



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

# Trabajo de Diploma

*En opción al Título de Ingeniero Mecánico*

**Título:** Parámetros de transporte neumático de la arena sílice para moldeo de fundición en la empresa mecánica del níquel.

**Autor:** Jorge Luis Mejias Benitez.

**Tutor:** Dr. C. Héctor Luis Laurencio Alfonso.

**Dr. C. Enrique Torres Tamayo.**

**Moa – 2014**  
**“Año 56 de la Revolución”**

## **Dedicatoria**

A mis padres, Aracelis Benítez Rodríguez y Jorge Luis Mejias Jomarrón.

A mi hermana y mi padrastro.

En especial a mi tío Alexis Mejias Jomarrón.

## **Agradecimientos**

Le agradezco principalmente a:

La Revolución por haberme dado la oportunidad de estudiar.

Mi familia por todo su apoyo incondicional, en especial a mis padres, hermanas y mi tío.

A mis tutores, el Dr.C. Héctor Luis Laurencio Alfonso y el Dr.C. Enrique Torres Tamayo por apoyarme en todo momento en la realización de este trabajo y por facilitarme los documentos por los cuales realicé mi tesis.

A mis amigos en especial a Gleydis Dueñas Rodríguez que luchó junto conmigo para que se realizara con éxito este trabajo.

A los compañeros de la empresa mecánica del níquel que me ayudaron con los datos necesarios para la realización del trabajo.

A todos, muchas gracias.

## Declaración de autoridad

Moa, 25 de junio del 2014

“Año 56 de la Revolución”

Yo, **Jorge Luis Mejias Benítez**, aspirante al título de **Ingeniero Mecánico**, autor del Trabajo titulado: **Parámetros de transporte neumático de la arena sílice para moldeo de fundición en la empresa mecánica del níquel**, y el tutor **Dr.C. Héctor Luis Laurencio Alfonso** certificamos la propiedad intelectual y la calidad del mismo a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Para que así conste firmamos la presente:

Autor: Jorge Luis Mejias Benítez \_\_\_\_\_

Tutor: Dr.C. Héctor Luis Laurencio Alfonso \_\_\_\_\_

## **Resumen**

En el presente trabajo de diploma se analiza la caída de presión en el sistema de transporte neumático del taller de fundición en la empresa mecánica del níquel, con el objetivo de disminuir los costos de transporte de la arena, para la cual se determinaron los distintos parámetros a tener en cuenta para su transporte.

Se realizaron experimentos para la determinación de la granulometría y velocidad con que debe operar la instalación, para la cual el tamaño de partícula es de 0,15 mm, siendo esta el 62 % de las muestras y una velocidad de 0,9 m/s.

Para la instalación se calculó la caída de presión en el sistema de tuberías para cuatro tipos de flujos de sólido diferentes, los cuales permanecían constantes en cada simulación y se varió la concentración de la mezcla obteniendo diferentes resultados de caída de presión, estos dieron paso para el cálculo de la potencia con la que se trabaja y que a su vez nos permitió conocer el costo anual de energía eléctrica por las caídas de presión.

## Summary

In the present work of diploma it is analyzed the fall of pressure in the system of pneumatic from the smelting factory in the mechanical company of nickel, with the object to rest the cost of translate the sand. For this sand it's determinate the different parameters to be in count for this translate.

It's make experiments for determinate the granulometry and work speed of system. The size of particle is 0, 15 mm being this one the 62 % and the speed is 0, 9 m/s.

For the installation it's calculate the fall of pressure in the system of tubes for four kinds of solid flow. It's keep constant for the experiments the solid flow and is change the concentration of the blending to obtain different results of pressure fall end power. Knowledge the power it's calculates the cost for year of electrical energy.

| <b>Índice</b>   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Introducción  | 1           |
| <b>Capítulo 1. Marco teórico y antecedentes investigativos del transporte neumático</b>                               | <b>4</b>    |
| 1.1 Introducción  | 4           |
| 1.2 Clasificación de las arenas de moldeo   | 4           |
| 1.3 Característica de los conductores neumáticos  | 6           |
| 1.3.1 Partes componentes de los conductores neumáticos  | 8           |
| <b>Capítulo 2. Modelo de las pérdidas de presión en el transporte neumático de la arena y técnicas experimentales</b> | <b>22</b>   |
| 2.1 Introducción  | 22          |
| 2.2 Metodología de cálculo de los sistemas de transporte neumático  | 22          |
| 2.2.1 Determinación de la longitud de transportación reducida   | 23          |
| 2.2.2 La potencia consumida en la zona de transporte  | 24          |
| 2.3 Características de la instalación   | 25          |
| 2.4 Tendencias para la determinación de las pérdidas de presión en los sistemas de transporte.                        | 25          |
| 2.4.1 Pérdida de presión por resistencia locales en los codos   | 32          |
| 2.5 Propiedades termofísicas del aire   | 33          |
| 2.5.1 Cálculo de los costos de transporte neumático   | 34          |
| 2.6 Técnicas experimentales empleadas   | 34          |
| 2.6.1 Granulometría   | 34          |
| 2.6.2 Cribado seco de las muestras.   | 35          |
| 2.6.3 Técnica experimental para determinar la velocidad de flotación  | 35          |
| 2.7 Conclusiones parciales  | 37          |

### **Capítulo 3. Análisis de los resultados experimentales y evaluación del transporte neumático**

|  |    |
|--|----|
| 3.1 Introducción   | 38 |
| 3.2 Análisis granulométrico                                    | 38 |
| 3.3 Modelación de la velocidad de flotación de la arena sílice | 38 |
| 3.4 Resultados de la simulación de la caída de presión         | 40 |
| 3.5 Valoración económica                                       | 44 |
| 3.6 Impacto ambiental del taller de fundición                  | 46 |
| 3.7 Conclusiones parciales del capítulo                        | 48 |
| <b>Conclusiones generales</b>                                  | 49 |
| <b>Recomendaciones</b>   | 50 |
| <b>Bibliografía</b>  | 51 |
| <b>Anexos</b>  | 55 |





## Introducción

Un factor importante dentro del taller de fundición del combinado mecánico resulta ser la realización de los moldes compuestos principalmente por arena sílice, la cual necesita ser transportada desde su depósito hacia donde va a ser utilizada. Por lo que es necesario analizar los diferentes parámetros que componen al material y al sistema de transporte neumático en sí, tratando de garantizar la mayor eficiencia en el proceso.

La introducción de un transporte neumático continuo permite garantizar cualquier producción con alta productividad y bajos costos. A este tipo pertenece el transporte con perspectivas reales de aplicación para la arena sílice y que se hacen inmediatas en la medida que aumenta la producción y se incrementa la calidad y variedad del producto final mediante un proceso más complejo. Dicho transporte es de flujo heterogéneo de sólidos y gases por tuberías; debido a ello existen pocas correlaciones y métodos que garanticen una alta precisión en los cálculos; no obstante se han desarrollado algunos métodos de cálculo para otros materiales, los que permiten predecir con una apreciación aceptable este tipo de transporte.( Torres, 2000.)

En transporte por tuberías horizontales la fuerza de gravedad tiende a estratificar la mezcla existente en el flujo, y el sólido (arena sílice) tiende a sedimentar hacia el fondo de la tubería. De todas formas, aunque el sólido puede permanecer suspendido como resultado de las altas velocidades del aire que provoca elevada turbulencia o en las suspensiones donde las partículas son relativamente pequeñas, la sedimentación de las partículas sólidas tiene un efecto pronunciado sobre la caída de presión. A altas velocidades, la caída de presión a lo largo de la tubería es ligeramente mayor para las partículas que para el aire, solo fluyendo a la misma velocidad. En el caso de sólidos finamente divididos, la caída de presión a altas velocidades puede ser menor que para el aire solo debido a la interacción de los sólidos en la turbulencia y efectos de tipo pseudoplástico. En la medida que la velocidad se reduce, la caída de presión para la flujo de partículas puede decrecer, pero se incrementa la diferencia entre la caída de presión que provoca el

flujo del aire solo. La velocidad de transporte es una función del diámetro de la tubería, de la concentración de sólidos y de las propiedades del material.

**Situación problemática:**

En la empresa mecánica del níquel Gustavo Machín Hoed de Beche se debe realizar el transporte neumático desde la salida de los secaderos hasta los moldes de fundición. En la actualidad el sistema, aunque está instalado no se encuentra funcionando por problemas asociados con la incorrecta selección de sus parámetros de transporte, consumos energéticos, dimensiones del sistema. Ello ha conllevado al transporte manual de la arena que no garantiza la calidad del proceso productivo de la empresa.

**Problema:**

Insuficiente conocimiento de los parámetros de transporte de la arena sílice para su transporte neumático por tubería. Además de la necesidad de instalación y puesta en marcha de un sistema de transporte neumático de arena de moldeo para el taller de fundición.

**Objeto:**

El proceso de transporte neumático de arena sílice.

**Hipótesis:**

Teniendo en cuenta la densidad real y aparente, la granulometría, el contenido de humedad, la forma de las partículas y la velocidad de sustentación del material, se podrá aplicar el transporte neumático en tuberías de arena sílice, garantizando valores satisfactorios de los parámetros de trabajo.

**Campo de acción:**

Los parámetros de transporte neumáticos de arenas para fundición.

**Objetivo general:**

Obtener los parámetros racionales de transporte neumático de la arena sílice en la empresa mecánica del níquel.

**Objetivos específicos:**

- ❖ Determinar las propiedades físicas y aerodinámicas de la arena sílice.
- ❖ Simular las pérdidas de presión del sistema para transporte neumático.

**Tareas:**

- Revisión bibliográfica relacionada con el transporte neumático de sólidos.
- Descripción del flujo tecnológico asociado con el proceso de transporte neumático de la arena sílice.
- Obtención de las propiedades físicas y aerodinámicas de la arena sílice que influyen en el transporte neumático de la misma.
- Cálculo verificativo del sistema de transporte neumático de la arena sílice.
- Valoración técnico-económico y medio ambiental de la aplicación del transporte neumático en el taller de fundición de la empresa mecánica del níquel "Gustavo Machín Hoed de Beche".

## **Capítulo 1. Marco teórico y antecedentes investigativos del transporte neumático**

### **1.1 Introducción**

Los sistemas de transporte neumático se utilizan ampliamente en la industria para transportar materiales secos, finos y a granel porque son extremadamente versátiles, adecuados y económicos para muchos procesos. El transporte neumático de sólidos se ha practicado por más de un siglo en el mundo y hoy se puede encontrar sistemas de este tipo en las más variadas industrias: la minería, industria del cemento y construcción, química y farmacéutica, plásticos, de alimentos, papel, vidrio, energía. Por ejemplo, el transporte y descarga neumática de cemento, cal, azúcar, pellets plásticos en camiones a granel presurizados; sistemas de transporte e inyección neumática de concentrado de cobre seco a convertidores teniente, y sistemas similares para carbón pulverizado que alimentan calderas y hornos; sistemas de transporte neumático de fertilizantes, yeso, coke, cenizas, sal, alimentos, granos, arena, aserrín y en plantas de procesos. La arena sílice es el principal medio de moldeo para la construcción de piezas mediante el proceso de fundición debido a su alto punto de fusión.

#### **Objetivo del capítulo:**

Establecer el marco teórico y antecedentes investigativos necesarios de la arena sílice y el transporte neumático, con el fin de tener mayores conocimientos acerca de este sistema de transporte, para dar respuesta a la hipótesis planteada en el presente trabajo.

### **1.2 Clasificación de las arenas de moldeo**

La mayor producción de piezas fundidas se realiza en moldes de arena. Los moldes utilizados en fundición están constituidos esencialmente por un material granular, la arena propiamente dicha y de un aglomerante que confiere a la arena la cohesión suficiente para la ejecución del molde. La arena más empleada es la de sílice fundamentalmente debido a que cumple muy bien su función y tiene un precio muy asequible. El consumo de otros tipos de arenas

tales como la de olivino, cromita, circonio no representan más de un 5 % y únicamente tienen sentido en aplicaciones donde sea necesario afrontar problemáticas de altas temperaturas, dilataciones muy concretas.

Las propiedades granulométricas y térmicas de la arena juegan un papel importante en la calidad de las piezas a fabricar puesto que inciden de manera directa en el proceso de enfriamiento del caldo y por lo tanto, en las estructuras del metal una vez solidificado. (Sociedad pública gestión ambiental del país Basco, 2000)

La precisión dimensional depende básicamente del coeficiente de dilatación que está en función del nivel térmico en el que se esté trabajando. Finalmente las características granulométricas tales como la distribución del tamaño de los granos, su grado de redondez y la naturaleza de su superficie están incidiendo directamente sobre la respuesta que el molde ofrezca en el desarrollo de su función.

La arena sílice es un compuesto resultante de la combinación del sílice con el oxígeno. Su composición química está formada por un átomo de sílice y dos átomos de oxígeno, formando una molécula muy estable:  $\text{SiO}_2$ .

Esta molécula es insoluble en agua y en la naturaleza se encuentra en forma de cuarzo. Si el cuarzo está cristalizado se denomina cristal de roca.

Pertenece a la clase de los silicatos y al sistema cristalino trigonal. Este mineral es muy rico en variedades, los que se pueden agrupar en macro cristalinas, con cristales bien visibles a simple vista, y criptocristalinas, formada por cristales microscópicos. (Sociedad pública gestión ambiental del país Basco, 2000)

Las arenas silíceas están compuestas de minerales de cuarzo, feldespatos, minerales arcillosos, minerales micáceos, elementos de carbón y de carbonato y minerales pesados que tienen influencia en las propiedades de la arena; así por ejemplo altos contenidos de feldespato favorecen la caída de la dilatación térmica de la arena y su punto de sinterización. De todas formas, los elementos presentes en las arenas silíceas diferentes del cuarzo representan un

porcentaje muy pequeño.

La utilización de las arenas una vez extraídas de las canteras requiere un lavado previo y una clasificación en función de su granulometría. (Sociedad pública gestión ambiental del país Basco, 2000)

Las arenas para moldeo en las plantas de fundición necesitan de amplitud y versatilidad para su transporte debido a que son muy utilizadas en este proceso, por lo que el transporte neumático es una de las opciones más frecuentemente utilizado para su traslado desde los tanques de almacenamiento hasta las áreas de fundición.

### **1.3 Característica de los conductores neumáticos**

Los equipos transportadores sirven para una gran variedad de propósitos en casi todas las industrias así como en otras actividades comerciales y de servicios, estos permiten el transporte con un flujo uniforme de una operación a otra, además de efectuar muchas otras funciones tales como distribuir el material, carga a granel y el llenado de contenedores, ya que su función principal es garantizar la continuidad de las operaciones teniendo en cuenta sus características, aplicaciones y tipo (Rodes, 2001).

Una gran cantidad de materiales pulverizados, granulados y fluidos en general pueden ser transportados exitosamente mediante conductores neumáticos, tales como: cemento, polvo de carbón, granos, cenizas, algodón, alúmina y otros.

La capacidad y fundamentales parámetros de estos conductos varían dentro de un amplio rango. Algunos tipos alcanzan capacidades hasta 3000 kg/h para un solo conducto. Una planta puede trasladar materiales hasta 1,8 a 2 km y una elevación de 100 m sin transferencias intermedias (Rodes, 2001).

Según Arnold y Wipych (1991) los conductos neumáticos que conducen el material dentro de una tubería, tienen marcadas ventajas y desventajas.

#### **Las ventajas radican en:**

- Facilidad para el trazado de las líneas de transporte, pudiendo salvar obstáculos de forma sencilla, colocando curvas y utilizando trazos en

vertical u horizontal según convenga.

- Posibilidad de transportar una amplia gama de productos.
- Facilidad para la recolección de productos desde distintos puntos y de distribución a varios destinos utilizando una misma línea común.
- Bajo mantenimiento.
- Montaje sencillo y económico, es posible cubrir largas distancias con bajo coste por metro lineal de transporte.
- Limpieza y seguridad de fuga en el transporte, sobre todo cuando éste se realiza en depresión.
- Baja cantidad de residuo una vez realizado el transporte, lo que lo hace idóneo para productos donde se debe garantizar su transvase total una vez han sido dosificados.
- El material se transporta en un conducto herméticamente cerrado impidiendo el levantamiento de polvo y disminuyendo la pérdida de material.
- Óptimo empleo del espacio.
- Posibilidad de trasladar el material por una traza de cualquier configuración espacial.
- Automatización de los procesos de carga y descarga.
- Fácil mantenimiento pues posee pocas partes móviles.

**Sus desventajas principales están dadas por:**

- Resultar técnicamente complejo debido a los fenómenos físicos de flujo que aparecen en las líneas de transporte por lo que se requiere cierta pericia para su diseño.
- Energía consumida superior a la de otros sistemas.
- Desgastes por abrasión en los equipos y en las tuberías cuando hay



cambio de dirección.

- Disgregación en productos compuestos y posible ruptura de partículas para productos frágiles.
- Gran consumo de energía (1 a 4 kW/t del material transportado).
- Rápido desgaste de las piezas del equipo en la transportación de materiales abrasivos.
- No transportan eficientemente materiales pegajosos.

### **1.3.1 Partes componentes de los conductores neumáticos**

Un conductor neumático empleado para transportar materiales a granel en una corriente de aire, se compone de: unidades o dispositivos para la admisión, tuberías o conductos, válvulas de desvío, separadores y colectores de polvo, unidad compresora o de soplado y dispositivos para el control automático.

Dependiendo del método por el cual se obtiene la caída de presión necesaria para producir la corriente de aire dentro del conducto, los conductores neumáticos se dividen en:

De succión: en el cual la carga y el traslado del material se efectúan como resultado del enrarecimiento del aire en el conducto (a veces estos sistemas se denominan de vacío)

De compresión o impelencia: en el cual la alimentación del material y su desplazamiento se efectúan como resultado de la impelencia y de la presión excesiva del aire en la tubería.

Mixtos: en los cuales existen dos secciones, una operando bajo un vacío parcial y la otra con aire comprimido.

El sistema de succión se emplea para la transportación del material desde varios lugares a un solo lugar. La caída de presión en este sistema no es muy grande (0,1 a 0,2 atm), a consecuencia de lo cual solo puede efectuarse la transportación a distancias cortas. Suele emplearse en la transportación de materiales ligeros, fluidos, granulados y en polvos. (Torres, 2003)

Los sistemas a presión se emplean para transportar materiales desde un lugar a varios puntos diferentes, por medio de tuberías de derivación. Este sistema se emplea eficientemente en los materiales poco fluidos, pesados y en pedazos.

A una velocidad relativamente alta los sólidos son transportados en una aparente suspensión uniforme en la llamada fase pobre o diluida, esto se utiliza para grandes distancias donde puede ser un kilómetro o algo más, para distancias menores a las anteriores es recomendable el transporte en fase densa debido a su menor consumo energético.

### **Dispositivos de admisión:**

Los alimentadores sinfín, las cámaras de llenado y las compuertas de esclusa se emplean para los sistemas a presión mientras que para el sistema de vacío suelen emplearse las toberas.

Los alimentadores sinfín estacionarios: se emplean ampliamente para instalaciones donde se manipulan cemento u otros materiales pulverizados. (PRILLWITZ, 2002).

El material desde una tolva es forzado a penetrar en la cámara de mezclado de alta presión mediante el alimentador sinfín el cual rota a velocidades de hasta 1 000 rpm este tiene un paso variable decreciente en el sentido del movimiento de la carga. Esto hace que la carga se vaya compactando e impida que el aire comprimido que hay en la cámara de mezclado escape a través del tornillo sinfín hacia la tolva. El grado de compactación que se alcanza se regula mediante una válvula:

Los cojinetes de los alimentadores sinfín están protegidos por sellos los cuales evitan la penetración de polvo procedente de la cámara de llenado.

Los alimentadores sinfín tienen la ventaja de que mantienen un llenado constante y que son compactos. Como desventaja, el elevado desgaste a que están sometidos el tornillo sinfín y el cilindro o cámara donde este trabaja, y el alto consumo de energía.

Compuertas de esclusas: en sistemas de presiones medias hasta 1atm. (manométricos) el material es a menudo introducido en las tuberías a través de esclusas o compuertas. Las mismas se emplean para evitar la entrada de aire a la zona de vacío o la pérdida de presión en los sistemas a presión o en los mixtos, cuando se hace pasar el material de un recipiente de baja presión a uno de alta presión o viceversa. Las compuertas de esclusas rotatorias rotan a velocidades entre 20 y 60 r.p.m. (PRILLWITZ, 2002).

Toberas de succión: Se emplean para recoger el material e introducirlo en la tubería del sistema de succión. Su trabajo se realiza de la siguiente forma: la tobera va unida a una manguera flexible y está conectada a la tubería que conducirá el material. La boca de la tobera se sumerge en el material de manera que este sea succionado al producirse una corriente de aire producto de la diferencias de presiones entre el exterior y el interior de la tubería.

Las cámaras de llenado se emplean para cargar cemento u otros materiales pulverizados o tacos suspendiéndolos en una corriente de aire e introduciéndolos dentro del conducto neumático.

Las cámaras de llenado se dividen en dos grupos: (1) descarga del material en el fondo de la tolva, y (2) descarga por la parte superior de la tolva. Este tipo de variante ofrece dimensiones más compactas y un llenado más uniforme.

La cámara se compone de un recipiente cilíndrico con el fondo en forma de cono. El material es llenado por la parte superior de la cámara, a través de la escotilla. Esta escotilla queda herméticamente cerrada por la válvula cónica. Cuando la cámara está llena y sin contacto con el exterior, se introduce aire a la cámara por la parte inferior. El aire “aérea” el material creando una mezcla en la que está el material suspendido. El aire también es introducido por la parte superior con el fin de crear contra presión. La diferencia de presión obliga al material a entrar por el conducto y enviarlo al punto de destino.

Las principales ventajas de las cámaras de llenado sobre los alimentadores sinfín, están en que estas consumen menos energía y que no tienen partes móviles que se desgasten, resultando por tanto, preferibles para la manipulación de materiales

abrasivos. Las cámaras de llenado también se emplean cuando el material se transporta a grandes distancias y por lo tanto trabajan con altas presiones.



**Figura 1.1.** Sistema de doble cámara. PRILLWITZ (2002).

Las principales desventajas de las cámaras de llenado lo constituye su considerable altura y, que operan en forma intermitente. Esta última desventaja se elimina con la existencia del sistema de doble cámara, como se muestra en la Fig.1.1 ya que mientras una está siendo descargada, la otra está siendo llenada.

### **Tuberías o conductos.**

Las tuberías de acero sin costura, con un rango de 50 a 250 mm de diámetro son empleadas en los sistemas de alta presión. Para los sistemas de presiones medias y bajas, se emplean tuberías más ligeras con espesores de pared entre 1 y 3mm. Las uniones de las tuberías se construyen herméticas.

#### *Válvulas de dos vías.*

Las válvulas de dos vías se emplean para conectar el sistema neumático a una de las ramas de la tubería.

## **Separadores.**

El material inmerso en la corriente de aire entra en un separador donde la pérdida de velocidad del flujo producto de la expansión al entrar al conducto, el cambio de dirección al chocar con las paredes y la aparición de la fuerza centrífuga separan el material, el cual desciende producto de su propio peso. El área de la sección de un separador o ciclón es de 50 a 150 veces mayor que el área de la tubería en el punto de entrada a este. La velocidad del aire dentro del separador puede tener un rango de 0.2 a 0.8 m/s de manera que puedan ser separadas aún las partículas más pequeñas. (PRILLWITZ, 2002).

El separador está compuesto generalmente por un tanque cilíndrico con una tolva en el fondo construida en forma de cono y que termina en una compuerta de esclusa, de manera que el material pueda ser extraído sin que salga el aire. En ocasiones el tanque o separador puede tener un laberinto interno para ayudar a la separación de las partículas del medio que las transporta, saliendo el aire por la parte superior.

## **Colectores de polvo**

A pesar de producirse una gran reducción de la velocidad del aire al entrar en el separador, este mantiene la suficiente como para arrastrar polvo y partículas en suspensión fuera del equipo. Para evitar que salgan al exterior dichas partículas enrareciendo el aire, se emplean varios tipos de colectores de polvo o filtros como son: ciclones centrífugos, filtros de saco, electrostático, mojados entre otros. En los ciclones centrífugos el aire conteniendo polvo y las partículas en suspensión, penetra en un cilindro de diámetro pequeño con un cono en su parte inferior. Bajo la acción de la fuerza centrífuga durante el movimiento por la superficie del cilindro, el polvo se aproxima a las paredes perdiendo velocidad como consecuencia de la fricción contra estas, cayendo al fondo del ciclón.

Con el fin de garantizar la filtración de un alto volumen de aire, los ciclones suelen colocarse en baterías.

En los filtros mojados (de agua), el aire sucio se pasa por un recipiente con agua, en el cual el polvo se asienta saliendo, el aire limpio al exterior. Los filtros textiles se construyen formando varias capas de tejidos situados sucesivamente y que tienen forma de saco (se denominan así también). Estos equipos cuentan con dispositivos para sacudir los sacos, en forma periódica y automática en el colector electrostático el aire es pasado a través de un campo electrostático producido por un alto voltaje de corriente continua, las partículas de polvo se ionizan y son atraídas a placas electrodos en estos equipos la velocidad del aire baja, del rango de 90 a 150 m/min. Para evitar que el polvo precipitado vuelva a ser redispersado por la corriente de aire. (PRILLWITZ, 2002).

### **Máquinas Soplantes**

En dependencia de la capacidad de la instalación, la presión de trabajo necesaria y de las condiciones de trabajo, se emplean en uno de los dos tipos principales de máquinas soplantes: centrífugas o de émbolo o pistón. Ambos tipos presentan gran variedad de formas. Por ejemplo, las máquinas centrífugas se dividen en ventiladores y turbo compresores y las de émbolos en compresores rotatorios, es decir, con movimiento rotatorio del órgano de trabajo (las de paletas rotatorias) y reciprocantes. (PRILLWITZ, 2002).

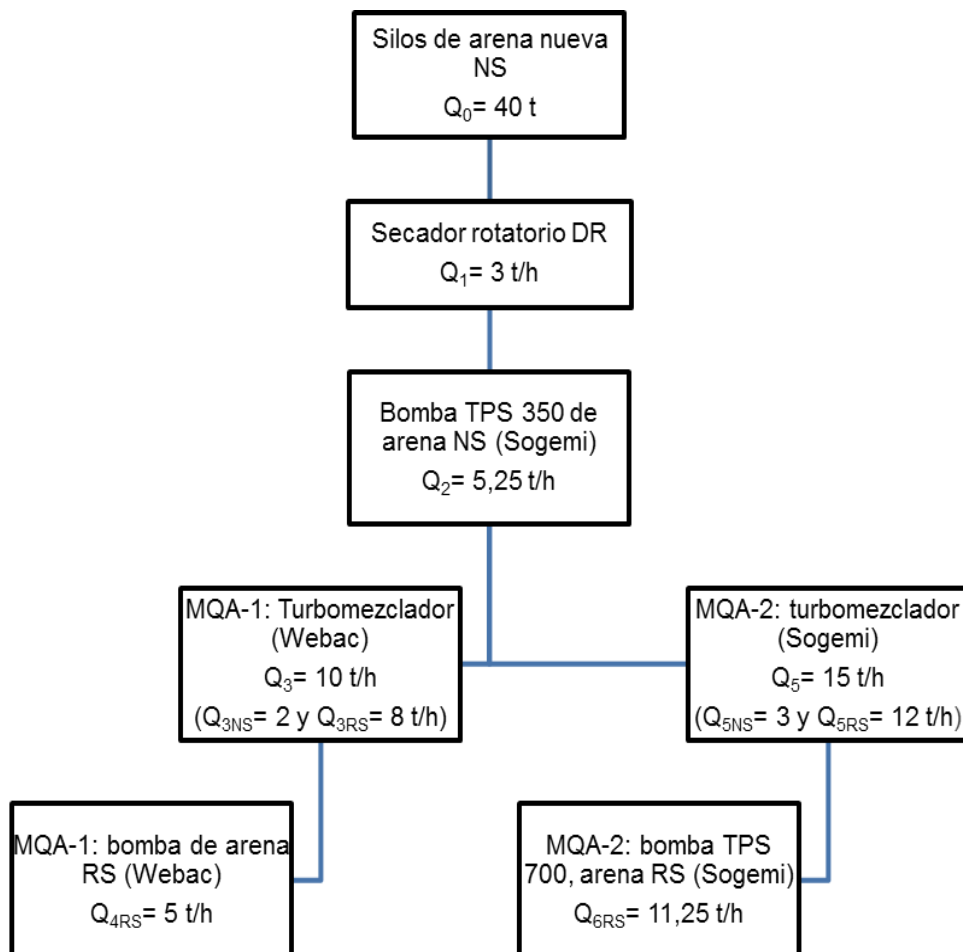
Independientemente de la clasificación de los sistemas neumáticos en compresión y succión, existe una segunda clasificación común a ambos sistemas, dadas por sistemas de alta y bajas presiones entendiendo por alta presión valores por encima de 65 hPa hasta 500 hPa dentro de cuyos límites el fluido de aire puede ser considerado como incomprensible, con pequeño error. Esta clasificación se relaciona directamente con las características de la máquina soplante usada en el sistema. Presiones por debajo de hasta 65 hPa pueden obtenerse en ventiladores centrífugos radiales muy simples, del tipo industrial. Presiones por encima de los 65 hPa obligan a recurrir generalmente a turbocompresores, compresores rotatorios o reciprocantes. No obstante lo planteado, la alta presión puede llegar a 3 o más atmósferas en el caso de sistemas a compresión. En cuanto al sistema de

succión, la presión está físicamente limitada a valores por debajo de la presión atmosférica y raras veces puede exceder a 500 hPa.

Otro parámetro a tener en cuenta en cuanto a la selección de las máquinas soplantes es el volumen de aire a comprimir. Los sistemas de alta presión se caracterizan por comparativamente pequeños volúmenes de aire, del orden de varios miles de ( $\text{m}^3/\text{min}$ ); (PRILLWITZ, 2002).

#### 1.4 Flujo tecnológico del objeto en estudio

La arena nueva sale de los silos principales del taller de fundición pasando por el secador rotatorio donde se acoge al porcentaje de humedad necesario para el proceso de moldeo, desde ese punto ella pasa a la bomba TPS 350 que la envía a los dos turbomezcladores los cuales se encargan de distribuirlas para su utilización en el moldeo para fundición (figura 1.2).



**Figura 1.2.** Flujo Tecnológico del sistema de transporte neumático

Después de utilizada esta arena se recupera y se pasa por la desmoldeadora que a su vez tiene un silo de arena recirculada desde donde se bombea la arena mediante dos bombas una para el turbomezclador uno y la otra para el dos donde nuevamente es utilizada la arena en el proceso de fundición.

### 1.5 Conceptos y definiciones aplicables al transporte neumático

Un paso importante en el diseño de los sistemas de transporte neumáticos es determinar las propiedades y funciones que se necesitan aplicar para obtener un sistema eficiente, dentro de estos se encuentran. (Mansfarrol, 2003)

La concentración en peso de la muestra se define por:

$$\mu = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_a} \quad (1.1)$$

Donde:

$\dot{m}_s$  - flujo másico de sólido (kg/s)

$\dot{m}_a$  - flujo másico de aire (kg/s)

Si consideramos un punto seleccionado arbitrariamente en el tubo, en el cual el aire y las partículas de sólido fluyen, el flujo de la mezcla de aire 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  $\mu$  se considera en función del lugar en la tubería y la definición de (ecuación 1.1), debe ser remplazada por:

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



Donde:  $\dot{m}_a''$  y  $\dot{m}_s''$  son las densidades del flujo másico (kg/m<sup>2</sup>s) del aire y el sólido respectivamente en un cierto punto del tubo.

Los flujos de aire y de partículas sólidas se asumen como flujos paralelos, esto quiere decir que la velocidad del aire ( $v_g$ ) y la velocidad de las partículas sólidas ( $v_M$ ) están en la misma dirección del tubo. Por otro lado como el flujo es homogéneo, el valor absoluto de ( $v_g$ ) y  $v_M$  puede variar a través de su sección transversal.

Un elemento diferencial de volumen  $dV$  en el campo de flujo contiene una masa de aire ( $d_{mg}$ ) y una masa de sólido ( $d_{ms}$ ), los volúmenes correspondientes para el aire y para el sólido se denotan por ( $d_{vg}$ ) y ( $d_{vs}$ ). La suma de esos volúmenes parciales es el volumen total de la mezcla, es decir:

$$dv = d_{vg} + d_{vs} \quad (1.3)$$

La densidad real del aire en el punto del elemento de volumen  $dV$  es:

$$\rho_G = \frac{dm_a}{dV_a} \quad (1.4)$$

y la densidad parcial del aire es:

$$\rho_a = \frac{dm_a}{dV} \quad (1.5)$$

La densidad real del aire ( $\rho_a$ ) es su masa dividida por el volumen ocupado por el gas, la densidad aparente o densidad parcial  $\rho_a$  es la masa dividida por el volumen total de la mezcla sólido - aire.

De forma similar a la ecuación 1.4 y 1.5 se definen las densidades correspondientes para las partículas sólidas.

$$\rho_s = \frac{dm_s}{dV_s} \quad (1.6)$$

$$\rho_s = \frac{dm_s}{dV} \quad (1.7)$$

Donde:

$\rho_s$  - es la densidad real de la partícula sólida.

$\rho_s$  - es la densidad parcial de las partículas en la mezcla.

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

$$\Phi = \frac{dV_g}{dV} \quad (1.8)$$

De las ecuaciones 1.4 y 1.5 se obtiene:

$$\Phi = \frac{\rho_g}{\rho_G} \quad (1.9)$$

De las ecuaciones 1.6, 1.7 y 1.3 se obtiene:

$$\frac{\rho_s}{\rho_s} = 1 - \Phi \quad (1.10)$$

Por otro lado, si  $dl$  es un diferencial de longitud en la dirección del fluido el diferencial de volumen será:

$$dV = dA \cdot dl \quad (1.11)$$

$$dV_g = dA_g \cdot dl$$

$$dV_s = dA_s \cdot dl$$

Donde:  $dA_g$  es el diferencial de área de la sección transversal a través de la cual el gas fluye y  $dA_s$  es el área por dónde fluyen las partículas sólidas. La suma de estas dos áreas parciales es:

$$dA = dA_g + dA_s \quad (1.12)$$

Sobre la base de la ecuación 1.11 la fracción de volumen de gas puede ser escrita de la siguiente forma:

$$\Phi = \frac{dA_g}{dA} \quad (1.13)$$

Esta interpretación de la fracción de vacío  $\Phi$  se necesitará en unión con las ecuaciones de momento lineal.

Con la ayuda de las densidades parciales ( $\rho_g$ ) y ( $\rho_s$ ) la densidad del flujo másico puede ser expresado como:

$$\dot{m}_g'' = \rho_g \cdot V_g \quad (1.14)$$

$$\dot{m}_s'' = \rho_s \cdot V_M \quad (1.15)$$

Donde  $v_g$  es la velocidad del aire y  $v_M$  es la velocidad del material transportado. La densidad del flujo másico es la suma de estos dos flujos.

$$\dot{m} = \rho_s \cdot v_M + \rho_g \cdot v_g \quad (1.16)$$

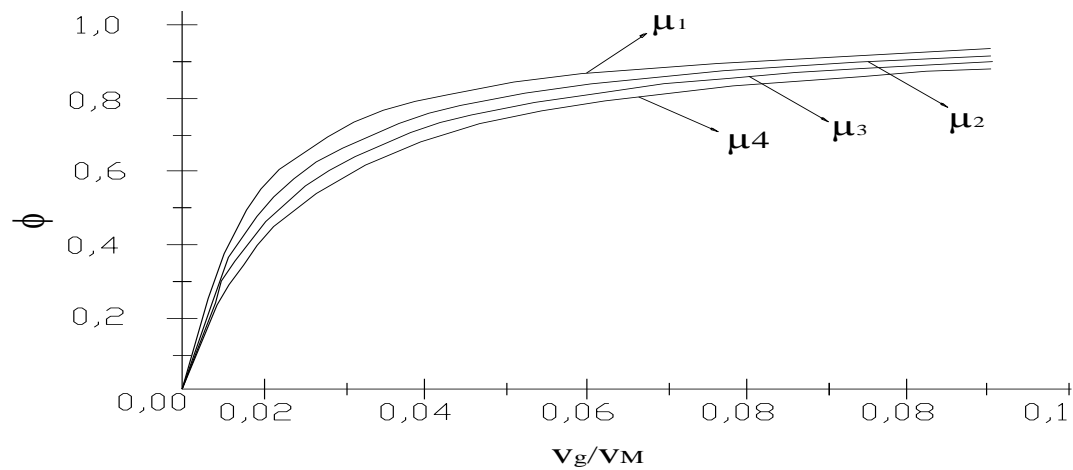
Sustituyendo la ecuación 1.14 y 1.15 en la ecuación 1.2 se obtiene:

$$\mu = \frac{v_M \cdot \rho_s}{v_g \cdot \rho_g} = \frac{v_M (1 - \phi) \rho_s}{v_g \cdot \phi \cdot \rho_g} \quad (1.17)$$

Donde la última igualdad se obtiene de la ecuación 1.9 y 1.10.

Cuando la concentración y la relación entre las velocidades  $\frac{v_g}{v_M}$  son conocidas la

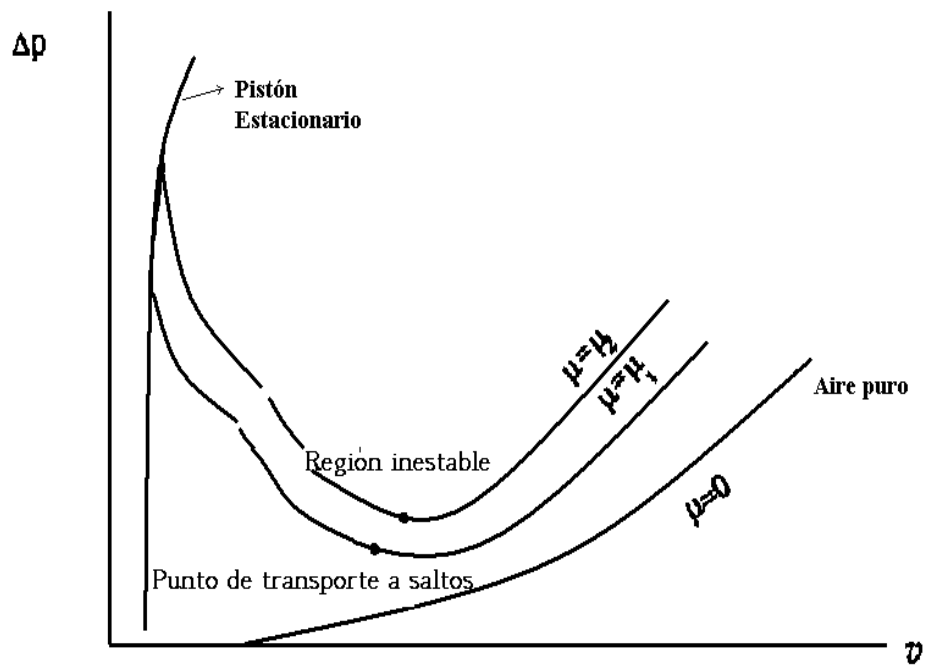
$\phi$  puede ser determinada por la ecuación 1.17 como un ejemplo de esto se puede observar su comportamiento para la arena sílice en la figura 1.3.



**Figura 1.3.** Fracción de vacío en función de la relación ( $v_g / v_M$ ) para diferentes concentraciones.

### 1.6 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.

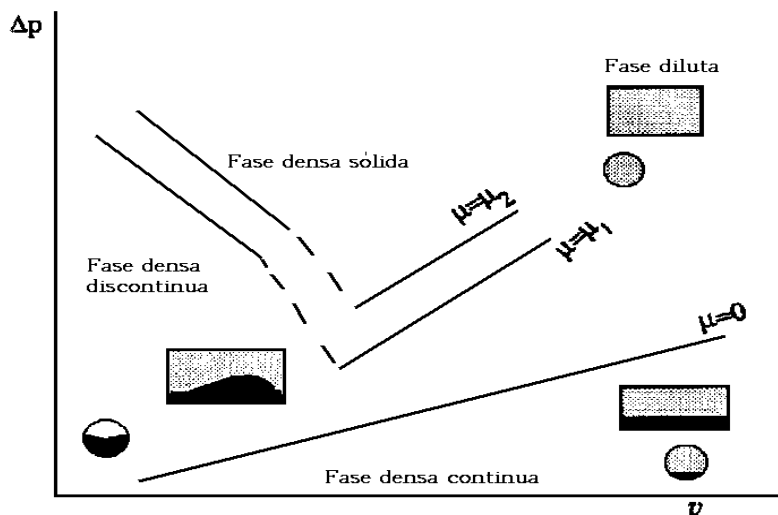


**Figura 1.4.** Diagrama de estado del transporte neumático.

Una gráfica ampliamente usada para ilustrar los diferentes tipos de flujos en el transporte neumático es el llamado diagrama de estado (Torres, 2003) en el que la caída de presión se relaciona con la velocidad del aire.

Como se muestra en la figura 1.3, 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 ( $v_g$ ), está por debajo de la velocidad de transporte a saltos.

El régimen de la fase densa puede ser además subdividido en tres distintas regiones (Jodlowski 1984); Klintworth y Rodes 2001) las cuales se muestran en la figura 1.5.



**Figura1.5** Distintas fases en el transporte neumático.

- 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.

Comparada con la fase diluta, el transporte en fase densa ofrece algunas claras ventajas, este tiene un consumo más bajo de energía, el desgaste es reducido, el separador aire / 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 anterior lo más importante está en que no hay una vía general ni un simple parámetro 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.

### **1.7 Conclusiones parciales**

- Se realizó un análisis detallado de las características que presentan los diferentes tipos de arena para el transporte neumático en especial la arena sílice que es la que vamos a utilizar.
- Se caracterizaron los diferentes tipos de transporte neumático teniendo en cuenta sus diferencias, su utilidad y cuál es más eficiente según el caso que corresponda.
- Se nombraron y describieron los conceptos y notaciones principales de los sistemas de transporte neumático de gran importancia para su correcto funcionamiento.

## Capítulo 2. Modelo de las pérdidas de presión en el transporte neumático de la arena y técnicas experimentales

### 2.1 Introducción

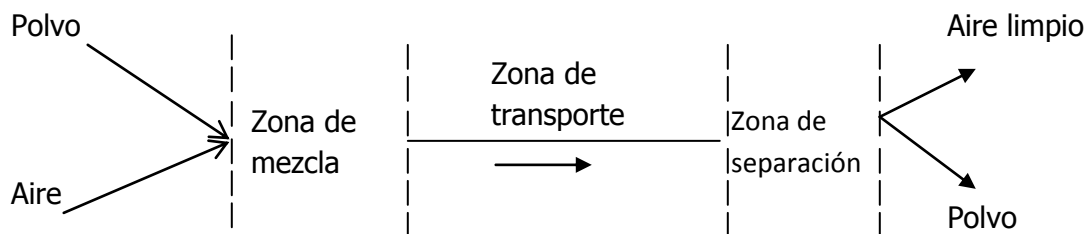
El transporte neumático es muy utilizado en diferentes partes del mundo para el trasiego de diversos materiales, ha demostrado ser una técnica muy eficiente e innovadora en cuanto a los regímenes de explotación, los diseños de sus instalaciones no son muy difíciles y poseen bajo costo económico. En los talleres de fundición el traslado de la arena para los moldes siempre ha sido una ardua tarea por la importancia de hacer más viable la utilización y recuperación de la arena que se utiliza en los moldes de fundición.

#### Objetivo

Proponer las técnicas experimentales y ecuaciones para la evaluación del transporte neumático de arena sílice en el taller de fundición de la empresa mecánica del níquel.

### 2.2 Metodología de cálculo de los sistemas de transporte neumático

Los sistemas de transporte neumático a presión pueden dividirse en tres zonas fundamentales como se muestra en la figura 2.1. (Mansfarrol, 2003)



**Figura 2.1.** Zonas del transporte neumático.

El análisis de cada una de estas zonas debe realizarse por separado, atendiendo a los principios de cálculos presentes en la literatura.

### 2.2.1 Determinación de la longitud de transportación reducida $L_{red}$

La longitud reducida se obtiene mediante la suma de la longitud geométrica del conductor y sus longitudes equivalentes.

La longitud equivalente de una resistencia local se asume como la resistencia en un tramo de tubería horizontal recta en la que las pérdidas de presión causada por el paso de la corriente de aire – material es igual a la que se produce por una resistencia local (concentrada) como son los codos, derivaciones, válvulas de dos vías entre otras. Estas longitudes equivalentes dependen de las propiedades del material y de las dimensiones de los elementos que inducen estas resistencias locales. Como guía para el cálculo se dan los valores aproximados de estas resistencias basadas en los datos experimentales. (Mansfarrol, 2003)

La longitud reducida se obtiene mediante la expresión:

$$L_{red} = \sum l_{hor} + \sum l_{ver} + \sum l_{eq.cod} + \sum l_{eq.val} \quad (2.1)$$

Donde:

$\sum l_{hor}$  = suma de las longitudes de los tramos horizontales.

$\sum l_{ver}$  = suma de las longitudes de los tramos verticales.

$\sum l_{eq.cod}$  = suma de las longitudes equivalentes por concepto de los codos.

$\sum l_{eq.val}$  = suma de las longitudes equivalentes por concepto de las válvulas.

La energía necesaria es la gastada en vencer las diversas resistencias que se oponen al flujo de arena a través de la tubería transportadora.

Esta energía puede expresarse en función de la diferencia de presión de uno a otro extremo de la tubería, del área de la sección transversal de la tubería, y de la velocidad del aire.



### 2.2.2 La potencia consumida en la zona de transporte queda expresada por:

$$N = \frac{(P_1 - P_2) \cdot A \cdot v}{1000} \quad (\text{kW}) \quad (2.2)$$

Donde:

$(P_1 - P_2)$  = Diferencia de presión entre los extremos de la tubería transportadora expresada en (Pa)

$A$  = Área de la sección transversal de la tubería ( $\text{m}^2$ )

$v$  = Velocidad media del aire (m/s)

La potencia total que se necesita para el transporte se determina agregando al valor obtenido en la ecuación 2.2, las pérdidas de potencia que se produce en el compresor, la potencia consumida en introducir o sacar arena de la tubería transportadora y las pérdidas que pudieran ocurrir por caída de presión a través de separadores ciclónicos y filtros en el extremo de descarga. (Mansfarrol, 2003)

Como se puede apreciar, en este método de cálculo de las pérdidas de presión en los tramos horizontales y verticales se basan en coeficientes numéricos obtenidos de manera experimental, en los cuales se encuentran reflejadas las características del material a transportar.

### 2.3 Características de la instalación

La instalación semiautomática del moldeo químico autofraguante 2 (MQA-2) de la firma italiana Sogemi Engineering S.p.a. (*Societa' Generale Macchine Impianti, Milán*) a la vez que permite mantener el moldeo en verde introduce variaciones sustanciales en las trazas de las líneas de arenas nueva (*NS*) y de retorno (*RS*). Contiene una bomba TPS 350 de arena (*NS*): instalada bajo las tolvas (capacidad de 40 t) de arena nueva. La bomba Webac corresponde a la instalación actual del MQA-1 y la TSP 700 al nuevo MQA-2. Operan de forma independiente una de otra. Las tuberías para la arena nueva (*NS*) son de hierro resistente a la abrasión, diámetro DN 100. Básicamente en tramos de 6 m e impulsores neumáticos (11 u)

aproximadamente a 18 m de distancia. Desde el silo de arena principal hay instalada una derivación en “Y” hacia el turbomezclador TMVS 10/1000/2500 de Webac con conexión a la tolva mediante válvula con accionamiento gobernada por los sensores de mínimo máximo de arena e interconectada además a la válvula de cierre de la derivación y a la puesta en marcha o apagado de la bomba TPS 350. . La línea DN 100 de arena (NS) continúa hasta los ejes donde se eleva unos 3,1 m para atravesar el taller a una altura aproximada de 11,87 m y desciende hasta la tolva de arena NS del MQA-2 (*Sogemi Engineering S.p.a.*). El recorrido total suma aproximadamente 197 m. La arena de retorno (RS) de Webac (MQA-1) se mantiene la traza original con tubería DN 100 partiendo del silo de 60 t (ítem 3.01) y empleando la misma bomba neumática de 5 t/h de capacidad. El recorrido se localiza cercano a los ejes 14-E, subida de 11,6 m en 15-E con destino horizontal al eje 15-D (aprox. 20 m) y descenso de 3,1 m en los mismos ejes con avance positivo de 14,4 m y descarga final en la tolva del turbomezclador TMVS 10/1000/2500. El recorrido total abarca unos 62 m. La arena de retorno (RS) proveniente del (MQA-2) tiene una tubería de DN 100 igual a la de arena (NS). Parte de la bomba TPS 700 ubicada debajo del silo de 60 t en la zona de los ejes 13-E donde asciende 7,2 m en pendiente de 80 grados sexagesimales para luego retornar por el mismo eje E hasta la descarga en la tolva de arena de retorno (RS) de la instalación con una pequeña inclinación de 0,5 grados sexagesimales en el recorrido hasta cerca de los ejes 2-E. El recorrido total es de 72,5 m.(Anexo 1)

## **2.4 Tendencias para la determinación de las pérdidas de presión en los sistemas de transporte.**

El transporte neumático de materiales se realiza en presencia de un flujo de aire; la caída de presión en un flujo de aire puro por el interior de un tubo de longitud  $dl$  se calcula por todos los autores por la ecuación de Darcy.

$$dp = \frac{1}{D} \cdot \lambda_a \cdot \frac{\rho_a}{2} \cdot v_a^2 \cdot dl \quad (2.3)$$

Dónde:

$\rho_a$ : densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ )

$v_a$ : velocidad del aire ( $\text{m/s}$ )

$dl$ : diferencial de longitud ( $\text{m}$ )

$D$ : diámetro de la tubería ( $\text{m}$ )

Aunque el coeficiente de fricción del aire  $\lambda_a$  se encuentra próximo a 0,02, un cálculo más exacto se logra utilizando la ecuación de Blasius (Pacheco ,1984).

$$\lambda_a = 0,3164 \cdot \text{Re}^{-\frac{1}{4}} \quad (2.4)$$

Esta ecuación es la preferida por su sencillez y precisión para los números de Reynolds entre  $2320 < \text{Re} < 10^5$ .

Para flujo completamente turbulento (Lampinen, 1991) es válida la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_a}} = 2.0 \cdot \log_{10}(\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda_a}) - 0.8 \quad (2.5)$$

El número de Reynolds se define por:

$$\text{Re} = \frac{v_a \cdot D}{\nu} \quad (2.6)$$

La caída de presión debido al aire limpio tiene una fuerte dependencia con la distribución de la velocidad y de la tensión tangencial dentro del tubo (Pacheco,1984) que concebido como aislado del efecto deformante por la presencia de las partículas sólidas en el flujo, traslada y dificulta el cálculo de la caída debido al transporte del material. Esta circunstancia real reclama el establecer en forma clara y precisa los límites dentro de los cuales este criterio es válido. (Mansfarrol, 2003)

En el transporte neumático por tuberías horizontales y verticales, se han diferenciado, perfectamente, dos zonas:

1. La zona dispersa.
2. La zona de dispersión.

La diferencia entre ambas zonas está establecida por el carácter constante de la velocidad de la partícula en la zona dispersa y el carácter variable de la misma en la zona de dispersión.

En el transporte neumático por tuberías verticales, si el material es transportado con suficiente velocidad, lo hace a través de toda la sección transversal del conductor. Al disminuir hasta cierto límite la velocidad transportadora del aire, su distribución se hace más densa alrededor del perímetro del tubo, y el flujo principal del sólido transcurre por el centro del conductor.

Estas conclusiones han sido comprobadas en diferentes trabajos (Pacheco 1984; Lesme 1996) y en nuestras investigaciones con arena sílice. Caracteriza además el transporte por tuberías verticales a diferencia con el horizontal una fuerte influencia en el primero del peso de la columna de material, mientras en el segundo no hay relación sustancial entre la fuerza que realiza el medio transportador y el peso del sólido transportado. El transporte del sólido por el tubo horizontal tiende en las condiciones de no-homogeneidad de la mezcla a moverse por el fondo del tubo. Es por tanto muy probable la conclusión de que a pesar de la deformación, el perfil de velocidades del aire en tuberías verticales, mantenga cierta simetría con el eje del conductor, mientras que en tuberías horizontales su aspecto es más complejo.

Varios investigadores han orientado sus trabajos a la evaluación de las pérdidas de presión en tramos horizontales y verticales de sistemas bifásicos, pero sus respuestas en ocasiones no se han fundamentado teóricamente, o no se han presentado datos experimentales que corroboren las teorías planteadas, y en otros casos, las soluciones encontradas han sido incompletas y no abarcan la totalidad de los factores que influyen en esta problemática.

La primera ecuación popularizada sobre el transporte neumático de sistemas bifásicos fue publicada por Gasterstadt en el año 1924, pero dicho autor no hizo generalizaciones de su proposición teniendo en cuenta la influencia del tamaño del tubo, la velocidad del aire, las características del material transportado. (Pacheco 1984; Weber 1991).

El coeficiente de Gasterstadt considera el aumento de las pérdidas de presión durante el transporte neumático de la mezcla en comparación con las pérdidas producto del movimiento del aire limpio en el caso de tuberías rectas, en este coeficiente influyen fundamentalmente las propiedades físicas del material transportado, recogándose en la bibliografía gran diversidad de valores del mismo, (Pacheco; 1984).

Para el cálculo de la caída de presión en el transporte neumático la siguiente versión modificada de la ecuación 2.1, siempre se puede encontrar en la literatura.

$$dp = \frac{1}{D} \cdot (\lambda_a + \mu \cdot \lambda_s) \cdot \frac{\rho_a}{2} \cdot v_a^2 \cdot dl \quad (2.7)$$

Dónde:

$\mu$ : concentración (kg/kg)

La ecuación 2.5 contiene solo a  $\mu$  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, están contenidos en el coeficiente de pérdida de presión de las partículas sólidas ( $\lambda_s$ ), las cuales se determinan separadamente para cada material.

Para el cálculo del coeficiente de pérdidas de presión de las partículas sólidas ( $\lambda_s$ ), en la literatura se relacionan varias ecuaciones donde se busca la dependencia de  $\lambda_s$  con valores obtenidos directamente de la investigación, o aplicando la teoría de semejanza. En el trabajo desarrollado por Pacheco (1984), se realiza un resumen de las principales publicaciones y la forma del modelo

obtenidas en la antigua URSS, donde se explica la amplitud de variación del coeficiente de pérdidas, distinto para tuberías horizontales que para verticales y dependiendo de gran cantidad de factores.

Para estimar el coeficiente de pérdidas de presión ( $\lambda_s$ ) Stegmaier (1978) resumió y correlacionó diversas ecuaciones para el transporte horizontal de sólidos granulares finos los cuales contienen algunos números característicos de similitud. La misma idea ha sido usada por Weber (1982), quien encontró una correlación del coeficiente de pérdida de presión para el transporte neumático vertical basado en datos experimentales. A fin de expresar esos modelos, primero introduciremos dos números adimensionales, el número de Froude relacionado al tubo y al sólido.

$$F_r = \frac{v_a^2}{D \cdot a} \quad (2.8)$$

y

$$Fr_s = \frac{v_{fo}^2}{d_s \cdot a} \quad (2.9)$$

Dónde:

$d_s$ : diámetro de la partícula (m)

$v_{fo}$ : velocidad del aire a la cual la partícula flota (m/s)

$g$ : aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

El modelo matemático desarrollado por Stegmaier para transporte horizontal es:

$$\lambda_s = 2.1 \cdot \mu^{-0.3} \cdot F_r^{-1} \cdot F_{rs}^{0.25} \cdot \left( \frac{D}{d_s} \right)^{0.1} \quad (2.10)$$

La ecuación 2.10 es un valor promedio para la mayoría de los sólidos, esta nos da una desviación estándar bastante alta, la cual no es aceptada para la correlación de muchos sólidos.

Para el transporte vertical a partir de los datos de medición. La correlación del coeficiente de pérdida de presión para el transporte neumático vertical desarrollado por Weber es:

$$\lambda_s = \frac{v_a/v_M}{1200} + \frac{2v_a/C_M}{Fr} \quad (2.11)$$

La correlación de la ecuación obtenida por Weber es mejor que el modelo desarrollado por Stegmaier.

Otros autores (Wypych 1989; Pan 2001), proponen obtener un coeficiente de pérdidas de presión que incluya el gas y las partículas sólidas.

$$\Delta P = \lambda_{as} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_a^2 \cdot \frac{L}{D} \quad (2.12)$$

Donde para el cálculo del coeficiente de pérdidas de presión se establecen varias ecuaciones, una de las más utilizadas es:

$$\lambda_{as} = 3.07 \cdot \mu^{1.249} \cdot Fr^{-0.786} \quad (2.13)$$

La amplitud de variación publicada del coeficiente de Gasterstadt, distinta para tubo horizontal que para vertical y dependiente de una gran cantidad de factores, ha creado serias dificultades para obtener ecuaciones generales que permitan evaluar las pérdidas por fricción en el transporte neumático.

Ninguno de los modelos propuestos, resuelve la complejidad evaluativa del coeficiente en el transporte neumático, sus diferencias son solo de forma de presentación del coeficiente. Es conocido de la experiencia que en el transporte

neumático vertical la influencia del peso prevalece a bajas velocidades, pero con el incremento de la velocidad, la fricción gana importancia, por lo tanto en los cálculos de la pérdida de presión no se puede depender solo del peso del sólido. En el transporte neumático por tuberías horizontales, el cómo se distribuye el material en el tubo, disperso o amontonado, juega un papel fundamental en la evaluación de las pérdidas de presión.

Las últimas publicaciones científicas que trabajan en la solución del problema del movimiento de sistemas bifásicos (Mason, 1997; Sommerfeld, 1992; Maugín, 1980) utilizan simultáneamente las ecuaciones del movimiento de balance material y de estado. Sin embargo sobre la base de los análisis experimentales realizados en la planta piloto del ISMM. Moa y un exhaustivo análisis de la bibliografía existente, permitieron arribar a la aceptación del modelo que se describe en la ecuación 2.14 y 2.15. Las mismas han sido utilizadas con anterioridad en el estudio del comportamiento de materiales como el cemento obteniendo buenos resultados.

Del resultado del error promedio total podemos inferir la validez de este modelo para su aplicación en la determinación de las pérdidas de presión en los tramos horizontales. Quedando estructurado de la siguiente manera dicho modelo:

$$\frac{dp}{dl} = \frac{1}{D} \cdot \left( 0.3164 \cdot \left( \frac{v_a \cdot D}{v} \right) + 0.231 \cdot \mu^{1-0.01} \cdot \left( \frac{v_a^2}{D \cdot a} \right)^{-1} \cdot \left( \frac{v_f^2}{d_p \cdot a} \right)^{0.25} \cdot \left( \frac{D}{d_p} \right)^{0.1} \right) \cdot \frac{\rho_a}{2} \cdot v_a^2 \quad (2.14)$$

Con el resultado del error promedio total se aprecia la validez de este modelo para su aplicación en la determinación de las pérdidas de presión en los tramos verticales. Quedando expresada de la siguiente forma dicho modelo:

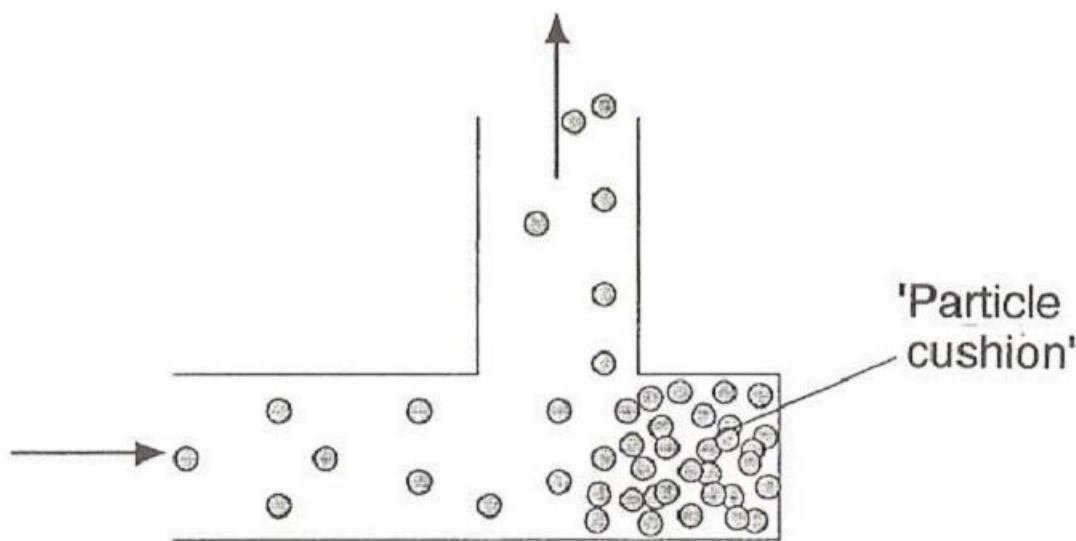
$$\frac{dp}{dl} = \frac{1}{D} \cdot \left( 0.3164 \cdot \left( \frac{v_a \cdot D}{v} \right) + 0.256 \cdot \mu^{1-0.01} \cdot \left( \frac{v_a^2}{D \cdot a} \right)^{-1} \cdot \left( \frac{v_f^2}{d_p \cdot a} \right)^{0.25} \cdot \left( \frac{D}{d_p} \right)^{0.1} \right) \cdot \frac{\rho_a}{2} \cdot v_a^2 \quad (2.15)$$



#### 2.4.1 Pérdida de presión por resistencia locales en los codos

Cuando se diseña las líneas de transporte deben considerarse los codos que existan en la misma. Se recomienda minimizar el número de codos, ya que ellos constituyen los puntos de mayor erosión de tuberías y atrición de sólidos.

Anteriormente se consideraba que la curvatura de los codos debía ser suave para evitar grandes pérdidas de carga, sin embargo se ha probado que el uso de Ts con un tramo ciego (ver Figura 2.2) alargan el tiempo de vida útil en más de 15 veces respecto a un codo convencional. En la parte ciega se forma un colchón de partículas que amortiguan los golpes contra las cañerías.



**Figura 2.2.** T ciega empleada en el transporte neumático

**Fuente:** Rodes (2003)

Según Rodes (2003) la regla del pulgar sugiere asignarle al codo una caída de presión equivalente a 7.5m de una tubería vertical.

#### 2.5 Propiedades termofísicas del aire

Las propiedades termofísicas del aire pueden ser calculadas a través de las ecuaciones empíricas reportadas por Tiwari (2002); Montero (2005). Estas propiedades son necesarias para el cálculo del intercambio de calor durante el transporte del combustible por tuberías, las mismas pueden ser determinadas a través de las ecuaciones empíricas reportadas por Tiwari (2002) y Montero (2005)

$$k = 0,0244 + 0,6763 \cdot 10^{-4} \cdot t_p \quad (2.16)$$

$$\rho = \frac{353,44}{t_p + 273,15} \quad (2.17)$$

$$Cp = 999,2 + 0,1434 \cdot t_p + 1,101 \cdot 10^{-4} \cdot t_p^2 - 6,7581 \cdot 10^{-8} \cdot t_p^3 \quad (2.18)$$

$$\mu = 1,718 \cdot 10^{-5} + 4,620 \cdot 10^{-8} \cdot t_p \quad (2.19)$$

Siendo:  $t_p$  – temperatura pelicular; (°C).

$$t_p = \frac{t_s + t_a}{2} \quad (2.20)$$

Donde:  $k$  - coeficiente de conductividad térmica del aire; (W/m·°C).

$\rho$  - densidad del aire; (kg/m<sup>3</sup>).

$c_p$  - capacidad calorífica del aire a presión constante; (J/kg·°C).

$\mu$  - coeficiente dinámico de viscosidad del aire; (Pa·s).

$t_a$  - temperatura del aire; (°C).

$t_s$  - temperatura de la superficie; (°C).

### 2.5.1 Cálculo de los costos de transporte neumático

El costo de operación se determina para decidir cuáles son los mejores puntos de operación en el que la máquina es eficiente con un mínimo gasto de energía. Este queda determinado por la ecuación 2.21.

$$C = N \cdot T_t \cdot T_e \cdot 10^{-3} \quad (2.21)$$

Donde:

$C$  - Costo de transporte; (CUC/año)

$N$  – Potencia de flujo; (W)

$T_t$  - Tiempo de trabajo; (h/año)

$T_e$  - Tarifa eléctrica; (CUC/kW.h)

### 2.6 Técnicas experimentales empleadas

Las técnicas experimentales son de vital importancia para el estudio de cualquier tipo de material a transportar, dichas técnicas al aplicarlas arrojan una gran información, lo que a través de ella podemos conocer cuál es la granulometría del material a estudiar, así como a qué velocidades se debe transportar el mismo.

### 2.6.1 Granulometría

Con el fin de determinar la composición granulométrica de la arena se realizó el cribado de las muestras totales. Para ello se utilizó un juego de tamices Serie Taylor, cuyas características se muestran en la siguiente tabla. (2.1).

**Tabla 2.1.** Tamices utilizados y aberturas de las mallas.

| No. Tamiz (mm) | Abertura de las mallas (mm) |
|----------------|-----------------------------|
| 0,85           | 20                          |
| 0,60           | 30                          |
| 0,43           | 40                          |
| 0,30           | 50                          |
| 0,21           | 70                          |
| 0,15           | 100                         |
| 0,11           | 150                         |
| 0,08           | 200                         |
| 0,05           | 270                         |

### 2.6.2 Cribado seco de las muestras.

El cribado por vía seca se le realizó a la arena para ver qué porcentaje de la misma es mayor. Para ello se tomó una muestra de la arena con el objetivo de tener mayor exactitud de las propiedades que ella tiene al ser transportada.

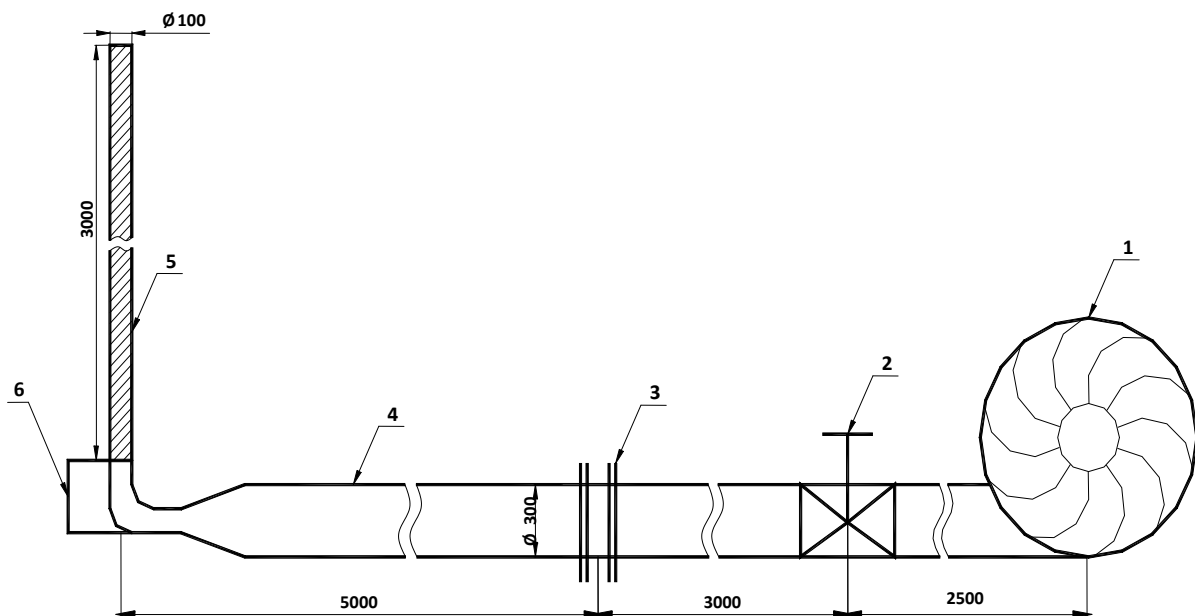
El tamizado se realizó en una criba eléctrica, en la cual permaneció el material aproximadamente 45 minutos. Luego se pesó cada tamiz con el retenido y sin este, y por diferencia se logra saber la masa del material que hay en cada tamiz. Posteriormente se calculan sus porcentajes en peso, con respecto a la muestra original. (Anexo 2)

### 2.6.3 Técnica experimental para determinar la velocidad de flotación

Para la determinación de este parámetro se utilizó una instalación experimental situada en áreas del Instituto Minero Metalúrgico de Moa, los detalles de la misma se encuentran en la figura 2.3:

Las partes componentes de esta instalación son:

1. Fuente de aire (Ventilador)
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.



**Figura 2.3** Instalación experimental, donde se determinó la velocidad de flotación para distintas fracciones de la arena sílice.

Para determinar la velocidad de flotación de las partículas primeramente se estableció un flujo mínimo estacionario de aire a través del conducto, este valor se controla a través del 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/s comenzando a una velocidad mínima de 0,5 (m/s) para cada experimento realizado, el tiempo de espera entre incrementos fue de 1 minuto para cada caso. Se observó el momento en que las partículas se mantuvieron flotando dentro del tubo y se tomó la lectura del flujo de aire  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) por el flujómetro instalado con

este fin. La velocidad del flujo de gas a la cual las partículas flotan se calcula por la fórmula:

$$V_G = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (m/s) \quad (2.22)$$

Donde:

D – diámetro interior de la tubería, (m)

Q – flujo de aire, (m<sup>3</sup>/s)

El largo del tubo vertical utilizado L = 3000 mm, lo cual equilibra la velocidad del gas a régimen turbulento. (Anexo 3)

## **2.7 Conclusiones parciales**

- Los métodos experimentales de investigación utilizados se complementan con el empleo de una base experimental y equipamiento adecuado para el desarrollo de las pruebas realizadas.
- Se propusieron las técnicas experimentales y ecuaciones necesarias para el desarrollo de los resultados a obtener en el trabajo.

## Capítulo 3. Análisis de los resultados experimentales y evaluación del transporte neumático

### 3.1 Introducción

El estudio de las propiedades físicas así como la composición granulométrica y distribución del tamaño de las partículas de la arena sílice que se utiliza para moldeo en el taller de fundición de la empresa mecánica del níquel, son de importancia en la caracterización del material objeto de estudio, la obtención de los diferentes parámetros del mismo que describen el comportamiento de la transportación neumática y contribuyen con su perfeccionamiento.

#### Objetivo

Analizar los resultados experimentales y de cálculo, considerando el impacto ambiental y económico asociado al traslado de la arena sílice por tuberías empleando el sistema de transporte neumático como una vía de mayor eficiencia y rapidez en la construcción de moldes para la fundición.

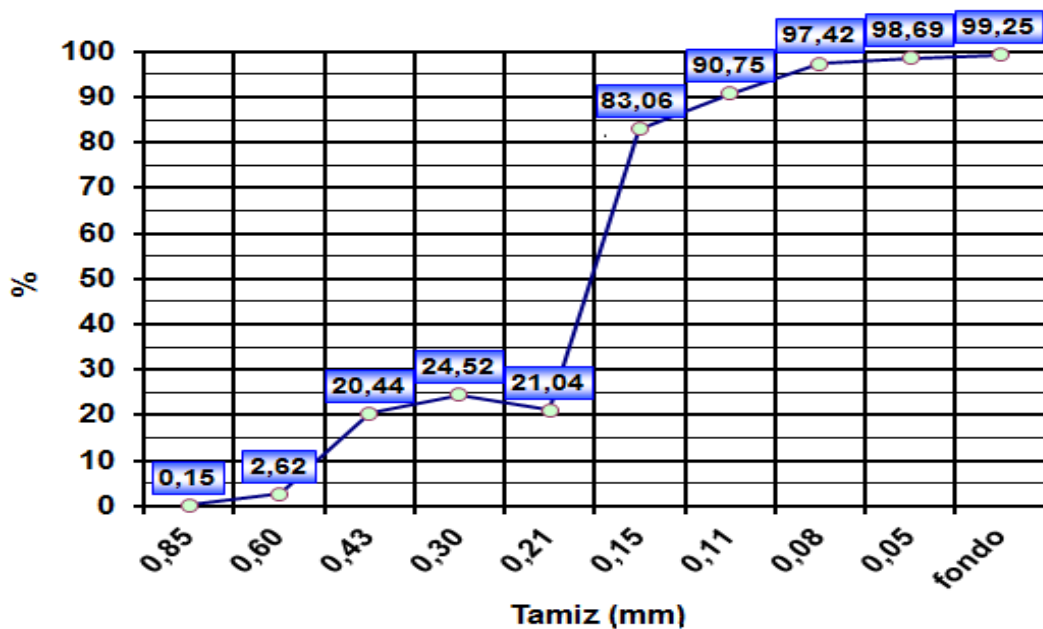
### 3.2 Análisis granulométrico

Para realizar la adecuada evaluación del sistema de transporte neumático, se realizó el análisis granulométrico a varias muestras de arena sílice, en las tablas que se muestran a continuación se refleja de manera general el porcentaje del tamaño de las partículas que posee dicha arena.

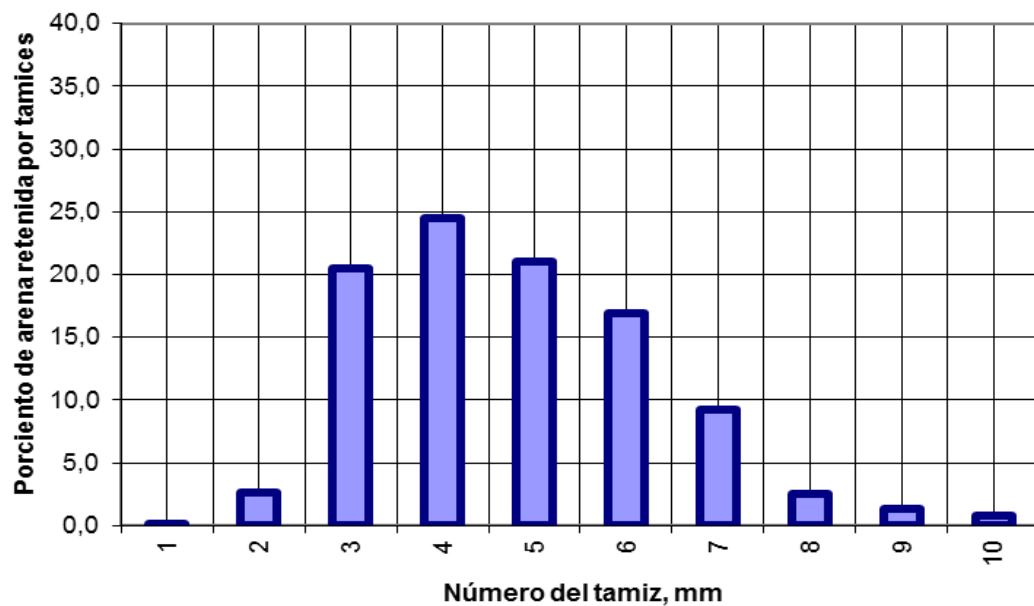
**Tabla 3.1.** Análisis granulométrico de la arena sílice.

| No. Tamiz<br>(mm) | Mesh  | Retenido<br>(%) | Acumulado<br>(%) | Factor | Factor<br>(%) | Valor<br>Gráfico |
|-------------------|-------|-----------------|------------------|--------|---------------|------------------|
| 0,85              | 20    | 0,15            | 0,15             | 10     | 1,5           | 0,15             |
| 0,6               | 30    | 2,62            | 2,77             | 20     | 52,4          | 2,62             |
| 0,43              | 40    | 20,44           | 23,21            | 30     | 613,2         | 20,44            |
| 0,3               | 50    | 24,52           | 47,73            | 40     | 980,8         | 24,52            |
| 0,21              | 70    | 21,04           | 68,77            | 50     | 1052          | 21,04            |
| 0,15              | 100   | 16,94           | 85,71            | 70     | 1185,8        | 83,06            |
| 0,11              | 150   | 9,25            | 94,96            | 100    | 925           | 90,75            |
| 0,08              | 200   | 2,58            | 97,54            | 140    | 361,2         | 97,42            |
| 0,05              | 270   | 1,31            | 98,85            | 200    | 262           | 98,69            |
| fondo             | fondo | 0,75            | 99,6             | 300    | 225           | 99,25            |
| <b>Total</b>      |       |                 |                  |        | <b>5658,9</b> |                  |

A partir de la tabla 3.1 se obtienen los gráficos de distribución granulométrica, que representan según el tipo de tamiz que por ciento de arena retenida obtengo en el análisis (figura 3.1 y 3.2).



**Figura 3.1.** Gráfico de distribución granulométrica.



**Figura 3.2.** Retenido de los tamices en porciento.

### 3.3 Modelación de la velocidad de flotación de la arena sílice

Para el análisis de la velocidad de flotación se utilizó la instalación experimental situada en el laboratorio de mecánica de los fluidos del Instituto Superior Minero Metalúrgico, donde se llegó a la siguiente conclusión (tabla 3.2).

**Tabla 3.2.** Velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas.

| <b>ds (mm)</b> | <b><math>v_f</math> (m/s)</b> | <b>Contenido de humedad (%)</b> |
|----------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 0,150          | 0,9                           | 1 a 1,5                         |

Para el diámetro de partícula de arena sílice que se utiliza en el taller de fundición (0,150 mm), con un contenido de humedad de 1 a 1,5 por ciento, se obtuvo mediante el experimento realizado que en el momento en que las partículas comenzaban a flotar la velocidad del aire era de 0,9 m/s, siendo esta su velocidad de flotación.

### 3.4 Resultados de la simulación de la caída de presión

Para la simulación de la caída de presión en el sistema de transporte neumático del taller de fundición de la empresa mecánica del níquel se trabajó en cuatro simulaciones distintas manteniendo en cada uno de estas la concentración del sólido constante, y variándola según se cambia de simulación para encontrar las caídas de presión y la potencia de flujo, resultados que se muestran en la tabla 3.3.



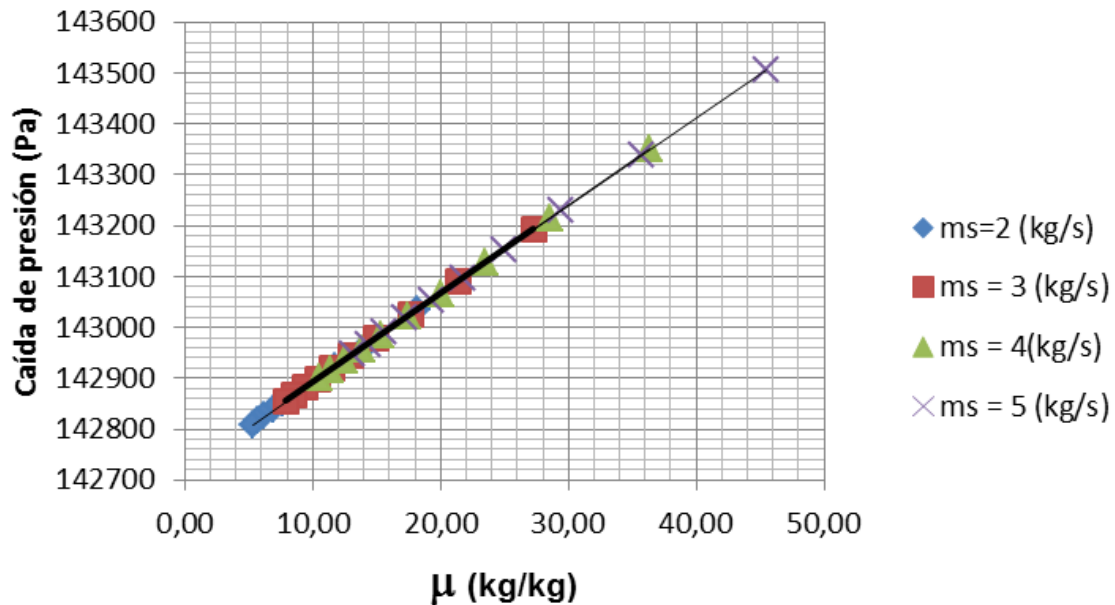
**Tabla 3.3.** Análisis de la caída de presión y potencia de flujo.

| Nº | $m_a$ (kg/s) | $m_a$ (m <sup>3</sup> /h) | $Q_a$ (m <sup>3</sup> /s) | $m_s$ (kg/s) | $\mu$ (kg/kg) |
|----|--------------|---------------------------|---------------------------|--------------|---------------|
| 1  | 0,11         | 316,8                     | 0,088                     | 2            | 18,18         |
| 2  | 0,14         | 403,2                     | 0,112                     | 2            | 14,29         |
| 3  | 0,17         | 489,6                     | 0,136                     | 2            | 11,76         |
| 4  | 0,2          | 576                       | 0,16                      | 2            | 10,00         |
| 5  | 0,23         | 662,4                     | 0,184                     | 2            | 8,70          |
| 6  | 0,26         | 748,8                     | 0,208                     | 2            | 7,69          |
| 7  | 0,29         | 835,2                     | 0,232                     | 2            | 6,90          |
| 8  | 0,32         | 921,6                     | 0,256                     | 2            | 6,25          |
| 9  | 0,35         | 1008                      | 0,28                      | 2            | 5,71          |
| 10 | 0,38         | 1094,4                    | 0,304                     | 2            | 5,26          |
| 11 | 0,11         | 316,8                     | 0,088                     | 3            | 27,27         |
| 12 | 0,14         | 403,2                     | 0,112                     | 3            | 21,43         |
| 13 | 0,17         | 489,6                     | 0,136                     | 3            | 17,65         |
| 14 | 0,2          | 576                       | 0,16                      | 3            | 15,00         |
| 15 | 0,23         | 662,4                     | 0,184                     | 3            | 13,04         |
| 16 | 0,26         | 748,8                     | 0,208                     | 3            | 11,54         |
| 17 | 0,29         | 835,2                     | 0,232                     | 3            | 10,34         |
| 18 | 0,32         | 921,6                     | 0,256                     | 3            | 9,38          |
| 19 | 0,35         | 1008                      | 0,28                      | 3            | 8,57          |
| 20 | 0,38         | 1094,4                    | 0,304                     | 3            | 7,89          |
| 21 | 0,11         | 316,8                     | 0,088                     | 4            | 36,36         |
| 22 | 0,14         | 403,2                     | 0,112                     | 4            | 28,57         |
| 23 | 0,17         | 489,6                     | 0,136                     | 4            | 23,53         |
| 24 | 0,2          | 576                       | 0,16                      | 4            | 20,00         |
| 25 | 0,23         | 662,4                     | 0,184                     | 4            | 17,39         |
| 26 | 0,26         | 748,8                     | 0,208                     | 4            | 15,38         |
| 27 | 0,29         | 835,2                     | 0,232                     | 4            | 13,79         |
| 28 | 0,32         | 921,6                     | 0,256                     | 4            | 12,50         |
| 29 | 0,35         | 1008                      | 0,28                      | 4            | 11,43         |
| 30 | 0,38         | 1094,4                    | 0,304                     | 4            | 10,53         |
| 31 | 0,11         | 316,8                     | 0,088                     | 5            | 45,45         |
| 32 | 0,14         | 403,2                     | 0,112                     | 5            | 35,71         |
| 33 | 0,17         | 489,6                     | 0,136                     | 5            | 29,41         |
| 34 | 0,2          | 576                       | 0,16                      | 5            | 25,00         |
| 35 | 0,23         | 662,4                     | 0,184                     | 5            | 21,74         |
| 36 | 0,26         | 748,8                     | 0,208                     | 5            | 19,23         |
| 37 | 0,29         | 835,2                     | 0,232                     | 5            | 17,24         |
| 38 | 0,32         | 921,6                     | 0,256                     | 5            | 15,63         |
| 39 | 0,35         | 1008                      | 0,28                      | 5            | 14,29         |
| 40 | 0,38         | 1094,4                    | 0,304                     | 5            | 13,16         |

**Tabla 3.3. (Continuación)** Análisis de la caída de presión y potencia de flujo.

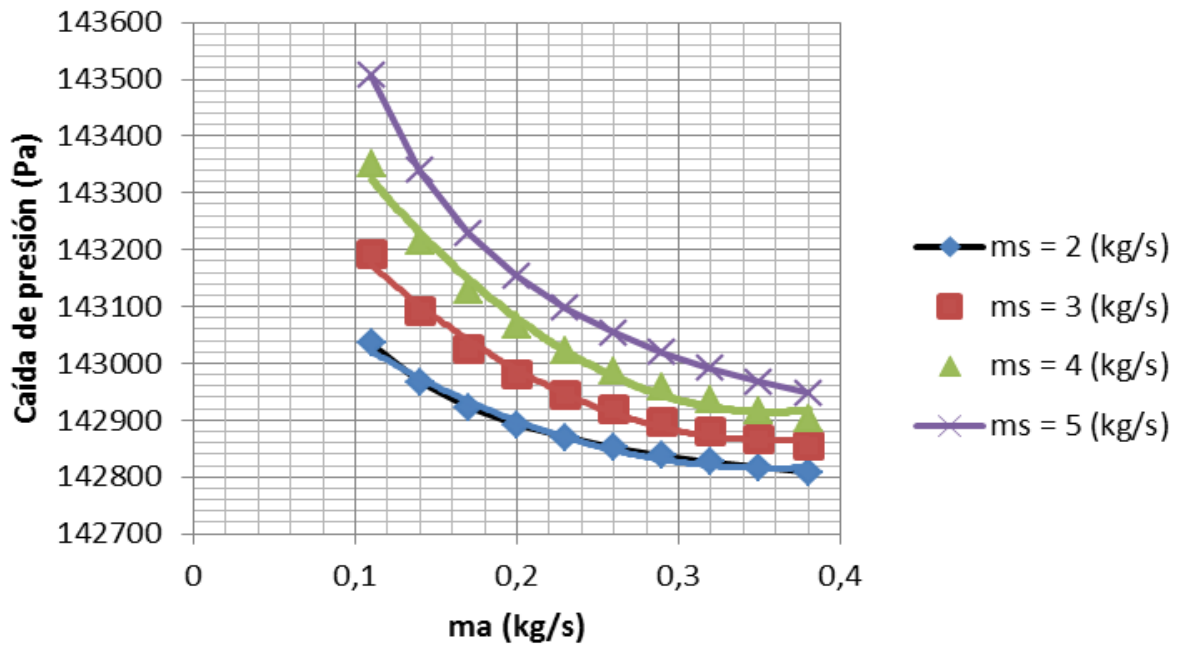
| dP Vertical (Pa) | dP Horizontal (Pa) | dP Total (Pa) | Q <sub>s</sub> (m3/s) | N (W)      | Costo (cuc/año) |
|------------------|--------------------|---------------|-----------------------|------------|-----------------|
| 83210,079        | 59824,779          | 143034,858    | 0,00153846            | 12807,1211 | 168,29          |
| 83168,927        | 59798,076          | 142967,003    | 0,00153846            | 16232,2536 | 213,29          |
| 83142,241        | 59780,759          | 142923        | 0,00153846            | 19657,4095 | 258,30          |
| 83123,527        | 59768,616          | 142892,143    | 0,00153846            | 23082,5769 | 303,31          |
| 83109,674        | 59759,626          | 142869,3      | 0,00153846            | 26507,7501 | 348,31          |
| 83099,004        | 59752,703          | 142851,707    | 0,00153846            | 29932,9269 | 393,32          |
| 83090,532        | 59747,205          | 142837,737    | 0,00153846            | 33358,1053 | 438,33          |
| 83083,641        | 59742,733          | 142826,374    | 0,00153846            | 36783,2846 | 483,33          |
| 83077,926        | 59739,025          | 142816,951    | 0,00153846            | 40208,4647 | 528,34          |
| 83073,109        | 59735,899          | 142809,008    | 0,00153846            | 43633,6446 | 573,35          |
| 83305,782        | 59886,88           | 143192,662    | 0,00230769            | 12931,3989 | 169,92          |
| 83244,304        | 59846,987          | 143091,291    | 0,00230769            | 16356,4353 | 214,92          |
| 83204,437        | 59821,117          | 143025,554    | 0,00230769            | 19781,5343 | 259,93          |
| 83176,48         | 59802,976          | 142979,456    | 0,00230769            | 23206,6656 | 304,94          |
| 83155,784        | 59789,547          | 142945,331    | 0,00230769            | 26631,8147 | 349,94          |
| 83139,844        | 59779,203          | 142919,047    | 0,00230769            | 30056,975  | 394,95          |
| 83127,187        | 59770,99           | 142898,177    | 0,00230769            | 33482,1421 | 439,96          |
| 83116,892        | 59764,31           | 142881,202    | 0,00230769            | 36907,3136 | 484,96          |
| 83108,354        | 59758,77           | 142867,124    | 0,00230769            | 40332,4881 | 529,97          |
| 83101,158        | 59754,1            | 142855,258    | 0,00230769            | 43757,6644 | 574,98          |
| 83401,16         | 59948,771          | 143349,931    | 0,00307692            | 13055,8706 | 171,55          |
| 83319,425        | 59895,733          | 143215,158    | 0,00307692            | 16480,7597 | 216,56          |
| 83266,421        | 59861,339          | 143127,76     | 0,00307692            | 19905,7685 | 261,56          |
| 83229,252        | 59837,22           | 143066,472    | 0,00307692            | 23330,84   | 306,57          |
| 83201,738        | 59819,366          | 143021,104    | 0,00307692            | 26755,9481 | 351,57          |
| 83180,545        | 59805,614          | 142986,159    | 0,00307692            | 30181,0785 | 396,58          |
| 83163,717        | 59794,694          | 142958,411    | 0,00307692            | 33606,2234 | 441,59          |
| 83150,03         | 59785,813          | 142935,843    | 0,00307692            | 37031,3784 | 486,59          |
| 83138,679        | 59778,447          | 142917,126    | 0,00307692            | 40456,5403 | 531,60          |
| 83129,112        | 59772,239          | 142901,351    | 0,00307692            | 43881,7072 | 576,61          |
| 83496,298        | 60010,505          | 143506,803    | 0,00384615            | 13180,5479 | 173,19          |
| 83394,356        | 59944,356          | 143338,712    | 0,00384615            | 16605,2385 | 218,19          |
| 83328,249        | 59901,459          | 143229,708    | 0,00384615            | 20030,1238 | 263,20          |
| 83281,891        | 59871,378          | 143153,269    | 0,00384615            | 23455,1125 | 308,20          |
| 83247,575        | 59849,11           | 143096,685    | 0,00384615            | 26880,1619 | 353,21          |
| 83221,143        | 59831,958          | 143053,101    | 0,00384615            | 30305,2492 | 398,21          |
| 83200,155        | 59818,339          | 143018,494    | 0,00384615            | 33730,3617 | 443,22          |
| 83183,085        | 59807,262          | 142990,347    | 0,00384615            | 37155,4917 | 488,22          |
| 83168,927        | 59798,076          | 142967,003    | 0,00384615            | 40580,6339 | 533,23          |
| 83156,995        | 59790,333          | 142947,328    | 0,00384615            | 44005,7851 | 578,24          |

Con el empleo de los parámetros del modelo característicos para la arena sílice (tabla 3.3), se estudia el comportamiento de la caída de presión en función de la concentración de la mezcla y la velocidad del aire, manteniendo el flujo del sólido constante en cuatro simulaciones diferentes. (figura 3.3 y 3.4)



**Figura 3.3.** Caída de presión en función de la concentración de la mezcla.

Se demuestra mediante la simulación de la figura 3.3, que para los valores de concentración de la mezcla de 5,26 a 45,45 (kg/kg) la caída de presión varía desde 142809,008 hasta 143506,803 (Pa), aumentando de forma lineal. Se determina que para las concentraciones de sólido 2; 3; 4 y 5 la relación de caída de presión se mantiene invariante debido a que se rige por la concentración de la mezcla.



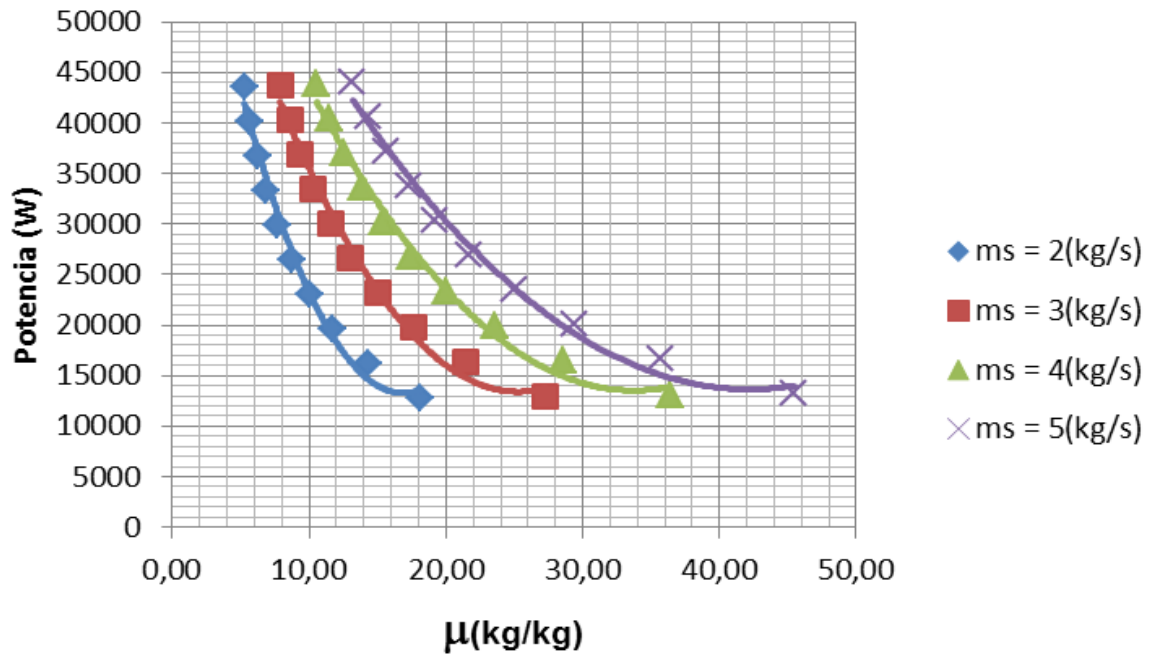
**Figura 3.4.** Caída de presión en función del flujo de aire.

Analizando los resultados de simulación de la figura 3.4, se puede indicar que se trata de un flujo en fase densa, cumpliéndose esta para flujos máscicos de sólidos de 2; 3; 4 y 5 kg/s, tomando como referencia lo expuesto en el epígrafe 1.5 de este trabajo (Jodlowski 1984); Klintworth y Rodes 2001).

### 3.5 Valoración económica

Con los niveles elevados que ha alcanzado el precio del petróleo en los mercados internacionales, por la crisis que se vive en el medio oriente, es necesario analizar muy minuciosamente los gastos de energía en cada sistema de trabajo con el que contamos y plantear medidas para el ahorro de esta. Para hacer una valoración económica se debe tener en cuenta la potencia para los diferentes tipos de concentraciones y para los flujos máscicos 2; 3; 4 y 5 (kg/s).

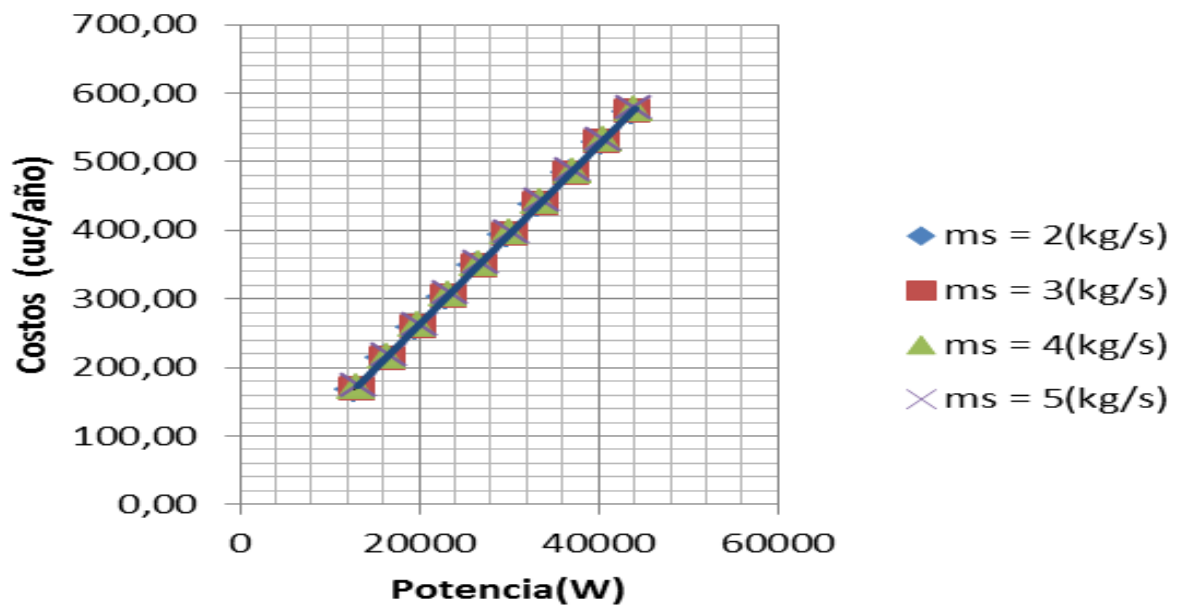
Se deduce que para el transporte en fase densa a medida que aumenta la concentración disminuye la potencia. Por recomendación para el transporte de los diferentes flujos máscicos analizados. Se recomienda la última concentración para cada flujo máscico.



**Figura 3.5.** Potencia en función de la concentración de la mezcla.

De la figura 3.5 se obtiene la relación racional de transporte, donde para diferentes flujos másicos de sólido se recomiendan diferentes concentraciones de mezcla, siendo las siguientes: Para  $m_s = 2$  (kg/s),  $\mu = 18,18$  (kg/kg) ; para  $m_s = 3$  (kg/s),  $\mu = 27,27$  (kg/kg) ; para  $m_s = 4$  (kg/s),  $\mu = 36,36$  (kg/kg); para  $m_s = 5$  (kg/s),  $\mu = 45,45$  (kg/kg).

Para determinar los costos de operación se hace necesario simular el costo de operación al año en función de la potencia, teniendo en cuenta la variación de los flujos másicos de sólidos.



**Figura 3.6.** Potencia en función de los costos.

Es preciso mencionar como existe un aumento significativo de los costos anuales en relación con el aumento de la potencia (figura 3.6), por lo que es necesario analizar la forma de disminuir la potencia utilizada en los servicios de transporte de arena y de este modo disminuir los costos. Para la potencia mínima de trabajo que es 12,8 kW el costo asociado a las pérdidas de presión en el transporte es 168,29 cuc/año; para la potencia máxima es 43,9 kW y el costo asociado 576,61cuc/año. De este análisis se ultima la importancia de determinar el punto de operación de la instalación para evitar gastos por pérdidas de energía.

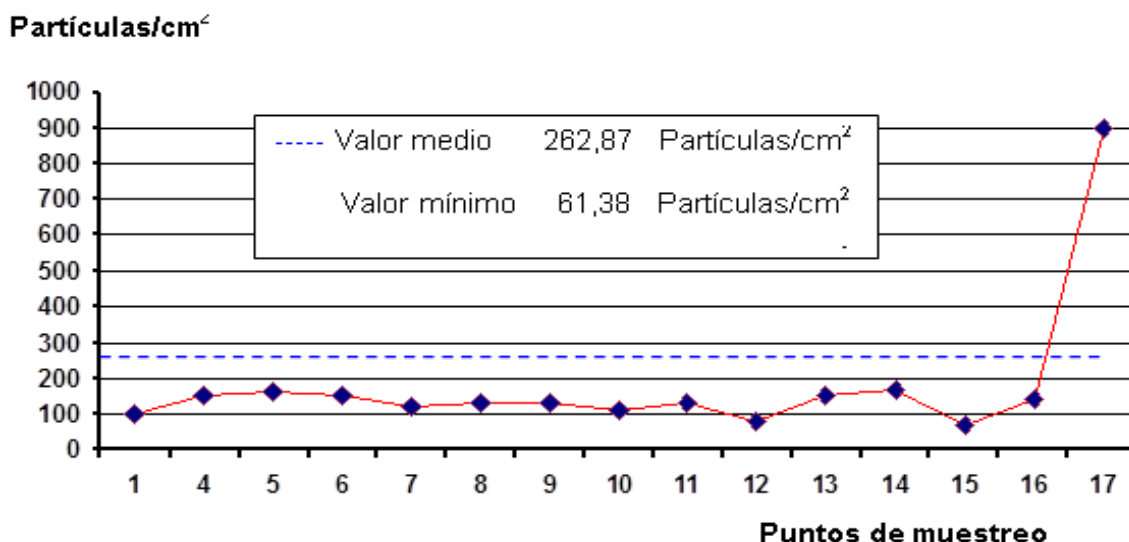
### 3.6 Impacto ambiental del taller de fundición

En las áreas productivas es la zona de moldeo donde mayor concentración de trabajadores existe en todo el taller de fundición, como se puede observar en figura 3.7, donde se determinó la deposición de partículas, los valores más significativos obtenidos de las mediciones estuvieron entre el punto de medición #12 con 81,02 partículas por  $\text{cm}^2$  lugar de menor concentración en esta parte del taller de fundición y en el punto 14 con el mayor valor de 166,12 partículas por  $\text{cm}^2$ , ambos lugares para la toma de muestra se encuentran en el área de vertido. Se midieron valores por encima de 200 partículas por  $\text{cm}^2$  en el área de limpieza y acabado, siendo esta

área la de mayor contaminación, relacionada directamente con las operaciones que se realizan en ella (Morales, 1999). En la actualidad estos parámetros se comportan de forma similar.

Se puede apreciar en la figura 3.7 el comportamiento de las cantidades de partículas en todos los lugares seleccionados para la toma de muestra, observándose bastante homogeneidad en los valores obtenidos para en todo el taller de fundición, solamente existe diferencia significativa en el área de acabado y limpieza que llega a 900 partículas por  $\text{cm}^2$ , debido fundamentalmente por las operaciones que se realizan para la limpieza de las piezas fundidas.

Del análisis de las partículas sedimentables el mayor por ciento corresponde a un mineral de cuarzo que fue el único compuesto obtenido en el difractograma por Morales (1999), lo que ratifica su procedencia de las arenas de sílice utilizadas en los materiales de moldeo del taller. Como se conoce la sílice es el elemento fundamental en producir la enfermedad profesional de silicosis en el hombre y es por otra parte una sustancia altamente abrasiva ya que es utilizada comúnmente como material abrasivo.

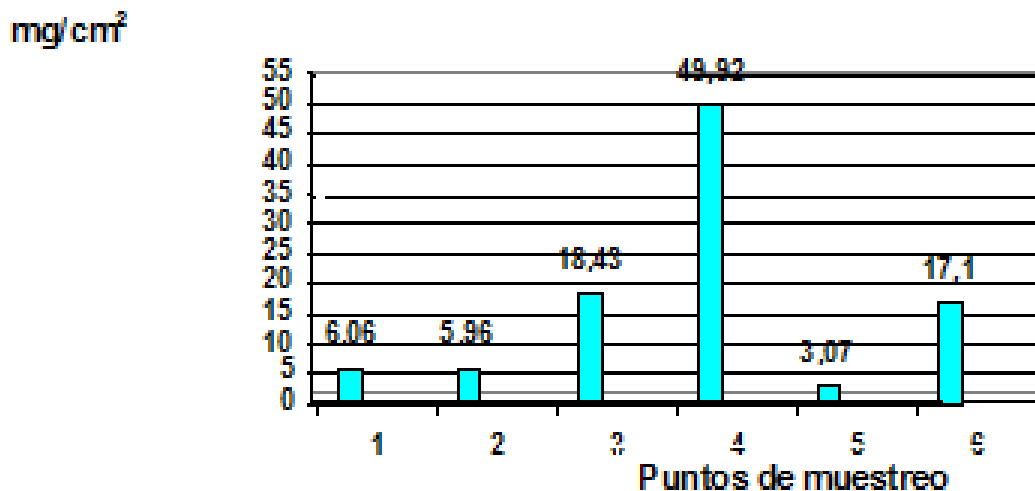


**Figura 3.7.** Polvo sedimentable en las áreas de producción.

**Fuente:** Morales (1999).

En mediciones realizadas para la determinación del polvo sedimentable, se puede observar en la figura 3.8, que en el punto N°4 el máximo valor corresponde al área del horno de arco eléctrico, siendo donde se manipulan los recipientes de desechos

sólidos a los camiones, además de estar cerca del área de vertido, lugar donde en las muestras tomadas en las placas portaobjetos, como se puede observar en la figura 3.7 se obtuvieron los valores mayores de contaminación.



**Figura 3.8** Polvos sedimentables **Fuente:** Morales (1999).

Otro dato interesante es, en el área donde se muestra, el valor mínimo el punto N°5 área de preparación de carga que es la zona más alejada de la nave de producción, estando situada en la nave central en la parte oeste del taller, por lo que se puede deducir que los vientos predominantes no transportan los contaminantes a esta área del taller, por ser los vientos predominantes de dirección este.

### 3.7 Conclusiones parciales del capítulo

- De los resultados experimentales de velocidad de flotación se obtuvo que tiene un valor cercano a 0,9 m/s.
- Se realizó la simulación de la caída de presión tanto en tuberías verticales como horizontales, donde se determinó la concentración recomendable para cada flujo másico de sólido.
- Se consideró el impacto ambiental asociado al traslado de la arena sílice por tuberías en el taller de fundición.



## **Conclusiones generales**

- Para la granulometría de la arena que se desea transportar, los resultados fueron analizados y el tamaño promedio de las partículas de arena medida fue de 0,15 mm, siendo el 62 % de cada muestra analizada.
- Se realizó el experimento de velocidad flotación para la arena sílice, obteniendo su velocidad de flotación que es de 0,9 m/s, para un por ciento de humedad de 1 a 1,5 y un diámetro de tubería de 0,1 m.
- Se determinó que nuestro sistema de transporte neumático trabaja en una fase densa para diferentes concentraciones de sólido.
- Se determinaron los gastos asociados a la caída de presión, y cómo influye el aumento de la potencia con el incremento de los costos de transporte neumático.

## Recomendaciones

- Utilizar siempre el valor máximo de concentración permisible debido a que como se demostró con el aumento de la concentración disminuye la potencia y con esta los costos.
- Se debe investigar el comportamiento de este mismo sistema para una fase diluida, comprobar los parámetros y simular la caída de presión.
- Determinar la velocidad de flotación en función de la humedad y otro diámetro de partícula.
- Analizar por parte de la Empresa los resultados obtenidos y ejecutar medidas para el uso de la potencia necesaria y de esta forma ahorrar energía.

## Bibliografías

1. Aguirre, A. Pérez, R. y Martínez, D., Mecánica de Fluidos, Editorial Universo Sur, Cuba 1996.
2. Arnold, P.C and P.W. Wipych; The development of pneumatic conveying in Australia. Australia. Volume 11, Number1, March 1991.
3. Ávila, N., Becerra Lotero, C., Iza Mustafá, Y., Sanz Uribe, J., “Pérdidas de presión en el transporte hidráulico de café por tubería PVC”. Ciencia y técnica. 12(4) 23-31, 2007.
4. Capítulo 09 Gestión Ambiental, “Procedimiento general de tratamiento a desechos peligrosos”, Empresa Salinera Guantánamo, Caimanera, Cuba.
5. Córdova y Gámez, “Estudio de los parámetros de la instalación de transporte hidráulico de las colas en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara”, Moa, Cuba, 1999.
6. Fitzgerald S. A pneumatic conveying powder delivery system for continuously heterogeneous material deposition in solid freeform fabrication. Thesis of Master. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. 1996. 140p.
7. Flúor, “Transporte de sedimentos”, 1996.
8. Flygt Industries, “Avances en sedimentación”, 1999.
9. Iakovlev, S. y Dalkov, M., “Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales”, Gosstroishdat, Moscú, 1961.
10. Ivenski, B., “Transporte de las mezclas de materiales para la construcción por tuberías”, Gosstroishdat, Moscú, 1957.

11. Izquierdo, R., "Estudio de la instalación de hidrotransporte a presión de la pulpa laterítica de la Empresa Cmte. Pedro Soto Alba". Minería y Geología. 2(3) 16-22, 1989.
12. Laurencio, H., "Método para la obtención de la temperatura racional de bombeo de petróleos pesados", ENERMOA, ISMM, Moa, Cuba, 2012.
13. Lesme J. R. Modelación del movimiento de las partículas y pérdidas en codos durante el transporte neumático del bagazo [Tesis doctoral] 1996. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
14. Mansfarrol, R. Evaluación del comportamiento de los sistemas de transporte neumático en la empresa Las Camariocas durante la transportación de la serpentina a 6mm, 2003. ([www.htm.PRILLWITZ y CIA S R . com](http://www.htm.PRILLWITZ y CIA S R . com))
15. Martinez, J., "Quantifying the economy of water supply looped networks". Journal American Society of Civil Engineers. 22(3) 105-119, 2007.
16. Mason, David. J; Marjanovic, Predrag; Levy, Avi. A simulation system for pneumatic conveying systems. Powder Technology. Centre for Industrial Bulk Solids Handling, Department of Physical Sciences, Glasgow G40BA, UK. Abril 1997.
17. Maugin, G.A., The method of virtual power in continuum mechanics: Application to coupled fields. Acta Mechanica, 35 (1980), p. 1 – 70.
18. Montero, I. Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos. Tesis de Doctorado, Badajoz, 2005. 262p.
19. NC- 480, "Clasificación de la sal", Cuba, Caimanera, 2008.
20. Pacheco Berlot, Pedro M. Ecuaciones para el diseño de instalaciones a transporte neumático por tuberías verticales de

materiales polvorientos, granulados, polimorfos y poli dispersos [Tesis doctoral] 1984. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.

21. Pakrovskaya, I..., El transporte hidráulico en la industria minera. Niedra, Moscú, 1985.
22. Pan, Y. ;Tanaka, T. and Tsuji, Y. "Numerical Study of Particle-Laden Rotating Turbulence, " Proc. of 4th Int. Conf. on Multiphase Flow (ICMF-2001), New Orleans, USA, May 27-June 1, (2001), Paper No.422(CD-ROM).
23. Pérez y Maliuk, "Investigación de los parámetros de transporte de sal común suspensas en flujos de salmueras saturadas", Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 1976.
24. Pérez, F. D. (1986): "Equipos de bombeo", editorial Pueblo y Educación. La Habana.
25. Rodes, M. Pneumatic Transport of Powders. <http://www.erpt.org>. Octubre 2001.
26. Sommerfeld. M. and G. Zivkovic; Recent advances in the numerical simulation of pneumatic conveying through pipe systems. Germany, Elsevier Science Publishers, 1992.
27. Stegmaier, W., Zur Berechnung der horizontalen pneumatischen Forderung feinkorniger Stoffe, Fordern und Heber, 28(1978), p. 363-366.
28. Streeter, V., Benjamín, E. y Bedford, K., Mecánica de fluidos. Novena Edición. McGraw-Hill. Best Seller International, S.A., Santafé de Bogotá, Colombia, 2000.
29. Tiwari, G., Solar energy. Fundamentals, design, modelling and applications. Alpha Science International, India, 2002.

30. Torres, E. Propiedades físicas y aerodinámicas del mineral laterítico utilizado en los sistemas de transporte neumático. *Minería y Geología*. 24 (2): 71 – 76, 2003.
31. Torres, E. Modelación Matemática y simulación del Transporte Neumático Del Mineral Laterítico, 2003
32. Turro, A., Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2002. 114p
33. Warman International LTD, “Características de los flujos”, 2000.
34. Weber, M., Correlation analyses in the design of pneumatic transport plant. *Bulk Solids Handling*, 2 (june 1982), Nr.2, p. 231-233.
35. Weber, M. Friction of the Air and the Air/Solid Mixture in Pneumatic Conveying. Germany. 11 (1):1991.
36. Wojs, K., “Laminar and turbulent flow of dilute polymer solutions in smooth and rough pipes”. *Journal of non-Newtonian fluid mechanise*. 48(2) 337-355, 1993.
37. Wypych, P.W and Arnold, P.C. Plug – Phase Pneumatic Transportation of Bulk Solids and the importance of Blow Tank Air injection. Australia.

## Anexos

### Anexo N<sup>o</sup> 1 Dibujo Técnico

### Anexo N<sup>o</sup> 2









**Figura A2.** Juego de tamices.

### Anexo N<sub>0</sub> 3





**Figura A3.** Instalación experimental para medir la velocidad de flotación.