 y 6 MPa en el gráfico de deformación horizontal vs tensión de corte, las curvas se mantienen prácticamente constantes. El grafico B de la Ilustración 3.5, nos da una idea del relieve mientras la roca superior se desplaza, donde las curvas siempre ascienden. En C de la Ilustración 3.5, donde vemos una regresión lineal que se ajusta muy bien a los puntos, con la cual se calcula la pendiente y con ello el ángulo de fricción interna. A continuación, en la Tabla 3.7 se presenta la tensión de corte máxima y el ángulo de fricción calculado. La roca después de la carga 12 Mpa se fracturo, por ende, no se incluyó en el cálculo del ángulo de fricción. En la Ilustración 3.6 se ve se observa un antes y después de la roca al finalizar el ensayo.

Tabla 3.7 Tensión de corte máxima y ángulo de fricción, muestra A15-A16.

Muestra	Stress normal [Mpa]	Tensión Corte máxima [Mpa]	Ángulo de Fricción
A15-A16	1	0,3	Φ=15°
	3	0,9	
	6	1,7	

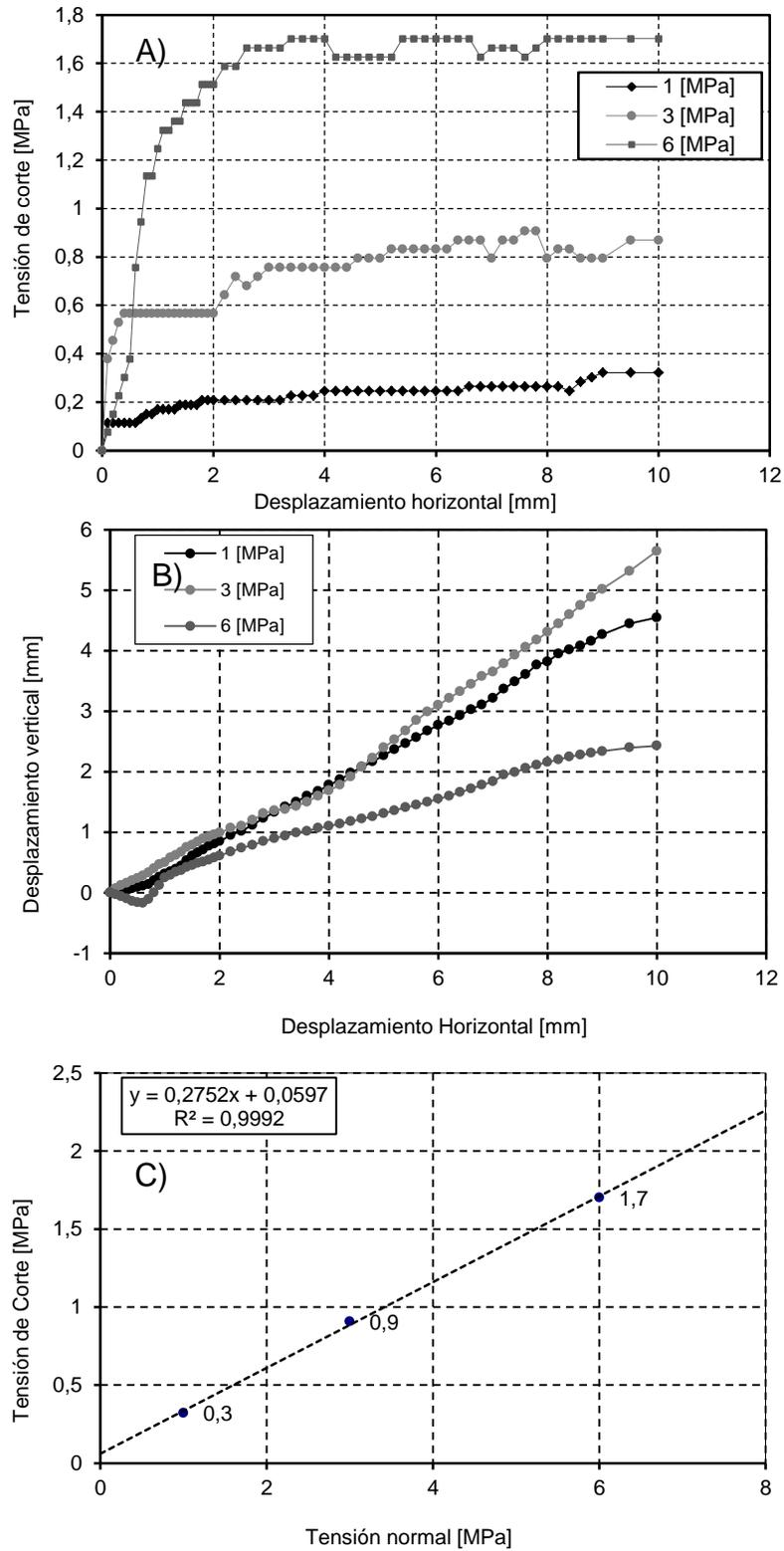


Ilustración 3.5. Graficos resultados de ensayo de corte directo para la muestra A15-A16, A) Desplazamiento horizontal v/s tensión de corte, B) Desplazamiento horizontal v/s desplazamiento vertical, C) Tensión de corte máxima v/s tensión normal.

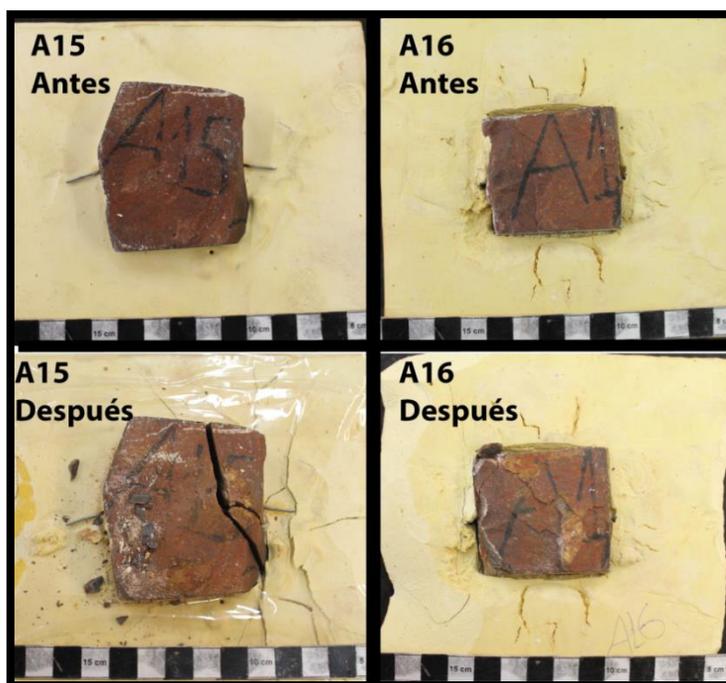


Ilustración 3.6. Foto de antes y después del corte directo, muestra A15-A16.

Ensayo N°2 (A17-A19): como se observa en la Ilustración 3.7 (grafico A), que para la tensión normal de 1,3 y 6 MPa, en el gráfico de deformación horizontal v/s tensión de corte, las curvas se mantienen prácticamente constantes. El grafico B de la Ilustración 3.7, nos da una idea del relieve mientras la roca de arriba se desplaza, donde la curva asciende y luego se mantiene constante. En C de la Ilustración 3.7, donde vemos una regresión lineal que se ajusta muy bien a los puntos, con la cual se calcula la pendiente y con ello el ángulo de fricción interna. La roca después de la carga 12 MPa se fracturo, por ende, no se utilizó para el cálculo del ángulo de fricción. A continuación, en la Tabla 3.8 se presenta la tensión de corte máxima y el ángulo de fricción calculado. En la Ilustración 3.8 se ve se observa un antes y después de la roca al finalizar el ensayo.

Tabla 3.8 Tensión de corte máxima y ángulo de fricción, muestra A17-A19.

Muestra	Stress normal [MPa]	Tensión Corte máxima [MPa]	Ángulo de Fricción interna.
A17-A19	1	0,3	$\Phi = 12^\circ$
	3	0,7	
	6	1,4	

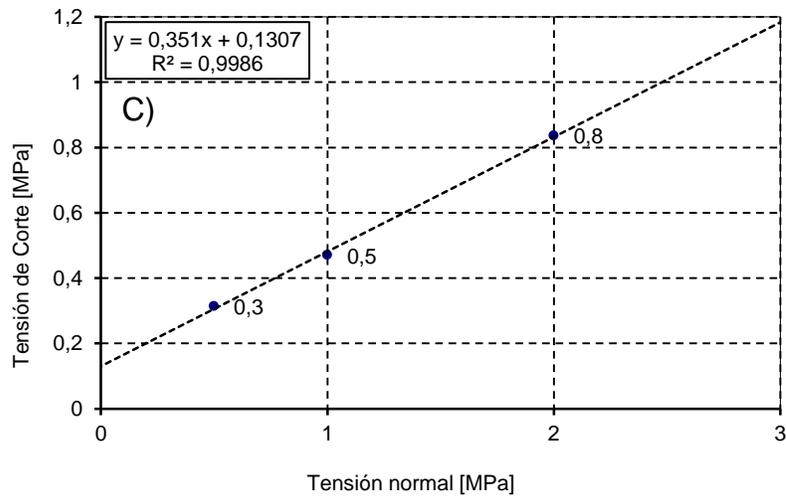
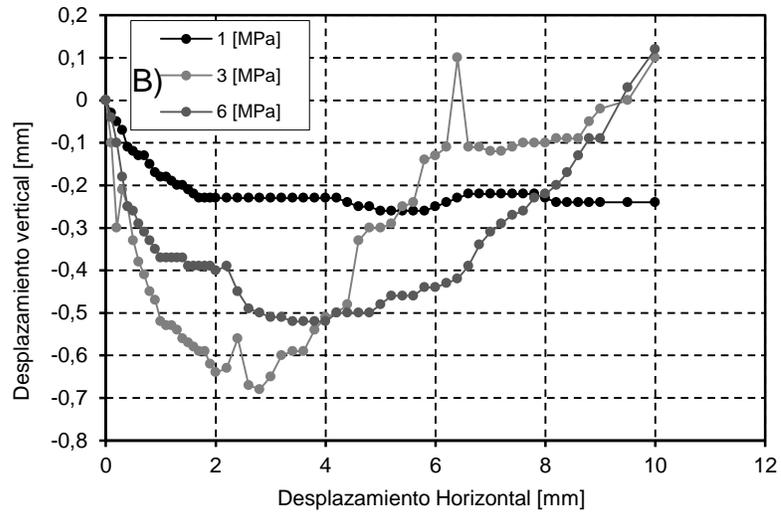
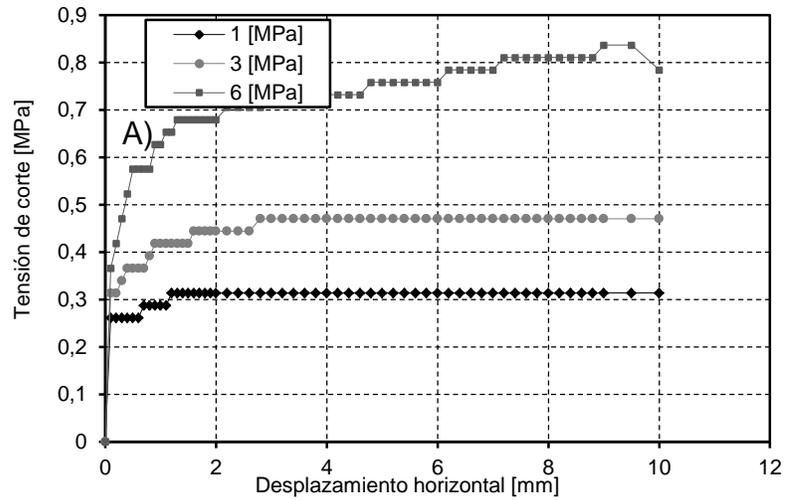


Ilustración 3.7. Graficos resultados de ensayo de corte directo para la muestra A17-A19. A) Desplazamiento horizontal v/s tensión de corte. B) Desplazamiento horizontal v/s Axial. C) Tension de corte v/s tension normal.

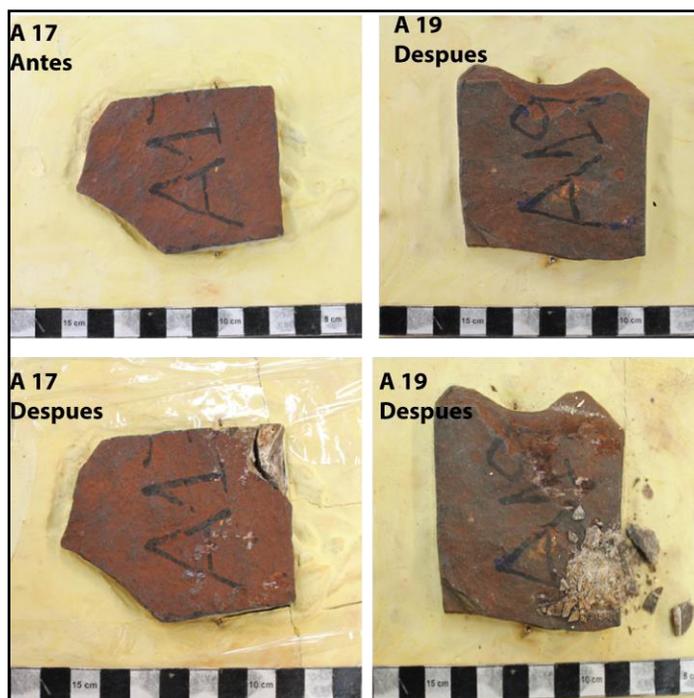


Ilustración 3.8. Foto de antes y después del corte directo, muestra A17-A19.

Ensayo N°3 (A26-A29): se puede notar en la Ilustración 3.9 (grafico A), que para la tensión normal de 1,3 y 6 MPa, en el gráfico de deformación horizontal v/s tensión de corte, las curvas se mantienen prácticamente constantes. El grafico B de la Ilustración 3.9, nos da una idea del relieve mientras la roca de arriba se desplaza, donde la curva primero asciende y luego decrece. En C de la Ilustración 3.9, donde vemos una regresión lineal que se ajusta muy bien a los puntos, con la cual se calcula la pendiente y con ello el ángulo de fricción interna. A continuación, en la Tabla 3.9 se presenta la tensión de corte máxima y el ángulo de fricción calculado. En la Ilustración 3.10 se ve se observa un antes y después de la roca al finalizar el ensayo. La roca después de la carga 12 Mpa se fractura, por ende, no se utiliza para los cálculos.

Tabla 3.9 Tensión de corte máxima y ángulo de fricción, muestra A26-A29.

Muestra	Stress normal [MPa]	Tensión corte máxima [MPa]	Ángulo de Fricción
A26-A29	1	0,2	$\Phi = 11^\circ$
	3	0,6	
	6	1,2	

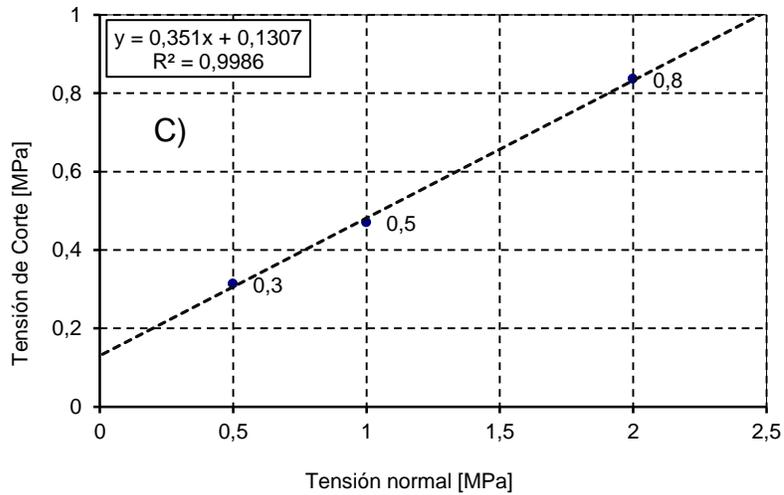
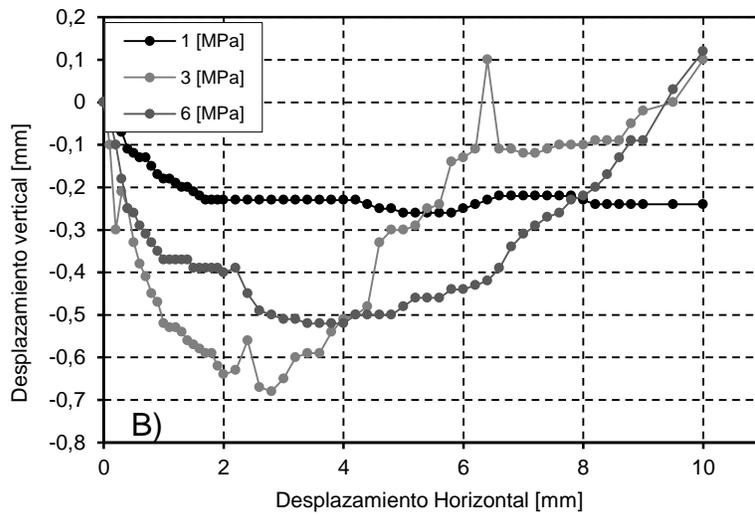
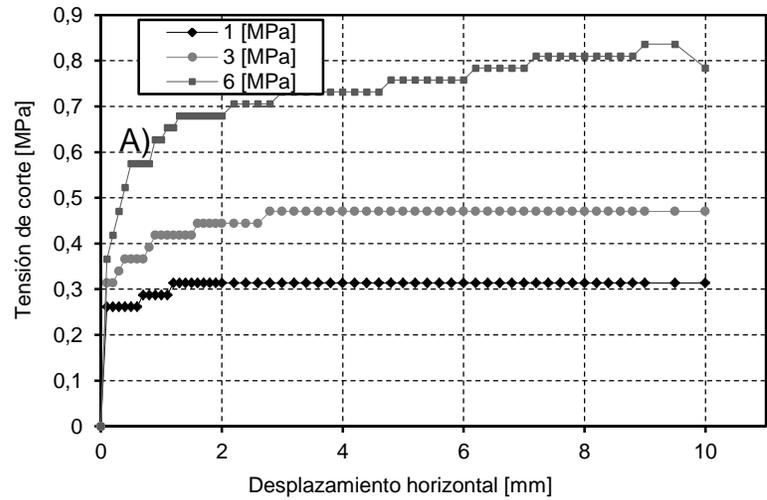


Ilustración 3.9. Graficos resultados de ensayo de corte directo para la muestra A26-A29. A) Desplazamiento horizontal v/s tensión de corte. B) Desplazamiento horizontal v/s vertical. C) Tension de corte v/s tension normal.

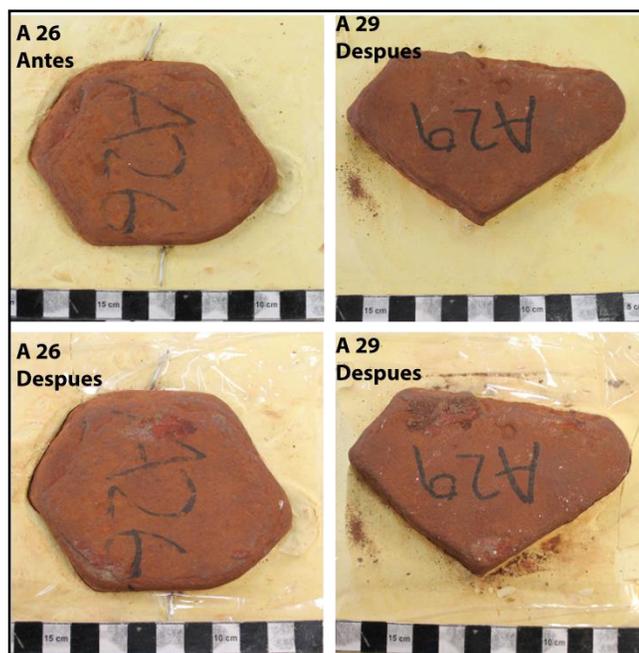


Ilustración 3.10. Foto de antes y después del corte directo, muestra A26-A29.

Finalmente, en la Tabla 3.10 se presenta un resumen de la tensión de corte máxima y el ángulo de fricción para cada ensayo. Se observa que el ángulo de fricción varía de $11,2^\circ$ a $15,4^\circ$.

Tabla 3.10 Resumen de stress normal aplicado, tensión de corte máxima y ángulos de fricción interna para cada para de muestras.

Ensayo	Tensión normal [MPa]	Tensión corte máxima [MPa]	Ángulo de fricción
N°1(A15-A16)	1	0,3	$\Phi=15^\circ$
	3	0,9	
	6	1,7	
N°2(A17-A19)	1	0,3	$\Phi =12^\circ$
	3	0,7	
	6	1,4	
N°3(A26-A29)	1	0,2	$\Phi =11^\circ$
	3	0,6	
	6	1,2	

Notar que si se compara la Tabla 3.4 y la Tabla 3.10, se puede ver que, a mayor rugosidad, hay mayor ángulo de fricción.

3.1.5 Corte directo en roca-suelo

El segundo proceso que ocurre dentro del triaxial gigante es un esfuerzo de corte entre suelo y roca. Para representarlo se creó una celda (Ilustración 3.11) donde se compactó el suelo a una cierta humedad.



Ilustración 3.11 Foto que muestra la roca y celda para ensayar suelo.

Se hicieron tres ensayos con distintas condiciones iniciales:

1. Suelo compactado a una densidad de $2,19 \text{ gr/cm}^3$ con humedad de 2,34%.
2. Suelo compactado a una densidad de $2,19 \text{ gr/cm}^3$ con humedad de un 5%.
3. Suelo compactado a una densidad de $2,19 \text{ gr/cm}^3$ con humedad de un 8%.

Ensayo N°1: En este caso se utilizó una compactación del suelo a una densidad de $2,19 \text{ gr/cm}^3$ a una humedad de un $2,34\%$, ya que el triaxial gigante fue realizado a estas condiciones iniciales. Se ensayó a $0,5$, 1 y 2 MPa . El área menor de contacto, en este caso el área de la roca es $21,81 \text{ cm}^2$. En la Ilustración 3.12 se observa un antes y después de la ejecución del ensayo, donde se puede apreciar que hubo rotura de partículas.



Ilustración 3.12 Foto antes y después de ensayar suelo a $2,34\%$

En la ilustración 3.13 se muestra en la parte A un gráfico, tensión de corte v/s deformación horizontal, que muestra que la resistencia máxima alcanza es $0,8 \text{ [MPa]}$. La parte B muestra un gráfico deformación vertical v/s deformación. En la parte C, un gráfico de tensión de corte máxima v/s tensión normal con el cual se calcula el ángulo de fricción presentado en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Ángulo de fricción muestra a $2,34\%$ humedad.

Ensayo	Stress normal [MPa]	Tensión corte máxima [MPa]	Ángulo de Fricción
Densidad $2,19 \text{ gr/cm}^2$ Humedad: $2,34\%$	$0,5$	$0,3$	$\Phi=18^\circ$
	1	$0,5$	
	2	$0,8$	

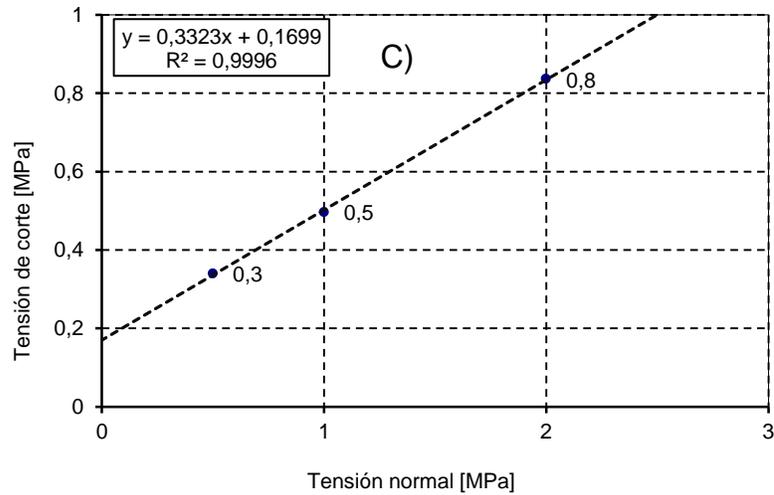
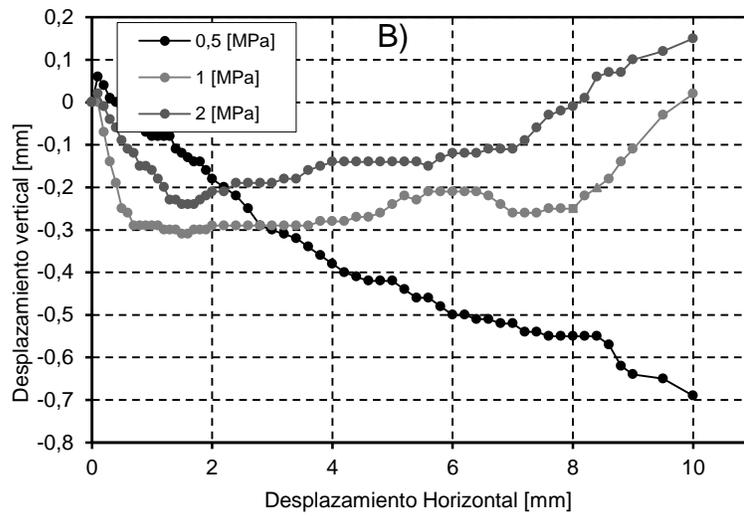
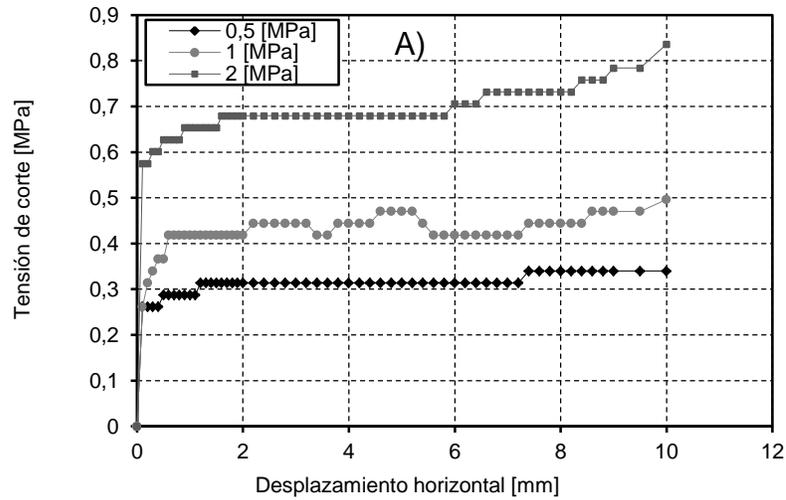


Ilustración 3.13 A) Grafico tension de corte v/s deformacion horizontal. B) deformacion horizontal v/s deformacion vertical. C) tension de corte v/s tension normal. Muestra suelo 2,34% humedad.

Ensayo N°2: En este caso se utilizó una compactación del suelo a una densidad de $2,19 \text{ gr/cm}^3$ a una humedad de un 5%, ya que esta es la humedad óptima para compactarse. Se ensayó a 0,5, 1 y 2 MPa. El área menor de contacto, en este caso el área de la roca es $21,81 \text{ cm}^2$. En la Ilustración 3.14 se observa un antes y después de la ejecución del ensayo donde se observa rotura de partículas.

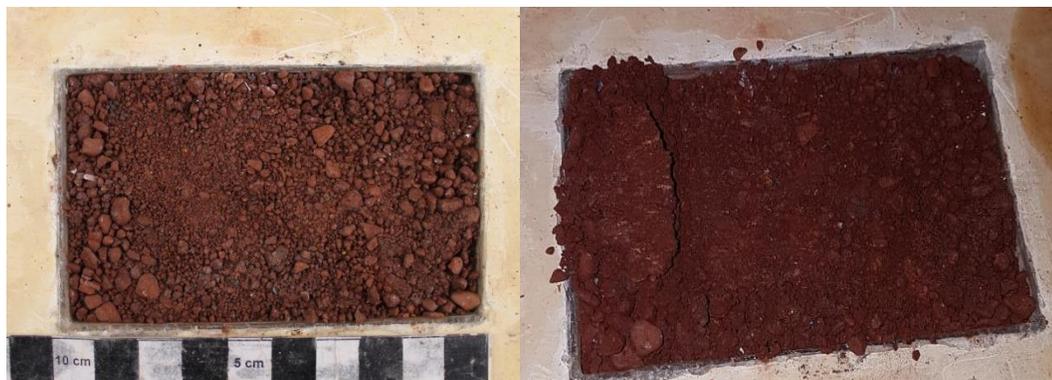


Ilustración 3.14 Antes y después de ensayo roca-suelo 5% humedad.

En la ilustración 3.15 se muestra en la parte A un gráfico, tensión de corte v/s deformación horizontal, que muestra que la resistencia máxima alcanza es 0,8 MPa. La parte B muestra un gráfico deformación vertical v/s deformación horizontal que indica que la roca baja a medida que avanza. En la parte C, un gráfico de tensión de corte máxima v/s tensión normal con el cual se calcula el ángulo de fricción presentado en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Ángulo de fricción a 5% de humedad.

Ensayo	Stress normal [Mpa]	Tensión corte máxima [Mpa]	Ángulo de Fricción
Densidad $2,19 \text{ gr/cm}^2$ Humedad: 2,34%	0,5	0,3	$\Phi=19^\circ$
	1	0,5	
	2	0,8	

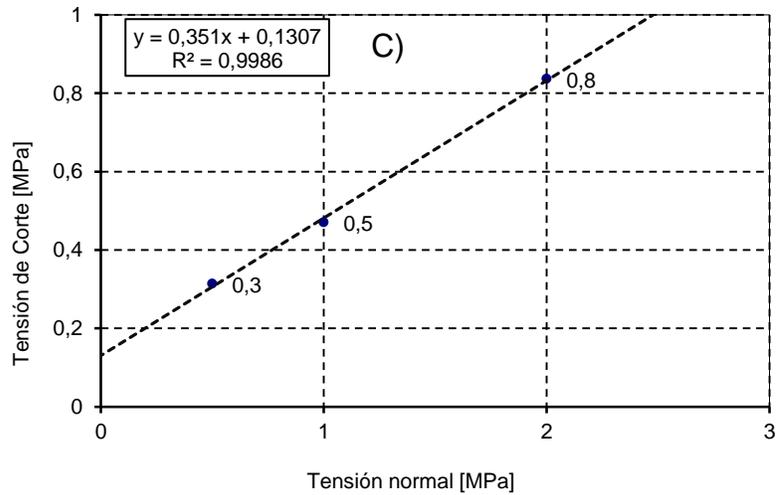
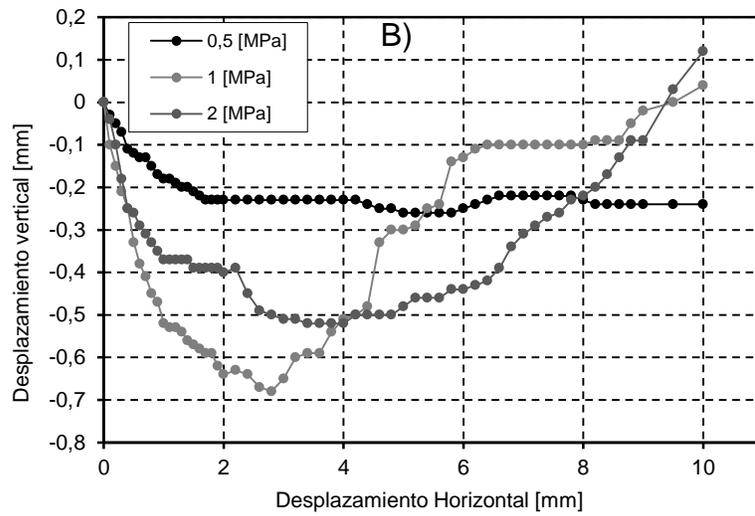
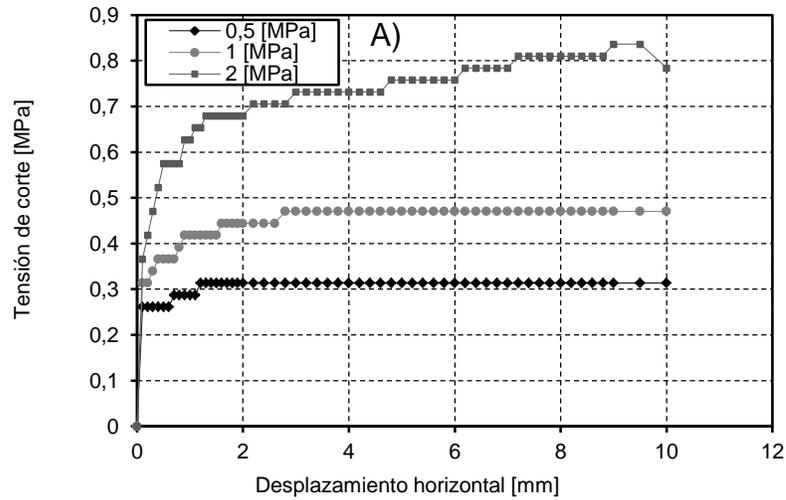


Ilustración 3.15 Grafico tensión de corte v/s deformación horizontal. B) deformación horizontal v/s deformación vertical. C) tensión de corte v/s tensión normal. Muestra suelo 5% humedad.

Ensayo N°3: En este caso se utilizó una compactación del suelo a una densidad de $2,19 \text{ gr/cm}^3$ a una humedad de un 8%, ya que esta es la humedad la muestra se sobresaturó. Se ensayó a 0,5, 1 y 2 [MPa]. El área menor de contacto, en este caso el área de la roca es $21,81 \text{ cm}^2$. En la Ilustración 3.16 se observa un antes y después de la ejecución del ensayo donde se observa rotura de partículas.



Ilustración 3.16 Antes y después roca-suelo humedad al 8%

En la ilustración 3.17 se muestra en la parte A un gráfico, tensión de corte v/s deformación horizontal, que muestra que la resistencia máxima alcanza es 0,7 MPa. La parte B muestra un gráfico deformación vertical v/s deformación horizontal que indica que la roca baja a medida que avanza hasta que comienza a subir. En la parte C, un gráfico de tensión de corte máxima v/s tensión normal con el cual se calcula el ángulo de fricción presentado en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Ángulo de fricción roca-suelo 8%.

Ensayo	Stress normal [MPa]	Tensión corte máxima [MPa]	Ángulo de Fricción
Densidad $2,19 \text{ gr/cm}^2$ Humedad: 2,34%	0,5	0,3	$\Phi=15^\circ$
	1	0,5	
	2	0,7	

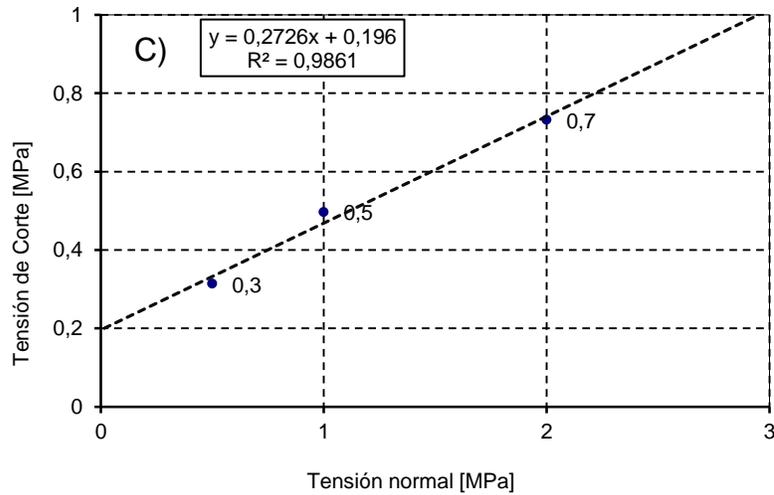
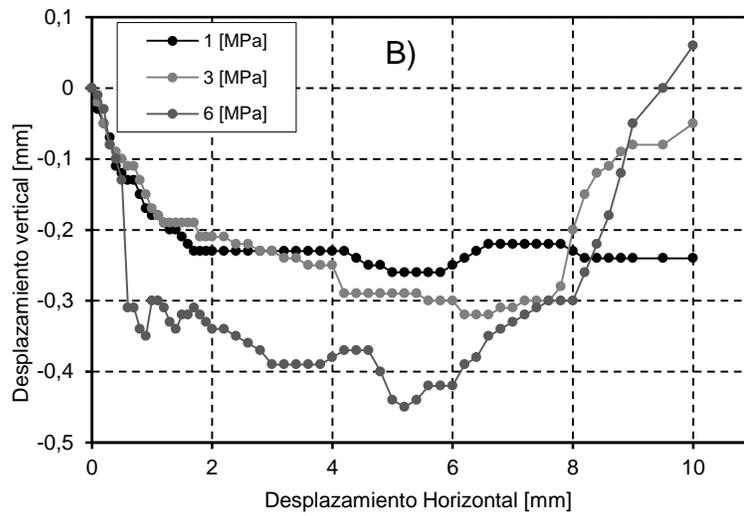
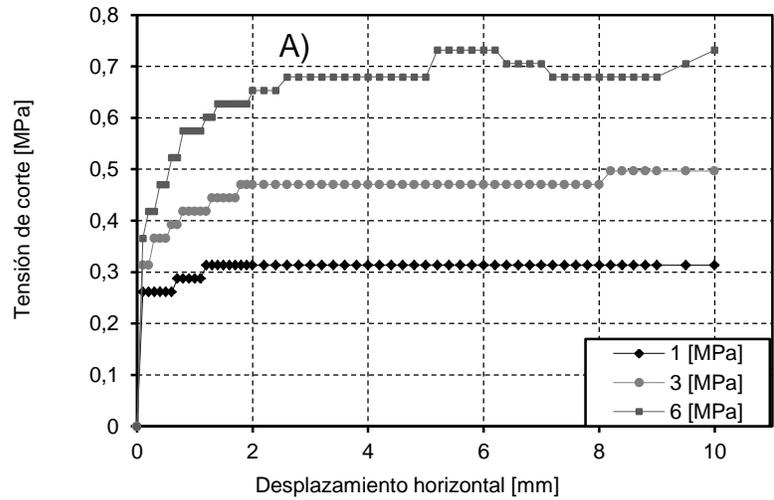


Ilustración 3.17 Grafico tensión de corte v/s deformación horizontal. B) deformación horizontal v/s deformación vertical. C) tensión de corte v/s tensión normal. Muestra suelo 8% humedad.

En la Tabla 3.14, se presenta un resumen de todos los ángulos obtenidos en el ensayo de corte directo roca-suelo. Notar que el suelo alcanza su máxima resistencia y ángulo en el ensayo de 5% de humedad, es decir, la humedad óptima de compactación. A la humedad del 8% alcanza la mínima resistencia y ángulo de fricción, ya que la muestra se encuentra sobresaturada.

Tabla 3.14 Resumen ángulos de fricción para todos los ensayo roca-suelo.

Ensayo	Stress normal [MPa]	Tensión corte máxima [MPa]	Ángulo de Fricción
Densidad 2,19 gr/cm ² Humedad: 2,34%	0,5	0,3	Φ=18°
	1	0,5	
	2	0,8	
Densidad 2,19 gr/cm ² Humedad: 2,34%	0,5	0,3	Φ=19°
	1	0,5	
	2	0,8	
Densidad 2,19 gr/cm ² Humedad: 2,34%	0,5	0,3	Φ=15°
	1	0,5	
	2	0,7	

3.1.6 Carga puntual

Para representar el tercer proceso que ocurre en el triaxial gigante se procedió a realizar ensayos de carga puntual. Se hizo ensayos de carga puntual a cinco grupos de rocas de diez cada uno. Estos se realizaron de manera perpendicular a sus bandas (Ilustración 3.18).



Ilustración 3.18. Ensayo carga puntual perpendicular a las bandas, muestra A12.

En la Tabla 3.15 se muestra una estimación resistencia a la compresión simple, este se obtuvo al multiplicar el índice de carga puntual por un factor de 24 (Norma ASTM D-5731-16). $Is_{(50)} * 24$.

Tabla 3.15 Resultado de carga puntual y estimación de la resistencia a la compresión simple.

Muestras	IS ₍₅₀₎	Resistencia a la compresión simple [MPa]
Grupo 1	3,36	77
Grupo 2	4,78	109
Grupo 3	4,06	93
Grupo 4	5,09	117
Grupo 5	4,72	108
Promedio	4,40	101

Como se puede observar en la Tabla 3.15, el índice de carga puntual corregido varía desde 3,36 a 5,09, promediando 4,4. De acuerdo con la clasificación de Gamble (Tabla 1.4), estas se clasifican en resistencia muy alta. En la Tabla 3.15 se puede ver la resistencia a la compresión simple resultante para cada grupo varía en un rango de 77 a 117 MPa, promediando 101 MPa. Casi todas las rocas fallaron de manera aleatoria por la matriz (Ilustración 3.19), salvo algunas que se fracturaron en el contacto entre bandas, debido a que este se encontraba alterado.



Ilustración 3.19. Foto carga puntual antes (A) y después (B) donde se observa como las rocas fallan por matriz.

En Tabla 3.16, se presenta un resumen de las características del material completo.

Características del material		
Propiedades	Método de determinación	Resultados
Clasificación de suelo	Tabla 1.1, Clasificación de suelos USCS	Se clasifica como gravas bien graduadas (GW), es decir, mezcla de gravas con arenas y pocos finos. Clastos 84%, tamaño (2-256mm) Matriz 16%. tamaño (<2mm) Peso específico: 3,83gr/cm ³ Limite liquido: 19 Limite plástico: 10 Índice de plasticidad: 9
Tamaño de grano	Descripción macroscópica	Desde tamaño arcilla(<0,002mm) a tamaño grava (4-256mm)
Resistencia al corte	Triaxial gigante	$\Phi=30^\circ$
Resistencia al corte roca-roca	Corte directo roca-roca	$\Phi=11^\circ, 12^\circ$ y 15°
Resistencia al corte roca-suelo	Corte directo roca-suelo	$\Phi=15^\circ, 18^\circ$ y 19°

Tabla 3.16 Resumen características material completo.

3.2 Caracterización mineralógica y geotécnica de partículas del material granular grueso

Como el material está compuesto por un 84% de partículas tamaño 2-256mm y un 16% de partículas tamaño (<2mm), es decir, en su mayoría este compuesto por material tamaño grava, es decir, es un material granular grueso. Con estos antecedentes en cuenta, se procedió a caracterizar este material de tamaño grueso. Para ello se realizó descripciones geológicas a las partículas, descripción microscópica a cortes transparentes y pulidos, estimación del grado de erosión a través de una Tabla 1.4, se estimó la resistencia a la compresión simple a través de una Tabla 1.5 y martillo de schmidt, se determinó el índice de carga puntual en bandas de minerales, las propiedades físicas (densidad, absorción y porosidad) y con el ensayo slake se determina la durabilidad y desgaste de las partículas.

3.2.1 Descripción macroscópica

A continuación, se presentan los resultados de la descripción macroscópica para cinco partículas representativas del material granular grueso.

D-01 (ilustración 3.20): Roca sedimentaria tipo BIF de color rojo levemente meteorizada. Su tamaño es 11x9x4,5 cm y posee forma prismática-tabular, tiene baja esfericidad y redondeamiento subangular, por ende, baja madurez textural. Presenta magnetismo en algunas zonas. Su estructura es bandeada (Ilustración 3.20). Las bandas son intercalaciones de hematita, cuarzo y magnetita. La primera banda es de magnetita, mide 8mm. La segunda banda es una serie de intercalaciones de cuarzo y hematita roja de espesor 1,8cm. Le sigue una banda de hematita gris de 1,5cm. Posee otra banda de magnetita con hematita de espesor 5mm y finalmente 1cm de intercalaciones de cuarzo-hematita. Se estimó porcentajes de los minerales identificados: cuarzo (25%), magnetita (25%) y hematita (55 %)



Ilustración 3.20 Roca D-01 y su corte transversal.

D-02 (Ilustración 3.21): Roca sedimentaria tipo BIF de color rojo levemente meteorizada. Su tamaño es 15x9,5x2 cm, tiene forma plana, baja esfericidad y redondeamiento subangular a sub-redondeado, por ende, baja madurez textural. Presenta magnetismo en algunas zonas. Su estructura es bandeada (Ilustración 3.21). Posee una banda de espesor de 1cm que está compuesta por una serie de intercalaciones de cuarzo y hematita gris. Finalmente tiene una banda magnetita de 1 cm de espesor. Se estimó porcentajes de los minerales identificados: cuarzo (20%), hematita (50%) y magnetita (30%).



Ilustración 3.21 Roca D-02 su corte transversal.

D-03 (Ilustración 3.22): Roca sedimentaria tipo BIF de color rojo levemente meteorizada. Su tamaño es 12x8x4 cm, tiene forma planar, baja esfericidad y redondeamiento subangular, por ende, baja madurez textural. Presenta magnetismo en algunas zonas. Su textura es bandeada (Ilustración 3.22). Las bandas son intercalaciones de hematita, cuarzo y magnetita. La primera banda tiene un espesor de 3,5 cm, está compuesta por una serie de intercalaciones de cuarzo y hematita roja. Finalmente tiene una banda magnetita de 5 mm de espesor. Se estimó los porcentajes de los minerales: cuarzo (10%) magnetita (50%) y hematita (40%).



Ilustración 3.22 Roca D-03 y su corte transversal.

D-04 (Ilustración 3.23): Roca sedimentaria tipo BIF de color rojo levemente meteorizada. Su tamaño es 7,5x4,5x2,5cm, tiene forma planar, baja esfericidad y redondeamiento subangular a sub-redondeado, por ende, baja madurez textural. Presenta leve magnetismo en algunas zonas. Su estructura es bandeada (Ilustración 3.23). La primera banda tiene un espesor de mide 2,3cm y está compuesta por una serie de intercalaciones de cuarzo y hematita roja. También se observa una banda de hematita gris de 2mm de espesor. Se estimó un porcentaje de los minerales encontrados: cuarzo (40%), hematita (60%).



Ilustración 3.23 Roca D-04 y corte transversal.

D-05 (Ilustración 3.24): Este tipo de roca representa menos del 5% del material del botadero. Es una roca sedimentaria de color rojo muy meteorizada. Su tamaño es 7x5x5 cm, tiene forma esférica, alta esfericidad y redondeamiento sub-angular a sub-redondeado, por ende, posee madurez textural media. Presenta magnetismo en algunas zonas. Su textura vesicular (Ilustración 3.24). Al fracturar la roca, se observa que está compuesta por hematita con magnetita granular y un poco de cuarzo. Se estimó un porcentaje de minerales encontrados: hematita (70%), magnetita (25) y cuarzo (5 %).

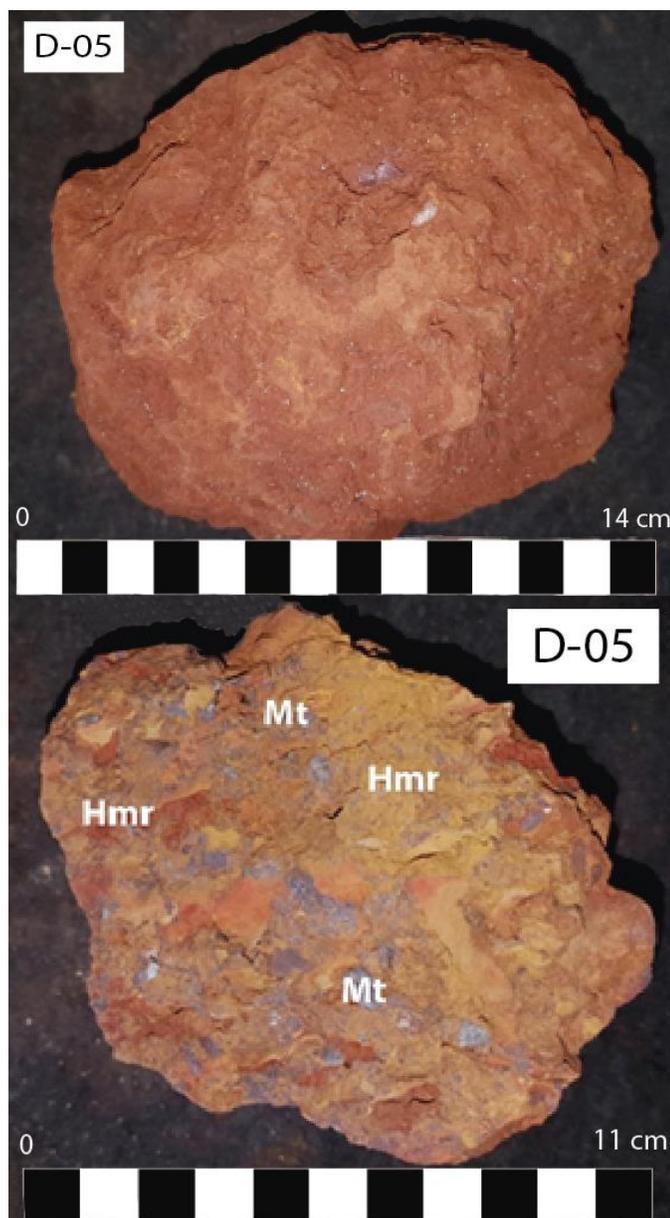


Ilustración 3.24 Roca D-05 y corte transversal.

Notar que a excepción de la roca D-05 (Ilustración 3.24), todas las rocas son material proveniente de depósitos tipo BIF.

3.2.2 Descripción microscópica

A continuación, se presentan los resultados para la descripción de cortes pulidos y transparentes.

Descripción CP-01 (Ilustración 3.25): Roca tipo BIF de textura bandeada, con bandas que van desde los 7 mm a menos de 1mm. La mineralogía presente desde abajo hacia arriba es: una banda de hematita oscura de espesor de 7mm, luego sigue una capa de magnetita de espesor de 2mm que en el contacto se está alterando a hematita (martiritización) y finalmente una intercalación de espesor 11mm de hematita roja con cuarzo y arcillas. Se observan dos vetillas: Primero una vetilla cuarzo que corta todas las bandas, es continua y sinuosa, tiene un espesor de menos de 1mm. La segunda vetilla de hematita oscura, la cual corta solo las intercalaciones de cuarzo con hematita roja, esta vetilla es sinuosa, se expande lateralmente y tiene un espesor máximo de 2mm. Notar que se puede observar plegamiento en las bandas de hematita con cuarzo donde al centro se forma un núcleo que podría ser un porfidoblasto. Se estimó un porcentaje de los minerales identificados: hematita (60%), magnetita (10%), cuarzo (20%) y arcillas (10%).

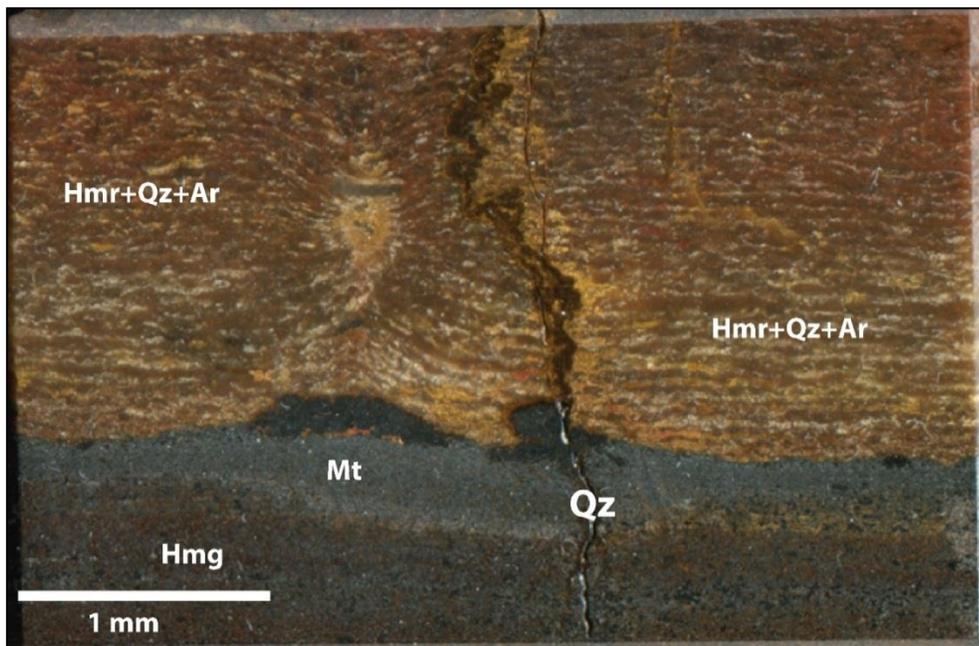


Ilustración 3.25 Foto de corte pulido de la muestra CP-01. Se observan intercalaciones de bandas de magnetita (Mt), hematita gris (Hmr) y roja (Hmr), además una vetilla de hematita y una de cuarzo. También se puede ver plegamiento de las bandas de hematita con cuarzo.

Descripción CP-02 (ilustración 3.26): Roca tipo BIF de estructura bandeada, con bandas que van desde los 10 mm a menos de 1mm. La mineralogía presente desde abajo hacia arriba es: una intercalación de bandas de 20 mm de espesor, compuesta de hematita oscura con cuarzo y magnetita, luego sigue una capa de hematita oscura de espesor de 10mm, finalmente una intercalación de hematita roja con cuarzo y hematita oscura de espesor de 10mm. No se observan vetillas. Se estimó un porcentaje de los minerales identificados: hematita (60%), magnetita (25%), cuarzo (10%) y arcillas (5%).

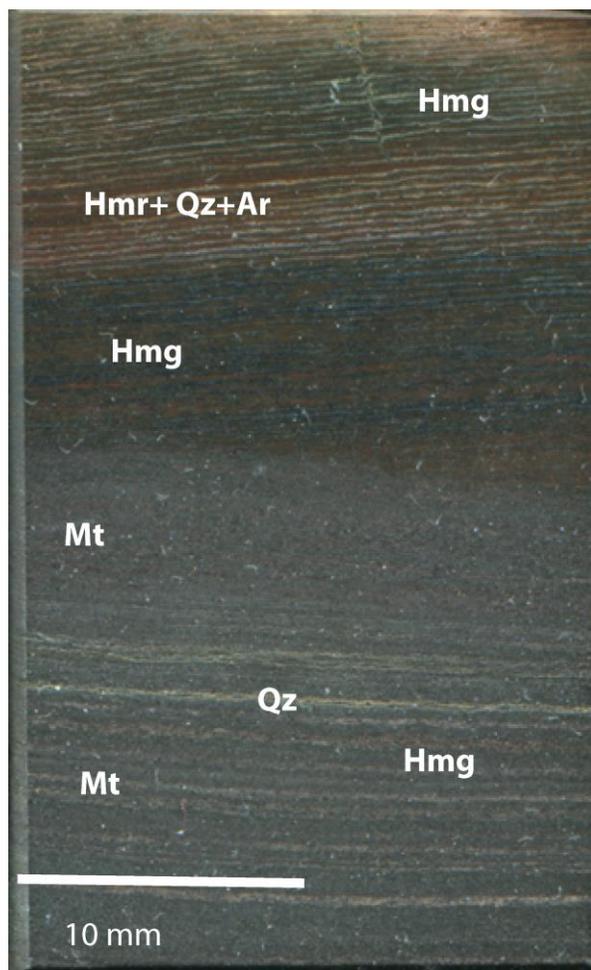


Ilustración 3.26 Foto corte pulido de la muestra CP-02. Se observan bandas de magnetita (Mt), hematita gris (Hmg), cuarzo (Qz) y hematita roja (Hmr),

Descripción CT-01 (Ilustración 3.27): Roca tipo BIF de estructura bandeada que van desde los 1 mm a menos de 1mm. La mineralogía presente desde abajo hacia arriba es: una intercalación de bandas de 20 mm de cuarzo micro-cristalino y arcillas color marrón que se encuentran deformadas, luego sigue una intercalación de 10mm de cuarzo micro-cristalino y arcillas blancas y arcillas deformadas (marrón), luego una banda de hematita gris de espesor de 3mm. También se encontraron inclusiones de rutilo que no se alcanzan a observar. Se observan 11 vetillas: todas las vetillas son de cuarzo, de formas sinuosas y discontinuas, sus espesores varían desde 2mm a menos de 1mm. Se estimó un porcentaje de los minerales identificados: hematita (35), cuarzo (45%) y arcillas (20%).

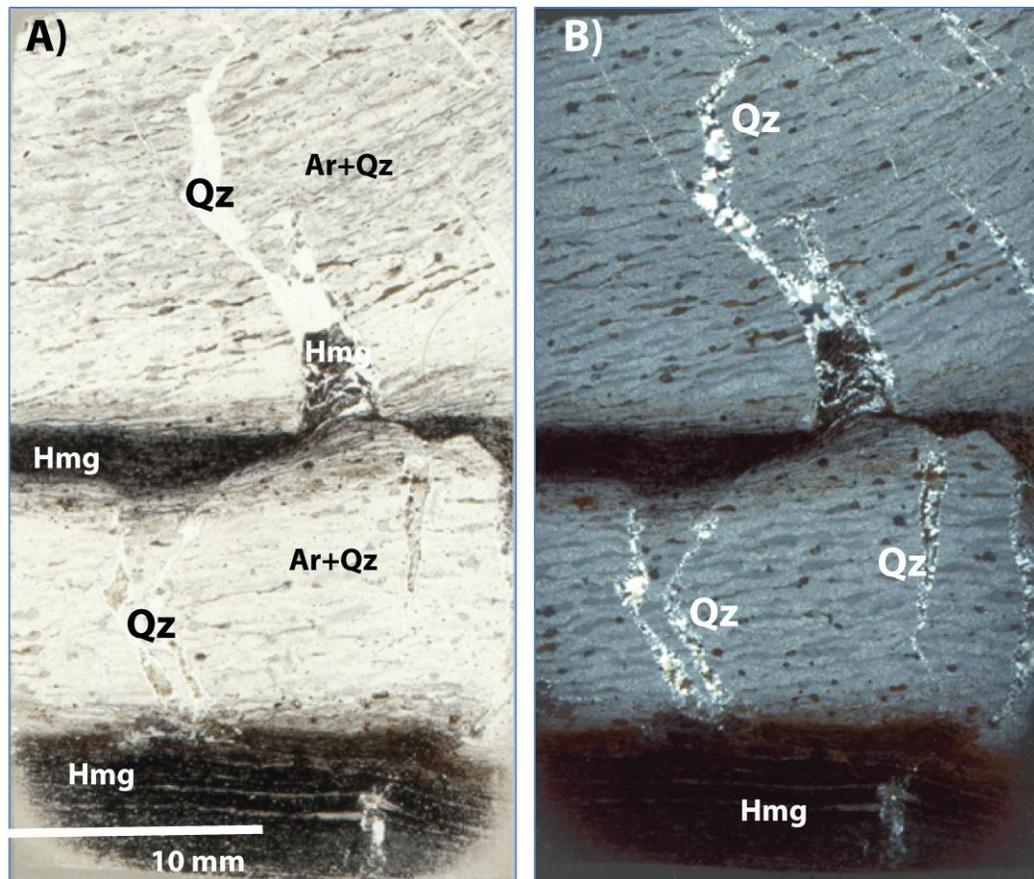


Ilustración 3.27 Corte transparente a nicols paralelos (A) y cruzados (B) de la muestra CT-01. Se observan bandas de hematita gris (Hmg), arcillas color marrón deformadas con arcillas blancas y cuarzo micro-cristalino (Ar+Qz), y vetillas de cuarzo (Qz).

Descripción CT-02 (Ilustración 3.28): Corte transparente hecho a la misma muestra que el corte pulido CP-02 (Ilustración 3.26). Roca tipo BIF de estructura bandeada. Son bandas que tienen espesores de menos de 1mm. La mineralogía presente desde abajo hacia arriba es: una intercalación de bandas de 18 mm de hematita gris con cuarzo y arcillas. Luego viene una intercalación de espesor de 20mm de hematita roja, hematita gris, cuarzo y arcillas. No se observan vetillas. Se estimó un porcentaje de los minerales identificados: hematita (60%), cuarzo (15%) y arcillas (15%).

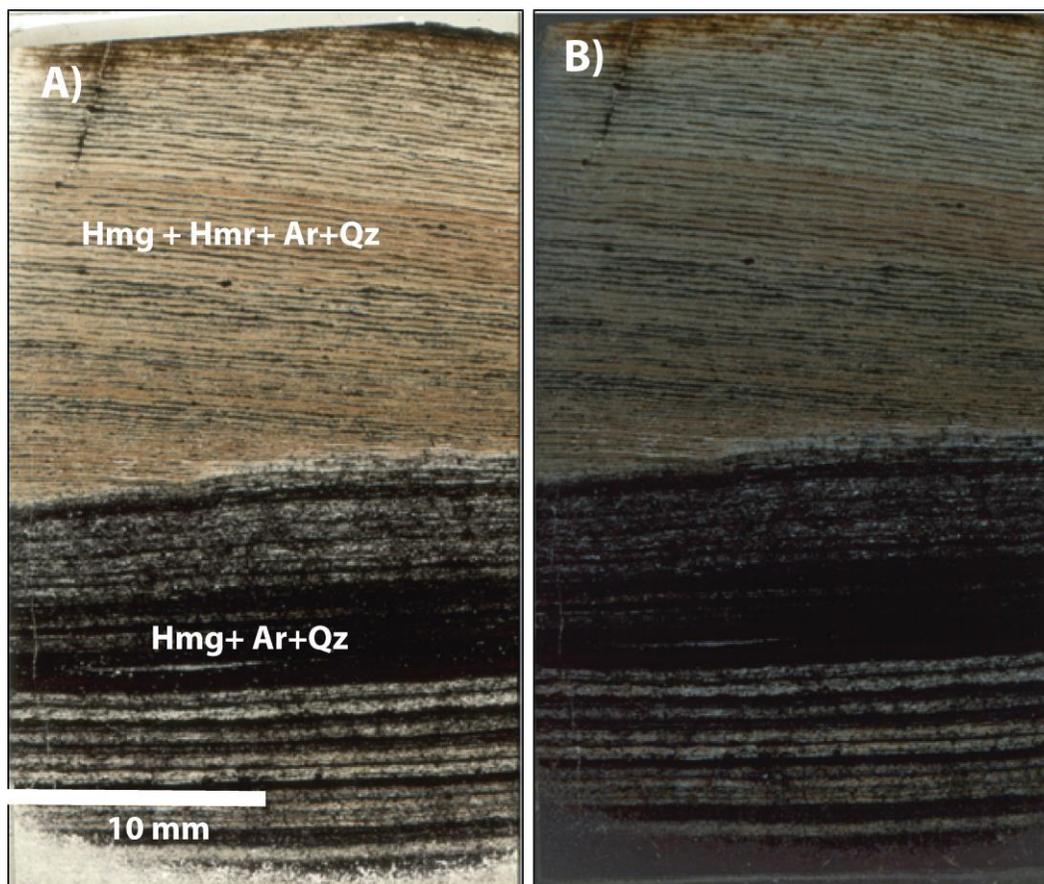


Ilustración 3.28. Corte transparente a nicolas paralelos (A) y cruzados (B) de la muestra CT-2. Se observan bandas de hematita gris (Hmg) con arcillas de color marrón y arcillas blancas (Ar). No hay vetillas.

3.2.3 Propiedades físicas

Luego de calcular la mineralogía que constituye las partículas del material granular grueso, se procedió a calcular

De este ensayo se obtuvo el porcentaje de absorción, porosidad y la densidad para las 6 muestras analizadas. Los resultados se muestran en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17 Resultados densidad, absorción y porosidad.

Muestra	Densidad [g/cm ³]	Absorción[%]	Porosidad [%]
Pf1	3,39	1,30	4,42
Pf2	2,77	1,49	4,14
Pf5	3,83	1,84	5,34
Pf6	3,29	1,53	5,04
Pf11	3,43	1,61	5,54
Pf12	3,77	1,66	6,25
Promedio	3,41	1,57	5,12

Se puede observar en la Tabla 3.17, que la densidad varía desde 2,77 a 3,83 g/cm³, por ende, se calculó un promedio equivalente a una densidad de 3,41 g/cm³, lo cual es una densidad bastante alta.

En el caso de la absorción, el porcentaje de agua absorbida varía entre un 1,3 a 1,84 %, promediando 1,57%.

Finalmente, la porosidad, que varía desde 4,14 a 5,34% la más alta, promediando 5,12%.

3.2.4 Grado de meteorización

En primera instancia se estimó el grado de meteorización de las rocas, para ello se utilizó la Tabla 1.4 para estimar el grado de meteorización, resultando entre grado I y II, es decir, la roca está levemente meteorizada, con arcillas en su exterior.

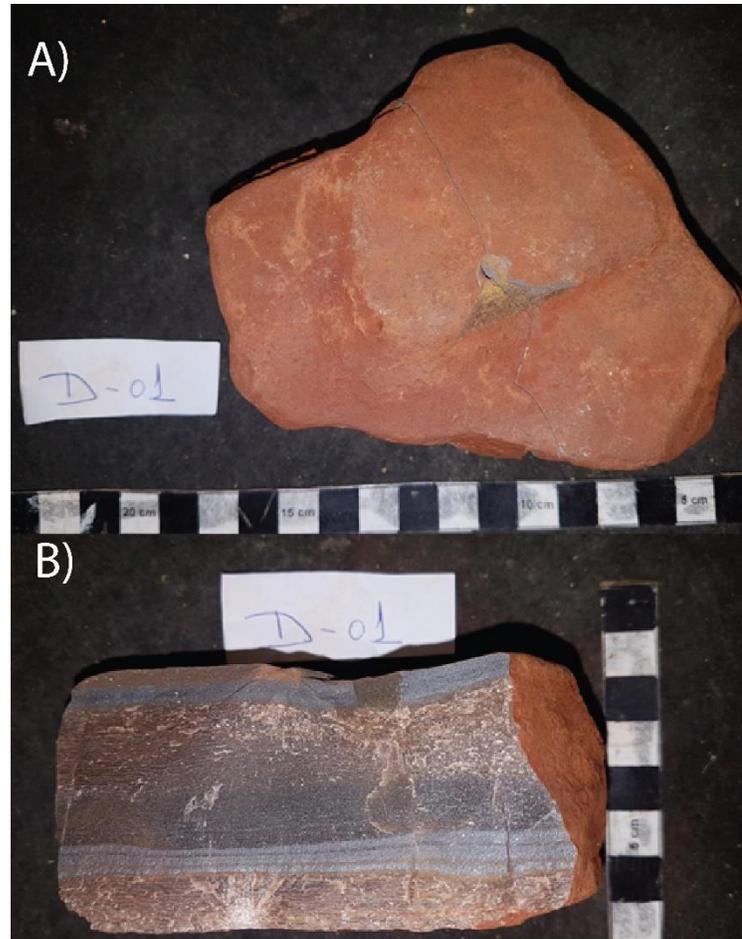


Ilustración 3.29. Foto donde se aprecia el grado de meteorización de la muestra D-01. A) Exterior de la roca. B) Corte transversal.

Como se observa en la Ilustración 3.29, en la parte A (muestra D-01) se aprecia que la partícula está levemente meteorizada en su exterior con una cubierta de arcillas rojas (hematita). En la parte B, tenemos un corte transversal de la roca donde se ve que el interior no está alterado.

3.2.5 Estimación resistencia a la compresión simple

Posteriormente se realizó una estimación de la resistencia a la compresión simple a través de la Tabla 1.5, donde la mayoría de las rocas se clasifican como R4 a R5 (roca fuerte a roca muy fuerte), es decir, su resistencia varía entre 50-100 a 100-250 MPa.

Posteriormente se estimó la resistencia a la compresión simple a través del martillo Schmidt (Ilustración 3.30). Los resultados se presentan en la Tabla 3.18.

$$\text{Densidad } \rho = 3,23 \frac{g}{cm^3} \rightarrow \text{Peso específico } \gamma = 32,3 \frac{KN}{m^3}$$

Tabla 3.18 Estimación resistencia a la compresión simple a través del martillo Schmidt.

Muestra	Resistencia a la compresión simple [MPa]
A-3	90
A-6	120
A-9	85
A-24	90
Promedio	96,25



Ilustración 3.30. Utilizando el martillo de Schmidt, muestra D-07.

Para obtener la resistencia a la compresión simple, aparte del valor del martillo, era necesario el peso específico, calculado a partir de la densidad obtenida en este capítulo. Notar (Tabla 3.18) que la resistencia a la compresión simple varía desde 85 a 120 [Mpa], promediando 96,25 MPa.

3.2.6 Carga puntual

Como se vio anterior mente en el ensayo de carga puntual (Tabla 3.15), el índice de carga puntual de manera perpendicular a las rocas, promedio 4,4 MPa, con ello se estimó la resistencia a la compresión simple en 101 MPa. Con el fin de caracterizar mejor la resistencia, también se realizó ensayos de carga puntual en las distintas bandas de minerales (Ilustración 3.31). Se hizo en bandas de magnetita (Mg), en bandas de hematita gris (Hmg) y bandas de cuarzo con hematita roja (Qz+Hmr), que son las bandas que más aparecieron con más frecuencia en las descripciones macroscópica y microscópica. El resultado se presenta en la Tabla 3.19.



Ilustración 3.31 Carga puntual en banda de magnetita.

Tabla 3.19 Carga puntual a las distintas bandas Mg (magnetita), Qz (cuarzo), Hm (hematita) y Hmr (hematita roja).

Identificación	Índice de Carga Puntual (Is50) [MPa]	Promedio [MPa]	Clasificación Gamble	Resistencia a la compresión simple (Is50*24) [MPa]
Banda Mg	2,8	2,5	Alta	60
Banda Mg	2,2			
Banda Qz+Hm	1,4	2,7	Alta	64
Banda Qz+Hm	2,0			
Banda Hmg	3,4	3,4	Muy alta	81
Banda Hmg	3,5			
Contacto Mg/Hmg	1,4	1,5	Alta	36
Contacto Mg/Hmg	1,7			

En la Ilustración 3.32, se observa en la parte A como falla en la banda de magnetita, al no lograr romper la banda, esta se rompe en el contacto más próximo (parte B). En la parte D) y D) se observa como falla la banda de hematita gris, esta fue la banda que opuso más resistencia a la carga puntual. En E) y F) se aprecia como falla la banda de hematita con cuarzo, banda más débil. Finalmente, en G) y H) se puede ver como falla la roca en un contacto de hematita con magnetita.

De la Tabla 3.19, se observa que la resistencia más alta fue en las bandas de hematita gris, mineral que no está alterado, en cambio la banda con la resistencia más baja fue la de cuarzo con hematita roja. También se puede observar una estimación a la resistencia a la compresión simple.



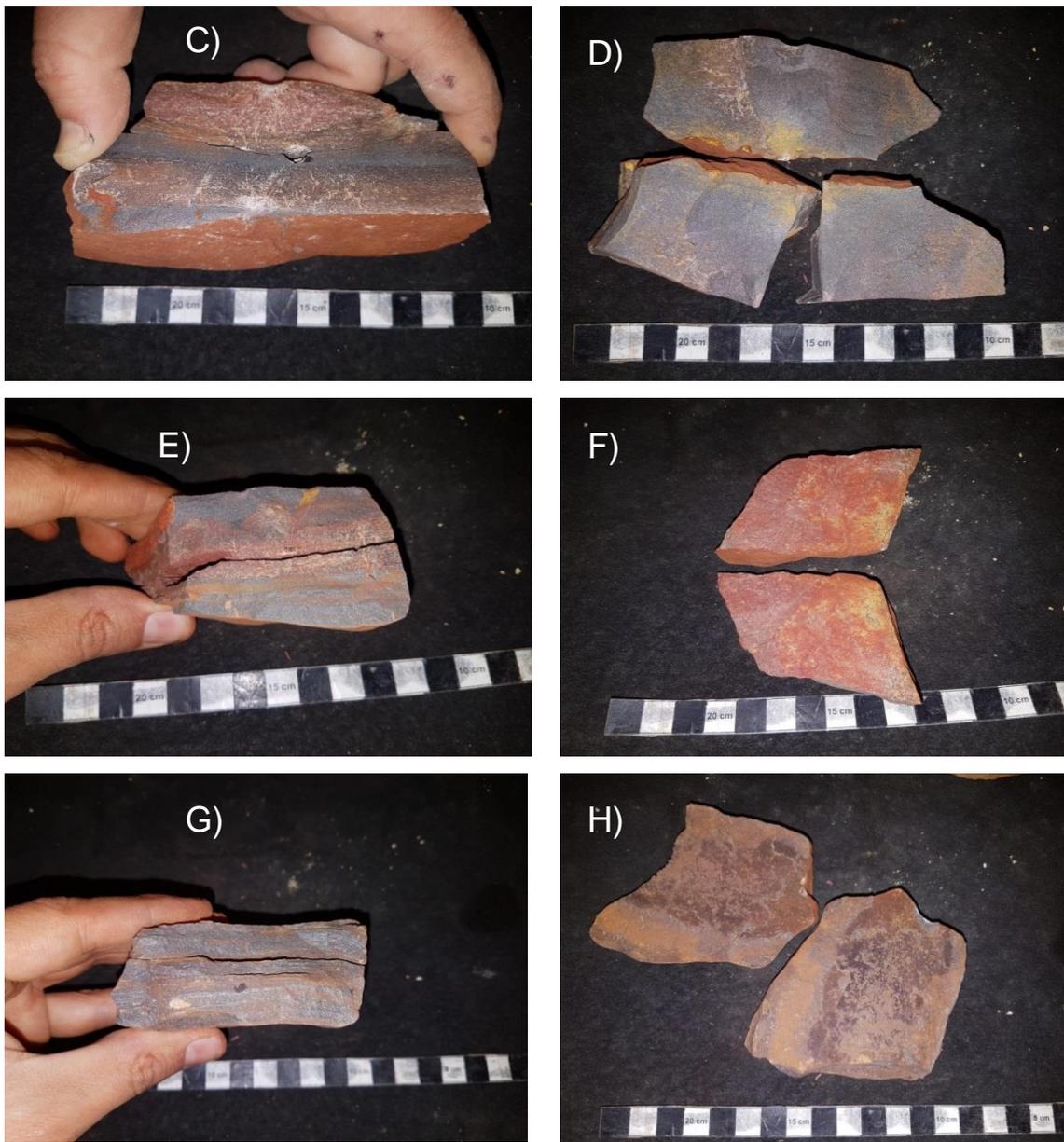


Ilustración 3.32 Mosaico de fotos que muestran cómo se fracturan los minerales en las bandas. A) Carga puntual en magnetita B) Fractura en banda de magnetita C) Carga puntual en hematita D) Fractura en banda de hematita, E) Carga puntual en cuarzo con hematita, F) Fractura en cuarzo con hematita, G) y H) fractura en contacto magnetita y hematita.

3.2.7 Slake

Siguiendo con los ensayos de resistencia, se procedió a realizar dos slake (ensayo de desgaste), ya que como vimos anteriormente en el capítulo 2 (Marco geológico), se pueden presentar lluvias y provocar desgaste de las partículas.

Los resultados de las muestras SL-01 y la muestra SL-02 se presentan en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20 Muestra el porcentaje de desgaste y la durabilidad para cada ensayo.

Ensayo	Ciclo [N°]	Desgaste [%]	Índice de Durabilidad [%]
SL-01	0	0,00	100,00
	1	0,72	99,28
	2	0,19	99,09
SL-02	0	0,00	100,00
	1	0,97	99,03
	2	0,17	98,86

Como se puede notar, las rocas del ensayo SL-01 poseen un índice de durabilidad entre 99,28% y 99,09%. En el ensayo SL-02 el resultado fue similar, variando desde el primer ciclo 99,03 al segundo ciclo 98,86.

Se clasificaron utilizando la clasificación de Gamble (Tabla 1.6), resultando en ambos ensayos un índice de durabilidad extremadamente alta.

Notar en las ilustraciones 3.33 y 3.34, que las rocas prácticamente no tienen cambios, solo sufre un lavado de las arcillas que se encontraban en su superficie. El porcentaje de pérdida del material no supera el 2 %.



Ilustración 3.33. Slake, Antes (A) y después (B), muestra SL-01.



Ilustración 3.34. Slake, Antes (A) y después (B), muestra SL-02.

En la Tabla 3.35, se presenta un resumen de las características del material granular grueso.

Tabla 3.21 Resumen caracterización material granular grueso.

Características de material granular grueso		
Propiedades	Método de determinación	Resultados
Mineralogía	Descripción macroscópica	Hematita 40% Magnetita 30% Cuarzo 25% Arcillas 5%
	Descripción microscópica	
Color	Descripción macroscópica	Rojo al exterior. En caras frescas desde rojo, blanco a grises de distintas tonalidades.
Tamaño de grano		2-250mm
Grado Meteorización	Tabla 1.3. Estimación meteorización ISRM (1981)	Entre grado I y II
Densidad	Método de propiedades físicas	Densidad 3,41 gr/cm ³
Porosidad		Absorción 1,57%
Absorción		Porosidad 5,12%
Durabilidad	Ensayo Slake (desgaste)	Durabilidad extremadamente alta 99%
Resistencia a la compresión simple	Tabla 1.2. Estimación método ISRM (1981)	50-100 a 250 MPa
	Martillo de Schmidt	96 MPa
	Ensayo de carga puntual	101 MPa

3.3 Caracterización mineralógica de material fino

Como se observó en la granulometría, el material fino (material que paso la malla #200) es aproximadamente un 1% del material completo.

Por ende, se realizaron dos ensayos que son complementarios entre sí, la espectrometría por infrarrojo (FTIR) y difracción de rayos x. Esto con el fin de identificar la mineralogía presente en las arcillas.

3.3.1 Difracción de RX y FTIR

Las cuatro muestras que se analizaron provienen de material que paso la malla #200 en las granulometrías, a todas se les realizo difracción de RX y FTIR.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la difracción de rayos x y FTIR para la muestra M1U, ya que los demás resultados son similares (Para ver el resultado de las demás muestras ver en anexos).

Muestra M1U

Los resultados de la difracción de rayos x para la muestra M1U se presentan en la Ilustración 3.36 (Para ver las otras muestras ver en anexo 7.7, 7.8 y 7.9). Como se observa los minerales encontrados fueron: cuarzo, hematita, rutilo, caolín y muscovita.

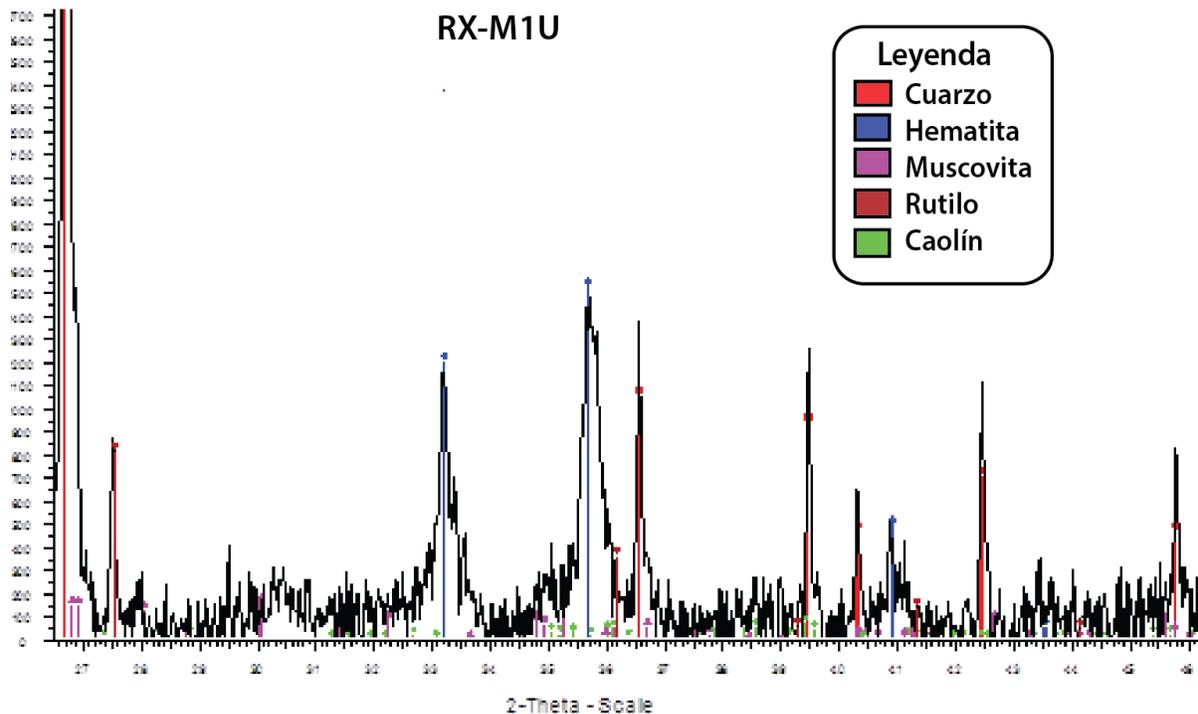


Ilustración 3.35 Difracción de rayos x, muestra M1U.

Los resultados de la espectrometría infrarroja para la muestra M1U se presentan en la Ilustración 3.37 y su respectiva cuantificación en la Ilustración 3.38. Como se observa los minerales identificados son: cuarzo (20%), hematita (18%), goethita (5%), micas blancas (18%). Hubo un 39% de mineral que no se identificó, esto debido a lo acotada que es la biblioteca de minerales presente en el software, pero se puede inferir que ese 39% es magnetita, ya que hay fuerte presencia de magnetismo en la muestra, también a que este mineral se encuentra ampliamente en las descripciones tanto macroscópicas como microscópicas. En M3U y M4U, se registró un porcentaje de 3% de caolín (ver en anexos 7.12 y 7.14). Para ver el resultado del FTIR de las otras muestras ver anexos 7.10, 7.11, 7.12, 7.13, 7.14 y 7.15.

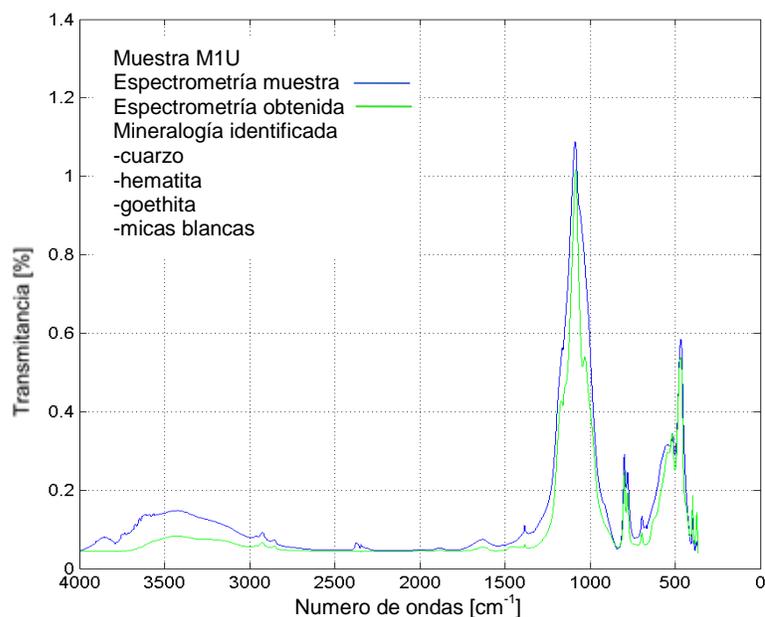


Ilustración 3.36. Espectrometría infrarroja de la muestra M1U. En azul la espectrometría de la muestra, en verde la espectrometría obtenida.

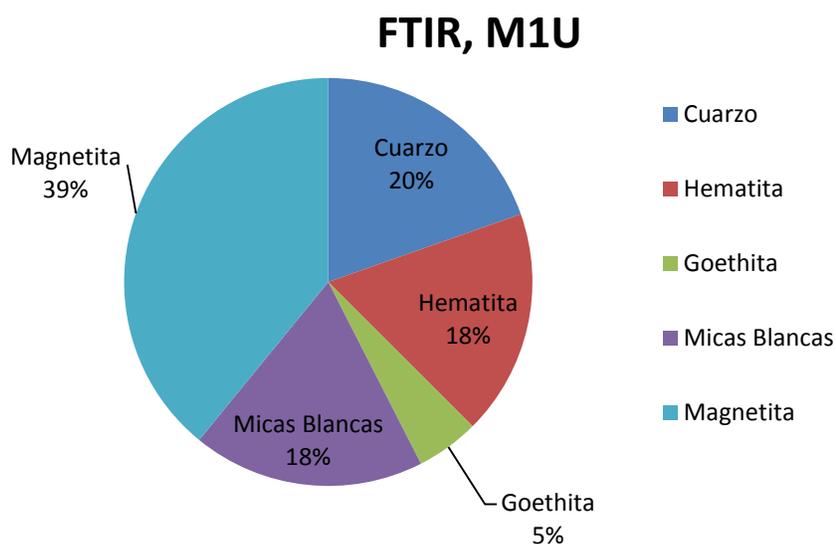


Ilustración 3.37, Cuantificación de porcentajes de minerales en FTIR, M1U.

Notar que los minerales encontrados en la difracción de rayos x (Ilustración 3.36) no presentan una cuantificación, ya que por problemas técnicos en el laboratorio no fue posible realizar dicho procedimiento, en cambio para la espectrometría por infrarrojo (FTIR), si se pudo cuantificar gracias al software (Quanti3), el cual proceso el resultado y entrego una matriz resultante con los porcentajes de cada mineral los que fueron normalizados y representados en los gráficos circulares.

En la Tabla 3.22 se presenta un resumen de la mineralogía encontrada para cada muestra de arcillas. Para difracción de RX fue la misma mineralogía para todas las muestras y no presenta cuantificación.

Tabla 3.22 Resumen de mineralogía encontrada en material fino en RX y FTIR.

	Hematita (%)	Cuarzo (%)	Magnetita (%)	Muscovita (%)	Goethita (%)	Caolín (%)	Rutilo (%)
M1U FTIR	18	20	39	18	5		
M2U FTIR	19	28	34	12	7		
M3U FTIR	19	22	36	8	12	3	
M4U FTIR	19	21	47	10		3	
Difracción RX	x	x		x		x	x

Finalmente, en la Tabla 3.23, se presenta un resumen de todos los resultados visto en este capítulo

Tabla 3.23, Resumen de las características de material coluvial del sector de Pilbara, Australia..

Características del material		
Propiedades	Método de determinación	Resultados
Clasificación de suelo	Tabla 1.1, Clasificación de suelos USCS	Se clasifica como gravas bien graduadas (GW), es decir, mezcla de gravas con arenas y pocos finos. Clastos 84% tamaño (2-256mm) Matriz 16% tamaño (<2mm) Peso específico: 3,83gr/cm ³ Limite líquido: 19 Limite plástico: 10 Índice de plasticidad: 9
Tamaño de grano	Descripción macroscópica	Desde tamaño arcilla (<0,002mm) a tamaño grava (4-250mm)
Resistencia al corte	Triaxial gigante	$\Phi=30^\circ$
Resistencia al corte roca-roca	Corte directo roca-roca	$\Phi=11^\circ, 12^\circ$ y 15°
Resistencia al corte roca-suelo	Corte directo roca-suelo	$\Phi=15^\circ, 18^\circ$ y 19°
Características del material granular grueso		
Propiedades	Método de determinación	Resultados
Mineralogía	Descripción macroscópica Descripción microscópica	Hematita 40% Magnetita 30% Cuarzo 25% Arcillas 5%
Color	Descripción macroscópica	Rojo al exterior. En caras frescas desde rojo, blanco a grises de distintas tonalidades.
Tamaño de grano		2-250mm
Grado Meteorización	Tabla 1.3. Estimación meteorización ISRM (1981)	Entre grado I y II
Densidad	Método de propiedades físicas	Densidad 3,41 gr/cm ³
Porosidad		Absorción 1,57%
Absorción		Porosidad 5,12%
Durabilidad	Ensayo Slake (desgaste)	Durabilidad extremadamente alta 99%
Resistencia a la compresión simple	Tabla 1.2. Estimación método ISRM (1981)	50-100 a 250 MPa
	Martillo de Schmidt	96 MPa
	Ensayo de carga puntual	101 MPa
Características del material fino		
Propiedades	Método de determinación	Resultados
Mineralogía	Difracción de RX y FTIR (espectrometría)	Magnetita 24% Cuarzo 23% Hematita 19% Muscovita 12 Goethita 8% Caolín 3% Rutilo <1%

4 Discusiones

Lo más destacable de la granulometría del material, es la variedad de tamaño de sus partículas, es decir una buena distribución. Los tamaños varían desde tamaño arcilla (<0,002mm) hasta grava (4-256mm). Por otra parte, casi todas las partículas poseen una forma planar, en menor cantidad algunas con formas prismáticas, esto es debido a su estructura bandeada, donde los contactos entre bandas son los planos de debilidad de la roca, es decir, son planos de exfoliación, los cuales son característicos de rocas sedimentarias bandeadas como las lutitas y BIF. Se puede ver que el material se clasifico como GW de acuerdo con el sistema USCS (Tabla 1.1), es decir, gravas bien graduadas. Este resultado se dio en las cuatro granulometrías. Esto se debe a que en el depósito predominan de todos los tamaños de partículas. Notar que el porcentaje de arenas no es poco, es aproximadamente un 16%. El porcentaje de finos (limos y arcillas) es de 1%.

Hay que destacar el peso específico $3,86 \text{ gr/cm}^3$ es bastante alto, esto se explica por la mineralogía que la compone. Según Coduto (1999), la magnetita tiene un peso específico $5,1 \text{ gr/cm}^3$, la hematita $5,2 \text{ gr/cm}^3$ y el cuarzo un $2,65 \text{ gr/cm}^3$. Al ser estos los minerales que predominan, se calculó un peso específico en base al porcentaje de minerales estimado, resultando aproximadamente 4 gr/cm^3 , resultado muy parecido al peso específico del material $3,86 \text{ gr/cm}^3$.

Con respecto al triaxial gigante, este arrojó un ángulo de $\Phi=30^\circ$. Una resistencia máxima de 3 MPa. Según De la Hoz (2007), el ángulo de fricción de un material granular grueso depende una sumatoria de muchos factores, como la forma, rugosidad y dureza de las partículas, la densidad inicial, como también la resistencia al deslizamiento entre partículas, es decir, el ángulo de fricción de cada proceso que está ocurriendo dentro. Por esta razón se realizó dos ensayos especiales: ensayo de corte directo entre roca y roca, y un corte directo entre suelo y roca. Esto con el fin de comparar con el ángulo que arrojó el triaxial gigante y tratar de entender que está ocurriendo dentro de la probeta al momento del ensayo.

Con respecto a la forma y redondez, se observó que estas en general son de forma plana y sub angulosas. Esto influye directamente en el ángulo de fricción obtenido en el triaxial, ya que según Lee & Farhoomand (1967), los suelos más angulosos tienen más rotura de partículas, ya que concentran mayores tensiones en sus esquinas,

En el caso de la carga puntual la resistencia a la carga puntual fue 4,4 MPa y se estimó una resistencia a la compresión simple a 101,24 MPa, es decir, tiene resistencia muy alta. Esto afecta directamente el ángulo de fricción que resultó en el triaxial gigante, ya que según Lo & Roy (1973) a mayor resistencia de las partículas, hay menor rotura de partículas.

En el ensayo de roca-roca, que de acuerdo con la Tabla 3.11, el ángulo de fricción varía de 11° a 15°. Ángulo bastante bajo, esto se podría explicar por varios factores. La presencia de relleno entre ambas caras, ya que como se ve en la Tabla 3.4, las caras poseían un poco de arcillas, por ende, tal vez, lo que realmente fue medido es el ángulo de fricción del relleno. Otro factor que afecta es la rugosidad de las partículas, ya que si se compara la Tabla 3.4 con la Tabla 3.10, se observa que, a mayor rugosidad, mayor ángulo de fricción.

En el ensayo roca-suelo, se calculó el ángulo de fricción para distintas condiciones de humedad a una misma densidad inicial, ya que en el triaxial gigante estas condiciones van variando. El ángulo obtenido a la humedad natural de un 2,4%, fue 18,4%. En su humedad óptima (5%) fue 19°, en una humedad que la sobresaturación (8%) el ángulo fue 19,3%. Se puede ver que los resultados son consistentes, ya que el menor ángulo fue cuando la muestra se sobresaturó, la cual tiene menos resistencia al corte. Y el mayor ángulo, fue en su humedad óptima. En los tres casos se observó rotura de partículas.

Como se puede ver en el capítulo 3, todos los ensayos mineralógicos arrojaron diferentes mineralogías. Partiendo por la descripción macroscópica, donde solo se encontró cuarzo, hematita, magnetita y algo de arcillas. Esta descripción fue compleja debido a lo diminuta que son algunas de las bandas. Estas micro-bandas miden desde pocos centímetros a menos de un milímetro. También hay que destacar que la variedad de rocas es bastante grande, donde hay rocas donde predominan la hematita y cuarzo, a rocas que poseen una buena cantidad de magnetita. Esta variedad de rocas y bandas puede ser explicada, ya que, al ser material del coluvial, puede contener mezclas de rocas derivadas de distintos niveles estratigráficos.

Algo interesante de destacar es la presencia de unas rocas que difieren completamente en la forma y estructura de las demás. Como por ejemplo D-05 (Ilustración 3.24), roca que no presenta la típica distribución en bandas que las demás rocas poseen, ni presenta la forma planar característica de las partículas de este material. Es una roca esférica que parece ser una masa de hematita y magnetita. Este material se encuentra en una proporción bastante baja, menos del 5 %. Por su hábito masivo y no poseer estructura bandeada como las demás, podría tratarse de algún tipo de roca muy meteorizada, o roca sedimentaria formada posteriormente a partir de minerales de hierro.

En el caso de las descripciones microscópicas, la mineralogía encontrada varía en cada corte transparente y pulido. Para el caso del corte CP-01 (Ilustración 3.25) tenemos una variedad de minerales, donde predomina la hematita con cuarzo, también hay magnetita alterándose a martita y algo de magnetita, pero lo interesante de esta roca es la presencia de deformación, plegamiento de las micro-bandas e incluso una estructura que parece ser un porfidoblasto. También se observan vetillas de cuarzo y de hematita, en el caso de la segunda, esta parece tener un halo de alteración.

Para el segundo corte pulido, es decir, CP-02 (Ilustración 3.26) la mineralogía no difiere tanto con el primero, aumenta la cantidad de magnetita, La diferencia notable es que acá no hay presencia de deformación, ni estructuras. Este corte se relaciona con el corte transparente CT-02 (Ilustración 3.28), ya que fueron realizados a la misma muestra. En este corte se nota el predominio de la hematita.

En CT-01 (Ilustración 3.27) al ser un corte transparente y poder analizar los silicatos, se puede ver la presencia de arcillas. También se puede ver que existe deformación, ya que hay minerales (arcillas) que parece estar estirados en una dirección preferencial paralelo a las bandas. También hay una serie de vetillas de cuarzo y una de hematita, al igual que en el corte CP-01.

Ya con la mineralogía encontrada, y las descripciones macroscópicas y microscópicas, además de la ubicación del depósito, se puede confirmar que este material coluvial proviene de la erosión de un depósito tipo BIF. No hay rastro de material de tipo CID, ya que no hay detritos de hematita y goethita formando oolitos y/o peloides.

La estimación del grado de meteorización resultó entre grado I y II.

En las propiedades físicas se puede ver que la densidad de las rocas es bastante alta, promediando $3,4 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$. Esto puede ser explicado por varios factores, primero con la mineralogía encontrada, ya que los minerales férricos como la hematita y magnetita son bastante densos, a esto sumarle la edad que tienen (2500Ma), donde las rocas están bien litificadas, también a la presencia de deformación analizada en los cortes transparentes, que implica que hay un grado de metamorfismo por enterramiento. Como se observa en la Tabla 3.18. La porosidad fue un $5,12\%$, que se explica por la presencia de estructuras como vetillas y fracturas, también por las discontinuidades generadas entre los contactos de bandas.

Con respecto a la estimación de la resistencia a la compresión simple calculada en el capítulo 3, la resistencia a la compresión simple se estimó entre R4 a R5, es decir, varía de 50-100 hasta 250 MPa, lo cual, no es un rango muy acotado, esto sucede, por la amplia variedad de rocas que existen en el material y sus distintos grados de meteorización, también debido a que este es un método cualitativo, que depende de muchos factores. Este es un método fácil y excelente para medir resistencia a la compresión simple de forma rápida, por ejemplo, en salidas a terreno.

De los resultados del uso del martillo de Schmidt (Tabla 3.19), se obtuvo que la resistencia promedio sea $96,25 \text{ MPa}$.

Del ensayo de carga puntual, se obtuvo un índice de carga puntual de $4,4 \text{ MPa}$. Hay que aclarar que este ensayo fue realizado de manera perpendicular a sus bandas, es decir, donde se requiere un esfuerzo mayor que el ensayado en las bandas o contacto que resultó en promedio $2,8 \text{ MPa}$. La resistencia más débil se presentó en los contactos

resultado un índice de carga puntual de 1,5 MPa. Notar que la resistencia alta de las partículas se relaciona con la presencia de minerales férricos y cuarzo, ambos bastante resistentes. También se observó que una de los contacto entre bandas, estaban alterados.

En el ensayo de desgaste, de acuerdo con la Tabla 3.21, la durabilidad fue bastante alta. El porcentaje de pérdida de material no supera el 2%, esto nos da un indicio que lo resistente que son las rocas al estar a la expuesta a la intemperie.

La difracción de rayos x en arcillas, muestra una mineralogía muy parecida a la vista en los cortes transparente y pulidos, se identificaron los minerales de cuarzo, hematita, y rutilo, muscovita y caolín. Lo extraño fue no encontrar la presencia de magnetita, mineral que se encuentra en la mayoría de las rocas. Esto puede ser debido al software con el que se procesaron los datos, ya que, si bien identifica de manera automática algunos minerales, hay otros con los que tiene problemas, como la magnetita y sus derivados, que tienen espectrómetros parecidos.

En los resultados del FTIR para arcillas, se identificó cuarzo, hematita, goethita, micas blancas y caolín. Las micas blancas abarcan un conjunto de minerales, entre ellas, la muscovita, por ende, se puede relacionar con el resto de los ensayos. Pero hubo algunos problemas con la identificación de minerales, ya que aproximadamente un 35% resultó como mineralogía no identificada la cuál se infiere a partir de las macroscópica y microscopia, y a la presencia de magnetismo en la muestra, que ese mineral era magnetita. Debido a que la base de datos para el FTIR es bastante acotada, donde no supera los 15 minerales, dificulta la identificación de minerales básicos como minerales de hierro como la magnetita, pirofilita, limonita, etc.

Hay que destacar que las inclusiones de rutilo concuerdan con su presencia en las rocas, ya que es un mineral comúnmente asociado a la hematita debido a su composición (<https://www.mindat.org/min-3486.html>)

Como material para obras civiles es muy buen material, ya que es bastante resistente, la granulometría demostró que son gravas bien graduadas, excelente para usar como drenajes, como muro de gaviones si se corta en malla más pequeñas 3/8. Es buen material para vías ferroviarias por su resistencia y poco desgaste en el slake. Debido a que el material posee grandes tamaños de partículas con alta resistencia, este puede ser utilizado como material para enrocado para contener relaves.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El material está compuesto por una amplia variedad de tamaños, desde arcilla (<0,002 mm) a tamaño grava (60-250 mm) predominando este último. De acuerdo con la clasificación USCS, este material clasifica como gravas bien graduadas, es decir, mezcla de gravas con arena y pocos finos (GW), con un peso específico alto, de 3,83 gr/cm³. El material fino tiene bajo índice de plasticidad, definiendo un comportamiento de limos y arcillas no plásticas.

El ángulo de fricción interna del material es $\Phi=30^\circ$. El ángulo de fricción interna Φ entre roca-roca, varía de 11° a 15° . El ángulo de fricción interna entre roca y suelo varía de 15° (8% de humedad), 18° (2,34% de humedad) y 19° (5% de humedad).

Se concluye que la mineralogía del material granular grueso del depósito coluvial está compuesta en mayor parte por hematita, cuarzo y magnetita. La mineralogía del material fino es cuarzo, hematita, magnetita, goethita, muscovita, caolín y rutilo. Debido a la mineralogía del material, la predominancia de la estructura bandeada y a la ubicación del depósito, se concluye que este material corresponde a depósitos tipo BIF (Formation Iron Banded).

Respecto a las propiedades físicas, se concluye que las partículas gruesas corresponden a rocas bastante densas, con una densidad promedio de 3,41 g/cm³. Esto es debido principalmente a la predominancia de minerales férricos.

La resistencia a la compresión simple de las partículas, perpendicular a las bandas, es cercana a 101 MPa.

Se concluye a partir del slake (ensayo de desgaste) que las rocas son bastante resistentes a la meteorización al estar expuestas a la intemperie (durabilidad muy alta).

La Tabla siguiente resume las características mineralógicas y geotécnicas del material:

Características del material completo	
Propiedades	Resultados
Clasificación de suelo	Se clasifica como gravas bien graduadas (GW), es decir, mezcla de gravas con arenas y pocos finos. Clastos 83% tamaño (2-250mm); Matriz 17% tamaño (<2mm) Peso específico: 3,83gr/cm ³ Limite liquido: 19; Limite plástico: 10; Índice de plasticidad: 9
Tamaño de grano	Desde tamaño arcilla (<0,002mm) a tamaño grava (4-250 mm)
Resistencia al corte (Triaxial gigante)	$\Phi=30^\circ$
Resistencia al corte roca-roca	$\Phi=11^\circ, 12^\circ$ y 15°
Resistencia al corte roca-suelo	$\Phi=15^\circ, 18^\circ$ y 19°
Características del material granular grueso	
Mineralogía	Magnetita 30%; Cuarzo 25%; Hematita 40%; Arcillas 5%;
Color	Rojo al exterior. En caras frescas desde rojo, blanco a grises de distintas tonalidades.
Tamaño de grano	2-250 mm
Grado Meteorización	Entre grado I y II
Densidad	3,41 gr/cm ³
Porosidad	5,12 %
Absorción	1,57 %
Durabilidad	Durabilidad extremadamente alta 99%
Resistencia a la compresión simple	(ISRM, 1981) 50-100 a 250 MPa
	Martillo Schmidt 96 MPa
	Carga Puntual 101 MPa
Características del material fino	
Mineralogía	Magnetita 24%; Cuarzo 23%; Hematita 19%; Muscovita 12; Goethita 8%; Caolín 3%; Rutilo <1%

Tabla 5.1 Resumen de las características del material.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda una visita a terreno para hacer una descripción geomorfológica del depósito.

Se recomienda hacer más ensayos de corte directo roca-roca y roca-suelo, con el fin de, evaluar mejor el material y las variables que afectan estos ángulos de fricción interna.

Se recomienda hacer ensayos de corte directo y triaxiales a la matriz, dado que representa el 16% del material y podría permitir una mejor interpretación de los resultados del ensayo triaxial gigante.

Para ensayos de FTIR y difracción de rayos x, se recomienda trabajar con software más especializados y una mayor base de datos de minerales.

Se recomienda realizar un ensayo de desgaste de los ángeles, para evaluar el uso de este material en otro tipo de obras civiles.

6 Bibliografía

ASTM C 97–02 Standard Test Method for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone

ASTM D 4644-16 Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks

ASTM D 2216-10 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass

ASTM D 421-85 Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants

ASTM D 422–63 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils

ASTM D5731–16 Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications

ASTD D4543 – 08: Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances.

ASTM D 5607-08 - Standard Test Method for Performing Laboratory Direc Shear Strength Test of Rock Specimens Under Constant Normal Force

Barton, N.& Choubey, V. (1977). The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 10(1), 1-54.

Brown, E.T. (1981). *Rock Characterization, Testing & Monitoring: ISRM Suggested Methods*.

Coduto, D., 1999. Geotechnical Engineering: Principles and Practices. Prentice-Hall, New Jersey, pp. 528 – 552.

Goldblatt, C.; Lenton, T.M. & Watson, A.J. (2006). «The Great Oxidation at 2.4 Ga as a bistability in atmospheric oxygen due to UV shielding by ozone». *Geophysical Research Abstracts* 8: 00770.

Dalstra, H. J. (2006). Structural Controls of Bedded Iron Ore in the Hamersley Province, Western Australia - An Example from the Paraburdoo Ranges. *Applied Earth Sciences* (Trans. Inst.Min. Metall 139-145

DE LA HOZ, Karem. Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos, Tesis de Ingeniero Civil y Magíster. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (2007).

Harmsworth, R. A., Kneeshaw, M., Morris, R. C., Robinson, C. J., & Shrivastava, P. K. (1990). BIF-Derived Iron Ores of the Hamersley Province. In F. E. Hughes, *Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea* (pp. 617-642).

Hickman, A. H. (1999). New tectono-stratigraphic interpretation of Pilbara Craton, Western Australia.

Hickman A. H, Smithies R. H., Pike G., T. R. Farrell, and K. A. Beintema (2001). Evolution of the West Pilbara Granite– Greenstone Terrane and Mallina Basin, Western Australia.

Klein C. (2005). Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin

LEE, K. y FARHOOMAND, I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian Geotechnical journal*, 4(1):68-86, 1967.

Morris, R. C. (1980). A textural and Mineralogical Study of the Relationship of Iron Ore to banded Iron Formation in the Hamersley Iron Province of Western Australia. *Economic Geology*, 184-209.

Morris, R. C. (1985). Genesis of Iron Ore in Banded Iron-Formation by Supergene and Supergene-Metamorphic Processes - A Conceptual Model. In K. H. Wolff, *Handbook of Stratabound and Strataform Ore Deposits* (pp. 73-235). Amsterdam: Elsevier.

Morris, R. C. (1993). Genetic Modeling for Banded Iron-Formation of the Hamersley Group, Pilbara Craton, Western Australia. *Precambrian Research*, 243-286.

Morris, R. C. and M. Kneeshaw (2011) Genesis modelling for the Hamersley BIF-hosted iron ores of Western Australia: a critical review.

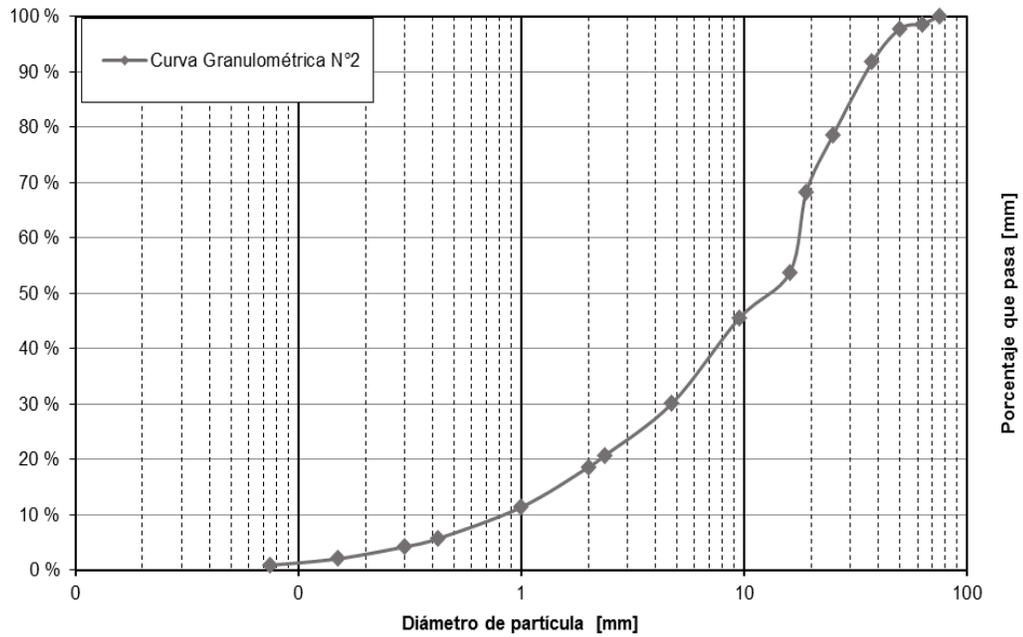
Trendall, A. F. (1983). The Hamersley Basin. In A. F. Trendall, & R. C. Morris, Iron-Formation: Facts and Problems (pp. 69-129). Amsterdam: Elsevier.

7 Anexos

7.1 Granulometrías

Tamiz	Diámetro[mm]	Peso [Kg]	Peso retenido acumulado [Kg]	Retenido [%]	Porcentaje que pasa [%]
3''	75	0	0	0,00	100,00
2 1/2''	63	0,35	0,35	1,38	98,62
2''	50	0,23	0,58	2,28	97,72
1 1/2''	38	1,51	2,09	8,23	91,77
1''	25	3,36	5,45	21,46	78,54
3/4''	19	2,59	8,04	31,65	68,35
1/2''	16	3,7	11,74	46,22	53,78
3/8''	10	2,09	13,83	54,45	45,55
#4	4,75	3,9	17,73	69,80	30,20
#8	2,36	2,41	20,14	79,29	20,71
#10	2,00	0,52	20,66	81,34	18,66
#18	1,00	1,83	22,49	88,54	11,46
#40	0,43	1,43	23,92	94,17	5,83
#50	0,30	0,38	24,3	95,67	4,33
#100	0,15	0,55	24,85	97,83	2,17
#200	0,08	0,29	25,14	98,98	1,02
Platillo		0,26	25,4	100	0

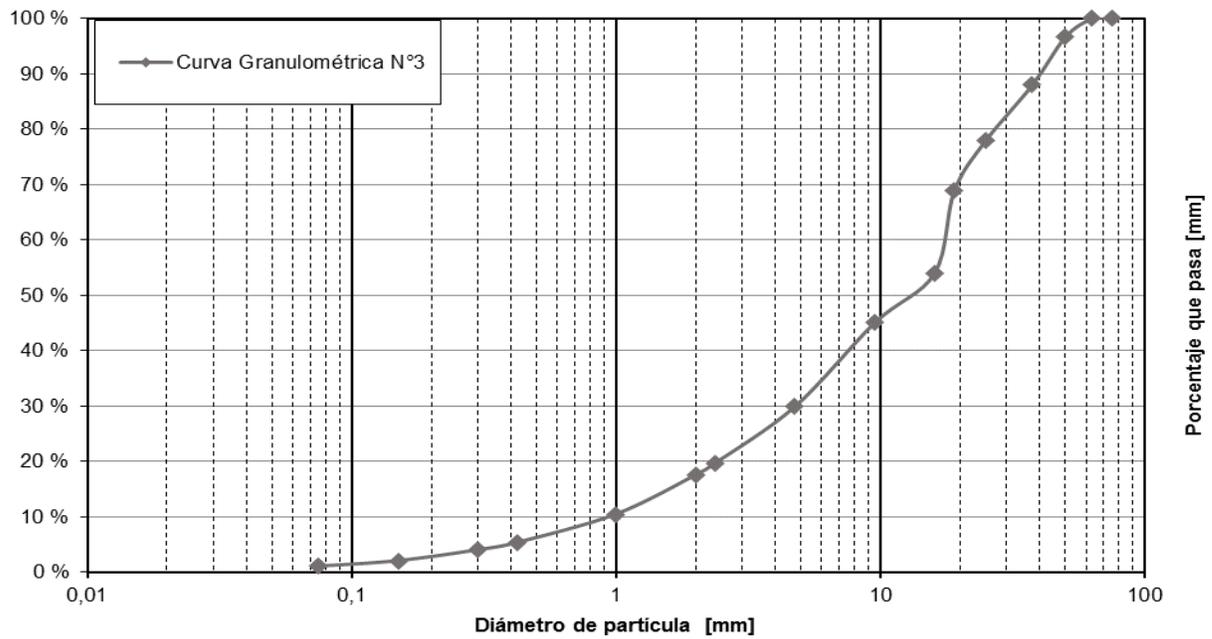
Anexo 7.1 Granulometría, saco de material N°2



Anexo 7.2 Curva granulométrica, saco de material N°2

Tamiz N°	Diámetro[mm]	Pesos [Kg]	Peso retenido acumulado [Kg]	Retenido [%]	Porcentaje que pasa [%]
3''	75	0	0	0	100
2 1/2''	63	0	0	0	100
2''	50	0,8	0,8	3,28	96,72
1 1/2''	37,5	2,11	2,91	11,94	88,06
1''	25	2,45	5,36	21,99	78,01
3/4''	19	2,22	7,58	31,10	68,90
1/2''	16	3,63	11,21	46,00	54,00
3/8''	9,5	2,18	13,39	54,94	45,06
#4	4,75	3,69	17,08	70,09	29,91
#8	2,36	2,51	19,59	80,39	19,61
#10	2	0,5	20,09	82,44	17,56
#18	1	1,73	21,82	89,54	10,46
#40	0,425	1,24	23,06	94,62	5,38
#50	0,3	0,33	23,39	95,98	4,02
#100	0,15	0,48	23,87	97,95	2,05
#200	0,075	0,24	24,11	98,93	1,07
Platillo		0,26	24,37	100	0

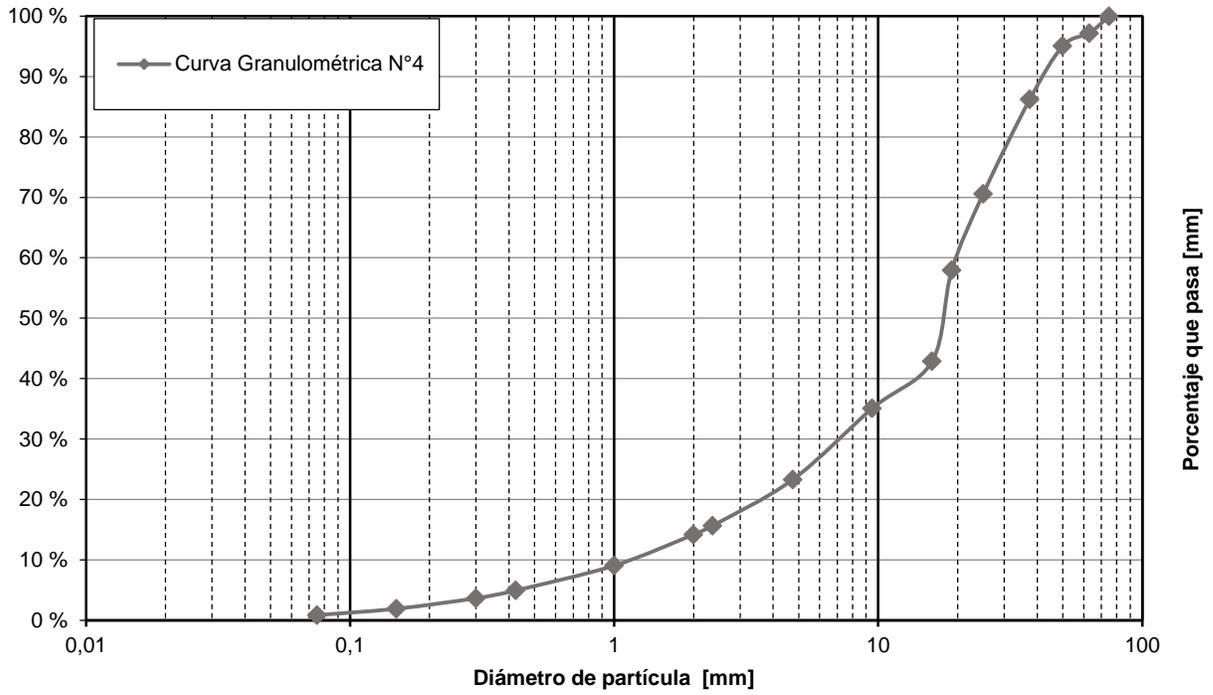
Anexo 7.3 Granulometría, saco de material N°3.



Anexo 7.4 Curva granulométrica saco de material N°3.

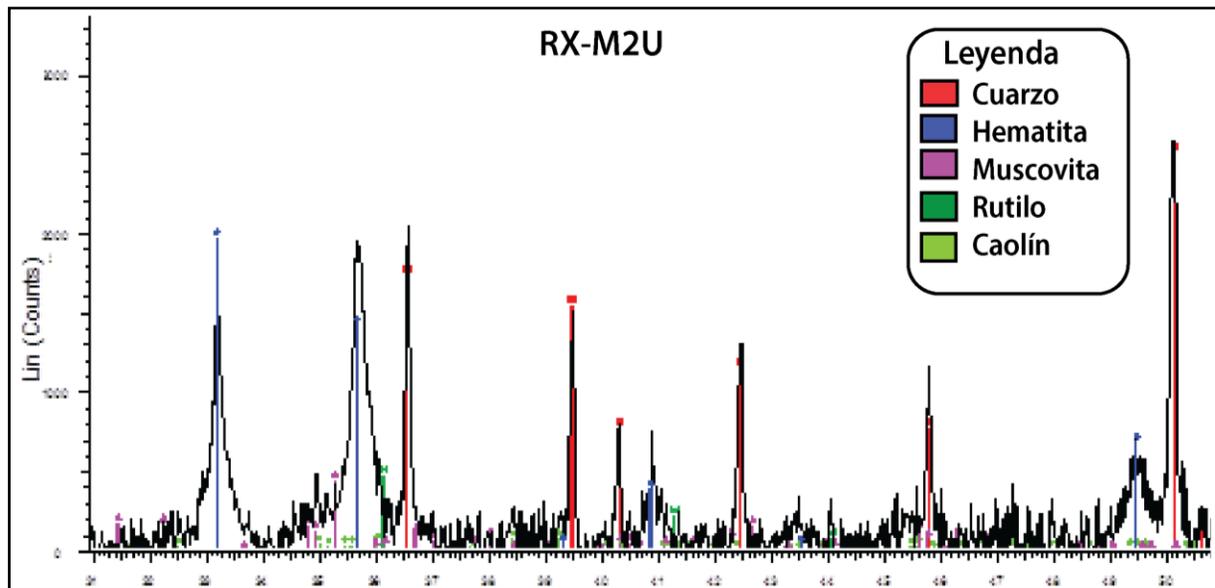
Tamiz N°	Diámetro[mm]	Peso [Kg]	Peso retenido acumulado [Kg]	Retenido [%]	Porcentaje que pasa [%]
3''	75	0	0	0	100
2 1/2''	63	0,69	0,69	2,80	97,20
2''	50	0,53	1,22	4,95	95,05
1 1/2''	37,5	2,18	3,4	13,79	86,21
1''	25	3,85	7,25	29,40	70,60
3/4''	19	3,12	10,37	42,05	57,95
1/2''	16	3,72	14,09	57,14	42,86
3/8''	9,5	1,92	16,01	64,92	35,08
#4	4,75	2,91	18,92	76,72	23,28
#8	2,36	1,88	20,8	84,35	15,65
#10	2	0,36	21,16	85,81	14,19
#18	1	1,27	22,43	90,96	9,04
#40	0,425	1,01	23,44	95,05	4,95
#50	0,3	0,32	23,76	96,35	3,65
#100	0,15	0,43	24,19	98,09	1,91
#200	0,075	0,26	24,45	99,15	0,85
Platillo		0,21	24,66	100	0

Anexo 7.5 Granulometría, saco de material N°4.

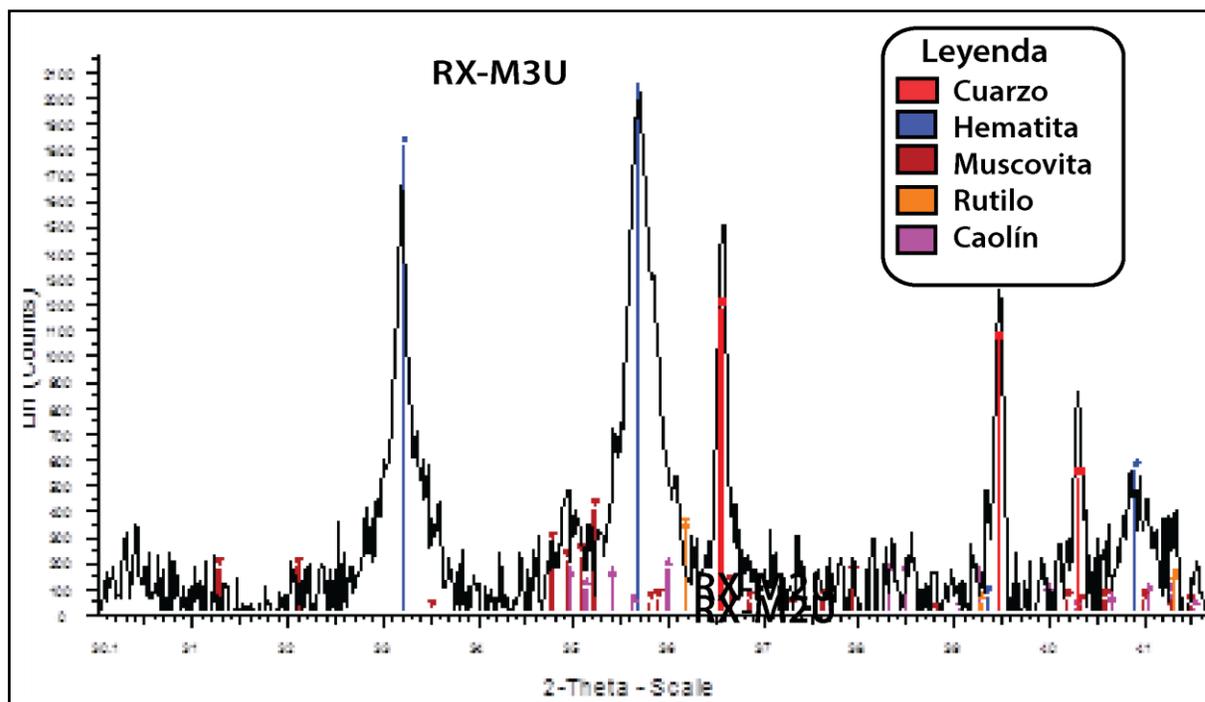


Anexo 7.6 Curva granulométrica saco de material N°4.

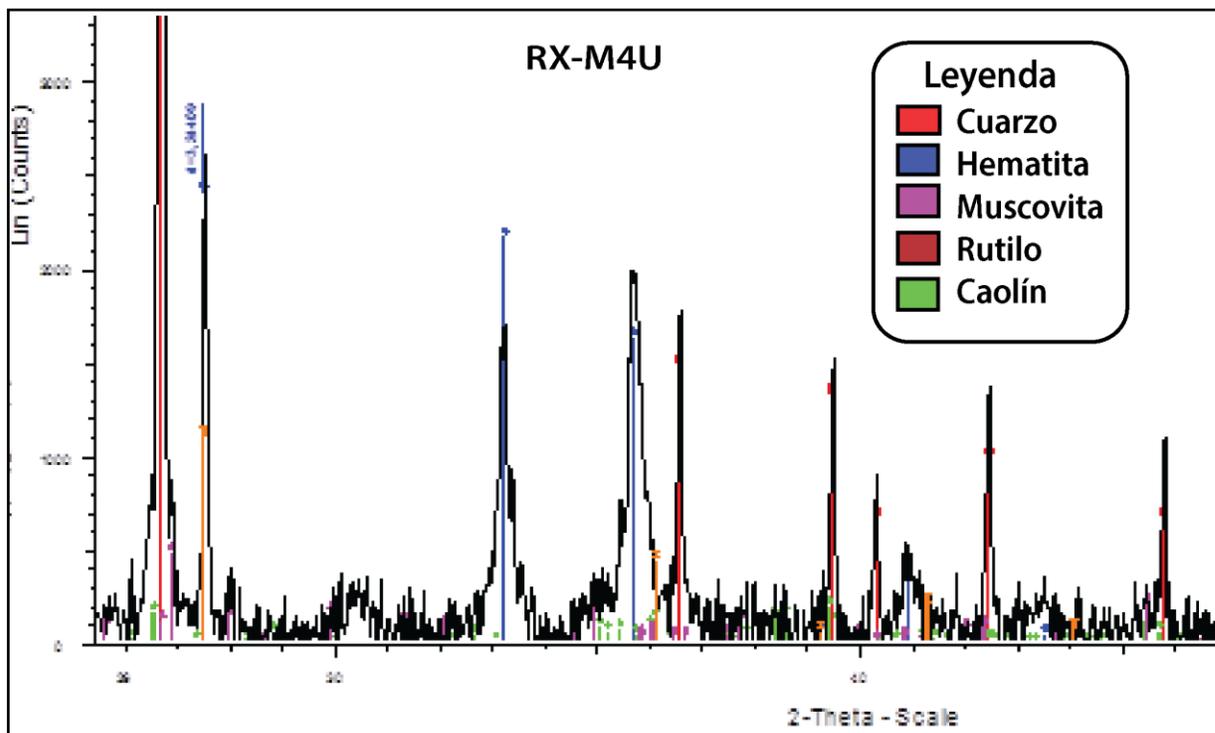
7.2 Difracción de rayos x



Anexo 7.7 Difracción de RX, muestra M2U.

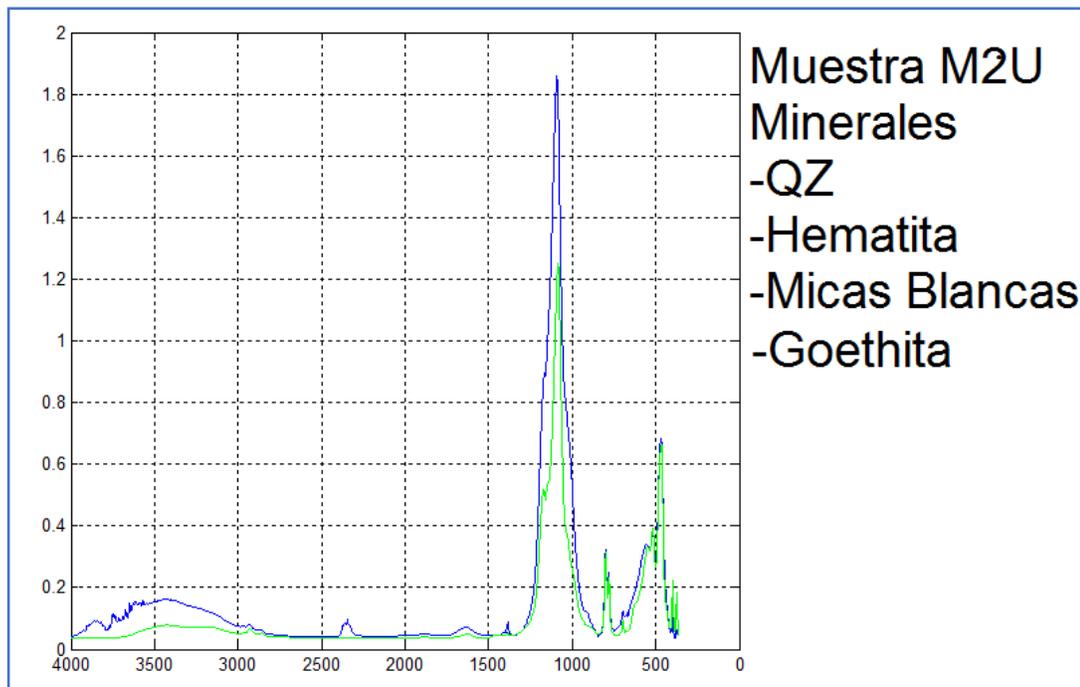


Anexo 7.8 Difracción de RX, muestra M3U.

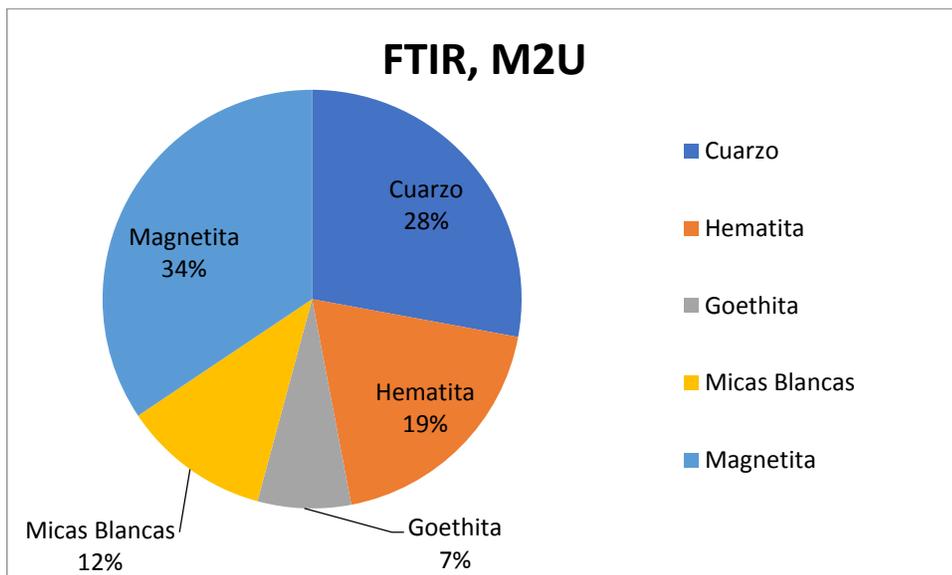


Anexo 7.9 Difracción de RX, muestra M4U.

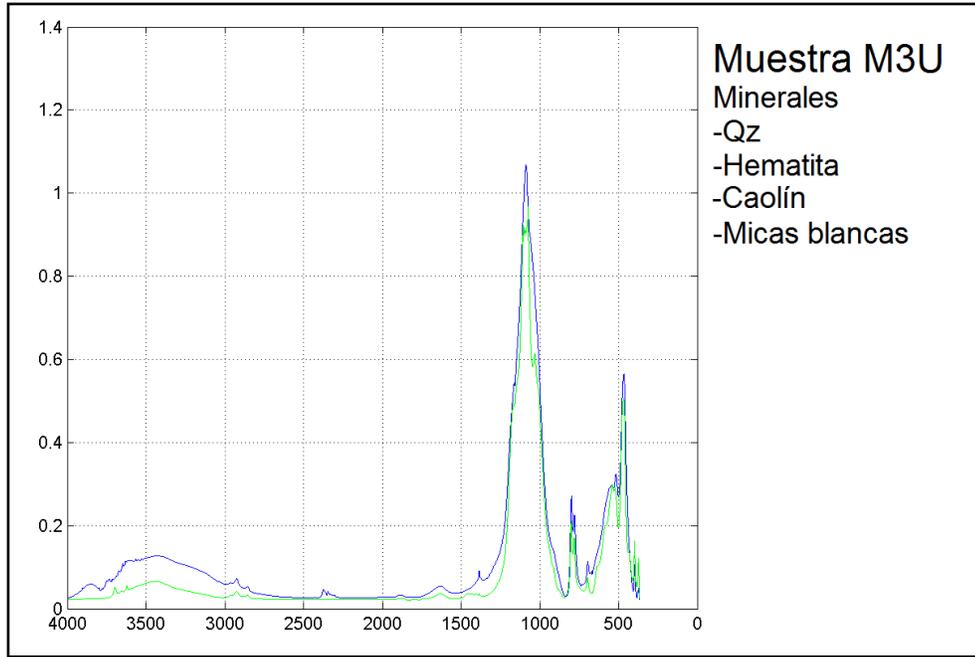
7.3 FTIR (Espectrometría infrarroja)



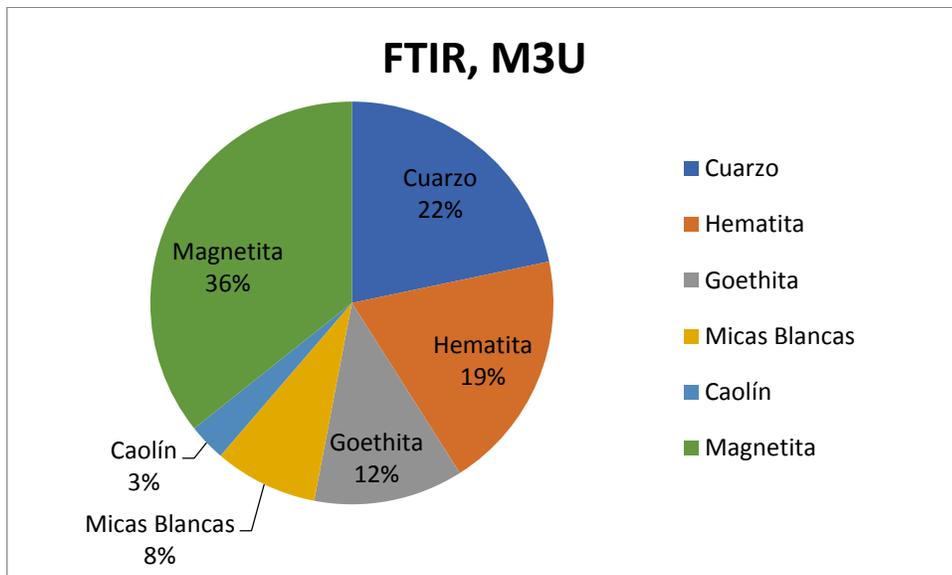
Anexo 7.10 FTIR para muestra M2U.



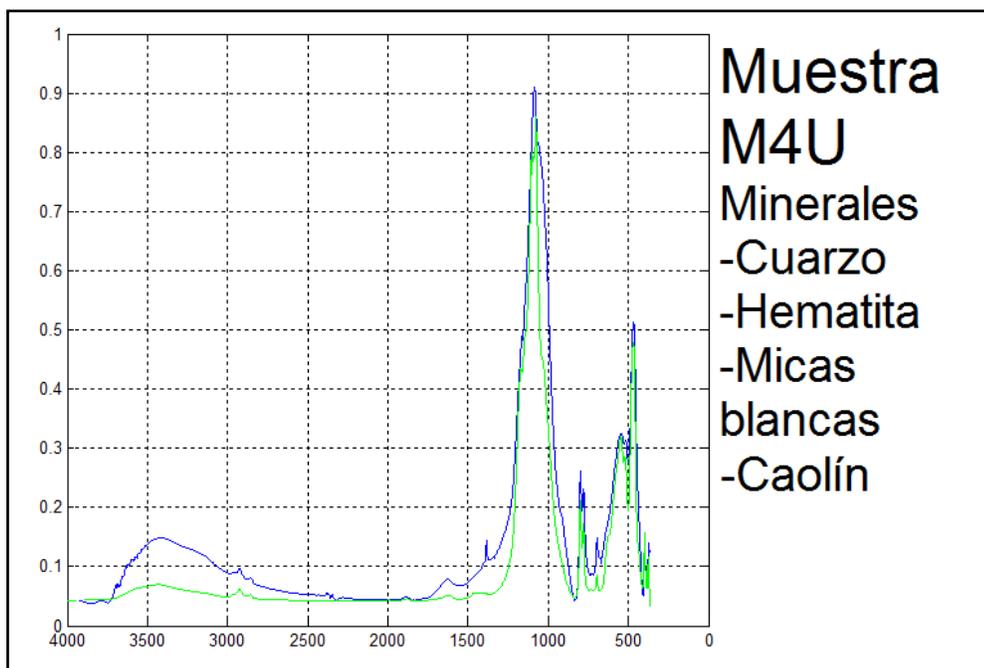
Anexo 7.11 Cuantificación de porcentajes de minerales en FTIR, M2U.



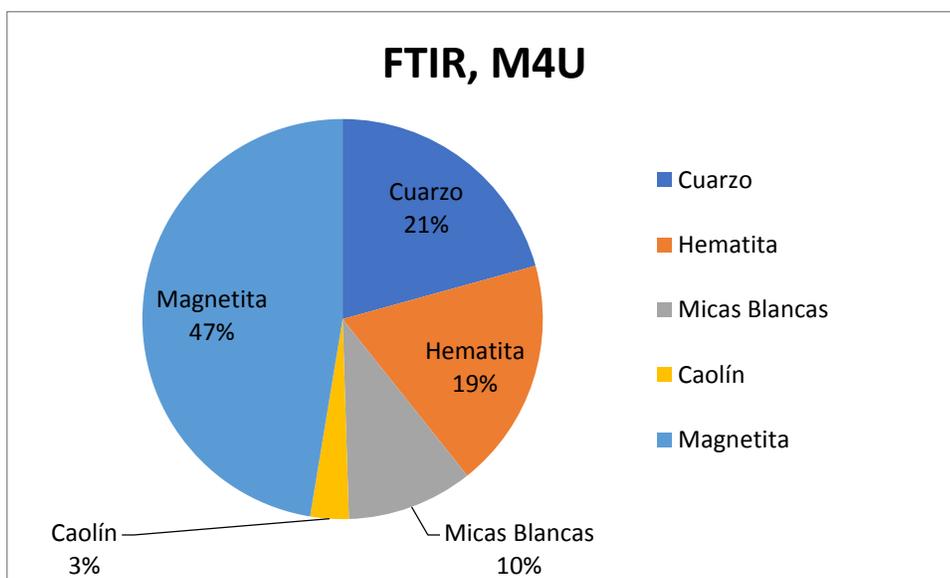
Anexo 7.12 FTIR para muestra M2U.



Anexo 7.13 Cuantificación de porcentajes de minerales en FTIR, M3U.



Anexo 7.14 FTIR para muestra M2U.



Anexo 7.15 Cuantificación de porcentajes de minerales en FTIR, M4U.