

REPÚBLICA DE CUBA
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
Dr. Antonio Núñez Jiménez



TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO
ACADEMICO DE MASTER EN CIENCIAS TÉCNICAS
MENCIÓN BENEFICIO DE MINERALES

TITULO: *Modelación empírica teórica de las pérdidas de presión en el transporte neumático de la serpentina a 7,4 mm.*

AUTORA : *Ing. Ekaterina A.Gólubova.*

TUTOR: *Dr. Raúl Izquierdo Pupo.*

2003

"Año de Gloriosos Aniversarios de Martí y del Moncada"

RESUMEN

El transporte neumático, el método más moderno de transporte de sólidos, se utiliza ampliamente en las industrias del níquel. Según la búsqueda bibliográfica realizada no existe una metodología científicamente argumentada que permita establecer los parámetros óptimos de transporte neumático del mineral serpentínico. En la proyección, análisis y evaluación de estos sistemas es necesario establecer una metodología para cada material analizado, que depende en gran medida de las propiedades físicas y aerodinámicas del mineral. En el mundo se han realizado varios trabajos relacionados con la temática, principalmente con partículas de madera, bagazo, cemento, productos alimenticios, entre otros, pero ninguno de los casos se puede adaptar al mineral serpentínico. Debido a la importancia y perspectivas que posee este tipo de transporte en la industria del níquel es necesario realizar investigaciones para establecer el comportamiento de los principales parámetros de transporte para lograr los mayores índices de eficiencia en los mismos.

Con el cambio de la tecnología CARON para la tecnología de producción de Ferroníquel en la fábrica Las Camariocas existe diferencia entre la materia prima utilizada y su granulometría. En el caso específico es la serpentina.

En el trabajo se construyó por la fábrica Las Camariocas una instalación experimental en el Instituto Superior Minero Metalúrgico, dotada de instrumentación de punta de la firma SIEMENS y se realizó un estudio profundo del comportamiento de los principales parámetros de transporte, así como, determinar a escala experimental las pérdidas de presión en tramos horizontales y verticales en estos sistemas, que permita conformar un método de cálculo capaz de proyectar correctamente estas instalaciones. En este trabajo se determinan las propiedades físicas y aerodinámicas más importantes del mineral serpentínico granulado utilizado en los sistemas de transporte neumático de la empresa Las Camariocas (Densidad de las partículas, densidad aparente, granulometría, forma de las partículas y velocidad de flotación). Se observa que el mineral serpentínico estudiado es un material polidisperso con predominio de tamaño inferior a 7,4 mm y con velocidad de flotación máxima de 13,98 m/s. Se establece el modelo empírico teórico de las pérdidas de presión en tuberías horizontales y verticales que se debe utilizar en los cálculos de los sistemas de transporte neumático en fase diluta. Se analiza el comportamiento de estos sistemas para este mineral mediante gráficas. Los resultados

obtenidos ofrecen una alentadora perspectiva para la selección del equipamiento a utilizar en la fábrica de Ferroníquel.

RESUMEN

Capítulo 1 – INTRODUCCIÓN

1.1 – Planteamiento del problema	1
1.2 – Revisión bibliográfica	3
1.3 – Fundamentos teóricos	5
1.3.1 – Conceptos y notaciones	5
1.3.2 – Clasificación de los diferentes tipos de flujos	8
1.3.3 – Velocidad de caída libre de las partículas	9
1.3.4 – Modelación de la velocidad de caída libre en tubos	12
1.3.5 – Forma representativa y dimensión de las partículas de mineral	13
1.4 – Flujo tecnológico del Proyecto Ferroníquel	16
1.5 – Selección de las muestras	18
1.6 – Preparación de las muestras	18

Capítulo 2 – DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y AERODINÁMICAS DE LA SERPENTINA

2.1 – Metodología y equipos empleados	21
2.2 – Métodos de investigación de las propiedades físicas y aerodinámicas de la serpentina	21
2.2.1 – Densidad real del mineral serpentínico	21
2.2.2 – Determinación del contenido de humedad	24
2.2.3 – Densidad aparente del mineral serpentínico	26
2.2.4 – Granulometría	27
2.2.5 - Factor de forma de las partículas	32
2.2.6 – Velocidad de flotación	37

Capítulo 3 – MODELACIÓN EMPÍRICA TEÓRICA PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN EL TRANSPORTE NEUMÁTICO DEL MINERAL SERPENTÍNICO EN TUBERÍAS HORIZONTALES Y VERTICALES

- 3.1 – Una aproximación empírica para calcular la caída de presión en el transporte neumático
- 3.2. – Instalación experimental
- 3.3. – Diseño de experimento
- 3.4 – Técnica experimental
- 3.5 – Identificación del modelo matemático
 - 3.5.1 – Algoritmo de identificación del modelo
- 3.6 – Comportamiento de las pérdidas de presión en función de la velocidad del gas para tuberías horizontales y verticales
- 3.7 – Comportamiento de las pérdidas de presión en función de la distancia de transporte para tuberías horizontales y verticales

Capítulo 4 – VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

CAPÍTULO 1

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La planta de Níquel Las Camariocas ubicada en el Nordeste de la Provincia de Holguín fue diseñada para el tratamiento de los minerales lateríticos por el esquema de la Lixiviación Amoniacal basado en el proceso Caron para producir 30 000 t de Ni + Co. La construcción del Proyecto Cupey Las Camariocas fue interrumpida con la caída del Socialismo en los antiguos países del CAME y la Unión Soviética, quedando a un 60 % de completamiento.

En la actualidad la firma Cubana Comercial Caribbean Nickel S.A. está negociando junto a la firma Sudafricana OMICROM la conversión de Las Camariocas en una Planta para la producción de Ferroníquel por electrofundición de los Minerales Saprolíticos de los yacimientos de Moa Occidental. Esta industria será la primera y la única en la Republica de Cuba. Debido al cambio de la materia prima a utilizar y su granulometría surge la necesidad de investigar si el sistema de transporte neumático previsto por proyecto anterior satisface la transportación de la serpentina triturada. Por encargo de Commercial Caribbean Nickel S.A. (CCN), y en correspondencia con la negociación con la firma Overseas Mining Investments Limited (OMI), relacionada con el proyecto de una planta de producción de Ferroníquel con una capacidad de 90 000 TM/año, fue realizada una Corrida Experimental del mineral de Saprolitas del yacimiento de Moa Occidental en la Instalación de Transporte Neumático, construida con el asesoramiento del personal de ISMM por la Empresa Las Camariocas en ISMMM con este objetivo. La instalación construida con dimensiones de Planta Piloto (hasta 1T de capacidad) permite realizar las corridas de distintos materiales. Un paso importante en la modelación matemática, evaluación, cálculo y diseño de los sistemas de transporte neumático es determinar las propiedades físicas y aerodinámicas del material en las condiciones que se realizará el transporte del mismo (Torres, 2002). Existen los estudios de determinación de las propiedades del mineral laterítico utilizado en los sistemas de transporte neumático (Torres, 1999), estudios de arroz y semillas de soya

(Kaheman, 1999), partículas de aserrín (Lampinen, 1991), bagazo y madera (Pacheco, 1984 y Lesme, 1996), cemento y carbón (Spivakovsky, 1983), pero como tal el mineral de serpentina, utilizado para el transporte neumático no fue investigado suficientemente por tener poco uso en las industrias existentes hasta ahora en Cuba. De aquí surge una situación problemática: *Inexistencia de un estudio sobre la transportación neumática de la serpentina.* Por lo tanto, *la determinación de las características de los minerales serpentínicos para su transportación neumáticamente, así como la modelación teórica del sistema y su validación en una instalación experimental permite analizar el comportamiento de los principales parámetros de su manipulación y constituye el Problema Científico a resolver en este trabajo.*

Se plantea para el trabajo la siguiente **Hipótesis**: *El modelo empírico teórico de cálculo de las pérdidas de presión en los tramos verticales y horizontales permite obtener el comportamiento de los principales parámetros de transportación neumática del mineral serpentínico, que aportaría elementos indispensables para la elección del equipamiento para el Proyecto de Ferroníquel en Las Camariocas.*

Como **objetivos** del trabajo se plantean los siguientes:

1. Caracterizar desde el punto de vista físico y aerodinámico la serpentina transportada neumáticamente del Yacimiento Moa Occidental.
2. Obtener un modelo empírico teórico de cálculo de las pérdidas de presión en las tuberías horizontales y verticales en el sistema de transporte neumático, que describa el comportamiento de transportación neumática del mineral serpentínico.

Objetivos específicos:

1. Determinar la granulometría, forma, el índice de aplastamiento, densidad real, densidad aparente, humedad y velocidad de flotación de las partículas de serpentina, como componentes de la mezcla transportada neumáticamente.
2. Establecer el modelo matemático de las pérdidas de presión en los tramos verticales y horizontales.
3. Validar el modelo matemático en la instalación experimental construida con este fin.

4. Presentar el comportamiento de los principales parámetros de transporte neumático de la serpentina.

1.2. Revisión bibliográfica

La temática de transporte neumático ha sido tratada por varios autores con el objetivo de ampliación de su uso en distintas esferas de la industria, como son la industria de cemento, alimenticia, cerámica, azucarera, industria del níquel y también buscando las formas de modelar, seleccionar y proyectar los sistemas para distintos materiales con menor gasto energético. Las fórmulas actuales para la determinación de los parámetros de transporte neumático de los minerales han sido determinadas a partir de los resultados experimentales o de premisas teóricas aplicadas a esquemas simplificados y dependen de las condiciones en las cuales fueron determinadas. Los modelos clásicos de cálculo de las instalaciones de transporte neumático en general utilizando los coeficientes, que dependen de las propiedades físico-mecánicas y aerodinámicas del material transportado, como la granulometría, la densidad, la forma de la partícula, la velocidad de sustento se utilizan para los cálculos aproximados, los cuales podemos encontrar en los trabajos de Spivakovsky (1983); Smoldirev (1967) y Nodar Petit (1971). La proyección de los sistemas de transporte neumático de la laterita siempre se ha basado en las propiedades físicas del cemento. Para los cálculos de la transportación de la serpentina mediante el transporte neumático es necesario la investigación de las propiedades de este mineral. Las propiedades como contenido de humedad, composición granulométrica y forma de las partículas se analizan en el trabajo de Torres (1999) para mineral laterítico (mezcla 3:1 de limonita y serpentina). El estudio para determinar la velocidad del aire con partículas de arroz y semillas de soya realizó Kaheman (1998). Davidov, Pavlujin y Veber (1990) buscan la vía de mejorar la neumotransportación a partir de la concentración de la mezcla en las bombas de cemento. Un aporte sobre la influencia de la concentración de la mezcla podemos encontrarla en el trabajo de Kawaguchi (2000) y Pan (2001). El comportamiento de la velocidad de la partícula con concentraciones no muy altas en tuberías horizontales lo desarrolló Hui y Tomita (2000). Taylor (2001) estudió la velocidad de flotación de las partículas. Es importante la determinación de la velocidad mínima del gas para evitar la obstrucción plantea Pacheco (1984). Pacheco (1983) determina experimentalmente la velocidad de vuelo para una partícula de bagazo. La nueva ecuación, basada en la determinación de dos

parámetros: diferencia entre la velocidad del gas y el material transportado y la velocidad de caída del material en un tubo vertical, para el cálculo de la caída de presión esta presentada por Lampinen (1991). En los trabajos de Arnold y Wipych (1991) se da el tratamiento en los sistemas buscando la mayor capacidad de transportación con menor consumo de aire. Stegmaier (1978) resumió diversas ecuaciones que expresan las correlaciones en transporte neumático para el transporte de sólidos granulares finos los cuales contienen algunos números característicos de similitud. Weber (1982) encontró una correlación del coeficiente de pérdida de presión para el transporte neumático vertical basado en datos de mediciones experimentales. El modelo matemático de la caída de presión desarrollado por Stegmaier para transporte neumático es un valor promedio para la mayoría de los sólidos. El diagrama de estado del transporte neumático señalado por Krambrock (1963); Weber (1982); Rhodes (2001) representa la relación entre la caída de presión y la velocidad del aire. Jodlowski (1984); Klintworth y Rhodes (2001) llegaron a señalar las distintas regiones en el transporte neumático, como la fase densa y diluta. Lesme (1995) obtuvo una metodología de cálculo para la proyección de los sistemas de transporte neumático de bagazo en las centrales azucareras del país. Análisis de la influencia de las propiedades de madera, arroz, pelets de polietileno en las pérdidas de presión y el consumo de energía específica de los sistemas de transporte neumático fue desarrollado por Taylor (2001) y Lampinen (1991). Según los estudios realizados no existe una metodología científicamente argumentada que permita establecer los parámetros óptimos de transporte neumático del mineral serpentínico. En la proyección, análisis y evaluación de estos sistemas es necesario establecer una metodología para cada material analizado, que depende en gran medida de las propiedades físicas del mineral y del comportamiento aerodinámico de las partículas. En el mundo se han realizado varios trabajos relacionados con la temática, principalmente con partículas de madera, bagazo, cemento, productos alimenticios, entre otros, pero ninguno de los casos se puede adaptar al mineral serpentínico. Debido a la importancia y perspectivas que posee este tipo de transporte en la industria del níquel es necesario realizar investigaciones para establecer los parámetros óptimos de transporte, lograr los mayores índices de eficiencia en los mismos y determinar a escala experimental las pérdidas de presión en tramos horizontales, verticales y distintos accesorios utilizados en estos sistemas, que permita conformar un método de cálculo capaz de proyectar correctamente estas instalaciones.

I.3. Fundamentos teóricos

1.3.1. Conceptos y notaciones

La concentración en peso de la muestra se define por:

$$M = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_g} \quad (1.1)$$

Donde:

$\dot{m}_s$ - flujo másico de sólido. [kg/s]

$\dot{m}_g$ - flujo másico de gas. [kg /s]

Si consideramos un punto seleccionado arbitrariamente en el tubo, en el cual el gas y las partículas de sólido fluyen, el flujo de la mezcla de gas y sólido no necesita ser homogéneos, por tanto la concentración de las partículas puede variar a través de la sección transversal del tubo, esto quiere decir, que μ se considera en función del lugar en la tubería y la definición (1) debe ser reemplazada por:

$$\mu = \frac{\dot{m}_s''}{\dot{m}_g''} \quad (1.2)$$

Donde: $\dot{m}_g''$ y $\dot{m}_s''$ son las densidades del flujo másico [kg/m²seg] del gas y del sólido respectivamente en un cierto punto del tubo.

Los flujos del gas y de las partículas sólidas se asumen como flujos paralelos, esto quiere decir que la velocidad del gas (v) y la velocidad de las partículas sólidas (c) están en la misma dirección del tubo. Por otro lado como el flujo es homogéneo, el valor absoluto de v y c puede variar a través de su sección transversal. Un elemento diferencial de volumen dv en el campo de flujo contiene una masa de gas dm_g y una masa de sólido dm_s, los

volúmenes correspondientes para el gas y para el sólido se denotan por dv_g y dv_s . La suma de esos volúmenes parciales es el volumen total de la mezcla, es decir:

$$dv = dv_g + dv_s \tag{1.3}$$

La densidad real del gas en el punto del elemento de volumen dv es:

$$\rho_G = \frac{dm_g}{dv_g} \tag{1.4}$$

y la densidad parcial del gas es:

$$\rho_g = \frac{dm_g}{dv} \tag{1.5}$$

La densidad real del gas ρ_G es masa dividida por el volumen ocupado por el gas, la densidad aparente o densidad parcial ρ_g es la masa dividida por el volumen total de la mezcla sólido - gas.

De forma similar a las ecuaciones (1.4) y (1.5) se definen las densidades correspondientes para las partículas sólidas.

$$\rho_s = \frac{dm_s}{dv_s} \tag{1.6}$$

$$\rho_s = \frac{dm_s}{dv} \tag{1.7}$$

Donde: ρ_s - es la densidad real de la partícula sólida.

ρ_s - es la densidad parcial de las partículas en la mezcla.

La fracción de volumen de gas en la mezcla o fracción de vacío es:

$$\Phi = \frac{dV_g}{dV} \tag{1.8}$$

De las ecuaciones 1.4 y 1.5 se obtiene:

$$\Phi = \frac{\rho_g}{\rho_G} \tag{1.9}$$

De las ecuaciones (1.6), (1.7) y (1.3) se obtiene:

$$\frac{\rho_s}{\rho_s} = 1 - \Phi \tag{1.10}$$

En la Fig. 1.1. se observa la variación de la fracción de vacío en función de la relación (c/v) para diferentes concentraciones.

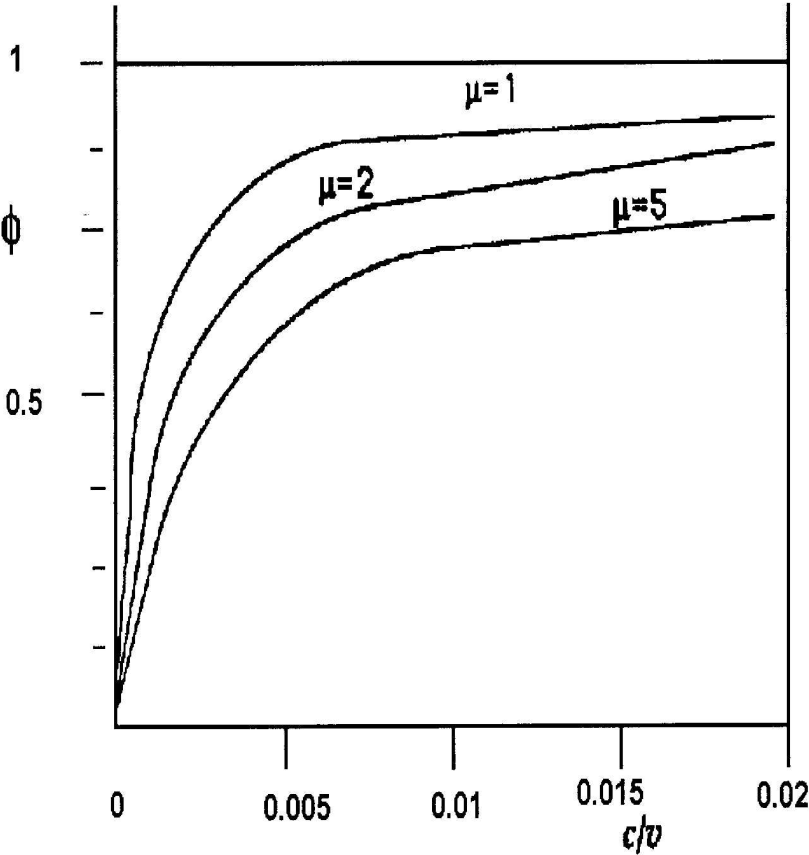


Fig.1.1. Fracción de vacío $\phi = f(\mu, c/v)$ para una $\rho_G = 1.2 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_S = 1500 \text{ kg/m}^3$.

1.3.2. Clasificación de los diferentes tipos de flujos

Para determinar el tipo de flujo en el transporte neumático, es necesario conocer, la fracción de vacío, la distribución del tamaño de las partículas, las propiedades superficiales del sólido, entre otros.

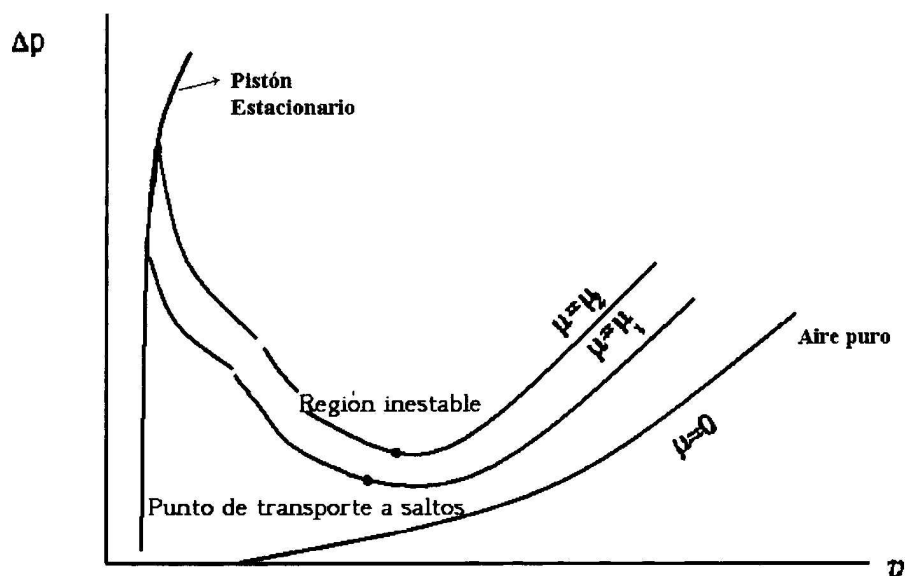


Fig.1.2.Diagrama de estado del transporte neumático.

Una gráfica ampliamente usada para ilustrar los diferentes tipos de flujos en el transporte neumático es el llamado diagrama de estado Krombrock (1963), Weber (1982), Rhodes (2001) en el que la caída de presión se relaciona con la velocidad del aire.

Como se muestra en la figura 1.2, la región de transporte de material está limitada por la curva de aire solamente y la curva de pistón estacionario, donde el aire fluye sobre una cama rellena de partículas estacionarias. El transporte en la fase densa ocurre cuando la velocidad del aire (v), está por debajo de la velocidad de transporte a saltos.

El régimen de la fase densa puede ser subdividido en tres distintas regiones las cuales se muestran en la figura 1.3.

- Fase densa continua: en el que el material se mueve a saltos y rebotes a partir de un arrastre estable.
- Fase densa discontinua: en la que el flujo de partículas se mueve en grupos.
- Fase densa sólida: donde el sólido sobresale a través del tubo como un material continuo.

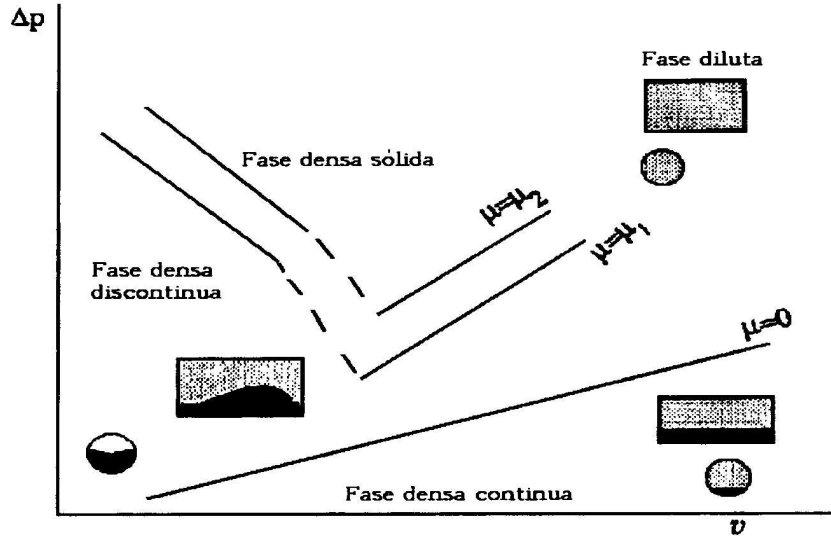


Fig.1.3. Distintas fases en el transporte neumático.

Comparada con la fase diluta, el transporte en fase densa ofrece algunas claras ventajas, este tiene un consumo más bajo de potencia, el desgaste es reducido, el separador gas/sólido y el diámetro del tubo requerido son más pequeños. La desventaja es la mayor pérdida de presión por unidad de longitud del tubo, lo que limita el uso del transporte en fase densa para distancias cortas, no mayor de 1 kilómetro. El otro factor es que muchos materiales principalmente granulares y con gran tamaño de partículas no fluyen como flujos en fase densa.

De todo lo anteriormente dicho lo más importante está en que no hay una metodología única con la ayuda del cual se pudiera predecir el comportamiento del flujo en cada aplicación, para cada caso, el tipo de flujo tiene que ser examinado experimentalmente.

1.3.3. Velocidad de caída libre de las partículas

Comenzaremos considerando la velocidad de caída libre de una partícula simple cuyo diámetro es d_s . Cuando la partícula alcanza la velocidad de caída libre (W_{so}), la fuerza gravitacional y la fuerza de resistencia están en equilibrio, después de la cual la velocidad de caída libre es constante. El problema básico en la determinación de la caída libre está en la evaluación de la fuerza de resistencia que una partícula experimenta como resultado del movimiento relativo a los alrededores del gas. El flujo de gas y la fuerza de resistencia resultante (F_d), han sido caracterizados más a fondo para el movimiento de una esfera lisa sin rotación a velocidad constante a través de un gas estable y no limitado. Los resultados obtenidos bajo esas condiciones altamente idealizadas es normalmente representada por una curva de un coeficiente de resistencia estándar, la cual expresa la relación entre el coeficiente de resistencia, C_d y el número de Reynolds de la partícula.

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{d_s^2 \pi}{4} \cdot \rho_G \cdot \frac{W_{so}^2}{2}} \quad (1.11)$$

$$R_{ed} = \frac{W_{so} \cdot d_s}{\nu} \quad (1.12)$$

Donde:

ν - es la viscosidad cinemática del gas.

Con los parámetros adimensionales C_d y R_{ed} el problema está en encontrar la correlación.

$$C_d = f(R_{ed}) \quad (1.13)$$

La cual junto con la condición de equilibrio de fuerza, la fuerza de resistencia F_d y la fuerza gravitacional menos la fuerza hidrostática es igual a:

$$F_d = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_s}{2}\right)^3 \cdot (\rho_s - \rho_G) \cdot g \quad (1.14)$$

El coeficiente de resistencia basado en el análisis teórico de Stokes es:

$$C_d = f(R_{ed}) = \frac{24}{R_{ed}} \quad (1.15)$$

Sustituyendo C_d en la ecuación (1.11) y combinando esta con las condiciones de fuerza de equilibrio (1.14), se obtiene la siguiente ecuación para la velocidad de caída libre.

$$W_{so} = \frac{\rho_s - \rho_G}{\rho_G} \cdot \frac{d_s^2}{18\nu} \cdot g \quad (1.16)$$

Si el gas es aire a presión atmosférica y temperatura de 25°C, $\rho_G = 1.2 \text{ kg/m}^3$ y $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. El coeficiente de resistencia a partir de la ley de Stokes puede ser calculado para pequeños valores del número de Reynolds. Glift y Gauvin utilizaron la siguiente ecuación para el cálculo del mismo a través de los regímenes de transición y turbulentos.

$$C_d = 24R_{ed}^{-1} + 3.60R_{ed}^{-0.313} + \frac{0.42}{(1 + 4.25 \cdot 10^4 R_{ed}^{1.16})} \quad (1.17)$$

La región $1000 < R_{ed} < 200\ 000$, algunas veces llamada régimen de Newton se caracteriza por un coeficiente de resistencia relativamente constante, indicando que no ocurren grandes cambios en el modelo de flujo. Los cambios más significativos ocurren en la transición del flujo laminar a turbulento.

De la ecuación (1.17) se obtiene:

$$C_d = 0.47 \text{ para } R_{ed} = 1000$$

$$C_d = 0.49 \text{ para } R_{ed} = 200\ 000$$

Por tanto:

$$C_d = \text{Cont} = 0.5 \quad (1.18)$$

Sustituyendo la ecuación (1.18) en la ecuación (1.11) y usando la ecuación (1.14) se obtiene la bien conocida fórmula de Newton para la velocidad de caída libre.

$$W_{So} = \left[\frac{8}{3} \cdot \frac{\rho_s - \rho_G}{\rho_G} \cdot g \cdot d_s \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.19)$$

La cual es una buena aproximación en la región $1000 < R_{ed} < 200\,000$.

1.3.4. Modelación de la velocidad de caída libre en tubos

Hasta ahora hemos considerado la velocidad de caída libre en el aire en reposo, pero, el fenómeno en el tubo difiere de este porque la caída de las partículas sólidas se realiza en un flujo de aire ascendente. Esta idea de modelación es de Weber.

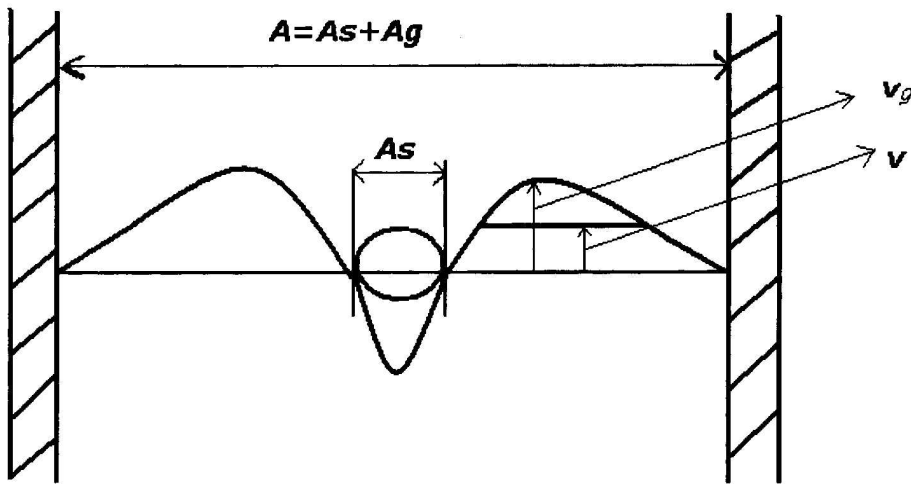


Fig 1.4. Caída de una partícula sólida en un tubo.

El volumen de aire reemplazado por las partículas fluye hacia arriba y la variación del flujo de aire es:

$$V_g \cdot A_g = W_s \cdot A_s \quad (1.20)$$

Donde:

W_s - es la velocidad de caída de las partículas en el tubo, magnitud que deseamos determinar.

A_g - es el área de la sección transversal para el flujo de aire.

A_s - es el área de la sección transversal de las partículas sólidas.

La ecuación (1.20) incluye asumir que el flujo es incomprensible.

En el sistema de coordenada en el cual el flujo de aire se mueve hacia arriba con la velocidad V_g , la partícula desciende como si el aire alrededor de este estuviera en reposo. En otras palabras la velocidad de caída libre es la suma de las dos velocidades.

$$W_{so} = W_s + V_g \quad (1.21)$$

Resolviendo V_g de la ecuación (1.20) obtenemos:

$$V_g = \frac{A_s}{A_g} \cdot W_s = \frac{A - A_g}{A_g} \cdot W_s = \left(\frac{1}{\phi} - 1 \right) \cdot W_s \quad (1.22)$$

Sustituyendo la ecuación (1.22) en (1.21) se obtiene un resultado muy simple para la velocidad de caída libre.

$$W_s = \phi \cdot W_{so} \quad (1.23)$$

Donde:

ϕ - es la fracción de volumen de gas en la mezcla o fracción de vacío.

En la ecuación (1.23), W_{so} es la velocidad de caída libre de las partículas de forma separada, si estas forman grandes terrones, no es adecuada asumir ese comportamiento porque las partículas unidas caen a otra velocidad, para este caso la ecuación (1.23) tiene que ser reemplazada por una relación empírica.

1.3 5. Forma representativa y dimensiones de las partículas de mineral

La granulometría de la carga a granel determina la distribución de las partículas de dicha carga de acuerdo con sus medidas. La mayor dimensión lineal, su diagonal "a", caracteriza a la partícula (ver figura 1.5) y define algunos parámetros en el transportador y sus accesorios. Por lo general los materiales a granel no son homogéneos.

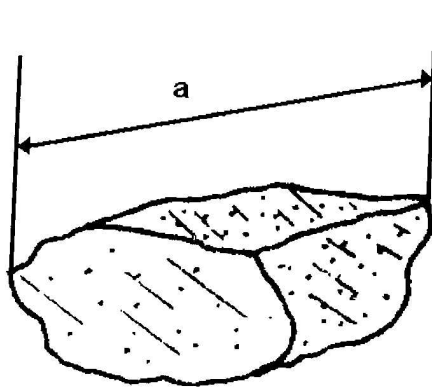


Fig 1.5. Caracterización de la partícula.

La homogeneidad de las dimensiones de las partículas de los materiales a granel se determina por un coeficiente K_o que depende de las dimensiones máximas ($a_{máx}$) y mínimas ($a_{mín}$) de las partículas de una determinada carga, de modo que:

$$K_o = \frac{a_{máx}}{a_{mín}} \quad (1.25)$$

Una vez realizado el proceso de tamizado y determinada la granulometría del material se llega a los valores de $a_{máx}$ y $a_{mín}$ de la muestra y se determinará el valor de K_o . Para un valor de $K_o > 2.5$, denominaremos a la muestra como *no clasificada* y la “dimensión de la partícula más representativa”, $\acute{a}$; se determina de la siguiente forma:

Si el peso del conjunto cuya dimensión $a_{máx}$ es igual o superior al 10% en peso del total de la muestra $\acute{a} = a_{máx}$. Si el peso del conjunto cuya dimensión es $a_{máx}$ es inferior al 10% en peso del total, se tomará $\acute{a}$ igual al valor de la dimensión inmediata que resulte superior al 10% en peso del total de la muestra. Cuando el valor de $K_o \leq 2.5$, se denominará a la muestra con el nombre de *clasificada* y el valor de $\acute{a}$ estará dado por la media de las dimensiones máxima y mínima de las partículas del material analizado (ver la tabla 1.1).

$$\acute{a} = \frac{a_{máx} + a_{mín}}{2} \quad (1.26)$$

Tabla 1.1.Determinación de la dimensión de la partícula representativa (a).

$K_o = \frac{a_{m\acute{a}x}}{a_{m\acute{i}n}}$	Denominación	$\frac{G}{G_o} (\%)$	Valor de á
>2.5	No clasificada	$\geq 10 \%$ $< 10 \%$	$\acute{a} = a_{m\acute{i}n}$ $\acute{a} = K \times a_{m\acute{a}x}$
≤ 2.5	Clasificada	-----	$\acute{a} = \frac{a_{m\acute{a}x} + a_{m\acute{i}n}}{2}$

Donde:

G_o - peso total de la muestra [g].

G - peso de la porción correspondiente a $a_{m\acute{a}x}$ [g].

K - factor que dependerá de la porción superior al 10% en peso.

Para el mineral serpentínico con la composición granulométrica obtenida se determina la clasificación de la muestra y las dimensiones de las partículas más representativas (ver la tabla 1.2).

Tabla 1.2.Determinación del peso de la partícula y el peso de la porción correspondiente.

Clase de tamaño, mm	% en peso	Clasificación
+ 6.3	2.42 %	$a_{max} = 6.3 \text{ mm}$
- 6.3+ 5	2.61 %	-----
- 5 + 3.15	5.86 %	$a_{min} = 0.071 \text{ mm}$
-3.15 + 2.0	6.87 %	-----
- 2.0 +1.0	11.54 %	
-1.0 + 0.25	23.45%	
- 0.25 + 0.071	20.21 %	
- 0.071	27.04 %	

$$K_o = a_{max}/a_{min}$$

$$K_o = 88.73$$

Como K_0 es mayor que 2.5 la muestra es no clasificada.

$$a' = a_{max}$$

$$a' = 6.3 \text{ mm}$$

De acuerdo con el valor de a' , los materiales a granel se dividen en los siguientes grupos:

- Con pedazos muy grandes -----más de 320mm.
- Con pedazos grandes ----- 320 a 161 mm.
- Con pedazos medianos -----160 a 61 mm.
- Con pedazos pequeños ----- 60 a 10 mm.
- Granulados----- 9 a 0.5 mm.
- Pulverizados ----- 0,49 a 0.05 mm.
- Polvos y talcos -----hasta 0.05 mm.

Teniendo en consideración el valor calculado de a' para el mineral serpentínico este pertenece al grupo de los materiales granulados.

La granulometría del material a granel debe ser tomada muy en cuenta para la determinación de las dimensiones del órgano portador de la carga en un transportador neumático. También para determinar las dimensiones de la tolva y embudos. Además, cuando se precisa transportar materiales clasificados o que contengan partes considerables de polvos, debe emplearse conductores herméticos y tomar medidas contra la excesiva abrasividad.

1.4. Flujo tecnológico del Proyecto Ferroniquel

La fábrica para la producción de 90000 T/A de Ferroniquel con 22500 T de níquel en él, tendrá las siguientes Operaciones:

- Minado del Mineral.
- Trituración Primaria.

- Transportación por Camiones y Transportador de 17 Km hasta el depósito de homogeneización.
- Homogeneización con utilización de los apiladores reclamadores.
- Secado del mineral (3 secaderos)
- Molienda (2 molinos)
- Almacenaje en Silos.
- Calcinación pre - reductora en Hornos Herreshoff (8 hornos)
- Electrofusión (2 hornos)
- Refinación.
- Empaque y embalaje.

El mineral serpentínico procedente de las instalaciones mineras, donde se realiza la primera reducción de tamaño en las trituradoras de rodillos, llega al patio a través de un transportador de banda de 17 Km. El mineral se homogeniza en el Patio de homogeneización mediante de dos apiladores reclamadores y por un conjunto de bandas transportadoras se alimenta a los secaderos, donde ocurre el proceso de secado y el mineral sale con 4,5 % de humedad. El producto fino, debido al arrastre en los secaderos, y captado por los electrofiltros de secaderos se envía a la tolva de Producto Final de Molienda a través de *transporte neumático*. El mineral con una granulometría menor de 100 mm pasa a la segunda etapa de reducción de tamaño (a los molinos de bolas) para alcanzar una granulometría menor de 6 mm. La captación de polvo en la Planta de Molienda se efectúa en los electrofiltros y es transportado a la Tolva de Producto Final a través de *transporte neumático*. Para transportar el mineral molido desde la Planta de Molienda hasta los Silos también se utiliza *transporte neumático*, así como desde los Silos hacia los Hornos de Reducción. Desde los electrofiltros de Hornos de Reducción el polvo se transporta *neumáticamente* hasta la Tolva de Producto Final. El mineral calcinado y pre-reducido a través del transportador de placa flexible se traslada a los dos hornos de arco eléctrico de 43 MW cada uno, donde ocurre el proceso de fusión y obtención de los productos finales. El Ferroniquel crudo para lograr los indicadores de calidad establecidos por las normas ISO 9000 pasa a la siguiente etapa de proceso, que es la refinería, donde se obtienen dos

productos: el Ferroniquel comercial y la escoria. Cada uno de ellos pasa a sus respectivas Plantas de Granulación. El Ferroniquel se embarca y la escoria se almacena.

En Las Camariocas existen varios puntos de transporte neumático, ubicados en cinco lugares:

1. Salida de los Electrofiltros de Secaderos hasta las tolvas de producto final de los molinos (cuatro sistemas independientes)
2. Tolvas de producto final de los molinos hasta los silos (seis sistemas independientes)
3. Salida de silos hasta los hornos de soleras múltiples (ocho sistemas independientes)
4. Salida de los Electrofiltros de Hornos hasta las tolvas de producto final de los molinos (cuatro sistemas independientes)
5. Salida de los Electrofiltros de Molienda hasta las tolvas de producto final de los molinos (cuatro sistemas independientes).

1.5. Selección de las muestras

La construcción de la nueva fabrica de Ferroniquel exige el cumplimiento de un programa amplio de las investigaciones y una de ellas es la transportación de la serpentina mediante el neumotransporte. Con este objetivo se selecciono la muestra tecnológica del yacimiento de Moa Occidental y fue trasladada a la Planta Piloto de Nicaro para su posterior preparación mecánica. Una muestra de aproximadamente 290 toneladas de Saprolitas de Moa, obtenida a partir del duplicado de la muestra enviada a Sudáfrica en 1999, fue homogenizada, secada y triturada hasta 95% de fracciones menores de 5 mm. El mineral de serpentina preparado de esta manera fue enviado a la Instalación de Transporte Neumático de ISMMM en cantidad de dos big-bag de 1T cada uno. Esta fue la muestra que utilizamos para efectuar la Corrida de Transporte Neumático.

1.6. Preparación de las muestras

El proceso de reducción de tamaño de la serpentina desde 450 mm hasta 25mm se realiza en el CIL y después la muestra es trasladada hasta la fábrica Comandante RRL.

La muestra de Saprolita de Moa fue ubicada sobre el piso de cemento de la Planta Piloto de Nicaro, fábrica RRL , en un área cercana al Secador Rotatorio, donde se alimentaba a una correa transportadora con la ayuda de un cargador. Las piedras, con tamaño de partículas superiores a 25 mm fueron trituradas previamente. De la correa, el mineral se descarga al Secador Rotatorio de 12 TM/día de capacidad. El secado se efectúa con los gases provenientes de una cámara de combustión anexa al Secador Rotatorio. El movimiento del mineral dentro del Secador Rotatorio era concurrente con el sentido del flujo de gases. El mineral secado se clasifica en una zaranda cuya abertura es de 5 mm. El cernido de la zaranda se envía directamente a la tolva de producto final, mientras que la fracción gruesa se tritura en un molino de martillos. El mineral triturado es enviado a la tolva de producto final. Los gases polvorientos de salida del Secador Rotatorio, producto del arrastre, pasan a través de un ciclón con el objetivo de capturar las partículas finas, las cuales eran enviadas hacia la tolva de producto final (ver Fig. 1.6)

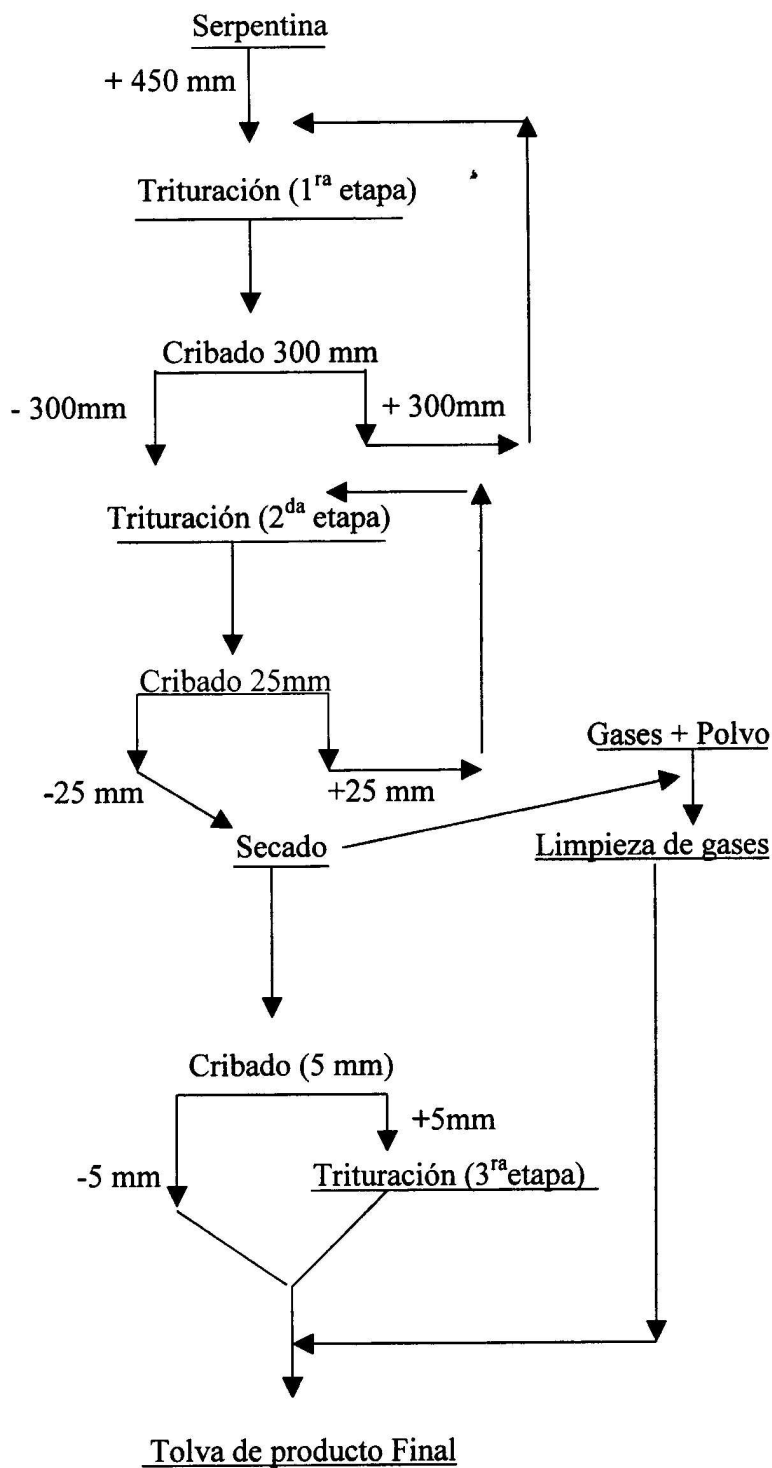


Fig. 1.6 Esquema de preparación mecánica utilizado para el procesamiento de las serpentinas.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2.

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y AERODINÁMICAS DE LA SERPENTINA

2.1. Metodología y equipos empleados

Un paso importante en el diseño de los sistemas de transporte neumáticos es determinar las propiedades físicas y aerodinámicas del mineral en las condiciones en que se realizará el transporte del mismo (humedad, densidad, granulometría, forma de las partículas y la velocidad de flotación).

Realizando este trabajo se utilizaron diferentes técnicas analíticas e instrumentales, así como los métodos de laboratorio, que se relacionan a continuación.

2.2. Métodos de investigación de las propiedades físicas y aerodinámicas de la serpentina.

Estos estudios se realizaron en los laboratorios de Beneficio de minerales, de Química, de Difracción de rayos-X de la facultad de Geología - Minería del ISMMM y la instalación construida por Las Camariocas en el ISMMM para la determinación de la velocidad de flotación ó la velocidad de sustento.

2.2.1. Densidad real del mineral serpentínico.

La densidad es una propiedad que influye en la velocidad de transporte de las partículas del material, por lo que al estudiar el comportamiento de los sistemas de transporte neumático del mineral serpentínico, es necesario investigar la densidad de este mineral.

Para determinar la misma existen varios métodos, dentro de ellos los más utilizados según la literatura son el método de Ergun y el Picnómetro. Para los experimentos realizados se utilizó el método de picnómetro por poseer todas las condiciones para su ejecución en el laboratorio de Química de la facultad de Metalurgia y Electromecánica del ISMM.

Materiales y reactivos utilizados en los experimentos:

- Picnómetros (2 unidades de 25 mililitros);
- Balanza analítica ("Sartorius");
- Agua destilada;
- Mortero;
- Tamiz (0,2 mm);

- Estufa;
- Micro pipeta;
- Embudo de crisol;
- Benceno;
- Gas oil;
- Bicromato de potasio;
- Ácido sulfúrico.

Técnica experimental empleada

1. El picnómetro se lava primero con una mezcla caliente de bicromato de potasio con ácido sulfúrico, después con agua y seguidamente con agua destilada, se seca y se pesa. Seguidamente el mismo se llena (hasta enrase) con líquido picnométrico seleccionado mediante una bureta y nuevamente se pesa, la temperatura del líquido picnométrico debe ser de 18 a 22 ° C. Se pesa nuevamente en una balanza de precisión con una exactitud de 0,01 g. Se obtiene el peso del picnómetro con el líquido (g_1).
2. La muestra, que se encuentra en un estado seco, se tritura en un mortero de porcelana y se cierne a través de una zaranda de agujeros con diámetro de 0,2 mm. Las partículas de diámetro superior a 0,2 mm se vuelven a triturar.
3. El picnómetro otra vez se seca. Del material cernido y homogenizado se toman unos 5 g y se colocan en una probeta de vidrio. Después, esta muestra se coloca en un termostato a la temperatura de 100-110 ° C hasta peso constante, se enfría y se traslada al picnómetro pesado de antemano. El picnómetro con el mineral se pesa en balanza de precisión con la exactitud de 0,01g. Del peso de picnómetro con el mineral se resta el peso del picnómetro (g_1) y se obtiene el peso de la muestra (g).
4. Para eliminar el aire de la muestra, al picnómetro se le hecha el líquido picnométrico puro en un 30-50% de su volumen y se pone a hervir durante 30 min, si en la muestra se han observado granos gruesos y durante una hora si los granos son finos.
5. Después de la ebullición, se enfría el picnómetro en un baño con agua destilada, se mide la temperatura del líquido, la cual debe ser igual que en el primer paso de 18-22 ° C. El nivel del líquido en el picnómetro se establece de un modo rígido por el límite superior del menisco, para lo cual se utiliza una micro pipeta con la que se añaden o sustraen gotas de líquido según se necesite. Después de esto el picnómetro se pesa en la balanza con

exactitud de hasta 0,01g y se obtiene el peso del picnómetro con el líquido picnométrico y la muestra, o sea (g_2). Utilizando los datos anteriores, determinamos el peso específico por la formula:

$$\gamma_e = \frac{g \cdot \rho_1}{(g_1 + g - g_2)} \tag{2.1}$$

Donde:

- g - masa de la muestra seca (g);
- g_1 - masa del picnómetro con el líquido picnométrico (g);
- g_2 - masa del picnómetro con el líquido picnométrico y la muestra (g).
- ρ_1 - densidad del líquido picnométrico (g/cm^3);
- γ_e - peso específico (g/cm^3).

La densidad de las partículas se define como la masa correspondiente a la unidad de volumen ocupado por una sola partícula simple. En ella no interviene la porosidad del material ni el diámetro de las partículas. En la tabla 2.1 están presentados los resultados del análisis picnométrico de las muestras analizadas.

Tabla 2.1. Resultados de la densidad real de las muestras.

No.pic nómet ro.	Peso vacío (g'),g	Peso con gas – oil (g_1),g	Peso con mineral (g''),g	Peso con gas - oil y mineral(g_2),g	Densidad real, g/cm^3	Densidad gas – oil, g/cm^3
1	16.4859	36.8492	21.3159	39.6923	2.0784	0.855
2	18.2761	38.3020	23.2637	41.5213	2.4116	0.855
1	16.4859	36.8492	21.5034	40.3952	2.9154	0.855
2	18.2761	38.3020	23.2719	41.9193	3.0986	0.855
1	16.4859	36.8492	21.4846	40.0130	2.3292	0.855
2	18.2761	38.3020	23.252	41.5560	2.4708	0.855
1	16.4859	36.8492	21.4839	40.0848	2.4247	0.855
2	18.2761	38.3020	23.2519	41.7554	2.7945	0.855
1	16.4859	36.8492	21.4837	40.0836	2.4232	0.855
2	18.2761	38.3020	23.2498	41.7811	2.8453	0.855
				promedio	2.5792	

Continuación de la tabla 2.1 Resultados de la densidad real de las muestras

No.pic nómet ro.	Peso vacío (g'),g	Peso con benceno (g ₁),g	Peso con mineral (g''),g	Peso con benceno y mineral(g ₂),g	Densidad real, g/cm ³	Densidad benceno, g/cm ³
1	16.4859	38.2925	21.5024	41.7065	2.7469	0.8775
2	18.2761	39.8603	23.2735	43.3156	2.8437	0.8775
1	16.4859	38.2925	21.4985	41.6935	2.7293	0.8775
2	18.2761	39.8603	23.2152	43.1844	2.6836	0.8775
1	16.4859	38.2925	21.4630	41.7908	2.9533	0.8775
2	18.2761	39.8603	23.2184	43.2774	2.8435	0.8775
1	16.4859	38.2925	21.4834	41.8928	3.1386	0.8775
2	18.2761	39.8603	23.2549	43.3598	2.9534	0.8775
1	16.4859	38.2925	21.4809	41.8427	3.0337	0.8775
2	18.2761	39.8603	23.2530	43.3591	2.9546	0.8775
				promedio	2.8881	
				promedio	2.7336	

En la tabla 2.2. se muestra un resumen del valor de la densidad para ambos líquidos picnométricos.

La densidad real promedio es de 2733,6 kg/m³.

Tabla 2.2. Densidad real del mineral serpentínico determinada por el método de Picnómetro.

Densidad real	
Con gas - oil	Con benceno
2579,2 kg/m ³	2888,1 kg/m ³
Densidad mineral (kg/m ³)	2733,6 kg/m ³

2.2.2. Determinación del contenido de humedad.

En el mineral se observan dos tipos de agua. La primera es el agua libre contenida en los poros y la adherida a la superficie y la segunda es el agua de constitución ó químicamente ligada. Para determinar la humedad libre se utiliza la diferencia entre el peso de la muestra húmeda y el peso de esa misma muestra después de secarla.

La humedad influye significativamente en la velocidad de transporte neumático del mineral serpentínico debido a que se puede producir la aglomeración de las partículas y la

sedimentación de las mismas durante el proceso de transporte. Es por eso que durante el estudio de este material es necesario determinar los valores de la humedad. Para el análisis fueron tomadas cinco réplicas y se realizaron los ensayos, aplicando la metodología de peso constante.

Materiales y reactivos empleados para la ejecución de los experimentos.

- ❖ Mineral de serpentina;
- ❖ Balanza analítica de precisión;
- ❖ Desecadora;
- ❖ Estufa;
- ❖ Pesa filtros con sus tapas;
- ❖ Taras;
- ❖ Beaker;
- ❖ Pipeta;
- ❖ Espátula.

Técnica experimental.

- Se toman las cinco muestras con 100 g de mineral cada una.
- Se pesan los pesa filtros con tapas.
- Se colocan las muestras húmedas en los pesafiltros y se pesan los pesafiltros con muestras tapadas.
- Se le quita la tapa al recipiente y se introduce en la estufa por un tiempo de 4 h a una temperatura de 105 - 110 °C.
- Una vez consumido el tiempo fijado se extraen los recipientes y se introducen en una desecadora hasta alcanzar la temperatura ambiente.
- Posteriormente se colocan las muestras tapadas sobre una balanza analítica y se toman los pesos a la temperatura ambiente, por la diferencia de peso se determina la humedad correspondiente.
- El secado y las pesadas se repiten hasta que el peso en dos pesadas sucesivas sea constante (se considera como tal cuando la diferencia no sobrepasa el 1%).

Para el cálculo de la humedad se utilizó la formula:

$$W = \frac{G_n - G_1}{G_1} \cdot 100 \quad (2.2.)$$

Donde:

G_n – Masa de la muestra con la humedad natural (g);

G_1 – Masa de la muestra seca (g);

W – Humedad del mineral (%).

Tabla 2.3. Determinación del contenido de humedad.

No. Muestra	Humedad, %
1	5.1
2	5.22
3	5.16
4	5.17
5	4.49
Promedio	5.028

La humedad de la muestra suministrada es de 5.028%.

2.2.3. Densidad aparente del mineral serpentínico.

La densidad es una propiedad que influye en la velocidad de transporte de las partículas del material, por lo que al estudiar el comportamiento de los sistemas de transporte neumático del mineral serpentínico, es necesario investigar la densidad aparente de este mineral. Para determinar la misma se utilizó el laboratorio de química de la facultad de Metalurgia y Electromecánica del ISMM.

Materiales y reactivos a utilizar para ejecución de los experimentos.

- Juego de tamices.
- Estufa.
- Embudo de crisol.
- Probeta graduada.
- Cubeta.

- Agua destilada.
- Balanza analítica de precisión 0,01 g.

Técnica experimental utilizada.

- Una muestra de mineral de 200 g se seca en la estufa a una temperatura de 100 °C hasta peso constante, y se tamiza tal que permita la clasificación de las partículas del mineral de acuerdo a su diámetro.
- Se lava la probeta con agua destilada, se seca en la estufa y se pesa obteniéndose la masa de la probeta (m). Cada muestra según su diámetro se traslada en una cubeta y se deposita en la probeta graduada, se trata de eliminar todo el aire de la muestra de manera que esta quede lo más compacta posible y al mismo nivel mediante golpecitos en una mesa y se mide el volumen ocupado por esta (Vn). Se hace este procedimiento para todas las muestras clasificadas: se toma la probeta con la muestra y se pesa obteniéndose la masa (m_n).
- Se determina la densidad aparente ρ (kg /m³) por la fórmula:

$$\rho = \frac{m_n - m}{V_n} \quad (2.3)$$

Donde :

n – es el numero de la muestra según cada caso.

La densidad aparente se define como la masa total correspondiente a la unidad de volumen ocupado por el material y varía con la distribución por tamaño de las partículas y con los cuerpos que la rodean. La porosidad del cuerpo sólido, así como la materia que llena sus poros o espacios vacíos intermedios, influyen también en el valor de la densidad aparente, para una simple partícula de un material no poroso la densidad real resulta igual a la densidad aparente.

La densidad aparente del mineral ó el peso específico es de 1334,6 kg/ m³.

2.2.4. Granulometría.

El cribado es un procedimiento de separación de los materiales por clases de grosor mediante el tamizado de los mismos, o de clasificación de minerales en las superficies de

las cribas. Los granos de mineral cuyo tamaño es superior a los orificios de la criba después de la separación quedan en la misma, mientras que los granos de menor tamaño caen por los orificios.

El proceso de tamizado consiste en hacer pasar la muestra del material a granel a través de un juego de tamices, de manera que se determinen porciones de dicho material según el tamaño de las partículas o pedazos del mismo. Una vez separadas estas porciones, se procede a pesarla y determinar el por ciento en peso de cada porción en relación con el peso total de la muestra, obteniendo de esta forma la granulometría del material analizado.

Cálculo de la cantidad de mineral para el cribado.

La cantidad de mineral que se necesita para el cribado se determina por la siguiente expresión:

$$Q_{min} = 0,02 \cdot d^2 + 0,5 \cdot d \quad (2.4.)$$

Donde:

d – diámetro máximo de la partícula (mm)

Q_{min} – cantidad mínima de mineral en cada muestra (Kg)

Tomando en consideración, que la granulometría del mineral transportado neumáticamente es inferior a 6 mm, es que se fijará este valor para determinar la cantidad de mineral necesario en cada muestra y para la elección del juego de tamices.

$$Q_{min} = 0,02 \cdot 6^2 + 0,5 \cdot 6$$

$$Q_{min} = 3.22 \text{ kg.}$$

Selección del juego de tamices.

Para seleccionar el juego de tamices se utiliza la escala de Tayler con módulo $\sqrt{2}$:

✓ 6,680 mm

✓ 4,700 mm

✓ 3,330 mm

✓ 2,360 mm

✓ 1,170 mm

✓ 0,246 mm

✓ 0,071 mm

Debido a que no se pudo encontrar esta serie de forma exacta se seleccionaron los tamices más próximos a cada uno de los valores anteriores de forma que no se altera la esencia del experimento.

Juego de tamices seleccionados:

➤ 6,300 mm

➤ 5,000 mm

➤ 3,150 mm

➤ 2,000 mm

➤ 1,000 mm

➤ 0,250 mm

➤ 0,071 mm

El cribado se puede utilizar tanto por vía seca como por vía húmeda en este caso se utilizó la vía húmeda buscando mayor precisión en los resultados obtenidos.

Procedimiento.

Preparación de la porción de ensayo.

1. Pese 100 g con una exactitud de 0,1 g de la muestra de ensayo y transfíralo cuantitativamente a un juego de mallas.
2. Lave la porción de ensayo con agua por espacio de 3 a 5 minutos, agitando ocasionalmente, hasta que no se aprecien más partículas a través de la última malla.
3. Auxiliándose de agua transfiera cuidadosamente a recipientes adecuados (cápsulas de porcelanas) las porciones retenidas en cada malla.
4. Seque por un periodo de 4 horas a temperaturas de 107°C y enfríe en desecadora.
5. Determine la masa de cada porción con una aproximación de 0,1 g.

Método para los cálculos.

La fineza expresada como por ciento retenido en cada malla, se calcula por la formula siguiente:

La *fineza* expresada como por ciento retenido en cada malla, se calcula por la formula siguiente:

$$\%Fineza = m \cdot 100/P \tag{2.5}$$

Donde:

m – masa de la porción de ensayo retenida en la malla;

P – masa de la porción de ensayo, expresada en gramos.

Los resultados del análisis granulométrico se demuestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Resultados de la granulometría.

Clases de tamaño, (mm)	Peso, g	Salida, %	Salida sumaria, %	
			por (+d)	por (-d)
(+6,3)	2.42	2.42	2.42	100
(- 6,3 + 5,0)	2.61	2.61	5.03	97.58
(-5,0+3,15)	5.86	5.86	10.89	94.97
(-3,15+2,0)	6.87	6.87	17.76	89.11
(-2,0+1,0)	11.54	11.54	29.30	82.24
(-1,0+0.25)	23.45	23.45	52.75	70.70
(-0.25+0.071)	20.21	20.21	72.96	47.25
(-0.071)	27.04	27.04	100	27.04
Total	100	100		

Utilizando la tabla 2.4 y 2.5 se plotean los gráficos 2.1 y 2.2 mostrando la característica de la salida sumaria y parcial del mineral serpentínico.

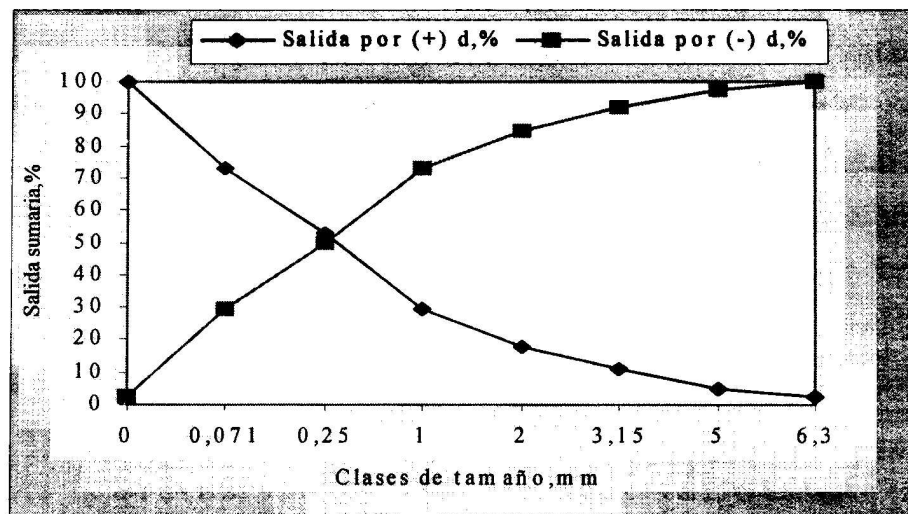


Gráfico 2.1. Característica de la salida sumaria del mineral Saprolita.

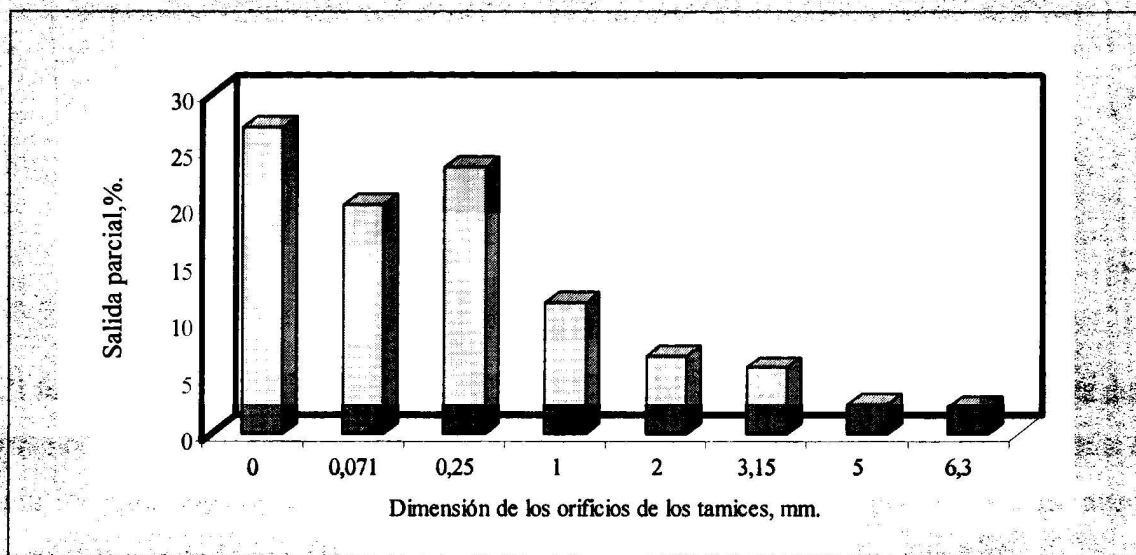


Gráfico 2. 2. Característica de la salida parcial de la Saprolita.

La característica sumaria “por más” (gráfico 2.1) es convexa y demuestra la predominación de las clases finas en el material. De la tabla 2.4. y gráfico 2.2 se puede ver que para las clases de tamaño de 0,25 mm hasta 0 mm la salida es de 47 % y 5 % presentan las partículas mayores de 5 mm.

2.2.5. Factor de forma de las partículas.

Para la descripción de la forma de las partículas del material serpentínico utilizamos el método experimental basado en el análisis microscópico del material. Para la observación se empleó el microscopio óptico binocular del laboratorio de difracción de rayos - X de la facultad de Geología – Minería del ISMMM. Las muestras analizadas son las mismas, que se tomaron para el análisis de granulometría. Para poder describir la forma de la partícula se determinaron las dimensiones de cada grano de 20 partículas de distintas fracciones (6,3 mm; 5 mm; 3.15 mm; 2 mm; 1 mm) (ver tablas 1-5; Anexo 1). Las dimensiones tomadas son el largo (Λ), el ancho (B) y el espesor (T) de cada grano.

A partir de las dimensiones obtenidas se procede a calcular el diámetro equivalente y factor de forma Corey (o también se llama el índice de aplastamiento) de la partícula por las fórmulas siguientes:

$$d_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \cdot \Lambda \cdot B \cdot T} \quad (2.6)$$

$$I_A = \frac{T}{\sqrt{\Lambda \cdot B}} \quad (2.7)$$

El factor de forma Corey describe el aplanamiento de los granos. A pequeños valores del I_A (menor de 0,8) las partículas presentan forma aplanada en forma de elipsoide, mientras que con los altos valores de dicho índice las partículas alcanzan la forma esférica. En nuestro caso el factor de forma promedio es de 0,4015, como se deduce de la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Factor de forma del material

<i>No. de mallas</i>	<i>Mallas (mm)</i>	<i>Diámetro equivalente (d_{eq})</i>	<i>Factor de forma Corey (I_A)</i>	<i>Forma de la partícula</i>
1	6.3	7.403	0.313	Elipsoide
2	5.0	6.42	0.418	Elipsoide
3	3.15	4.672	0.571	Elipsoide
4	2.0	2.971	0.448	Elipsoide
5	1.0	1.875	0.460	Elipsoide
6	0.25	0.514	0.277	Elipsoide
7	0.071	0.140	0.324	Elipsoide

En el rango de dimensiones de las mallas de 3,15 mm hasta 1 mm las partículas tienen el mayor índice de aplastamiento, pero como se ve de la tabla 2.5. ninguna tiene la forma esférica, el material es más bien homogéneo debido a su forma y tiende a tener un comportamiento similar. El cambio en las dimensiones se presenta más en las granulometrías mayores de 5 mm, sin embargo en las granulometrías menores de 5 mm se observa más la uniformidad de los granos entre sí.

El comportamiento entre el factor de forma y clases de tamaño se observa en el gráfico 2.3 y se ve una dependencia irregular. Sin embargo, analizando la curva del gráfico 2.4, que representa el diámetro equivalente en función a clases de tamaño se muestra, que con el aumento de fracciones de tamaño crece el diámetro equivalente.

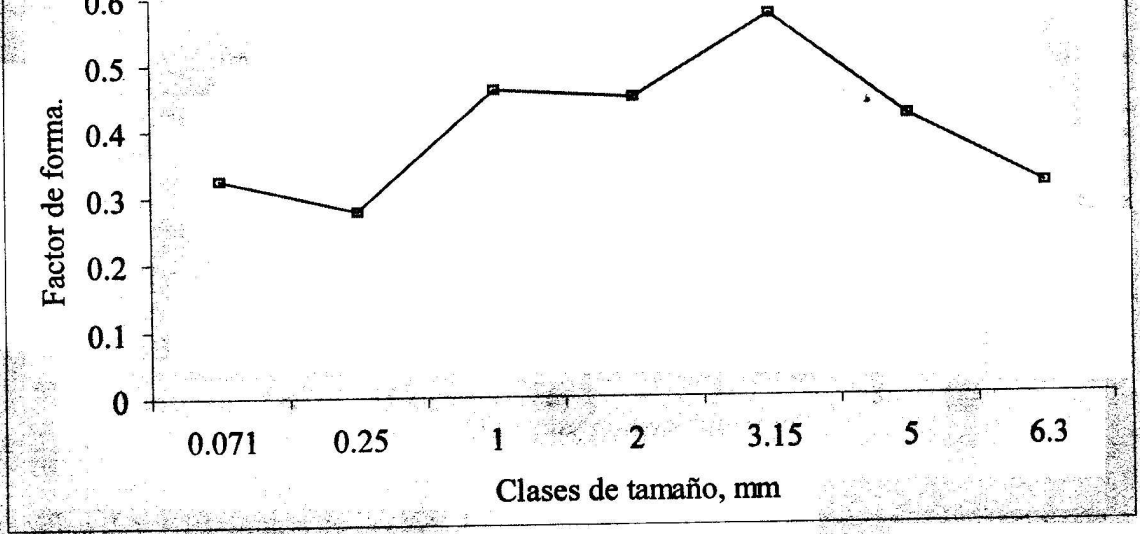


Gráfico 2.3 Relación entre el factor de forma y clases de tamaño.

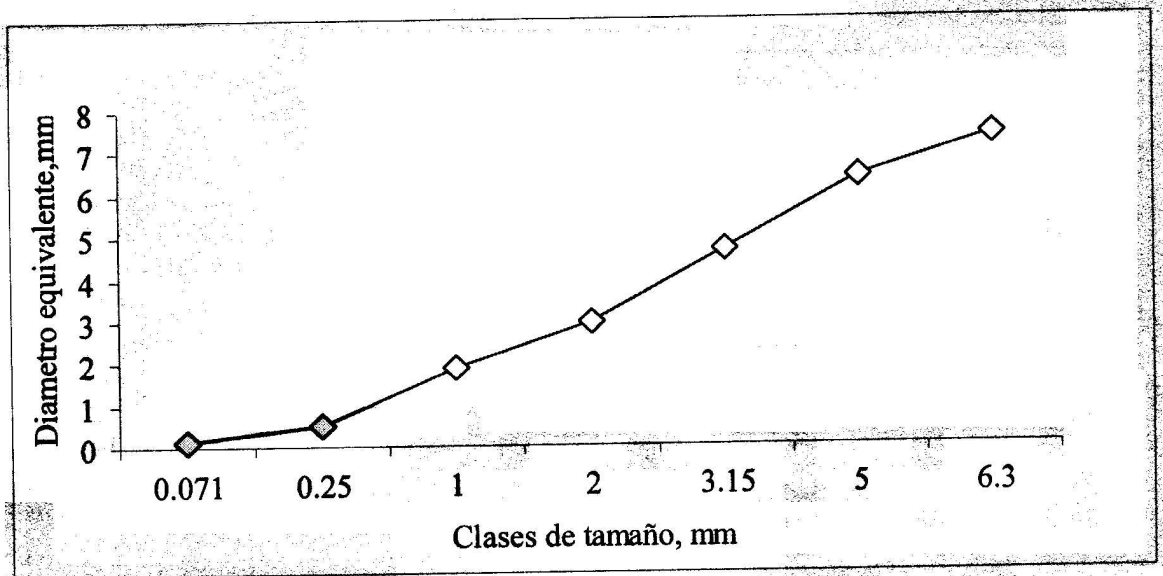


Gráfico 2. 4. Relación entre el diámetro equivalente y clases de tamaño.

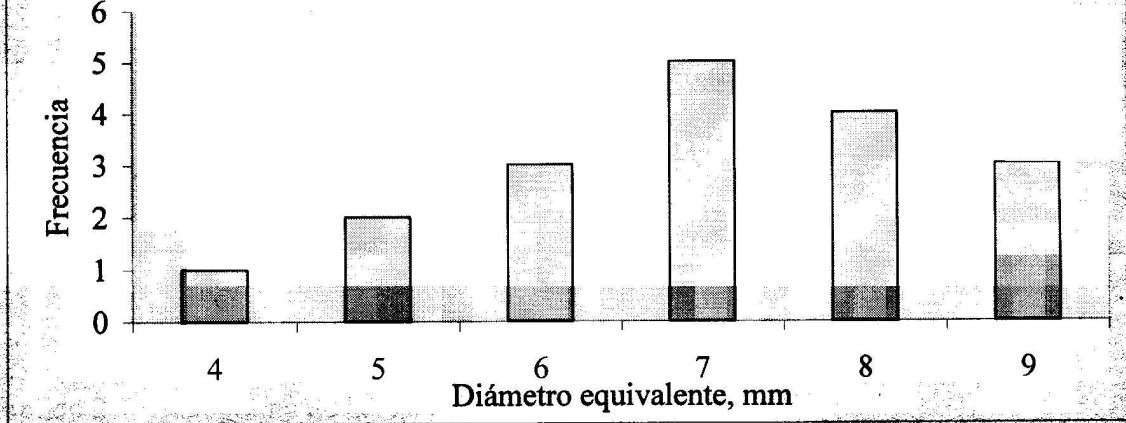


Gráfico 2.5. Histograma de la clase + 6.3 mm.

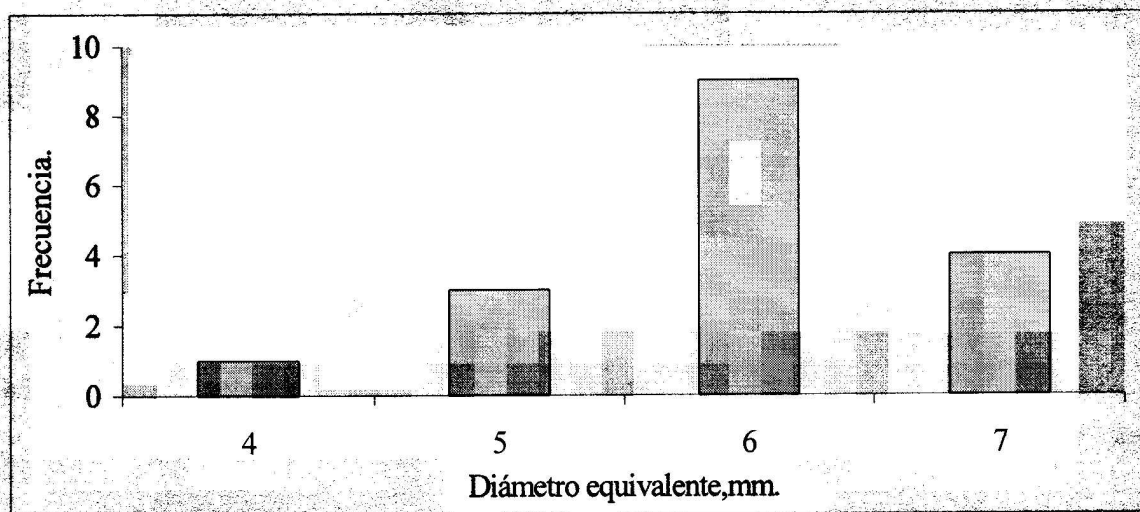


Gráfico 2.6. Histograma de la clase - 6.3 + 5 mm.

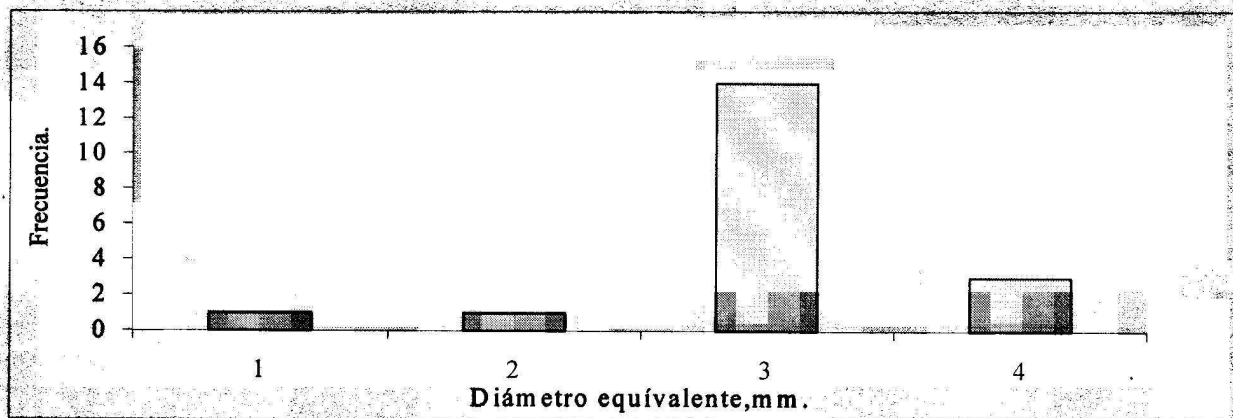


Gráfico 2.7. Histograma de la clase - 5 +3.15 mm.

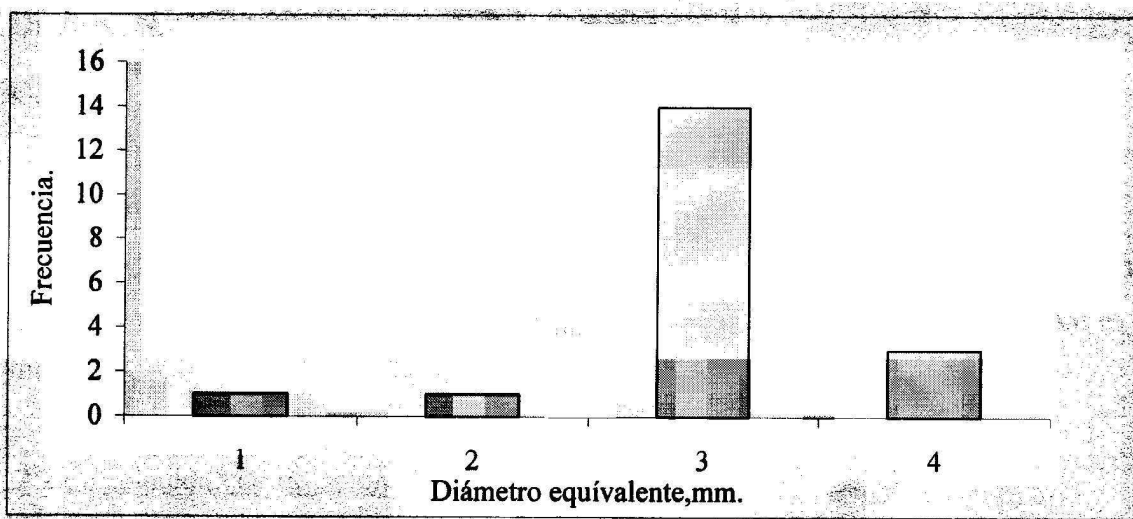


Gráfico 2.8. Histograma de la clase -3.15 +2.0 mm.

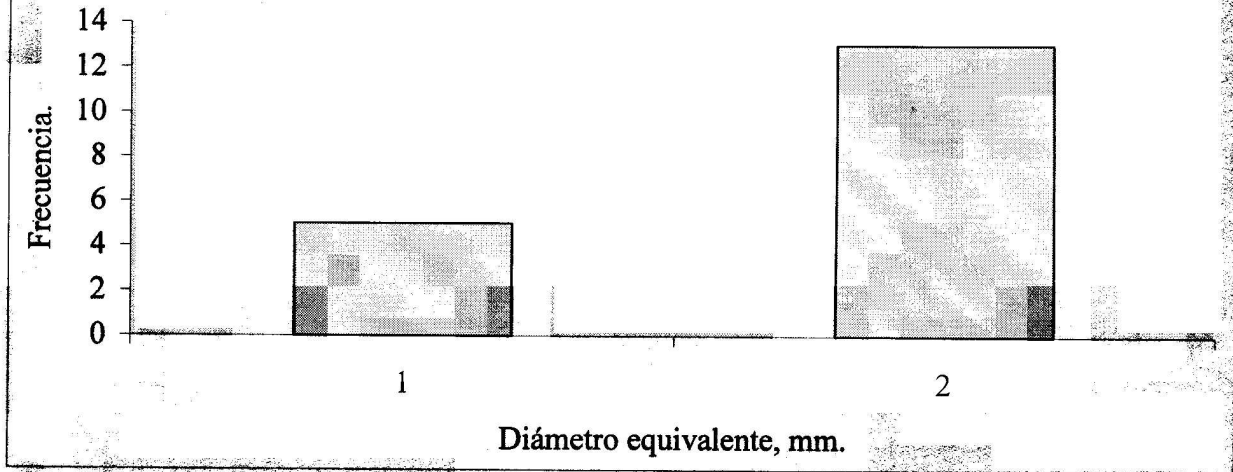


Gráfico 2.9. Histograma de la clase $-2.0 + 1.0$ mm.

Como se puede observar de los gráficos 2.5 – 2.9 en la granulometría de $+ 6,3$ mm aparecen con más frecuencia los granos con diámetro equivalente de 7 mm; en la granulometría $- 6,3 + 5$ mm prevalecen las partículas de 6 mm; la granulometría de $- 5 + 3,15$ mm esta representada por los granos de 4 y 5 mm; los granos de 3 mm tienen mayor frecuencia en la clase $- 3,15 + 2$; y el diámetro equivalente de la clase $- 2 + 1$ mm es de 2 mm.

2.2.6. Velocidad de flotación

La característica aerodinámica más importante de las partículas en las teorías modernas sobre el transporte neumático es la velocidad de flotación. De acuerdo con la literatura revisada se desprende que para una partícula caracterizada por su diámetro d y su velocidad de flotación (V_f), existe una cierta velocidad del gas, por debajo de la cual el transporte neumático es imposible. El significado de la velocidad mínima es grande puesto que brinda la posibilidad de seleccionar la velocidad óptima de transporte.

Para la determinación de este parámetro se construyó por la Empresa “Las Camariocas” una instalación experimental en áreas del Instituto Minero Metalúrgico de Moa, los detalles de la misma se encuentran en la figura 2.1.y en la foto 1 del anexo 4.

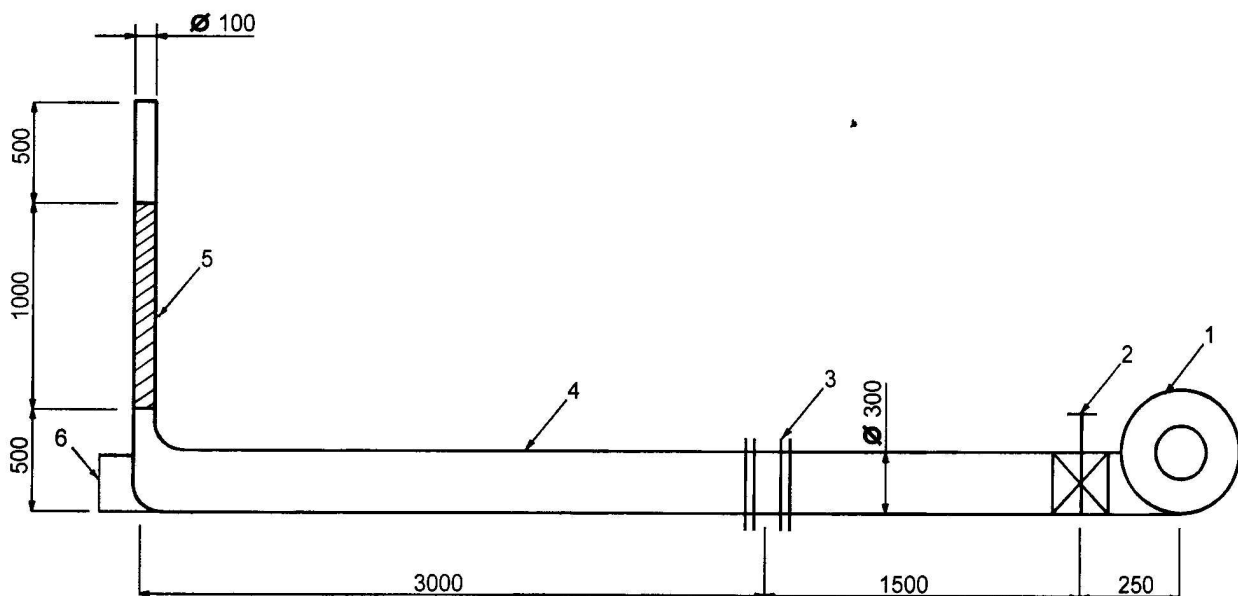


Fig. 2.1. Instalación experimental, donde se determinó la velocidad de flotación para distintas fracciones del mineral.

Las partes componentes de esta instalación son:

1. Ventilador tipo LRMNE -315/4-W-4-18.
2. Válvula de mariposa para la regulación de flujo.
3. Cámara con platillo orificio para la conexión del flujómetro.
4. Tubería horizontal.
5. Visor transparente de la velocidad de flotación.
6. Cámara con gaveta para la recolección del producto.

El material se clasificó por vía húmeda utilizando un juego de tamices según la escala incompleta de Tayler con módulo $\sqrt{2}$, en esta selección se tomó como punto de partida el diámetro máximo de las partículas que se desean analizar (6,3 mm). Las próximas mallas seleccionadas fueron: 5 mm; 3,15 mm; 2 mm; 1 mm.

Para determinar la velocidad de flotación de las partículas primeramente se pone en marcha el ventilador (ver foto 2; Anexo 2) y se establece un flujo mínimo estacionario del aire a través del conducto, este valor se controla mediante el flujómetro conectado en la entrada y se regula por medio de la válvula de mariposa instalada. El incremento de la velocidad del

aire fue de 0,2 m/seg comenzando a una velocidad mínima de 1 m/seg para cada experimento realizado, el tiempo de espera entre incrementos fue de 1 minuto para cada caso. Se tomaron las cinco muestras de 50 gramos para cada una de las clases de tamaño. Se observó el momento en que las partículas se mantuvieron flotando dentro del tubo y se tomó la lectura del flujo de aire Q (m³/h) por el flujómetro instalado con este fin. La velocidad del gas se calcula por la fórmula:

$$V_g = \frac{4 \cdot Q}{\pi D^2} \tag{2.8}$$

Donde:
 D – diámetro interior de la tubería, mm.
 Q – flujo de aire, m³/h.

El largo del tubo vertical utilizado $L = 1000$ mm, lo cual equilibra la velocidad del gas a régimen turbulento. Los valores de los parámetros medidos se exponen en la tabla 2.6.
 Tabla 2.6. Resultados de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas.

d_{eq} (mm)	V_g (prom)	Q (m ³ /h)
1,87	9,7449	176,25
2,97	11,1918	202,42
4,67	12,1399	220,61
6,42	12,3640	223,62
7,4	13,9790	252,83

En el gráfico 2.10 se expone el comportamiento de la velocidad de flotación en función del diámetro equivalente. En el se puede observar que la relación entre el diámetro de las partículas y la velocidad de flotación es directamente proporcional, quiere decir que con el aumento del tamaño de las partículas aumenta la velocidad de flotación.

El máximo tamaño de la partícula del mineral investigado es de 7,4 mm y para poder flotar esta partícula hace falta aplicar un flujo de 252,83 m³ / h, que corresponde a una velocidad de 13,98 m/ s.

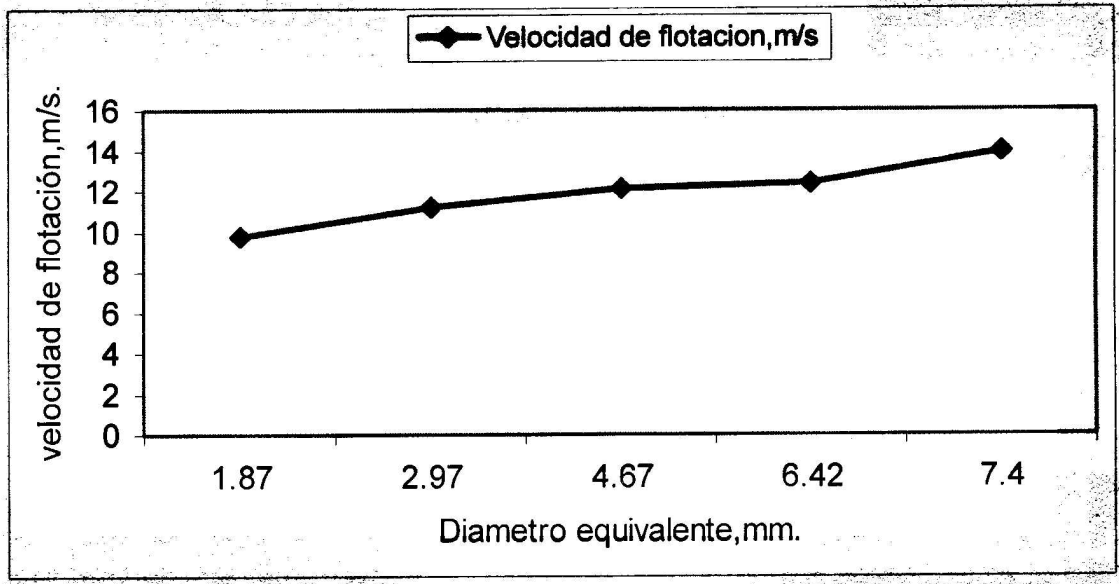


Grafico 2.10. Velocidad de flotación en función del diámetro equivalente

Las propiedades físicas y aerodinámicas encontradas se emplearán en el proceso de modelación del transporte neumático de la serpentina a 7,4 mm. Se observa que este es un material polidisperso con predominación de la clase fina inferior a 1 mm, la forma es elipsoide con un índice de aplastamiento de 0,4015, el peso específico de 1334,6 kg/m³ y velocidad de flotación máxima de 13,98 m/s.

CAPÍTULO 3

MODELACIÓN EMPÍRICA TEÓRICA PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN EL TRANSPORTE NEUMÁTICO DEL MINERAL SERPENTÍNICO EN TUBERÍAS HORIZONTALES Y VERTICALES.

3.1. Una aproximación empírica para calcular la caída de presión en el transporte neumático

La caída de presión de un flujo de gas puro en un tubo de longitud dl se calcula por todos los autores por la ecuación de Darcy.

$$dp = \frac{1}{D} \cdot \lambda_G \cdot \frac{\rho_G}{2} \cdot V^2 \cdot dl \quad (3.1)$$

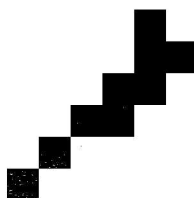
Donde:

D – Diámetro del tubo [m].

ρ_G - Densidad del gas [kg/m³].

V – Velocidad del gas [m/s].

λ_G - Coeficiente de fricción del gas.



Aunque el coeficiente de fricción del gas λ_G se encuentra próximo a 0.02, un cálculo más exacto se logra utilizando la ecuación

$$\lambda_G = 0.3164 \cdot R_e^{-\frac{1}{4}} \quad (3.2)$$

Para los números de Reynolds entre $2320 < Re < 10^5$ para flujo completamente turbulento su valor se define por:

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (3.3)$$

Donde:

ν - Es la viscosidad cinemática del gas [m²/s].

Para el calculo de la caída de presión en el transporte neumático la siguiente versión modificada de la ecuación 3.1 siempre se puede encontrar en la literatura:

$$d_p = \frac{1}{D} \cdot (\lambda_G + \mu \cdot \lambda_s) \cdot \frac{\rho_G}{2} \cdot V^2 \cdot dl \quad (3.4)$$

Para el cálculo del coeficiente de fricción del sólido en tuberías horizontales y verticales se utiliza el modelo matemático desarrollado por Stegmaier (1978), este tiene la forma general siguiente:

$$\lambda_s = K1 \cdot \mu^{-K2} \cdot F_r^{-1} \cdot F_{rs}^{0.25} \cdot \left(\frac{D}{d_s} \right)^{0.1} \quad (3.5)$$

La ecuación (3.4) contiene solo a μ como un número característico del mecanismo de similitud de la mezcla. Todos los otros factores importantes, tales como tamaño de las partículas, densidad del sólido, etc, están contenidos en el coeficiente de pérdida de presión adicional de las partículas sólidas, λ_s , las cuales se determinan separadamente para cada material. La ecuación (3.5) es un valor del coeficiente de fricción promedio para la mayoría de los sólidos, pero no precisamente para la serpentina. ¿ Cómo puede ser estimado el coeficiente de perdidas de presión λ_s ? Stegmaier (1978) ha resumido por correlación diversas ecuaciones para el transporte de sólidos granulares finos los cuales contienen algunos números característicos de similitud. La misma idea ha sido usada por Weber (1982). A fin de expresar esos modelos, primero se introducen dos números adimensionales, números de Froude relacionado al tubo y al sólido:

$$F_r = \frac{V^2}{D \cdot g} \quad (3.6)$$

y

$$Fr_s = \frac{V_{so}^2}{d_s \cdot g} \quad (3.7)$$

Donde:

g – Aceleración debido a la gravedad.

V_{flo} – Velocidad de flotación de la partícula.

d_s – Diámetro de la partícula.

F_r y F_{rs} – Números de Froude relacionado al tubo y al sólido, respectivamente.

Sustituyendo las ecuaciones 3.5; 3.6 y 3.7 en 3.4 se obtiene:

$$\frac{dp}{dl} = \frac{1}{D} \cdot \left[0,3164 \left(\frac{V_s \cdot D}{\nu} \right)^{-\frac{1}{4}} + \mu^{-K_2} \cdot K_1 \cdot \left(\frac{V_s^2}{D \cdot g} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{V_s^2}{d_s \cdot g} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{D}{d_s} \right)^{0,1} \right] \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot V_s^2 \quad (3.8)$$

La ecuación 3.8 constituye el modelo general para el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías horizontales y verticales. En ella es necesario identificar los coeficientes K_1 y K_2 para el mineral serpentínico, esta se realiza en una instalación experimental construida por la Empresa Las Camariocas en áreas del ISMMM.

3.2. Instalación experimental.

La instalación experimental mostrada en la figura (1) del Anexo (3) y la foto (3) del Anexo (2) consta de los siguientes equipos y accesorios:

- Compresores;
- Tanque de almacenamiento del aire;
- Sistema regulador de flujo;
- Cámara de alimentación del mineral;
- Sistema de transporte que incluye tramos horizontales, verticales y accesorios;
- Instrumentación y control de los parámetros.

Compresores.

Para el suministro del aire se emplearon dos compresores de pistón de dos etapas del tipo KLM 10 -100/32 conectados en paralelo; los que permiten abastecer la cantidad del aire necesario para las corridas con una presión máxima regulada de 1MPa y flujo nominal de 200 m³/h cada uno (ver foto 4 del anexo 2).

Tanque de almacenamiento del aire.

La descarga de los compresores está conectada a un depósito de almacenamiento de $3,3 \text{ m}^3$ de volumen con el objetivo de garantizar el flujo uniforme en la tubería de transporte, disminuir al mínimo las variaciones de presión y por lo tanto evitar los posibles errores en las mediciones.

Sistema de regulación del flujo.

La regulación del flujo a la cámara de alimentación y tubería de transporte se lleva a cabo mediante una válvula a la entrada del sistema. La cantidad de aire suministrado se registra a través de un transmisor diferencial SITRANS P de la firma SIEMENS conectado a un platillo orificio calculado y calibrado, el que permite ajustar la velocidad del gas en la tubería de transporte.

Cámara de alimentación del mineral.

El aire proveniente del tanque de almacenamiento pasa por el sistema regulador de flujo y se introduce en la cámara de alimentación en dos niveles: uno superior que es el aire de dosificación y otro inferior llamado el aire de transporte. Está equipada con la instrumentación necesaria para ajustar los parámetros en la línea de transporte y una válvula de entrada para la carga del material. Tiene un volumen de $0,9 \text{ m}^3$.

Tubería de transporte.

El mineral serpentínico alcanzando la fluidez necesaria en la cámara de alimentación es arrastrado por un flujo de aire a través de una tubería de 100 mm de diámetro interior. El sistema presenta tramos horizontales, verticales y accesorios. En cada uno de los puntos de medición se colocaron transmisores de presión puntual con una señal de salida de 4 – 20 mA (ver foto 5 del anexo 2). Para medir la caída de presión las señales de corriente se enviaron a un registrador multipunto PIEZOGRAPH 2 con 32 canales de entradas (esta señalado en la foto 6; anexo2) El equipo está dotado de un conjunto de funciones y valores

que permite ajustar de forma segura y simple todos los parámetros de servicio. Este informa mediante lista de selección el conjunto de funciones de cada entrada, lo que permiten obtener los valores de la presión diferencial entre los diferentes puntos seleccionados.

3.3. Diseño de experimento.

Selección de las variables.

Según el modelo matemático teórico desarrollado las pérdidas de presión en tuberías horizontales y verticales para el neumotransporte de la serpentina a 7,4 mm dependen de los siguientes factores:

- ❖ Velocidad de la corriente;
- ❖ Diámetro de las partículas transportadas;
- ❖ Concentración de la mezcla;
- ❖ Posición geométrica de la línea de transporte.

Velocidad de la corriente.

El material transportado se moverá en un flujo continuo a través del conducto si se garantiza una velocidad del aire superior a 14 m/s para los máximos diámetros de partículas presentes en las muestras. La velocidad no deberá ser superior al mínimo permisible de manera que no se produzca un excesivo consumo de energía. Por otro lado, no deberá estar por debajo de un valor límite cercano a la velocidad crítica, ya que cualquier cambio en las condiciones de operación puede dar lugar a que las partículas de material obstruyan la tubería y se produzcan los llamados embotellamientos. Como referencia para la selección correcta de la velocidad del aire se toma la velocidad de flotación de las partículas en un flujo de aire vertical.

Lo que ayuda a mantener la velocidad estable durante la transportación es la presión inicial en la línea de suministro del aire. En los sistemas de transporte neumático es necesario controlar la presión del aire debido al incremento de las pérdidas de presión con la variación de otros parámetros tales como: la concentración y la velocidad del gas. Esta tiene gran influencia en la demanda de potencia del alimentador de aire y de energía específica del sistema. La variación de la presión se debe fundamentalmente a la

fluctuación del flujo de aire en el sistema; si la demanda aumenta por encima de la capacidad de los compresores, la presión tiende a disminuir y viceversa; si disminuye la demanda, aumenta la presión. Para garantizar que se mantenga constante en la entrada, o que varíe solo dentro de un determinado intervalo, se emplean los sistemas de regulación. En los diferentes experimentos se aplicó la regulación mediante descarga del aire en exceso a la atmósfera y la regulación por paradas temporales.

Para establecer los niveles de la misma se toman en cuenta los resultados experimentales obtenidos en la instalación para determinación de la velocidad de flotación y se escogieron 6 niveles: 7; 8; 9; 10; 11 y 12 m/s.

Diámetro de las partículas.

Las corridas en la instalación experimental se realiza con la mezcla del mineral serpentínico y el diámetro máximo de las partículas se toma igual a 7,4 mm, determinado en el Capítulo 2.

Concentración del mineral.

La concentración del mineral expresa la cantidad de material transportado por unidad de volumen de aire y se determina de forma indirecta. Para cada experimento se establece la concentración mediante la cantidad de material transportado por unidad de tiempo y el caudal del gas transportador. En esta variable no se fijaron niveles iniciales, sus resultados se obtuvieron a partir de la variación de los restantes factores involucrados en el proceso (velocidad de la corriente, diámetro de partículas, presión del gas y posición geométrica de las tuberías).

Posición geométrica de la línea de transporte.

En esta variable se escogieron dos niveles: las posiciones horizontales y verticales que coinciden con las longitudes rectas de los sistemas de transporte neumático de la Empresa Las Camariocas.

Número de corridas experimentales.

Para determinar el número de corridas experimentales se aplica un diseño factorial con dos factores $\underline{a} \times \underline{b}$, que va a tener 12 experimentos y con tres réplicas para cada experimento en total se obtiene 36 experimentos. Aquí $\underline{a}$ es la velocidad del gas con 6 niveles y $\underline{b}$ es la posición geométrica de la línea de transporte con 2 niveles.

3.4. Técnica experimental

Para poner a punto la instalación se calibran los instrumentos de medición y se hacen experimentos con aire limpio para diez valores de velocidad, comparando los resultados experimentales con los obtenidos a partir de la ecuación de Darcy. Los resultados promedios para las cinco réplicas aparecen en la tabla 3.1 y muestran correspondencia con los valores de las pérdidas de presión calculados por la ecuación (3.1).

Tabla 3.1. Cálculo de las pérdidas de presión con aire limpio para una longitud de 14 metros de tubería.

Velocidad V_g (m/s)	Reynolds Re	Coef. de fricc. λ	dp (teórico) (Pa)	dp (exp) (Pa)	Error (%)
5	31466	0,024	49	51	2,96
6	37759	0,023	68	69	1,32
7	44052	0,022	89	92	3,07
8	50346	0,021	113	117	3,72
9	56639	0,0205	138	141	1,82
10	62932	0,02	166	172	3,22
11	69226	0,0195	197	200	1,66
12	75519	0,019	229	234	2,13
13	81812	0,0187	263	269	2,06
14	88106	0,0184	300	305	1,66

Mediante el sistema de regulación de flujo para fijar los niveles de velocidad se le suministra el aire a la cámara de alimentación y luego de forma estable a la tubería de transporte. Se establece el régimen de flujo deseado y se efectúan las mediciones de pérdidas de presión en los puntos seleccionados para los tramos horizontales y verticales (ver tabla 3.2) La cantidad de material transportado se determina por medio de pesadas con una balanza cuyo error en la escala era de 0,005 kg. El tiempo de duración de cada experimento se registra con un cronómetro y su precisión es de 0,1 segundo. Conocida la cantidad de material transportado y el flujo de aire por unidad de tiempo, se determina la

concentración de la mezcla. El movimiento de la mezcla bifásica se observa a través de un tubo transparente colocado en ambas líneas.

Tabla 3.2. Resultados de las corridas experimentales de la determinación de las pérdidas de presión en las tuberías horizontales y verticales.

Parámetros						Tramo Vertical	Tramo Horizontal
Experi mentos	Mg kg/s	Mg m ³ /h	Po kPa	Ms kg/s	μ kg/kg	$(dp/dx)_{exp}$ Pa/m	$(dp/dx)_{exp}$ Pa/m
1	0,06544444	190	450	3,196	48,83	666,0412	603,0505
2	0,06785556	197	450	3,155	46,50	634,2600	574,2750
3	0,07026667	204	450	3,106	44,20	602,8880	545,8700
4	0,07474444	217	425	3,073	41,11	560,7404	507,7085
5	0,07681111	223	425	3,245	42,25	576,2900	521,7875
6	0,08128889	236	425	3,225	39,67	541,0988	489,9245
7	0,08404444	244	400	3,068	36,50	497,8600	450,7750
8	0,08301111	241	400	2,924	35,22	480,4008	434,9670
9	0,08507778	247	400	3,222	37,87	516,5468	467,6945
10	0,08852222	257	375	3,171	35,82	488,5848	442,3770
11	0,08645556	251	375	3,219	37,23	507,8172	459,7905
12	0,09058889	263	375	3,097	34,19	466,3516	422,2465
13	0,09334444	271	350	2,952	31,62	431,2968	390,5070
14	0,09541111	277	350	2,882	30,21	412,0644	373,0935
15	0,09988889	290	350	3,343	33,47	456,5308	413,3545
16	0,10092222	293	325	3,183	31,54	430,2056	389,5190
17	0,10195556	296	325	3,433	33,67	459,2588	415,8245
18	0,10264444	298	325	3,516	34,25	467,1700	422,9875
19	0,10505556	305	300	3,020	28,75	392,1500	355,0625
20	0,10367778	301	300	3,097	29,87	407,4268	368,8945
21	0,10333333	300	300	2,220	21,48	292,9872	265,2780
22	0,10746667	312	275	2,422	22,54	307,4456	278,3690
23	0,10781111	313	275	2,508	23,26	317,2664	287,2610
24	0,10918889	317	275	2,342	21,45	292,5780	264,9075

Continuación de la tabla 3.2.

Parámetros						Tramo Vertical	Tramo Horizontal
Experi- mentos	Mg kg/s	Mg m3/h	Po kPa	Ms kg/s	μ kg/kg	(dp/dx) _{exp} Pa/m	(dp/dx) _{exp} (Pa/m)
25	0,11056667	321	250	2,073	18,75	255,7500	231,5625
26	0,10987778	319	250	1,992	18,13	247,2932	223,9055
27	0,11160000	324	250	2,396	21,47	292,8508	265,1545
28	0,11332222	329	225	2,225	19,63	267,7532	242,4305
29	0,11401111	331	225	1,910	16,75	228,4700	206,8625
30	0,11504444	334	225	2,068	17,98	245,2472	222,0530
31	0,11745556	341	200	2,342	19,94	271,9816	246,2590
32	0,11642222	338	200	3,053	26,22	357,6408	323,8170
33	0,11573333	336	200	2,702	23,35	318,4940	288,3725
34	0,10367778	301	310	2,829	27,29	372,2356	337,0315
35	0,10161111	295	310	1,911	18,81	256,5684	232,3035
36	0,10436667	303	310	2,704	25,91	353,4124	319,9885

Leyenda

M_g - Flujo másico de gas

M_s - Flujo másico de sólido

P_o - Presión inicial del gas

μ - Concentración de la mezcla

(dp/dx)_{exp} – Pérdida de presión por unidad de longitud de la tubería.

El procesamiento estadístico de la variable de salida, que es: el gradiente de presión en la línea se efectuó mediante la determinación de los errores admisibles de los valores de la variable estudiada. Los parámetros de calculo del análisis estadístico son:

Media aritmética:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.9)$$

Donde:

x_i - elementos de la serie.

n - número de pruebas.

Desviación media:

$$\Delta\bar{X} = \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{n} \quad (3.10)$$

La varianza muestral:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (3.11)$$

La raíz cuadrada de la varianza muestral se denomina error estándar. El error estándar de la media aritmética es:

$$\delta = \frac{t_d \cdot S_x}{\sqrt{n}} \quad (3.12)$$

El procesamiento estadístico de los resultados se ejecutó empleando el criterio de Student para una probabilidad $t_{0,95}$ comparando el t observado con t_d de la tabla:

$$t = \frac{|X_i - \bar{X}|}{S_x} \quad (3.13)$$

En todos los casos se confirmó que $t < t_d$ por lo que la dispersión entre los resultados obtenidos no es significativa, encontrándose el error estándar de la media aritmética por debajo del 5%. La confirmación de la validez de los resultados experimentales con el modelo teórico se desarrolla a través del error relativo, o sea, la diferencia entre el valor experimental dp/dl_{exp} de la caída de presión y el valor teórico dp/dl_{teo} obtenido por el modelo para las mismas condiciones del experimento.

El error relativo puntual se calcula por la siguiente expresión:

$$E_p = \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot 100 \quad (3.14)$$

El error relativo promedio se expresa por:

$$E = \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot \frac{100}{n} \quad (3.15)$$

En la bibliografía (Lesme, 1996) se hace un examen de los errores, especificando que para los cálculos de Ingeniería una desviación de 20-25% es aceptable. En nuestro caso el error relativo promedio no sobrepasa el 7% (ver tabla 3.5 y 3.6).

3.5. Identificación del modelo matemático

La identificación del modelo consiste en la adecuación del modelo a la instalación construida. Para esto se aplica el algoritmo de identificación que minimiza la diferencia entre los resultados teóricos y experimentales y se apoya en el Softword Mathcad Plus2000.

3.5.1. Algoritmo de identificación del modelo.

El objetivo de validación del modelo matemático que describe el proceso consiste en la determinación del parámetro de los coeficientes K1 y K2 de la ecuación 3.8, que caracteriza el mineral serpentínico. Para esto se comparan los valores de las pérdidas de presión obtenidos en la instalación $\left(\frac{dp}{dl}\right)_{\text{exp}}$ con los resultados teóricos $\left(\frac{dp}{dl}\right)_{\text{teor}}$ calculados por la formula (3.8). Minimizando el error relativo puntual entre $\Delta P_{\text{teorico}}$ y ΔP_{exp} el algoritmo selecciona los coeficientes adecuados para el mejor juego de parámetros.

$$\left[\left(\frac{dp}{dl}\right)_{\text{exp}} - \left(\frac{dp}{dl}\right)_{\text{teor}} \right] \rightarrow \min \quad (3.16)$$

El algoritmo de identificación se presenta de la forma siguiente:

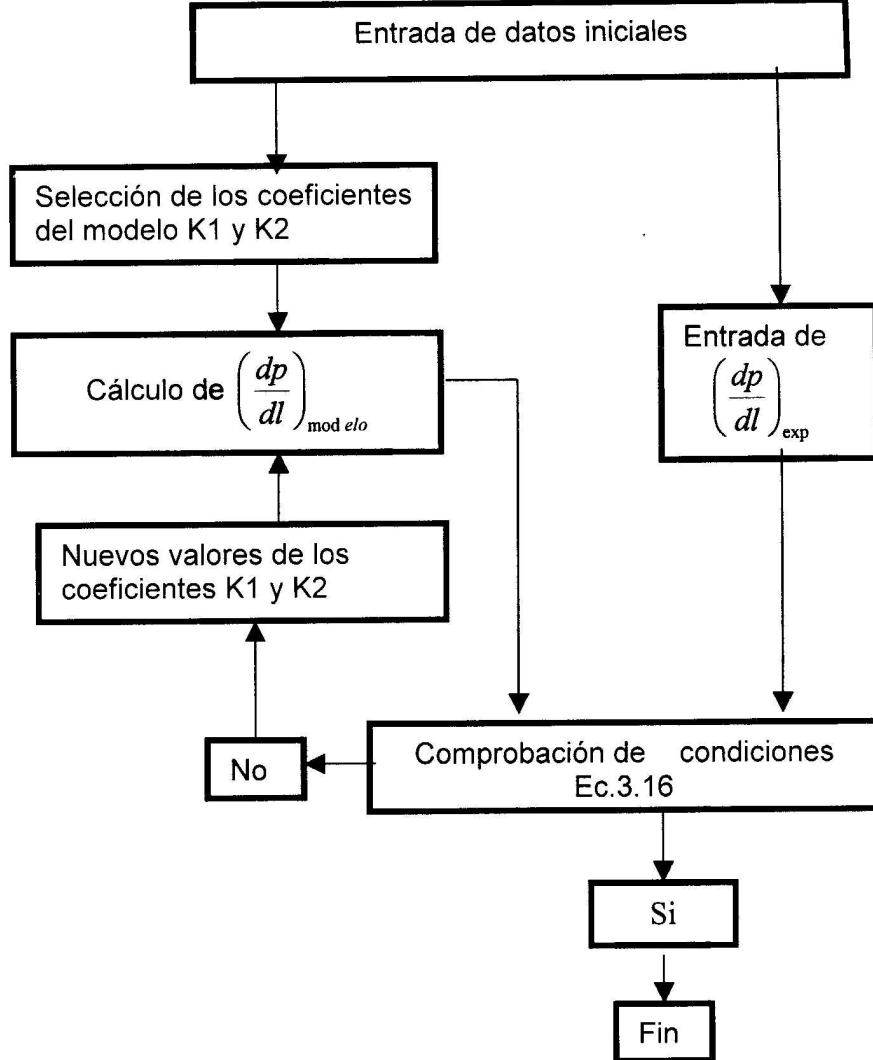


Fig. 3.1 El algoritmo de identificación del modelo y del prototipo.

En este caso como datos iniciales (ver tabla 3.2) se toman el flujo másico de gas (M_g) y la concentración de la mezcla (μ). Se introducen los datos experimentales obtenidos del gradiente de presión. Los valores obtenidos mediante del algoritmo de identificación de los coeficientes del modelo K1 y K2 se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados de los coeficientes del modelo empírico teórico para determinación del gradiente de presión en los tramos horizontales y verticales.

Tuberías horizontales.			Tuberías verticales.		
K1	K2	E(%)	K1	K2	E(%)
0,231	0,01	6,30	0,256	0,01	6,29

El modelo teórico identificado para tuberías horizontales y verticales se representa de la forma siguiente:

Tuberías horizontales:

$$\frac{dp}{dl} = \frac{1}{D} \cdot \left[0,3164 \left(\frac{V_g \cdot D}{\nu} \right)^{-\frac{1}{4}} + \mu^{1-0,01} \cdot 0,231 \left(\frac{V_g^2}{D \cdot g} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{V_g^2}{d_p \cdot g} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{D}{d_p} \right)^{0,1} \right] \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot V_g^2 \quad (3.17)$$

Tuberías verticales:

$$\frac{dp}{dl} = \frac{1}{D} \cdot \left[0,3164 \left(\frac{V_g \cdot D}{\nu} \right)^{-\frac{1}{4}} + \mu^{1-0,01} \cdot 0,256 \left(\frac{V_g^2}{D \cdot g} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{V_g^2}{d_p \cdot g} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{D}{d_p} \right)^{0,1} \right] \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot V_g^2 \quad (3.18)$$

Se procede a calcular según el modelo empírico teórico encontrado los parámetros de transporte neumático de la serpentina para los máximos valores de la velocidad de flotación y el máximo diámetro de las partículas presentes en la mezcla. Los resultados de cálculo se demuestran en las tablas 3.5 y 3.6.

Tabla 3.5. Resultados de la pérdida de presión en los tramos horizontales para

$V_{flo} = 13,98 \text{ m/s}$ y $d_{eq.} = 7,40 \text{ mm}$.

Frs	V_g m/s	Fr	μ kg/kg	Ls	Re	L_G	dp/dl_{teor} Pa/m	dp/dl_{exp} Pa/m	Error, %
2692.2390	6.9710	49.5358	46.5133	0.0419	43870.256	0.021862	594.3191	574.3985	3.35
2692.2390	7.9736	64.8093	41.0100	0.0321	50179.853	0.021140	527.1794	506.4735	3.93
2692.2390	8.6341	75.9917	36.5300	0.0274	54336.764	0.020723	472.2800	451.1455	4.47
2692.2390	9.0941	84.3049	35.7467	0.0247	57231.756	0.020456	463.3670	441.4713	4.73
2692.2390	9.8844	99.5938	31.7667	0.0209	62205.203	0.020035	415.0661	392.3183	5.48
2692.2390	10.4624	111.5813	33.1533	0.0187	65842.500	0.019752	433.7440	409.4437	5.60
2692.2390	10.6865	116.4128	26.7033	0.0179	67252.880	0.019648	353.2066	329.745	6.64
2692.2390	11.1111	125.8479	22.4167	0.0166	69925.180	0.019457	300.2203	276.8458	7.79
2692.2390	11.3706	131.7948	19.4500	0.0159	71558.252	0.019345	263.4252	240.2075	8.81
2692.2390	11.7245	140.1254	18.1200	0.0150	73785.169	0.019197	247.4905	223.7820	9.58
2692.2390	11.9722	146.1088	23.1700	0.0143	75344.010	0.019097	311.7896	286.1495	8.224
2692.2390	10.6039	114.6208	24.0033	0.0182	66733.266	0.019686	319.0378	296.4412	7.08
									6.30

Tabla 3.6. Resultados de cálculo de la pérdida de presión en los tramos verticales para $V_{flo}=13,98\text{ m/s}$ y $d_{eq}=7,40\text{mm}$.

Frs	V_g m/s	Fr	μ kg/kg	Ls	Re	L_G	$dp/dl_{teor.}$ Pa/m	dp/dl_{exp} Pa/m	Error, %
2692.2390	6.9710	49.5358	46.5133	0.0465	43870.26	0.021862	657.9265	634.396	3.58
2692.2390	7.9736	64.8093	41.0100	0.0356	50179.85	0.021140	583.3316	559.376	4.11
2692.2390	8.6341	75.9917	36.5300	0.0304	54336.76	0.020723	522.3560	498.269	4.61
2692.2390	9.0941	84.3049	35.7467	0.0274	57231.76	0.020456	512.3798	487.585	4.84
2692.2390	9.8844	99.5938	31.7667	0.0232	62205.20	0.020035	458.6733	433.297	5.53
2692.2390	10.4624	111.5813	33.1533	0.0207	65842.50	0.019752	479.2352	452.212	5.64
2692.2390	10.6865	116.4128	26.7033	0.0199	67252.88	0.019648	389.9268	364.188	6.60
2692.2390	11.1111	125.8479	22.4167	0.0184	69925.18	0.019457	331.0999	305.763	7.65
2692.2390	11.3706	131.7948	19.4500	0.0176	71558.25	0.019345	290.2562	265.298	8.60
2692.2390	11.7245	140.1254	18.1200	0.0166	73785.17	0.019197	272.5045	247.157	9.30
2692.2390	11.9722	146.1088	23.1700	0.0159	75344.01	0.019097	343.6964	316.039	8.05
2692.2390	10.6039	114.6208	24.0033	0.0202	66733.27	0.019686	352.0805	327.406	7.01
									6.29

3.6. Comportamiento de las pérdidas de presión en función de la velocidad del gas para tuberías horizontales y verticales

En este tópico se analiza el comportamiento del modelo empírico teórico ecuaciones 3.17 y 3.18 para diferentes condiciones de transporte neumático del mineral serpentínico.

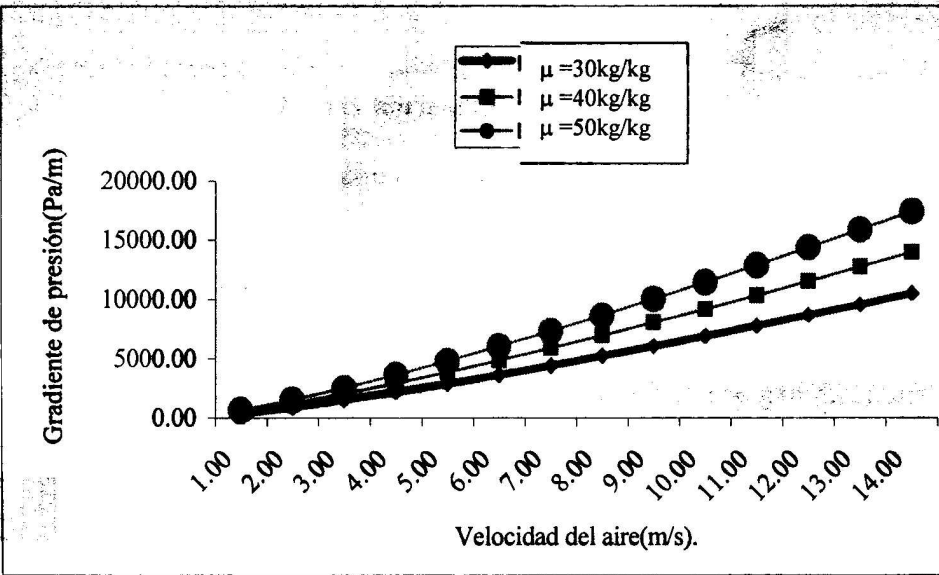


Gráfico 3.1. Dependencia entre las pérdidas de presión y velocidad del gas para distintas concentraciones en las tuberías horizontales.

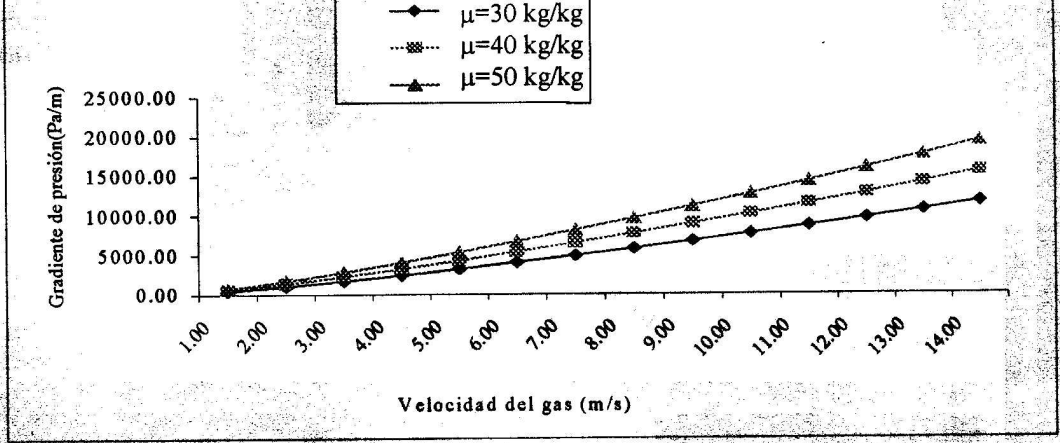


Gráfico 3.2 Dependencia de las pérdidas de presión y velocidad del gas para distintas concentraciones en las tuberías verticales.

Se observa la dependencia que se establece entre la velocidad de flujo del aire y la concentración con respecto a las pérdidas de presión, a mayor relación mineral /aire y mayor velocidad de flujo aumentan las pérdidas de presión por resistencia.

3.7. Comportamiento de las pérdidas de presión en función de la distancia de transporte para tuberías horizontales y verticales

En este epígrafe se define como cambia la pérdida de presión en dependencia de la distancia de transporte. De los gráficos 3.3 y 3.4 se observa que con el aumento de la distancia de bombeo del mineral crecen las pérdidas de presión en tuberías horizontales y en tuberías verticales, las cuales deben ser tomadas en cuenta a la hora de la ejecución del Proyecto de Ingeniería, ya que debido a esta consideración se garantiza una transportación segura y se evitan las tupidiones en las líneas.

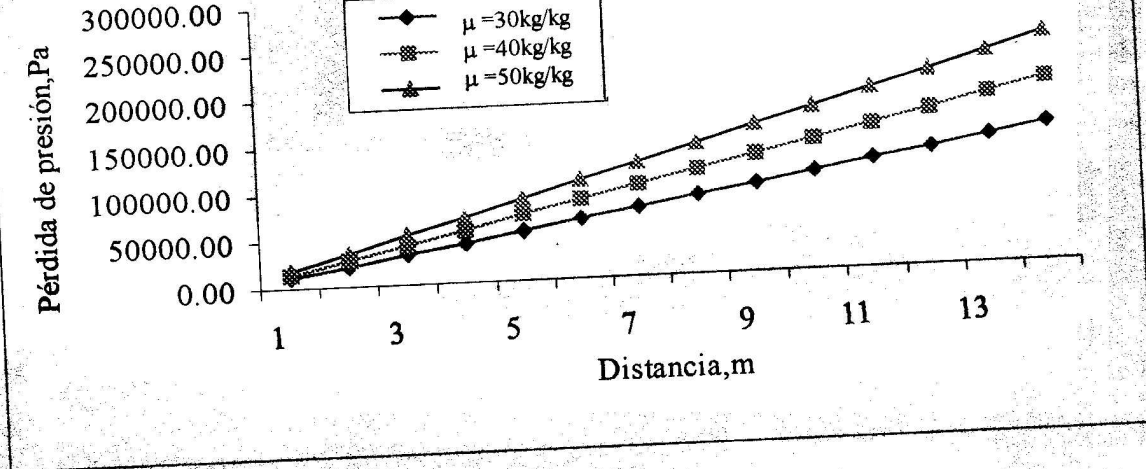


Gráfico 3.3 Pérdida de presión en función de la distancia de transporte para las tuberías horizontales.

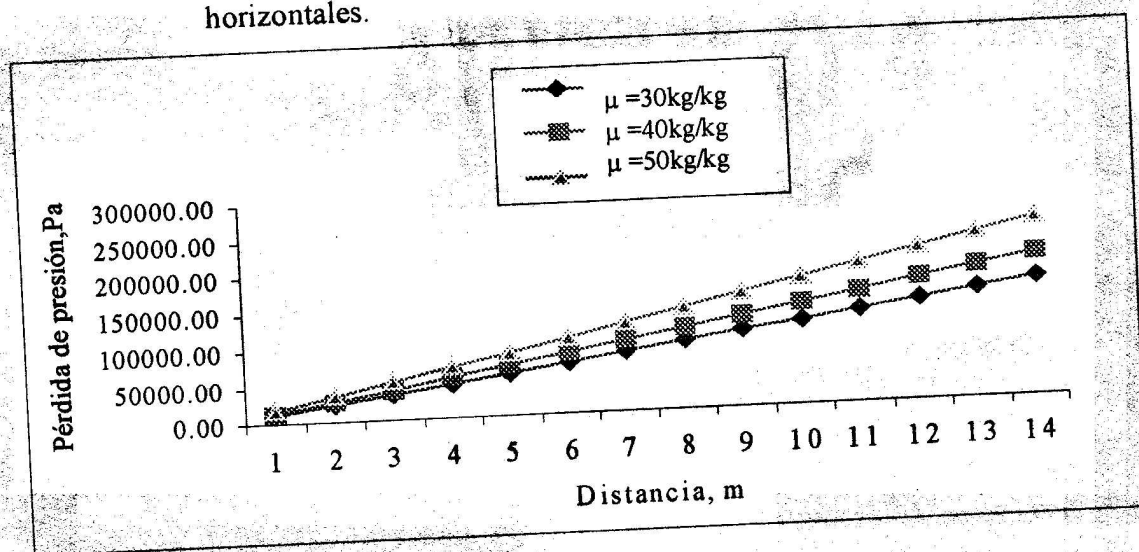


Gráfico 3.4 Pérdida de presión en función de la distancia de transporte para las tuberías verticales.

CAPÍTULO 4

CAPITULO 4. VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

4.1 Valoración económica

La investigación desarrollada en la presente tesis significa un aporte empírico teórico importante en el campo del conocimiento tecnológico y científico – técnico. Los resultados obtenidos de la caracterización de la muestra de serpentina analizada y el modelo obtenido de las pérdidas de presión en las tuberías horizontales y verticales servirán como base para los cálculos de Ingeniería y selección del equipamiento, que va a transportar este mineral con menores gastos energéticos y costos de producción. En el Anexo 5 están presentes los costos según presupuesto realizado de la instalación experimental construida por la Fábrica de Las Camariocas y en total el costo de la investigación es de \$ 30000.

4.2. Impacto de los materiales polvorientos en la salud del hombre y el Medio Ambiente

La protección del medio ambiente se ha convertido en una de las tareas que más inquietan a la humanidad. Los grandiosos medios técnicos de que dispone el hombre para explorar las riquezas naturales, el acelerado desarrollo de la economía y el crecimiento de la población, han dado lugar a consecuencias indeseables para la humanidad, tales como: el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación ambiental, los ruidos, la pérdida de los valores estéticos del medio circundante. Por lo tanto no es casual que las organizaciones científicas, sociales, políticas, los estados y gobiernos de muchas partes del mundo se hayan preocupado por tomar las medidas que, de una forma u otra, están dirigidas a garantizar un uso racional de los recursos naturales y la protección del Medio Ambiente.

El período industrial moderno se ha caracterizado por la creación masiva de máquinas y los procesos de fabricación que emplean energía. Las principales fuentes de estas son los carbones, el petróleo, el gas natural y de alguna otra manera la energía hidráulica y nuclear.

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, pues en este medio es donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentran el polvo industrial, ruido, gases, etc.

Las partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra y produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad; además de la luz solar las partículas en suspensión absorben la luz producida por medios artificiales.

Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración de partículas, pero así mismo influye el tamaño de estas. Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetros comprendidos entre 0.1 a 1 μm .

Estas influyen sobre los materiales, entre los efectos que pueden tener sobre estos tenemos:

- Abrasión: realizada por aquellas partículas de mayor tamaño y dotadas de elevada velocidad.
- Ataque químico: puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conjuntamente, tras el efecto de abrasión realizado por las partículas.

Los efectos que producen sobre la vegetación puede considerarse muy pequeños y prácticamente inexistentes. Tan solo pueden cifrarse como peligrosos aquellos que se derivan para zonas muy próximas a puntos de producción de partículas en cantidades notables. Las partículas solas o en combinación con otros contaminantes representan un peligro muy grave para la salud.

Sin embargo cuando se habla del organismo humano, la situación se toma más preocupante, ya que lo afecta directamente en mayor o menor medida. Los contaminantes penetran al organismo principalmente por dos vías:

- Inhalación de polvos en el aire a través de vías respiratorias.
- Absorción de polvos a través de la piel.

Las partículas entran en el cuerpo humano a través del sistema respiratorio, y el efecto que se produce depende de su tamaño, la composición química y mineralógica, densidad, superficie específica y otras.

Las partículas de tamaño superior a 5 μm de diámetro quedan detenidas en los bellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la traquea y la cavidad nasal. Los componentes entre 0.5 - 5 μm son capaces de penetrar hasta el sistema

respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de pocas horas de aspiración.

La situación más preocupante corresponde a las partículas menores de $0.5\ \mu\text{m}$, ya que se ha estimado que más del 50 % de las partículas de $0.01\text{-}0.1\ \mu\text{m}$ que penetran en los alvéolos se depositan allí, donde es difícil eliminarlos por carecer de cilios y mucosas, pudiendo permanecer durante meses e incluso años degradando la salud del hombre.

Las partículas sólidas de pequeño tamaño, generalmente menores de $10\ \mu\text{m}$ de diámetro, son de gran importancia porque dado su tamaño permanecen en el aire mucho tiempo antes de sedimentarse.

Las partículas pueden tener un efecto tóxico de una o más de las maneras siguientes:

- Pueden ser intrínsecamente tóxicas por sus características inherentes químicas.
- Pueden interferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio.
- Pueden actuar como un conductor de una sustancia tóxica absorbida en su superficie.

Los polvos se clasifican según la forma de acción biológica sobre el organismo humano en :

- Polvos inertes: son aquellos que no provocan reacción aparente en los depósitos linfáticos pulmonares, pero obstruyen el flujo normal de la linfa.
- Polvos tóxicos: ocasionan en uno o varios órganos y sistemas específicos del organismo humano.
- Polvos energéticos: que son los causantes de afecciones alérgicas, sus efectos dependen en gran medida de la susceptibilidad del individuo.
- Polvos fibrógenos: ocasionan fibrosis pulmonar característico de la neumoconiosis.

Tomando en consideración todo lo anterior dicho es que el transporte neumático, independientemente de su mayor consumo de energía en comparación con otros sistemas de transporte, ofrece mayor seguridad en el traslado de materiales polvorientos humanizando el trabajo y reduciendo considerablemente la presencia de partículas sólidas en el medio ambiente.

CONCLUSIONES

1. Se realizó la caracterización física y aerodinámica del material. En la muestra están presente las partículas con:

- ◆ Tamaño – inferior a 7,4 mm
- ◆ Forma - elipsoidal
- ◆ Índice de aplastamiento – 0,401
- ◆ Densidad real – 2733,6 kg/m³
- ◆ Densidad aparente – 1334,6 kg/m³
- ◆ Humedad – 5 %
- ◆ Velocidad de flotación – 13,98 m/s

2. Se estableció un modelo empírico teórico para los cálculos de las pérdidas de presión en el sistema de transporte neumático de la serpentina a 7,4 mm en las tuberías horizontales:

$$\frac{dp}{dl} = \frac{1}{D} \cdot \left[0,3164 \left(\frac{V_g \cdot D}{\nu} \right)^{-\frac{1}{4}} + \mu^{1-0,01} \cdot 0,23 \left(\frac{V_g^2}{D \cdot g} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{V_g^2}{d_p \cdot g} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{D}{d_p} \right)^{0,1} \right] \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot V_g^2$$

y verticales:

$$\frac{dp}{dl} = \frac{1}{D} \cdot \left[0,3164 \left(\frac{V_g \cdot D}{\nu} \right)^{-\frac{1}{4}} + \mu^{1-0,01} \cdot 0,256 \left(\frac{V_g^2}{D \cdot g} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{V_g^2}{d_p \cdot g} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{D}{d_p} \right)^{0,1} \right] \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot V_g^2$$

RECOMENDACIONES

1. Aplicar el modelo empírico teórico en los cálculos de los sistemas de transporte neumático del mineral serpentínico en la fábrica de Ferroníquel Las Camariocas actualmente en fase de proyecto.
2. Determinar los parámetros racionales de transporte neumático en fase diluta para el mineral de serpentina granulado.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANDREIEV , S.E; Perov,V.A.; Zverievich,V.V. Trituración desmenuzamiento y cribado de minerales. Moscú, Mir.1980.548p.
2. ARNOLD, P.C; P.W. Wipych. The development of pneumatic conveying in Australia. Bulk solids handling .11(1): 85 - 91, 1991.
3. BRADLEY, M. Presure losses caused by bends in pneumatic conveying pipelines. Powder handling processing. 2(4), 1990.
4. CALVO, R. Tratamiento del aire comprimido. Metalurgia y electricidad. Mes-octubre, 1995.
5. CHANG, A. Una Visión Sobre las Reservas Estratégicas de Eficiencia Metalúrgica en la Tecnología Carbonato-Amóniacal. Minería y Geología. 16 (1):13 – 19, 1999.
6. DAVIDOV C; Pavlujin M; Veber G. Modernizacia camernogo nasosa dlja pneumotransporta goriachij poroshkoobraznij materialov. Metalurgía no ferrosa. Instituto central de investigación. No.4; mes-abril, 1990.
7. DYNAMIC AIR. The basics of pneumatic conveying. <http://www.dynamicair.com/pdf/9515-2-pdf>. Julio, 2002.
8. EISELE, Klaus. Mejor ver y comprender los flujos. Sulzer technical review. Suiza; 1/1998.
9. FRANZINI B; Finnemore E. Mecánica de flúidos con aplicaciones en Ingeniería. 9^{na} edición, 1998.
10. GORDÓN, G. M.; I. L. Peisájov: Captación de polvos y purificación de gases en la metalurgia de metales no ferrosos. Mir, Moscú, 1981. p 392
11. GOURDEL, C. Q. Simoning. Modelling and simulation of gas - solid turbulent flows with a binary mixture of particles. Third Int. Conf. on Multiphase flow, Lyon, France, 1998.
12. GUERRA, J. D.; E. S. Pereda: Introducción al análisis estadístico para proceso. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1987. p 368.

13. GUIST, L. The morphology, mineralogy, and behavior of “fine- grained” gold from placer deposits of Alberta: sampling and implications of mineral exploration. March 25, 1986.
14. HARADA, S; Tanaka, T. Fluid force acting on a falling particle toward a plane wall. Proc. of ASME FEDSM'00, Boston, USA: 15 - 6, 2000.
15. HAYES, J. Economics of pneumatic conveying systems. Powder handling processing. 5(1): 1 – 5, 1993.
16. KRAUS, N. M. Pneumatic conveying of bulk materials. Second edition, 1980.
17. KUBOTA, R. Determinación de la velocidad de flotación de las partículas del mineral laterítico utilizado en el transporte neumático de la empresa Ernesto Che Guevara. Trabajo de diploma, 2001.
18. LAMPINEN, M. Calculation Methods for Determining the pressure Loss of Twophase Pipe Flow and Ejectors in Pneumatic Conveying Systems. Acta polytechnica scandinavica. Mechanical Engineering series No 99, 1991.
19. MASSOUDI M; Rajagopal K. On the fully developed flow of a dense particulate mixture in a pipe. Powder technology. 104 (1): 258 – 268, 1999.
20. MATOS, H. Modelación teórica y propiedades físicas más importantes en el transporte neumático del mineral laterítico. Trabajo de diploma, 2000.
21. MATOUSEK V. Distribution and friction of particles in pipeline flow of sand– water mixtures.<http://www.ocp.tudelft.nl/dredging/matousek/handbookmatousek2000.pdf> .Septiembre, 2002.
22. MITROFANOV,S.I; Barski, L.A; Samigin, V.D. Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Moscú, Mir. 1982. 440p.
23. MAWATARI Y; Tetsu K; Yuji T; Takenari T. Comparison of three vibrational modes (twist, vertical and horizontal) for fluidization of fine particles. Powder Technólogy 12, (2): 157-168, 2001.
24. MI, B; P. Wypych. Pressure drop prediction in low – velocity pneumatic conveying. Powder Technology. 81(1): 125 – 137, 1994.

25. Mi, B; P. Wypych. Low – velocity pneumatic conveying of powders. Mech trans. IEAust, 20(3): 187 – 191, 1995.
26. MIRANDA, J. L. Comparación y conjugación de métodos de determinación de humedad en la Industria del Níquel. Minería y Geología. Moa. 13 (2): 42 – 47, 1996.
27. ORIOL Guerra, J. Conferencias de Maquinas Transportadoras. Facultad de construcción de Maquinarias, ISPJAE, 1986. 231p.
28. PACHECO Bertot, P. Ecuaciones para el diseño de instalaciones a transporte neumático por tuberías verticales de materiales polvorientos, granulados, polimorfos y polidispersos. Tesis doctoral. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. 1984. 120p.
29. PAN, Y; Tanaka, T; Tsuji, Y; "Large-Eddy Simulation of Particle-Laden Rotating Channel Flow," Proc. of ASME FEDSM'00, Boston, USA: 1 - 7, 2000.
30. PAVLOV, V. Los acumuladores hidroneumáticos del aire comprimido. Svetnaya metalurgía, No. 10, mes 10, 1986.
31. PALOP, F. Transporte neumático de materiales pulverulentos. Editorial labor, s.a, 1974.
32. REED, R; Bradley, M. Advances in the Design of Pneumatic Conveying Systems. Bulk solids handling. 11(1): 93 – 98, 1991.
33. ROJAS L. Principales fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 1994. 92p.
34. RYAN, T. Two phase slag flow in horizontal and inclined tubes.
35. SÁNCHEZ Alvarez, Rafael. Estadística Elemental. Ciudad de la Habana, Editorial Pueblo y Educación, 1986.
36. SCOTT, D; Rao, P. Transport of solids by gas liquid Mixtures in Horizontal Pipes. The Canadian journal of Chemical Engineering, Vol. 49, June, 1971.
37. SMOLDIREV, E. Creación de las instalaciones económicas de transporte neumático. Svetnaya metalurgía, No. 2, mes 2, 1986.
38. SOMMERFELD, M; N. Huber. Experimental analysis and modelling of particle – wall collisions. Int. J. Multiphase Flow. 25: 1457 – 1489, 1999.
39. STREETER, V. Mecánica de los fluidos. Ciudad de la Habana, Editorial Pueblo y Educación, 1978.

40. TANIDA, K; Honda, K. "Particle Motion in Screw Feeder Simulation by Discrete Element Method". Proc. of IS&T's NIP14: International Conference on Digital Printing Technologies, Toronto, Canada: 429-431, 1998.
41. TASHIRO, H; Peng, X. Numerical prediction of saltation velocity for gas – solid two – phase flow in a horizontal pipe. Powder technology. 91: 141 – 146, 1997.
42. TAYLOR, T. Specific energy consumption and particle attrition in pneumatic conveying. Powder Technology. 95(1): 1-6, 1998.
43. THOMSON, F. Dense fase pneumatic conveying. Powder solids annual: 10, 1997.
44. TORRES, E. Características físicas y aerodinámica del mineral laterítico utilizado en los sistemas de transporte neumático de la industria del níquel. Memorias de la tercera conferencia internacional CINAREM 2002. Moa, Holguín, 2002.
45. TORRES, E. Características reológicas para el transporte de fluidos bifásicos utilizados en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Minería y Geología. 15 (2): 70 – 75, 1998.
46. TORRES, E. Comportamiento del transporte neumático de partículas en secadores rotatorios. Minería y Geología. 17(2): 73 – 77, 2000.
47. TORRES, E. Humedad de equilibrio y coeficiente de transferencia de masa para el secado y transporte neumático del mineral laterítico de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Minería y Geología. 18 (3): 66 – 71, 2001.
48. TORRES, E. Investigación del transporte neumático de partículas en los gases durante el secado del mineral laterítico en tambores cilíndricos rotatorios. Tesis de Maestría. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, ISMM, Moa, Holguín. 1999. 87p.
49. VIELZA, R. Automatización de la instalación experimental de transporte neumático del ISMMM. Trabajo de diploma, 2002.
50. VIERA, R; S. López. Modelación matemática para ingenieros químicos. Pueblo y Educación, La Habana, 1988. pp240.
51. WEBER, M. Friction of the Air and the Air / Solid Mixture in Pneumatic Conveying. Bulk solids handling. 11(1): 99 – 102, 1991.
52. YAMAMOTO, Y; Tanaka, T; Tsuji Y. Effect of spatial resolution of less on particle motion. Proc. of FEDSM'98, Washington, USA: 25 - 6, 1998.

53. YI, J; Wypych, P. W. Minimum conveying velocity in dilute – phase pneumatic conveying. Powder handling processing .10: 255 – 261, 1998.

ANEXOS

ANEXO I : Características dimensionales de las partículas.

Tabla 1. Características dimensionales de las partículas mayores de 6.3 mm.

No. Grano	L (largo), mm			B (ancho), mm			T (espesor), mm			Diámetro equiv.	Factor de forma Corey
	Medición	Factor	Dimensión	Medición	Factor	Dimensión	Medición	Factor	Dimensión		
1	4.50	0.5	2.250	4.75	0.5	2.376	0.3	0.5	0.150	1.153	0.0649
2	5.79	0.5	2.895	2.39	0.5	1.195	2.64	0.5	1.320	2.058	0.7097
3	5.64	0.5	2.820	2.46	0.5	1.230	2.54	0.5	1.270	2.034	0.6819
4	4.22	0.5	2.110	4.12	0.5	2.060	2.93	0.5	1.465	2.300	0.7027
5	4.87	0.5	2.435	3.55	0.5	1.775	4.59	0.5	2.295	2.666	1.1039
6	8.52	0.5	4.260	4.6	0.5	2.300	0.75	0.5	0.375	1.915	0.1198
7	4.97	0.5	2.485	2.85	0.5	1.425	1.685	0.5	0.843	1.786	0.4477
8	3.84	0.5	1.920	2.15	0.5	1.075	1.66	0.5	0.830	1.485	0.5777
9	5.40	0.5	2.700	3.6	0.5	1.800	2.25	0.5	1.125	2.186	0.5103
10	4.53	0.5	2.265	4.61	0.5	2.305	3.02	0.5	1.510	2.469	0.6609
11	4.85	0.5	2.425	4.6	0.5	2.300	3.21	0.5	1.605	2.576	0.6796
12	5.33	0.5	2.665	2.43	0.5	1.215	1.16	0.5	0.580	1.531	0.3223
13	4.89	0.5	2.445	4.12	0.5	2.060	0.67	0.5	0.335	1.477	0.1493
14	4.81	0.5	2.405	4.62	0.5	2.310	1.63	0.5	0.815	2.053	0.3458
15	4.48	0.5	2.240	2.47	0.5	1.235	1.33	0.5	0.665	1.520	0.3998
16	5.00	0.5	2.500	3.45	0.5	1.725	0.59	0.5	0.295	1.344	0.1421
17	4.74	0.5	2.368	2.77	0.5	1.385	1.77	0.5	0.885	1.770	0.4887
18	4.76	0.5	2.380	3.96	0.5	1.980	0.64	0.5	0.320	1.423	0.1474
19	4.04	0.5	2.020	4.31	0.5	2.155	2.44	0.5	1.220	2.165	0.5847
20	4.39	0.5	2.195	2.99	0.5	1.495	1.3	0.5	0.650	1.597	0.3588
									Promedio	1.875	0.460

Tabla 2. Características dimensionales de las partículas mayores de 5 mm.

No. Grano	L (largo), mm			B (ancho), mm			T (espesor), mm			Diámetro equivalente	Factor de forma Corey
	Medición	Factor	Dimensión	Medición	Factor	Dimensión	Medición	Factor	Dimensión		
1	51	0.176	9.000	31	0.176	5.471	19	0.176	3.353	6.806	0.478
2	43	0.176	7.588	32	0.176	5.647	30	0.176	5.294	7.567	0.809
3	42	0.176	7.412	20	0.176	3.529	21	0.176	3.706	5.700	0.725
4	44	0.176	7.765	27	0.176	4.765	9	0.176	1.588	4.823	0.261
5	52	0.176	9.176	30	0.176	5.294	15	0.176	2.647	6.262	0.380
6	55	0.176	9.706	45	0.176	7.941	8	0.176	1.412	5.923	0.161
7	68	0.176	12.000	33	0.176	5.824	19	0.176	3.353	7.649	0.401
8	44	0.176	7.765	36	0.176	6.353	4	0.176	0.706	4.051	0.101
9	52	0.176	9.176	31	0.176	5.471	21	0.176	3.706	7.083	0.523
10	41	0.176	7.235	28	0.176	4.941	11	0.176	1.941	5.099	0.325
11	70	0.176	12.353	37	0.176	6.529	27	0.176	4.765	9.020	0.531
12	59	0.176	10.412	43	0.176	7.588	26	0.176	4.588	8.846	0.516
13	59	0.176	10.412	37	0.176	6.529	11	0.176	1.941	6.317	0.235
14	47	0.176	8.294	26	0.176	4.588	18	0.176	3.176	6.135	0.515
15	60	0.176	10.588	22	0.176	3.882	12	0.176	2.118	5.499	0.330
16	60	0.176	10.588	20	0.176	3.529	21	0.176	3.706	6.419	0.606
17	47	0.176	8.294	40	0.176	7.059	9	0.176	1.588	5.621	0.208
18	45	0.176	7.941	29	0.176	5.118	17	0.176	3.000	6.152	0.471
19	52	0.176	9.176	35	0.176	6.176	14	0.176	2.471	6.443	0.328
20	46	0.176	8.118	37	0.176	6.529	19	0.176	3.353	6.976	0.461
									Promedio	6.420	0.418

Tabla 3. Características dimensionales de las partículas mayores de 3.15 mm.

No. Grano	L (largo), mm			B (ancho), mm			T (espesor), mm			Diámetro equivalente	Factor de forma Corey
	Medición	Factor	Dimensión	Medición	Factor	Dimensión	Medición	Factor	Dimensión		
1	34	0.176	6.000	15	0.176	2.647	19	0.176	3.353	4.668	0.841
2	48	0.176	8.471	27	0.176	4.765	21	0.176	3.706	6.586	0.583
3	28	0.176	4.941	14	0.176	2.471	16	0.176	2.824	4.038	0.808
4	41	0.176	7.235	26	0.176	4.588	17	0.176	3.000	5.751	0.521
5	29	0.176	5.118	21	0.176	3.706	12	0.176	2.118	4.249	0.486
6	36	0.176	6.353	18	0.176	3.176	20	0.176	3.529	5.143	0.786
7	33	0.176	5.824	18	0.176	3.176	13	0.176	2.294	4.328	0.533
8	33	0.176	5.824	23	0.176	4.059	13	0.176	2.294	4.696	0.472
9	26	0.176	4.588	17	0.176	3.000	17	0.176	3.000	4.288	0.809
10	37	0.176	6.529	16	0.176	2.824	15	0.176	2.647	4.534	0.616
11	24	0.176	4.235	18	0.176	3.176	6	0.176	1.059	3.008	0.289
12	39	0.176	6.882	11	0.176	1.941	16	0.176	2.824	4.161	0.772
13	30	0.176	5.294	20	0.176	3.529	18	0.176	3.176	4.840	0.735
14	37	0.176	6.529	15	0.176	2.647	13	0.176	2.294	4.231	0.552
15	27	0.176	4.765	19	0.176	3.353	15	0.176	2.647	4.323	0.662
16	48	0.176	8.471	33	0.176	5.824	6	0.176	1.059	4.638	0.151
17	35	0.176	6.176	27	0.176	4.765	15	0.176	2.647	5.299	0.488
18	37	0.176	6.529	24	0.176	4.235	16	0.176	2.824	5.303	0.537
19	30	0.176	5.294	28	0.176	4.941	12	0.176	2.118	4.730	0.414
20	36	0.176	6.353	24	0.176	4.235	11	0.176	1.941	4.638	0.374
									Promedio	4.672	0.571

Tabla 4. Características dimensionales de las partículas mayores de 2 mm.

No. Grano	L (largo), mm			B (ancho), mm			T (espesor), mm			Diámetro equivalente	Factor de forma Corey
	Medición	Factor	Dimensión	Medición	Factor	Dimensión	Medición	Factor	Dimensión		
1	8.29	0.5	4.145	6.18	0.5	3.090	2.43	0.5	1.215	3.098	0.339
2	5.11	0.5	2.555	5.81	0.5	2.903	4.85	0.5	2.425	3.251	0.890
3	6.63	0.5	3.315	6.36	0.5	3.180	3.46	0.5	1.730	3.266	0.533
4	8.16	0.5	4.080	5.32	0.5	2.660	2.23	0.5	1.115	2.848	0.338
5	8.05	0.5	4.025	5.39	0.5	2.695	3.35	0.5	1.675	3.262	0.509
6	8.69	0.5	4.345	5.98	0.5	2.990	1.80	0.5	0.900	2.816	0.250
7	6.26	0.5	3.130	3.80	0.5	1.900	0.30	0.5	0.150	1.194	0.062
8	8.47	0.5	4.235	4.87	0.5	2.435	4.67	0.5	2.335	3.583	0.727
9	6.72	0.5	3.360	1.78	0.5	0.890	2.44	0.5	1.220	1.910	0.705
10	25	0.176	4.412	20.0	0.176	3.529	5	0.176	0.88	2.969	0.223
11	33	0.176	5.824	23	0.176	4.059	7	0.176	1.232	3.817	0.253
12	26	0.176	4.588	15	0.176	2.647	6	0.176	1.056	2.904	0.303
13	20	0.176	3.529	16	0.176	2.824	9	0.176	1.584	3.112	0.502
14	26	0.176	4.588	14	0.176	2.471	8	0.176	1.408	3.124	0.418
15	26	0.176	4.588	16	0.176	2.824	11	0.176	1.936	3.632	0.538
16	22	0.176	3.882	11	0.176	1.941	10	0.176	1.76	2.937	0.641
17	18	0.176	3.176	17	0.176	3.000	7	0.176	1.232	2.820	0.399
18	23	0.176	4.059	19	0.176	3.353	4	0.176	0.704	2.635	0.191
19	22	0.176	3.882	11	0.176	1.941	7	0.176	1.232	2.608	0.449
20	22	0.176	3.882	16	0.176	2.824	13	0.176	2.288	3.632	0.691
									Prom.	2.971	0.448

Tabla 5. Características dimensionales de las partículas mayores de 1 mm.

No. Grano	L (largo), mm			B (ancho), mm			T (espesor), mm			Diámetro equivalente	Factor de forma Corey
	Medición	Factor	Dimensión	Medición	Factor	Dimensión	Medición	Factor	Dimensión		
1	4.50	0.5	2.250	4.75	0.5	2.376	0.3	0.5	0.150	1.153	0.0649
2	5.79	0.5	2.895	2.39	0.5	1.195	2.64	0.5	1.320	2.058	0.7097
3	5.64	0.5	2.820	2.46	0.5	1.230	2.54	0.5	1.270	2.034	0.6819
4	4.22	0.5	2.110	4.12	0.5	2.060	2.93	0.5	1.465	2.300	0.7027
5	4.87	0.5	2.435	3.55	0.5	1.775	4.59	0.5	2.295	2.666	1.1039
6	8.52	0.5	4.260	4.6	0.5	2.300	0.75	0.5	0.375	1.915	0.1198
7	4.97	0.5	2.485	2.85	0.5	1.425	1.685	0.5	0.843	1.786	0.4477
8	3.84	0.5	1.920	2.15	0.5	1.075	1.66	0.5	0.830	1.485	0.5777
9	5.40	0.5	2.700	3.6	0.5	1.800	2.25	0.5	1.125	2.186	0.5103
10	4.53	0.5	2.265	4.61	0.5	2.305	3.02	0.5	1.510	2.469	0.6609
11	4.85	0.5	2.425	4.6	0.5	2.300	3.21	0.5	1.605	2.576	0.6796
12	5.33	0.5	2.665	2.43	0.5	1.215	1.16	0.5	0.580	1.531	0.3223
13	4.89	0.5	2.445	4.12	0.5	2.060	0.67	0.5	0.335	1.477	0.1493
14	4.81	0.5	2.405	4.62	0.5	2.310	1.63	0.5	0.815	2.053	0.3458
15	4.48	0.5	2.240	2.47	0.5	1.235	1.33	0.5	0.665	1.520	0.3998
16	5.00	0.5	2.500	3.45	0.5	1.725	0.59	0.5	0.295	1.344	0.1421
17	4.74	0.5	2.368	2.77	0.5	1.385	1.77	0.5	0.885	1.770	0.4887
18	4.76	0.5	2.380	3.96	0.5	1.980	0.64	0.5	0.320	1.423	0.1474
19	4.04	0.5	2.020	4.31	0.5	2.155	2.44	0.5	1.220	2.165	0.5847
20	4.39	0.5	2.195	2.99	0.5	1.495	1.3	0.5	0.650	1.597	0.3588
									Promedio	1.875	0.460

ANEXO 2. FOTOS.



Foto 1. Instalación experimental para la determinación de la velocidad de flotación de las partículas.

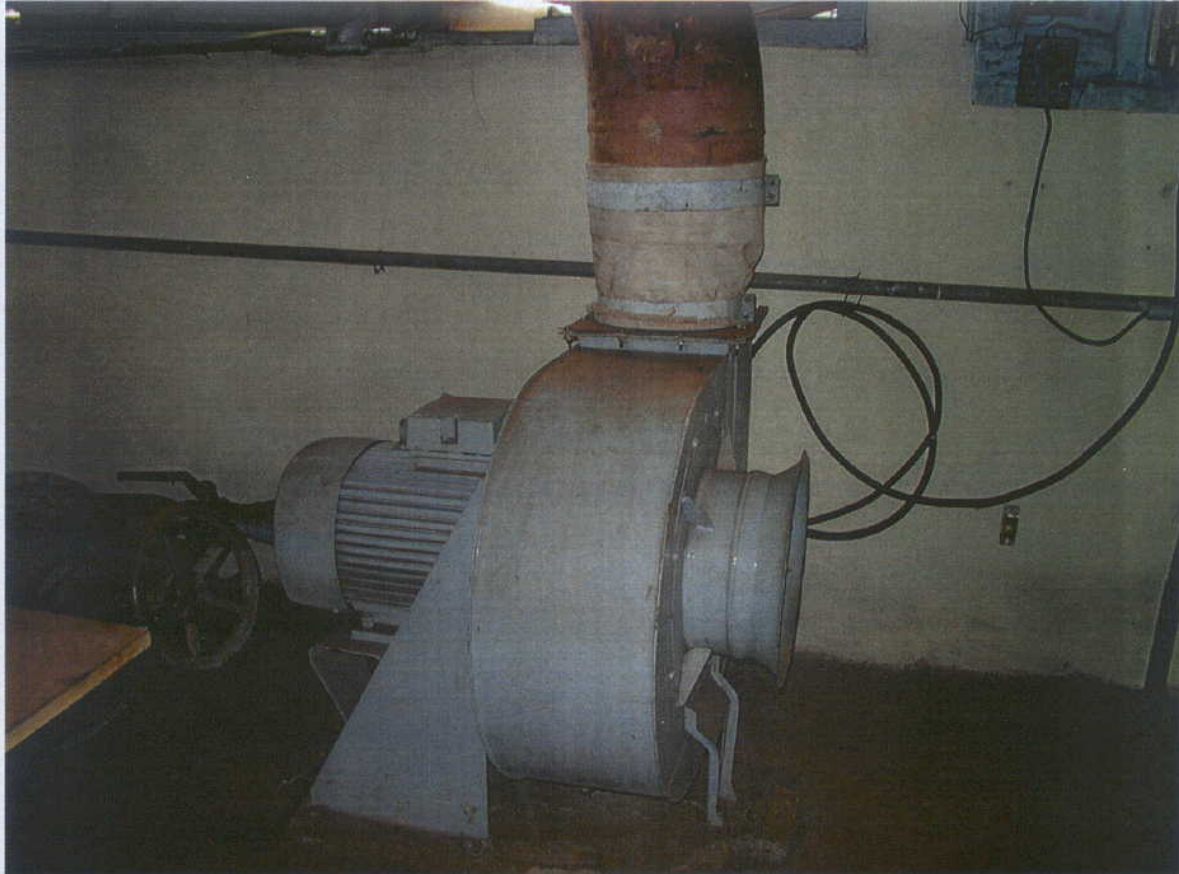


Foto 2. Ventilador LRMNE-315/4-W-4-18, utilizado como la fuente del aire en la instalación experimental para determinación de la velocidad de flotación.

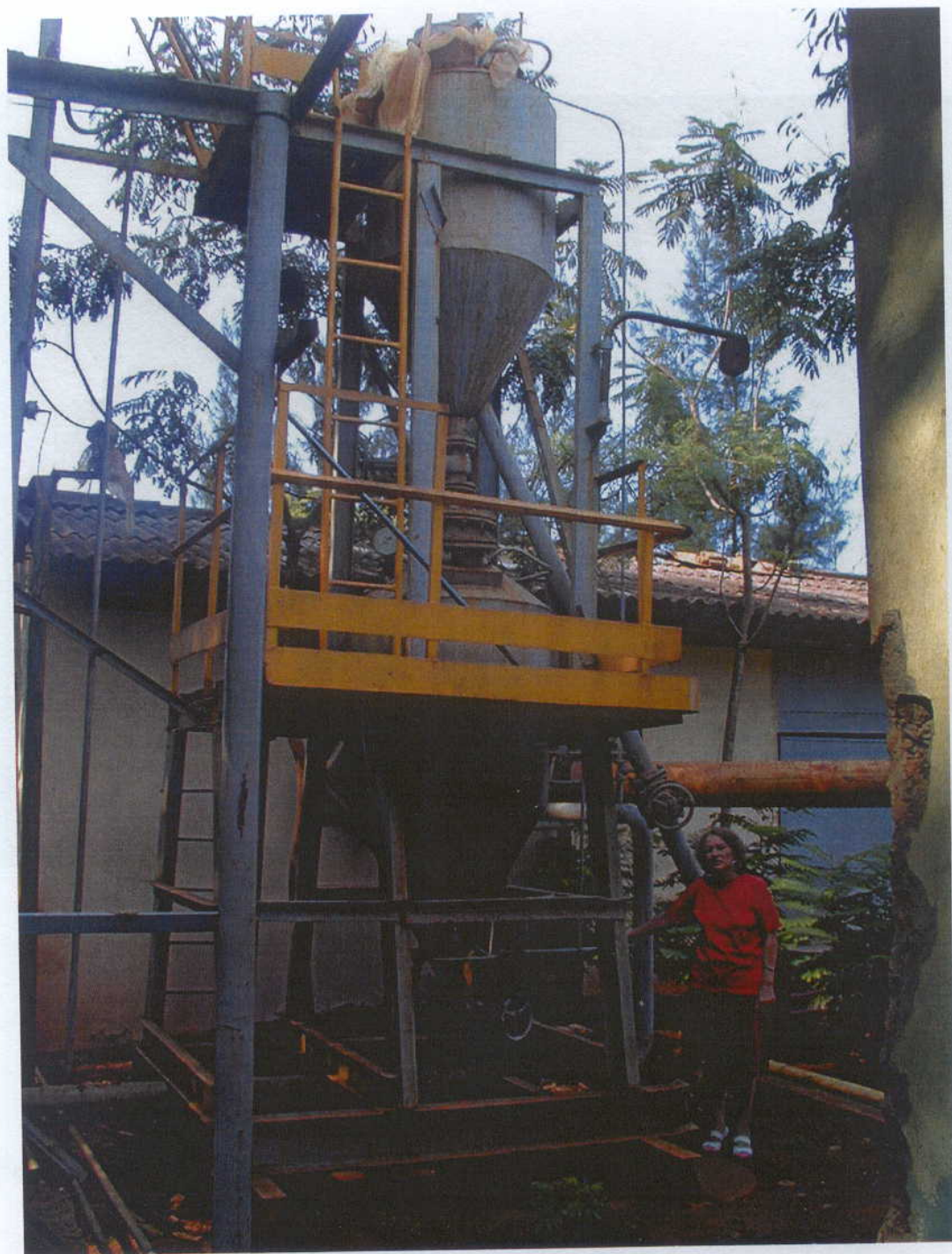


Foto 3. Instalación experimental para determinación de las pérdidas de presión en las tuberías horizontal y vertical.



Foto 4. Vista general de los dos compresores con el tanque de almacenamiento del aire.

Foto 5 Transmisor de presión instalado en la tubería en 100 mm



Foto 5 Transmisor de presión instalado en la tubería de 100 mm.

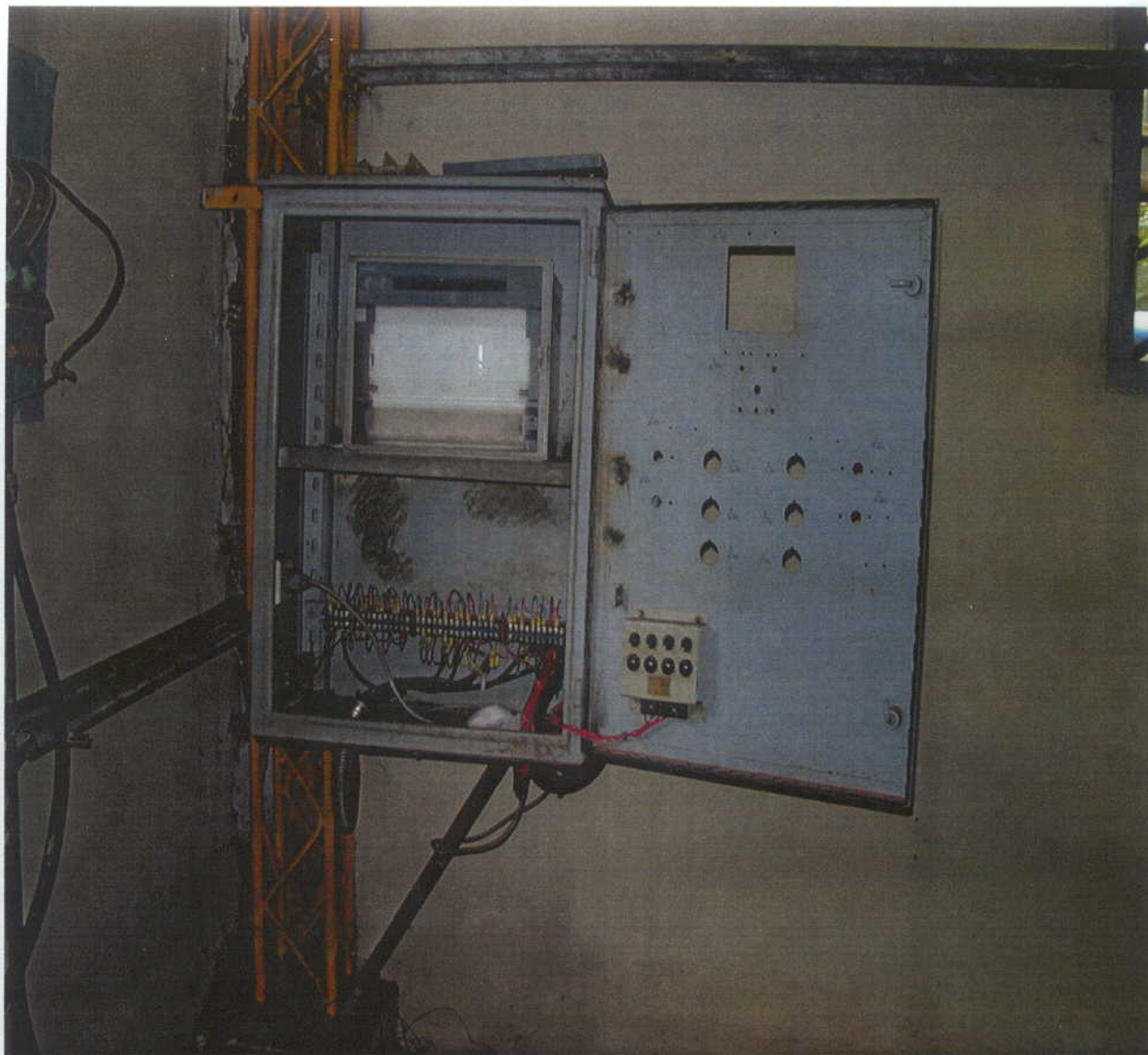


Foto 6 Registrador multipunto PIEZOGRAF.

Fig. 1. Esquema de la instalación experimental para determinación de las pérdidas de presión en las tuberías horizontales y verticales.

ANEXO 3. Figuras.

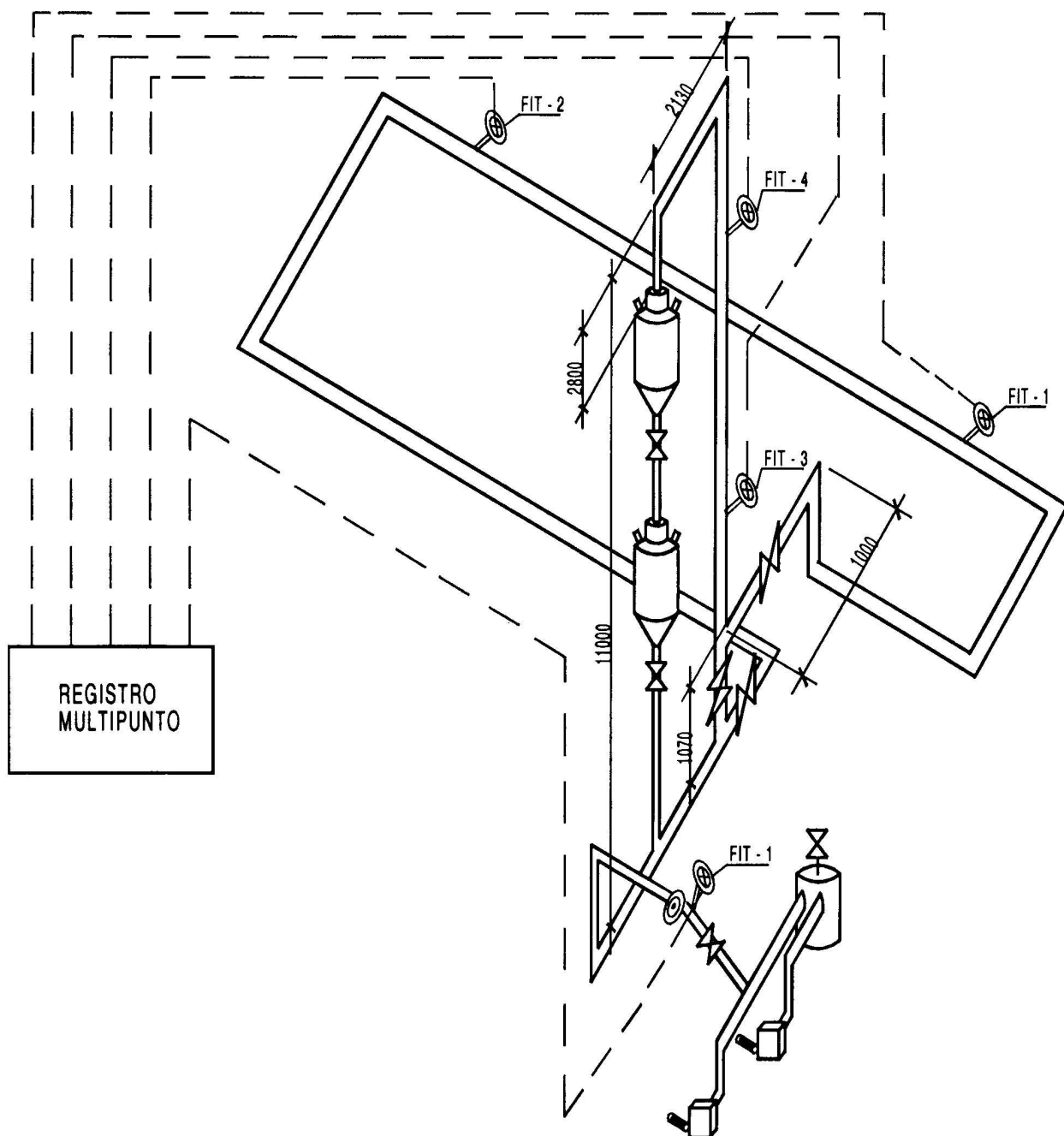


Fig. 1. Esquema de la instalación experimental para determinación de las pérdidas de presión en las tuberías horizontales y verticales.

ANEXO 4. Resultados de las pérdidas de presión en función de la velocidad del gas.

Tabla 1. Resultados de las pérdidas de presión en función de la velocidad del gas para la concentración de la mezcla 30 kg/kg en tuberías verticales.

Frs	Vg (m/s)	Q (m ³ /h)	Mg (kg/s)	μ (kg/kg)	Ls	Re	L _G	dp/dl (Pa/m)
2692.2390	1.00	176.6250	0.0608	30.00	5.7832	15733.17	0.02825	430.3402
2692.2390	2.00	353.2500	0.1217	30.00	3.4387	31466.33	0.02376	1023.5962
2692.2390	3.00	529.8750	0.1825	30.00	2.5370	47199.50	0.02147	1699.2810
2692.2390	4.00	706.5000	0.2434	30.00	2.0447	62932.66	0.01998	2434.7679
2692.2390	5.00	883.1250	0.3042	30.00	1.7296	78665.83	0.01889	3218.1906
2692.2390	6.00	1059.7500	0.3650	30.00	1.5085	94398.99	0.01805	4042.0661
2692.2390	7.00	1236.3750	0.4259	30.00	1.3438	110132.16	0.01737	4901.1813
2692.2390	8.00	1413.0000	0.4867	30.00	1.2158	125865.32	0.01680	5791.6674
2692.2390	9.00	1589.6250	0.5475	30.00	1.1130	141598.49	0.01631	6710.5234
2692.2390	10.00	1766.2500	0.6084	30.00	1.0284	157331.66	0.01589	7655.3443
2692.2390	11.00	1942.8750	0.6692	30.00	0.9575	173064.82	0.01551	8624.1538
2692.2390	12.00	2119.5000	0.7301	30.00	0.8970	188797.99	0.01518	9615.2951
2692.2390	13.00	2296.1250	0.7909	30.00	0.8447	204531.15	0.01488	10627.3565
2692.2390	14.00	2472.7500	0.8517	30.00	0.7990	220264.32	0.01460	11659.1187

Tabla 2. Resultados de las pérdidas de presión en función de la velocidad del gas para la concentración de la mezcla 40 kg/kg en tuberías verticales.

Frs	Vg (m/s)	Q (m ³ /h)	Mg (kg/s)	μ (kg/kg)	Ls	Re	L _G	dp/dl (Pa/m)
2692.2390	1.00	176.6250	0.0608	40.00	5.7666	15733.17	0.02825	572.1155
2692.2390	2.00	353.2500	0.1217	40.00	3.4288	31466.33	0.02376	1360.7966
2692.2390	3.00	529.8750	0.1825	40.00	2.5298	47199.50	0.02147	2259.0414
2692.2390	4.00	706.5000	0.2434	40.00	2.0388	62932.66	0.01998	3236.7702
2692.2390	5.00	883.1250	0.3042	40.00	1.7246	78665.83	0.01889	4278.2084
2692.2390	6.00	1059.7500	0.3650	40.00	1.5042	94398.99	0.01805	5373.4083
2692.2390	7.00	1236.3750	0.4259	40.00	1.3400	110132.16	0.01737	6515.4402
2692.2390	8.00	1413.0000	0.4867	40.00	1.2123	125865.32	0.01680	7699.1612
2692.2390	9.00	1589.6250	0.5475	40.00	1.1098	141598.49	0.01631	8920.5820
2692.2390	10.00	1766.2500	0.6084	40.00	1.0255	157331.66	0.01589	10176.5057
2692.2390	11.00	1942.8750	0.6692	40.00	0.9547	173064.82	0.01551	11464.3053
2692.2390	12.00	2119.5000	0.7301	40.00	0.8944	188797.99	0.01518	12781.7784
2692.2390	13.00	2296.1250	0.7909	40.00	0.8423	204531.15	0.01488	14127.0486
2692.2390	14.00	2472.7500	0.8517	40.00	0.7968	220264.32	0.01460	15498.4950

Tabla 3. Resultados de las pérdidas de presión en función de la velocidad del gas para la concentración de la mezcla 50 kg/kg en tuberías verticales.

Frs	Vg (m/s)	Q (m3/h)	Mg (kg/s)	μ (kg/kg)	Ls	Re	L _G	dp/dl (Pa/m)
2692.2390	1.00	176.6250	0.0608	50.00	5.7537	15733.17	0.02825	713.5330
2692.2390	2.00	353.2500	0.1217	50.00	3.4212	31466.33	0.02376	1697.1461
2692.2390	3.00	529.8750	0.1825	50.00	2.5241	47199.50	0.02147	2817.3892
2692.2390	4.00	706.5000	0.2434	50.00	2.0343	62932.66	0.01998	4036.7485
2692.2390	5.00	883.1250	0.3042	50.00	1.7208	78665.83	0.01889	5335.5510
2692.2390	6.00	1059.7500	0.3650	50.00	1.5008	94398.99	0.01805	6701.3907
2692.2390	7.00	1236.3750	0.4259	50.00	1.3370	110132.16	0.01737	8125.6253
2692.2390	8.00	1413.0000	0.4867	50.00	1.2096	125865.32	0.01680	9601.8411
2692.2390	9.00	1589.6250	0.5475	50.00	1.1073	141598.49	0.01631	11125.0631
2692.2390	10.00	1766.2500	0.6084	50.00	1.0232	157331.66	0.01589	12691.3045
2692.2390	11.00	1942.8750	0.6692	50.00	0.9526	173064.82	0.01551	14297.2891
2692.2390	12.00	2119.5000	0.7301	50.00	0.8924	188797.99	0.01518	15940.2706
2692.2390	13.00	2296.1250	0.7909	50.00	0.8404	204531.15	0.01488	17617.9086
2692.2390	14.00	2472.7500	0.8517	50.00	0.7950	220264.32	0.01460	19328.1821

Tabla 4. Resultados de las pérdidas de presión en función de la velocidad del gas para la concentración de la mezcla 30 kg/kg en tuberías horizontales.

Frs	Vg (m/s)	Q (m3/h)	Mg (kg/s)	μ (kg/kg)	Ls	Re	L _G	dp/dl (Pa/m)
2692.2390	1.00	176.6250	0.0608	30.00	5.2184	15733.17	0.02825	388.3216
2692.2390	2.00	353.2500	0.1217	30.00	3.1029	31466.33	0.02376	923.6586
2692.2390	3.00	529.8750	0.1825	30.00	2.2893	47199.50	0.02147	1533.3824
2692.2390	4.00	706.5000	0.2434	30.00	1.8450	62932.66	0.01998	2197.0750
2692.2390	5.00	883.1250	0.3042	30.00	1.5607	78665.83	0.01889	2904.0286
2692.2390	6.00	1059.7500	0.3650	30.00	1.3612	94398.99	0.01805	3647.4904
2692.2390	7.00	1236.3750	0.4259	30.00	1.2126	110132.16	0.01737	4422.7564
2692.2390	8.00	1413.0000	0.4867	30.00	1.0970	125865.32	0.01680	5226.3353
2692.2390	9.00	1589.6250	0.5475	30.00	1.0043	141598.49	0.01631	6055.5188
2692.2390	10.00	1766.2500	0.6084	30.00	0.9280	157331.66	0.01589	6908.1369
2692.2390	11.00	1942.8750	0.6692	30.00	0.8640	173064.82	0.01551	7782.4059
2692.2390	12.00	2119.5000	0.7301	30.00	0.8094	188797.99	0.01518	8676.8308
2692.2390	13.00	2296.1250	0.7909	30.00	0.7622	204531.15	0.01488	9590.1377
2692.2390	14.00	2472.7500	0.8517	30.00	0.7210	220264.32	0.01460	10521.2261

Tabla 5. Resultados de las pérdidas de presión en función de la velocidad del gas para la concentración de la mezcla 40 kg/kg en tuberías horizontales.

Frs	Vg (m/s)	Q (m ³ /h)	Mg (kg/s)	μ (kg/kg)	Ls	Re	L _G	dp/dl (Pa/m)
2692.2390	1.00	176.6250	0.0608	40.00	5.2034	15733.17	0.02825	516.2517
2692.2390	2.00	353.2500	0.1217	40.00	3.0940	31466.33	0.02376	1227.9293
2692.2390	3.00	529.8750	0.1825	40.00	2.2827	47199.50	0.02147	2038.4787
2692.2390	4.00	706.5000	0.2434	40.00	1.8397	62932.66	0.01998	2920.7568
2692.2390	5.00	883.1250	0.3042	40.00	1.5562	78665.83	0.01889	3860.5290
2692.2390	6.00	1059.7500	0.3650	40.00	1.3573	94398.99	0.01805	4848.8188
2692.2390	7.00	1236.3750	0.4259	40.00	1.2091	110132.16	0.01737	5879.3729
2692.2390	8.00	1413.0000	0.4867	40.00	1.0939	125865.32	0.01680	6947.5503
2692.2390	9.00	1589.6250	0.5475	40.00	1.0014	141598.49	0.01631	8049.7513
2692.2390	10.00	1766.2500	0.6084	40.00	0.9253	157331.66	0.01589	9183.0911
2692.2390	11.00	1942.8750	0.6692	40.00	0.8615	173064.82	0.01551	10345.1988
2692.2390	12.00	2119.5000	0.7301	40.00	0.8071	188797.99	0.01518	11534.0872
2692.2390	13.00	2296.1250	0.7909	40.00	0.7600	204531.15	0.01488	12748.0629
2692.2390	14.00	2472.7500	0.8517	40.00	0.7189	220264.32	0.01460	13985.6634

Tabla 6. Resultados de las pérdidas de presión en función de la velocidad del gas para la concentración de la mezcla 50 kg/kg en tuberías horizontales.

Frs	Vg (m/s)	Q (m ³ /h)	Mg (kg/s)	μ (kg/kg)	Ls	Re	L _G	dp/dl (Pa/m)
2692.2390	1.00	176.6250	0.0608	50.00	5.1918	15733.17	0.02825	643.8589
2692.2390	2.00	353.2500	0.1217	50.00	3.0871	31466.33	0.02376	1531.4322
2692.2390	3.00	529.8750	0.1825	50.00	2.2776	47199.50	0.02147	2542.3004
2692.2390	4.00	706.5000	0.2434	50.00	1.8356	62932.66	0.01998	3642.6122
2692.2390	5.00	883.1250	0.3042	50.00	1.5527	78665.83	0.01889	4814.6155
2692.2390	6.00	1059.7500	0.3650	50.00	1.3543	94398.99	0.01805	6047.1154
2692.2390	7.00	1236.3750	0.4259	50.00	1.2064	110132.16	0.01737	7332.3133
2692.2390	8.00	1413.0000	0.4867	50.00	1.0915	125865.32	0.01680	8664.4217
2692.2390	9.00	1589.6250	0.5475	50.00	0.9992	141598.49	0.01631	10038.9511
2692.2390	10.00	1766.2500	0.6084	50.00	0.9233	157331.66	0.01589	11452.3040
2692.2390	11.00	1942.8750	0.6692	50.00	0.8596	173064.82	0.01551	12901.5241
2692.2390	12.00	2119.5000	0.7301	50.00	0.8053	188797.99	0.01518	14384.1329
2692.2390	13.00	2296.1250	0.7909	50.00	0.7583	204531.15	0.01488	15898.0187
2692.2390	14.00	2472.7500	0.8517	50.00	0.7173	220264.32	0.01460	17441.3576

273602	DE TAMAÑO MEDIANO EN PIZARRA	u	3.00	3.56	10.68	0.10
273603	TRANSMISOR DE PRESION SOPORTADO LOCAL CON SEÑAL A DISTANCIA	u	8.00	323.34	2586.72	24.87
274102	CON PERFILES FIJADOS A PARED CON TORNILLOS PASANTES	u	8.00	21.72	173.76	1.67
275101	CON SOPORTES SOLDADOS A ESTRUCTURAS	u	1.00	10.56	10.56	0.10
276109	PESO <=2,0KG, ALTURA HASTA 6ML	ct	0.81	57.39	46.49	0.45
	DIAMETRO <1000 MM, ALTURA <6 ML	ct	0.06	91.36	5.48	0.05
	DE 4" FIJADA CON GRAPA TIPO U H = < 5 ML	cm	0.12	1452.03	174.24	1.68
Presupuesto del Servicio de Construcción					Total Etapa o Especialidad	3007.93
					Total Brigad	10401.43
Precio de Construcción por Renglón Variante						
Precio de Construcción en Presup. Independientes					Total general	10401.43
	Facilidades Temporales		310.02		Costo de suministro del Ventilador	4080.00
	Gastos de Transportación		0.00		Fabricación de accesorios y barandas	782.12
	Otros gastos adicionales		206.68		Precio Total del Servicio de Const.	11367.50
	Gastos bancarios		103.34			
Precio Total de Construcc. en Presup. Independent	Seguros		0.00		GRAN TOTAL	16229.62
	Imprevistos		413.36			
Precio Total del Servicio de Construcción			1033.40			
			11367.50			

ANEXO 5 Presupuestos materiales y salarios

<i>C Costo</i>	<i>OT</i>	<i>Transporte neumático. Equipo</i>	<i>Plan</i>	<i>Servicio</i>	<i>H/H</i>	<i>Salario</i>	<i>Mat</i>	<i>Total</i>
130	704-17	Transporte neumático Instalación de tuberías	n	Servicios a	64	107.45	38.32	145.77
130	704-32	Transporte neumático	n	Extras	2	3.15	6.00	9.15
130	704-48	Transporte neumático	n	Servicios a	96	154.46	0.00	154.46
130	704-62	Cubos	n	Servicios a	16	26.44	0.00	26.44
130	705-06	ISM Prestación de servicios	n	Servicios a	336	581.75	0.00	581.75
130	705-13	Transporte neumático	n	Servicios a	320	554.05	0.00	554.05
130	706-123	Transporte neumático Prestación de servicios y montaje de instrum.	n	Servicios a	160	268.62	747.91	1,016.61
130	706-183	transporte neumático Montaje de equipos de instrumentación	n	Servicios a	88	147.74	0.00	147.74
130	706-363	Transporte neumático	n	Servicios a	40	62.96	0.66	63.62
130	706-414	Transporte neumático	n	Servicios a	120	188.88	26.79	215.67
130	706-501	Panel de control central	s	Conservación	144	226.66	10.19	236.85
130	706-532	Transporte Neumático	n	Servicios a	8	12.59	0.60	13.19
130	706-57	transporte neumático Montaje de instrumentación	n	Servicios a	96	161.17	29.40	190.57
130	707-13	ISM Trabajos eléctricos	n	Mantenimiento	112	211.55	8.06	219.61
130	707-39	Transporte neumático Prestación de servicios en montaje eléctrico	n	Servicios a	160	302.21	30.00	332.21
130	711-112	Prestación de servicio Prestación de servicio en transporte neumático	n	Servicios a	72	105.77	0.00	105.77
130	714-07	Equipos de Instrumentación Soldadura de equipo de instrumentación	n	Servicios a	72	113.33	5.95	119.28
130	714-19	Transporte neumático Soldadura y montaje	n	Servicios a	112	176.29	0.00	176.29
130	715-58	Prestación de servicio Prestación de servicio en transporte neumático	n	Servicios a	93.5	156.42	0.00	156.42
Subtotal					2111.	3,561.48	903.94	4,465.44

TOTALES

<i>H/H</i>	<i>Salario</i>	<i>Material</i>	<i>Total</i>
2111.5	3,561.48	903.96	4,465.4