UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAISO – CHILE

DETERMINACIÓN, MODELACIÓN Y MITIGACIÓN DE LA GENERACIÓN DE POLVO EN UN STOCKPILE MINERO

DAVID SEBASTIÁN CAMUS CARRIÓN

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO MECANICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: FRANCISCO CABREJOS M., Ph.D.

PROFESOR CORREFERENTE: Mg. – Ing. JAIME ESPINOZA S.

DICIEMBRE 2009

Agradecimientos

Agradezco a toda mi familia, amigos y a personas como: Mario Vergara, Francisco Mena los cuales me inculcaron el espíritu de superación y me ayudaron a iniciar este camino.

También a Francisco Cabrejos profesor guía y ejemplo de persona, por sus diferentes consejos y su amistad más allá del deber vocacional como docente.

Como olvidar a todos los apoyos académicos del Departamento de Ingeniería Mecánica, colaboradores anónimos de muchas de nuestras obras y logros universitarios.

Mis agradecimientos para todos ustedes

…El camino de la vida nunca es fácil para aquellos que les gusta soñar…

A mis padres y a mi hermana, pilares de mi educación, por su motivación, amor y apoyo constante durante todos estos años.

A mi abuelo Guillermo Carrión por su dedicación y cariño durante mi infancia lo cual me llevo a elegir esta profesión. Y por supuesto a todos mis amigos los cuales estuvieron siempre allí con una palabra de ánimo ante la adversidad. A todos ustedes, gracias por creer en mí.

Resumen

El presente trabajo busca determinar y modelar el fenómeno de la generación de polvo en un stockpile minero del tipo cónico con un mineral chancado de cobre, mediante ensayos y experimentos realizados en el Centro de Investigación para el Transporte de Materiales Sólidos a Granel (CITRAM) laboratorio dependiente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María. La modelación de este fenómeno, requiere el diseño, construcción y armado de un sistema que permita medir y cuantificar la generación de polvo en una pila de acopio, así como de un sistema de captación de polvo.

Se procedió a cuantificar el polvo captado por los filtros controlando diferentes variables de operación de un stockpile minero como son el contenido de humedad del mineral y el flujo de sólidos.

Una vez captado el material obtenido por los filtros, este fue analizado en características como son su distribución granulométrica, densidad aparente, densidad específica, y su tendencia a generar polvo del material captado, utilizando un instrumento conocido como Dustmeter®.

Los resultados obtenidos indican una clara disminución de la generación de polvo al aumentar la cantidad de humedad en el mineral, llegando a valores donde la reducción de polvo es cerca de un 70 [%]. En el caso de la variación del flujo de sólidos, se apreció que depende en gran medida del contenido de humedad presente en el mineral.

Se concluye que el mineral captado por los filtros, es de características muy finas (d_{50} = 4,5 [µm] y d_{100} = 30 [µm]), que provocarían daños irreversibles a la salud en el caso de estar sometido a exposiciones por largos períodos.

Abstract

The present work seeks to determinate and model the phenomenon of dust generation in a mining conical stockpile with copper crushed ore, through experiment and tests performed in the "Centro de Investigación para el Transporte de Materiales Sólidos a Granel" (CITRAM) laboratory of the Departamento de Ingeniería Mecánica of the Universidad Técnica Federico Santa María. The modelling of this phenomenon requires the design, construction and assembly of a system that allows for the measurement and quantification of the dust generation in the stockpile and also for the creation of a dust capture system.

The work proceeds to quantify the dust collected by the filters controlling several different variables of operations in a mine stockpile such as the moisture content of the ore and the solids flow.

Once the dust was captured by the filters, it was analyzed in terms of particle size distribution, bulk density, specific density and the tendency to generate dust from the collected material, using an instrument known as a Dustmeter®.

The results obtained by this device indicated a clear reduction of the dust generated when the moisture content in the ore is increased, achieving values of reduction of nearly 70[%]. The flow of the variation of solids depends, to a great extent, on the moisture content of the ore.

It is concluded that the ore collected by the filters is very fine (d_{50} = 4,5 [µm] y d_{100} = 30 [µm]), and that being exposed to it for long periods of time will result in irreversible health problems.

Nomenclatura

W_s	= Flujo de sólidos	[kg/min]
d_{10}	= Tamaño de partículas bajo el cual está el 10 % de la distribución	[µm]
d_{50}	= Tamaño de partículas bajo el cual está el 50 % de la distribución	[µm]
d_{100}	= Tamaño de partículas bajo el cual está el 100 % de la distribución	[µm]
γ_a	= Densidad aparente del material	[gr/ml]
γ_e	= Densidad específica del material	[gr/ml]
α_{reposo}	= Angulo de reposo del material	[°]
α_{reposo}	= Angulo de vaciado del material	[°]
P_{silo}	= Peso total de material en el silo	[kg]
$P_{inicial}$	= Peso inicial de los filtros	[gr]
P_{final}	= Peso final de los filtros	[gr]
t_{ensayo}	= Tiempo de duración de ensayo	[min]
W_{polvo}	= Pérdida porcentual de masa	[%]
U_g	= Velocidad del gas	[m/s]
$W_{polvocaptado}$	= Polvo captado por los filtros	[gr]
$d_{acrilico}$	= Diámetro interior de Dustmeter	[m]
Q	= Caudal de gas	[m^3/h]

Índice

Resumen i

Abstract ii

Nomenclatura iii

Índice iv

Índice de Tablas vi

Índice de Figuras vii

1. Introducción 2
   1.1 Objetivos 4

2. Investigación del estado del arte 5
   2.1 Definiciones de polvo 5
   2.2 Generación de polvo 6
   2.3 Diámetro de partículas 8
   2.4 Motivación para el control de polvo 10
   2.5 Stockpiles 11
      2.5.1 Stockpiles cónicos 14
      2.5.2 Stockpiles prismáticos 15
   2.6 Sistema de control de polvo en stockpiles 16
      2.6.1 Canchas acopio de carbón 16
      2.6.2 Sistemas de adición de agua 17
      2.6.3 Murallas laterales y faldones 18
      2.6.4 Stockpiles de presión negativa 19

3. Modelación 21
   3.1 Características de un material sólido a granel 21
      3.1.1 Principales características de un material sólido a granel 21
   3.2 Características del material ensayado 26
      3.2.1 Granulometría 26
      3.2.2 Contenido de humedad 27

3.2.3 Angulo de reposo y de vaciado 27
3.3 Características del modelo 27
3.4 Equipamiento utilizado 31
3.4.1 Silo 31
3.4.2 Tolva de descarga 31
3.4.3 Alimentador de correa 31
3.4.4 Aspiradora 32
3.4.5 Filtro de captación 33
3.5 Prueba 34
4. Experimental 37
4.1 Montaje inicial 37
4.2 Procedimiento de medición 38
4.3 Ensayos y mediciones 40
4.3.1 Ensayos realizados 41
4.3.2 Granulometría del polvo captado 44
4.3.3 Densidad del polvo 46
5. Resultados Obtenidos 47
5.1 Variación de humedad 47
5.2 Variación de flujo másico 49
5.3 Dustmeter 53
5.4 Concentración de polvo 56
5.5 Efecto de segregación 57
6. Conclusiones y recomendaciones 59
7. Referencias 61
8. Anexos 64

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Diferentes tamaños de partículas finas existentes. 9

Tabla 2.2: Posibles daños producidos por emanaciones de polvo. 10

Tabla 3.1: Valores típicos de ángulos de reposo y de vaciado de los minerales..... 22

Tabla 3.2: Valores medidos de ángulo de reposo y vaciado. 27

Tabla 4.1: Programa de ensayos y mediciones realizados. 43

Tabla 4.2: Cantidad de muestras analizadas por parámetro. 44

Tabla 4.3: Tamaños característicos del ensayo granulométrico del polvo..... 45

Tabla 4.4: Valores de densidad del polvo ensayado. 46

Tabla 5.1: Relación de velocidad de avance el alimentador de correa del silo de llenado. 49

Índice de Figuras

Figura 1.1: Generación de polvo en un stockpile cónico abierto, SCM Candelaria. .. 3

Figura 2.1: Fenómeno de generación de polvo ambiental en Bagdad, Iraq. 6

Figura 2.2: Generación de polvo durante el carguío de camiones en SCM Abra. 8

Figura 2.3: Comparación de tamaños entre partículas finas. [7]..... 9

Figura 2.4: Sistema de carga de un stockpile en SCM Candelaria. 13

Figura 2.5: Stockpile cónico en Codelco Norte Proyecto PMTP. [9] 14

Figura 2.6: Stockpile prismático de chips de madera, Celco Planta Valdivia. 15

Figura 2.7: Canchas de carbón, Riga – Letonia. 16

Figura 2.8: Sistema de protección de murallas y faldones laterales, SCM El Abra.. 18

Figura 2.9: Stockpiles cónicos de presión negativa de carbón y cal Riga, Letonia. . 20

Figura 2.10: Interior de un stockpile de concentrado de cobre Atiport, Chile. [14] . 20

Figura 3.1: Ejemplo de medición del ángulo de reposo y vaciado. 23

Figura 3.2: Segregación por percolación en un stockpile cónico..... 25

Figura 3.3: Granulometría del mineral chancado de cobre utilizado. 26

Figura 3.4: Esquema general de funcionamiento del modelo físico.* 29

Figura 3.5: Configuración típica de operación del modelo físico. 30

Figura 3.6: Separación de las partículas del flujo principal al llenar la pila. 32

Figura 3.7: Filtros utilizados para la captación de polvo. 33

Figura 3.8: Filtro de Captación en operación durante un ensayo. 34

Figura 3.9: Etapa de prueba con gritz de maíz. 35

Figura 3.10: Alimentador de correa operando con mineral chancado de cobre..... 36

Figura 4.1: Fase inicial de formación del stockpile. 42

Figura 4.2: Funcionamiento del modelo durante el ensayo. 42

Figura 4.3: Curva granulométrica del polvo captado. 44

Figura 4.4: Ensayo de densidad al polvo captado. 46

Figura 5.1: Captación de polvo variando la humedad del mineral..... 48

Figura 5.2: Captación de polvo variando el flujo másico de llenado de la pila. 50

Figura 5.3: Variación de alimentación para mineral a 7 [%] de humedad. 51

Figura 5.4: Captación de polvo para el mineral con 0 [%] de humedad. 52

Figura 5.5: Tendencia a generar polvo del mineral captado por los filtros. 54

Figura 5.6: Ensayo de polvo captado con un “Dustmeter”. 55

Figura 5.7: Variación de concentración de polvo en relación al flujo de sólidos. 56

Figura 5.8: Segregación por trayectoria con mineral a 7[%] de humedad. 57

Figura 5.9: Segregación por trayectoria con mineral a 0[%] de humedad. 58

1. Introducción

Dentro de los aportes a la economía nacional, el rubro de la mediana y la gran minería son el área que mayores fondos incorpora en las arcas fiscales, debido en parte a su gran rentabilidad y en el caso de nuestro país, a la gran cantidad de minerales explotados y procesados.

Basado en esto es de cada vez mayor importancia, explotar, transportar, y almacenar mayores volúmenes y toneladas de minerales. Es así como deben ser manejadas millones de toneladas cada día, para cumplir con las cuotas de producción deseadas.

Una limitante para el aumento de la producción, es el impacto ambiental de los procesos mineros, debiendo analizarse todas las etapas involucradas en el manejo del mineral, para poder reducir las diferentes fuentes contaminantes, las cuales pueden provocar daños irreversibles a la salud de los operadores, a los equipos y al medio ambiente.

Es por eso que dentro de las faenas mineras, un punto que ha tomado gran relevancia ha sido el control de la generación de polvo [1]. Una de las principales fuentes de generación de material particulado, son los stockpiles, que permiten el almacenamiento de volúmenes elevados de mineral chancado.

La generación de polvo es un problema actual en las operaciones mineras, ya que no solo disminuye el volumen de material procesado, sino que también implica en una pérdida energética debido a que se trata de un mineral que fue chancado y se pierde debido a diferentes causas.

Actualmente las tecnologías existentes para determinar la generación de polvo en stockpiles han sido enfocadas principalmente en el área del manejo de carbón. Por lo cual, se buscará identificar las posibles variables operacionales y ambientales que condicionen la generación de material particulado en un stockpile de mineral chancado de cobre.

El objetivo de realizar una modelación física de la generación de polvos en un stockpile minero, es el de poder reproducir un fenómeno existente en la realidad a una escala óptima que permita visualizar y cuantificar la generación de polvo en un stockpile minero del tipo cónico.

Actualmente este tipo de stockpiles puede encontrarse en diversas operaciones mineras nacionales, por lo que es de vital importancia conocer bajo qué condiciones se provoca una generación de polvo excesiva. Se pretende estudiar y reproducir el fenómeno de generación de polvo que actualmente está presente en stockpiles, como el mostrado en la Figura 1.1.

Figura 1.1: Generación de polvo en un stockpile cónico abierto, SCM Candelaria.

1.1 Objetivos

La presente investigación tiene por objetivo identificar y lograr reproducir el fenómeno de generación de polvo en stockpiles mineros, revisando bajo que características de operación se provoca una menor generación de polvo. Para lograr esto se procederá a construir un modelo físico a escala representativo de un stockpile donde se realizarán los ensayos.

Objetivo general: Modelación experimental de la generación de polvo en un stockpile minero, analizando los diferentes parámetros involucrados y formas de controlar el fenómeno.

Objetivos específicos:

1. Adoptar una definición de polvo, para entender el fenómeno de generación de polvo.
2. Identificar problemas de generación de polvo en un stockpile en aplicaciones mineras.
3. Crear un modelo que permita aproximar y escalar un stockpile minero a un modelo representativo, en el Laboratorio CITRAM del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.
4. Cuantificar el volumen en masa perdido de mineral bajo ciertas condiciones operacionales y ambientales que propicien la generación de polvo.
5. Identificar variables de diseño y de operación involucradas en la generación de polvo.
6. Establecer la mejor forma de control de polvo para la reducción del material particulado en un stockpile generado por condiciones ambientales.

2. Investigación del estado del arte

Dentro de este punto se pretende dar referencia a estudios anteriores realizados en el área, así como lograr establecer una definición correcta del fenómeno a investigar. Se busca aplicar e identificar el concepto de polvo en términos técnicos y prácticos para poder aplicarlo dentro del marco de la investigación.

2.1 Definiciones de polvo

Existen diferentes definiciones para el concepto "polvo".

Por ejemplo, "polvo" consiste en residuos que quedan de otras cosas solidas, moliéndolas hasta reducirlas a partes muy pequeñas [2].

La administración de salud y seguridad minera de E.E.U.U. (MSHA) establece que polvo consiste en finos sólidos divididos que pueden ser transportados por el aire desde su estado original sin algún cambio químico o físico que no sea la fractura [3].

Material particulado respirable MP10: Material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual que 10 micrones, según la Norma de calidad primaria para material particulado respirable MP10 del Ministerio de Salud de Chile. [4].

En este caso usaremos y emplearemos la definición establecida en "Dust Control Handbook" [5] debido a que se adapta de mejor forma a nuestro requerimiento técnico, involucra diferentes aspectos que ocurren actualmente en el equipo analizado. La cual define como "polvo" a diminutas partículas sólidas que son arrastradas por corrientes de aire. Estas partículas son formadas por procesos de desintegración o fractura tales como molienda, chancado o impacto

2.2 Generación de polvo

La generación de polvo se encuentra en diferentes áreas y a raíz de diferentes causas [6], cuando un material sólido a granel es separado y cierta cantidad del material fino es transportado por aire mientras el resto es depositado en otra parte.

El polvo puede ser generado por muchas actividades entre las cuales se encuentran procesos industriales, situaciones domésticas y también fenómenos naturales (ver Figura 2.1). Sin embargo, esta investigación se limita a un proceso particular de una actividad industrial, como son lo stockpiles mineros.

Figura 2.1: Fenómeno de generación de polvo ambiental en Bagdad, Iraq.

Hay áreas donde se presenta de mayor forma la generación de polvo o de material particulado. Tales como:

- Minería
- Generación eléctrica en base a carbón
- Agricultura
- Movimiento de tierra

En operaciones mineras a rajo abierto y subterráneas existen diferentes actividades en las cuales se presenta la generación de polvo en una manera claramente visible y con claros efectos nocivos, como son:

- Carguío de camiones (ver Figura 2.2)
- Descarga de camiones en chancador primario.
- Tronaduras
- Caminos interiores del rajo
- Traspaso de material en correas transportadoras
- Molienda y conminución
- Almacenamiento y Apilamiento

Figura 2.2: Generación de polvo durante el carguío de camiones en SCM Abra.

Diferenciándose en la cantidad o nivel de material generado en cada una de las actividades, así como también del período durante el cual la fuente emite o genera polvo; una constante preocupación por parte de los mantenedores de las operaciones mineras es lograr cuantificar la cantidad de polvo emitido, con el objeto de reducirlo y tener un indicador o alguna medición que permita establecer pautas a seguir.

2.3 Diámetro de partículas

El diámetro aerodinámico de una partícula es el diámetro de una esfera de densidad 1 [gr/cm^3] que tiene la misma velocidad terminal que la partícula que se busca analizar. Es así como el diámetro aerodinámico es utilizado y usado para estandarizar el tamaño de las partículas, debido a que la velocidad terminal y la habilidad de penetrar o ingresar en las vías respiratorias dependen de parámetros como el tamaño, forma, y densidad de las partículas.

Por ejemplo, un material como el hierro de tamaño de partícula de 4,5 [µm] que posee una densidad aparente de 5,2 [gr/cm^3] tendrá y se comportará de la misma forma que una partícula de aproximadamente un diámetro aerodinámico de 10 [µm]. A modo de referencia, la Tabla 2.1 muestra el tamaño de varios materiales. La Figura 2.3, compara los diferentes tamaños de partículas y objetos.

Tabla 2.1: Diferentes tamaños de partículas finas existentes.

Objetos o Materiales	**Tamaño [µm]**
Cenizas	1 - 100
Polvo de carbón	1 - 100
Harina	1 – 80
Cabello humano	50 – 75
Fibra de algodón	15 - 30
Glóbulos rojos	8

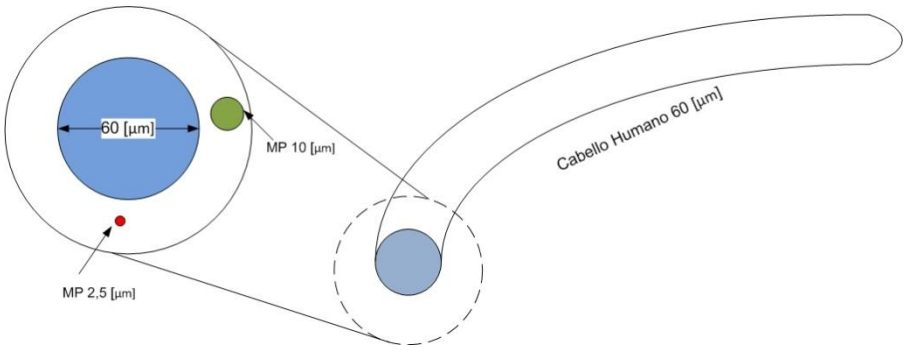

Figura 2.3: Comparación de tamaños entre partículas finas. [7]

2.4 Motivación para el control de polvo

El control de polvo a pesar de ser necesario es casi incontrolable en la mayoría de los procesos, provocando un sin número de problemas para las personas [8], el área de trabajo y el medio en donde se ubica, como se resume en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Posibles daños producidos por emanaciones de polvo.

Tipo de Daño	Problemas Detectados
Salud	• Problemas Respiratorios • Irritación de los ojos, oídos, nariz y garganta • Irritación en la piel
Operacionales	• Explosiones • Incendios • Visibilidad disminuida • Olores desagradables • Disminución vida útil equipos
Otros	• Problemas con las comunidades colindantes

La mayor preocupación es para los trabajadores que deben estar expuestos a jornadas de ocho horas de trabajo, en un lugar confinado donde se pueden producir las condiciones para la inhalación de polvo, el cual provoca daños irreversibles a la salud.

Las partículas MP10 y MP2.5 son las partículas que más provocan problemas a la salud, específicamente a las vías respiratorias, por establecerse en los pulmones y por estar compuestas de elementos que son más tóxicos (como metales pesados y compuestos orgánicos que causan cáncer debido a exposiciones durante largos

períodos). Las partículas MP2.5 pueden tener efectos más severos a la salud que las partículas más grandes MP10, pero la legislación nacional vigente sólo establece normas para el material particulado MP 10 [4].

2.5 Stockpiles

Dentro de las operaciones normales de una planta minera, en donde se debe reducir el tamaño de las partículas para su posterior tratamiento de recuperación de metales, en conjunto con el transporte del material, existen áreas y zonas donde el material debe ser transferido de un punto a otro. Existen numerosas oportunidades en donde el material sólido a granel puede volverse volátil y generar polvo, lo cual debe ser controlado según a las normas ambientales chilenas actuales.

En las faenas nacionales, actualmente el mineral chancado de cobre (óxidos o sulfuros), es reducido en el chancador primario, obteniendo un tamaño de partículas bajo 6” a 8”. En el proceso se provoca la formación de partículas más pequeñas entre las cuales existe cierto porcentaje de material fino, así como de polvo generado.

Debido a esto es importante identificar bajo qué condiciones de operación se provocaría una menor generación de polvo, con lo cual se podrían establecer mejores parámetros de operación que ayuden a controlar el fenómeno de la generación de polvo, utilizando las propiedades del material.

Los stockpiles o pilas de acopio son un tipo de equipo que permite almacenar un material sólido a granel solamente en base a su ángulo de reposo y descansando sobre sí mismo. Esto permite almacenar material desde 5.000 [ton] hasta valores sobre las 100.000 [ton], para alcanzar volúmenes de mineral procesado de sobre 120.000 [tpd].

Este equipo permite independizar un proceso “batch” o discontinuo, debido a que si por variables operacionales, ambientales o de otra índole el área mina debe detener su producción, el área de planta de conminución o molienda no deba detener su producción y disponga de mineral suficiente con un flujo constante para poder ser procesado y mantener la producción.

En el diseño de las operaciones mineras, el stockpile ha tomado un rol importante y crucial debido a sus dimensiones y a que todo el mineral a procesar en la planta debe pasar por él.

Los stockpiles normalmente operan sin protecciones laterales que eviten el control de la generación de polvo, aunque hay ciertos elementos mecánicos que han sido ocupados últimamente con cierto grado de efectividad.

Algunas características que predominan en el diseño de los stockpiles y que deben de ser consideradas en la etapa de diseño son:

- Limitaciones de espacio físico
- Orientación de las correas transportadoras
- Requisitos propios de la operación de la planta
- Método de llenado y descarga (ver Figura 2.4)
- Eventual efecto de atrición y segregación del mineral

Figura 2.4: Sistema de carga de un stockpile en SCM Candelaria.

2.5.1 Stockpiles cónicos

Los stockpiles cónicos son formados por una correa transportadora elevada o también conocida como stacker, la cual cumple la función de apilar el material desde un punto fijo y lograr el volumen deseado de material a almacenar. A simple vista poseen una forma cónica en la cual el material se apila sobre sí mismo hasta una altura, diámetro y el ángulo de reposo del material a almacenar.

Stockpiles como estos son posibles de encontrar en faenas actuales como El Tesoro, Codelco – Teniente, Codelco Norte PMTP (ver Figura 2.5), etc.

Figura 2.5: Stockpile cónico en Codelco Norte Proyecto PMTP. [9]

2.5.2 Stockpiles prismáticos

Los stockpiles prismáticos cumplen la misma función que los stockpiles cónicos, con la diferencia de que la pila de material es formada por un apilador móvil o tripper que se desplaza en forma transversal para incrementar el volumen de material almacenado. La distancia entre el punto de inicio y de término de la carrera del tripper determina el tamaño que alcanzará la pila. (Ver Figura 2.6).

Este tipo de stockpile permite almacenar una mayor cantidad de material, y es el más usado en las operaciones mineras nacionales más recientes, siendo de gran importancia el control tanto de nivel del stockpile como su comportamiento en fenómenos tales como la segregación, formación de ratholes, control de capacidad viva, entre otros.

Figura 2.6: Stockpile prismático de chips de madera, Celco Planta Valdivia.

2.6 Sistema de control de polvo en stockpiles

2.6.1 Canchas acopio de carbón

Dentro del área de control de polvo donde con mayor énfasis se han desarrollado tecnologías de mitigación, es en los stockpiles o en las canchas de acopio de carbón. Un ejemplo de esto es con la aplicación de cal viva [10,11] sobre las canchas de carbón que están expuestas a corrientes de aire marinas, debido a que en su mayoría son utilizadas para almacenar material para las generadoras eléctricas de carbón (ver Figura 2.7). Este sistema permite aplicar una capa de material más grueso y pesado que forma una cubierta protectora sobre el carbón coke, penetrando en condiciones normales hasta 3 [cm] sobre la capa exterior del stockpile.

La aplicación de esta cobertura de cal también aumenta la resistencia eléctrica sobre el material lo cual disminuye el riesgo de posibles incendios, a su vez como se aplica un material de características gruesas impide que se genere polvo en exceso debido a las fuentes naturales existentes.

Figura 2.7: Canchas de carbón, Riga – Letonia.

2.6.2 Sistemas de adición de agua

En la actualidad existen áreas de operación de las minas en las cuales se adiciona agua con el fin de disminuir la generación de polvo. Esto es aplicado en áreas como el chancador primario, caminos interiores del rajo de la mina o accesos secundarios, así como en la carga y descarga de los baldes de las palas hacia la tolva de los camiones, por parte de camiones aljibes.

También ha sido aplicado con diferentes resultados [12] dependiendo del material almacenado para disminuir el material particulado generado en los stockpiles,. Debido a que funciona bajo el principio de la adición de humedad hacia el material, se aumenta la relación de masa y la resistencia cohesiva del mismo, lo cual provoca que sea más difícil para las corrientes de aire levantar y volver volátil el material fino almacenado en el stockpile. [13]

Los métodos en los cuales la humedad es añadida pueden variar en la forma en la cual son aplicados, existiendo métodos como rociadores, neblina, cortinas de agua y flujo directo.

La efectividad de estos sistemas depende de la cantidad de agua aplicada, técnica utilizada y según las mismas propiedades del material a almacenar ya que por ejemplo el carbón disminuye la cantidad de polvo al ser humedecido, pero si es utilizado como combustible para generar electricidad debe ser secado. Esto implica un gasto energético adicional al sistema, así como también disminuye la eficiencia del ciclo de generación.

En el caso de ser aplicada la humedad a un material que después va a ser transportado en correas transportadoras se pueden provocar problemas como son el deslizamiento de la correa, acumulación de finos en los raspadores y problemas de saturación o de bloqueos en chutes de traspasos.

2.6.3 Murallas laterales y faldones

Actualmente la gran mayoría de los stockpiles a nivel nacional en operaciones mineras ocupan la técnica de cerrar o encapsular parcialmente parte del stockpile con lo que se protege que el material que está en las caras laterales del stockpile sea separado y genere polvo.

Se procede a cerrar solamente una parte del stockpile para dar espacio a los equipos pesados en caso de necesitar mantención o hacer alguna modificación al interior del mismo. Este sistema es acompañado en algunas áreas por faldones de goma que buscan proveer flexibilidad en la mantención y reducir la cantidad de polvo.

Estos equipos ayudan a reducir considerablemente la cantidad de polvo generado, pero también encarecen el proyecto y pueden presentar un problema mayor al momento de realizar mantenciones al interior de los alimentadores o del mismo stockpile. A su vez, si no son bien dimensionados e instalados tienden a generar corrientes de aires verticales al interior del stockpile las que provocan flujos ascendentes de aire al interior, con lo que el material vuelve nuevamente a provocar polvo. La Figura 2.8 muestra una aplicación típica para un stockpile prismático.

Figura 2.8: Sistema de protección de murallas y faldones laterales, SCM El Abra.

2.6.4 Stockpiles de presión negativa

Siguiendo el principio anterior y su relativa eficacia se ha decidido en situaciones donde el material a almacenar es muy fino o nocivo para el ambiente y la comunidad por optar por stockpiles que son cerrados en su totalidad. Como se aprecia en la Figura 2.9, normalmente son ubicados en sectores donde existen factores ambientales que permitirían generar polvo.

En las operaciones donde se utiliza este tipo de domo sobre el stockpile normalmente va en combinación con un sistema de diferencia de presión, el cual por medio de extractores conectados al interior, permiten que si llegase a existir una fuga, el flujo de aire del exterior fluya hacia el interior del propio stockpile y no hacia el exterior con polvo en suspensión.

A nivel nacional su mayor uso se da en sectores portuarios donde el mineral espera ser embarcado, para prevenir contaminación del borde costero y del mar, como se ilustra en la Figura 2.9 y Figura 2.10. Usualmente es utilizado en sectores de carga de concentrado de cobre o de hierro, donde el porcentaje de humedad del mineral es de vital importancia y debe ser controlado en forma continua.

Figura 2.9: Stockpiles cónicos de presión negativa de carbón y cal Riga, Letonia.

Figura 2.10: Interior de un stockpile de concentrado de cobre Atiport, Chile. [14]

3. Modelación

3.1 Características de un material sólido a granel

Un material sólido a granel es un conjunto de partículas solidas de naturaleza y características químicas similares, que poseen diferentes características físicas como son su densidad, tamaño, y forma de partículas. Estos materiales se diferencian de los líquidos ya que las partículas rotan, ruedan, giran, mueven y deslizan sobre sí mismos, por la acción y la influencia de las mismas partículas. Una de sus principales características es que soportan esfuerzos de corte cuando se encuentran en estado de reposo, a diferencia de los líquidos, que no son capaces de resistir este tipo de esfuerzos en la condición de reposo y adquieren la forma del recipiente que los contiene.

Un material sólido a granel posee diferentes características que permiten definirlo e individualizarlo. Para esto, son necesarios ensayos de laboratorio para determinar las características y cualidades propias del material, ya que éstas serán consideradas como parámetros de diseño y de operación a lo largo del proceso de manejo del material.

3.1.1 Principales características de un material sólido a granel

Dentro de las principales características para determinar las propiedades que describen un material sólido a granel se destacan las siguientes.

3.1.1.1 Distribución granulométrica y tamaño de partículas

La granulometría es la cuantificación de las partículas de un material sólido a granel y el cálculo de la abundancia de cada uno de los tamaños que componen el material,

logrando separarlos por tamaño, y estableciendo la proporción de cada uno de los tamaños.

La forma más habitual de determinar la distribución granulométrica de un material sólido a granel es mediante el tamizado, que consiste en usar un set de tamices o mallas granulométricas claramente estandarizadas bajo la norma norteamericana ASTM D 422 – 83 y también bajo la norma nacional chilena NCh 1021 E de 1976 [15]. Se procede a determinar y a pesar el material retenido en cada malla, para posteriormente graficar el porcentaje retenido y acumulado en cada tamiz en función de la apertura del tamiz, y obteniendo así el grafico de distribución granulométrica del material ensayado.

3.1.1.2 Angulo de reposo y de vaciado

Según el concepto de que los materiales sólidos a granel soportan esfuerzos de corte al estar en reposo [16], al contrario de los líquidos, esto provoca que cuando un material sólido a granel es apilado sobre una superficie plana se forme un ángulo de reposo o de apilamiento, como se aprecia en la Figura 3.1. Es así, como también crea un ángulo cuando es descargado por gravedad, influenciado en gran parte por la resistencia cohesiva del material. La Tabla 3.1 entrega valores típicos para los ángulos de reposo y de vaciado para minerales chancados.

Tabla 3.1: Valores típicos de ángulos de reposo y de vaciado de los minerales.

Tipo de ángulo	Rango
α_{reposo}	35 °– 40 °
$\alpha_{vaciado}$	35 °– 90 °

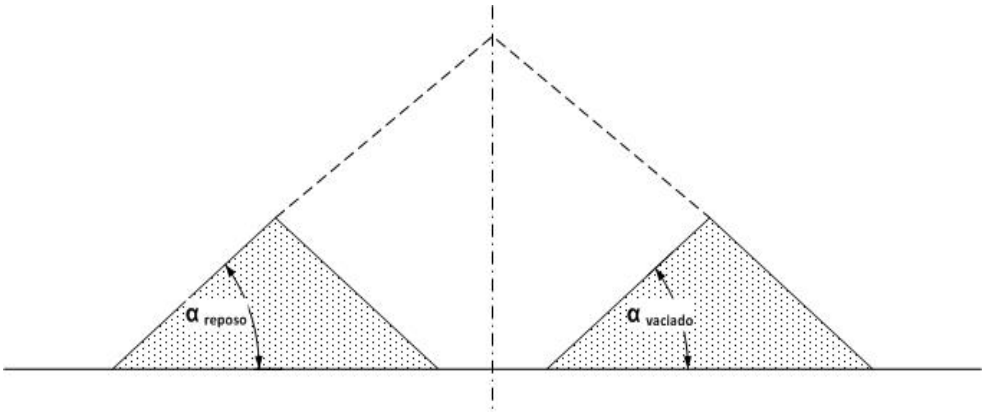

Figura 3.1: Ejemplo de medición del ángulo de reposo y vaciado.

3.1.1.3 Contenido de humedad

El contenido de humedad de un material sólido a granel determina la cantidad de agua superficial presente en el material, lo cual puede deberse a condiciones propias del banco de extracción en una mina o a características propias de la zona de extracción, o a la adicción de agua para controlar el polvo (como se verá más adelante).

Esta característica indica que tan cohesivo será un material definiendo su fluidez bajo ciertas condiciones de humedad, siendo materiales con baja humedad generalmente de alta fluidez y materiales con alta humedad generalmente de una mala fluidez.

El método para medir la cantidad de humedad de un mineral se realiza según la norma nacional NCh 1515 Of. 1979 [17], la cual establece que se debe determinar como el cuociente entre la variación de la masa de una muestra de material al calentarla en un horno a una temperatura de 105 [ºC] durante una hora y la masa inicial de la muestra. Dentro del rango esperable de humedad, los minerales chancados de cobre fluctúan entre 0% y 10%.

3.1.1.4 Atrición del material

El fenómeno de atrición ocurre bajo el fundamento de que todos los materiales sólidos a granel de cierto tamaño pueden ser reducidos a un menor tamaño, cuando un material cae desde cierta altura, al impactar tiende a fracturarse y pasa a formar partículas de menor tamaño.

Este fenómeno también ocurre debido al roce y desgaste de las partículas entre ellas y contra paredes, mientras se desplazan o fluyen bajo alguna condición.

3.1.1.5 Densidad de partícula

Corresponde a la masa por unidad de volumen de un material, y se mide en base seca, con el material secado previamente a 110[°C] por un tiempo de 8 [h]. Influye de gran forma en la determinación de la presión de pared ejercida por un sólido a granel cuando es almacenado en un silo. Este ensayo está normado bajo la norma nacional NCh 1532 Of. 80 [18].

3.1.1.6 Segregación

Este fenómeno ocurre siempre y cuando se trabaje con un material que posea una amplia distribución granulométrica, que las partículas sean diferentes entre ellas en tamaño y forma, como suele ocurrir habitualmente con los minerales chancados.

La segregación es la separación no deseada y no intencional, de una agrupación de partículas según su tamaño, densidad, forma u otros parámetros. Este fenómeno ocurre bajo diferentes condiciones de carga o descarga de un material sólido a granel, y tiene mayor influencia cuando el material se encuentra con un bajo contenido de humedad. [19].

La segregación se manifiesta en diferentes formas como son:

1. Segregación por ángulo de reposo: Ocurre cuando los finos, que tienen un ángulo de reposo mayor tienden a concentrarse bajo el punto de descarga. Mientras los gruesos que tienen un ángulo de reposo menor tienden a ubicarse en la periferia de la zona de descarga.

2. Segregación por trayectoria: Ocurre normalmente cuando el material sólido a granel es lanzado de un punto, cuando los finos que tienen una inercia menor que los gruesos caen antes que los gruesos en un chute.

3. Segregación por percolación: Este tipo de segregación se presenta por el desplazamiento de las partículas pequeñas y finas a través de los espacios que dejan los gruesos. Se produce normalmente cuando un mineral chancado es almacenado en un stockpile, como destaca en la Figura 3.2.

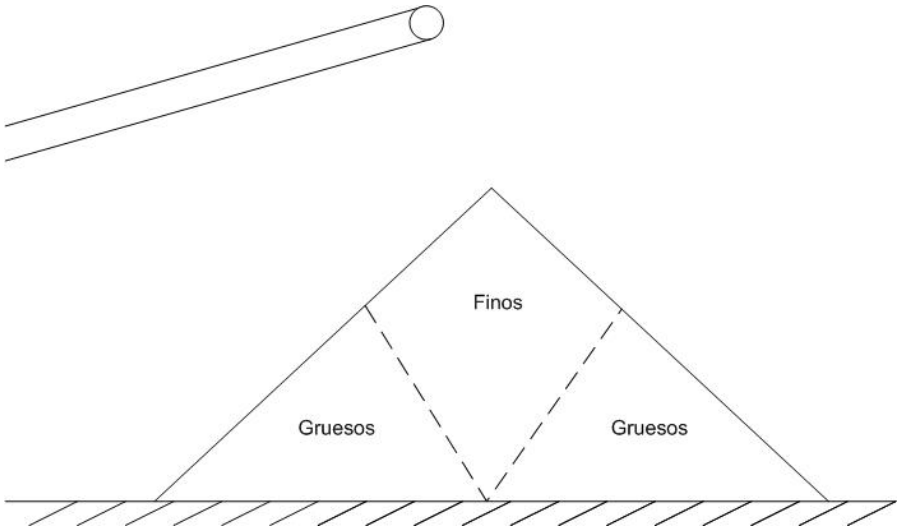

Figura 3.2: Segregación por percolación en un stockpile cónico.

3.2 Características del material ensayado

Para reproducir la generación de polvo en stockpiles existente en las faenas mineras nacionales se procedió a realizar las simulaciones con un mineral chancado de cobre de las siguientes características.

3.2.1 Granulometría

Se procedió a realizar un ensayo de granulometría (ver Figura 3.3) según la norma NCh 1021 E de 1976, la cual establece claramente el procedimiento de medición que se debe seguir para obtener la curva representativa del material.

De manera de estudiar la ocurrencia del fenómeno se procedió a utilizar un material que por inspección visual tuviese una alta composición de finos (bajo malla #100).

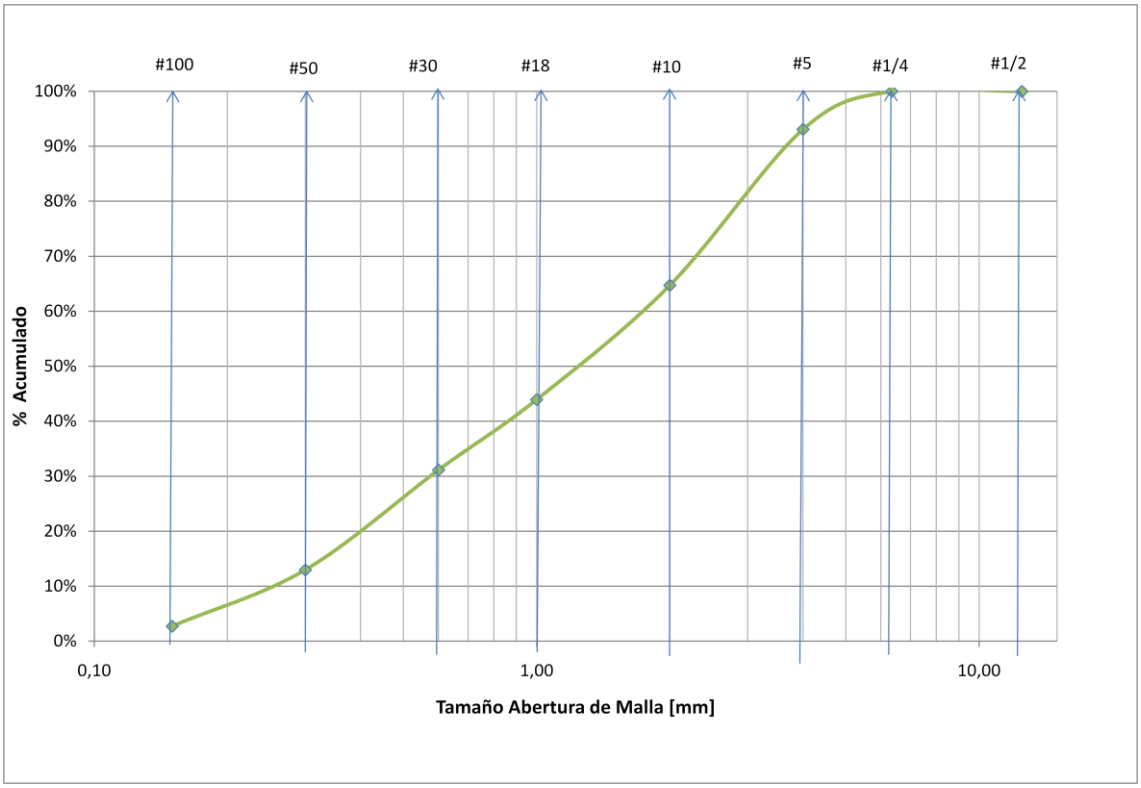

Figura 3.3: Granulometría del mineral chancado de cobre utilizado.

3.2.2 Contenido de humedad

El material posee un alto contenido de humedad inicial, determinado mediante ensayos de laboratorio, aproximadamente cerca de 7% de humedad (cálculo realizado en base húmeda).

Este valor de humedad para este tipo de material provoca que posea a su vez una alta resistencia cohesiva y tendencia a formar arcos cohesivos en las tolvas de descargas si no son diseñadas y dimensionadas correctamente.

3.2.3 Angulo de reposo y de vaciado

Como forma de caracterizar el material se midió el ángulo de reposo y de vaciado para poder diseñar el modelo físico y la capacidad del stockpile de acuerdo a estos. Basados en las mediciones realizadas se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 3.2: Valores medidos de ángulo de reposo y vaciado.

Angulo de Reposo α_R	Angulo de Vaciado α_V
37 °	55°

3.3 Características del modelo

Se procedió a diseñar y a fabricar un modelo que permitiera la reproducción del fenómeno de la generación de polvo, que fuera de una escala óptima para poder evaluar en forma correcta los parámetros y controlados.

Bajo el principio de que un material sólido a granel descargado desde cierta altura procedería a genera polvo, se construyó y elaboró un sistema que permitiese captar

el material particulado que procede a separarse de la pila cónica y que se vuelve volátil bajo diferentes condiciones.

A su vez, este modelo posee características que posibilitan realizar múltiples pruebas de diferentes variables que afectan en el fenómeno de generación de polvo como son:

- Flujo de material
- Contenido de humedad
- Carga y descarga del material
- Diferentes materiales
- Granulometrías
- Segregación

Otro punto estudiado e implementado fue el de un sistema de captación de polvo basado, como puede verse en la Figura 3.4, en la utilización de filtros que funcionan bajo un diferencial de presión, con el objetivo de evitar que las partículas en suspensión precipiten y caigan depositadas en la base del modelo, sino que por el contrario suban y sean almacenadas en la cara exterior del filtro. Una vez capturadas, se procedió a cuantificarlas en masa, granulometría, humedad, etc.

Dentro de los parámetros a controlar se procedió a probar con diferentes sistemas de alimentación: alimentación central directa, alimentación por sección diagonal, alimentación por correa y se optó por esta última alternativa para realizar los ensayos. El sistema de alimentación es de vital importancia en el modelo debido a que debe simular la situación más real que ocurre normalmente en las faenas mineras.

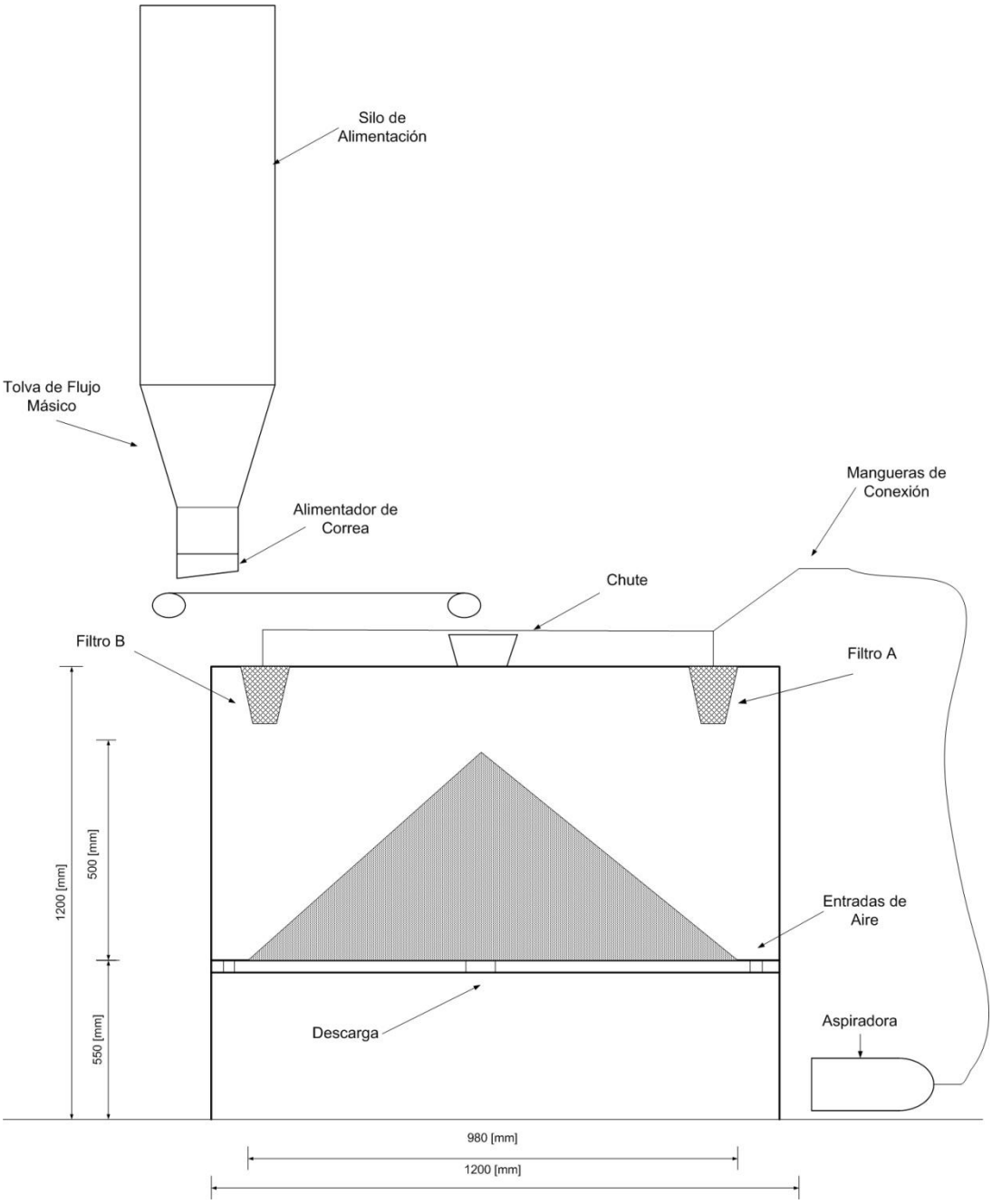

Figura 3.4: Esquema general de funcionamiento del modelo físico.*

Para controlar y almacenar el material sólido a granel a ensayar se utiliza un silo con tolva de flujo másico de manera de lograr un perfil de velocidad uniforme y evitar las zonas muertas con flujo detenido, como también de evitar la segregación del material previa a la alimentación del modelo.

** Valores aproximados, y modelo no a escala.*

Se decidió encapsular la pila cónica, para poder apreciar el fenómeno, identificarlo, como también lograr percibir lo ocurrido en una escala menor de lo que sucede en la realidad. Esta configuración logra un mayor control sobre el fenómeno reproducido en el laboratorio, como se ve en la Figura 3.5.

Figura 3.5: Configuración típica de operación del modelo físico.

3.4 Equipamiento utilizado

3.4.1 Silo

El silo utilizado para almacenar el mineral chancado de cobre posee una capacidad de 105 [kg]. Este silo entrega el material de forma continua para simular las condiciones de carga de un stockpile en operación normal, en donde el material es descargado en forma continua a través de una correa transportadora normalmente "overland" proveniente del chancado primario.

3.4.2 Tolva de descarga

La tolva a utilizar para la modelación es una tolva de flujo másico. Para evitar la segregación en la descarga así como canales de flujo detenidos, esto previene también que el material forme arcos cohesivos y que tienda a consolidarse en ciertas zonas.

3.4.3 Alimentador de correa

El alimentador de correa es un equipo encargado de controlar el flujo de sólidos a depositar en la pila cónica, al ser del tipo prismático impide la formación de "zonas muertas" así como de evitar fluctuaciones en el flujo hacia la correa transportadora.

El alimentador funciona logrando una descarga uniforme de material, con lo cual controla la cantidad de material depositado finalmente en la pila de acopio.

3.4.4 Aspiradora

La aspiradora instalada en el equipo es la encargada de generar un diferencial de presión, entre el interior y el exterior, suficiente para lograr que el volumen de aire acumulado en el interior sea desplazado y permita que el polvo generado por la descarga del material pueda ser capturado en los filtros.

La aspiradora utilizada para los ensayos es una aspiradora Somela® Cyclonic® 2000[w], la cual con la potencia disponible permite desplazar el volumen interior de aire del modelo en reducido intervalo de tiempo, con un caudal promedio de aire de 135 [m^3/h] (ver Anexo n°1).

La diferencia de presión generada por la aspiradora permite que las partículas desplazadas del canal de flujo principal o que son arrastradas por la corriente de aire existente al interior del modelo, no precipiten sino por el contrario, asciendan y sean depositadas en el filtro, como se ve en la Figura 3.6.

Figura 3.6: Separación de las partículas del flujo principal al llenar la pila.

3.4.5 Filtro de captación

Los filtros cumplen la función de captar y almacenar el material sólido a granel que se encuentra en suspensión, y que como consecuencia de la diferencia de presión generada sube y es almacenado en la superficie exterior del filtro.

Los filtros a utilizar son del tipo cónico, de tela plegada, ocupados en la aspiradora portátil Dustbuster® de Black and Decker®. Estos filtros son ubicados simétricamente en el modelo con el objeto de que capten la misma cantidad de material particulado cada uno. Los filtros en la Figura 3.7, muestran uno de los cuales ha sido ocupado mientras el otro está completamente limpio.

Figura 3.7: Filtros utilizados para la captación de polvo.

Cuando el modelo se encuentra en operación los filtros están posicionados de tal forma que no tengan ningún grado de movimiento o puedan ser influidos por vibraciones en el modelo. A su vez son ubicados de una manera que se impida la pérdida de diferencia de presión, en los anillos del filtro. La Figura 3.8 muestra uno de los filtros en operación durante un ensayo.

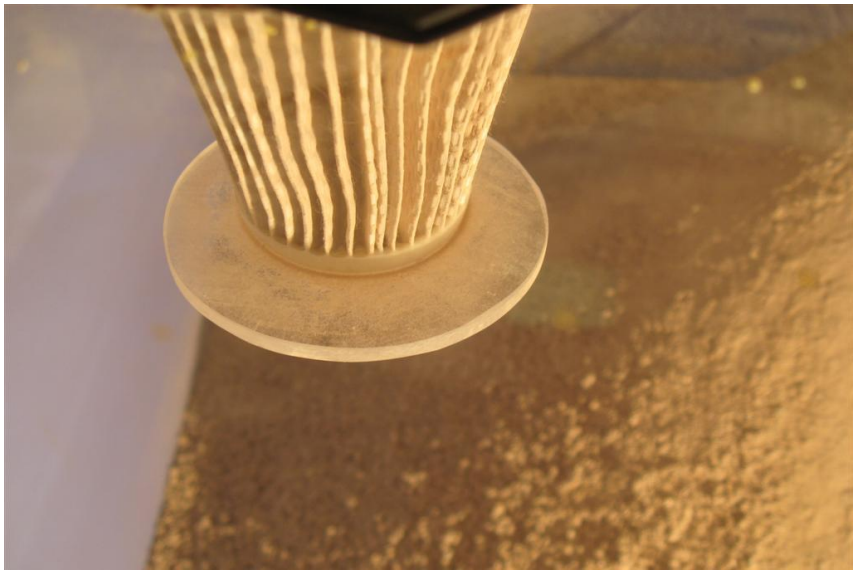

Figura 3.8: Filtro de Captación en operación durante un ensayo.

3.5 Prueba

Dentro de la fase de prueba se ensayó con diferentes configuraciones de alimentadores de correa, los cuales fueron variados en su geometría, de forma de poder controlar la cantidad de material descargado.

Es así como en un principio al ensayar la configuración deseada de alimentador de correa, se verificó que el material de prueba (gritz de maíz) poseía una buena fluidez con un modelo de alimentador prismático. Pero debido al alto flujo que entregaba debió ser modificado por uno en que no se produjeran zonas muertas ni que provocara posibles arcos cohesivos con partículas de diferente tamaño.

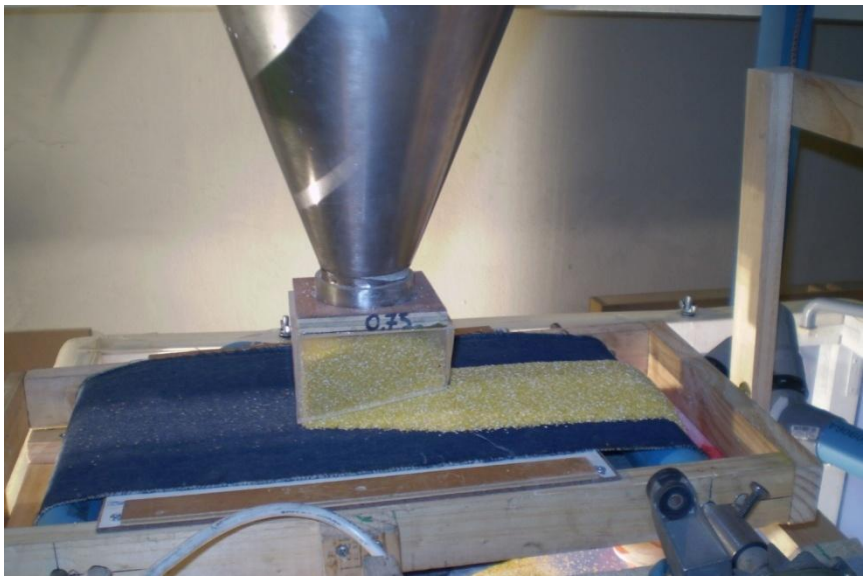

Figura 3.9: Etapa de prueba con gritz de maíz.

Para las pruebas con el mineral chancado de cobre se utilizó la misma configuración anterior, mostrada en Figura 3.9, que permitió realizar pruebas con distintos flujos másicos de material. Entre un mínimo de 2,5 [kg/min] y un máximo de 8,5 [kg/min] para la operación del modelo. El modelo presenta la característica que puede ser adaptado para diferentes posiciones de alimentación.

A su vez se verificó (como se aprecia en la Figura 3.10) la operación de transferencia de mineral chancado, que no tuviese obstrucciones ni formara posibles arcos por “interlocking” entre las partículas de mayor tamaño.

Figura 3.10: Alimentador de correa operando con mineral chancado de cobre.

4. Experimental

Dentro de la fase experimental de esta investigación se elaboraron y establecieron procedimientos que permitieran realizar mediciones que alcanzaran cierto grado de repetibilidad y bajo las cuales se lograran controlar y modificar ciertas variables en las cuales se estaba interesado investigar.

Es así como se decidió optar por una carga de material que usara la capacidad máxima del silo, el cual para el mineral chancado de cobre utilizado para los ensayos logra almacenar una capacidad de 102[kg] entre el volumen del silo, tolva de flujo másico y el alimentador prismático. Se optó por este volumen de material a ensayar debido a que permite escalar los resultados y a su vez representa de mejor forma el fenómeno buscado.

4.1 Montaje inicial

Para lograr el montaje apropiado es necesario haber limpiado todos los equipos previamente para evitar alteraciones en la masa inicial y que existan porciones de polvo remanentes en los equipos. La secuencia de pasos incluye:

1. Montar el silo sobre el soporte de carga, verificando la alineación de los agujeros del soporte con el silo.
2. Apernar la tolva de flujo másico al silo por la zona inferior del soporte de carga.
3. Apoyar el modelo de acrílico sobre la base móvil de acero.
4. Colocar el chute de traspaso plástico sobre perforación central del acrílico.

5. Ensamblar y montar el alimentador de correa sobre el modelo de acrílico, apernando ambos pernos al interior del modelo.
6. Desplazar completamente el modelo de acrílico bajo la tolva de descarga.
7. Montar el alimentador de correa en la tolva de descarga del silo.
8. Alinear y apernar listones de madera desde el alimentador de correa hacia el soporte de carga. Asegurándose que la descarga de la correa coincida con el chute de descarga.
9. Montar la fuente de voltaje variable en el soporte de carga del silo.
10. Verificar que no exista interferencia en el desplazamiento de la correa con el alimentador de correa.
11. Montar manguera de la aspiradora en el soporte de carga y conectarla a la aspiradora. Asegurando que la conexión hacia los filtros sea hermética.

Es importante de mencionar que el alimentador de correa debe ser alineado y fijado correctamente, debido a que de lo contrario se ejercerá presión sobre el acrílico o provocará que el material deslice y no caiga dentro del chute de descarga.

4.2 Procedimiento de medición

Una vez montado los equipos, el procedimiento para llevar a cabo la medición incluye:

1) Mezclar el material en el tambor almacenado de forma de que no se separen los diferentes tamaños de partículas y evitar la segregación.
2) Pesar los filtros limpios en sus bolsas de almacenamiento, mediante la balanza de resolución 0,01 [mg] existente en el Laboratorio de Termodinámica de la UTFSM. Registrar el valor como $P_{inicial}$.

3) Cargar el material en el silo y registrar peso total cargado P_{Silo}.

4) Una vez cargado completamente el silo, registrar el valor total de masa almacenado.

5) Sellar las descargas del modelo de acrílico, posteriormente cerrar y sellar la puerta de acceso al interior del modelo.

6) Montar filtros en las posiciones establecidas como A y B como se ve en detalle en la Figura 3.5.

7) Encender aspiradora, esperar 30 [s].

8) Encender fuente de poder variable del alimentador e iniciar cronómetro.

9) Ajustar revoluciones de giro deseadas para llenar el stockpile.

10) Descargar todo el material almacenado en el silo.

11) Una vez descargado completamente el material, parar cronómetro, detener correa y esperar 1 [min]. Registrar como t_{ensayo}.

12) Apagar aspiradora.

13) Retirar filtros y almacenarlos en sus bolsas respectivas, para determinar la masa de polvo captada. Registrar el valor como P_{final}.

14) Registrar parámetros obtenidos.

Para repetir la medición o preparar otro ensayo bajo las mismas características, y se debe repetir los puntos (1) al (11).

4.3 Ensayos y mediciones

Se utilizó el modelo físico construido para determinar la tendencia a generar polvo de un mismo mineral bajo diferentes variables.

El modelo permite variar los parámetros estudiados, de forma de poder estudiar la influencia de una sola variable por ensayo, dejando el resto constante.

Es importante mencionar que se fue verificando de manera constante y en forma previa a cada ensayo la humedad del material, así como la limpieza de los filtros de captación de polvo con el objetivo de evitar la acumulación de material fino en las superficies del mismo.

Los datos de cada punto de medición han sido incluidos en detalle en el Anexo n °2, y sólo se presentarán las curvas de comportamiento final para cada una de las variables investigadas.

Con el objetivo de poder comparar posteriormente los diferentes efectos de los fenómenos investigados, se llevó a cabo un registro fotográfico y audiovisual de cada uno de los puntos de medición.

4.3.1 Ensayos realizados

Dentro de los parámetros investigados se cuentan:

- Contenido de humedad del mineral.
- Velocidad de descarga del mineral (llenado de la pila).

Con estas variables a controlar se procedió a medir la influencia de cada una de ellas y en combinación de las mismas, en el fenómeno de la generación de polvo en un stockpile cónico.

Con respecto a la repetitividad de los valores obtenido se comprobó que uno de los mayores problemas para lograrla, es el efecto de la mezcla y carga del material desde el tambor de almacenamiento al silo de carga.

A su vez, utilizando el equipo denominado “Dustmeter” [20], se analizó el polvo captado por los filtros cónicos, con el objetivo de conocer el comportamiento del polvo captado y su tendencia a ser arrastrado por el aire.

Como se aprecia en las Figura 4.1 y 4.2, el modelo logra contener todas las posibles emisiones de material particulado que escapan durante la formación de la pila cónica al interior del modelo. Dichas partículas quedan atrapadas en la superficie de los filtros y son posteriormente analizadas.

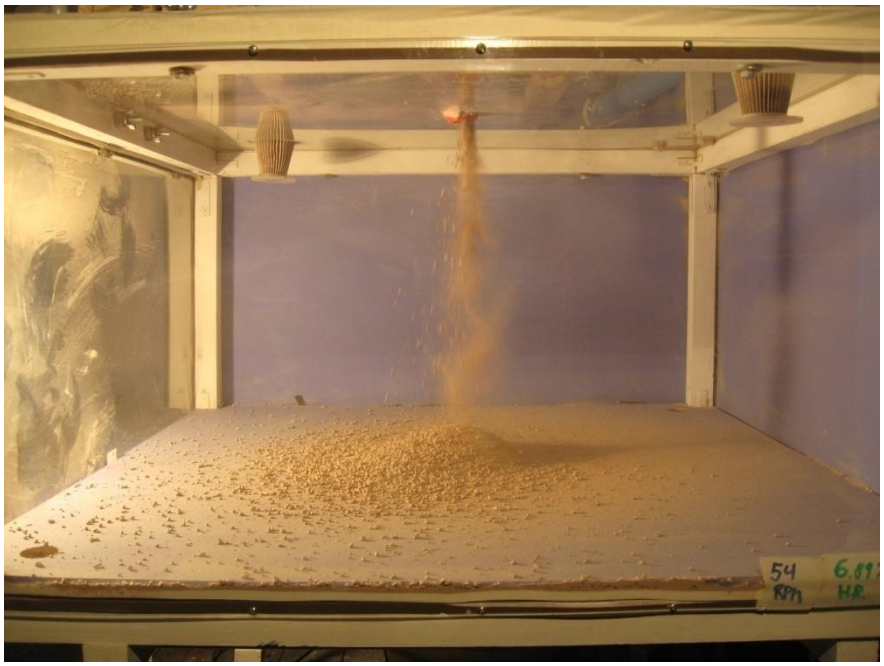

Figura 4.1: Fase inicial de formación del stockpile.

Figura 4.2: Funcionamiento del modelo durante el ensayo.

La Tabla 4.1 muestra el programa de ensayos que permitiera variar como fue mencionado anteriormente, los diferentes parámetros de interés a investigar, en base solamente a las características propias del mineral chancado de cobre. La Tabla 4.2 muestra la cantidad de puntos analizados para cada una de las condiciones ensayadas. Los valores mostrados en la Tabla 4.1 son valores promedios a medir, debido a alzas de voltaje o problemas en el ajuste de la velocidad de la correa.

Tabla 4.1: Programa de ensayos y mediciones realizados.

Parámetros	**Contenido de Humedad del Mineral**	**Flujo Másico Ensayado**
Condición original del Mineral	7 [%]	2,5 [kg/min] 3,5 [kg/min] 5 [kg/min] 6,5 [kg/min] 7,5 [kg/min]
Mineral Secado en Horno	5 [%]	5 [kg/min] 6,5 [kg/min]
Mineral Secado en Horno	3 [%]	5 [kg/min] 6,5 [kg/min]
Material Completamente Seco	0 [%]	2,5 [kg/min] 3,5 [kg/min] 5 [kg/min] 6,5 [kg/min] 7,5 – 8,5 [kg/min]

Tabla 4.2: Cantidad de muestras analizadas por parámetro.

Tipo de Ensayo	Número de Repeticiones por punto	Numero de Muestras Analizadas
Variación de Humedad	2	7
Variación de Flujo Másico	2 -3	8

4.3.2 Granulometría del polvo captado

Con el objeto de caracterizar y conocer el tamaño de partículas del material que fue captado durante los ensayos se procedió a enviar una muestra del polvo obtenido por los filtros al laboratorio CETTEM Ltd. [21], donde se realizó un ensayo de granulometría por el método de difracción de rayo laser, el cual logra determinar el tamaño y porcentaje de las partículas. Los resultados se entregan en el Anexo 3.2 y se muestran en la Figura 4.3.

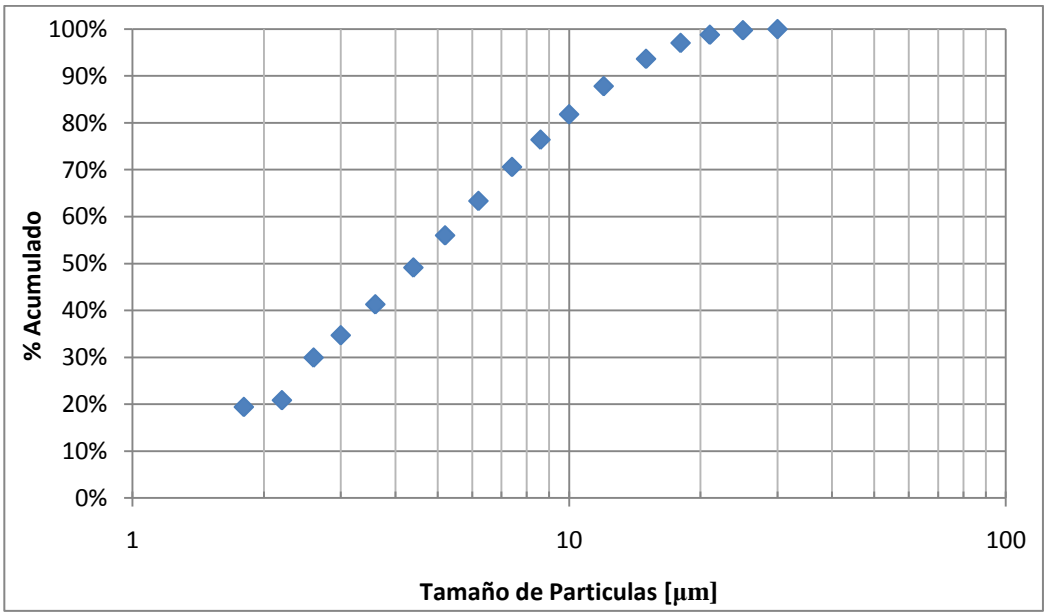

Figura 4.3: Curva granulométrica del polvo captado.

Tabla 4.3: Tamaños característicos del ensayo granulométrico del polvo.

d_{10}	d_{50}	d_{100}
[μm]	[μm]	[μm]
1,17	4,50	30,00

Los valores obtenidos a través de este ensayo, buscan entregar una relación respecto al material que fue determinado por la granulometría del mineral que se encontraba bajo la malla #100, con lo que se puede obtener un porcentaje de cuanto material fue arrastrado por el aire hacia los filtros de captación. Este valor indica a su vez el comportamiento del material fino, definido como polvo.

Con el ensayo realizado de granulometría del polvo es posible afirmar que el mineral captado por los filtros es de características muy finas, ya que el total del mineral analizado está bajo los 30 [μm] de tamaño, el cual claramente puede ser arrastrado por cualquier corriente de aire existente.

El análisis también indica que cerca de un 80 [%] del polvo generado en la formación del stockpile, no cumpliría con la normativa actual de material particulado MP10 [22]. Estas partículas de tamaño muy pequeño ocasionarán daños irreversibles a la salud en los operadores de una faena minera en donde se encuentre localizado un stockpile de estas características.

4.3.3 Densidad del polvo

Para lograr una comparación respecto al mineral descargado en la pila cónica y el mineral captado por los filtros cónicos, se realizaron ensayos de densidad aparente y densidad específica a ambos minerales, con los que se comprobó que el material captado posee una densidad aparente bastante baja (como se aprecia en la Tabla 4.4). Esto permite indicar que las partículas captadas poseen una leve inercia, por lo que permanecerán en el aire por un mayor intervalo de tiempo desde que son descargadas y caerán con posterioridad respecto a las partículas gruesas descargadas.

Tabla 4.4: Valores de densidad del polvo ensayado.

	Valor Medido
Densidad Aparente γ_a	0,91 [gr/ml]
Densidad Especifica γ_e	2,41 [gr/ml]

Estos valores de densidad fueron medidos según la norma [18], lo cual se aprecia en la Figura 4.4.

Figura 4.4: Ensayo de densidad al polvo captado.

5. Resultados Obtenidos

5.1 Variación de humedad

Durante esta etapa de la modelación se procedió a variar el contenido de humedad de una misma muestra de mineral, con una granulometría constante y un flujo de sólido constante para llenar la pila cónica en cerca de 20 [min] a una tasa de 5 [kg/min]. Los puntos medidos fueron elegidos debido a que permiten tener una percepción del comportamiento de la generación de polvo entre los valores más habituales de humedad existente en operaciones mineras. Los valores ensayados fueron por ende 7[%], 5[%], 3[%], 0 [%] de humedad.

Los valores de carga del material, así como el valor detallado de las muestras se encuentran en el Anexo 2.1.

Como se aprecia en la Figura 5.1, existe una clara tendencia a disminuir la generación de polvo del mineral al llenar la pila, cuando se aumenta la humedad del mismo. La generación de polvo se reduce en cerca de 70 [%] al disminuir de un 7 [%] a un 0 [%] de humedad, para este material y granulometría simulada.

De la Figura 5.1 se puede apreciar que una humedad cercana a 8[%] minimizaría la generación de polvo de este mineral ensayado prácticamente a cero.

Es de destacar que a medida que se fue reduciendo el contenido de humedad presente en el mineral, la cantidad de polvo generado y captado en los filtros aumentó. Por lo que claramente la generación de polvo es dependiente de la cantidad de humedad presente en el mineral chancado, como se aprecia en la Figura 5.1.

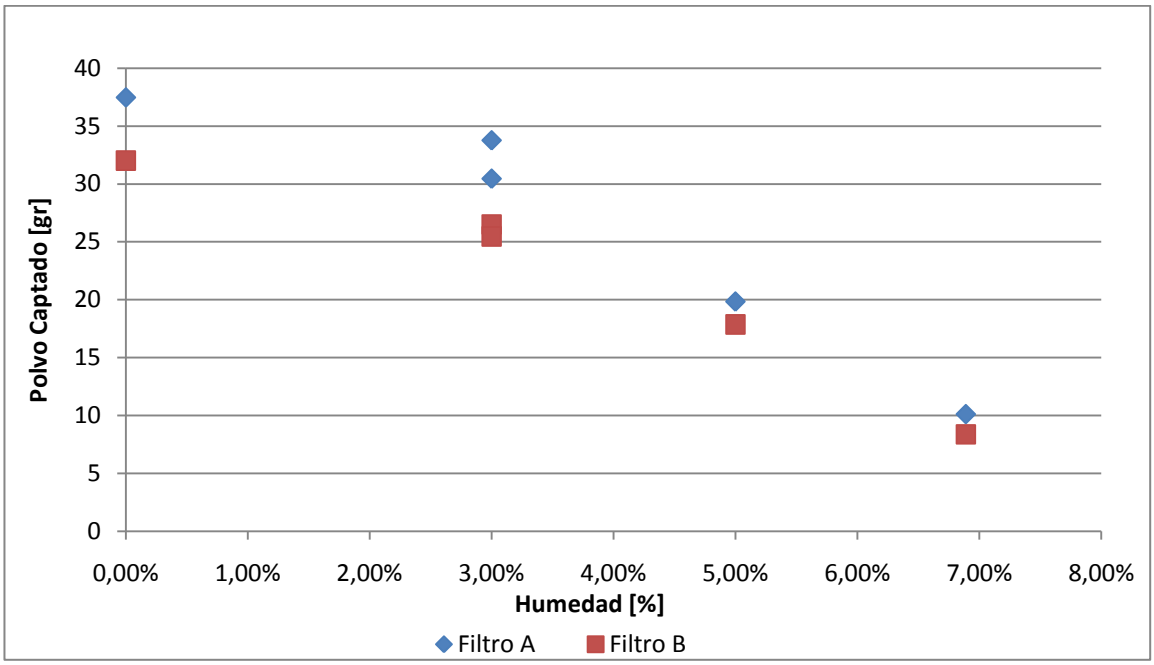

Figura 5.1: Captación de polvo variando la humedad del mineral.

5.2 Variación de flujo másico

Para determinar cuanto afecta este parámetro se procedió a medir y a cuantificar la cantidad de polvo captado variando el flujo másico de sólidos depositados en la pila cónica.

Para la medición de los puntos experimentales, se procedió a trabajar con una humedad constante del material analizado, con lo que se pretende relacionar ambos parámetros e identificar la posible influencia de la variación del flujo másico de sólidos en la generación y captación de polvo.

Dentro de los puntos analizados se consideró simular la carga del stockpile cónico con tasas de 2,5 [kg/min], 3,5 [kg/min], 5 [kg/min], 6,5 [kg/min], 7,5 [kg/min] y 8,5 [kg/min], valores que fueron seleccionados debido a que incluyen un amplio rango de medición. La relación para poder seleccionar estos flujos másicos puede verse en la Tabla 5.1.

Estos valores medidos fueron caracterizados bajo una humedad constante, midiendo valores de 7[%], 5 [%], 3[%], 0 [%] con el fin de comprobar su comportamiento bajo la influencia de este parámetro.

Tabla 5.1: Relación de velocidad de avance el alimentador de correa del silo de llenado.

w_s	ω_c	v_c
[kg/min]	**[rpm]**	**[m/s]**
2,5	11	0,023
3,5	24	0,050

5	34	0,071
6,5	44	0,092
7,5	54	0,113

Como se muestra en la Figura 5.2, existe una leve dependencia del flujo másico respecto a la generación de polvo que se provocará en la formación de la pila cónica. Claramente, en el caso del ensayo a 0 [%] de humedad, la generación de polvo aumenta levemente en torno al 3 [%] del material.

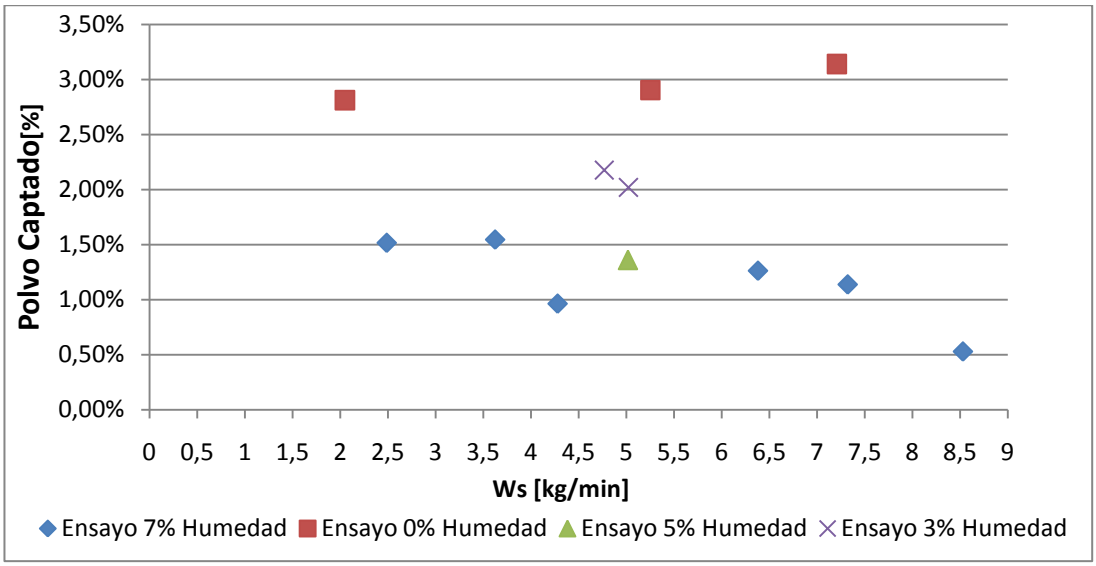

Figura 5.2: Captación de polvo variando el flujo másico de llenado de la pila.

Cuando el mineral que posee una humedad de un 7 [%] es descargado a un tasa mayor de sólidos se produce una menor generación de polvo en el stockpile, debido a que no logran ingresar corrientes de aire ascendentes que separen las partículas finas del canal de descarga principal.

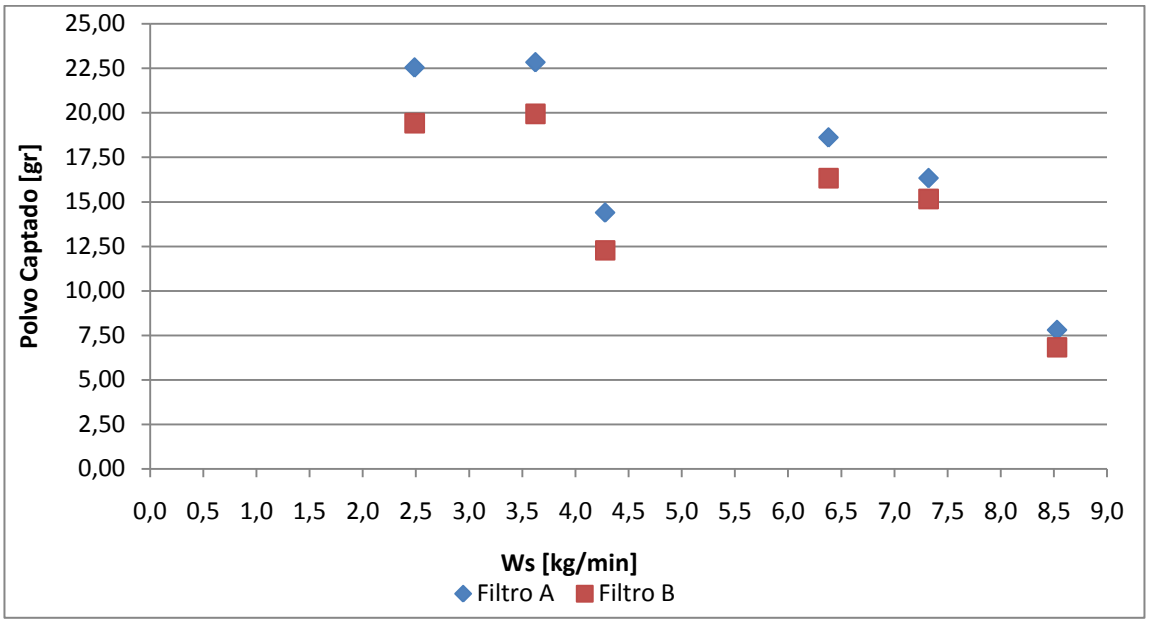

Figura 5.3: Variación de alimentación para mineral a 7 [%] de humedad.

La causa de este comportamiento se debe a que los materiales finos no logran ser separados de los gruesos en la descarga hacia la pila cónica, manteniéndose unidos durante toda la trayectoria de la partícula, hasta permanecer finalmente en reposo.

La unión presente entre ambos tamaños de partículas, es producida debido a la capa superficial de humedad existente en la cara exterior de las partículas gruesas. Con lo que los finos proceden a rodear a los gruesos, formando un manto alrededor de las partículas de mayor tamaño.

A su vez, el mineral analizado a pesar de tener un contenido de humedad cercano a un 7 [%], fue capaz igualmente de generar polvo bajo las diferentes condiciones estudiadas de flujo de sólidos, durante el proceso de formación del stockpile cónico.

A medida que aumenta el flujo descargado de mineral hacia la pila cónica, es levemente mayor la generación de polvo, debido a que el fenómeno de separación entre las partículas es incrementado al manejar un mineral con 0 [%] de humedad, como puede observarse en la Figura 5.4. Es así como también se genera y capta mineral que logra incluso pasar a través del filtro (definido como polvo secundario).

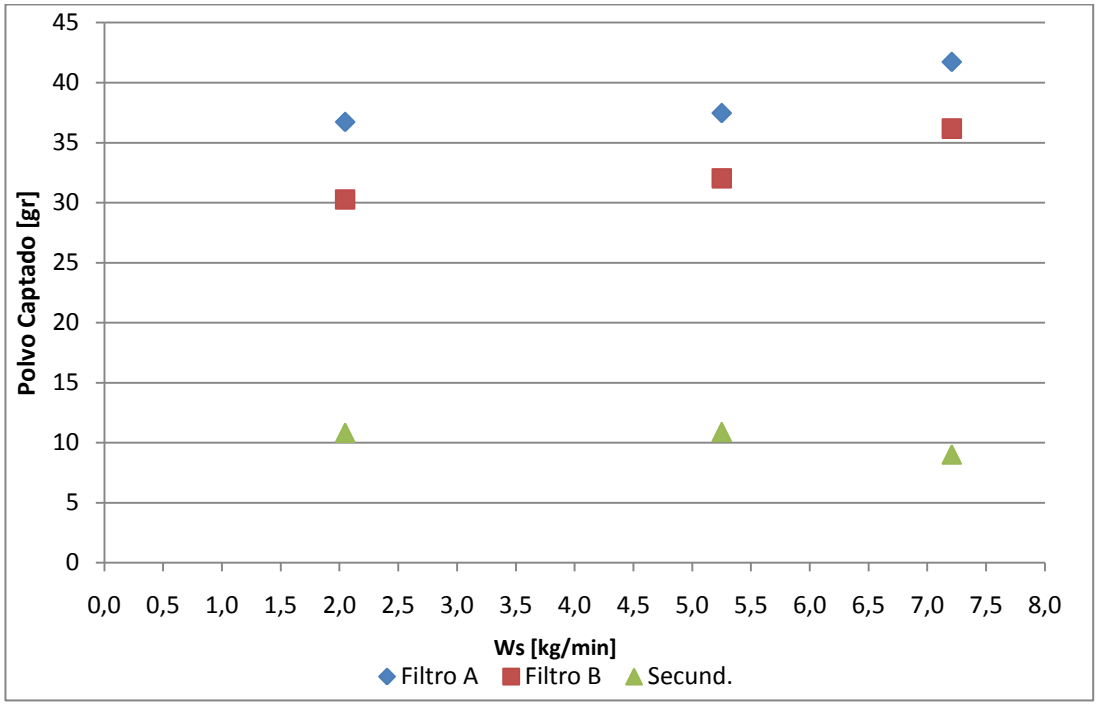

Figura 5.4: Captación de polvo para el mineral con 0 [%] de humedad.

5.3 Dustmeter

Para determinar la tendencia a generar polvo del mineral se utilizó un instrumento denominado “Dustmeter”, el cual se basa en las características aerodinámicas de las partículas de un material sólido a granel, al hacer fluir un flujo de aire seco a través de sus partículas en una capa de material. Se cuantifica la pérdida de masa de la cantidad de material analizado, al ser soplado durante un determinado intervalo de tiempo a una velocidad de aire específica. [20]

Con este equipo se procedió a realizar un ensayo al mineral captado y almacenado en los filtros, que poseía una humedad de 0[%] y fue el que más material particulado generó (basado en las gráficas anterior).

Se aprecia en la Figura 5.5 que el mineral captado por los filtros posee una alta tendencia a generar polvo, con lo que podemos afirmar que la máxima generación de polvo ocurre para partículas pequeñas, disminuyendo la generación de polvo cuando se manejan partículas de mayor tamaño.

Con los datos anteriormente obtenidos de granulometría del polvo captado, y los datos logrados con el uso del “Dustmeter” es posible afirmar que el material definido como polvo puede ser fácilmente arrastrado por el aire.

Para un valor de velocidad del gas cercano a 0,270 [m/s] se genera la mayor cantidad de polvo, ya que casi la totalidad de la muestra ha sido soplada, del equipo.

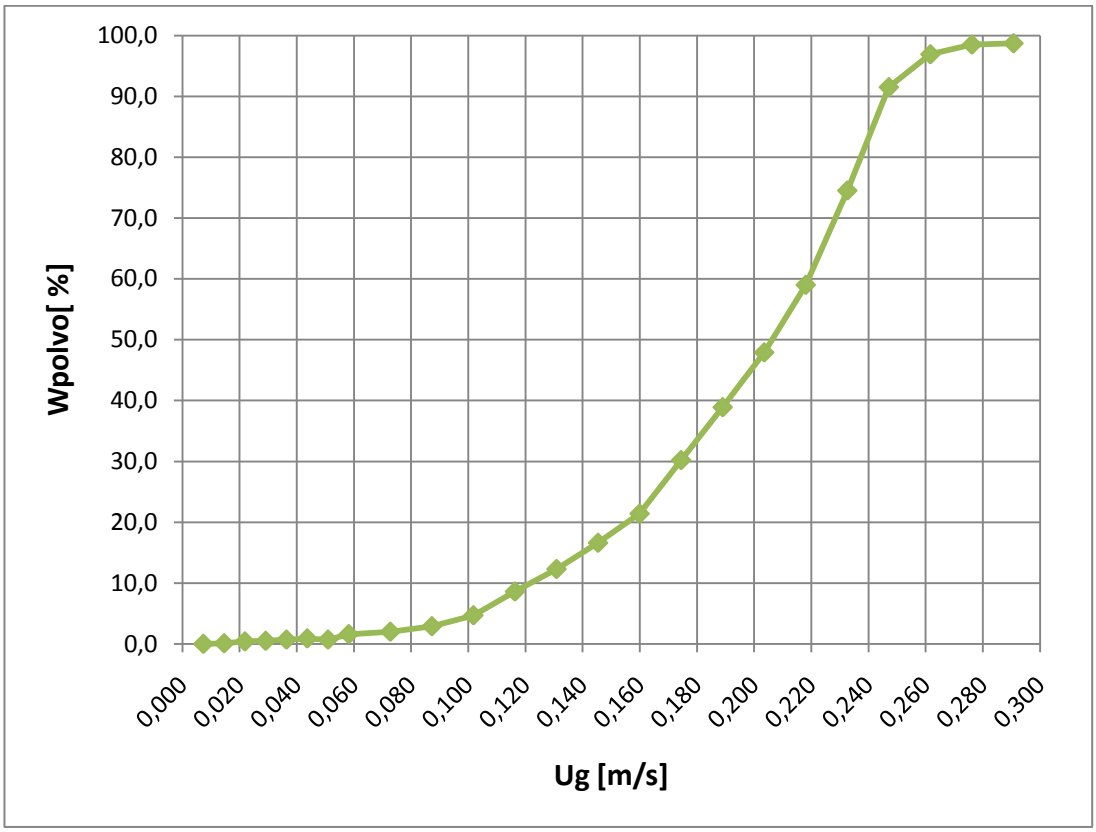

Figura 5.5: Tendencia a generar polvo del mineral captado por los filtros.

Como se aprecia en la Figura 5.6, el ensayo realizado con el Dustmeter permitió observar la clara tendencia del mineral captado para generar polvo, el cual bajo una condición bastante baja de velocidad de aire es arrastrado por la corriente, precipitando las partículas más gruesas antes que las más finas debido a su mayor inercia. Para ver en detalle los valores obtenidos ver Anexo n°3.

Figura 5.6: Ensayo de polvo captado con un “Dustmeter”.

5.4 Concentración de polvo

Basado en el aire desplazado desde el interior del modelo y de polvo captado por los filtros es posible calcular la concentración de polvo que existió durante la formación del stockpile de mineral chancado, medido en [gr/m^3] de aire.

Los valores obtenidos, apreciados en la Figura 5.7, nos indican que claramente existe una dependencia entre el porcentaje de humedad que posee el mineral chancado de cobre con la concentración de material particulado que puede ser generado en la carga del stockpile.

Para valores menores de flujo de sólidos, se verificó que la concentración de material particulado será menor, debido a que el aire desplazado al interior del modelo es más alto.

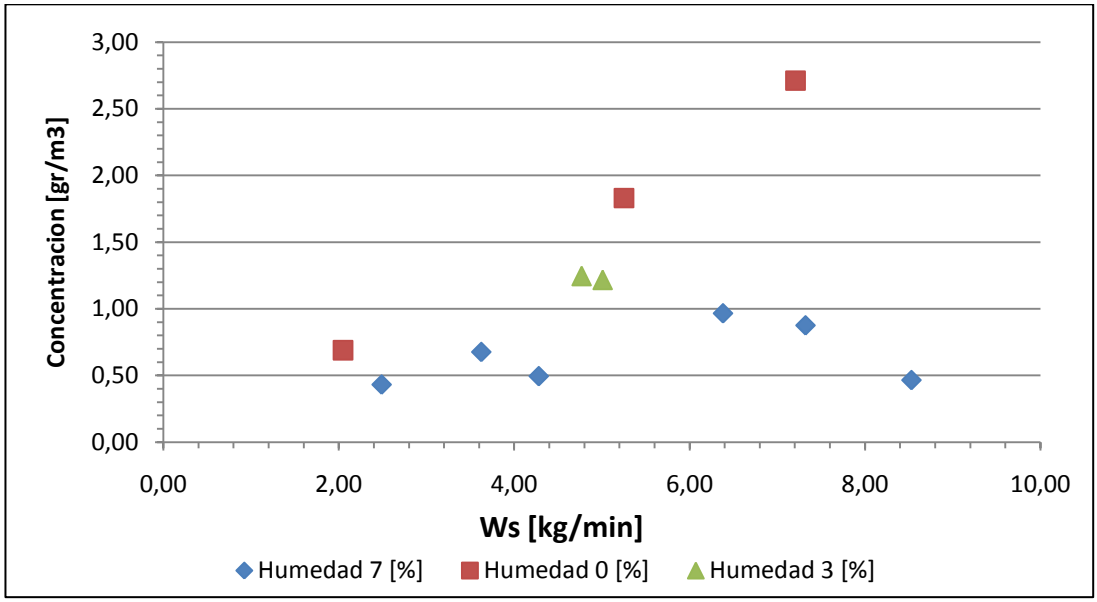

Figura 5.7: Variación de concentración de polvo en relación al flujo de sólidos.

5.5 Efecto de segregación

Otro fenómeno claramente identificable fue la segregación por trayectoria y por percolación, a pesar de que los filtros están ubicados de forma simétrica alrededor de la pila cónica. Existe una clara diferencia entre las masas obtenidas por cada uno de ellos, siendo el filtro A el que obtiene un valor mayor que el filtro B bajo cualquier condición.

Este fenómeno es acrecentado cuando el valor de humedad disminuye en el mineral, como es apreciado en la Figura 5.1. Valores cercanos a 0 [%] de humedad provocan que existan una mayor separación de las partículas en la formación del stockpile. Lo cual es claramente visible al comparar las Figuras 5.8 y 5.9.

Figura 5.8: Segregación por trayectoria con mineral a 7[%] de humedad.

Este fenómeno, apreciado solo visualmente, se debe a que al disminuir el contenido de humedad del mineral ensayado también es reducida la resistencia cohesiva del mismo mineral.

Figura 5.9: Segregación por trayectoria con mineral a 0[%] de humedad.

A pesar de existir diferentes formas de segregación, siempre hay una que destaca sobre el resto o que tiene mayor efecto sobre el mineral. En este caso es la segregación por trayectoria, debido al efecto producido cuando se traspasa el mineral desde la correa transportadora hacia el chute de descarga.

Este fenómeno es dependiente del proceso de mezcla y carga del material hacia el silo, dando especial cuidado en el control de la segregación para disminuir su efecto en la generación de polvo.

6. Conclusiones y recomendaciones

Los ensayos realizados permiten validar la construcción y operación del modelo físico del stockpile cónico. Se obtuvo un modelo que permite controlar y ensayar variables, como son la humedad del mineral, flujo de sólidos y diferentes granulometrías.

Para el caso de los ensayos de humedad, es importante recalcar que se logró comprobar que el mineral chancado de cobre alcanza un punto de saturación, en el cual ya no se generará polvo. En el caso ensayado será para un valor cercano al 8[%] de contenido de humedad.

A través de los ensayos de variación de flujo de sólidos, se comprobó que el comportamiento del mineral para genera polvo no sólo está determinado por esta variable, sino que depende en gran medida de la cantidad de humedad presente en el mineral, lo cual puede explicarse debido a que al disminuir la humedad disminuye la resistencia cohesiva del mineral.

Se comprobó que el material captado por los filtros es de características muy finas, posee una alta tendencia a generar polvo. Con un d_{100} bajo los 30 [μm], indicando que de producirse condiciones como las estudiadas en un stockpile minero, se podría estar infringiendo las normas nacionales ambientales existentes en la actualidad MP10. Con lo que sería imposible cumplir con estándares internacionales aplicados en países desarrollados como en E.E.U.U, donde actualmente es aplicada la MP2.5 [23].

Con respecto al fenómeno de la segregación por trayectoria y por percolación, se comprobó que a medida que disminuye la cantidad de humedad presente en el mineral, el fenómeno se ve afectado de mayor forma. Esto incrementa la diferencia de polvo captado entre los dos filtros presentes en el modelo físico, y provoca que la

pila formada posea áreas que tienen mineral más grueso y áreas con mineral más fino.

Debido a lo anteriormente expuesto se dan por cumplidos los objetivos inicialmente planteados en el presente trabajo.

Basados en la investigación realizada, se recomienda considerar en un futuro estudio la variación de la altura desde la cual el material es descargado hacia la pila, así como la modelación del fenómeno con otros minerales ya que permitirá apreciar cómo afecta a la generación de polvo.

7. Referencias

[1] RAPPEN, Albert. Dust Supression in Comparison with Other Dedusting Processes. Bulk Solids Handling Magazine. P 333 – 338. Volumen 14. Numero 2. Abril – Junio 1994.

[2] Real Academia Española, diccionario de la lengua española, vigésima segunda edición.

[3] Mine Safety and Health Administration, MSHA USA. www.msha.gov

[4] Ministerio de Salud de Chile, www.minsal.cl

[5] MODY, Vinit y JAKHETE, Raj. Dust Control Handbook. 1988. USA.

[6] ZADOR, Andrew. Methods to Prevent Enviromental Pollution At Large Bulk Material Handling Terminals. Bulk Solids Handling Magazine. 502 – 507. Volumen 13. Numero 3. Septiembre 1993.

[7] HARPER, Jon. Dust Management – Thinking Outside the Box. SKM MINMETALS. AUSTRALIA.

[8] NIOSH. Department of health and human service. Handbook for Dust control in mining. Information Circular. USA. 2003.

[9] CABREJOS M., Francisco, DEL CAMPO, Alfredo. "Diseño y operacion de stockpiles operaciones mineras". Jenike and Johanson Chile. Minería Global, año 6, N°1, 2007.

[10] BAEYENS, J., SMOLDERS, K., Ph. DUMONT. Stockpile Dust Emission and Suppression. Bulk Solids Handling Magazine. P 337 – 340. Volumen 21. Numero 3. Mayo/ Junio 2001.

[11] WAYNE, J, LEPAGE, Mike, JORDAN, Melissa. Creative Solutions to Assess and Control Fugitive and Wind-Blown. Dust Emissions at Industrial Facilities. D.E.T. RWDI, 2004. CANADA.

[12] HÖFLINGER, W, GRUNDIG, P. MAUSCHITZ, G. GAO, J. Reducing Dust Emissions From Falling Bulk Solids By Water Spraying – Development a Suitable Model Equation. Proceedings Relpowflo IV. 10 – 12 June 2008.

[13] REED, Randy, PAGE, Steven, LISTAK, Jeffrey. "An expanded model pro predicting surface coal mine drill respirable dust emissions". National Institute for Occupational Safety and Health. Pittsburg Research Laboratoty. USA, 2003

[14] Atiport Antofagasta, Chile. www.atiport.cl

[15] Instituto Nacional de Normalización. "Tamizado y determinación de granulometría". Norma Chilena NCh 1021 E 1976, Santiago.

[16] CABREJOS M., Francisco. Propiedades de Fluidez de los Materiales Sólidos a Granel, Jenike and Johanson Chile, I Congreso de Metalurgia Internacional, Arequipa, Perú, 2001.

[17] Instituto Nacional de Normalización. "Determinación de humedad para partículas solidas". Norma Chilena NCh 1515 Of. 1979, Santiago.

[18] Instituto Nacional de Normalización. "Determinación de densidad de partículas solidas". Norma Chilena NCh 1532 E 1980, Santiago.

[19] CABREJOS M., Francisco. Almacenamiento y Flujo de Materiales Sólidos a Granel, Jenike and Johanson Chile, I Congreso de Metalurgia Internacional, Arequipa, Perú, 2001.

[20] AYALA Ramírez, Sergio Andrés. “Determinación de parámetros que afectan la generación de polvos en el manejo de materiales sólidos a granel”. Trabajo para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Valparaíso. UTFSM, Departamento de Mecánica, 2007.

[21] Centro de Tecnologia de Mineral, CETTEM, www.cettem.cl

[22] Improvement of NPI Fugitive Particulate Matter Emissions. Estimation Techniques, SKM MINMETALS. 2005. AUSTRALIA.

[23] Enviromental Protection Agency, www.epa.gov

8. Anexos

Anexo N°1

1.1 Granulometría para mineral chancado de cobre ensayado

Tabla 1.1: Valores medidos para granulometría del mineral.

Malla	Abertura de Malla [mm]	Peso Retenido	Peso Pasante	Peso Retenido Porcentaje	Porcentaje Pasante
	[mm]	[gr]	[gr]	%	%
#1/2"	12,50	0	0	0,00%	100,0%
#1/4"	6,35	0	0	0,00%	100,0%
#5	4,00	36,7	494,4	6,91%	93,09%
#10	2,00	150,6	343,8	28,36%	64,73%
#16	1,00	110,4	233,4	20,79%	43,95%
#30	0,60	68	165,4	12,80%	31,14%
#50	0,30	96,5	68,9	18,17%	12,97%
#100	0,15	54,4	14,5	10,24%	2,73%
PAN		14,5	0	2,73%	0,00%

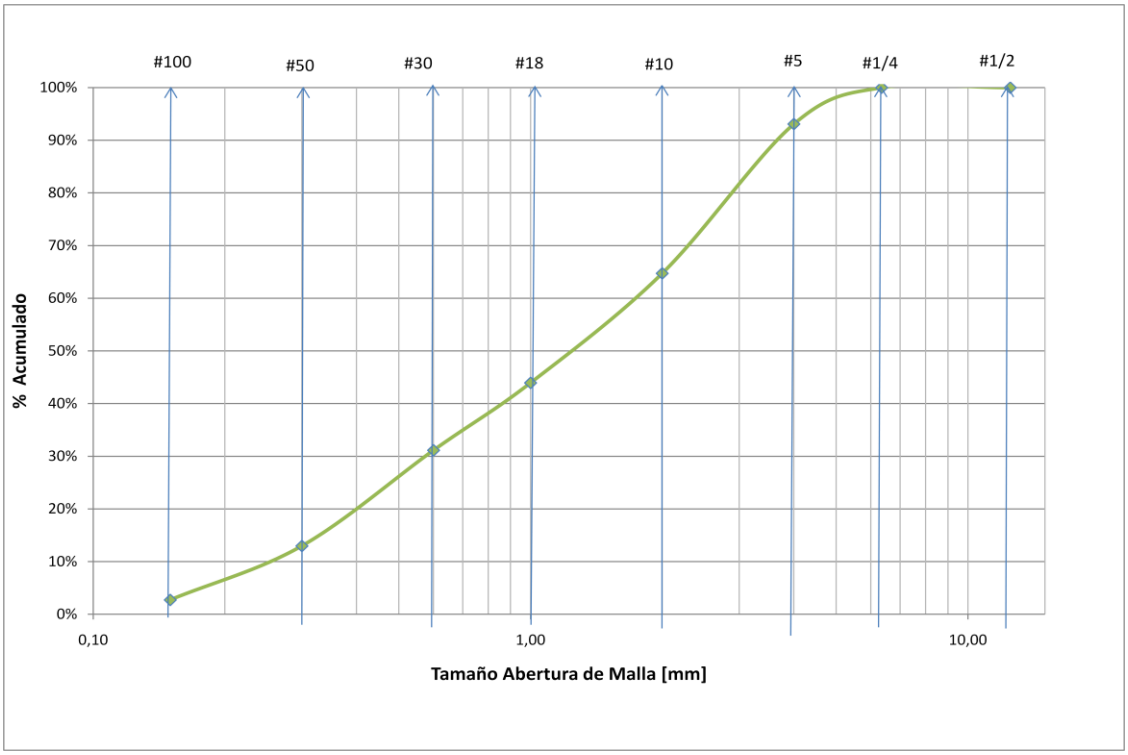

Figura A.1: Curva obtenida para granulometría del mineral ensayado.

1.2 Curva de operación aspiradora

Área = 0,00950332 [m^2]
D_{tubo} = 0,11 [m]

Tabla 1.1: Valores de presiones y velocidad para aspiradora.

P	Ugas	Q	Q	
[kpa]	[m/s]	[m3/s]	[m3/h]	
2,5	4	0,038	136,848	Descarga Abierta
2,1	4,1	0,039	140,269	
3,8	3,5	0,033	119,742	
4,6	3,3	0,031	112,899	Descarga Cerrada
4,8	3	0,029	102,636	
2,85	4	0,038	136,848	Filtro Limpio
3,6	3,5	0,033	119,742	Filtro Parcial Cerrado
2,7	4	0,038	136,848	

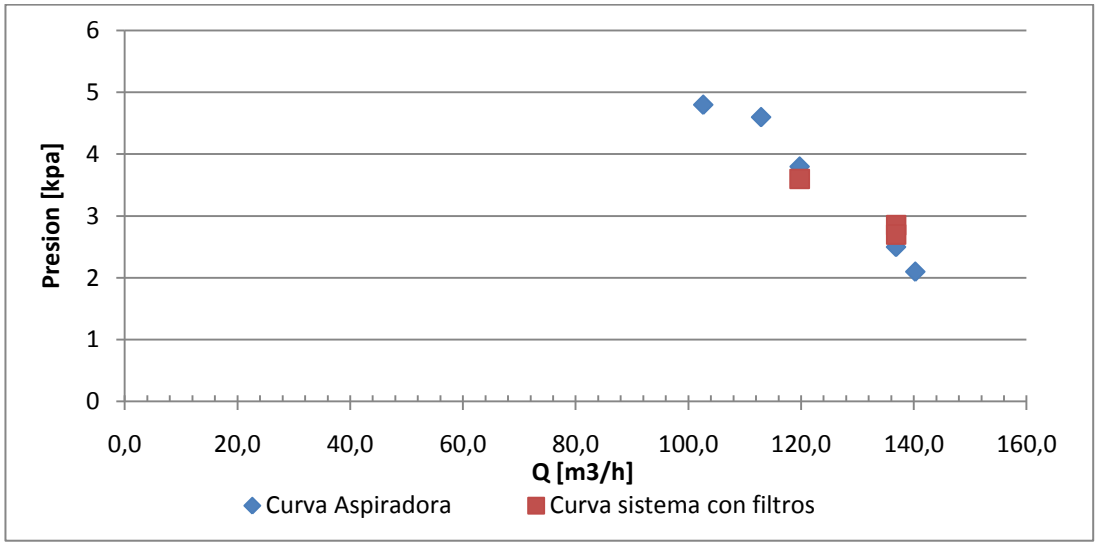

Figura A.2: Curva de aspiradora

Anexo N°2

2.1 Ensayos realizados contenido de humedad 7[%]

Tabla 2.1.1: Valores obtenidos ensayo de humedad.

Ensayo	6,89%	humedad
	34	RPM

	$P_{inicial}$	P_{Final}	Diferencia [gr]
Filtro A	51,39060	65,78581	14,39521
Filtro B	53,46192	65,73394	12,27202
		$W_{polvocaptado}$	**26,66723**

t_{ensayo}	24	min
W_s	4,28	[Kg/min]

Tabla 2.1.2: Valores de carga silo ensayo 7 [%] humedad.

Masa Ensayo	16,8	
	13,3	
	12,17	
	17,225	
	14,375	
	13,98	
	14,875	
P_{silo}	102,725	[Kg]

Tabla 2.1.3: Valores obtenidos ensayo de humedad.

Ensayo	6,89%	humedad
	54	RPM

	$P_{inicial}$	P_{Final}	**Diferencia [gr]**
Filtro A	52,74335	60,54324	7,79989
Filtro B	54,90614	61,73793	6,83179
		$W_{polvocaptado}$	**14,63168**

t_{ensayo}	12	[min]
W_s	8,53	[Kg/min]

Tabla 2.1.4: Valores de carga silo ensayo de 7 [%] humedad.

Masa Ensayo	15,235	
	12,78	
	13,96	
	12,89	
	19,65	
	14,83	
	13,015	
P_{silo}	102,36	[Kg]

Tabla 2.1.5: Valores obtenidos ensayo de humedad.

Ensayo	6,89%	humedad
	11	RPM

	$P_{inicial}$	P_{Final}	Diferencia [gr]
Filtro A	52,16522	74,71135	22,54613
Filtro B	54,33613	73,75947	19,42334
		$W_{polvocaptado}$	**41,96947**

t_{ensayo}	43,29	[min]
W_s	2,49	[Kg/min]

Tabla 2.1.6: Valores de carga silo ensayo de 7 [%] humedad.

Masa Ensayo	16,605	
	16,56	
	16,615	
	16,62	
	16,88	
	10,535	
	8,2	
	1,37	
P_{silo}	103,385	[Kg]

Tabla 2.1.7: Valores obtenidos ensayo de humedad.

Ensayo	6,89%	humedad
	24	RPM

	$P_{inicial}$	P_{Final}	Diferencia [gr]
Filtro A	52,06087	74,90151	22,84064
Filtro B	54,22265	74,16656	19,94391
		$W_{polvocaptado}$	**42,78455**

t_{ensayo}	28,15	[min]
W_s	3,63	[Kg/min]

Tabla 2.1.8: Valores de carga silo ensayo de 7 [%] humedad.

Masa Ensayo	17,85
	13,91
	15,026
	14,395
	16,175
	17,79
	6,37
	0,53

P_{silo}	102,046	[Kg]

Tabla 2.1.9: Valores obtenidos ensayo de humedad.

Ensayo	6,89%	humedad
	44	RPM

	$P_{inicial}$	P_{Final}	**Diferencia [gr]**
Filtro A	52,41814	68,75171	16,33357
Filtro B	54,20382	69,36808	15,16426
		$W_{polvocaptado}$	**31,49783**

t_{ensayo}	14	[min]
W_s	7,32	[Kg/min]

Tabla 2.1.10: Valores de carga silo ensayo de 7 [%] humedad.

Masa Ensayo	16,32
	16,42
	16,565
	16,01
	15,35
	15,39
	6,45

P_{silo}	102,505	[Kg]

Tabla 2.1.10: Valores obtenidos ensayo de humedad.

Ensayo	6,89%	humedad
	44	RPM

	$P_{inicial}$	P_{Final}	**Diferencia [gr]**
Filtro A	52,08927	70,70488	18,61561
Filtro B	54,19515	70,52628	16,33113
		$W_{polvocaptado}$	**34,94674**

t_{ensayo}	16,09	[min]
W_s	6,38	[Kg/min]

Tabla 2.1.11: Valores de carga silo ensayo de 7 [%] humedad.

Masa Ensayo	14,49	
	17,655	
	18,1	
	18,65	
	18,05	
	15,725	
P_{silo}	102,67	[Kg]

Tabla 2.1.11: Valores obtenidos ensayo de humedad.

Ensayo	5,00%	humedad
	34	RPM

	$P_{inicial}$	P_{Final}	Diferencia [gr]
Filtro A	52,06011	71,90143	19,84132
Filtro B	54,4355	72,30342	17,86792
		$W_{polvocaptado}$	**37,70924**

t_{ensayo}	20,48	[min]
W_s	5,02	[Kg/min]

Tabla 2.1.12: Valores de carga silo ensayo de 5 [%] humedad.

Masa Ensayo	18,01	
	20,67	
	18,38	
	18,99	
	17,93	
	8,785	
P_{silo}	102,765	[Kg]

Tabla 2.1.13: Valores obtenidos ensayo de humedad a 3 [%].

Ensayo	3,00%	humedad
	34	RPM

	$P_{inicial}$	P_{Final}	Diferencia [gr]
Filtro A	52,11367	85,87781	33,76414
Filtro B	54,14477	80,6563	26,51153
		$W_{polvocaptado}$	**60,27567**

t_{ensayo}	21,5	[min]
W_s	4,77	[Kg/min]

Tabla 2.1.14: Valores de carga silo ensayo de 3 [%] humedad.

Masa Ensayo	18,505	
	17,35	
	19,51	
	19,685	
	18,685	
	8,82	
P_{silo}	102,555	[Kg]

Tabla 2.1.15: Valores obtenidos ensayo de humedad a 0 [%]..

Ensayo	0,00%	humedad
	54	RPM

	$P_{inicial}$	P_{Final}	Diferencia [gr]
Filtro A	52,87883	94,59605	41,71722
Filtro B	55,24477	91,42006	36,17529
Secund.	3,56278	12,60062	9,03784
		$W_{polvocaptado}$	**86,93035**

t_{ensayo}	14,25	min
W_s	7,21	[Kg/min]

Tabla 2.1.16: Valores de carga silo ensayo de humedad.

Masa Ensayo	18,105	
	18,685	
	18,27	
	20,53	
	15,455	
	11,67	
P_{silo}	102,715	[Kg]

Tabla 2.1.17: Valores obtenidos ensayo de humedad a 0 [%]..

Ensayo	0,00%	humedad
	34	RPM

	$P_{inicial}$	P_{Final}	**Diferencia [gr]**
Filtro A	53,50380	90,97058	37,46678
Filtro B	55,50638	87,52759	32,02121
Secund.	3,54411	14,44982	10,90571
		$W_{polvocaptado}$	**80,39370**

t_{ensayo}	19,52	[min]
W_s	5,25	[Kg/min]

Tabla 2.1.18: Valores de carga silo ensayo de humedad a 0 [%].

Masa Ensayo	21,215	
	21,2	
	20,325	
	21,205	
	18,56	
P_{silo}	102,505	[Kg]

Tabla 2.1.19: Valores obtenidos ensayo de humedad a 0 [%].

	$P_{inicial}$	P_{Final}	Diferencia [gr]
Filtro A	55,18531	91,91287	36,72756
Filtro B	56,99022	87,25647	30,26625
Secund.	3,69074	14,53314	10,8424
		$W_{polvocaptado}$	**77,83621**

t_{ensayo}	50,23	[min]
W_s	2,05	[Kg/min]

Tabla 2.1.20: Valores de carga silo ensayo de humedad a 0 [%].

Masa Ensayo	20,975	
	20,59	
	20,28	
	20,215	
	20,84	
P_{silo}	102,9	[Kg]

Anexo N°3

3.1 Datos generación de polvo mineral chancado de cobre

Muestra de material: 100 [gr]

$W_{inicial}$ = 1326,4 [gr]

Tabla 3.1 Datos de Generación de Polvo.

Caudal de Gas Q [SCFH]	Velocidad del Gas U_{gas}	W_{ensayo} [gr]	W_{polvo} [%]
5	0,007	1326,4	0,0
10	0,015	1326,3	0,1
15	0,022	1326,0	0,4
20	0,029	1325,9	0,5
25	0,036	1325,7	0,7
30	0,044	1325,5	0,9
35	0,051	1325,7	0,7
40	0,058	1324,8	1,6
50	0,073	1324,4	2,0
60	0,087	1323,5	2,9
70	0,102	1321,7	4,7
80	0,116	1317,8	8,6
90	0,131	1314,1	12,3
100	0,145	1309,8	16,6
110	0,160	1305,0	21,4
120	0,174	1296,2	30,2
130	0,189	1287,5	38,9
140	0,204	1278,5	47,9
150	0,218	1267,4	59,0
160	0,233	1251,9	74,5
170	0,247	1234,9	91,5
180	0,262	1229,5	96,9
190	0,276	1227,9	98,5
200	0,291	1227,7	98,7

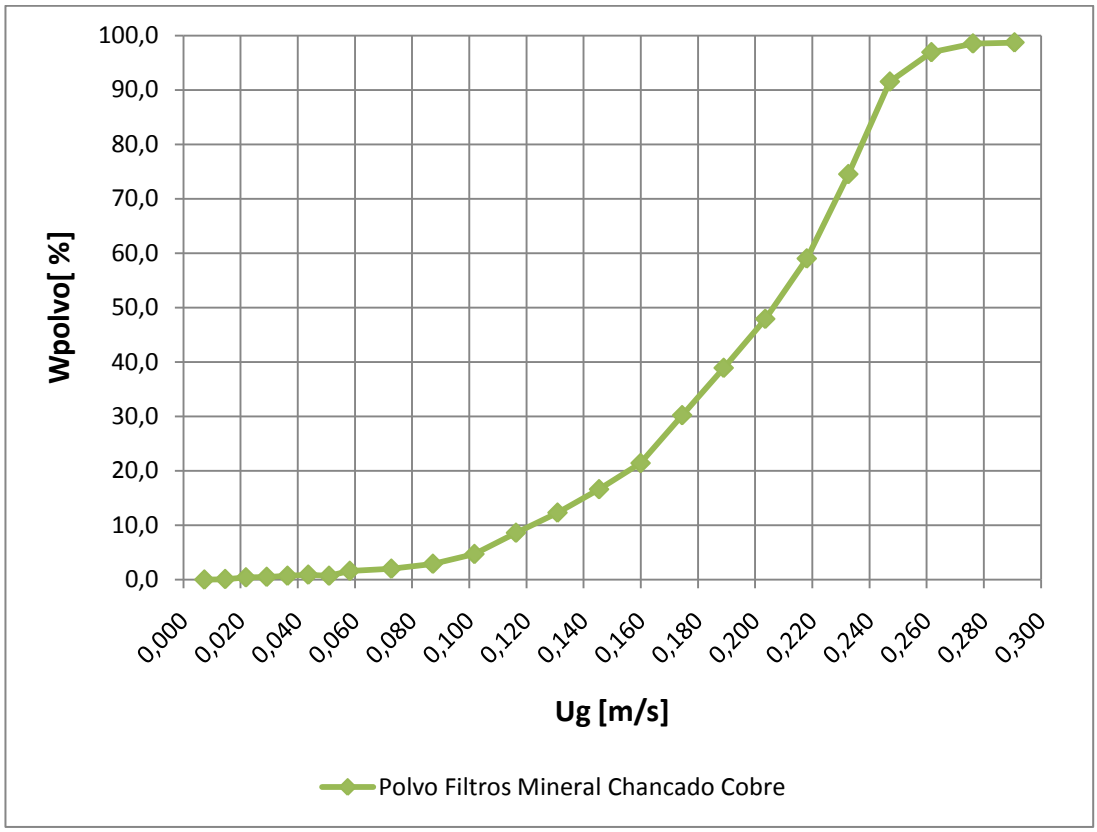

Figura A.3: Curva de tendencia de polvo obtenida con Dustmeter.

3.2 Análisis de polvo capturado.

Tabla 3.2: Distribución granulométrica polvo captado.

SYMPATEC HELOS VECTRA - U. DE CONCEPCION - ING. METALURGIA

S Y M P A T E C H E L O S Particle size analysis

Measure method	dry disperser	(RODOS)		Cascade	
Pressure	3.0 bar		Injector depression	70	mbar
Feed rate	45 %		Rotation rate	80	%

Focal length =	200 mm	Date	11-17-09 / 11:10
Measuring time =	10 s	Filename	C:\H_DATA\UTFSM001.HEL

Operator = Patricio Leonelli
Sample name -

Comments1 MUESTRA #1 GRANULOMETRIA Chancado de cobre(oxido) bajo #325
Comments2 UTFSM

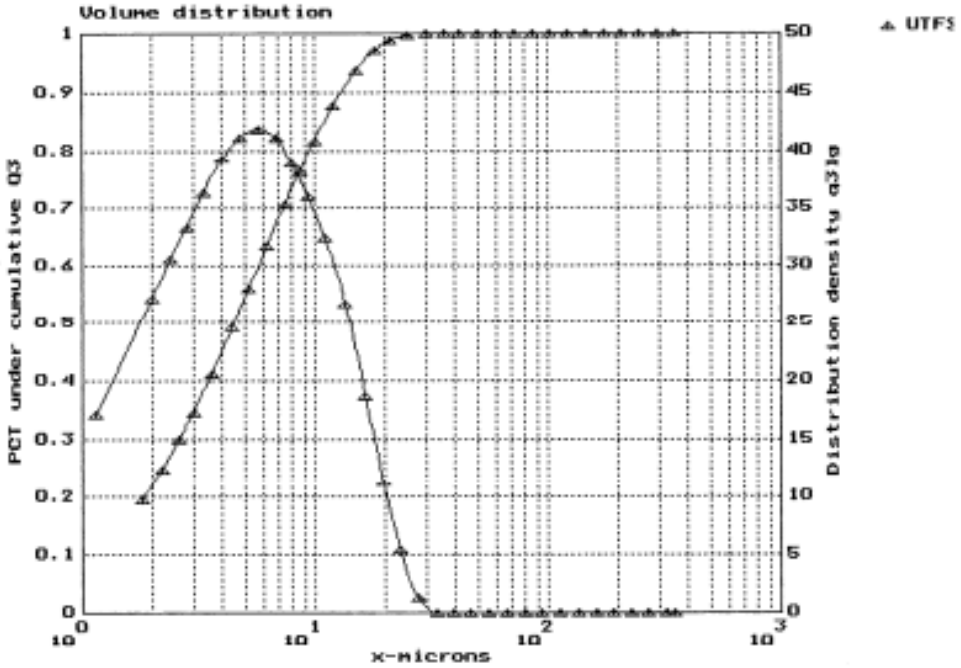

Tabla 3.3: Granulometría obtenida polvo capturado.

SYMPATEC HELOS VECTRA - U. DE CONCEPCION - ING. METALURGIA

S Y M P A T E C H E L O S Particle size analysis

Measure method dry disperser (RODOS) Cascade
Pressure 3.0 bar Injector depression 70 mbar
Feed rate 45 % Rotation rate 80 %

Focal length = 200 mm Date 11-17-09 / 11:10
Measuring time = 10 s Filename C:\H_DATA\UTFSM001.HEL

Operator = Patricio Leonelli
Sample name =

Comments1 NUESTRA #1 GRANULOMETRIA Chancado de cobre(oxido) bajo #325
Comments2 UTFSM

Volume distribution

Upper band limit xo/mym	Pct. under cumulative Q3/%	Pct. over cumulative (1-Q3)/%	Average for band xm/mym	Distribut. density linear q3/1/mm	Distribut. density logarith. q3lg	Pct.in band different. dQ3/%
1.80	19.40	80.60	1.15	149.25	17.16	19.40
2.20	24.84	75.16	2.00	135.87	27.17	5.43
2.60	29.93	70.07	2.40	127.19	30.53	5.09
3.00	34.69	65.31	2.80	119.12	33.35	4.76
3.60	41.29	58.71	3.30	109.93	36.28	6.60
4.40	49.14	50.86	4.00	98.14	39.25	7.85
5.20	56.00	44.00	4.80	85.81	41.19	6.87
6.20	63.35	36.65	5.70	73.49	41.89	7.35
7.40	70.60	29.40	6.80	60.41	41.08	7.25
8.60	76.42	23.58	8.00	48.51	38.81	5.82
10.00	81.83	18.17	9.30	38.64	35.94	5.41
12.00	87.73	12.27	11.00	29.47	32.42	5.89
15.00	93.66	6.34	13.50	19.78	26.71	5.93
18.00	97.06	2.94	16.50	11.33	18.70	3.40
21.00	98.80	1.20	19.50	5.82	11.34	1.74
25.00	99.76	0.24	23.00	2.39	5.49	0.95
30.00	100.00	0.00	27.50	0.48	1.32	0.24
36.00	100.00	0.00	33.00	0.00	0.00	0.00
42.00	100.00	0.00	39.00	0.00	0.00	0.00
50.00	100.00	0.00	46.00	0.00	0.00	0.00
60.00	100.00	0.00	55.00	0.00	0.00	0.00
72.00	100.00	0.00	66.00	0.00	0.00	0.00
86.00	100.00	0.00	79.00	0.00	0.00	0.00
102.00	100.00	0.00	94.00	0.00	0.00	0.00
122.00	100.00	0.00	112.00	0.00	0.00	0.00
146.00	100.00	0.00	134.00	0.00	0.00	0.00
174.00	100.00	0.00	160.00	0.00	0.00	0.00
206.00	100.00	0.00	190.00	0.00	0.00	0.00
246.00	100.00	0.00	226.00	0.00	0.00	0.00
294.00	100.00	0.00	270.00	0.00	0.00	0.00
350.00	100.00	0.00	322.00	0.00	0.00	0.00

x10 = 1.17 mym x50 = 4.50 mym x90 = 13.15 mym
x5 = 0.84 mym x63.2 = 6.18 mym x80 = 9.53 mym

Sv = 2.03 m3/cm3 c_opt = 0.4 %