



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

# DESARROLLO DE UNA TÉCNICA DE MEDICIÓN DE MICROFRACTURAS PARA LA EVALUACIÓN DE PROCESOS DE TRONADURA: APLICACIÓN DEL CONCEPTO MINE-TO-MILL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JUAN BASTIÁN AVILÉS RÍOS

PROFESOR GUÍA

GONZALO MONTES ATENAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

DANKO MORALES GARRIDO  
CÉSAR ARREDONDO PEÑA  
BRAULIO FERNÁNDEZ CLARO

SANTIAGO DE CHILE

2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS  
POR: JUAN BASTIÁN AVILÉS RÍOS  
FECHA: 2024  
PROF. GUÍA: GONZALO MONTES ATENAS

## DESARROLLO DE UNA TÉCNICA DE MEDICIÓN DE MICROFRACTURAS PARA LA EVALUACIÓN DE PROCESOS DE TRONADURA: APLICACIÓN DEL CONCEPTO MINE-TO-MILL

Este trabajo consiste en el desarrollo de una técnica de medición de microfrazuras mediante el fenómeno de adsorción física de gas en materiales. A través de la aplicación de procesos de adsorción sobre muestras de material post tronadura se obtienen isotermas de adsorción y desorción con las que se determinan los parámetros de área superficial específica y volumen de poros que cuantifican el nivel de microfrazura.

La metodología de trabajo contempla el desarrollo de pruebas preliminares y definitivas. En las pruebas preliminares se estudia la influencia del tamaño de los fragmentos del material post tronadura sobre la forma de las isotermas, esto para definir un rango de tamaño adecuado a emplear en las pruebas definitivas. En las pruebas definitivas se estudia si la técnica puede medir distintos niveles de microfrazura en muestras de material tronado con ANFO y Emulsión bajo la hipótesis que tronaduras con Emulsión generan un mayor nivel de microfrazura que el ANFO, y así, evaluar la aplicabilidad de la técnica en conjunto con resultados de pruebas de molienda.

Respecto a los resultados de las pruebas preliminares, se tiene que, a menor tamaño de fragmentos se favorece la construcción de isotermas de adsorción con forma creciente, y que el rango de tamaño definido para las pruebas definitivas es de 50# - 70#. Respecto a los resultados de las pruebas definitivas, los valores de área superficial específica, volumen de poros e índice de trabajo para una tronadura de desarrollo con ANFO son  $1.82 \text{ m}^2/\text{g}$ ,  $10.28 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$  y  $18.94 \text{ kWh}/\text{tc}$  respectivamente, mientras que para una con Emulsión son  $3.64 \text{ m}^2/\text{g}$ ,  $28.25 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$  y  $18.77 \text{ kWh}/\text{tc}$  respectivamente. Los resultados de área y volumen permitirían plantear que la técnica puede diferenciar entre ANFO y Emulsión, sin embargo, las isotermas a partir de las cuales se calcularon los parámetros no tienen una forma adecuada para una aplicación apropiada de los modelos, lo que condiciona la confiabilidad de los resultados. Por otra parte, los índices de trabajo expresan que no hay diferencia significativa entre ANFO y Emulsión, lo que indica que las pruebas de molienda no pudieron diferenciar entre estos explosivos.

Se concluye que, si bien la técnica entrega resultados esperados acorde con la hipótesis, hace falta ampliar los casos de estudio para evaluar si es posible obtener isotermas adecuadas para una aplicación confiable de los modelos de área superficial específica y volumen de poros, y así, concluir sobre la aplicabilidad de la técnica como una herramienta para medir microfrazuras.

ABSTRACT OF THE THESIS SUBMITTED TO  
OBTAIN THE DEGREE OF MINING ENGINEERING  
BY: JUAN BASTIÁN AVILÉS RÍOS  
DATE: 2024  
THESIS ADVISOR: GONZALO MONTES ATENAS

## DEVELOPMENT OF A MICROFRACTURE MEASUREMENT TECHNIQUE FOR THE EVALUATION OF BLASTING PROCESSES: APPLICATION OF THE MINE-TO-MILL CONCEPT

This work consists of the development of a technique for measuring microfractures through the phenomenon of physical adsorption of gas in materials. By applying adsorption processes to post-blasting material samples, adsorption and desorption isotherms are obtained, which determine the specific surface area and pore volume parameters that quantify the level of microfracture.

The work methodology contemplates the development of preliminary and definitive tests. In the preliminary tests, the influence of the size of the fragments of the post-blasting material on the shape of the isotherms is studied, this in order to define an appropriate size range to be used in the definitive tests. In the definitive tests, it is studied whether the technique can measure different levels of microfracture in samples of material blasted with ANFO and Emulsion under the hypothesis that blasts with Emulsion generate a higher level of microfracture than ANFO, and thus, evaluate the applicability of the technique in conjunction with the results of grinding tests.

Regarding the results of the preliminary tests, it is noted that the smaller the fragment size, the more likely it is to build adsorption isotherms with increasing shape, and that the defined size range for the definitive tests is 50# - 70#. Regarding the results of the definitive tests, the values of specific surface area, pore volume and work index for a development blast with ANFO are  $1.82 \text{ m}^2/\text{g}$ ,  $10.28 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$  and  $18.94 \text{ kWh/tc}$  respectively, while for one with Emulsion they are  $3.64 \text{ m}^2/\text{g}$ ,  $28.25 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$  and  $18.77 \text{ kWh/tc}$  respectively. The area and volumen results would suggest that the technique can differentiate between ANFO and Emulsion, however, the isotherms from which the parameters were calculated do not have suitable shape for an appropriate application of the models, which affects the reliability of the results. On the other hand, the work indexes express that there is no significant difference between ANFO and Emulsion, which indicates that the grinding tests could not differentiate between these explosives.

It is concluded that, although the technique delivers expected results in accordance with the hypothesis, it is necessary to expand the case studies to evaluate whether it is possible to obtain appropriate isotherms for a reliable application of the specific surface area and pore volume models, and thus, conclude on the applicability of the technique as a tool to measure microfractures.

## **Dedicatoria**

*Este trabajo se lo dedico a mi mom Ingrid, a quién amo y amaré con todo mi corazón hasta el fin del tiempo y más allá.*

## **Agradecimientos**

*Agradezco a Dios por haberme permitido desarrollar este trabajo, ya que gracias a su sabiduría me fue posible de realizar.*

*Agradezco a mi madre Ingrid, a mi padre Luis y a mis hermanos Felipe y Martín por apoyarme todos estos años que han pasado.*

*Agradezco a nuestro perruno Doki por haber sido parte de mi vida habiéndome dado su amor cada día, a nuestros gatunos Botitas y Gatuna por ser parte de mi vida, al gatuno Mechi por ser parte de mi vida, a nuestro perruno Kimba y gatuna Snorkita por haber sido parte de mi vida, a los miembros de la manada perruna: Kiro, Lobito, Chascón y Chico, al gatuno Gatoneke, al gatunito que llegó a nuestra casa a descansar, y a todos los perrunos y gatunos que fueron, han sido y son parte de mi vida, les agradezco.*

*Agradezco a mis profesores Gonzalo y Danko de Enaex por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo y haberme ayudado a desarrollarlo tanto en gestión como en financiamiento.*

*Agradezco a Juan Pablo por su gestión y acompañamiento durante todo el proceso.*

*Agradezco a Alfonso, a los niños de Asistencia Técnica y a todo el personal de la faena Chuqui Subte por haberme ayudado a desarrollar la primera parte de este trabajo.*

*Agradezco al jefe Bladimir, a David, a don Bruno y a todo el personal de la faena Atacama Kozan por haberme ayudado a desarrollar la segunda parte de este trabajo.*

# Tabla de Contenido

Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.2 Alcance .....	3
1.3 Estructura.....	3
Capítulo 2: Revisión crítica de la literatura .....	4
2.1 Mine-to-Mill.....	4
2.2 Tronadura y explosivos .....	5
2.3 Relación entre tronadura y operaciones de conminución.....	7
2.4 Rol de las microfracturas en operaciones de conminución .....	11
2.5 Técnica de medición de microfracturas.....	20
2.5.1 Área superficial específica .....	24
2.5.2 Volumen de poros.....	28
2.5.3 Equipo 3Flex.....	31
2.6 Conclusiones.....	32
Capítulo 3: Metodología .....	33
3.1 Pruebas preliminares .....	35
3.1.1 Definición de rangos de tamaño de muestras .....	35
3.1.2 Descripción de Faena 1 .....	36
3.1.3 Características de muestras .....	38
3.1.4 Extracción de material .....	39
3.1.5 Selección de zanjas para extracción de material.....	40
3.1.6 Elaboración de muestras .....	41
3.1.7 Definición de rango de tamaño definitivo.....	42
3.2 Pruebas definitivas .....	43
3.2.1 Descripción de Faena 2.....	43
3.2.2 Características de muestras .....	44
3.2.3 Extracción de material para procesos de adsorción .....	45
3.2.4 Elaboración de muestras para procesos de adsorción .....	45
3.2.5 Extracción de material para pruebas de molienda.....	46

Capítulo 4: Resultados .....	48
4.1 Pruebas preliminares .....	48
4.1.1 Isotermas de adsorción y desorción .....	48
4.1.2 Área superficial específica .....	52
4.1.3 Volumen de poros.....	55
4.2 Pruebas definitivas .....	59
4.2.1 Isotermas de adsorción y desorción .....	59
4.2.2 Área superficial específica .....	62
4.2.3 Volumen de poros.....	62
4.2.4 Índices de trabajo .....	62
Capítulo 5: Análisis de resultados .....	63
5.1 Pruebas preliminares .....	63
5.2 Pruebas definitivas .....	65
Capítulo 6: Conclusiones .....	70
Capítulo 7: Bibliografía .....	71
ANEXOS .....	74
Anexo A.....	74
Anexo B.....	77

## Índice de figuras

Figura 1: Esquema de la expansión de gases (Manual de tronadura Enaex, 2008). .....	6
Figura 2: Índice de trabajo en función del factor de carga (Nielsen y Kristiansen, 1996). .....	12
Figura 3: Índice de chancabilidad y P80 en función del tipo de explosivo (Khademian y Bagherpour, 2017). .....	15
Figura 4: Índice de trabajo y rendimiento en función del tipo de explosivo (Khademian y Bagherpour, 2017). .....	15
Figura 5: P80 en función del tiempo de molienda para taconita (Nielsen y Malvik, 1999). .....	16
Figura 6: Visualización de clasificación de microfracturas (Akesson et al., 2004).....	18
Figura 7: Eficiencia de extracción de cobre (Parra et al., 2015).....	19
Figura 8: Esquema de un proceso de adsorción de gas sobre un material ([Depiction of monolayer formation], 2024).....	21
Figura 9: Tipos de isotermas (adsorción en rojo y desorción en azul) según clasificación IUPAC. (Kumar et al., 2019).....	22

Figura 10: Mecanismo de adsorción en multicapas según teoría BET (Life of Riley, 2010). .....	24
Figura 11: Esquema de metodología de cálculo de área superficial específica según teoría BET. ([Simplified Depiction of a BET Surface area calculation], 2024). .....	25
Figura 12: Linealización de isoterma de adsorción según teoría BET (Brunauer et al., 1938). .....	27
Figura 13: Fotografía del equipo 3Flex de Micromeritics. ....	32
Figura 14: Metodología general común de pruebas preliminares y definitivas. ....	34
Figura 15: Diagrama de perforación de una calle de hundimiento del Macro Bloque N02. .....	37
Figura 16: Diagrama de perforación de un zanja (Parada N°6) del Macro Bloque N02. ....	37
Figura 17: Esquema de elaboración de muestras de pruebas preliminares. ....	39
Figura 18: Material post tronadura de una zanja. ....	40
Figura 19: Vista en planta del Macro Bloque N02 en el Nivel de Producción. En celeste se identifican las dos zanjas seleccionadas para la extracción del material. ....	41
Figura 20: Diagrama de perforación de galería de desarrollo correspondiente a tronaduras de desarrollo con ANFO y Emulsión. ....	44
Figura 21: Material post tronadura de tronadura de desarrollo con Emulsión. ....	45
Figura 22: Muestras para procesos de adsorción de pruebas definitivas. ....	46
Figura 23: Isotermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de zanja con Emulsión (Zanja 1) y tamizada para el rango de tamaño 4# - 12# (Muestra 1.1). ....	49
Figura 24: Isotermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de zanja con Emulsión (Zanja 1) y tamizada para el rango de tamaño 12# - 20# (Muestra 1.2). ....	49
Figura 25: Isotermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de zanja con Emulsión (Zanja 1) y tamizada para el rango de tamaño -20# (Muestra 1.3). ....	50
Figura 26: Isotermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de zanja con Emulsión (Zanja 2) y tamizada para el rango de tamaño 4# - 12# (Muestra 2.1). ....	50
Figura 27: Isotermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de zanja con Emulsión (Zanja 2) y tamizada para el rango de tamaño 12# - 20# (Muestra 2.2). ....	51
Figura 28: Isotermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de zanja con Emulsión (Zanja 2) y tamizada para el rango de tamaño -20# (Muestra 2.3). ....	51
Figura 29: Comparación de isotermas de adsorción de Muestra 2.3 (en verde) respecto a isotermas comunes según clasificación IUPAC. ....	52
Figura 30: Linealización de isoterma de adsorción de Muestra 2.3. ....	53
Figura 31: Regresión lineal de isoterma de adsorción linealizada de Muestra 2.3. ....	54



Figura 32: Volumen parcial de poros en función del radio de poro promedio de Muestra 2.3. ....	58
Figura 33: Isotermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de desarrollo con ANFO y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 1). ....	60
Figura 34: Isotermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de desarrollo con Emulsión y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 2). ....	60
Figura 35: Isotermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de producción con ANFO y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 3). ....	61
Figura 36: Isotermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de producción con Emulsión y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 4). ....	61
Figura 37: Distribución granulométrica de material post tronadura de voladura de desarrollo con ANFO (Tronadura 1 de pruebas definitivas). ....	74
Figura 38: Distribución granulométrica de material post tronadura de voladura de desarrollo con Emulsión (Tronadura 2 de pruebas definitivas). ....	75
Figura 39: Distribución granulométrica de material post tronadura de voladura de producción con ANFO (Tronadura 3 de pruebas definitivas). ....	75
Figura 40: Distribución granulométrica de material post tronadura de voladura de producción con Emulsión (Tronadura 4 de pruebas definitivas). ....	76

## Índice de tablas

Tabla 1: Energías específicas por operación (Esen, 2010, como se cita en Esen, 2013). ....	8
Tabla 2: Energías específicas calculadas y medidas por operación (Eloranta, 1997). ....	9
Tabla 3: Requerimientos energéticos y costos para tronadura de prueba con factor de carga de 0.33 Kg/t (Workman y Eloranta, 2003). ....	13
Tabla 4: Requerimientos energéticos y costos para tronadura de prueba con factor de carga de 0.45 Kg/t (Workman y Eloranta, 2003). ....	14
Tabla 5: Medición y clasificación de microfracturas para tres minerales en función del factor de carga (Nielsen y Malvik, 1999). ....	17
Tabla 6: Área superficial específica de pruebas definitivas. ....	62
Tabla 7: Volumen de poros de pruebas definitivas. ....	62
Tabla 8: Índices de trabajo de pruebas definitivas. ....	62
Tabla 9: Factores de carga de tronaduras de pruebas definitivas. ....	66
Tabla 10: Tamaños característicos de tronaduras de pruebas definitivas. ....	67
Tabla 11: Dominios geológicos de sectores de tronaduras de pruebas definitivas. ....	68

Tabla 12: Cálculo de volumen de poros para muestra de material post tronadura de una zanja tronada con Emulsión y tamizada para el rango de tamaño -20# (Muestra 2.3 de pruebas preliminares).....	77
Tabla 13: Cálculo de volumen de poros para muestra de material post tronadura de voladura de desarrollo con ANFO y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 1 de pruebas definitivas). ....	78
Tabla 14: Cálculo de volumen de poros para muestra de material post tronadura de voladura de desarrollo con Emulsión y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 2 de pruebas definitivas). ....	79
Tabla 15: Cálculo de volumen de poros para muestra de material post tronadura de voladura de producción con ANFO y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 3 de pruebas definitivas). ....	80
Tabla 16: Cálculo de volumen de poros para muestra de material post tronadura de voladura de producción con Emulsión y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 4 de pruebas definitivas). ....	81

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Área superficial específica según teoría BET (Brunauer et al., 1938). ....	25
Ecuación 2: Modelo de isoterma de adsorción según teoría BET (Brunauer et al., 1938). ....	26
Ecuación 3: Volumen de monocapa según teoría BET (Brunauer et al., 1938). ....	27
Ecuación 4: Constante BET (Brunauer et al., 1938).....	27
Ecuación 5: Radio de Kelvin (Halsey,1948). ....	28
Ecuación 6: Radio de poro para geometría cilíndrica (Lowell et al., 2004).....	29
Ecuación 7: Radio de poro para geometría de grieta (Lowell et al., 2004).....	29
Ecuación 8: Espesor del film para gas nitrógeno (Halsey, 1948). ....	29
Ecuación 9: Volumen de gas evaporado de los poros en estado líquido para un decremento de presión (Lowell et al., 2004).....	30
Ecuación 10: Volumen de poros parcial (Lowell et al., 2004).....	30
Ecuación 11: Área superficial específica en función del volumen de poros parcial (Lowell et al., 2004). ....	31
Ecuación 12: Volumen total de poros (Lowell et al., 2004).....	31

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Contexto

El trabajo desarrollado se enmarca en el concepto Mine-to-Mill, concepto cuya estrategia vincula las operaciones mineras con las operaciones de conminución en pos de un beneficio global del sistema minero-conminución.

El objeto de estudio de este trabajo son las microfracturas generadas por operaciones de tronadura. En la literatura existen estudios que tratan sobre la influencia de las microfracturas sobre las operaciones de conminución, particularmente en molienda donde el consumo energético relativo es significativamente mayor en comparación al del chancado y al de las operaciones previas de perforación y tronadura.

Según la literatura, distintos niveles de microfractura se corresponden con distintos índices de trabajo, aspecto que permite vincular las microfracturas con el consumo energético en operaciones de molienda, lo que corresponde a un enfoque característico del concepto Mine-to-Mill.

Ahora bien, a pesar que en la literatura se expresa la importancia de las microfracturas sobre las operaciones de molienda, no se identifica un estándar para cuantificar el nivel de microfractura propiamente tal, en otras palabras, no hay una técnica definida para medir el nivel de microfractura generado por operaciones de tronadura. Es precisamente este aspecto el que motiva el presente trabajo, que consiste en el desarrollo una técnica de medición de microfracturas para fragmentos de material post tronadura. El *desarrollo* de la técnica se refiere a la presentación y aplicación de la técnica, esto es, describir cómo funciona la técnica y la aplicación de esta sobre muestras de material post tronadura.

La técnica se basa en el fenómeno de adsorción física de gas en materiales, proceso comúnmente utilizado en las áreas de la química y ciencia de los materiales para el análisis de porosidad de materiales. Mediante la aplicación de procesos de adsorción sobre muestras elaboradas a partir de material post tronadura, se construyen isotermas de adsorción. Las isotermas de adsorción son curvas que describen el proceso de adsorción entre el material y el gas adsorbato, y son el objeto a partir del cual se determinan los parámetros de salida de la técnica que cuantifican el nivel de microfractura.

Los parámetros de salida de la técnica que cuantifican el nivel de porosidad de una muestra de material son el área superficial específica y el volumen de poros. Esto quiere decir que la técnica mide el nivel de microfractura de una muestra de material a través del nivel de porosidad dado por los parámetros de área y volumen que se calculan.

En la literatura hay evidencia que apoya la idea que diferentes tipos de explosivos fracturan y dañan la roca de distinta manera generando distintos niveles de microfractura.

Es este aspecto el que define el principal parámetro de estudio en la aplicación de la técnica, el tipo de explosivo empleado en la tronadura.

Considerando entonces, como base de este trabajo, que distintos explosivos generan distintos niveles de microfractura, se presenta y aplica la técnica para evaluar si se logra rescatar tal efecto, es decir, si la técnica es capaz de medir diferentes niveles de microfractura según el tipo de explosivo.

En términos generales, la metodología de trabajo contempla el desarrollo de pruebas preliminares y pruebas definitivas de la aplicación de la técnica, además de pruebas de molienda para estas últimas.

En las pruebas preliminares se elaboran muestras de material tronado con un mismo tipo de explosivo para un mismo tipo de roca, tal que cada muestra tiene un rango de tamaño de fragmentos distinto, luego se aplican procesos de adsorción sobre estas muestras para obtener las isothermas correspondientes, para después analizar los resultados y definir un único rango de tamaño de fragmentos para emplear en las pruebas definitivas.

En las pruebas definitivas se elaboran muestras de material tronado con distinto tipo de explosivo (ANFO y Emulsión) para un mismo tipo de roca y un mismo rango de tamaño (el definido en las pruebas preliminares), luego se aplican procesos de adsorción sobre estas muestras para obtener las isothermas correspondientes, luego se aplican modelos sobre las isothermas para determinar los parámetros de área superficial específica y volumen de poros. Además, se realizan pruebas de molienda para comparar los índices de trabajo con los parámetros determinados.

### **1.2.1 Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo es evaluar la aplicabilidad de la técnica, esto es, evaluar si los parámetros de la técnica rescatan el efecto de emplear distinto tipo de explosivo (ANFO y Emulsión) en las tronaduras, de tal manera que los resultados manifiesten tal efecto respecto al distinto nivel de acondicionamiento que generar estos explosivos en el material.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos de este trabajo son los siguientes:

- I. Analizar los resultados de la técnica al aplicarla en muestras de material tronado con distinto rango de tamaño de fragmentos, esto para un mismo tipo de explosivo y mismo tipo de roca (pruebas preliminares), para luego definir un rango de tamaño único para emplear en la elaboración de muestras de las pruebas definitivas
- II. Analizar los resultados de la técnica al aplicarla en muestras de material tronado con distinto tipo de explosivo (ANFO y Emulsión) y mismo tipo de roca (pruebas definitivas), esto para el rango de tamaño definido en las pruebas preliminares

- III. Comparar los resultados de la técnica de las pruebas definitivas con los resultados de pruebas de molienda, esto para evaluar el nivel de correlación entre los parámetros de la técnica y los índices de trabajo de las pruebas de molienda

## **1.2 Alcance**

Al tratarse de un estudio exploratorio del cual no se tiene antecedentes, el trabajo se realiza a escala de laboratorio. No se busca el escalamiento de los resultados obtenidos de la técnica.

El trabajo se desarrolla específicamente para material post tronadura extraído de faenas de minería subterránea.

Respecto al objetivo específico I, se analiza exclusivamente la influencia del tamaño de los fragmentos. No se analizan los efectos que puedan ejercer otros parámetros del proceso de tronadura sobre los resultados obtenidos.

Respecto al objetivo específico II, se analiza principalmente la influencia del tipo de explosivo. No se profundiza en los efectos que puedan ejercer otros parámetros del proceso de tronadura sobre los resultados obtenidos.

Respecto al objetivo específico III, los índices de trabajo se comparan con los resultados de la técnica en términos relativos.

## **1.3 Estructura**

En el Capítulo 1 se introduce el tema de estudio. Se presenta la motivación y aspectos generales del trabajo, el objetivo general, los objetivos específicos y el alcance.

En el Capítulo 2 se realiza una revisión crítica de la literatura. Se presentan las bases conceptuales, se discuten estudios afines al tema y se describe la técnica de medición de microfracturas.

En el Capítulo 3 se detalla la metodología de trabajo. Se presentan los procedimientos y razonamientos utilizados en el desarrollo de la técnica.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados de la aplicación de la técnica de acuerdo a la metodología empleada.

En el Capítulo 5 se realiza el análisis de los resultados.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo. Se incluyen los resultados principales, se da cuenta del nivel de cumplimiento de los objetivos y se proponen recomendaciones.

En el Capítulo 7 se incluyen las referencias bibliográficas utilizadas en el trabajo.

## Capítulo 2: Revisión crítica de la literatura

En esta sección se realiza la revisión bibliográfica de los contenidos afines al tema de estudio. Los contenidos se presentan de manera informativa y explicativa, incluyendo comentarios. Estos se presentan agrupados en subsecciones de los tópicos principales del tema de estudio.

### 2.1 Mine-to-Mill

El concepto Mine-to-Mill se puede entender como una estrategia en que se integran operaciones mineras y operaciones de conminución con el objetivo de mejorar el desempeño global de una actividad minera.

Este concepto adquiere fuerza en los años 90 gracias a los estudios realizados por el Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) en Queensland, Australia. En la literatura referente a Mine-to-Mill se pueden encontrar diversas visiones sobre las características del concepto.

Morrell y Munro (2000) describen Mine-to-Mill como un concepto en que se integran operaciones mineras y de conminución de manera que el sistema completo sea óptimo en vez de optimizar las operaciones por separado. Con una idea similar, Adel et al. (2005) describen el concepto como un enfoque en donde se optimiza un sistema global, enfatizando que el objetivo es la reducción del consumo energético en molienda. Estas descripciones dan cuenta de un aspecto característico del concepto Mine-to-Mill, que es la interdependencia entre las operaciones mineras y de conminución.

El hecho que las operaciones mineras antecedan a las operaciones de conminución permite considerar que las primeras influyen en las últimas y que no son operaciones aisladas. Un ejemplo de esta interdependencia es la distribución de tamaño del material post tronadura, puesto que procesar una distribución de tamaño gruesa o fina ciertamente no es equivalente.

Generalmente, cuando se habla de operaciones mineras y operaciones de conminución en un estudio Mine-to-Mill, se refiere principalmente a las operaciones de perforación y tronadura por el lado minero (principalmente tronadura) y a las operaciones de chancado y molienda por el lado de la conminución (principalmente molienda).

El concepto Mine-to-Mill sugiere que el enfoque para la optimización de un sistema tronadura-conminución está en comprender el impacto de las operaciones de tronadura aguas abajo en las operaciones de molienda en términos energéticos, puesto que el consumo de energía eléctrica es un aspecto crítico cuando se habla de reducción de costos de un sistema.

Un parámetro comúnmente utilizado para cuantificar y comparar el nivel de consumo de energía eléctrica en operaciones de conminución es el índice de trabajo (Wi) de Bond.

Este trabajo se clasifica como un estudio Mine-to-Mill puesto que, a grandes rasgos, se estudia la influencia del tipo de explosivo empleado en la tronadura sobre la generación de microfracturas, las cuales se relacionan con el nivel de acondicionamiento del material post tronadura, y, por consiguiente, con el índice de trabajo. Estos contenidos se abordan más adelante en este capítulo.

## **2.2 Tronadura y explosivos**

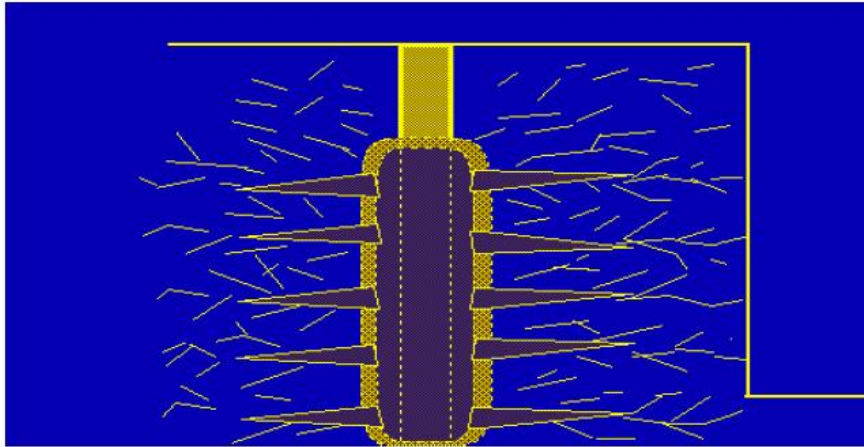
La tronadura (o voladura) es la operación minera en la cual se realiza la extracción de la roca del macizo rocoso. Mediante la aplicación de energía a través de explosivos se generan ondas de choque que fracturan la roca obteniéndose fragmentos de material con determinadas distribuciones de tamaño y niveles de acondicionamiento.

La fragmentación del macizo rocoso en fragmentos de menor tamaño es fundamental para la actividad minera puesto que es la primera etapa preparatoria en el proceso de extracción del mineral (Okeke, 2015). Esta idea se alinea con el concepto Mine-to-Mill ya que considera a la tronadura como una primera operación de reducción de tamaño antecediendo a las operaciones de conminución de chancado y molienda.

De acuerdo al Manual de tronadura de Enaex (2008), el mecanismo de fragmentación de la roca para una carga confinada se puede separar en las etapas de detonación, propagación de ondas, expansión de gases y movimiento del material:

- I. La detonación es la etapa en que los componentes básicos de un explosivo se convierten en gases de alta presión y temperatura (ondas de choque). Estos gases generan un frente de ondas de esfuerzo de ondas primarias (ondas-P) y secundarias (ondas-S)
- II. La propagación de ondas es la etapa en que las ondas de esfuerzo se propagan a través del macizo rocoso generando y expandiendo fracturas en el macizo rocoso
- III. La expansión de gases es la etapa en que los gases de alta presión y temperatura producen un campo de esfuerzo alrededor de las perforaciones generando y expandiendo fracturas radiales y penetrando en cualquier discontinuidad
- IV. El movimiento del material es la etapa en que la mayor parte de la fragmentación se ha completado debido a la acción de las ondas primarias, la presurización del gas o una combinación de ambos

En la Figura 1 se muestra un esquema de la etapa de expansión de gases.



**Figura 1: Esquema de la expansión de gases (Manual de tronadura Enaex, 2008).**

La manera en que se realiza la tronadura depende del diseño de tronadura, proceso que depende de factores como la geología del macizo rocoso, perforación, factor de carga, tipo de explosivo, entre otros. Respecto a estos factores, el tipo de explosivo es el factor sobre el cual se enfoca el tema de estudio.

Un explosivo es una sustancia que reacciona de manera violenta generando altos niveles de energía que fracturan el macizo rocoso. Los explosivos se pueden clasificar en explosivos mecánicos, nucleares y químicos (Johnson, 2024), siendo estos últimos los utilizados predominantemente en operaciones de tronadura en minería, y en particular, los utilizados por la empresa Enaex Servicios S.A., quien estuvo a cargo de las tronaduras sujetas a estudio para este trabajo.

Respecto a los explosivos químicos, se pueden clasificar dos tipos de acuerdo al Manual de tronadura. Estos son los explosivos moleculares y los explosivos compuestos. Los explosivos moleculares se caracterizan por reacciones químicas muy rápidas y completas, por ejemplo, el trinitrotolueno (TNT) y dinamita. Mientras que los explosivos compuestos reaccionan de manera más lenta que un explosivo molecular.

Cuando se habla de tipos de explosivos, estos pueden clasificarse por su densidad, energía disponible, calor de reacción, velocidad de detonación (VOD), entre otras propiedades.

Respecto a la VOD, es un indicador de la razón a la cual la reacción de la detonación avanza por la columna del explosivo. También es una medida de la capacidad de fragmentación de un explosivo, tal que a mayor VOD, mayor potencial de fragmentación.

Para este trabajo, es de particular interés la VOD de los explosivos empleados en las tronaduras, puesto que, como se verá más adelante, la VOD está asociada al nivel de acondicionamiento del material post tronadura. Dicho esto, se presentan las características de los explosivos empleados por Enaex en las tronaduras ejecutadas en el desarrollo de este trabajo, los cuales son ANFO (1 tipo) y Emulsión (2 tipos).



## **ANFO**

Agente de tronadura a granel para perforaciones de diámetro intermedio.

VOD (m/s): 3,600 - 4,100

Densidad (g/cc): 0.86

## **Emulsión (Duoblast-V)**

Agente de tronadura a granel para perforaciones de diámetro intermedio. Corresponde a una emulsión bombeable gasificada para tiros ascendentes.

VOD (m/s): 4,000 - 5,000

Densidad (g/cc): 1.15

Potencia en peso relativa al ANFO: 0.77

## **Emulsión (Emultex-CN)**

Agente de tronadura envasado para perforaciones de diámetro pequeño. Corresponde a una emulsión para un amplio rango de aplicaciones.

VOD (m/s): 4,000 - 5,200

Densidad (g/cc): 1.15

Potencia en peso relativa al ANFO: 1.01

## **2.3 Relación entre tronadura y operaciones de conminución**

En esta sección se presentan y discuten estudios que abordan la relación entre las operaciones de tronadura y las operaciones de conminución de chancado y molienda.

En el estudio de Mckee et al. (1995) sobre la relación de la fragmentación de la tronadura y el rendimiento de un circuito de conminución, los autores plantean que, para el material post tronadura, una distribución de tamaño más fina permite incrementar el rendimiento de un circuito de molienda SAG, esto debido a que una alimentación más fina permite incrementar el tonelaje de alimentación al circuito.

Por otra parte, en el estudio de Kojovic et al. (1995), los autores plantean que la cantidad de energía empleada en la tronadura tiene un impacto directo en lo que ellos definen como propiedades de conminución del mineral. Con un enfoque similar, en el estudio de Kanchibotla et al. (1999), los autores plantean que el rendimiento de un circuito de molienda SAG se incrementa al emplear una tronadura de alta energía.

Lo primero que se puede decir de estos estudios, es que se expresa una relación directa de causa y efecto entre la tronadura y las operaciones de conminución, ya sea en términos de productividad o en términos de energía aplicada, es claro que la tronadura

tiene un impacto directo en las operaciones de conminución. Además, los autores coinciden en la idea que las operaciones de tronadura y de conminución deberían desarrollarse en conjunto por la relación de interdependencia entre estas, un aspecto característico del concepto Mine-to-Mill.

En lo que respecta a factores energéticos, en el estudio de Esen (2013) se comparan las eficiencias energéticas entre operaciones desde la tronadura hasta la molienda. Se destaca que la tronadura es la más eficiente en términos de energía específica, es decir, consume menos energía que las otras operaciones por tonelada procesada. En la Tabla 1 se comparan las energías específicas de las operaciones de perforación y tronadura, carguío y transporte, chancado y molienda.

**Tabla 1: Energías específicas por operación (Esen, 2010, como se cita en Esen, 2013).**

	Specific energy kwh/t	Energy factor	Cost factor
Drill and Blast	0.1 – 0.25	1	1
Load and haul	0.2 – 0.5	1 - 5	2 - 10
Crushing	1 – 2	4 -20	2 - 10
Grinding	10 – 20	40 - 200	8 - 20

Se puede ver que la tronadura es la operación que menos energía consume (energía en forma de explosivos) y la molienda la que más consume (en energía eléctrica), relación de la cual se desprende que es en las operaciones de tronadura donde es más eficiente generar cambios en pos de un beneficio energético del sistema ya que utilizar mayor energía en tronadura es menos costoso que hacerlo aguas abajo.

El autor plantea que estudios Mine-to-Mill han demostrado que fragmentos de material fino (bajo 10 mm) generados por operaciones de tronadura pueden considerarse un indicador de desempeño clave puesto que la presencia de fragmentos de material bajo 10 mm en el material post tronadura incrementa de manera significativa el rendimiento de un circuito de molienda.

El autor desarrolla casos de estudio en los que implementa su propio modelo de fragmentación. Su idea es incrementar la cantidad de finos en el material post tronadura mediante la variación de parámetros de diseño. Se obtiene que incrementar el factor de carga (FC) del explosivo produce mayor cantidad de finos, lo que se traduce en mayores rendimientos en el circuito de molienda a pesar del incremento en costos en tronadura. Este resultado resulta intuitivo bajo la idea que utilizar mayor cantidad de explosivos genera un material post tronadura con distribuciones de tamaño con mayores proporciones de finos.

En otro estudio asociado al consumo energético de las operaciones, Eloranta (1997) también plantea que la eficiencia energética de la tronadura es significativamente mejor que las de chancado y molienda. En la Tabla 2 se muestran las energías específicas por operación para un mineral de taconita. Se incluye además el F80, el P80 y la energía específica actual (energía medida) por operación.

**Tabla 2: Energías específicas calculadas y medidas por operación (Eloranta, 1997).**

<b>PROCESS</b>	<b>FEED</b>	<b>PRODUCT</b>	<b>W(CALC)</b>	<b>W(Actual)</b>	<b>Apparent</b>
	<b>SIZE</b>	<b>SIZE</b>	kw-hr/lt	kw-hr/lt	<b>Efficiency</b>
<b>Blast</b>	4 m	.5 m	.15	0.43	36%
<b>Crush</b>	.5 m	2 cm	.95	3.24	29%
<b>Grind</b>	2 cm	60 micron	20.39	17.82	114%
<b>TOTAL</b>	4 m	60 micron	21.49	21.49	

Estos resultados se condicen con los de Esen (2013) en que el factor de energía de la molienda respecto a la tronadura o el chancado es considerable, lo que refuerza nuevamente la idea que es en la tronadura donde se tiene mayores oportunidades de generar un impacto positivo en un sistema tronadura-conminución.

En el estudio de Dance et al. (2006) se desarrolla una metodología para mejorar la productividad mediante la integración de las operaciones mineras y de conminución. Esta metodología permite identificar ineficiencias en las operaciones desde un punto de vista global para proponer mejoras al sistema tronadura-conminución, esto en respuesta a la persistencia de actividades mineras en que las operaciones mineras y de conminución trabajan de manera aislada según indican los autores.

Sin ahondar en los detalles de la metodología que proponen los autores, esta se basa principalmente en la caracterización de la roca. Se plantea que se debe prestar atención a la calidad y tipo de roca, además de la cantidad (tonelaje) que va a conminución, esto porque un dominio de cierto tipo de roca puede cumplir con la ley requerida, pero no necesariamente será eficiente de reducir de tamaño en las operaciones de conminución ya que sus propiedades de conminución no son las adecuadas.

La metodología considera identificar y clasificar dominios de roca para proponer modificaciones al diseño de las operaciones mediante modelamiento y simulación, esto basado en que diferentes dominios de roca tienen sus respectivas propiedades de conminución. Cuando se habla de las propiedades de conminución se refiere principalmente a las propiedades físicas y mecánicas de la roca.

Entre las propiedades físicas de las rocas se tiene el brillo, clivaje, color, dureza, tenacidad, entre otras. De estas propiedades se destaca la dureza y la tenacidad por su relevancia en las operaciones de conminución.

Las propiedades mecánicas de las rocas se clasifican según el mecanismo de aplicación de esfuerzo, los cuales son la compresión, tensión, corte e impacto. Por lo tanto, las propiedades mecánicas corresponden a la resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, resistencia al corte y resistencia al impacto.

Los autores clasifican los dominios de roca según el índice de carga puntual (PLI) como parámetro de clasificación de roca intacta, y también mediante la clasificación RQD como parámetro de clasificación de macizo rocoso. Luego, con esta información se realizan modelos y proponen mejoras que se materializan en mayores rendimientos en chancado y molienda. De este estudio se desprende que la litología es un factor clave para un sistema tronadura-conminución ya que las propiedades de la roca influyen en el desempeño de las operaciones de conminución.

Con un enfoque similar al estudio anterior, Korman et al. (2015) plantean que las propiedades físicas y mecánicas de la roca tienen impacto en la reducción de tamaño en operaciones de chancado. El estudio se enfoca en los efectos de estas propiedades sobre el consumo energético en chancado primario.

En el estudio se evalúa el impacto de las propiedades físicas y mecánicas de la roca según la litología. Se estudian rocas de tipo ígnea y sedimentaria, siendo las propiedades estudiadas la densidad aparente, resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, dureza y tenacidad. De los ensayos y análisis realizados se obtiene que la resistencia a la compresión es la propiedad con mayor impacto en el consumo de energía específica en el chancado, seguido de la tenacidad y resistencia a la tensión, y en menor medida la densidad aparente y dureza.

De los estudios de Dance et al. (2006) y Korman et al. (2015) se puede decir que el tipo de roca es un primer parámetro de la tronadura que tiene impacto en el desempeño de las operaciones de conminución, esto según las propiedades físicas y mecánicas de las rocas.

A continuación, se revisan estudios que dan cuenta de la importancia de otros dos factores de la tronadura que repercuten aguas abajo, el tipo de explosivo y el factor de carga.

En lo que respecta a tipos de explosivos, estos se pueden clasificar según su densidad, VOD, calor de reacción, entre otros. Razón por la cual es interesante revisar como es la relación entre las propiedades de los explosivos y sus efectos en las operaciones de conminución, de igual manera se revisa la importancia del factor de carga.

En el estudio de Nielsen y Lownds (1997) se aborda la importancia del factor de carga en la tronadura. El estudio presenta resultados de pruebas de laboratorio sobre el impacto

de diferentes factores de carga de la tronadura sobre la moliendabilidad del mineral. Entiéndase por moliendabilidad como la cualidad de un mineral de ser molido de manera más fácil, esto en términos de menor tiempo de molienda y/o menor requerimiento energético para su reducción de tamaño. Considérese la misma idea para la chancabilidad del mineral.

Para muestras de minerales de ilmenita, nefelina sienita y taconita, se realizan tronaduras de prueba con diferentes factores de carga para luego realizar pruebas de molienda batch. Para cada mineral, se realiza una tronadura con un cordón detonante y otra con dos cordones, esto para emular un factor de carga menor (1 cordón) relativo a un factor de carga mayor (2 cordones). Luego, se elaboran muestras para pruebas de molienda batch obteniéndose que las muestras detonadas con dos cordones presentan mejor moliendabilidad, mejor de acuerdo al tiempo de molienda y P80 de las muestras. Las tronaduras de prueba fueron realizadas con cordones detonantes de 10 g/m de PETN (explosivo con VOD del orden de los 8000 m/s).

Este estudio permite generar una primera idea de que utilizar mayor cantidad de explosivo genera fragmentos de roca más acondicionados favoreciendo la reducción de tamaño en las operaciones de conminución.

## **2.4 Rol de las microfracturas en operaciones de conminución**

En los estudios revisados hasta la sección anterior, se puede decir que el rol de las microfracturas se encuentra implícito. En esta sección se revisan estudios que abordan explícitamente la presencia e importancia de las microfracturas dado que son el objeto de estudio característico de este trabajo.

Cuando se piensa en el producto de una operación de tronadura, es directo pensar en la distribución de tamaño del material post tronadura, dado que, interesa saber si el tamaño de los fragmentos del material post tronadura son los apropiados de acuerdo al diseño de tronadura empleado. Esta idea ciertamente es correcta, aunque tal enfoque se centra principalmente en la obtención de fragmentos con tamaños adecuados para su posterior manejo en las operaciones de carguío y transporte.

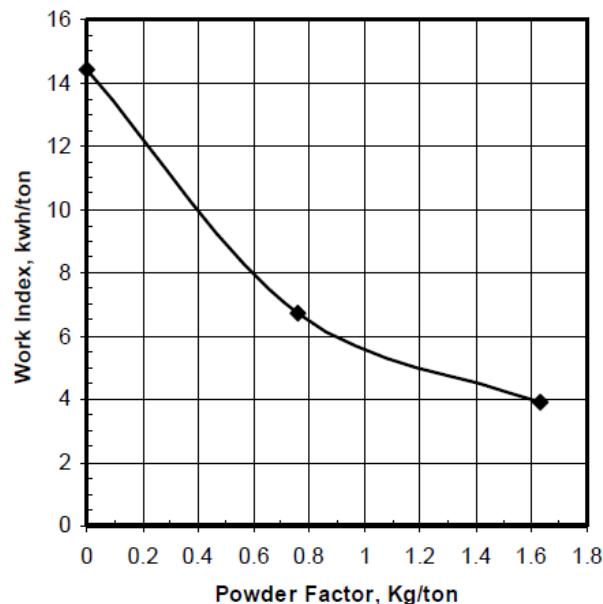
Lo que se quiere decir es que, además de considerar el tamaño de los fragmentos del material post tronadura como una variable de decisión, se debería considerar un segundo factor. Este factor es el *acondicionamiento* de los fragmentos del material post tronadura. El acondicionamiento se refiere al nivel de fractura interna a nivel microscópico de los fragmentos del material post tronadura, en otros términos, corresponde al nivel de microfractura propiamente tal.

La función de las microfracturas es reducir la resistencia de los fragmentos a ser reducidos de tamaño en las operaciones de conminución, o en un lenguaje más informal, su función es ablandar los fragmentos para su reducción de tamaño.

Respecto a microfrazuras, primero se revisa un estudio ampliamente reconocido en este campo, el estudio de Nielsen y Kristiansen (1996). En este estudio los autores desarrollan tronaduras y moliendas de prueba en diferentes tipos de roca para distintos factores de carga para evaluar los efectos en la moliendabilidad de la roca.

La estructura y metodología del estudio es similar a la de Nielsen y Lownds (1997), tal que se desarrollan tronaduras de prueba para muestras de roca empleando 1 y 2 cordones detonantes para estudiar la influencia del factor de carga del explosivo sobre la moliendabilidad de la roca.

Tras la ejecución de las tronaduras de prueba, se realizan pruebas de molienda batch para determinar los índices de trabajo por tipo de roca y en función del factor de carga. Los resultados indican que el índice de trabajo varía según el factor de carga. En la Figura 2 se muestra la tendencia del índice de trabajo en función del factor de carga para un mismo tipo de roca.



**Figura 2: Índice de trabajo en función del factor de carga (Nielsen y Kristiansen, 1996).**

De la figura es claro que a mayor factor de carga se reduce el índice de trabajo, resultado que los autores atribuyen al mayor nivel de microfrazura generado en la tronadura de prueba con mayor factor de carga.

En la misma línea, en el estudio de Workman y Eloranta (2003) se discute la importancia del nivel de microfrazura en el material post tronadura en relación al impacto en el consumo energético de las operaciones de conminución.

En este estudio los autores plantean que hay dos aspectos claves al momento de estudiar los efectos de la tronadura sobre las operaciones de conminución. El primero se refiere al tamaño de los fragmentos del material, es decir, a la distribución de tamaño de los

fragmentos del material post tronadura, aspecto que los autores clasifican como la parte *visible* del producto de la tronadura.

El segundo aspecto se refiere al nivel de acondicionamiento en los fragmentos del material post tronadura, es decir, a las microfrazas internas generadas por la tronadura, aspecto que los autores clasifican como la parte *invisible* del producto de la tronadura.

Sobre estos dos aspectos, los autores plantean que no se debe considerar solo la distribución de tamaño en la optimización de las operaciones de tronadura, sino también el nivel de acondicionamiento de los fragmentos. Se destaca, además, respecto a la distribución de tamaño de los fragmentos del material post tronadura, estas se pueden medir directamente mediante técnicas de análisis de imágenes, mientras que el nivel de fracturamiento interno puede medirse de manera indirecta mediante estudios de producción y consumo energético.

Los autores destacan que la productividad, el consumo energético y el grado de liberación del material son los factores principales en la efectividad de las operaciones de conminución de chancado y molienda.

Según lo expuesto por los autores, es claro que el nivel de microfrazas se ha de medir de manera indirecta puesto que no sería aplicable medirlo directamente en una operación, a diferencia del análisis de imágenes utilizado para determinar distribuciones de tamaño. La dificultad recae en las distintas escalas de tamaño, en lo visible e invisible como indican Workman y Eloranta (2003).

En el estudio se desarrollan dos tronaduras de prueba para las cuales se calculan los requerimientos energéticos desde la tronadura hasta la molienda. El primer caso utiliza un factor de carga de 0.33 Kg/t y el segundo uno de 0.45 Kg/t. Luego, se realizan pruebas de chancado y molienda donde se determina el P80 y F80 de las distribuciones resultantes de cada operación. En las Tablas 3 y 4 se muestran los resultados del estudio.

**Tabla 3: Requerimientos energéticos y costos para tronadura de prueba con factor de carga de 0.33 Kg/t (Workman y Eloranta, 2003).**

Operation	Feed size	Product size	Work input	Energy cost
	cm	cm	kwh/ton	\$/ton
Explosives	∞	40	.24	.087
Primary crushing	40	10.2	.23	.016
Secondary crushing	10.2	1.91	.61	.043
Grinding	1.91	.0053	19.35	1.35
<b>Totals</b>			20.43	1.50

**Tabla 4: Requerimientos energéticos y costos para tronadura de prueba con factor de carga de 0.45 Kg/t (Workman y Eloranta, 2003).**

Operation	Feed size	Product size	Work input	Energy cost
	cm	cm	kwh/ton	\$/ton
Explosives	∞	30	.27	.119
Primary crushing	30	10.2	.135	.009
Secondary crushing	10.2	1.91	.428	.030
Grinding	1.91	.0053	13.55	.949
<b>Totals</b>			14.38	1.107

Los resultados indican que el requerimiento energético del segundo caso es menor, resultado que se basa en lo que plantean Nielsen y Kristiansen (1996) en que el índice de trabajo es menor para un factor de carga mayor, esto a pesar que el requerimiento energético y costo de la operación de tronadura es mayor en el segundo caso por utilizar mayor cantidad de explosivos, lo que refuerza la idea que es en la tronadura donde es más eficiente incrementar costos en pos de un beneficio del sistema.

Notar que este estudio considera solo un tipo de roca (taconita) y un solo tipo de explosivo (ANFO pesado) con dos factores carga. Si bien el resultado del estudio es claro en cuanto a la relación entre el índice de trabajo y el factor de carga, sería interesante evaluar como varían los resultados para diferentes tipos de explosivos.

En respuesta a lo anterior, en el estudio de Khademian y Bagherpour (2017) se aborda el efecto del tipo de explosivo de sobre la chancabilidad y moliendabilidad de un material. Mediante la ejecución de tronaduras de prueba en bloques de granito se evalúa el impacto de utilizar diferentes explosivos (ANFO, Emulsión y Pentolita). Las tronaduras se realizan con el mismo nivel de energía para poder comparar el efecto de emplear distinto explosivo, los cuales se caracterizan según la VOD. Tras la ejecución de las tronaduras de prueba, se elaboran muestras para realizar pruebas de chancado y molienda batch.

De los resultados de las pruebas de conminución se destaca que, a mayor VOD, aumenta la chancabilidad y moliendabilidad del material, tal que la mayor VOD es de la Pentolita, seguido de la Emulsión y el ANFO.

La chancabilidad del material se cuantifica mediante el P80 de la distribución de tamaño resultante de la prueba de chancado y el índice de chancabilidad (CI). El índice de chancabilidad corresponde al porcentaje bajo 2 mm en la distribución. La Figura 3 muestra la tendencia de estos indicadores en función del tipo de explosivo.



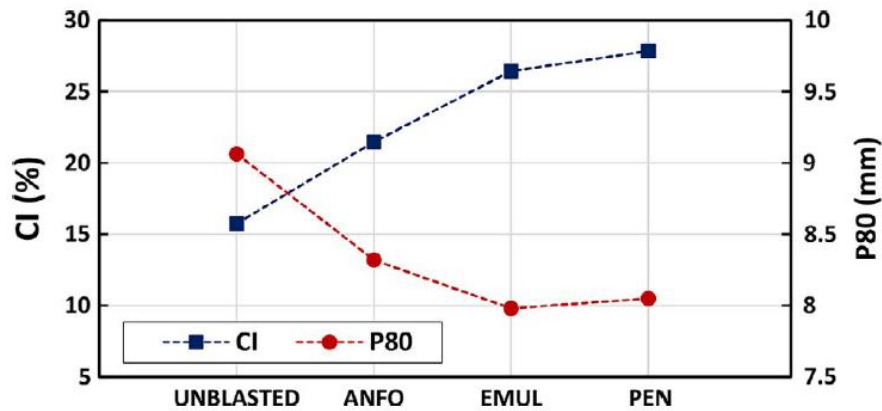


Figura 3: Índice de chancabilidad y P80 en función del tipo de explosivo (Khademian y Bagherpour, 2017).

Respecto a la moliendabilidad del material, esta se cuantifica mediante el índice de trabajo de Bond y el rendimiento. La Figura 4 muestra la tendencia de estos indicadores en función del tipo de explosivo.

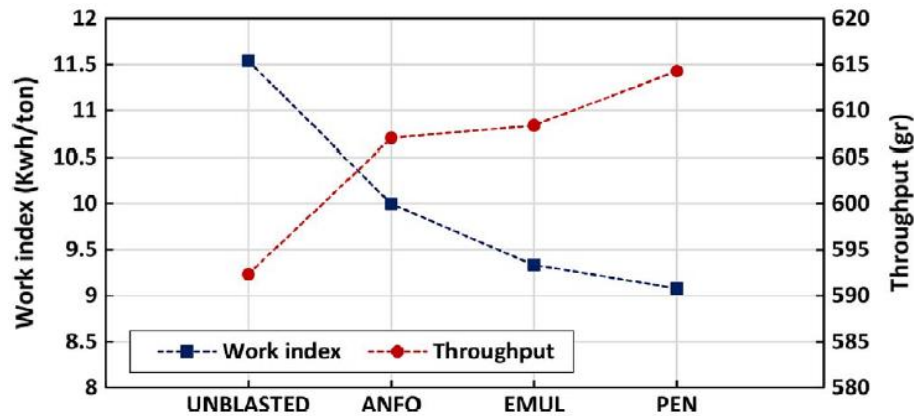


Figura 4: Índice de trabajo y rendimiento en función del tipo de explosivo (Khademian y Bagherpour, 2017).

De estos resultados se desprende que la VOD del explosivo influye en el desempeño del chancado y molienda, particularmente en la reducción del índice de trabajo.

Ciertamente este estudio se realiza en condiciones controladas y específicas y no representa necesariamente lo que ocurre en tronaduras a escala real donde intervienen múltiples variables, no obstante, son resultados clave que permiten ahondar en lo que respecta al acondicionamiento del material post tronadura. Estos resultados se complementan con lo obtenido por Nielsen y Lownds (1997), puesto que tanto el factor de carga (para un mismo tipo de explosivo), así como diferentes tipos de explosivo (para un mismo nivel de energía) son factores del diseño de tronadura que tienen influencia en las operaciones de chancado y molienda.

En un estudio de Nielsen y Malvik (1999) se realizan tronaduras de prueba y pruebas de conminución batch para dos tipos de roca (taconita e ilmenita) para evaluar los efectos

de la tronadura en las operaciones de conminución. Además, se propone una técnica para medir el nivel de microfractura en fragmentos de material post tronadura.

Los resultados de las pruebas de conminución indican que tanto la chancabilidad como la moliendabilidad del material mejoran a mayor factor de carga, mismo resultado que Nielsen y Kristiansen (1996). En la Figura 5 se muestran los resultados de la prueba de molienda para taconita donde el indicador de desempeño de la moliendabilidad es el P80.

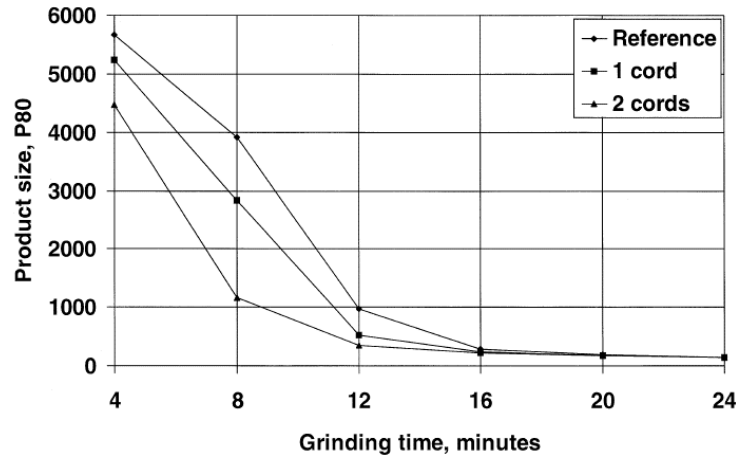


Figura 5: P80 en función del tiempo de molienda para taconita (Nielsen y Malvik, 1999).

De la figura notar que la Referencia se refiere a una distribución de tamaño elaborada a partir de fragmentos de material no sometidos a tronadura. Los P80 finales de la tronadura de referencia, de la tronadura con 1 cordón y de la tronadura con 2 cordones son 146  $\mu\text{m}$ , 142  $\mu\text{m}$  y 140  $\mu\text{m}$  respectivamente. Estos resultados indican que, a medida que aumenta el tiempo de molienda, el efecto del factor de carga es menos importante, lo que permite suponer que el nivel de microfractura en los fragmentos de material se reduce en la medida que el material es molido hasta un punto en que estas estructuras son *consumidas* cuando los tamaños de los fragmentos son suficientemente bajos.

Adicionalmente, el estudio plantea una técnica para cuantificar el nivel de microfractura en fragmentos de material obtenidos de tronaduras de prueba. La técnica involucra una examinación microscópica de las secciones finas de las distribuciones de tamaño resultantes (1-2 mm) de las tronaduras de prueba. La técnica corresponde a espectrometría fluorescente, técnica que involucra la impregnación de una sustancia fluorescente (resina epoxy) en ciertos fragmentos del material para luego utilizar un microscopio óptico con filtro fluorescente para poder visualizar las microfracturas.

La metodología para cuantificar el nivel de microfractura es mediante el registro sistemático de fracturas que intersectan líneas de referencia paralelas a un intervalo de 0.6 mm a lo largo de la sección. Las fracturas se clasifican en fracturas pequeñas (Small Cracks), fracturas de borde (Boundary Cracks) y fracturas de grano (Grain Cracks), tal que:

- Las fracturas pequeñas se forman solo a lo largo de un tramo corto del límite entre los granos del material, o aquellas que penetran en un solo grano sin atravesarlo
- Las fracturas de borde se forman a lo largo de los límites de varios granos de material
- Las fracturas de grano se forman cortando completamente uno o más granos de material y pueden estar asociadas con las fracturas de borde

En la Tabla 5 se muestran los resultados de las mediciones de microfracturas en función del factor de carga, tal que, a mayor número de muestra, mayor el factor de carga. Por ejemplo, el factor de carga de la muestra de Taconita 2 es mayor que el de Taconita 1.

**Tabla 5: Medición y clasificación de microfracturas para tres minerales en función del factor de carga (Nielsen y Malvik, 1999).**

Sample	Small cracks	Boundary cracks	Grain cracks
Taconite 1	98	97	45
Taconite 2	146	130	72
US taconite 1	55	48	15
US taconite 2	73	116	23
US taconite 3	84	103	35
Ilmenite ore 1	40	9	31
Ilmenite ore 2	74	15	48
Ilmenite ore 3	97	18	80

De la tabla es claro que emplear mayor energía genera mayor cantidad de microfracturas en los tres tipos de mineral. Es interesante comparar los resultados de taconita e ilmenita entre sí, tal que al comparar la cantidad de fracturas de la muestra de Taconita 1 con la cantidad de fracturas de Ilmenita 1, se tiene que la primera tiene una cantidad de fracturas notoriamente mayor que la segunda (de los tres tipos), esto a pesar que tanto la taconita como la ilmenita tienen una dureza entre 5.5 y 6, lo que permite plantear que la diferencia en cantidad de microfracturas no depende solo de la dureza del material, sino que del nivel de exposición de las microfracturas, es decir, del número de microfracturas expuestas en superficie y el número de microfracturas ocluidas dentro de los fragmentos.

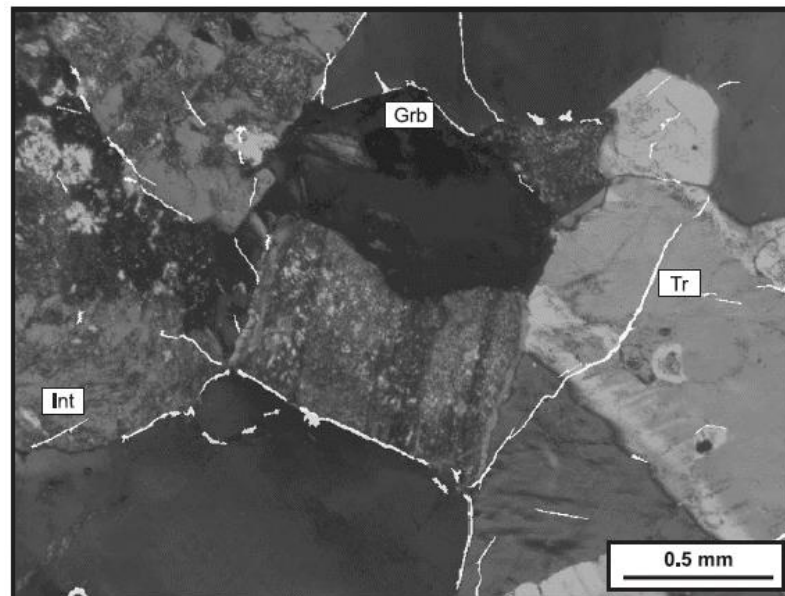
Continuando con técnicas para medir microfracturas, en un estudio de Akesson et al. (2004) se plantea una clasificación similar a la propuesta por Nielsen y Malvik (1999). Las fracturas se clasifican en fracturas intergranulares, fracturas transgranulares y fracturas intragranulares, tal que:

- Las fracturas intergranulares se forman a lo largo de los límites de granos de mineral

- Las fracturas transgranulares se forman pudiendo atravesar múltiples granos de mineral
- Las fracturas intragranulares se forman al interior de los granos de mineral

Notar que el estudio emplea la iniciación y propagación de microfrazuras mediante esfuerzos de carga uniaxial cíclica, esto mediante un test de carga uniaxial cíclica propiamente tal. Tal mecanismo de generación de microfrazuras difiere completamente de lo que es una operación de tronadura con explosivos, no obstante, resulta interesante el tipo de clasificación y el uso de espectrometría fluorescente (igual que Nielsen y Malvik, 1999) en conjunto con un análisis digital de imágenes cómo técnica de medición de microfrazuras.

En la Figura 6 se muestra una imagen de la aplicación de esta técnica donde es posible observar las microfrazuras intergranulares (Grb), microfrazuras transgranulares (Tr) y microfrazuras intragranulares (Int).



**Figura 6: Visualización de clasificación de microfrazuras (Akesson et al., 2004).**

Un aspecto interesante de esta figura, es que al visualizar las microfrazuras, no es posible determinar la extensión de estas hacia el interior del fragmento y tampoco las microfrazuras que puedan estar ocluidas al interior. Esto indica que técnicas de conteo y clasificación de microfrazuras como este estudio o el de Nielsen y Malvik (1999) pueden no ser un indicador representativo del nivel de microfrazura *real* en fragmentos de un material.

Hasta ahora se han revisado estudios sobre los efectos de la tronadura en las operaciones de molienda, ya que el trabajo desarrollado es para material post tronadura de operaciones de minería subterránea donde los minerales sulfurados predominan. No

obstante, es interesante revisar a grandes rasgos la influencia de las microfracturas sobre una operación de lixiviación.

En el estudio de Parra et al. (2015) se investiga la influencia de las microfracturas generadas por operaciones de tronadura sobre la extracción de cobre, además que se propone una técnica de medición de microfracturas.

En este estudio se realiza una tronadura controlada sobre un mineral sintético de cobre del cual se forman muestras con diferentes niveles de microfractura (con leyes de cobre muy similares). El nivel de microfractura se mide mediante una técnica de espectrometría de Rayos X. Luego, las muestras son lixiviadas por 7 días obteniéndose los resultados de extracción de cobre (Figura 7).

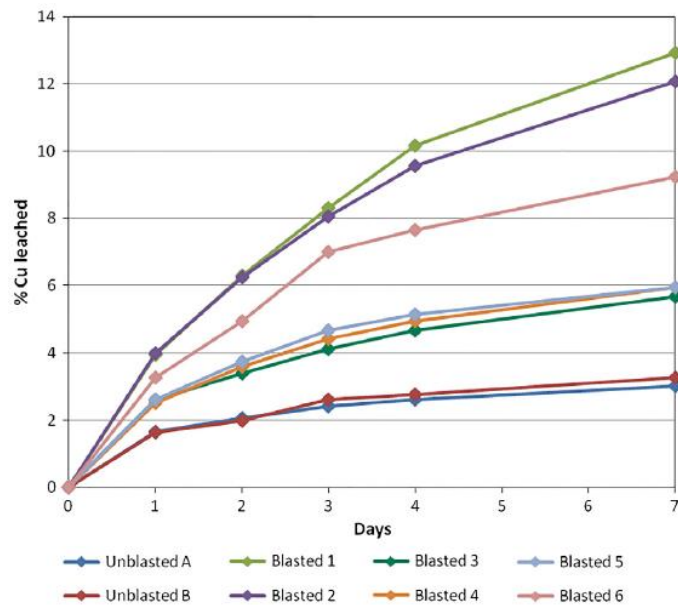


Figura 7: Eficiencia de extracción de cobre (Parra et al., 2015).

Considerando que el nivel de microfractura decrece según el número de las muestras del 1 a 6 (donde 1 es mayor), se observa que la extracción de cobre es mayor para las muestras con mayor nivel de microfractura (Muestras 1 y 2), lo que indica preliminarmente la correlación que a mayor nivel de acondicionamiento mayor es la extracción. Estos resultados corresponden a un estudio exploratorio para calibrar un modelo HSBM (Hybrid Stress Blasting Model) utilizado para modelar el daño interno de materiales, es decir, para identificar zonas con diferentes niveles de fractura. Luego de la calibración del modelo, de pruebas de validación y análisis estadísticos, los autores plantean que el acondicionamiento generado por la tronadura no es consistente ya que los niveles de microfractura varían para el mismo testigo utilizado, tal que para zonas con un nivel intermedio de microfractura puede haber mejoras en extracción de un 1%, mientras que en zonas de bajo nivel el incremento es despreciable.

Según los autores, los resultados se sustentan en que la mayoría de las microfracturas generadas corresponden a las formadas a lo largo de los bordes (intergranulares) y en

menor medida a las que se forman dentro de los granos de mineral (intragranulares), lo que en consecuencia manifiesta la dificultad en la liberación del cobre de manera consistente en pos de una mejora en la extracción.

De los métodos para medir microfracturas revisados, notar que las técnicas de medición de Akesson et al. (2004), Nielsen y Malvik (1999) y Parra et al. (2015), si bien tienen en común la utilización de la técnica de espectrometría, las metodologías de clasificación difieren entre sí, lo que permite plantear que no se tiene una técnica dedicada y aceptada para medir microfracturas. Además, estas técnicas no permiten determinar la extensión o ramificación de las microfracturas expuestas en superficie hacia el interior de los fragmentos, lo que condiciona la medición *real* del nivel de microfractura. Es este último aspecto el que motiva la aplicación de una técnica de adsorción física de gas en materiales, fenómeno con el cual se espera dar cuenta de las microfracturas hacia el interior de los fragmentos mediante la inyección y adsorción de moléculas de gas que cubran la superficie asociada a las microfracturas al interior de los fragmentos.

## **2.5 Técnica de medición de microfracturas**

La técnica de medición de microfracturas se basa en el fenómeno de adsorción física de gas en materiales, proceso comúnmente utilizado en las áreas de la química y ciencia de los materiales para el análisis de porosidad de materiales. La aplicación de un proceso de adsorción sobre una muestra de material permite medir el nivel de porosidad de esta. La técnica de medición de microfracturas plantea medir el nivel de microfractura de muestras de material post tronadura a través del nivel de porosidad.

La adsorción es el fenómeno en que moléculas de gas (adsorbato) se adhieren en la superficie de un material (adsorbente). Se puede diferenciar entre fisorción (adsorción física) y quimisorción (adsorción química), tal que en la fisorción la interacción entre las moléculas de gas y el material es mediante fuerzas de Van der Waals, es decir, se tiene una interacción débil (ScienceDirect, 2024), mientras que la quimisorción involucra una interacción mediante enlaces químicos. En este trabajo solo se emplea la variante de fisorción.

En un proceso de adsorción se realiza la inyección progresiva de gas a baja temperatura sobre una muestra de fragmentos de un material. El mecanismo de adsorción es tal que las moléculas de gas se van adsorbiendo en la superficie de los fragmentos a medida que aumenta la presión relativa del gas hasta alcanzar la presión de saturación. La adsorción de moléculas ocurre tanto en la superficie externa de los fragmentos como en la superficie interna de estos.

Al alcanzar la presión de saturación del gas, el proceso de adsorción se invierte, tal que inicia la separación (desorción) de las moléculas de gas de la superficie del material progresivamente en la medida que se reduce la presión relativa del gas hasta una presión relativa mínima, presión para la cual termina el proceso.

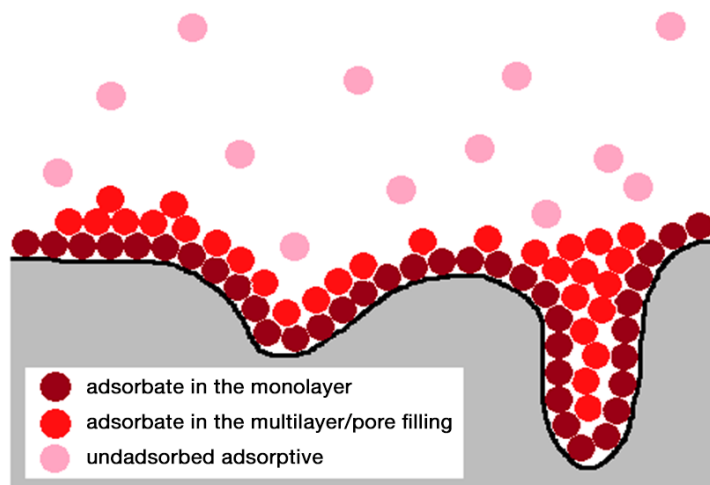
Básicamente, un proceso de adsorción se divide en dos etapas:

- Etapa 1: Mediante incrementos sucesivos de presión relativa, se realiza la adsorción (adherencia) de moléculas de gas sobre una muestra de fragmentos de un material, esto ocurre a partir de una presión relativa de 0 hasta una presión relativa de 1 (presión de saturación del gas)
- Etapa 2: Habiéndose alcanzado la presión de saturación del gas, mediante decrementos sucesivos de presión relativa, se realiza la desorción (separación) de las moléculas de gas de la muestra, esto a partir de la presión de saturación del gas hasta una presión relativa de 0

Una muestra de fragmentos se refiere a un conjunto de fragmentos de cierto rango de tamaño de un determinado material (material post tronadura para este trabajo). Un proceso de adsorción no suele aplicarse sobre un único fragmento por la baja representatividad en los resultados que esto representa debido a la baja escala de tamaño en que opera el proceso, por esta razón se utiliza un conjunto de fragmentos. Debido a la baja escala del fenómeno de adsorción (nanómetros), una muestra de fragmentos se mide en masa, debido a esto, parámetros como el volumen de gas adsorbido están normalizados por la masa de la muestra.

La temperatura utilizada en un proceso de adsorción depende del gas utilizado. Para este trabajo se emplea gas nitrógeno a 77 K (temperatura de equilibrio).

En la Figura 8 se muestra un esquema de un proceso de adsorción. Se identifica el material adsorbente, el gas adsorbato adsorbido y no adsorbido.



**Figura 8: Esquema de un proceso de adsorción de gas sobre un material ([Depiction of monolayer formation], 2024).**

Al aplicar un proceso de adsorción sobre una muestra de material, para cada una de las dos etapas descritas se registra la cantidad de volumen de gas adsorbido sobre la muestra, tal que:

- En la etapa 1 se registra la cantidad de volumen de gas adsorbido  $v$  para cada incremento de presión relativa  $p/p_0$  desde una presión relativa de 0 hasta la presión de saturación  $p_0$ . De esta manera se construye una *isoterma de adsorción*
- En la etapa 2 se registra la cantidad de volumen de gas adsorbido  $v$  para cada decremento de presión relativa  $p/p_0$  desde la presión de saturación  $p_0$  hasta una presión relativa de 0. De esta manera se construye una *isoterma de desorción*

Las isotermas de adsorción y desorción describen la interacción entre el gas y el material durante la primera y segunda etapa del proceso respectivamente. Son también el objeto a partir del cual se determinan los parámetros de salida de la técnica que cuantifican el nivel de porosidad de una muestra. En la Figura 9 se muestran los tipos de isotermas más comunes según la clasificación IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry).

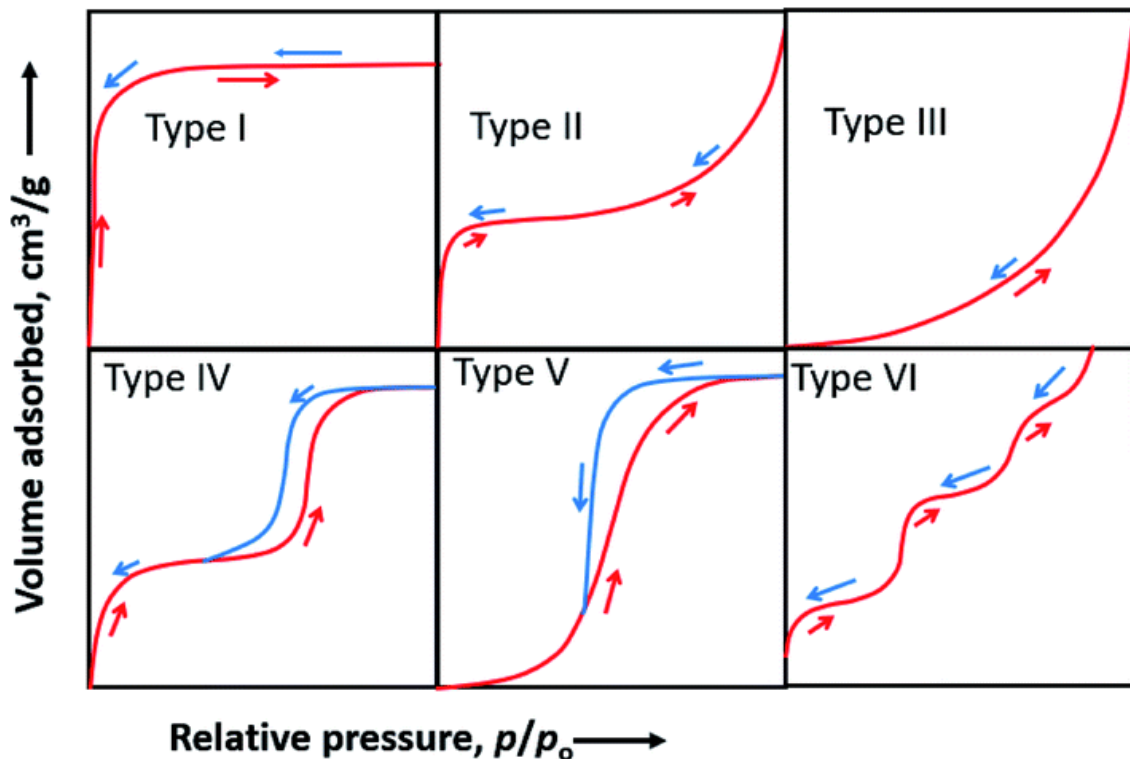


Figura 9: Tipos de isotermas (adsorción en rojo y desorción en azul) según clasificación IUPAC. (Kumar et al., 2019).

Notar que el volumen de gas adsorbido se mide en  $\text{cm}^3/\text{g}$  al estar normalizado por la masa de la muestra, por esta razón, las cantidades que se calculan a partir de este volumen también lo están. Además, este volumen corresponde a un valor acumulado, es decir, indica el volumen total de gas adsorbido para una determinada presión relativa.



Respecto a estos tipos de isothermas se puede decir lo siguiente:

- Isothermas Tipo I: Describen el comportamiento de materiales en que el tamaño de los poros es ligeramente mayor al diámetro de las moléculas de gas. A materiales con este comportamiento se les denomina microporosos, es decir, predominan poros de tamaño inferior a 2 nm
- Isothermas Tipo II: Describen el comportamiento de materiales con amplia variedad de tamaño de poros, tal que la formación de capas de moléculas de gas es indefinida. A materiales con este comportamiento se les denomina macroporosos, es decir, predominan poros de tamaño superior a 50 nm
- Isothermas Tipo III: Describen un comportamiento de materiales en que el gas adsorbido aumenta sin límite causando un crecimiento exponencial, lo cual es indicador de una baja interacción entre el material y el gas adsorbato
- Isothermas Tipo IV: Describen un comportamiento similar al tipo II, pero la formación de capas de moléculas de gas está limitada. A materiales con este comportamiento se les denomina mesoporosos, es decir, predominan poros de tamaño entre 2 nm y 50 nm. También presentan cierto nivel de histéresis (diferencia entre isoterma de adsorción y desorción)
- Isothermas Tipo V: Describen un comportamiento de alta afinidad de las moléculas de gas entre sí, lo que causa un crecimiento acelerado para presiones relativas intermedias. Presentan un nivel de histéresis mayor que el tipo IV
- Isothermas Tipo VI: Describen un comportamiento en que las capas de moléculas de gas se forman una después de la otra

Entre los aspectos que condicionan el desempeño de un proceso de adsorción se encuentra el tamaño de los fragmentos de la muestra. En la literatura se manifiesta que el tamaño de los fragmentos de la muestra influye en el desempeño del proceso de adsorción, y, por tanto, en la forma de las isothermas resultantes. En un estudio de adsorción con nitrógeno para un material de esquisto (Lyu et al., 2021), se expresa que, a menor tamaño de fragmentos, se construyen isothermas de mejor manera.

La importancia de una adecuada forma de las isothermas se debe a la aplicación de modelos sobre estas para calcular los parámetros que cuantifican el nivel de porosidad de una muestra de material.

El primer parámetro utilizado para cuantificar el nivel de porosidad de una muestra es el área superficial específica. El área superficial específica es sino el parámetro más conocido para medir el nivel de porosidad de una muestra de material en lo que respecta a procesos de adsorción en la literatura. Es un parámetro que mide el nivel de porosidad

mediante el área superficial de las porosidades de los fragmentos de una muestra y se mide en  $\text{m}^2/\text{g}$  (área superficial normalizada por la masa de la muestra).

El segundo parámetro utilizado para cuantificar el nivel de porosidad de una muestra es el volumen de poros. El volumen de poros es un parámetro que mide el nivel de porosidad mediante el volumen libre de las porosidades de los fragmentos de una muestra y se mide en  $\text{cm}^3/\text{g}$  (volumen de poros normalizado por la masa de la muestra). Nótese que a pesar que el volumen de poros es una cantidad normalizada por la masa, en la literatura no se le refiere como volumen de poros específico, sino que simplemente volumen de poros. Dicho esto, en las siguientes secciones se describen los métodos para calcular estos parámetros utilizando la información de las isothermas resultantes de los procesos de adsorción que se realicen sobre muestras de material.

### 2.5.1 Área superficial específica

El método para calcular el parámetro de área superficial específica corresponde a la denominada teoría BET, nombre en honor a sus autores Brunauer, Emmett y Teller (Brunauer et al., 1938) quienes desarrollaron un modelo que expande la teoría del mecanismo de adsorción de moléculas de gas en materiales desarrollada anteriormente por Langmuir (1916).

La teoría BET explica el fenómeno de fisisorción de gases en materiales mediante el concepto de multicapas expandiendo el concepto de monocapa de Langmuir. Básicamente, la teoría BET plantea que la adsorción de moléculas de gas se realiza mediante la construcción parcial de capas de moléculas de gas. En la Figura 10 se muestra una representación del mecanismo de adsorción en multicapas de la teoría BET.

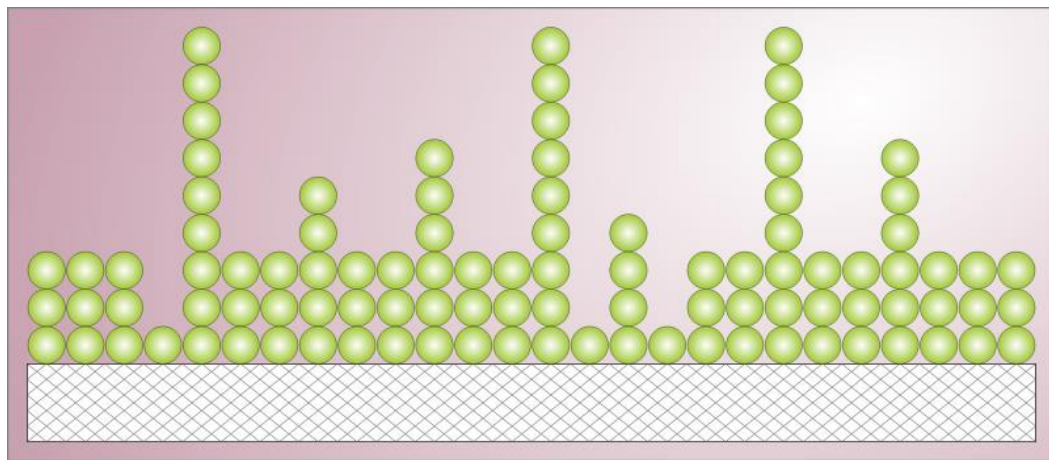
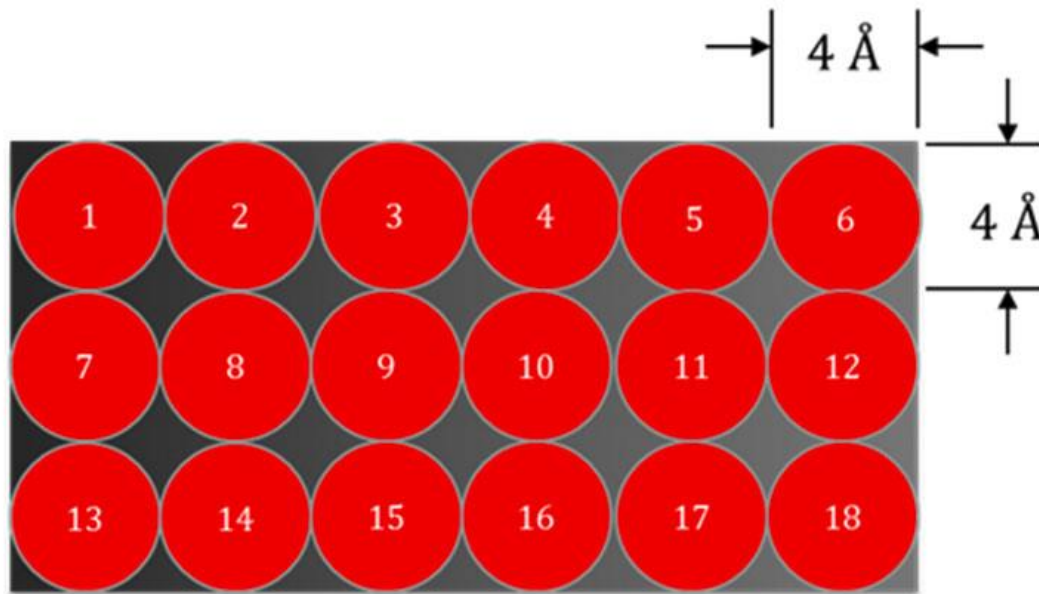


Figura 10: Mecanismo de adsorción en multicapas según teoría BET (Life of Riley, 2010).

A la capa de moléculas de gas en contacto con la superficie del material se le denomina *monocapa*. Según la teoría BET, para una muestra de fragmentos de un material sujeta a un proceso de adsorción, las moléculas de gas se van adsorbiendo en la superficie del material (superficie externa e interna) formando una monocapa que cubre toda la superficie del material. La importancia de la monocapa radica en que se tiene un área

superficial y volumen asociados que son clave para el cálculo del parámetro de área superficial específica.

La metodología de cálculo del área superficial específica de la teoría BET se basa en determinar el área de contacto entre la monocapa y la superficie del material, esto porque cada molécula de gas de la monocapa tiene un área transversal determinada, tal que, si se conoce cuántas moléculas de gas están en contacto con la superficie del material (mediante el volumen de gas adsorbido que corresponde a la monocapa), es posible determinar el área superficial total de la monocapa, y luego, el área superficial específica utilizando la masa de la muestra en estudio. En la Figura 11 se muestra un esquema de esta metodología de cálculo.



$$Surface\ Area = 4\text{\AA} * 4\text{\AA} * 18 = 288\ \text{\AA}^2$$

**Figura 11: Esquema de metodología de cálculo de área superficial específica según teoría BET. ([Simplified Depiction of a BET Surface area calculation], 2024).**

La Ecuación 1 muestra la expresión para calcular el área superficial específica según la teoría BET.

$$SSA = \frac{v_m N_a S}{V} \left[ \frac{m^2}{g} \right]$$

**Ecuación 1: Área superficial específica según teoría BET (Brunauer et al., 1938).**

donde:

- $v_m$  es el volumen de la monocapa en  $\text{cm}^3/\text{g}$
- $N_a$  es el número de Avogadro en  $\text{mol}^{-1}$ , cuyo valor es  $6.02 \times 10^{23}$

- $s$  es la sección transversal de una molécula de gas nitrógeno en  $\text{nm}^2$ , cuyo valor es  $0.16 \text{ nm}^2$  ( $16 \text{ \AA}$ )
- $V$  es el volumen molar del gas en  $\text{cm}^3/\text{mol}$ , cuyo valor es  $22,400 \text{ cm}^3/\text{mol}$

De esta ecuación,  $V$ ,  $s$  y  $N_a$  son conocidos, por lo que el cálculo del  $SSA$  se reduce a determinar el volumen de la monocapa  $v_m$ .

Notar que el  $SSA$  está normalizada por la masa de la muestra, específicamente porque el volumen de gas de la monocapa está normalizado.

El volumen de la monocapa se determina utilizando el modelo para isothermas de adsorción que plantea la teoría BET.

$$\frac{1}{v((p_0/p) - 1)} = \frac{c - 1}{v_m c} \left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{1}{v_m c}$$

**Ecuación 2: Modelo de isoterma de adsorción según teoría BET (Brunauer et al., 1938).**

donde:

- $v_m$  es el volumen de la monocapa en  $\text{cm}^3/\text{g}$
- $v$  es el volumen de gas adsorbido en  $\text{cm}^3/\text{g}$  para una presión relativa  $p/p_0$
- $c$  es la constante BET, tal que  $c = \exp\left(\frac{E_1 - E_L}{RT}\right)$
- $E_1$  y  $E_L$  son el calor de adsorción y vaporización de la monocapa respectivamente

De esta ecuación, el volumen de gas adsorbido  $v$  y las presiones relativas  $p/p_0$  son datos que se obtienen de una isoterma.

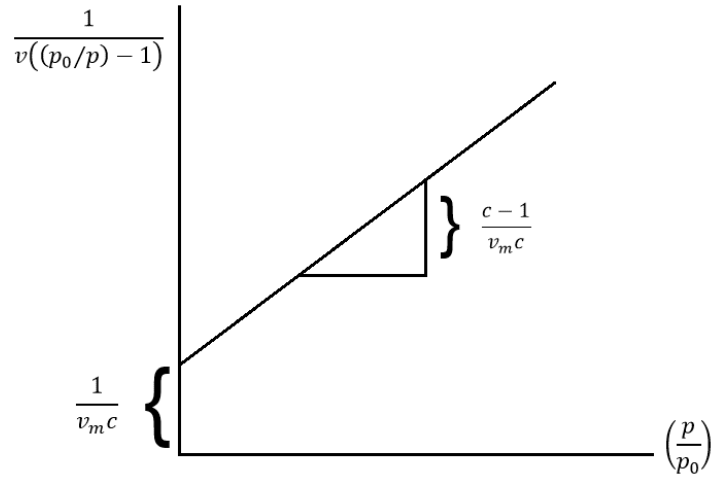
El aspecto característico de esta ecuación es que tiene la forma de una función afín:

$$y = mx + n$$

donde:

$$\frac{1}{v((p_0/p) - 1)} = y \quad ; \quad \frac{c - 1}{v_m c} = m \quad ; \quad \left(\frac{p}{p_0}\right) = x \quad ; \quad \frac{1}{v_m c} = n$$

De esta manera, se puede linealizar la isoterma de adsorción (Figura 12).



**Figura 12: Linealización de isoterma de adsorción según teoría BET (Brunauer et al., 1938).**

Con los datos de una isoterma de adsorción, es decir, con los pares de presión relativa  $p/p_0$  y volumen de gas adsorbido  $v$ , el procedimiento para calcular el volumen de la monocapa  $v_m$  es el siguiente:

- Para cada par de  $v$  y  $p/p_0$  se calcula la expresión  $\frac{1}{v((p_0/p)-1)}$
- Se construye la isoterma linealizada al graficar los puntos de  $p/p_0$  y  $\frac{1}{v((p_0/p)-1)}$
- Se seleccionan a lo menos tres de los puntos graficados para realizar una regresión lineal
- A partir de la regresión, se obtienen valores numéricos para la pendiente  $a = \frac{c-1}{v_m c}$  y el coeficiente de posición  $b = \frac{1}{v_m c}$
- A partir de  $a$  y  $b$  se calcula el volumen de la monocapa  $v_m$  y la constante  $c$

El cálculo de  $v_m$  y  $c$  se realiza con las Ecuaciones 3 y 4 respectivamente.

$$v_m = \frac{1}{a + b}$$

**Ecuación 3: Volumen de monocapa según teoría BET (Brunauer et al., 1938).**

$$c = 1 + \frac{a}{b}$$

**Ecuación 4: Constante BET (Brunauer et al., 1938).**

Tras el cálculo del volumen de la monocapa  $v_m$  se utiliza la Ecuación 1 para obtener el área superficial específica  $SSA$ .

Un aspecto importante de la teoría BET, es que la selección de puntos para la regresión lineal está limitada al rango de presiones relativas  $p/p_0$  de 0.05 - 0.30 puesto que para este rango ocurre la formación de la monocapa (Brunauer et al., 1938).

### 2.5.2 Volumen de poros

El método para calcular el parámetro de volumen de poros se basa en el análisis de mesoporos desarrollado por Lowell et al. (2004). Este método hace uso de los datos de presión relativa  $p/p_0$  y volumen de gas adsorbido  $v$  de una isoterma de adsorción o desorción y está construido específicamente para gas nitrógeno.

Este método se basa en la ecuación del radio de Kelvin (Halsey, 1948), la cual describe el tamaño de un poro de un material según la presión relativa de nitrógeno durante un proceso de adsorción.

$$R_k = \frac{4.15}{\log(p_0/p)} [\text{Å}]$$

**Ecuación 5: Radio de Kelvin (Halsey, 1948).**

El radio de Kelvin depende solamente de la presión relativa de nitrógeno y este aumenta conforme aumenta la presión.

En términos simples, a medida que aumenta la presión relativa de nitrógeno durante la etapa de adsorción, se desarrolla la condensación de moléculas de nitrógeno en los poros del material, esto hasta alcanzar la presión de saturación  $p_0$ . Luego, durante la etapa de desorción, se desarrolla la evaporación de las moléculas de nitrógeno de los poros a medida que se reduce la presión relativa de nitrógeno. El radio de Kelvin mide el tamaño de los poros según la cantidad de moléculas de nitrógeno que se condensaron o evaporaron de estos.

Ahora bien, el radio de Kelvin no describe el tamaño de un poro propiamente tal. El tamaño de un poro se describe mediante el radio de poro, el cual se compone de dos cantidades: el radio de Kelvin y el espesor del film de nitrógeno líquido en las paredes del poro.

El espesor del film corresponde a las moléculas de nitrógeno que se adsorben en las paredes de un poro previo a la condensación durante la etapa de adsorción. Para la etapa de desorción, el espesor del film corresponde a las moléculas de nitrógeno remanentes en el poro posterior a la evaporación de las moléculas de nitrógeno desde el poro.

El radio de poro se calcula de dos maneras dependiendo de la geometría de poro utilizada. Si se utiliza una geometría cilíndrica, el radio de poro se calcula con la Ecuación 6, y si se utiliza una geometría de grieta, el radio de poro se calcula con la Ecuación 7.

$$R_p = R_k + t \text{ [Å]}$$

**Ecuación 6: Radio de poro para geometría cilíndrica (Lowell et al., 2004).**

$$R_p = R_k + 2t \text{ [Å]}$$

**Ecuación 7: Radio de poro para geometría de grieta (Lowell et al., 2004).**

donde  $R_k$  es el radio de Kelvin y  $t$  es el espesor del film.

Respecto al espesor del film  $t$ , este se calcula con la ecuación de Halsey (1948).

$$t = 3.44 \left( \frac{5}{\ln(p_0/p)} \right)^{1/3} \text{ [Å]}$$

**Ecuación 8: Espesor del film para gas nitrógeno (Halsey, 1948).**

A continuación, se describe el procedimiento de Lowell para calcular el parámetro de volumen de poros a partir de los datos de presión relativa de nitrógeno  $p/p_0$  y volumen de gas adsorbido  $v$  de una isoterma de desorción.

El procedimiento considera la construcción de una tabla de 14 columnas. En la Sección Anexos se adjunta una tabla de 14 columnas correspondiente a un caso de estudio de este trabajo (Sección 4.1.3).

Primero, se construye la columna 1 con los valores de presión relativa  $p/p_0$  de la isoterma de desorción. Se asignan a la columna los valores de presión comprendidos entre el máximo (de 0.99 generalmente) y un valor inferior dependiendo de los datos (0.50 para este trabajo). Notar que los valores de  $p/p_0$  decrecen desde el máximo al corresponder a una isoterma de desorción.

Segundo, se construye la columna 2 con los valores de volumen de gas adsorbido  $v$  de la isoterma de desorción. Se asignan a la columna los valores de  $v$  correspondientes a las presiones relativas de la columna 1.

Tercero, se construye la columna 3 mediante el cálculo del radio de Kelvin  $R_k$  para cada valor de presión relativa  $p/p_0$  según la Ecuación 5.

Cuarto, se construye la columna 4 mediante el cálculo del espesor del film  $t$  para cada valor de presión relativa  $p/p_0$  según la Ecuación 8.

Quinto, se construye la columna 5 mediante el cálculo del radio de poro  $R_p$  utilizando los valores de  $R_k$  y  $t$  (para cada valor de presión relativa  $p/p_0$ ) según la Ecuación 7. Para este trabajo se utiliza la geometría de grieta al considerar que la estructura de las microfracturas se asemeja menor a una forma de grieta en vez de una forma cilíndrica.

Sexto, se construye la columna 6 mediante el cálculo del radio de Kelvin promedio  $\bar{R}_k$ . El  $\bar{R}_k$  es el promedio entre dos radios de Kelvin  $R_k$  consecutivos.

Séptimo, se construye la columna 7 mediante el cálculo del radio de poro promedio  $\bar{R}_p$ . El  $\bar{R}_p$  es el promedio entre dos radios de poro  $R_p$  consecutivos.

Octavo, se construye la columna 8 mediante el cálculo del cambio de espesor del film  $\Delta t$ . El  $\Delta t$  es la diferencia entre dos espesores de film  $t$  consecutivos.

Noveno, se construye la columna 9 mediante el cálculo del cambio de volumen de gas adsorbido  $\Delta v$  entre dos presiones relativas  $p/p_0$  consecutivas. En términos simples, este volumen corresponde al volumen de gas evaporado de los poros para un decremento de presión. Por ejemplo, según la Tabla 12 en Anexos, la reducción de presión relativa de 0.99 a 0.98 indica que el volumen de gas nitrógeno evaporado de los poros  $\Delta v$  fue de 0.2 cm<sup>3</sup>/g.

Décimo, se construye la columna 10 mediante la conversión de los  $\Delta v$  de la columna 9 ha estado líquido  $\Delta v_{liq}$  utilizando la Ecuación 9.

$$\Delta v_{liq} = \frac{\Delta v}{22,400} \times 34.84 \left[ \frac{cm^3}{g} \right]$$

**Ecuación 9: Volumen de gas evaporado de los poros en estado líquido para un decremento de presión (Lowell et al., 2004).**

Undécimo, se calculan las primeras celdas de las columnas 11, 12, 13 y 14 (en orden) de la siguiente manera:

Al primer valor de  $\Delta t \Sigma S$  (cambio de volumen del film en las paredes de los poros) de la columna 11 se le asigna el valor 0 (dado que no hay desorción previa). Luego, se calcula el volumen de poros parcial  $V_p$  para  $\Delta t \Sigma S$  de 0 según la Ecuación 10. Este valor corresponde a la primera celda de la columna 12.

$$V_p = \left( \frac{\bar{R}_p}{\bar{R}_k} \right)^2 (\Delta V_{liq} - \Delta t \Sigma S) \left[ \frac{cm^3}{g} \right]$$

**Ecuación 10: Volumen de poros parcial (Lowell et al., 2004).**

Notar que el volumen de poros  $V_p$  corresponde a un volumen de poros parcial para un decremento de presión relativa, no es un volumen acumulado.

Luego, para este  $V_p$  se calcula su respectiva área superficial específica  $S$  según la Ecuación 11. Este valor corresponde a la primera celda de la columna 13.



$$S = \frac{2V_p}{\bar{R}_p} \left[ \frac{m^2}{g} \right]$$

**Ecuación 11: Área superficial específica en función del volumen de poros parcial (Lowell et al., 2004).**

Luego, para esta  $S$  se calcula su respectiva área superficial específica acumulada  $\Sigma S$ . Este valor corresponde a la primera celda de la columna 14.

Duodécimo, se realiza el cálculo de las celdas restantes de las columnas 11, 12, 13 y 14 (fila a fila) de manera equivalente considerando que los  $\Delta t \Sigma S$  de la columna 11 se calculan multiplicando su respectivo  $\Delta t$  con el  $\Sigma S$  de la fila anterior.

Decimotercero, habiéndose completado la tabla se realiza el cálculo del volumen total de poros  $V_{total}$ . Este volumen se obtiene sumando cada valor de  $V_p$  de la columna 12 y corresponde al parámetro de *volumen de poros* propiamente tal.

$$V_{total} = \sum V_p \left[ \frac{cm^3}{g} \right]$$

**Ecuación 12: Volumen total de poros (Lowell et al., 2004).**

Adicionalmente, se puede graficar el volumen de poros parcial  $V_p$  en función del radio de poro promedio  $\bar{R}_p$  para observar la distribución del volúmenes según el tamaño de los poros.

### 2.5.3 Equipo 3Flex

El equipo que realiza los procesos de adsorción es un analizador de adsorción de alto rendimiento modelo 3Flex de Micromeritics. Este equipo está apto para el análisis de materiales microporosos y mesoporosos (Micromeritics, 2024).

El equipo 3Flex es capaz de realizar análisis de adsorción de gases de alta precisión para posterior medición de área superficial específica y volumen de poros. Además, es capaz de realizar análisis de sorción de vapor para estudios específicos, estudios de quimisorción, entre otros.

El laboratorio encargado de realizar los procesos de adsorción con el equipo 3Flex es el Laboratorio de Catálisis y Energía del Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, ubicado en Av. Beauchef 851, 6° piso, edificio sur-poniente, Santiago.



Figura 13: Fotografía del equipo 3Flex de Micromeritics.

## 2.6 Conclusiones

De la revisión desarrollada, en términos generales, se destaca la influencia de las operaciones de tronadura sobre las operaciones de molienda, influencia que se puede manifestar en términos económicos mediante distintos índices de trabajo según el tipo de tronadura, siendo de particular interés el estudio de índices de trabajo para tronaduras con diferentes tipos de explosivo.

En cuanto a las microfracturas, se concluye que no hay una metodología definida y aceptada para cuantificar el nivel de microfractura de un material, sino que, se tienen estudios de caso en donde distintos autores desarrollan sus metodologías para medir microfracturas, ya sea de manera *directa* en la superficie del material o bien de manera *indirecta* mediante pruebas de molienda, motivo que permite desarrollar la técnica tema de estudio para evaluar la aplicabilidad de esta para cuantificar el nivel de microfractura del material post tronadura, esto a través del fenómeno de adsorción física de gas en materiales.

## Capítulo 3: Metodología

Las actividades del trabajo realizado se realizaron en dos etapas, una primera etapa de pruebas preliminares y una segunda etapa de pruebas definitivas. En este capítulo se presentan los procedimientos y razonamientos desarrollados en cada etapa.

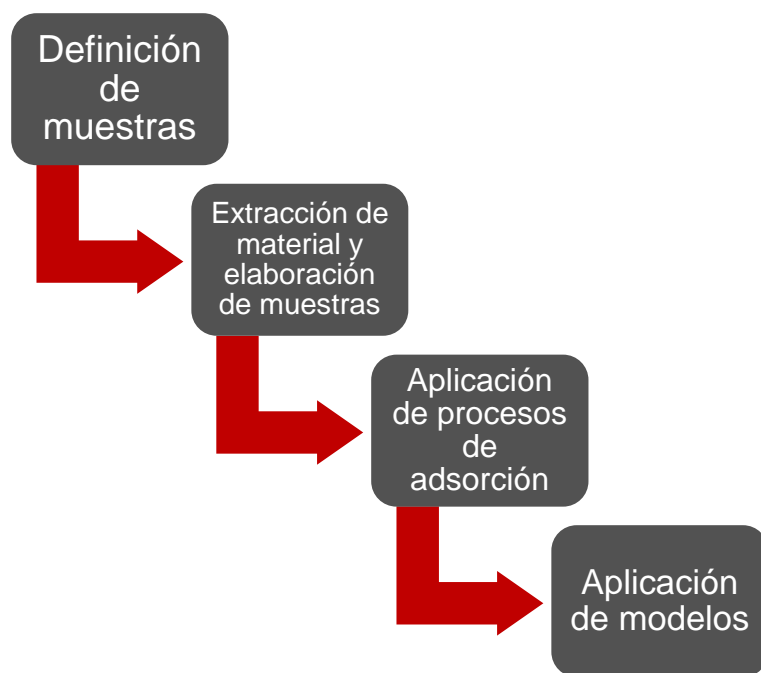
La decisión de realizar las actividades en dos etapas se basa en dos aspectos. El primero tiene que ver con el tamaño de los fragmentos de un material sujeto a un proceso de adsorción. Según la literatura, tiene conocimiento de que el tamaño de los fragmentos tiene influencia en los procesos de adsorción afectando directamente en la forma de las isothermas, aspecto que influye en los parámetros de salida de la técnica que se calculan a partir de las isothermas, es decir, el tamaño de los fragmentos tiene influencia en los resultados de área superficial específica y volumen de poros.

El segundo aspecto tiene que ver con los objetivos específicos de este trabajo, recordemos que se aplican procesos de adsorción sobre muestras de material tronado con ANFO y Emulsión para analizar resultados. Ahora bien, dado que en principio no se tiene conocimiento de la influencia del tipo de explosivo ni del tamaño de los fragmentos sobre los resultados de la técnica, se decide por estudiar los efectos de estos parámetros por separado.

Considerando estos aspectos, en la primera etapa de pruebas preliminares se estudia principalmente la influencia del tamaño de los fragmentos de las muestras sobre la forma de las isothermas (para un mismo tipo de roca y un mismo tipo de explosivo), para luego definir un rango de tamaño adecuado para utilizar en las pruebas definitivas.

Posteriormente, en las pruebas definitivas se estudia la influencia del tipo de explosivo sobre los resultados de la técnica (para un mismo tipo de roca y el rango de tamaño definido), esto es, estudiar el comportamiento del área superficial específica y volumen de poros según el tipo de explosivo empleado.

Las metodologías de las pruebas preliminares y pruebas definitivas se abordan por separado en este capítulo. No obstante, se tiene una metodología general común para ambas pruebas, para la cual se tienen cuatro procedimientos principales (Figura 14).



**Figura 14: Metodología general común de pruebas preliminares y definitivas.**

- I. Definición de muestras: En esta etapa se definen las características y cantidad de muestras a elaborar para los procesos de adsorción
- II. Extracción de material y elaboración de muestras: Esta etapa considera la extracción de lotes de material post tronadura a partir de los cuales se elaboran las muestras para los procesos de adsorción que suceden
- III. Aplicación de procesos de adsorción: En esta etapa el laboratorio a cargo ejecuta los procesos de adsorción sobre cada una de las muestras elaboradas, obteniéndose como resultado una isoterma de adsorción y desorción por cada muestra procesada
- IV. Aplicación de modelos: En esta etapa se aplican modelos sobre las isotermas para calcular los parámetros de área superficial específica y volumen de poros

Notar que el cuarto procedimiento se aborda en el Capítulo 4 ya que requiere de los resultados de los procesos de adsorción (isotermas de adsorción y desorción).

## 3.1 Pruebas preliminares

### 3.1.1 Definición de rangos de tamaño de muestras

De acuerdo a lo expresado anteriormente, en las pruebas preliminares el objetivo es estudiar la influencia del tamaño de los fragmentos sobre la forma de las isotermas para definir un tamaño de fragmentos adecuado para ser utilizado en la elaboración de muestras de las pruebas definitivas. Esto lleva a plantear la interrogante de qué tamaños o rangos de tamaño se han de definir para la elaboración de muestras.

Un primer aspecto a considerar es la instrumentación utilizada en los procesos de adsorción. El equipo 3Flex que realiza los procesos de adsorción sugiere no emplear fragmentos de material mayores a 5 mm.

Un segundo aspecto es la variabilidad de tamaños y rangos de tamaño que se pueden encontrar en la literatura sobre estudios de adsorción de gas en materiales, variabilidad que depende del tipo de material y de los casos de estudio en sí.

Considerando estos aspectos, se decide por definir rangos de tamaño de fragmentos en vez de tamaños específicos, con tal de abarcar un espectro relativamente más amplio de tamaños. Esta idea es similar a lo realizado por Hazra et al. (2018) en su estudio.

En este punto entra en juego la cantidad de procesos de adsorción que se pueden costear para las pruebas preliminares, la cual es de seis. Debido a esto, se evalúan dos escenarios:

- I. Definir seis rangos de tamaño para elaborar seis muestras (una por cada rango) a partir de material post tronadura extraído de un mismo sitio
- II. Definir tres rangos de tamaño para elaborar tres muestras (una por cada rango) a partir de material post tronadura extraído de un primer sitio y otras tres muestras (una por cada rango) de un segundo sitio

Entre ambos escenarios se decide por el segundo, principalmente porque se valora más la idea de aplicar la técnica a muestras de distinto origen para analizar qué tan comparables son los resultados. Notar que los sitios del segundo caso corresponden a un mismo sector, tal que tienen el mismo tipo de roca y se emplea el mismo tipo de explosivo (Emulsión).

La selección de los rangos se realiza considerando que no se tiene una referencia confiable y apropiada de rangos de tamaño para procesos adsorción. Dicho esto, se decide por definir un rango de tamaño *grueso*, un rango de tamaño *intermedio* y un rango de tamaño *fino*.

Para el rango de tamaño grueso resulta interesante definir un valor en torno al límite de 5 mm que sugiere el equipo 3Flex para observar el comportamiento de las isotermas, por

esta razón se define un límite superior de 4 malla (4.76 mm) y un límite inferior de 12 malla (1.68 mm).

El rango intermedio se define con un límite superior de 12 malla y un límite inferior de 20 malla (0.84 mm), mientras que el rango fino se define con un límite superior de 20 malla y sin límite inferior.

En resumen, los rangos de tamaño de fragmentos para la elaboración de muestras de las pruebas preliminares son:

- Rango grueso: Entre 4 malla y 12 malla (4# - 12#)
- Rango intermedio: Entre 12 malla y 20 malla (12# - 20#)
- Rango fino: Bajo 20 malla (-20#)

### **3.1.2 Descripción de Faena 1**

La faena minera a la cual se tuvo acceso por medio de Enaex para el desarrollo de las pruebas preliminares se denomina Faena 1. Las labores mineras que se ejecutan en esta faena corresponden a labores de producción para el método de explotación de Block Caving (BC), estas son:

- Tronadura de calle de hundimiento
- Tronadura de zanja (batea)

Respecto a estas labores, los diseños de las tronaduras varían según el sector, además, en todas se utiliza Emulsión (Duoblast-V) como agente de tronadura.

El sector del cual se extrae el material es el Macro Bloque (MB) N02, el cual tiene un dominio geológico predominante de QIS (Cuarzo Igual Sericita) de densidad 2.7 cm<sup>3</sup>/g con una mineralización de cobre pórfido potásica.

Para las tronaduras de hundimiento se tiene un diagrama de 27 perforaciones de 3 pulgadas de diámetro y largos teóricos entre 9.8 m y 18.9 m. Mientras que para las tronaduras de zanja se tiene un diagrama de 90 perforaciones de 3 pulgadas de diámetro con 11 paradas y largos teóricos entre 9.5 m y 12.3 m.

Para ilustrar, en las Figuras 15 y 16 se muestran los diagramas de perforación (para este sector) de las tronaduras de hundimiento y zanja respectivamente.

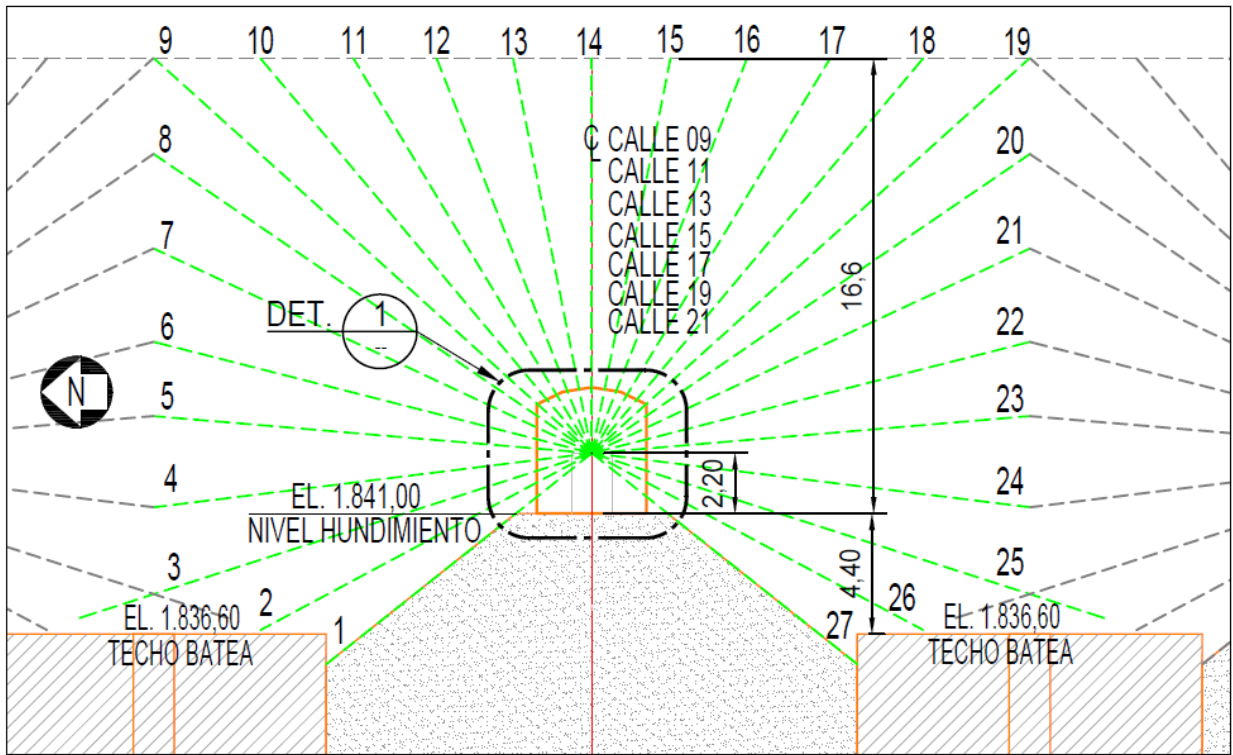


Figura 15: Diagrama de perforación de una calle de hundimiento del Macro Bloque N02.

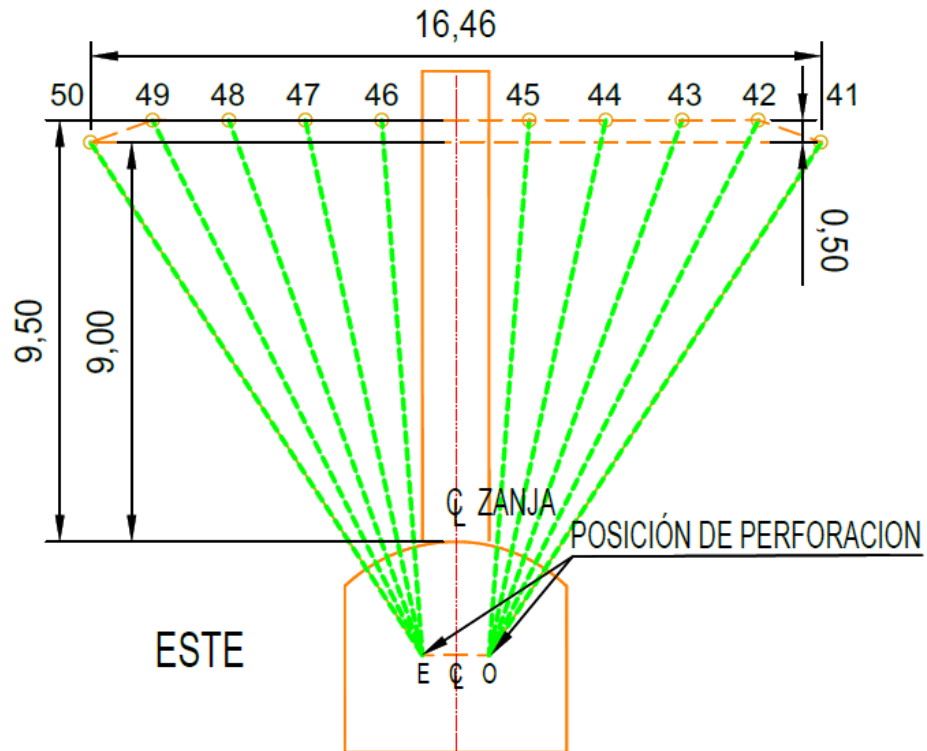


Figura 16: Diagrama de perforación de un zanja (Parada N°6) del Macro Bloque N02.

Respecto a la extracción del material de estas labores, se había evaluado extraer de ambas, sin embargo, tal idea fue descartada por el límite de muestras a procesar, pero sobre todo por las características de las tronaduras de hundimiento.

Las tronaduras de hundimiento están sujetas a preacondicionamiento con tiros ascendentes verticales confinados (TAC). Si bien estos tiros están por sobre el límite de la tronadura de hundimiento, el desconfinamiento y la potencial activación de estructuras fueron motivos para no extraer material de estas labores. Por lo tanto, se decidió extraer material de tronaduras de zanja, las cuales no están condicionadas por estos factores.

### **3.1.3 Características de muestras**

Considerando los tres rangos de tamaño de fragmentos definidos anteriormente y que se pueden procesar hasta seis muestras, se requiere de tres muestras de material de dos zanjas distintas para formar las seis muestras.

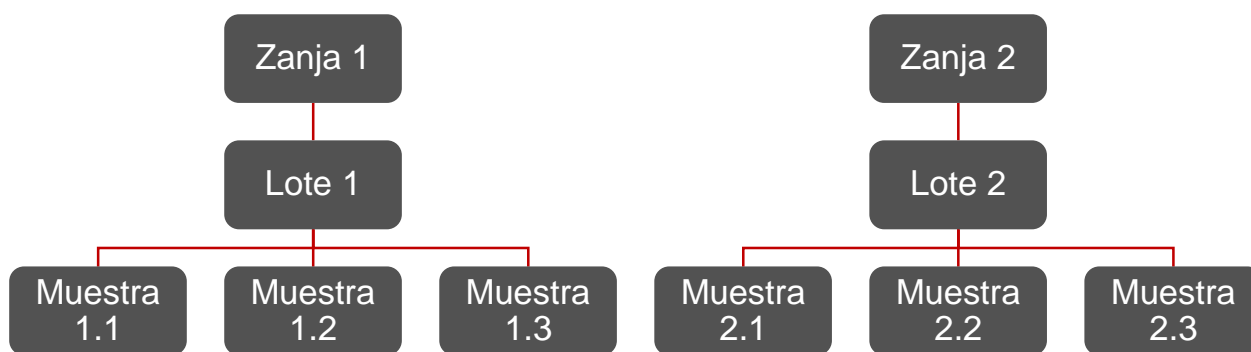
La extracción del material de una zanja se realiza mediante un lote, lote a partir del cual, posteriormente, se elaboran las muestras para los procesos de adsorción mediante tamizaje para los rangos de tamaño definidos. De esta manera, se extraen dos lotes de material (uno por zanja) para elaborar tres muestras por lote (una por cada rango de tamaño).

Las zanjas de las cuales se extrae el material se definen como Zanja 1 y Zanja 2, y los lotes que se extraen de estas se definen como Lote 1 y Lote 2 respectivamente. Según esta nomenclatura, las muestras a elaborar a partir de los lotes se definen de la siguiente manera:

- Muestra 1.1: Muestra elaborada a partir del Lote 1 y tamizada en el rango de tamaño grueso de 4# - 12#
- Muestra 1.2: Muestra elaborada a partir del Lote 1 y tamizada en el rango de tamaño intermedio de 12# - 20#
- Muestra 1.3: Muestra elaborada a partir del Lote 1 y tamizada en el rango de tamaño fino de -20#
- Muestra 2.1: Muestra elaborada a partir del Lote 2 y tamizada en el rango de tamaño grueso de 4# - 12#
- Muestra 2.2: Muestra elaborada a partir del Lote 2 y tamizada en el rango de tamaño intermedio de 12# - 20#
- Muestra 2.3: Muestra elaborada a partir del Lote 2 y tamizada en el rango de tamaño fino de -20#



La Figura 17 muestra un esquema de la elaboración de estas seis muestras.



**Figura 17: Esquema de elaboración de muestras de pruebas preliminares.**

Habiendo definido la cantidad de muestras, se consulta al laboratorio por las características de las muestras para los procesos de adsorción, específicamente por la cantidad de material necesario de cada muestra. El laboratorio indica que la cantidad mínima de una muestra de material granulométrico es de 0.5 g y que la cantidad recomendada es de 1 g para que el proceso de adsorción sea representativo.

### **3.1.4 Extracción de material**

La metodología de extracción del material post tronadura de una zanja para formar un lote considera los siguientes aspectos:

- Extracción mediante incrementos sucesivos de material para formar el lote
- Extracción de incrementos se realiza horizontalmente cruzando la calle zanja
- Extracción de incrementos se realiza a una misma altura aproximadamente
- Cada incremento es de 50 g
- Cada incremento se vierte en una bolsa plástica hermética
- Extracción de un total de 10 incrementos para formar un lote de 500 g

Se decide extraer un total de 500 g por ser una cantidad adecuada en lo que se refiere al error de muestreo asociado a la extracción del material quebrado, además de ser cantidad suficiente para la elaboración de las seis muestras.

En la Figura 18 se muestra la imagen de una calle zanja de referencia en el nivel de producción para ilustrar cómo luce el material post tronadura de una zanja para extraer un lote, esto previo al carguío de material.



**Figura 18: Material post tronadura de una zanja.**

Las extracciones de los incrementos se realizan a lo largo del segmento rojo de la imagen (de caja a caja), estos se extraen con una espátula metálica de punta redonda para segregar los fragmentos finos de los gruesos. Si bien en la imagen no se aprecia la caja del lado derecho, las extracciones se realizan de extremo a extremo.

Al extraer un incremento se segrega con la espátula el material fino del grueso tal que los fragmentos finos no superen 1 cm de tamaño. Se realiza de esta manera para evitar extraer material grueso que no es de utilidad para la elaboración de muestras puesto que el límite de tamaño de fragmentos más alto es de 4 malla (4.76 mm), y también para reducir el error de muestreo asociado ya que este aumenta conforme aumenta el tamaño de los fragmentos (Pitard, 2019).

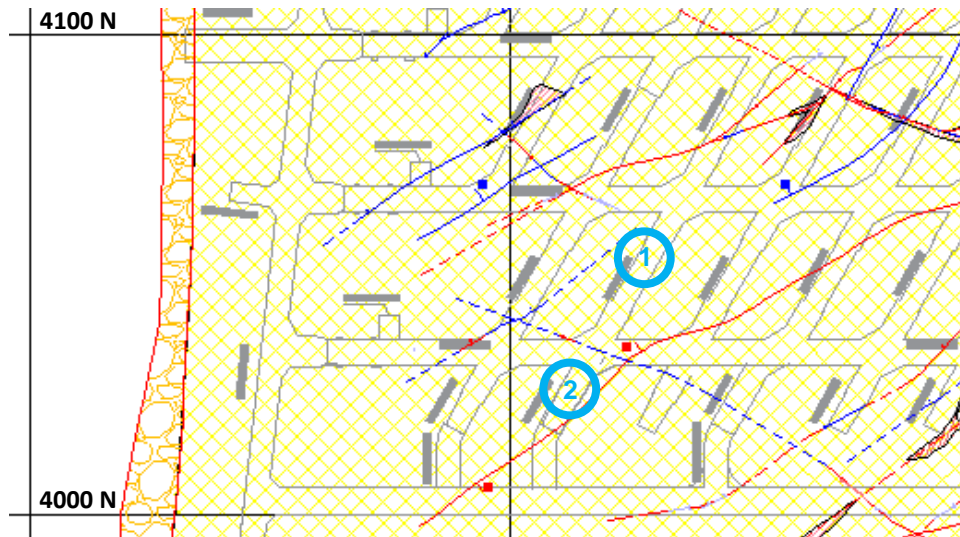
Este procedimiento se realiza de esta manera para rescatar material de distintos sectores y no extraer de un solo punto. Ciertamente es un procedimiento conveniente, pero es útil en términos de definir una línea de base para posteriores extracciones, ya sea para replicar el procedimiento o para realizar otro diferente.

### **3.1.5 Selección de zanjas para extracción de material**

La selección de las dos zanjas se realizó utilizando el Historial de Tronaduras. El Historial de Tronaduras es el documento que registra la información de todas las tronaduras de zanja y hundimiento que se ejecutan. Contiene información de las fechas de las tronaduras ejecutadas y programadas, los sectores de estas, entre otros.

El criterio para seleccionar una zanja para la extracción del material es que no haya habido carguío de material, principalmente para evitar posibles alteraciones. Para cumplir esta condición se monitorearon continuamente ciertas zanjas prontamente a ser tronadas, esto para coordinar el desplazamiento a interior mina para la extracción de los lotes de material previo al carguío. Entre los sectores disponibles, el Macro Bloque (MB) N02 en el Nivel de Producción fue el seleccionado.

En la Figura 19 se muestra una vista en planta del Macro Bloque N02 en el Nivel de Producción.



**Figura 19: Vista en planta del Macro Bloque N02 en el Nivel de Producción. En celeste se identifican las dos zanjas seleccionadas para la extracción del material.**

Habiéndose coordinado el traslado a interior mina hacia el sector de interés, se procede posteriormente a la extracción de los Lotes 1 y 2 de las Zanjas 1 y 2 de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente. Luego de la extracción de los lotes, estos se almacenan para posterior tamizaje y elaboración de muestras.

### **3.1.6 Elaboración de muestras**

La elaboración de las seis muestras para los procesos de adsorción considera los siguientes pasos:

- I. Tamizaje del Lote 1 con harneros de tamaño 4# y 12# para obtener fragmentos de material para este rango de tamaño (grosso). El material tamizado se vierte en una bolsa plástica hermética, se rotula como Muestra 1.1 y se almacena
- II. Tamizaje del remanente del Lote 1 con harneros de tamaño 12# y 20# para obtener fragmentos de material para este rango de tamaño (intermedio). El material tamizado se vierte en una bolsa plástica hermética, se rotula como Muestra 1.2 y se almacena

- III. Tamizaje del remanente del Lote 1 con un harnero de tamaño 20# para obtener fragmentos de material bajo este tamaño (fino). El material tamizado se vierte en una bolsa plástica hermética, se rotula como Muestra 1.3 y se almacena
- IV. Tamizaje del Lote 2 se realiza de manera equivalente. De este se elabora la Muestra 2.1, la Muestra 2.2 y la Muestra 2.3
- V. El remanente de ambos lotes se almacena para elaborar muestras adicionales en caso de ser necesario

Notar que en cada muestra se logra la cantidad de material recomendada (y un poco más) de 1 g.

Luego de la elaboración de muestras, se hace entrega de estas al laboratorio. Tras dos semanas, se reciben los resultados de los procesos de adsorción.

Dado que la definición del rango de tamaño para las pruebas definitivas requiere de los resultados de los procesos de adsorción de las pruebas preliminares, antes de continuar con la siguiente sección se sugiere revisar estos resultados (Sección 4.1.1) y su respectivo análisis (Sección 5.1.1).

### **3.1.7 Definición de rango de tamaño definitivo**

Considerando los resultados obtenidos, corresponde definir el rango de tamaño de fragmentos para las pruebas definitivas. Lo primero a considerar es que este rango debiese ser menor al rango de tamaño -20#, ya que, según los resultados, las formas de las isothermas mejoran progresivamente en la medida que se reduce el tamaño de los fragmentos de las muestras. Dicho esto, se evalúan dos escenarios:

- I. Definir el rango de tamaño -20# como el rango definitivo
- II. Definir un rango de tamaño inferior al rango -20#

Entre ambos escenarios se decide por el segundo, principalmente porque un rango de tamaño inferior podría entregar isothermas con mejores formas, mejores en términos de un crecimiento y decrecimiento estricto más notorio que el observado en las isothermas de las pruebas preliminares, además de un menor nivel de histéresis entre las isothermas de adsorción y desorción.

El nuevo rango de tamaño, a diferencia del rango de tamaño fino, se define con un límite inferior para acotar el espectro de tamaños presentes en este con tal que las isothermas evidencien una forma acorde al rango definido en vez de uno muy amplio como el rango -20# donde no es posible diferenciar que tamaños menores a 20# predominan en la construcción y forma de las isothermas.

Considerando que 20# equivale a 0.84 mm, se define un rango de tamaño cuyo valor medio sea en torno a 0.50 mm o 0.25 mm para que el cambio de rango pueda ser

significativo. De esta manera, se define un rango de tamaño con límite superior de 50# (0.30 mm) y un límite inferior de 70# (0.21 mm), tal que el valor medio de tamaño para este rango es de 0.25 mm aproximadamente. Este nuevo rango a utilizar en las pruebas definitivas se define como rango definitivo.

## **3.2 Pruebas definitivas**

### **3.2.1 Descripción de Faena 2**

La faena minera a la cual se tuvo acceso por medio de Enaex para el desarrollo de las pruebas definitivas se denomina Faena 2. A diferencia de la Faena 1, los tipos de tronadura disponibles para la extracción de material post tronadura corresponden a labores de desarrollo y producción para el método de explotación de Sublevel Stopping (SLS). El tipo de roca predominante en esta faena es la andesita, con un GSI promedio de 56.

En esta faena se ejecutan tronaduras de desarrollo y producción con ANFO y Emulsión (Emultex-CN) según la labor, por lo que fue posible disponer de material tronado con distinto explosivo para la elaboración de muestras para los procesos de adsorción.

Las tronaduras disponibles para la extracción del material post tronadura se definen de la siguiente manera:

- Tronadura 1: Tronadura de desarrollo con ANFO
- Tronadura 2: Tronadura de desarrollo con Emulsión
- Tronadura 3: Tronadura de producción con ANFO
- Tronadura 4: Tronadura de producción con Emulsión

Las Tronaduras 1 y 2 de desarrollo corresponden a tronaduras de galería, tal que los parámetros de diseño son equivalentes excepto por el agente de tronadura utilizado (ANFO en la Tronadura 1 y Emulsión en la Tronadura 2), lo que las hace comparables para efectos de evaluar la influencia del agente en los resultados. A diferencia de las Tronaduras 3 y 4, que, si bien son de producción, los parámetros de diseño difieren puesto que la Tronadura 3 (ANFO) corresponde a una tronadura de cara libre y la Tronadura 4 (Emulsión) a una tronadura de hundimiento de caserón. Por esta razón, el análisis de los resultados se realiza principalmente para las Tronaduras 1 y 2, dejando los resultados y análisis de las Tronaduras 3 y 4 como referencia.

Respecto a las tronaduras de desarrollo, estas corresponden a galerías de 5 x 4 m de 53 perforaciones (3 de alivio) de 48 mm de diámetro. Mientras que las tronaduras de producción corresponden a una tronadura de cara libre de 3 perforaciones de 4.5 pulgadas de diámetro y 26.8 m de largo, y una tronadura de hundimiento de caserón de 18 perforaciones de 3 pulgadas de diámetro con largos entre 3.8 m y 21.2 m.

Para ilustrar, en la Figura 20 se muestra el diagrama de perforación de las galerías de desarrollo correspondientes a las Tronaduras 1 y 2.

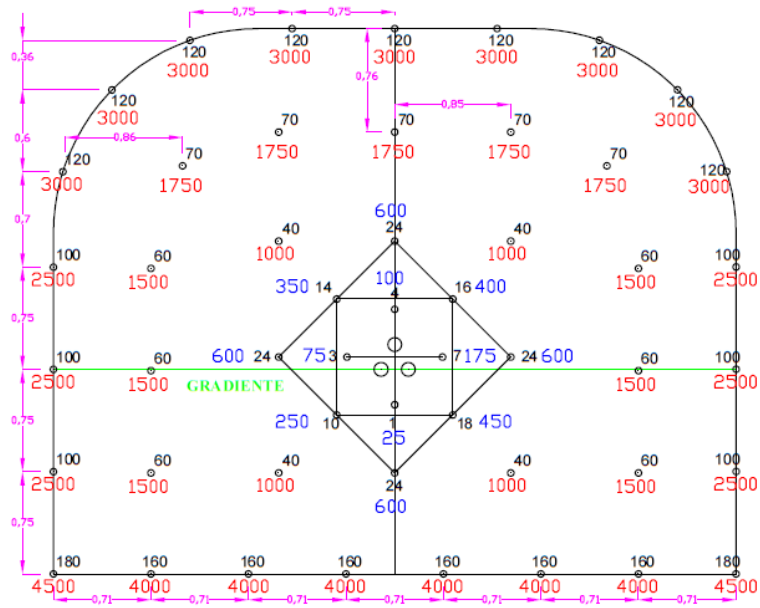


Figura 20: Diagrama de perforación de galería de desarrollo correspondiente a tronaduras de desarrollo con ANFO y Emulsión.

### 3.2.2 Características de muestras

En esta oportunidad la cantidad de procesos de adsorción que se pueden costear es de cuatro (para lograr un total de diez junto a los procesos de las pruebas preliminares), por lo que corresponde elaborar cuatro muestras de material post tronadura para los procesos de adsorción. Convenientemente, se tienen cuatro tipos distintos de material post tronadura para procesar (uno por cada tipo de tronadura).

De manera similar a la metodología de las pruebas preliminares, corresponde extraer un lote de material de cada uno de los cuatro tipos de tronaduras disponibles, tal que:

- Lote 1: Se extrae de la Tronadura 1
- Lote 2: Se extrae de la Tronadura 2
- Lote 3: Se extrae de la Tronadura 3
- Lote 4: Se extrae de la Tronadura 4

Luego, de cada lote se elabora una muestra de material mediante tamizaje para el rango de tamaño definitivo de 50 malla a 70 malla. De esta manera, las muestras se definen simplemente como:

- Muestra 1: Se elabora a partir del Lote 1
- Muestra 2: Se elabora a partir del Lote 2
- Muestra 3: Se elabora a partir del Lote 3
- Muestra 4: Se elabora a partir del Lote 4

### 3.2.3 Extracción de material para procesos de adsorción

La metodología de extracción del material post tronadura de las tronaduras de desarrollo y producción considera los siguientes aspectos:

- Extracción mediante incrementos sucesivos de material para formar el lote
- Extracción de incrementos se realiza a altura del piso cruzando la galería
- Cada incremento es de 50 g
- Cada incremento se vierte en una bolsa plástica hermética
- Extracción de un total de 10 incrementos para formar un lote de 500 g

La principal diferencia de la metodología de extracción de las tronaduras de zanja de las pruebas preliminares es que en esta oportunidad el material post tronadura se encuentra a la altura del piso. El error de muestreo asociado a la extracción es también del orden de 15%.

En la Figura 21 se muestra una imagen del material post tronadura de la tronadura de desarrollo con Emulsión (Tronadura 2) de la cual se extrajo el lote (Lote 2).



**Figura 21: Material post tronadura de tronadura de desarrollo con Emulsión.**

Luego de la extracción de los cuatro lotes, estos son almacenados para la posterior elaboración de muestras.

### 3.2.4 Elaboración de muestras para procesos de adsorción

La elaboración de las cuatro muestras se realiza mediante el tamizaje de cada lote con harneros de tamaño 50# y 70#, tal que se forman cuatro muestras de más de 1 g cada una. En la Figura 22 se muestra una imagen con las muestras elaboradas.



Figura 22: Muestras para procesos de adsorción de pruebas definitivas.

### 3.2.5 Extracción de material para pruebas de molienda

De acuerdo a lo revisado en el Capítulo 2, el índice de trabajo es un parámetro utilizado para medir el nivel de acondicionamiento del material post tronadura. Por esta razón, resulta interesante comparar los resultados de la técnica (área superficial específica y volumen de poros) con los índices de trabajo asociados a las muestras extraídas para los procesos de adsorción. Por esta razón, se extraen cuatro lotes (adicionales a los cuatro extraídos para procesos de adsorción) de material post tronadura para pruebas de molienda.

Se realiza la extracción de cuatro lotes de material post tronadura de 7 Kg cada uno, tal que se extraen de los mismos sectores que las tronaduras 1, 2, 3 y 4. De esta manera, cada lote para prueba de molienda se corresponde con el lote para el proceso de adsorción respectivo. Estos se definen como:

- Lote 1B: Se extrae de la Tronadura 1
- Lote 2B: Se extrae de la Tronadura 2
- Lote 3B: Se extrae de la Tronadura 3
- Lote 4B: Se extrae de la Tronadura 4

La extracción del material se realiza de acuerdo a la metodología descrita anteriormente, salvo que se extraen incrementos del orden de 500 g cada uno hasta alcanzar un total de 7 Kg. Para cada incremento, selectivamente se priorizan fragmentos con tamaños inferiores a 5 mm descartando fragmentos por sobre este tamaño, esto porque que el



tamaño máximo para los molinos de prueba es de 3.36 mm (6 malla). Posterior a la extracción de los lotes, estos son embalados y enviados al laboratorio a cargo.

El laboratorio se encarga de elaborar las muestras a partir de los lotes para las pruebas de molienda, tal que:

- Muestra 1B: Se elabora a partir del Lote 1B
- Muestra 2B: Se elabora a partir del Lote 2B
- Muestra 3B: Se elabora a partir del Lote 3B
- Muestra 4B: Se elabora a partir del Lote 4B

Notar que cada una de estas muestras se divide en tres sub muestras para realizar las pruebas de molienda en triplicado, tal que el índice de trabajo que se obtiene de cada muestra corresponde al índice de trabajo promedio.

Tras la realización de las pruebas de molienda, se reciben los resultados de los índices de trabajo promedio, uno por cada muestra.

## **Capítulo 4: Resultados**

### **4.1 Pruebas preliminares**

En esta sección se presentan los siguientes resultados:

- Isotermas de adsorción y desorción (4.1.1)
- Área superficial específica (4.1.2)
- Volumen de poros (4.1.3)

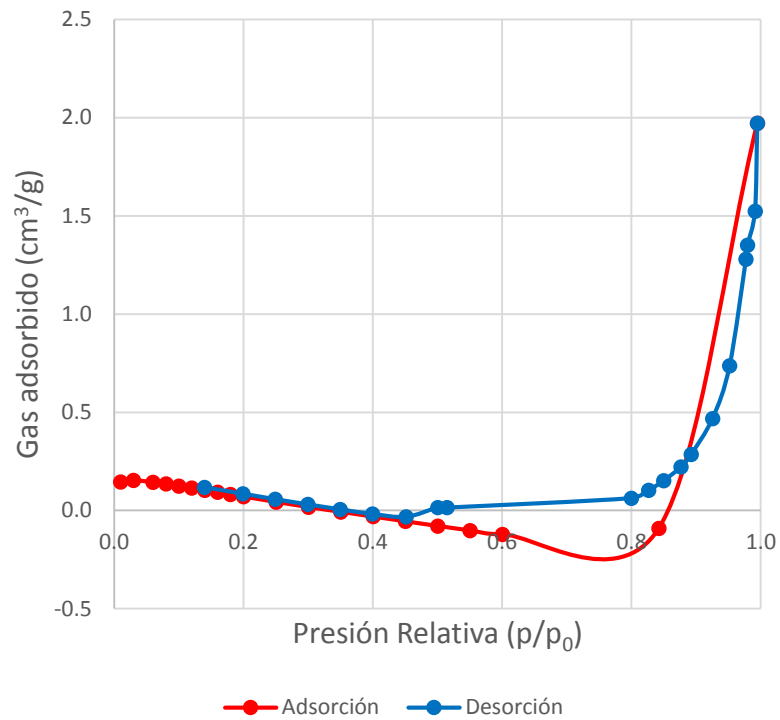
Las isotermas de adsorción y desorción se obtienen del laboratorio, luego se desarrolla el cálculo de los parámetros de área superficial específica y volumen de poros utilizando los datos de las isotermas, esto con el objetivo de mostrar el procedimiento de cálculo de estos parámetros y para tener un primer acercamiento de los órdenes de magnitud en que se desarrolla el trabajo.

#### **4.1.1 Isotermas de adsorción y desorción**

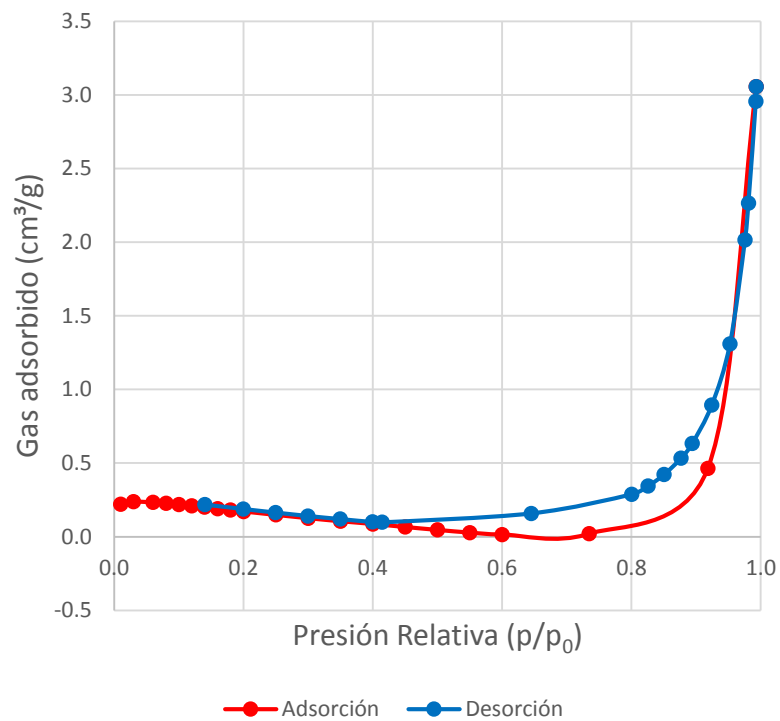
Para cada una de las seis muestras procesadas se obtienen los siguientes resultados:

- Isotermas de adsorción y desorción (gráficos)
- Tabla con los pares de datos de presión relativa y volumen de gas adsorbido con los que se construyen las isotermas

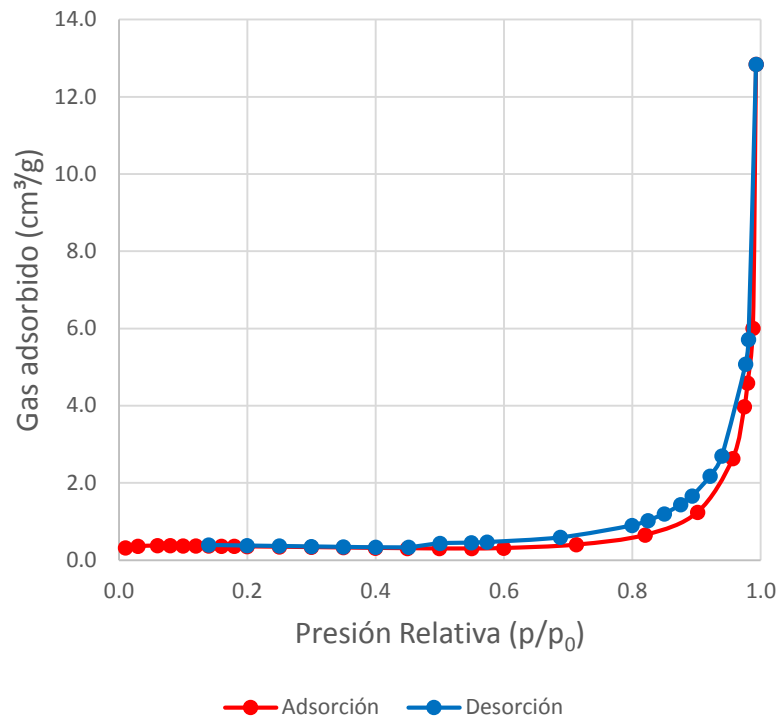
Se presentan las isotermas de adsorción y desorción (gráficos) para cada una de las seis muestras.



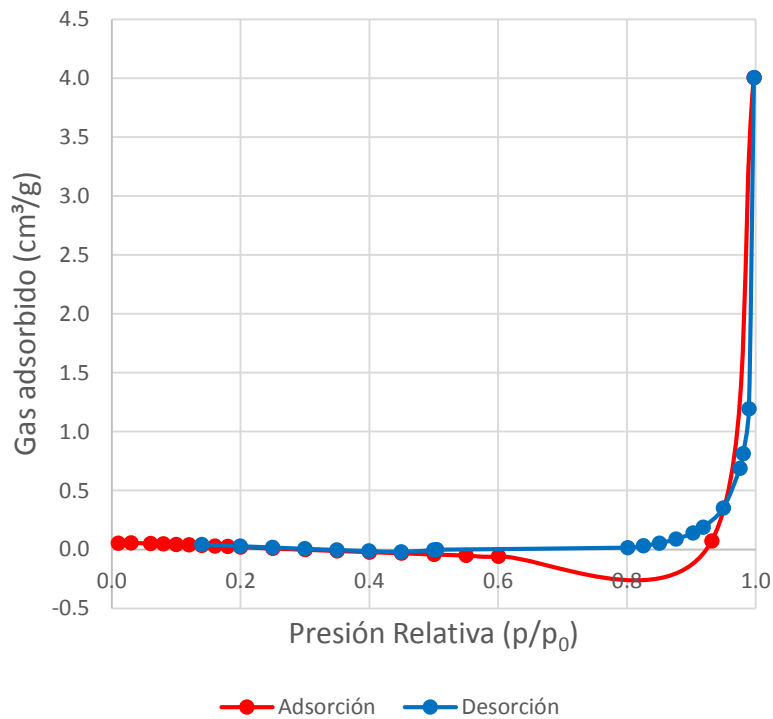
**Figura 23: Isotermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de zanja con Emulsión (Zanja 1) y tamizada para el rango de tamaño 4# - 12# (Muestra 1.1).**



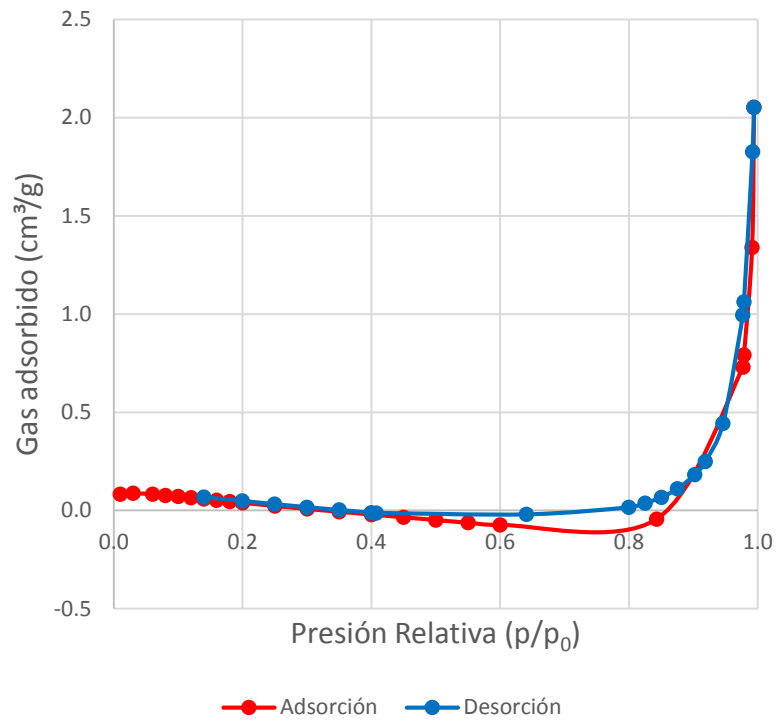
**Figura 24: Isotermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de zanja con Emulsión (Zanja 1) y tamizada para el rango de tamaño 12# - 20# (Muestra 1.2).**



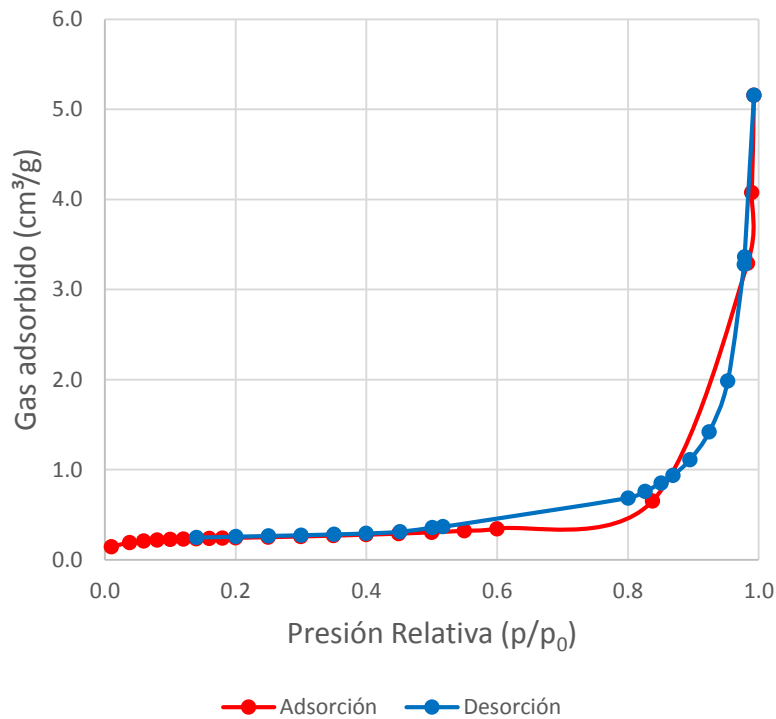
**Figura 25: Isothermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de zanja con Emulsión (Zanja 1) y tamizada para el rango de tamaño -20# (Muestra 1.3).**



**Figura 26: Isothermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de zanja con Emulsión (Zanja 2) y tamizada para el rango de tamaño 4# - 12# (Muestra 2.1).**



**Figura 27: Isothermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de zanja con Emulsión (Zanja 2) y tamizada para el rango de tamaño 12# - 20# (Muestra 2.2).**



**Figura 28: Isothermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de zanja con Emulsión (Zanja 2) y tamizada para el rango de tamaño -20# (Muestra 2.3).**

Para realizar el cálculo de los parámetros de área superficial específica y volumen de poros se utiliza la isoterma de adsorción de la Muestra 2.3 (Isotherma roja de la Figura 28) al presentar un mejor comportamiento en comparación a las demás, en específico, no tiene valores negativos de volumen de gas adsorbido y presenta un crecimiento estricto. Ahora bien, en la Figura 29 se grafica la isoterma de adsorción de la Muestra 2.3 junto a los tipos de isotermas comunes de la clasificación IUPAC, nótese la diferencia entre estas, en particular respecto a las del tipo II y IV, por esta razón, los valores de área y volumen que obtienen no son del todo confiables. No obstante, no se deja pasar la oportunidad de calcular estos parámetros al tratarse de los primeros resultados de este trabajo, y con ello tener una referencia de los órdenes de magnitud de estos parámetros.

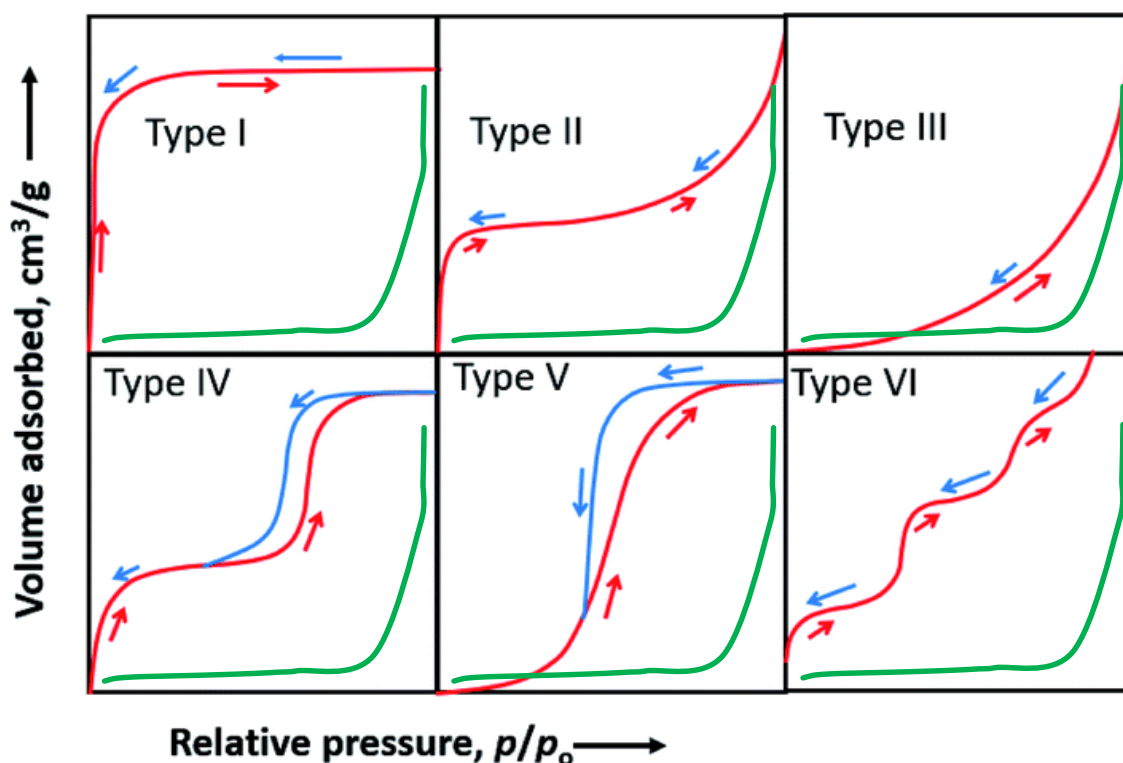


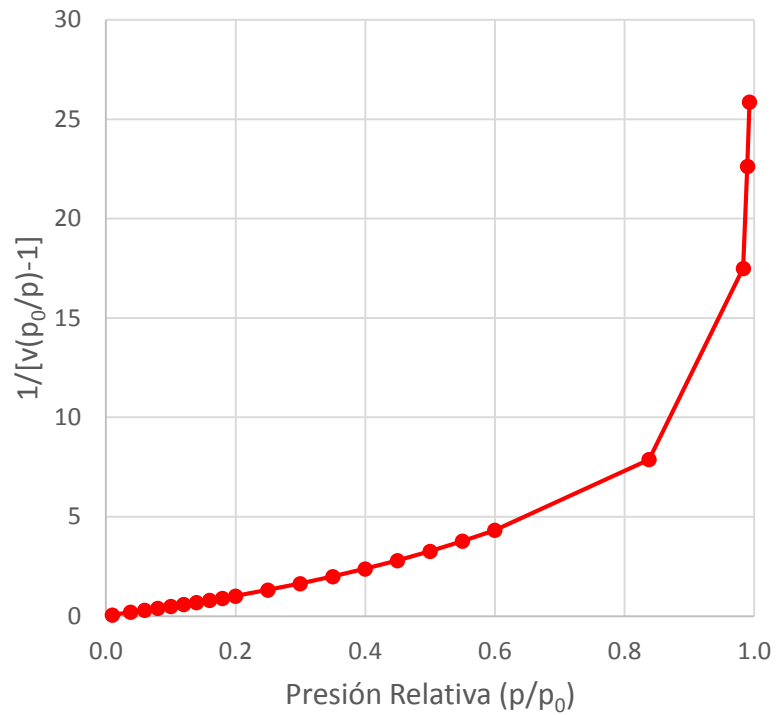
Figura 29: Comparación de isotermas de adsorción de Muestra 2.3 (en verde) respecto a isotermas comunes según clasificación IUPAC.

#### 4.1.2 Área superficial específica

El cálculo de la área superficial específica se realiza de acuerdo al procedimiento revisado en la Sección 2.5.1.

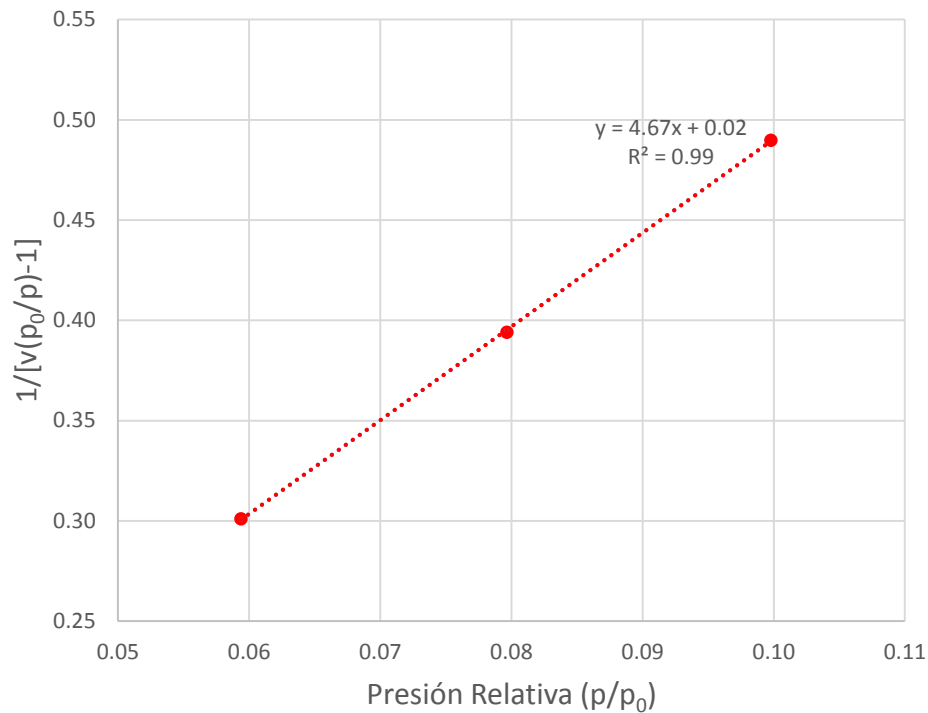
Primero, se realiza la linealización de la isoterma de adsorción de la Muestra 2.3. Para ello, se calcula la expresión  $\frac{1}{v((p_0/p)-1)}$  para cada valor de volumen de gas adsorbido  $v$ .

Estos valores corresponden al eje y de la isoterma linealizada. Luego, se grafican los valores calculados con la expresión anterior en función de la presión relativa  $p/p_0$  para obtener la isoterma de adsorción linealizada (Figura 30).



**Figura 30: Linealización de isoterma de adsorción de Muestra 2.3.**

Segundo, se seleccionan a lo menos tres puntos en el rango de presiones relativas de 0.05 a 0.30 para realizar la regresión lineal. En la Figura 31 se muestran los puntos seleccionados, la ecuación de la regresión y el coeficiente de determinación.



**Figura 31: Regresión lineal de isoterma de adsorción linealizada de Muestra 2.3.**

Tercero, de la regresión se extraen los valores de la pendiente  $a$  y el coeficiente de posición  $b$ :

$$a = 4.67 \frac{g}{cm^3}$$

$$b = 0.02 \frac{g}{cm^3}$$

Cuarto, con los valores de  $a$  y  $b$  se calculan los parámetros  $v_m$  y  $c$  con las Ecuaciones 3 y 4 respectivamente:

$$v_m = \frac{1}{a + b} = \frac{1}{4.67 + 0.02} = 0.21 \frac{cm^3}{g}$$

$$c = 1 + \frac{a}{b} = 1 + \frac{4.67}{0.02} = 202$$

Quinto, se calcula el área superficial específica  $SSA$  con la Ecuación 1, tal que:

- $N_a = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- $s = 0.16 \text{ nm}^2$
- $V = 22,400 \text{ cm}^3/\text{mol}$

$$SSA = \frac{0.21 \times 0.16 \times 6.02 \times 10^{23}}{22,400} = 0.93 \frac{m^2}{g}$$



### 4.1.3 Volumen de poros

En esta sección se realiza el cálculo del parámetro de volumen de poros a partir de los datos de la isoterma de desorción de la Muestra 2.3. Para ello se emplea el procedimiento revisado en la Sección 2.5.2. En Anexos se adjunta la tabla completa.

Primero, se construye la columna 1 asignando los valores de presión relativa  $p/p_0$  de la isoterma. Los valores máximo y mínimo seleccionados de  $p/p_0$  son 0.99 y 0.50 respectivamente.

Segundo, se construye la columna 2 asignando los valores de volumen de gas adsorbido  $v$  de la isoterma correspondientes a las presiones relativas de la columna 1. Como referencia, los valores máximo y mínimo de  $v$  son 5.16 cm<sup>3</sup>/g y 0.36 cm<sup>3</sup>/g respectivamente.

Tercero, se construye la columna 3 mediante el cálculo del radio de Kelvin  $R_k$  para cada valor de presión relativa  $p/p_0$  según la Ecuación 5. Como referencia, los valores de  $R_k$  máximo y mínimo son 1279.5 Å y 13.8 Å respectivamente.

$$R_k(0.99) = 1279.5 \text{ \AA}$$

$$R_k(0.50) = 13.8 \text{ \AA}$$

Cuarto, se construye la columna 4 mediante el cálculo del espesor del film  $t$  para cada valor de presión relativa  $p/p_0$  según la Ecuación 8. Como referencia, los valores máximo y mínimo de  $t$  son 31.0 Å y 6.8 Å respectivamente.

$$t(0.99) = 31.0 \text{ \AA}$$

$$t(0.50) = 6.8 \text{ \AA}$$

Quinto, se construye la columna 5 mediante el cálculo del radio de poro  $R_p$  (con geometría de grieta) para cada valor de presión relativa  $p/p_0$  (utilizando los respectivos valores de  $R_k$  y  $t$ ) según la Ecuación 7. Como referencia, los valores máximo y mínimo de  $R_p$  son 1341.4 Å y 27.5 Å respectivamente.

$$R_p(0.99) = R_k(0.99) + 2t(0.99) = 1279.5 \text{ \AA} + 61.9 \text{ \AA} = 1341.4 \text{ \AA}$$

$$R_p(0.50) = R_k(0.50) + 2t(0.50) = 13.8 \text{ \AA} + 13.7 \text{ \AA} = 27.5 \text{ \AA}$$

Sexto, se construye la columna 6 mediante el cálculo del radio de Kelvin promedio  $\bar{R}_k$  entre dos radios de Kelvin  $R_k$  consecutivos. Como referencia, los valores máximo y mínimo de  $\bar{R}_k$  son 856.6 Å y 14.1 Å respectivamente. Notar en paréntesis las presiones relativas consecutivas.

$$\bar{R}_k = \frac{R_k(0.99) + R_k(0.98)}{2} = \frac{1279.5 \text{ \AA} + 433.6 \text{ \AA}}{2} = 856.6 \text{ \AA}$$

$$\bar{R}_k = \frac{R_k(0.52) + R_k(0.50)}{2} = \frac{14.5 \text{ \AA} + 13.8 \text{ \AA}}{2} = 14.1 \text{ \AA}$$

Séptimo, se construye la columna 7 mediante el cálculo del radio de poro promedio  $\bar{R}_p$  entre dos radios de poro  $R_p$  consecutivos. Como referencia, los valores máximo y mínimo de  $\bar{R}_p$  son 909.1 Å y 27.9 Å respectivamente.

$$\bar{R}_p = \frac{R_p(0.99) + R_p(0.98)}{2} = \frac{1341.4 \text{ \AA} + 476.8 \text{ \AA}}{2} = 909.1 \text{ \AA}$$

$$\bar{R}_p = \frac{R_p(0.52) + R_p(0.50)}{2} = \frac{28.4 \text{ \AA} + 27.5 \text{ \AA}}{2} = 27.9 \text{ \AA}$$

Octavo, se construye la columna 8 mediante el cálculo del cambio del espesor del film  $\Delta t$  entre dos espesores  $t$  consecutivos. Como referencia, los valores máximo y mínimo de  $\Delta t$  son 9.4 Å y 0.1 Å respectivamente.

$$\Delta t = t(0.99) - t(0.98) = 31.0 \text{ \AA} - 21.6 \text{ \AA} = 9.4 \text{ \AA}$$

$$\Delta t = t(0.52) - t(0.50) = 7.0 \text{ \AA} - 6.8 \text{ \AA} = 0.1 \text{ \AA}$$

Noveno, se construye la columna 9 mediante el cálculo del cambio del volumen de gas adsorbido  $\Delta v$  entre dos presiones relativas  $p/p_0$  consecutivas. Como referencia, los valores máximo y mínimo de  $\Delta v$  son 1.79 cm<sup>3</sup>/g y 0.01 cm<sup>3</sup>/g respectivamente.

$$\Delta v = v(0.99) - v(0.98) = 5.16 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} - 3.36 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} = 1.79 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}}$$

$$\Delta v = v(0.52) - v(0.50) = 0.37 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} - 0.36 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} = 0.01 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}}$$

Décimo, se construye la columna 10 mediante el cálculo del cambio del volumen de gas adsorbido en estado líquido  $\Delta v_{liq}$  según la Ecuación 9. Como referencia, los  $\Delta v_{liq}$  máximo y mínimo son  $2.79 \times 10^{-3}$  cm<sup>3</sup>/g y  $0.02 \times 10^{-3}$  cm<sup>3</sup>/g respectivamente.

$$\Delta v_{liq} = 1.79 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} \times \frac{34.84}{22,400} = 2.79 \times 10^{-3} \frac{\text{cm}^3}{\text{g}}$$

$$\Delta v_{liq} = 0.01 \frac{\text{cm}^3}{\text{g}} \times \frac{34.84}{22,400} = 0.02 \times 10^{-3} \frac{\text{cm}^3}{\text{g}}$$

Undécimo, se calculan las primeras celdas de las columnas 11, 12, 13 y 14, tal que:

Al primer valor de  $\Delta t \Sigma S$  de la columna 11 se le asigna el valor 0. Luego, se calcula el volumen parcial de poros  $V_p$  según la Ecuación 10. Este valor corresponde a la primera celda de la columna 12.

$$V_p = \left( \frac{\bar{R}_p}{\bar{R}_k} \right)^2 (\Delta V_{liq} - \Delta t \Sigma S) = \left( \frac{909.1 \text{ \AA}}{856.6 \text{ \AA}} \right)^2 \left( 2.79 \times 10^{-3} \frac{cm^3}{g} - 0 \right)$$

$$V_p = 3.14 \times 10^{-3} \frac{cm^3}{g}$$

Luego, para este  $V_p$  se calcula su respectiva área superficial específica  $S$  según la Ecuación 11. Este valor corresponde a la primera celda de la columna 13.

$$S = \frac{2V_p}{\bar{R}_p} = \frac{2 \times 3.14 \times 10^{-3} \frac{cm^3}{g}}{882.8 \text{ \AA}}$$

$$S = 0.07 \frac{m^2}{g}$$

Luego, para esta  $S$  se calcula su respectiva área superficial específica acumulada  $\Sigma S$ . Dado que  $S$  se corresponde con el primer decremento de volumen de gas evaporado (no hay desorción previa),  $\Sigma S$  es igual a  $S$ . Este valor corresponde a la primera celda de la columna 14.

$$\Sigma S = 0.07 \frac{m^2}{g}$$

Duodécimo, se realiza el cálculo de las celdas restantes de las columnas 11, 12, 13 y 14 hasta completar la tabla.

Decimotercero, se calcula el volumen total de poros  $V_{total}$  de la Muestra según la Ecuación 12.

$$V_{total} = \sum V_p = 9.37 \times 10^{-3} \frac{cm^3}{g}$$

Adicionalmente, se gráfica el volumen parcial de poros  $V_p$  en función del radio de poro promedio  $\bar{R}_p$  (Figura 32).



**Figura 32: Volumen parcial de poros en función del radio de poro promedio de Muestra 2.3.**

Notar que los puntos verdes caracterizan el volumen de poros cuyos tamaños (radios de poro promedio) están en el rango de mesoporos (20-50 nm), mientras que el punto azul caracteriza el volumen de poros cuyo tamaño está en el rango de macroporos (sobre 50 nm). En específico, se tiene que:

- El volumen de mesoporos es de  $6.07 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$  lo que equivale a un 66.4%
- El volumen de macroporos es de  $3.30 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ , lo que equivale a un 33.6%

En resumen, los parámetros de área superficial específica y volumen de poros de la Muestra 2.3 son:

$$SSA = 0.93 \frac{m^2}{g}$$

$$V_{total} = 9.37 \times 10^{-3} \frac{cm^3}{g}$$

## 4.2 Pruebas definitivas

En esta sección se presentan los siguientes resultados:

- Isotermas de adsorción y desorción (4.2.1)
- Área superficial específica (4.2.2)
- Volumen de poros (4.2.3)
- Índices de trabajo (4.2.4)

De manera equivalente a las pruebas preliminares, las isotermas de adsorción y desorción se obtienen del laboratorio, luego se desarrolla el cálculo de los parámetros de área superficial específica y volumen de poros utilizando los datos de las isotermas. Además, se presentan los índices de trabajo de las pruebas de molienda desarrolladas.

En esta oportunidad se realiza el cálculo de los parámetros para las cuatro muestras, no obstante, ocurre lo mismo que en las pruebas preliminares, que la forma de las isotermas no se asemeja a las isotermas del tipo de II o IV de la clasificación IUPAC, lo que condiciona la confiabilidad de los resultados de área y volumen y da luces sobre las características de las muestras procesadas, lo cual se revisa en la Sección 5 de análisis de resultados. No obstante, se presentan los resultados de los parámetros y de las pruebas de molienda. No se muestra el cálculo de los parámetros de área superficial específica y volumen de poros ya que los procedimientos son equivalentes a lo desarrollado en las Secciones 4.1.2 y 4.1.3 respectivamente.

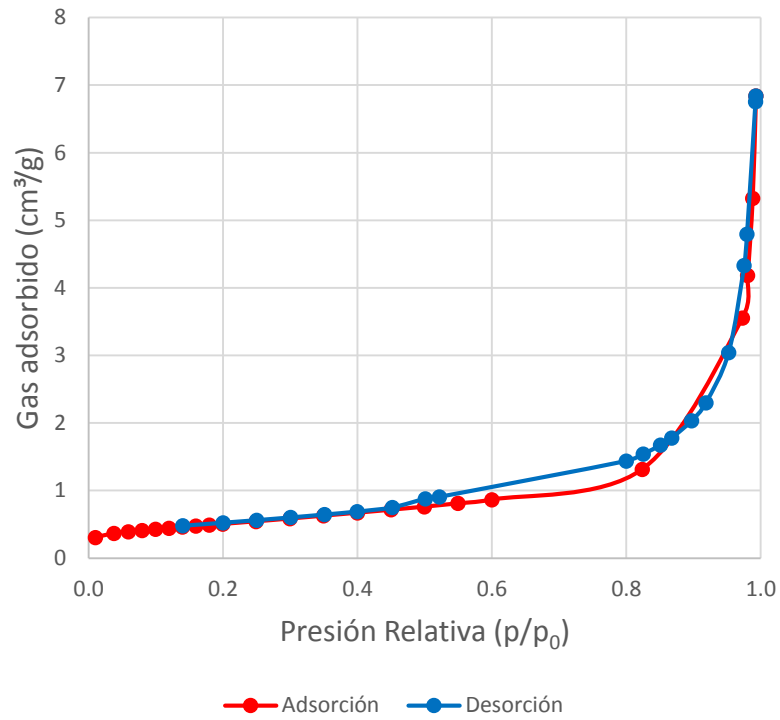
### 4.2.1 Isotermas de adsorción y desorción

Para cada una de las cuatro muestras procesadas se obtienen los siguientes resultados:

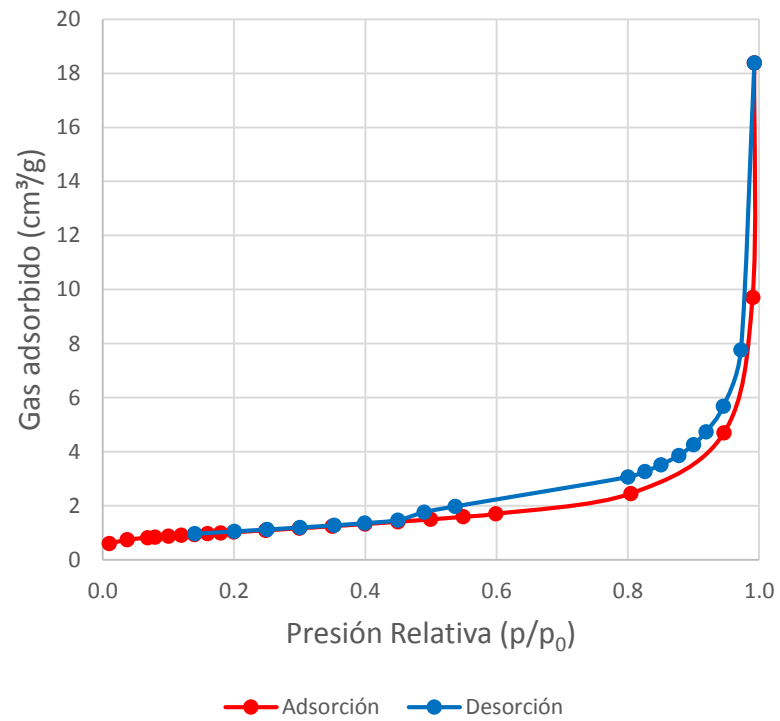
- Isotermas de adsorción y desorción (gráficos)
- Tabla con los pares de datos de presión relativa y volumen de gas adsorbido con los que se construyen las isotermas

Se presentan las isotermas de adsorción y desorción (gráficos) para cada una de las cuatro muestras.

En contraste a los resultados de las pruebas preliminares, en esta oportunidad todas las isotermas no presentan valores negativos de volumen de gas adsorbido y tienen un crecimiento positivo aceptable.



**Figura 33: Isothermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de desarrollo con ANFO y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 1).**



**Figura 34: Isothermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de desarrollo con Emulsión y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 2).**

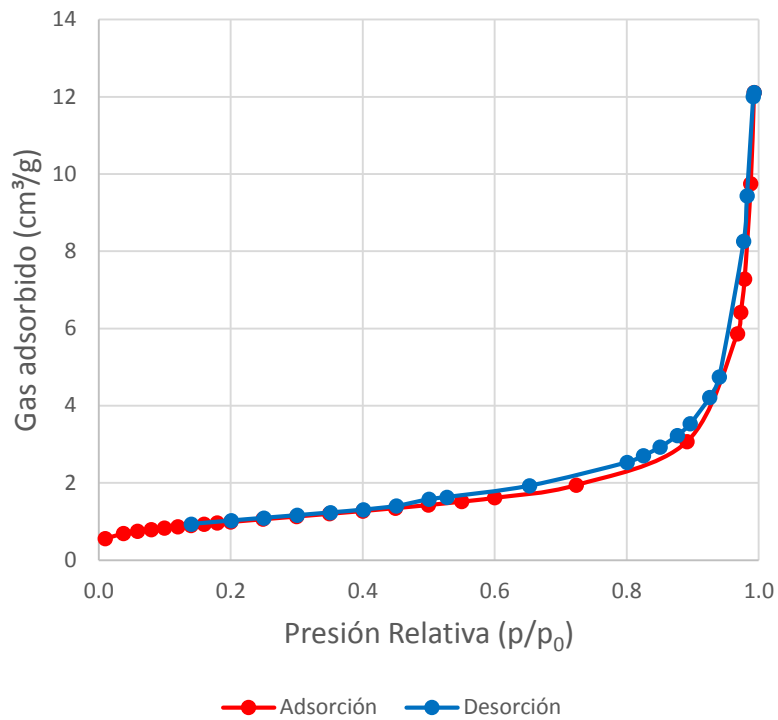


Figura 35: Isothermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de producción con ANFO y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 3).

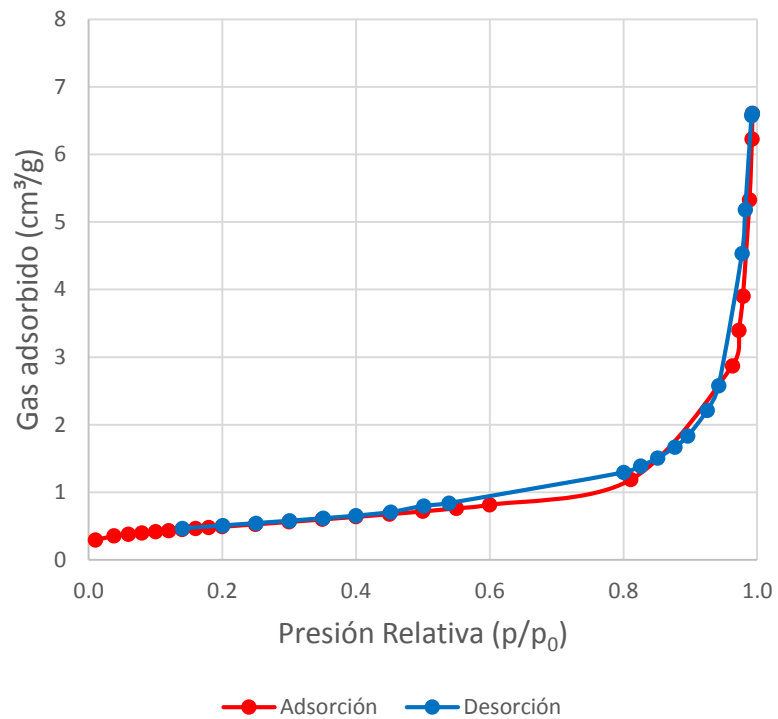


Figura 36: Isothermas de adsorción y desorción de muestra de material post tronadura de voladura de producción con Emulsión y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 4).

## 4.2.2 Área superficial específica

En la Tabla 6 se presentan los valores de área superficial específica de las cuatro muestras. El cálculo se realiza de manera equivalente a lo desarrollado en la Sección 4.1.2.

**Tabla 6: Área superficial específica de pruebas definitivas.**

ID Muestra	Tronadura	SSA (m <sup>2</sup> /g)
1	Desarrollo con ANFO	1.82
2	Desarrollo con Emulsión	3.64
3	Producción con ANFO	3.55
4	Producción con Emulsión	1.76

## 4.2.3 Volumen de poros

En la Tabla 7 se presentan los valores de volumen de poros de las cuatro muestras. El cálculo se realiza de manera equivalente a lo desarrollado en la Sección 4.1.3. En la Sección de Anexos se adjuntan las tablas con los cálculos correspondientes.

**Tabla 7: Volumen de poros de pruebas definitivas.**

ID Muestra	Tronadura	V <sub>total</sub> × 10 <sup>3</sup> (cm <sup>3</sup> /g)
1	Desarrollo con ANFO	10.28
2	Desarrollo con Emulsión	28.25
3	Producción con ANFO	18.10
4	Producción con Emulsión	9.97

## 4.2.4 Índices de trabajo

En la Tabla 8 se presentan los valores de los índices de trabajo de las pruebas de molienda de acuerdo a lo expresado en la Sección 3.2.4.

**Tabla 8: Índices de trabajo de pruebas definitivas.**

ID Muestra	Tronadura	Work Index (kWh/tc)
1B	Desarrollo con ANFO	18.94
2B	Desarrollo con Emulsión	18.77
3B	Producción con ANFO	25.62
4B	Producción con Emulsión	25.59

Considerar que el índice de trabajo de referencia (cuarzo) es de 12.70 kWh/tc.



## Capítulo 5: Análisis de resultados

### 5.1 Pruebas preliminares

Respecto a las isotermas obtenidas de los procesos de adsorción se puede decir lo siguiente:

- Las isotermas de adsorción y desorción presentan un comportamiento similar, tal que el volumen de gas adsorbido se mantiene relativamente constante hasta presiones relativas de 0.8, valor a partir del cual el volumen de gas aumenta fuertemente
- Dada la forma de las isotermas, no es posible clasificarlas según la clasificación IUPAC. En particular, no corresponden ni a isotermas tipo II (material macroporoso) ni tipo IV (material mesoporoso)
- Se tienen valores negativos de volumen de gas adsorbido en las isotermas de adsorción de las Muestras 1.1, 2.1 (gruesas) y 2.2 (intermedia), comportamiento que se atribuye a un tamaño de fragmentos muy alto para un proceso de adsorción. La histéresis es también más notoria en las isotermas de las muestras 1.1 y 2.1 precisamente por la forma de las isotermas de adsorción
- Las isotermas de las Muestras 1.3 y 2.3 (finas) presentan un comportamiento aceptable, tal que no presentan valores negativos de volumen de gas adsorbido y tienen un crecimiento/decrecimiento estricto para presiones bajas, aunque débil

Se puede decir que los procesos de adsorción respondieron de mejor manera para los fragmentos más finos de material, que para este caso es el rango de tamaño  $-20\mu$ . La relevancia de una forma aceptable de las isotermas de adsorción y desorción se debe a la posterior aplicación de modelos para el cálculo de los parámetros de área superficial específica y volumen de poros, ya que se requiere que las isotermas sean del tipo II o IV (o similares) para un cálculo confiable de los parámetros, puesto que estos modelos están desarrollados principalmente para isotermas de estos tipos.

Respecto al área superficial específica de la Muestra 2.3, debido a que es el único valor calculado, no es posible compararlo con el de las otras cinco muestras. Recordar que la isoterma de adsorción de la muestra 2.3 es la única con un comportamiento aceptable para el cálculo de los parámetros de área superficial específica y volumen de poros.

Respecto al valor de área superficial específica de  $0.93 \text{ m}^2/\text{g}$ , este se considera un valor muy bajo al compararlo con materiales mesoporosos comunes como la sílice que tiene un área superficial específica promedio del orden de  $500 \text{ m}^2/\text{g}$  (Bavnhøj et al., 2019).

Respecto a la constante BET, esta tiene un valor del orden de 200, lo cual es un indicador de una alta afinidad entre el material y el gas nitrógeno. Ahora bien, este aspecto solo se

aprecia a partir de presiones relativas por sobre 0.8 donde el crecimiento de volumen de gas se dispara, ya que para el rango de presiones entre 0 y 0.8 se tiene un bajo crecimiento de volumen de gas adsorbido. Este comportamiento de bajo crecimiento de gas adsorbido en gran parte del rango presiones y un crecimiento abrupto para altas presiones se cree que se debe a una muy baja porosidad de la Muestra 2.3.

Respecto al valor de volumen de poros de  $9.37 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ , este se considera también un valor bajo al compararlo con la sílice que tiene un volumen de poros promedio del orden de  $1.2 \text{ cm}^3/\text{g}$  (Bavnhøj et al., 2019).

En conclusión, según los resultados obtenidos de las pruebas preliminares, se tiene que los procesos de adsorción realizados respondieron de mejor manera para el rango de tamaño más bajo de -20#, motivo por el que se definió un rango de tamaño definitivo menor de 50# - 70#, esto bajo la presunción que un rango más fino como el definido permitirá obtener isothermas con formas que se asemejen a las isothermas tipo II o IV. Dicho esto, considerando las formas de las isothermas (las seis) y los valores de área superficial específica y volumen de poros de la Muestra 2.3, se plantea que el material de las muestras estudiadas posee muy baja porosidad, o directamente corresponde a un material no poroso, lo que condiciona la confiabilidad de los resultados y la aplicabilidad de la técnica.

## 5.2 Pruebas definitivas

Primero, corresponde recordar que el análisis de los resultados de estas pruebas se enfoca en las Muestras 1 y 2 debido a las características de las Tronaduras 1 (desarrollo con ANFO) y 2 (desarrollo con Emulsión) en comparación con las Muestras 3 y 4 de las Tronaduras 3 (producción con ANFO) y 4 (producción con Emulsión).

Respecto a las isothermas obtenidas de los procesos de adsorción se puede decir lo siguiente:

- Las isothermas de adsorción y desorción presentan un comportamiento similar, tal que el volumen de gas adsorbido crece positivamente con un ritmo parecido al de las isothermas de las pruebas preliminares, aunque un poco más fuerte
- Dado que las muestras son del mismo rango de tamaño, las isothermas no se diferencian significativamente en cuanto a su forma, sino en cuanto a la cantidad de volumen de gas adsorbido, tal que la Muestra 2 presenta mayor volumen de gas adsorbido que la Muestra 1
- No se tienen valores negativos de volumen de gas adsorbido y se tiene una histéresis menos fuerte que las pruebas preliminares. Este resultado obedece a que las muestras están compuestas de fragmentos de menor tamaño (50# - 70#) que las muestras de las pruebas preliminares
- Respecto a la forma de las isothermas, no es posible clasificarlas según la clasificación IUPAC. En esta oportunidad tampoco corresponden a isothermas tipo II o IV, lo que condiciona la confiabilidad de los parámetros de área superficial específica y volumen de poros que se calculan a partir de estas

Al comparar las isothermas de las Muestras 1 y 2, se tiene que para la Muestra 1 se alcanza un volumen de gas adsorbido de  $7 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$  y para la Muestra 2 un valor de  $18 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ , lo que anticipa diferencias en los valores de área superficial específica y volumen de poros que se calculan a partir de estas isothermas.

Respecto al área superficial específica, la Muestra 2 tiene valor de  $3.64 \text{ m}^2/\text{g}$ , mayor que el de la Muestra 1 (el doble) con  $1.82 \text{ m}^2/\text{g}$ . Este resultado permite plantear que la tronadura con Emulsión generó un mayor nivel de acondicionamiento que la tronadura con ANFO, en otras palabras, generó un mayor nivel de microfractura.

Respecto al volumen de poros, la Muestra 2 tiene un valor de  $28.25 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ , mayor que el de la Muestra 1 (2.7 veces) con  $10.28 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ . Este resultado también permite plantear que la tronadura con Emulsión generó un mayor nivel de microfractura que la tronadura con ANFO.

Respecto a los índices de trabajo, la Muestra 2B (desarrollo con Emulsión) obtuvo un valor de 18.77 kWh/tc, ligeramente menor que la Muestra 1B (desarrollo con ANFO) con 18.94 kWh/tc. Este resultado también permitiría plantear que la tronadura con Emulsión generó un mayor nivel de acondicionamiento que la tronada con ANFO, pero la diferencia de estos valores es de un 0.9%, lo que no se considera significativo. Por lo tanto, se plantea que las pruebas de molienda no pudieron diferenciar el agente de tronadura empleado. Ahora bien, visto desde otro punto de vista, se podría decir no hay diferencia significativa en emplear ANFO o Emulsión ya que ambos agentes dañan el material de manera equivalente, lo que se refleja en índices de trabajo prácticamente iguales.

En términos generales y a pesar de los resultados obtenidos, desde el punto de vista de los valores de área superficial específica y volumen de poros calculado, se puede decir que los parámetros de la técnica entregan un resultado consecuente sobre el nivel de porosidad de las Muestras 1 y 2 bajo la hipótesis que la Emulsión (con mayor VOD que el ANFO) genera un mayor nivel de acondicionamiento que el ANFO, efecto que se refleja en un mayor nivel de área superficial específica y volumen de poros, pero que no es posible de rescatar de las pruebas de molienda. Dicho esto, resulta interesante revisar algunos parámetros de las Tronaduras 1 y 2 para analizar cómo se relacionan con los parámetros de la técnica. Se revisan los factores de carga y las granulometrías de las tronaduras.

Los factores de carga de las cuatro tronaduras se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9: Factores de carga de tronaduras de pruebas definitivas.**

ID Tronadura	Tronadura	Factor de carga
1	Desarrollo con ANFO	587 g/ton en dinamita 60%
2	Desarrollo con Emulsión	433 g/ton en dinamita 60%
3	Producción con ANFO	1900 g/ton en ANFO
4	Producción con Emulsión	200 g/ton en ANFO

Los tamaños característicos del material post tronadura de las cuatro tronaduras se muestran en la Tabla 10. Las curvas de distribución se incluyen en la sección de Anexos.

**Tabla 10: Tamaños característicos de tronaduras de pruebas definitivas.**

Tamaño característico	Tronadura 1 Desarrollo con ANFO	Tronadura 2 Desarrollo con Emulsión	Tronadura 3 Producción con ANFO	Tronadura 4 Producción con Emulsión
P99	676 mm	454 mm	984 mm	669 mm
P80	586 mm	280 mm	681 mm	457 mm
P50	294 mm	106 mm	528 mm	320 mm
P20	123 mm	2.8 mm	238 mm	111 mm
P01	34 mm	2.2 mm	48 mm	32 mm

Según la Tabla 9, se tiene que el factor de carga de la Tronadura 2 es menor que el factor de carga de la Tronadura 1 tal que el factor de energía de la Tronadura 1 es de 587 g/ton y el de la Tronadura 2 de 437 g/ton (433 g/ton x 1.01). A pesar de la diferencia de energía, la Tronadura 2 generó una distribución de tamaño más fina que la Tronadura 1 (Tabla 10), resultado esperado ya que las emulsiones tienden a generar fragmentaciones más finas que los ANFO, a pesar que idealmente la comparación debería ser en tronaduras con factores de energía equivalentes. Dicho esto, se puede decir que los parámetros de área superficial específica y volumen de poros se correlacionan con la distribución de tamaño del material post tronadura, tal que a mayor área superficial específica y mayor volumen de poros, se tiene una distribución de tamaño más fina, resultado también dentro de lo esperado ya que distribuciones de tamaño más finas se asocian a materiales con mayor nivel de acondicionamiento según lo revisado en el Capítulo 2.

Ya se discutió que los índices de trabajo de las tronaduras de desarrollo son prácticamente equivalentes, ocurre lo mismo con los índices de trabajo de las tronaduras de producción. Se tiene que el índice de trabajo de la Tronadura 3 es de 25.62 kWh/tc y el de la Tronadura 4 de 25.59 kWh/tc, lo que es una diferencia de un 0.1%, nuevamente un diferencial no significativo. En consecuencia, de manera equivalente a lo expresado más arriba sobre los índices de trabajo de las tronaduras de desarrollo, las pruebas de molienda no pudieron diferenciar el agente de tronadura de las tronaduras de producción, o bien ambos agentes dañaron la roca de manera equivalente, lo que también se refleja en índices de trabajo prácticamente iguales.

Ahora, respecto a la diferencia de los índices de trabajo entre las tronaduras de desarrollo (18.86 kWh/tc en promedio) y producción (25.61 kWh/tc en promedio), esta se podría justificar según los diversos factores involucrados en las tronaduras, por ejemplo: los diagramas de perforación, las secuencias de detonación, los dominios geológicos, entre otros.

Respecto a los dominios geológicos de los sectores de las cuatro tronaduras, en la Sección 3.2.1 se indica que el dominio geológico predominante en la faena es andesita, y en efecto, el dominio geológico para cada uno de los cuatro sectores de las tronaduras es también andesita. En la Tabla 11 se muestran los GSI de cada sector involucrado.

**Tabla 11: Dominios geológicos de sectores de tronaduras de pruebas definitivas.**

Sector	Dominio	GSI
Tronadura 1	Andesita	56.8
Tronadura 2	Andesita	54.0
Tronadura 3	Andesita	56.6
Tronadura 4	Andesita	56.4

Considerando que los dominios y clasificación de los sectores son equivalentes, la diferencia de los índices de trabajo entre desarrollo y producción no se atribuye a la litología, sino que, a aspectos del diseño y condiciones de las tronaduras realizadas.

Respecto a las características del diseño de las tronaduras de desarrollo y producción, anteriormente se mencionó que las tronaduras de desarrollo corresponden a galerías de 5 x 4 m de 53 perforaciones de 48 mm de diámetro, mientras que las tronaduras de producción corresponden a una tronadura de cara libre de 3 perforaciones de 4.5 pulgadas de diámetro con 26.8 m de largo, y una tronadura de hundimiento de caserón de 18 perforaciones de 3 pulgadas de diámetro con largos entre 3.8 m y 21.2 m. Según esto, la diferencia de los índices de trabajo entre desarrollo y producción podría, por ejemplo, atribuirse en cierta medida a los diagramas de perforación, tal que se tiene una mayor cantidad de perforaciones con menor espaciamiento en las galerías de desarrollo, en contraste con las labores de producción, o podría ser que la secuencia de detonación de las tronaduras de desarrollo fue más efectiva que las de producción. O visto desde otro punto de vista, bien podría tratarse de un caso puntual en que el material de las tronaduras de producción es más duro que el material de las tronaduras de desarrollo porque se tiene una alteración en la composición litológica en el sector de donde se llevaron a cabo las tronaduras de producción.

Si bien sería interesante profundizar en el análisis de las diferencias en los índices de trabajo entre desarrollo y producción, corresponde concluir sobre la correlación de los resultados de la técnica y los índices de trabajo.

A modo de resumen, los valores de los parámetros de área superficial específica y volumen de poros de la Muestra 1 son 1.82 m<sup>2</sup>/g y 10.28 x 10<sup>-3</sup> cm<sup>3</sup>/g y 3.64 m<sup>2</sup>/g y 28.25 x 10<sup>-3</sup> cm<sup>3</sup>/g para la Muestra 2. Se tiene que el área superficial específica de la Muestra 2 es 2 veces mayor que el de la Muestra 1, mientras que el volumen de poros de la Muestra 2 es 2.7 veces mayor que el de la Muestra 1. Por otra parte, los valores de los índices de trabajo de las Muestras 1B y 2B son 18.94 kWh/tc y 18.77 kWh/tc respectivamente, lo que corresponde a un diferencial del 0.9%.

Por lo tanto, se plantea que los parámetros de la técnica permiten identificar diferencias en el nivel de microfractura del material post tronadura según el agente de tronadura utilizado, tal que la Tronadura 2 con Emulsión generó un mayor nivel de

acondicionamiento que la Tronadura 1 con ANFO, y, por otro lado, los índices de trabajo de las pruebas de molienda no permiten diferenciar el agente de tronadura utilizado ya que los valores son prácticamente equivalentes. Esta equivalencia en los índices de trabajo podría deberse a que las pruebas de molienda no pueden diferenciar el agente de tronadura empleado bajo la hipótesis que estos agentes dañan internamente el material de distinta manera, pero que sí pueden diferenciar los parámetros de la técnica. O visto de otra manera, podría ser que los agentes de tronadura empleados no causaron un daño interno en el material que sea significativo, lo que apropiadamente se refleja en índices de trabajo equivalentes, lo cual indicaría que los resultados de área superficial específica y volumen de poros de las Tronaduras 1 y 2 no representan el fenómeno en estudio a pesar de las tendencias (dentro de lo esperado) que se obtuvieron.

En respuesta a lo anterior, para poder dar un argumento más concluyente, hacen falta casos de estudio para ampliar el espectro de aplicación de la técnica, principalmente para analizar si es posible obtener isotermas del tipo II o tipo IV para un cálculo confiable de los parámetros de área superficial específica y volumen de poros.

En conclusión, se recomienda realizar más casos de estudio, esto es, aplicar procesos de adsorción sobre muestras de material post tronadura con distintos tipos de roca y con mayor variedad de rangos de tamaño para construir una línea de base para evaluar si efectivamente es posible obtener isotermas del tipo II o tipo IV para una aplicación confiable de la técnica y así calcular los parámetros de área superficial específica y volumen de poros, y de esta manera, evaluar la aplicabilidad de la técnica en conjunto con resultados de pruebas de molienda.

## Capítulo 6: Conclusiones

Respecto a los procesos de adsorción de las pruebas preliminares, se concluye que, a menor tamaño de fragmentos, se favorece la construcción de las isotermas para un adecuado cálculo de los parámetros de área superficial específica y volumen de poros.

Respecto a los resultados de los procesos de adsorción de las tronaduras de desarrollo de las pruebas definitivas, se podría plantear que la Emulsión generó un mayor nivel de microfractura que el ANFO. No obstante, el hecho que las isotermas obtenidas no correspondan ni al tipo II o IV de la clasificación IUPAC, condiciona la confiabilidad de los resultados de área superficial específica y volumen de poros calculados, ya que los modelos utilizados para determinar estos parámetros están contruidos principalmente para estos tipos de isotermas. Sin embargo, las tendencias están dentro de lo esperado, tal que la tronadura de desarrollo con Emulsión presenta mayor área superficial específica y mayor volumen de poros que la tronadura de desarrollo con ANFO, esto bajo la hipótesis que la Emulsión genera mayor daño que el ANFO.

Por otra parte, los resultados de estos procesos de adsorción no se condicen con los resultados de las pruebas de molienda, ya que los índices de trabajo de las tronaduras de desarrollo con ANFO y Emulsión son prácticamente equivalentes, lo que permite plantear que la diferencia del nivel de microfractura de estas tronaduras no se rescata de las pruebas de molienda. Dicho esto, se plantea que las pruebas de molienda no diferencian el emplear ANFO o Emulsión, pero que sí lo hacen los parámetros de área superficial específica y volumen de poros (al menos en términos relativos). Ahora bien, para poder dar una respuesta concluyente hacen falta más casos de estudio para ampliar el espectro de aplicación de la técnica, por que, nuevamente, los resultados de la técnica no son del todo confiables y que corresponden solo a un caso de estudio que bien podría ser caso particular.

Considerando lo expresado, se concluye que, según los casos de estudio realizados y los resultados obtenidos, la técnica de medición de microfracturas no puede considerarse una herramienta confiable para medir el nivel de microfractura mediante la porosidad del material post tronadura, principalmente por que hace falta mayor representatividad. Por lo que se recomienda ampliar los casos de estudio de la técnica al aplicar procesos de adsorción sobre muestras de material con distintos tipos de roca y rangos de tamaño (para analizar en profundidad la influencia de estos parámetros) para determinar si es posible obtener isotermas del tipo II o IV para una aplicación confiable de la técnica en el cálculo de los parámetros de área superficial específica y volumen de poros, y de esta manera, evaluar su aplicabilidad en conjunto con resultados de pruebas de molienda para evaluar si efectivamente los índices de trabajo no pueden diferenciar entre ANFO y Emulsión, mientras que los parámetros de la técnica si pueden, lo cual permitiría apoyar la aplicabilidad de esta técnica de medición de microfracturas.



## Capítulo 7: Bibliografía

- Adel, G., Smith, B., Kojovic, T., Thornton, D., y Richardson, J. M. (28 de febrero-2 de marzo de 2005). *Mine-to-Mill® optimization of aggregate production*. 2005 SME Annual Meeting: Got Mining - Preprints. Queensland, Australia. <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:a780e45>
- Akesson, U., Hansson, J., y Stigh, J. (2004). Characterisation of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading. *Engineering Geology*, 72(1-2), 131-142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.07.001>
- Bavnhøj, C. G., Knopp, M. M., Madsen, C. M., y Löbmann, K. (2019). The role interplay between mesoporous silica pore volume and surface area and their effect on drug loading capacity. *International Journal of Pharmaceutics: X*, 1, 100008. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpx.2019.100008>
- Brunauer, S., Emmett, P. H., y Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309-319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>
- Dance, A., Valery, W., Jankovic, A., La Rosa, D., y Esen, S. (23-27 de septiembre de 2006). *Higher productivity through cooperative effort: a method of revealing and correcting hidden operating inefficiencies*. SAG 2006. Vancouver, Canadá. <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:3c8e7ef>
- [Depiction of monolayer formation]. (2024). Anton Paar. [https://wiki.anton-paar.com/fileadmin/wiki/images/BET\\_Theory/figure\\_2.png](https://wiki.anton-paar.com/fileadmin/wiki/images/BET_Theory/figure_2.png)
- Eloranta, J. (2-6 de febrero de 1997). *The efficiency of blasting versus crushing and grinding*. 23rd Conference of Explosives and Blasting Technique. Las Vegas, Estados Unidos. [https://www.elorantaassoc.com/download/Papers/E&A\\_Efficiency\\_Blasting\\_vs\\_Crushing.pdf](https://www.elorantaassoc.com/download/Papers/E&A_Efficiency_Blasting_vs_Crushing.pdf)
- Esen, S. (16-19 de abril de 2013). *Fragmentation modelling and the effects of ROM fragmentation on comminution circuits*. 23rd International Mining Congress and Exhibition of Turkey. Antalya, Turquía. [https://www.researchgate.net/publication/288128319\\_Fragmentation\\_modelling\\_and\\_the\\_effects\\_of\\_ROM\\_fragmentation\\_on\\_comminution\\_circuits](https://www.researchgate.net/publication/288128319_Fragmentation_modelling_and_the_effects_of_ROM_fragmentation_on_comminution_circuits)
- Micromeritics. (2024). *3Flex*. <https://www.micromeritics.com/3flex/?lang=es>
- Halsey, G. (1948). Physical Adsorption on Non-Uniform Surfaces. *The Journal of Chemical Physics*, 16(10), 931-937. <https://doi.org/10.1063/1.1746689>
- Hazra, B., Wood, D. A., Vishal, V., y Singh, A. K. (2018). Pore Characteristics of Distinct Thermally Mature Shales: Influence of Particle Size on Low-Pressure CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> Adsorption. *Energy & Fuels*, 32(8), 8175-8186. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01439>
- Johnson, N. G. (2024). *explosive*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/explosive>

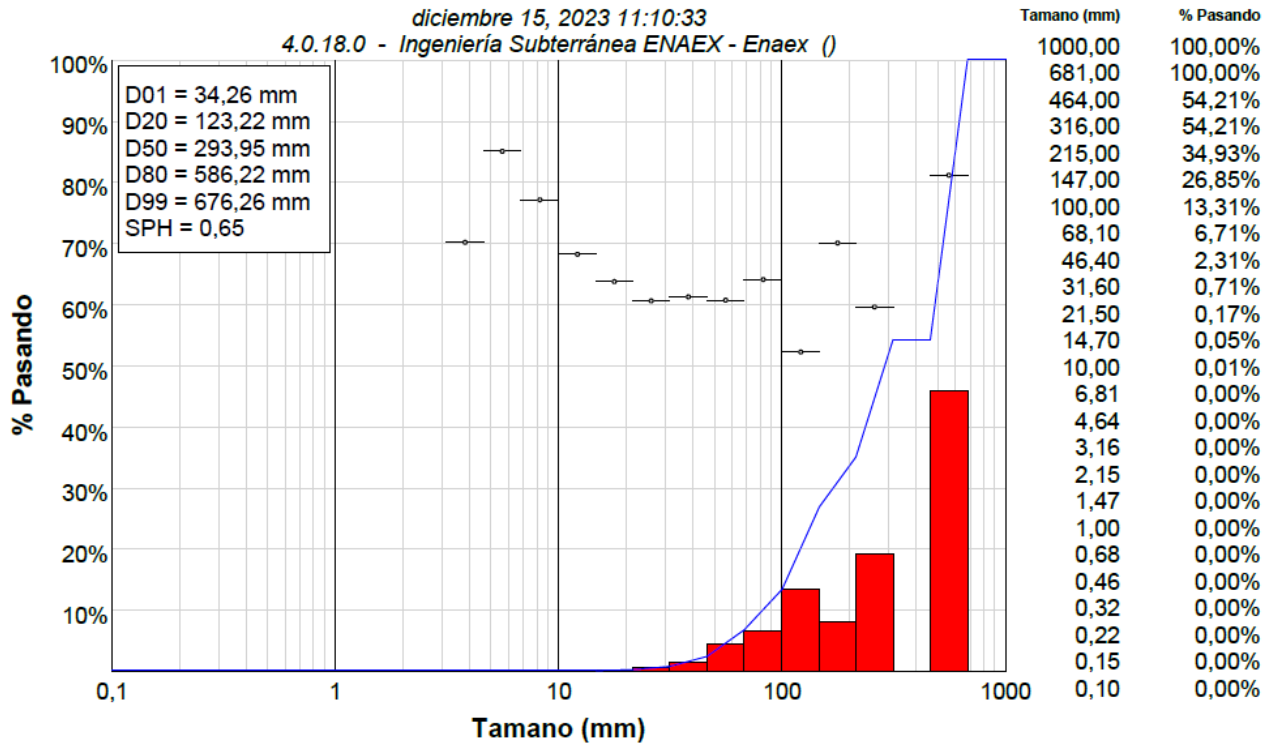
- Kanchibotla, S. S., Valery, W., y Morrell, S. (7-11 de noviembre de 1999). *Modeling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding*. Explo'99: A Conference on Rock Breaking. Kalgoorlie, Australia. <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:149888>
- Khademian, A., y Bagherpour, R. (2017). Alteration of grindability of minerals due to applying different explosives in blasting operation. *Minerals Engineering*, 111, 174-181. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.016>
- Kojovic, T., Michaux, S. y McKenzie, C. (4-7 de septiembre de 1995). *Impact of Blast Fragmentation on Crushing and Screening Operations in Quarrying*. EXPLO 95 Conference. Brisbane, Australia. <https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/explo-95-conference-brisbane-september-1995/impact-of-blast-fragmentation-on-crushing-and-screening-operations-in-quarrying>
- Korman, T., Bedeković, G., Kujundžić, T., y Kuhinek, D. (2015). Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of Jaw Crusher. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 51, 461-475. [https://www.researchgate.net/publication/271072004\\_Impact\\_of\\_physical\\_and\\_mechanical\\_properties\\_of\\_rocks\\_on\\_energy\\_consumption\\_of\\_Jaw\\_Crusher](https://www.researchgate.net/publication/271072004_Impact_of_physical_and_mechanical_properties_of_rocks_on_energy_consumption_of_Jaw_Crusher)
- Kumar, V., Srinivas, G., Wood, B., Ramisetty, K., Stewart, A., Howard, C., Brett, D. J. L., y Rodriguez-Reinoso, F. (2019). Characterization of adsorption site energies and heterogeneous surfaces of porous materials. *Journal of Materials Chemistry A*, 7. <https://doi.org/10.1039/C9TA00287A>
- Langmuir, I. (1916). The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids. Part I. Solids. *Journal of the American Chemical Society*, 38, 2221-2295. <http://doi.org/10.1021/ja02268a002>
- Life of Riley. (2010). *BET Multilayer Adsorption* [Figura]. Wikimedia Commons. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BET\\_Multilayer\\_Adsorption.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BET_Multilayer_Adsorption.svg)
- Lowell, S., Shields, J., Thomas, M. A., y Thommes, M. (2004). *Characterization of porous solids and powders: Surface area, pore size and density*. Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2303-3>
- Lyu, C., Zhou, X., Lu, X., Zhang, Y., Li, C., Zhou, Q., Sun, Z., y Chen, G. (2021). The Effect of Particle Size on the Interpretation of Pore Structure of Shale by N<sub>2</sub> Adsorption. *Geofluids*, 2021(1), 8898142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/8898142>
- Manual de tronadura Enaex. (2008). SlideShare. <https://es.slideshare.net/slideshow/manual-de-tronadura-enaex/31828552>
- McKee, D. J., Chitombo, G. P., y Morrell, S. (1995). The relationship between fragmentation in mining and comminution circuit throughput. *Minerals Engineering*, 8(11), 1265-1274. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875\(95\)00094-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875(95)00094-7)

- Morrell, S. y Munro, P. (10-12 de abril de 2000). *Increased Profits Through Mine-and-Mill Integration*. After 2000 - The Future of Mining. Sydney, Australia. <https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/after-2000---the-future-of-mining-annual-conference/increased-profits-through-mine-and-mill-integration>
- Nielsen, K., y Kristiansen, J. (1996). Blasting-crushing-grinding: Optimisation of an integrated comminution system. En B. Mohanty (Ed). *Rock Fragmentation by Blasting: Proceedings of the Fifth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. (pp. 269-277). CRC Press. <https://search.worldcat.org/es/title/1231037502>
- Nielsen, K., y Lownds, C. M. (1997). Enhancement of taconite crushing and grinding through primary blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4), 226.e1-226.e14. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)00165-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)00165-2)
- Nielsen, K., y Malvik, T. (1999). Grindability enhancement by blast-induced microcracks. *Powder Technology*, 105(1-3), 52-56. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00117-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00117-5)
- Okeke, R. R. C. (2015). Blasting and Mining. *Explosives Engineering*, 8-13. [https://www.researchgate.net/publication/321912428\\_Blasting\\_and\\_Mining](https://www.researchgate.net/publication/321912428_Blasting_and_Mining)
- Parra, H., Onederra, I., Michaux, S., Kuhar, L., McFarlane, A., y Chapman, N. (2015). A study of the impact of blast induced conditioning on leaching performance. *Minerals Engineering*, 74, 1-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.12.032>
- Pitard, F.F. (2019). *Theory of Sampling and Sampling Practice* (3a ed). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351105934>
- ScienceDirect. (2024). *Van Der Waals Adsorption*. <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/van-der-waals-adsorption>
- [Simplified Depiction of a BET Surface area calculation]. (2024). Anton Paar. [https://wiki.anton-paar.com/fileadmin/wiki/images/BET\\_Theory/figure\\_3.png](https://wiki.anton-paar.com/fileadmin/wiki/images/BET_Theory/figure_3.png)
- Workman, L., y Eloranta, J. (2003). *The Effects of Blasting on Crushing and Grinding Efficiency and Energy Consumption*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/237263003\\_The\\_Effects\\_of\\_Blasting\\_on\\_Crushing\\_and\\_Grinding\\_Efficiency\\_and\\_Energy\\_Consumption](https://www.researchgate.net/publication/237263003_The_Effects_of_Blasting_on_Crushing_and_Grinding_Efficiency_and_Energy_Consumption)

# ANEXOS

## Anexo A

En esta sección se adjuntan las distribuciones granulométricas de las cuatro tronaduras de las pruebas definitivas.



**Figura 37: Distribución granulométrica de material post tronadura de voladura de desarrollo con ANFO (Tronadura 1 de pruebas definitivas).**

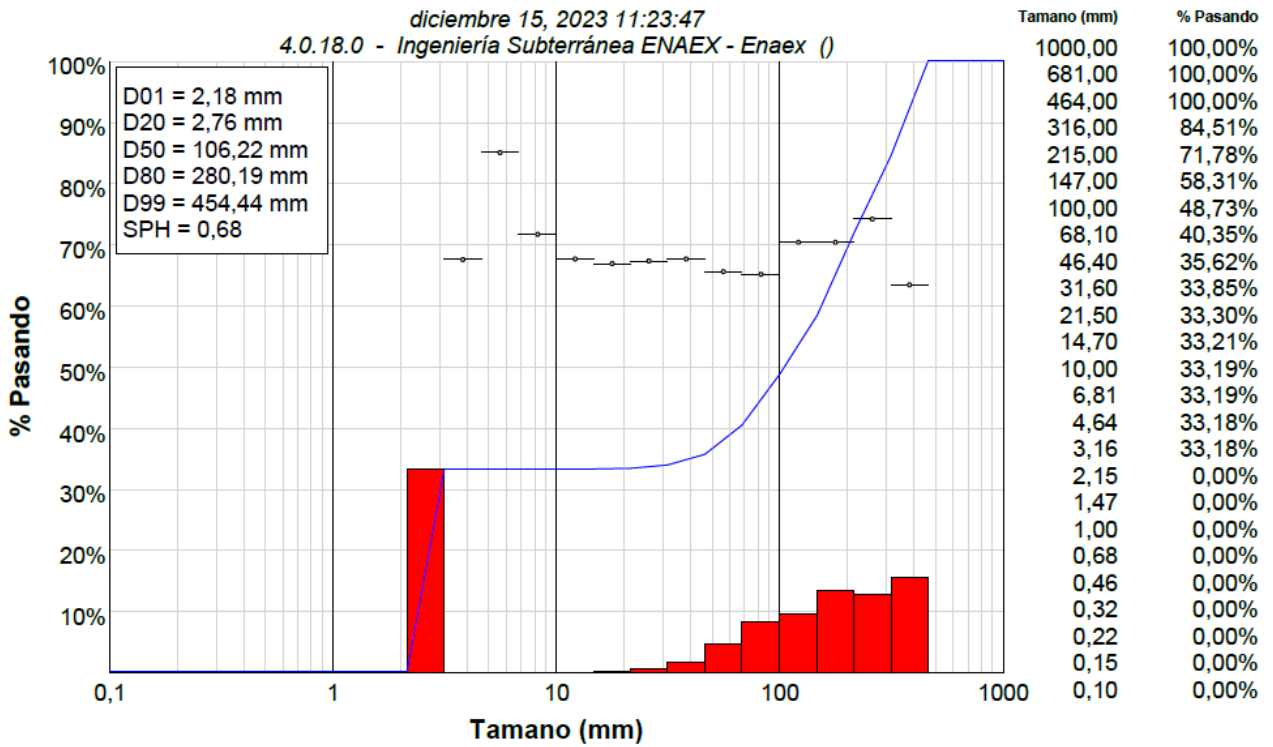


Figura 38: Distribución granulométrica de material post tronadura de voladura de desarrollo con Emulsión (Tronadura 2 de pruebas definitivas).

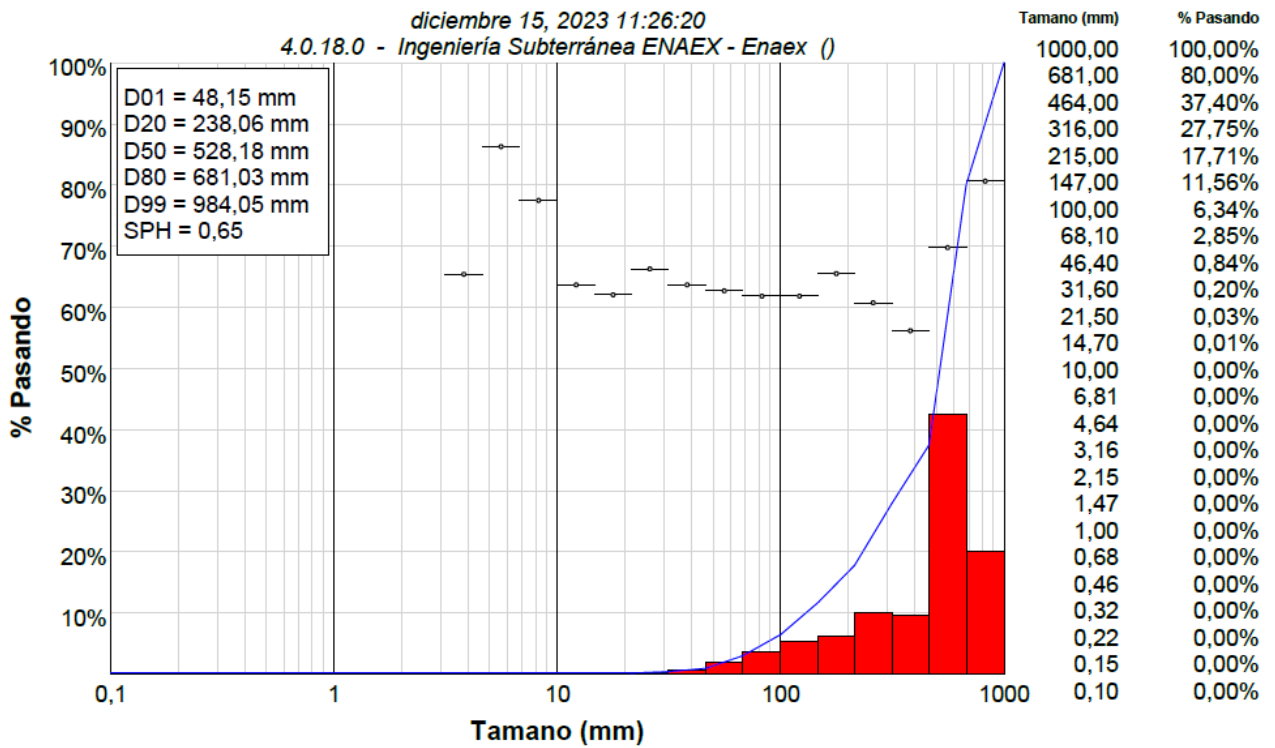


Figura 39: Distribución granulométrica de material post tronadura de voladura de producción con ANFO (Tronadura 3 de pruebas definitivas).

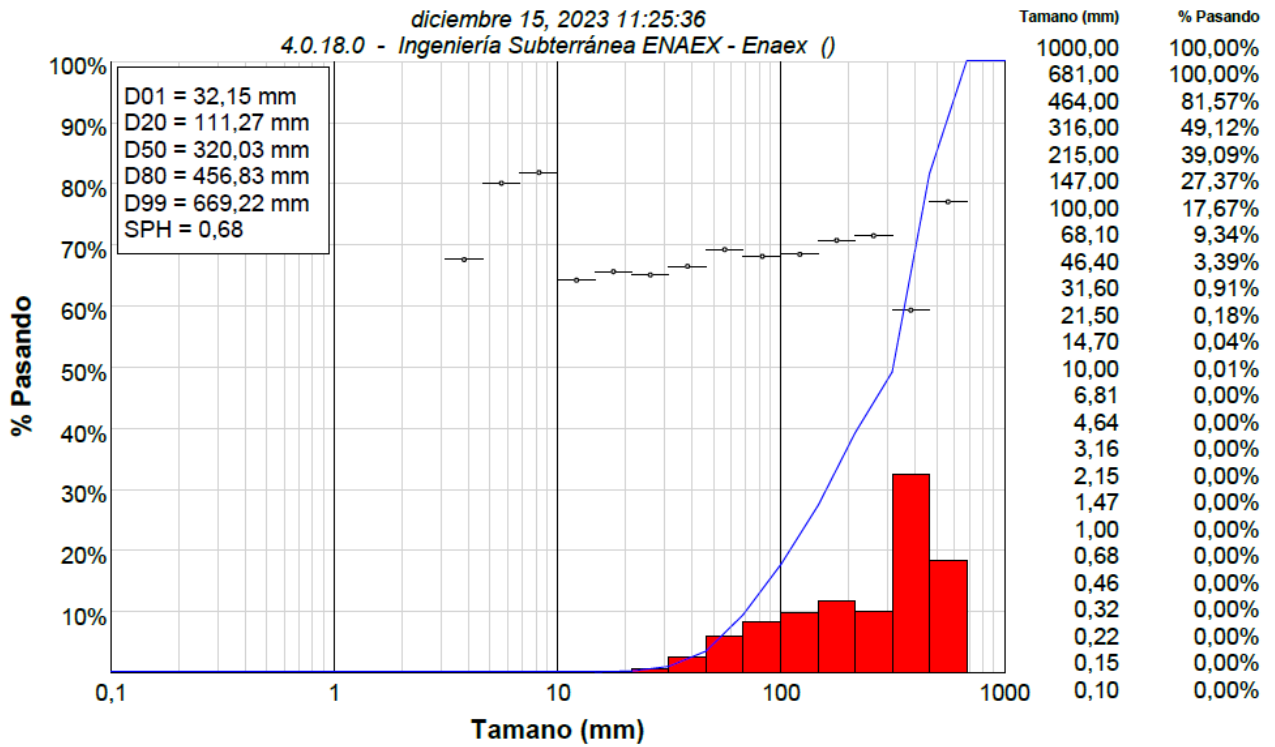


Figura 40: Distribución granulométrica de material post tronadura de voladura de producción con Emulsión (Tronadura 4 de pruebas definitivas).

## Anexo B

En esta sección se adjuntan tablas que contienen los cálculos asociados para obtener el parámetro de volumen de poros de acuerdo al procedimiento descrito en la Sección 2.5.2. Se adjunta la tabla asociada a la Muestra 2.3 de las pruebas preliminares y las cuatro tablas asociadas a las muestras de las pruebas definitivas.

**Tabla 12: Cálculo de volumen de poros para muestra de material post tronadura de una zanja tronada con Emulsión y tamizada para el rango de tamaño -20# (Muestra 2.3 de pruebas preliminares).**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\frac{p}{p_0}$	$v$	$R_k$	$t$	$R_p$	$\bar{R}_k$	$\bar{R}_p$	$\Delta t$	$\Delta v$	$\Delta v_{liq} \times 10^3$	$\Delta t \Sigma S \times 10^3$	$V_p \times 10^3$	$S$	$\Sigma S$
	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{m^2}{g}\right)$	$\left(\frac{m^2}{g}\right)$
0.99	5.16	1279.5	31.0	1341.4									
0.98	3.36	433.6	21.6	476.8	856.6	909.1	9.4	1.79	2.79	0.000	3.143	0.069	0.069
0.98	3.28	421.5	21.4	464.3	427.6	470.5	0.2	0.09	0.13	0.001	0.160	0.007	0.076
0.95	1.99	196.4	16.6	229.5	308.9	346.9	4.8	1.29	2.01	0.037	2.489	0.143	0.219
0.92	1.42	120.8	14.1	149.0	158.6	189.3	2.5	0.56	0.88	0.054	1.174	0.124	0.343
0.89	1.11	85.8	12.6	111.0	103.3	130.0	1.5	0.31	0.48	0.052	0.673	0.104	0.447
0.87	0.94	68.0	11.6	91.3	76.9	101.1	0.9	0.18	0.27	0.042	0.398	0.079	0.526
0.85	0.85	59.1	11.1	81.3	63.5	86.3	0.5	0.08	0.13	0.028	0.191	0.044	0.570
0.83	0.76	49.9	10.5	71.0	54.5	76.1	0.6	0.09	0.14	0.035	0.214	0.056	0.626
0.80	0.69	42.9	10.0	62.8	46.4	66.9	0.5	0.07	0.12	0.033	0.171	0.051	0.678
0.52	0.37	14.5	7.0	28.4	28.7	45.6	3.0	0.32	0.50	0.205	0.736	0.323	1.000
0.50	0.36	13.8	6.8	27.5	14.1	27.9	0.1	0.01	0.02	0.011	0.016	0.012	1.012

**Tabla 13: Cálculo de volumen de poros para muestra de material post tronadura de voladura de desarrollo con ANFO y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 1 de pruebas definitivas).**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\frac{p}{p_0}$	$v$	$R_k$	$t$	$R_p$	$\bar{R}_k$	$\bar{R}_p$	$\Delta t$	$\Delta v$	$\Delta v_{liq} \times 10^3$	$\Delta t \Sigma S \times 10^3$	$V_p \times 10^3$	$S$	$\Sigma S$
	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{m^2}{g}\right)$	$\left(\frac{m^2}{g}\right)$
0.99	6.84	1340.2	31.5	1371.7									
0.98	6.75	1217.6	30.5	1248.1	1278.9	1309.9	1.0	0.09	0.14	0.000	0.143	0.002	0.002
0.97	4.80	462.8	22.1	484.9	840.2	866.5	8.4	1.96	3.05	0.002	3.238	0.075	0.077
0.96	4.33	381.4	20.7	402.1	422.1	443.5	1.4	0.46	0.72	0.011	0.786	0.035	0.112
0.95	3.04	195.4	16.6	212.0	288.4	307.1	4.1	1.29	2.00	0.046	2.214	0.144	0.257
0.92	2.30	112.0	13.8	125.8	153.7	168.9	2.8	0.75	1.16	0.072	1.316	0.156	0.412
0.90	2.03	88.0	12.7	100.7	100.0	113.2	1.1	0.26	0.41	0.044	0.469	0.083	0.495
0.87	1.78	67.2	11.6	78.8	77.6	89.7	1.1	0.25	0.40	0.054	0.458	0.102	0.597
0.85	1.67	59.1	11.1	70.2	63.1	74.5	0.5	0.11	0.17	0.029	0.189	0.051	0.648
0.83	1.54	49.8	10.5	60.3	54.4	65.2	0.6	0.13	0.20	0.040	0.232	0.071	0.719
0.80	1.44	42.8	10.0	52.7	46.3	56.5	0.5	0.10	0.16	0.037	0.187	0.066	0.786
0.52	0.91	14.7	7.0	21.7	28.7	37.2	3.0	0.53	0.83	0.235	0.991	0.533	1.318
0.50	0.88	13.8	6.8	20.7	14.3	21.2	0.1	0.03	0.04	0.019	0.056	0.052	1.371



**Tabla 14: Cálculo de volumen de poros para muestra de material post tronadura de voladura de desarrollo con Emulsión y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 2 de pruebas definitivas).**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\frac{p}{p_0}$	$v$	$R_k$	$t$	$R_p$	$\bar{R}_k$	$\bar{R}_p$	$\Delta t$	$\Delta v$	$\Delta v_{liq} \times 10^3$	$\Delta t \Sigma S \times 10^3$	$V_p \times 10^3$	$S$	$\Sigma S$
	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{m^2}{g}\right)$	$\left(\frac{m^2}{g}\right)$
0.99	18.39	1285.9	31.0	1317.0									
0.97	7.77	336.8	19.8	356.7	811.4	836.8	11.2	10.62	16.51	0.000	17.566	0.420	0.420
0.95	5.68	169.0	15.8	184.7	252.9	270.7	4.1	2.09	3.25	0.171	3.533	0.261	0.681
0.92	4.74	112.9	13.8	126.7	140.9	155.7	2.0	0.94	1.46	0.135	1.621	0.208	0.889
0.90	4.27	90.6	12.8	103.4	101.7	115.0	1.0	0.47	0.73	0.087	0.826	0.144	1.033
0.88	3.86	73.0	11.9	84.9	81.8	94.1	0.9	0.41	0.63	0.092	0.715	0.152	1.185
0.85	3.52	58.9	11.1	70.0	65.9	77.4	0.8	0.34	0.53	0.098	0.601	0.155	1.340
0.83	3.27	49.9	10.5	60.4	54.4	65.2	0.6	0.25	0.38	0.079	0.434	0.133	1.473
0.80	3.06	42.8	10.0	52.8	46.4	56.6	0.5	0.21	0.33	0.077	0.372	0.131	1.604
0.54	1.98	15.4	7.1	22.4	29.1	37.6	2.9	1.08	1.68	0.464	2.041	1.085	2.689
0.49	1.77	13.4	6.8	20.2	14.4	21.3	0.3	0.21	0.33	0.085	0.541	0.508	3.197

**Tabla 15: Cálculo de volumen de poros para muestra de material post tronadura de voladura de producción con ANFO y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 3 de pruebas definitivas).**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\frac{p}{p_0}$	$v$	$R_k$	$t$	$R_p$	$\bar{R}_k$	$\bar{R}_p$	$\Delta t$	$\Delta v$	$\Delta v_{liq} \times 10^3$	$\Delta t \Sigma S \times 10^3$	$V_p \times 10^3$	$S$	$\Sigma S$
	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{m^2}{g}\right)$	$\left(\frac{m^2}{g}\right)$
0.99	12.11	1327.1	31.3	1358.5									
0.98	12.01	1146.3	29.9	1176.2	1236.7	1267.4	1.5	0.11	0.16	0.000	0.173	0.003	0.003
0.97	9.43	530.5	23.1	553.5	838.4	864.9	6.8	2.57	4.00	0.002	4.256	0.098	0.101
0.96	8.26	415.6	21.3	436.9	473.0	495.2	1.8	1.17	1.82	0.018	1.978	0.080	0.181
0.94	4.75	155.1	15.3	170.4	285.3	303.6	6.0	3.51	5.47	0.108	6.067	0.400	0.581
0.93	4.22	123.8	14.2	138.0	139.4	154.2	1.1	0.53	0.82	0.064	0.930	0.121	0.701
0.90	3.53	87.1	12.6	99.8	105.4	118.9	1.6	0.68	1.07	0.110	1.214	0.204	0.905
0.88	3.23	72.7	11.9	84.6	79.9	92.2	0.7	0.30	0.47	0.067	0.537	0.116	1.022
0.85	2.93	59.1	11.1	70.2	65.9	77.4	0.8	0.30	0.47	0.081	0.535	0.138	1.160
0.83	2.71	49.8	10.5	60.3	54.5	65.3	0.6	0.22	0.34	0.071	0.390	0.119	1.280
0.80	2.53	43.0	10.0	53.0	46.4	56.7	0.5	0.17	0.27	0.065	0.307	0.109	1.388
0.65	1.93	22.4	8.0	30.4	32.7	41.7	2.0	0.61	0.94	0.271	1.096	0.526	1.914
0.53	1.63	14.9	7.0	22.0	18.7	26.2	1.0	0.29	0.46	0.194	0.515	0.393	2.307
0.50	1.58	13.8	6.8	20.6	14.4	21.3	0.2	0.06	0.09	0.042	0.098	0.092	2.399

**Tabla 16: Cálculo de volumen de poros para muestra de material post tronadura de voladura de producción con Emulsión y tamizada para el rango de tamaño 50# - 70# (Muestra 4 de pruebas definitivas).**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\frac{p}{p_0}$	$v$	$R_k$	$t$	$R_p$	$\bar{R}_k$	$\bar{R}_p$	$\Delta t$	$\Delta v$	$\Delta v_{liq} \times 10^3$	$\Delta t \Sigma S \times 10^3$	$V_p \times 10^3$	$S$	$\Sigma S$
	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	(Å)	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{cm^3}{g}\right)$	$\left(\frac{m^2}{g}\right)$	$\left(\frac{m^2}{g}\right)$
0.99	6.61	1336.3	31.4	1367.7									
0.99	6.57	1123.5	29.7	1153.2	1229.9	1260.4	1.8	0.03	0.05	0.000	0.054	0.001	0.001
0.98	5.18	532.2	23.1	555.4	827.9	854.3	6.5	1.39	2.16	0.001	2.303	0.054	0.055
0.98	4.53	416.6	21.3	437.9	474.4	496.6	1.8	0.65	1.01	0.010	1.095	0.044	0.099
0.94	2.58	161.0	15.5	176.5	288.8	307.2	5.8	1.96	3.04	0.057	3.377	0.220	0.319
0.93	2.21	122.7	14.2	136.9	141.8	156.7	1.3	0.37	0.57	0.043	0.646	0.082	0.401
0.90	1.83	87.2	12.6	99.8	104.9	118.3	1.5	0.38	0.59	0.061	0.671	0.113	0.515
0.88	1.67	72.8	11.9	84.7	80.0	92.2	0.7	0.16	0.25	0.038	0.288	0.063	0.577
0.85	1.50	59.2	11.1	70.3	66.0	77.5	0.8	0.16	0.26	0.046	0.289	0.075	0.652
0.83	1.39	49.8	10.5	60.3	54.5	65.3	0.6	0.12	0.18	0.040	0.207	0.063	0.715
0.80	1.29	42.9	10.0	52.9	46.4	56.6	0.5	0.09	0.15	0.037	0.163	0.058	0.772
0.54	0.84	15.5	7.1	22.6	29.2	37.7	2.9	0.45	0.70	0.222	0.806	0.428	1.200
0.50	0.80	13.8	6.8	20.7	14.6	21.6	0.3	0.04	0.06	0.031	0.070	0.065	1.265