

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En las plantas de producción de acero, el mineral peletizado reducido suele ser transportado hasta los hornos de fusión a través de ‘bandas transportadoras’. Sin embargo algunas desventajas tales como la contaminación por polvo de mineral, el descenso de su temperatura, su alta reactividad, el rompimiento de estas bandas, aunando al factor de seguridad dentro de las empresas han propiciado una nueva forma de transporte, el transporte neumático. De hecho, este tipo de transporte presenta grandes ventajas, sin embargo ha sido utilizado principalmente para transportar partículas pequeñas, poco abrasivas y a temperatura ambiente¹.

Desde hace pocos años el transporte neumático de partículas de mineral en caliente se ha tratado de implementar en la industria productiva. Pero algunos resultados catastróficos (fig 1.1), han obligado a optimizar tales sistemas, trayendo consigo en forma implícita, el investigar el fenómeno de desgaste en las líneas de transporte.

Los mecanismos de desgaste presentes en el transporte neumático de pelets de hierro esponja son principalmente erosión, abrasión y posible adhesión. Éstos son propiciados por el impacto de los pelets^{2,3,4}. Es entonces que los parámetros velocidad y fuerza de impacto deben ser estudiados a fin de minimizar el desgaste. De igual manera el conocer la relación entre parámetros de operación y estructurales, ayudan a determinar las condiciones funcionales del sistema⁵.

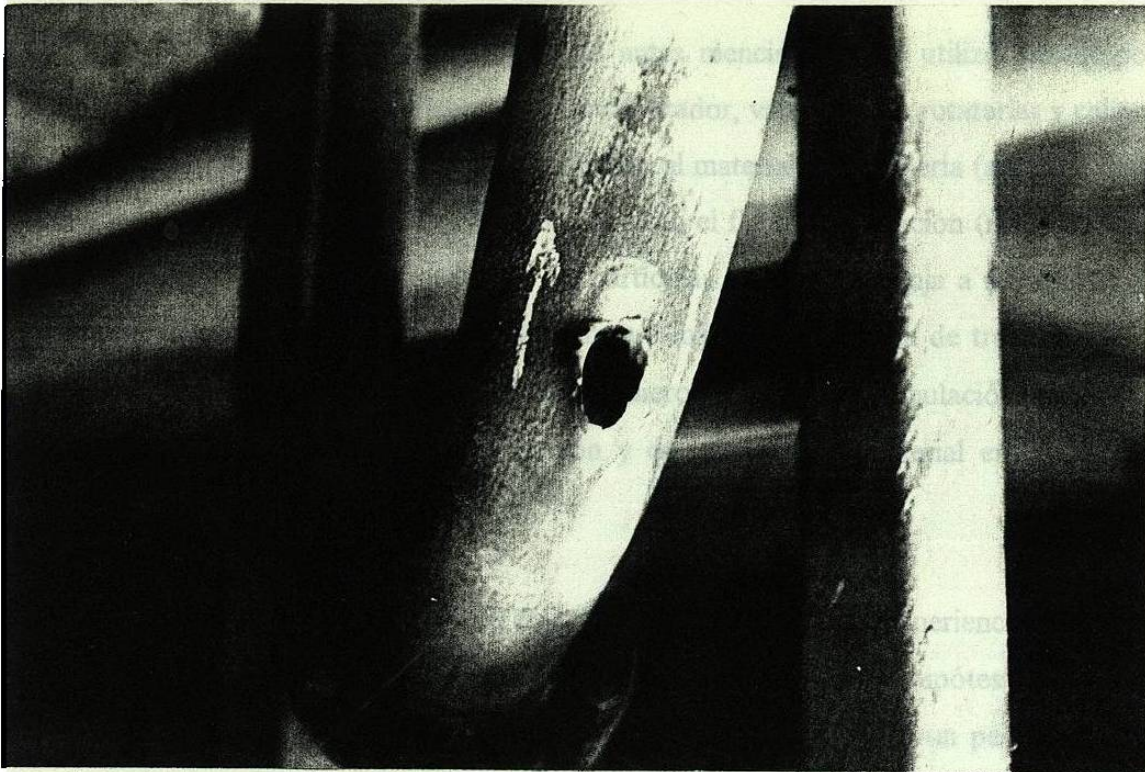


Figura 1.1 Fotografía de un codo de acero al carbón fallado por transporte de pelets y trozo de mineral en caliente.

Para dar respuesta a los problemas de desgaste en un sistema de transporte neumático de una empresa local, se ha puesto en marcha un proyecto de investigación de largo alcance que ha sido dividido en varios bloques. El presente trabajo está enfocado al estudio de la dinámica de las partículas y su efecto en el desgaste de la tubería de transporte neumático, dejando de lado la influencia química que pudiera afectar y acelerar el proceso de desgaste.

Los objetivos principales de esta investigación, consisten en: obtener la velocidad de las partículas de hierro esponja y el flujo de gas suministrado para lograr tales velocidades a diferentes temperaturas. Además, relacionar tal parámetro mecánico (velocidad de partículas) con el desgaste presente en la tubería de un sistema de transporte neumático.

A fin de llevar a cabo los objetivos antes mencionados se utilizó un equipo de laboratorio integrado principalmente por un calentador, válvulas tipo rotatorias y calientes, tubos venturi, dosificadoras y enfriadores. Tanto el material de la tubería (acero al carbón) como el diámetro de la misma (2.54 cm) limitaron el flujo de operación (menor de 5.574×10^{-4} en flujo de área), el tamaño de las partículas de hierro esponja a transportar (por supuesto menores de 2.54 cm) y la temperatura máxima en la zona de trabajo (menor a 700 °C). Sin embargo estas limitantes no impidieron obtener una simulación de las etapas de calentamiento, alimentación, aceleración y de impacto del material en el transporte neumático en fase diluida.

Para calcular la velocidad de las partículas y en base a la experiencia previa de la empresa local y la revisión bibliográfica realizada^{6,7}, se partió de la hipótesis de que sería posible detectar los desplazamientos de las partículas por medio de un péndulo balístico colocado en la línea de transporte. Así se procedió a diseñar y construir un péndulo balístico, encontrar tales desplazamientos y relacionarlos físicamente con la velocidad de las partículas.

Mientras que para la relación de desgaste en la tubería, muestras de acero al carbono se colocaron en las líneas de transporte y fueron bombardeados por las partículas diluidas en el gas. El desgaste se evaluó analizando las zonas dañadas por microscopía óptica y electrónica de barrido.

CAPÍTULO 2

TRANSPORTE NEUMÁTICO

2.1 Definición

El transporte neumático se define como el desplazamiento de sólidos granulares o polvos secos debido a un flujo de gas⁸. En la mayoría de los casos el aire es utilizado como gas transportador y su movimiento puede provocarse debido a una presión positiva o negativa ejercida sobre él.

El sistema de transporte neumático más simple¹ podría consistir en trasladar material a través de una tubería hacia cierto destino, con el movimiento de aire causado al aumentar o disminuir la presión a partir de la presión normal o atmosférica. Así, el aire se mueve para restaurar su presión normal, y cuando se mueve con suficiente velocidad puede transportar objetos en su trayectoria, dependiendo entre otras variables, del tipo y peso del material.

2.2 Transportador neumático

El término transportador neumático es comúnmente usado para describir dos métodos de transporte de material al aplicar una variación de presión en el gas. En el primer método se produce una velocidad de aire capaz de suspender el material en la

corriente. El segundo método consiste en aerear o fluidizar[†] el material, forzando así, la columna fluidizada del material a través del sistema de transporte debido a la energía del aire al expanderse.

Las técnicas de transporte neumático pueden clasificarse en tres grupos principales: transporte por gravedad con ayuda de aire, transporte por presión o por aspiración con introducción del sólido en el aire y con introducción de aire en el sólido. Cada uno de ellos puede funcionar con una diferencia positiva o negativa de presión de aire entre el sistema y el exterior.

Transporte por gravedad con ayuda de aire. En estos sistemas el ángulo de rozamiento de sólidos se reduce por influencia de aire que pasa a través de él mediante una presión o una depresión. Las zonas IA y IB de la figura 2.1⁸ corresponden a estas condiciones.

Transporte por presión o por aspiración. Introducción de sólidos en el aire. En estos sistemas, el sólido que puede estar fluidizado o no, se agrega a una corriente de aire motivada por medio de una presión o de una aspiración. Las zonas IIA y IIB de la figura 2.1 corresponden a estas condiciones. La diferencia de presión se logra generalmente por medio de soplantes, compresores o bombas de vacío.

Transporte por presión o por aspiración. Introducción de aire en el sólido. En estos sistemas, el aire de transporte se agrega al sólido. El aire de transporte puede agregarse a una presión mayor que la atmosférica (a presión), o a la presión atmosférica bajo la influencia de una aspiración (vacío o depresión). Las zonas IIIA y IIIB de la figura 2.1 corresponden a estas condiciones.

[†] Fluidización.-La aplicación de aire a partículas sólidas, de modo que la masa se asemeje a un fluido y pueda manipularse como tal.⁸

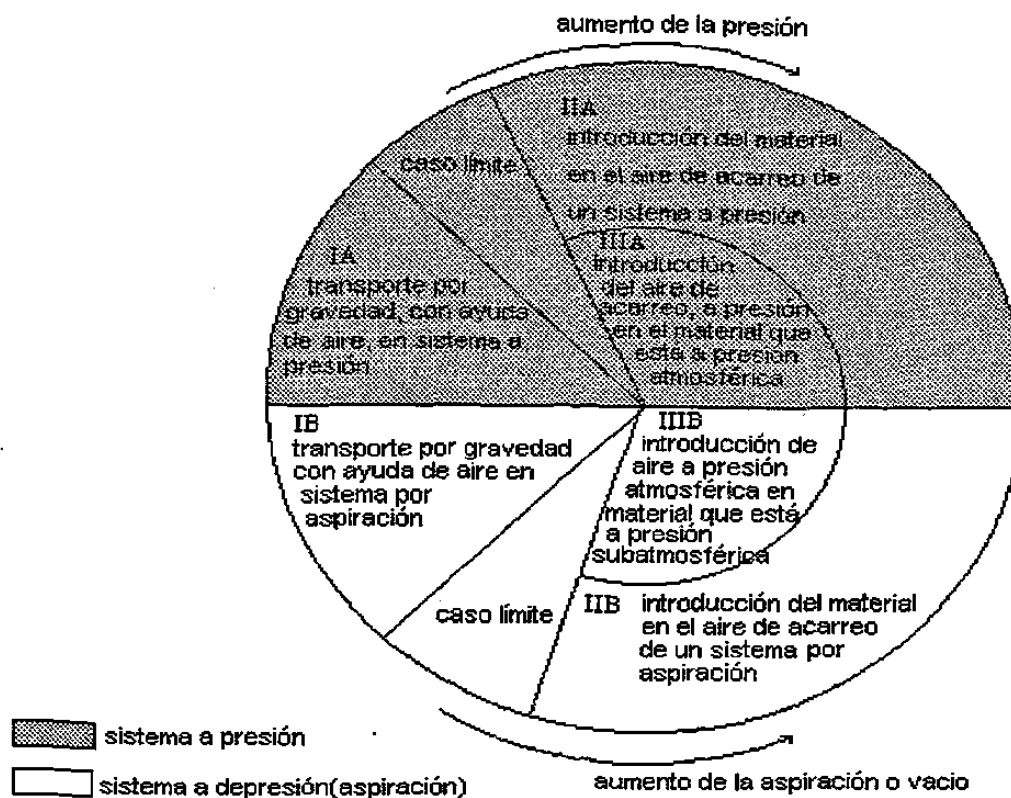


Fig. 2.1 Técnicas de transporte neumático⁸.

2.3 Constituyentes de un sistema de transporte neumático

En esencia, un sistema de transporte neumático está constituido por cuatro zonas distintas (fig.2.2)⁹: dispositivo primario, zona de mezcla y de aceleración, zona de transporte y zona de separación de sólidos - gas.

Dispositivo primario. Un rango amplio de compresores, bombas de vacío, y/o ventiladores pueden usarse para proveer la energía necesaria para transportar el gas. Pertinente al diseño del sistema de transporte neumático es necesario identificar la razón de flujo de gas y la presión (positiva o negativa) requerida para la transportación.

Zona de mezcla y de aceleración. En esta zona particular los sólidos son introducidos en la corriente de flujo del gas. Debido a que los sólidos están esencialmente en reposo, un cambio en la cantidad de movimiento se presenta cuando los sólidos se mezclan con el flujo de gas. Debido a este cambio de ímpetu, es importante proveer una zona de aceleración, en el que las partículas se aceleren en el menor tiempo posible hasta alcanzar la velocidad de aire necesaria para arrastrar la partícula, dicha velocidad es mayor en un tubo horizontal que en uno ascendente. Una vez alcanzada la velocidad mínima de acarreo, el paso posterior a lo largo de un tubo sólo aumenta la velocidad de las partículas debido a la expansión en la corriente de aire de acarreo. Si el espacio físico lo permite, la zona normalmente consiste de una pieza de tubería horizontal de una longitud específica designada a acelerar los sólidos hasta un estado de flujo estacionario.

De las diferentes formas de hacer el mezclado, se encuentran: el de agregar los sólidos a un alimentador y consecutivamente introducir aire de acarreo, el de agregar los sólidos y aire de mezcla a un alimentador mezclador hasta obtener una velocidad de acarreo en la salida y el de introducir sólidos, aire de mezcla y aire de acarreo al alimentador mezclador. La eficiencia de cualquier artefacto mezclador se mide en función de la caída de presión necesaria para producir la mezcla polvo/aire deseada a la velocidad requerida. En la figura 2.3⁸ se muestran algunos dispositivos para introducir polvo fluidizado en una corriente de aire de acarreo.

Zona de transporte. Después de pasar por la zona de aceleración, los sólidos entran a la zona de transporte, la cual está constituida principalmente por la línea de tubería. La selección de ella se basa en variables tales como abrasividad del producto, requerimientos de presión, velocidad de transporte, etc. La zona de transporte puede estar constituida además por codos y válvulas para cambiar la dirección del flujo. En virtud de que los codos constituyen un cambio de dirección, los sólidos son desacelerados conforme se muevan a través del codo. En la salida de cada codo una zona de aceleración es normalmente requerida para manejar los sólidos.

Varios factores discernibles en la zona de transporte son comunes a todos los sistemas de transporte de sólidos, y en particular:

- La velocidad del aire de acarreo. En el punto de partida desde la zona de mezcla es en donde su magnitud es la mínima. Para un transporte vertical puede bastar una velocidad apenas mayor que la crítica, pero para el transporte horizontal se requiere una velocidad mayor.
- Las pérdidas de carga por rozamiento y las caídas de presión inducidas por los codos de la tubería, especialmente los de pequeño radio. Debido a tales pérdidas, los radios de todas las curvas de la zona de transporte deberían tener el mayor radio posible. Otro aspecto importante es que con curvas de gran radio se reduce el desgaste por abrasión.
- La presión de trabajo. Debe hallarse un equilibrio económico entre gastos de instalación y explotación.

Zona de separación sólidos-gas. En esta zona los sólidos son separados de la corriente de flujo por la que fueron transportados. Con un sistema de transporte a presión es necesario solamente mantener una caída de presión entre el colector la cual debe ser suficiente para separar los sólidos del gas.

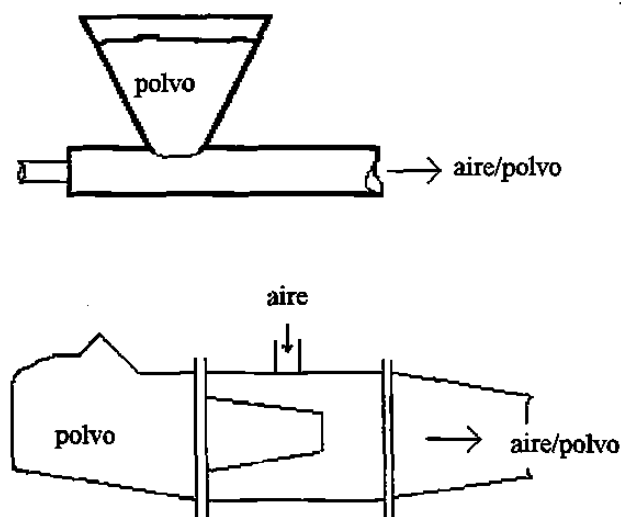


Figura 2.3 Dispositivos para introducir polvo fluidizado en una corriente de aire de acarreo⁸.

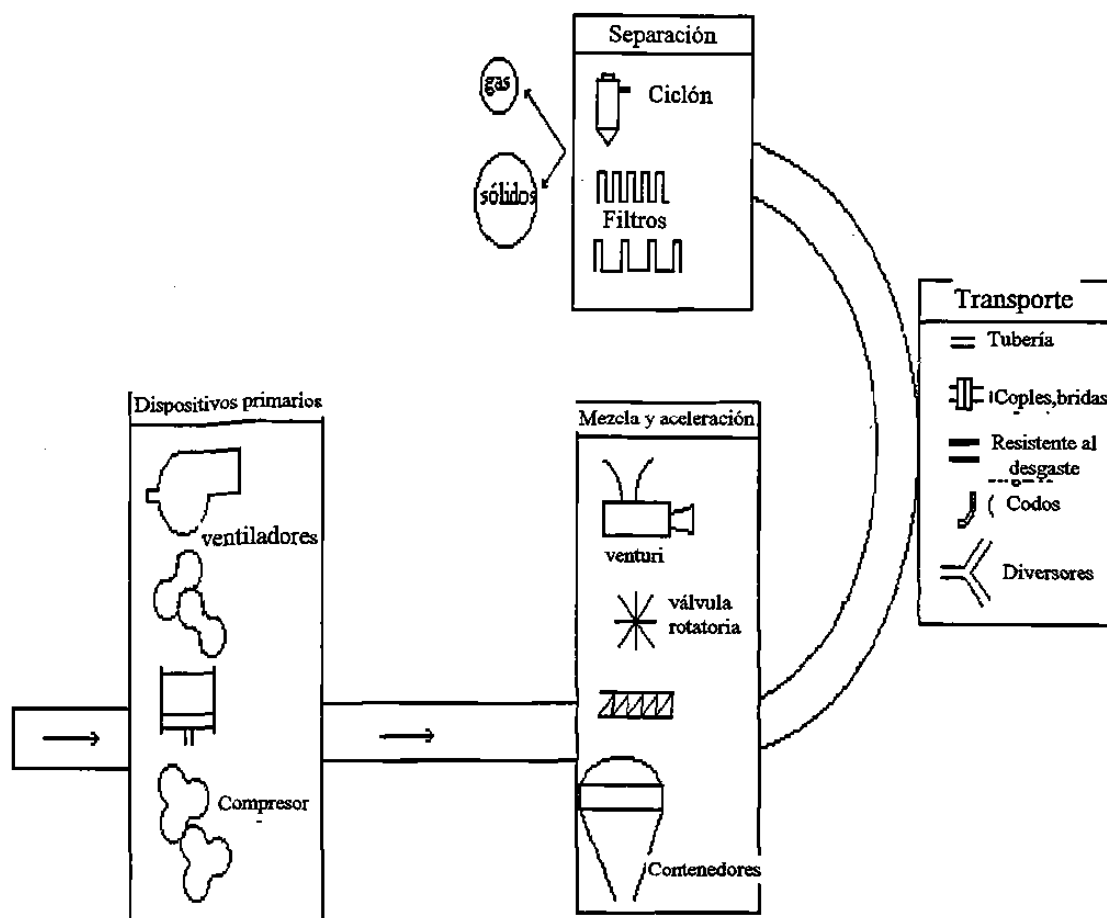


Figura 2.2 Zonas de un sistema de transporte neumático⁹.

2.4 Tipos de transporte neumático

De las diferentes clasificaciones de sistema de transporte neumático, es de interés la referente a la concentración de partículas en la tubería. Dentro de esta clasificación existen dos tipos de transporte neumático⁹, a saber:

a) Sistema de fase diluida

b) Sistema de fase densa

i) Régimen de flujo inestable

ii) Régimen de flujo estable - inestable

iii) Régimen de flujo estable

Por simplicidad cada fase esta categorizada en términos de la razón de flujo de masa, la cual se define como la razón de la masa de sólidos a la masa del gas transportador. De donde se tiene que:

Tipo de sistema	Razón de flujo de masa
Fase diluida	0-15
Fase densa	Mayor de 15

El sistema de fase diluida emplea grandes volúmenes de gas a altas velocidades. La corriente de gas transporta las partículas discretas del material por medio de fuerzas de arrastre y ascendientes que actúan individualmente sobre las partículas.

El sistema de fase densa es aquel en el que la velocidad del gas es menor que la velocidad de saltación[‡] en flujo horizontal, y por lo tanto resulta en una distribución no uniforme de sólidos sobre una sección perpendicular en la tubería de transporte. Un flujo de fase densa puede comportarse como estable o inestable dependiendo de las características de los sólidos, velocidad del gas, la razón de flujo de sólidos y otros factores tales como diámetro de la tubería (figura 2.4)¹⁰.

El patrón de flujo puede variar, sean sólidos llenando completamente la tubería y moviéndose como un pistón denso continuo o bien, sólidos en forma de dunas moviéndose en la parte inferior de la tubería con una capa de flujo de fase diluida desplazándose sobre ellas. Las situaciones de flujo estable resultan en un proceso de transporte suave mientras que la situación inestable se caracteriza por cambios de presión violentas.

[‡] velocidad crítica del aire que permite una suspensión de partículas o una fase diluida en estado estacionario.⁹

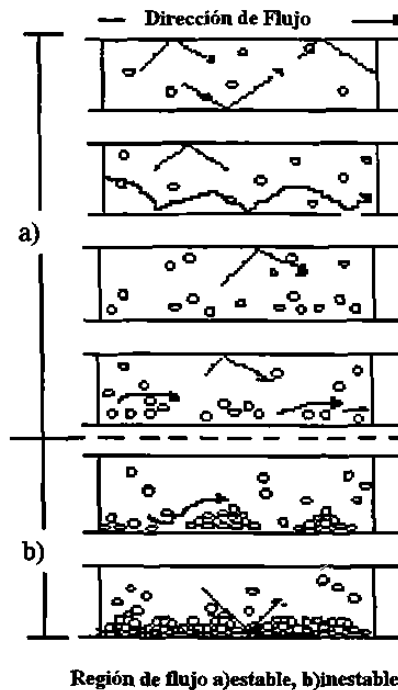


Figura 2.4 Zonas estables e inestables y formas de flujo en una tubería de transporte neumático¹⁰.

2.5 Consideraciones en transporte neumático

2.5.1 Flujo horizontal y vertical

En la figura 2.5⁶ se muestran diferentes formas de transporte neumático que pueden presentarse en un sistema de flujo horizontal. En donde la composición de la muestra se mantiene constante, y la velocidad del flujo se decreta gradualmente. La primer figura muestra un flujo turbulento con velocidad suficientemente alta como para mantener las partículas uniformemente distribuidas sobre la sección completa de el ducto. Al disminuir la velocidad, la influencia de la gravedad llega a ser notable, y la distribución de partículas es no uniforme. Con decrementos mayores en la velocidad, las partículas empiezan a asentarse formando dunas, las cuales ocupan una sección transversal cada vez mayor hasta que finalmente, el ducto llega a taparse.

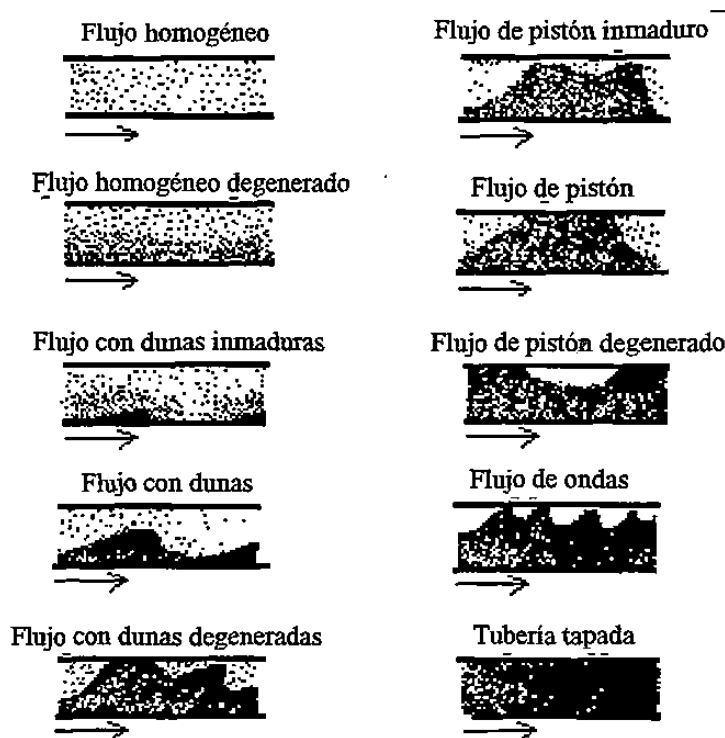


Fig 2.5 Flujo horizontal de mezcla gas - partícula⁶.

2.5.2 Suspensión de partículas finas y burdas.

El rango de tamaño de partículas de interés en un flujo de transporte neumático varía desde unos micrómetros hasta unos pocos milímetros (Tabla 2.1¹). Debido a que resulta difícil especificar el que una partícula pueda ser considerada fina o burda, se usó un tamaño promedio de 350 μm para distinguirlas. Sin embargo, el problema se complica aún más cuando se considera también el diámetro de la tubería transportadora. Se ha encontrado que algunas partículas, clasificadas como finas, al ser transportadas en tubería de diámetro pequeño se comportan como una suspensión de partículas burdas. Resultando entonces de mayor importancia el especificar la relación diámetro de la partícula - diámetro de la tubería, d_p / D_T .

Tabla 2.1 Rango de tamaño de partículas comunes¹.

Material	Tamaño aproximado (μm)
Humo tabaco	0.01 - 1
Humo combustible	0.03 - 1
Bacterias	0.3 - 50
Polvo carbón	1 - 100
Carbón pulverizado	3 - 600
Gotas de lluvia	600 - 6000
Insecticidas	6 - 10
Polen	10 - 100

2.6 Ventajas y desventajas del transporte neumático

De las ventajas que ofrece el transporte neumático de sólidos granulares se tiene que la transportación se efectúa libre de polvo. Provee una mayor flexibilidad en la ruta de transporte (conectando tubos horizontales y verticales por medio de codos). Utiliza un bajo mantenimiento y menor requerimiento de trabajo humano. Otorga mayor seguridad, así como facilidad de control y automatización⁹.

Sin embargo, algunas desventajas de este tipo de transporte es que se requiere un mayor consumo de energía, al tiempo que las distancias de transporte son limitadas (cortas). Un diseño incorrecto puede provocar degradación de la partícula, así como desgaste del equipo.

Se ha encontrado que los codos son los dispositivos de transporte neumático más propensos a sufrir desgaste (ver figura 2.6⁹). Esto debido a que son ellos los que presentan mayor cambio de dirección al impacto de las partículas. Sin embargo, se han realizado estudios en los que se proponen nuevos diseños de codos e instrumentos que otorguen un cambio de dirección en la línea de transporte, pero que presenten una mayor resistencia al desgaste

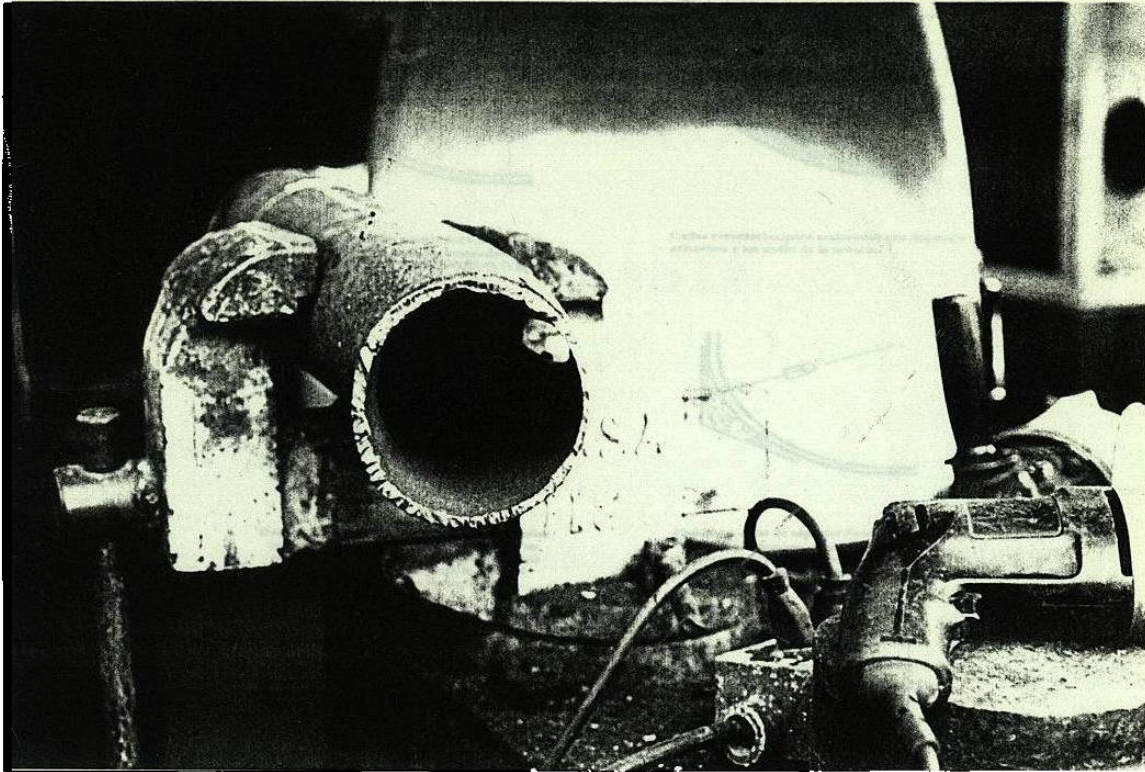


Figura 2.6 Fotografía de un codo fallado al trabajar en transporte neumático.

En la figura 2.7⁹ se muestran algunas técnicas de reforzamiento de codos a fin de prolongar la vida del sistema. Tal reforzamiento, provee una gruesa capa protectora en el reverso del codo, resistente al desgaste. De hecho, en situaciones con alto grado de desgaste, el empleo de una T con uno de sus extremos bloqueados como si fuera un codo cerrado es recomendado. El material erosiona contra sí mismo produciendo una porción aprisionada de polvo en el extremo cerrado de la T. Bodner realizó experimentos con T ciegas transportando arena (de tamiz +210 a -410 μm) y variando los radios de curvatura. En la figura 2.8⁹ se muestran algunos de estos dispositivos con sus respectivos puntos de falla.

En este trabajo, se desea estudiar el desgaste que se produce en las líneas horizontales de transporte neumático, así que un breve bosquejo de definición, mecanismos, leyes y aplicaciones de desgaste se presentan en el siguiente capítulo.

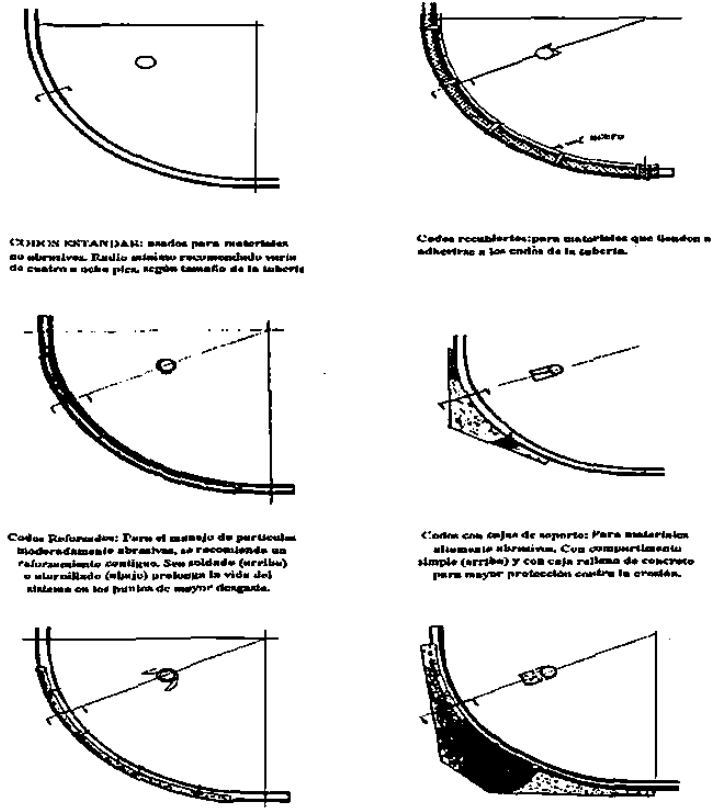


Figura 2.7 Técnicas en transporte neumático para reforzamiento de codos⁹.

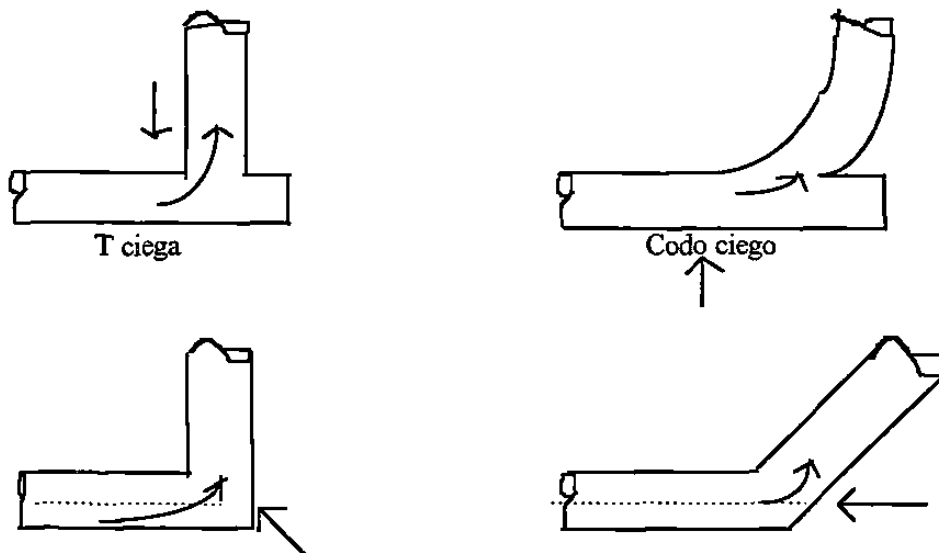


Figura 2.8 Dispositivos empleados para cambiar la dirección en líneas de transporte neumático (las flechas externas indican los puntos de fallo esperados)⁹.

CAPÍTULO 3

DESGASTE

3.1 Definición

Se define el desgaste como la pérdida progresiva de sustancia de la superficie de operación de un cuerpo, como resultado del movimiento relativo en la superficie¹¹. Implícito en la definición se tiene que el desgaste no es una propiedad intrínseca del material, mas bien es una característica del sistema ingenieril (tribosistema) y una causa seria de disipación de materia. Aún cuando el fenómeno de desgaste rara vez es catastrófico (usualmente es un proceso muy lento y continuo), reduce la eficiencia de operación de los sistemas ingenieriles.

3.2 Clasificación

De las diversas clasificaciones de desgaste^{12,13} se observa que algunas toman como factor común el tipo de movimiento relativo existente en el proceso; otras el tipo de mecanismo de desgaste involucrado, así como el contacto mecánico presente en el problema y en menor importancia tecnológica pero de mayor uso común, puede clasificarse por la apariencia de las partes desgastadas (ver figura 3.1)¹³.

De la clasificación de desgaste basada en el tipo de contacto mecánico, se define *el desgaste de fase simple*, es decir un sólido, un líquido o un gas con movimiento relativo deslizante referente a una superficie sólida causando que el material de la superficie se desprenda. Se define también *el desgaste de fase múltiple*, o desgaste que

depende de un sólido, un líquido o un gas moviéndose hacia una superficie, pero que a la vez actúa como transportador de una segunda fase (partícula, aspereza, gota líquida o burbuja de gas) siendo ésta última la causante del desgaste. La figura 3.2¹³ muestra esquemáticamente los sistemas posibles en dichos tipos de desgaste. En la tabla 3.1¹³ se describe cada sistema.

La caracterización fenomenológica del desgaste puede ser usada técnicamente, pero no provee un entendimiento fundamental del mecanismo de desgaste o la historia previa de las partes dañadas. En cambio en la clasificación de desgaste de acuerdo a los mecanismos y condiciones presentes, se puede tener un marco de trabajo que pueda explicar una ley obtenida regularmente en forma experimental. De los mecanismos por interacción mecánica el desgaste adhesivo, abrasivo y erosivo son los más comunes. Mientras que el desgaste corrosivo predomina por interacción química.

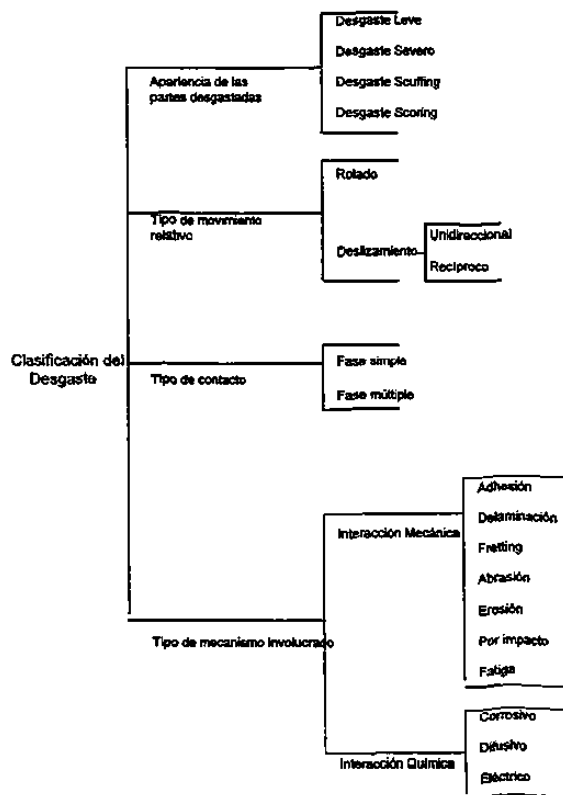


Figura 3.1 Esquema de clasificación de desgaste.¹³

Tabla 3.1 Designación de procesos de desgaste (*refiriéndose a los números de la figura 3.2)¹³.

No.*	Contacto	Partícula	Movimiento	Nombre común
1	Sólido	Ninguna	Deslizamiento	Desgaste por deslizamiento seco Desgaste metal-metal
			Recíproco	Fretting = calado
			Impacto	Desgaste por impacto
			Rolado	Desgaste por rodamiento
2-3	Gas o líquido	Ninguna	Flujo	Rayado
			Impacto	Erosión
4	Sólido	Superficie dura	Superficie rolado	
5	Sólido	Superficie dura	Partícula deslizante	Abrasión Desgaste de dos cuerpos
6	Líquido	Sólida	Desgaste de superficie deslizante	Desgaste de tres cuerpos Abrasión por polvo
			Desgaste de superficie rolada	Desgaste de tres cuerpos Abrasión por polvo
			Desgaste de superficie deslizante	Erosión
			Desgaste de superficie rolada	
7 y 9	Líquido o gas	Sólida	Partícula deslizante	Erosión con partículas a ángulos pequeños
8	Gas	Sólida	Impacto de partícula	Erosión con partícula a 90°
			Desgaste de superficie deslizante	Desgaste de tres cuerpos
			Desgaste de superficie rolada	Desgaste de tres cuerpos
			Desgaste de superficie deslizante	Desgaste de dos cuerpos Abrasión con bajo esfuerzo Abrasión con manchado
13	Líquido	Líquida	Impacto de partícula	
15	Gas	Líquida	Impacto de partícula	Erosión por gota Erosión por lluvia
19	Líquido	Gas o partícula de vapor	Impacto de partícula Flujo de partícula	Cavitación Erosión por rayado

3.3 Mecanismos de desgaste

3.3.1 Desgaste adhesivo

Tipo de desgaste que ocurre como resultado de un deslizamiento relativo entre dos superficies bajo una carga normal de contacto². Se asume que cuando las asperezas propias de cada material llegan a estar en contacto, se adhieren fuertemente una a la otra, y que la separación subsecuente genera desprendimientos preferentemente en la superficie suave.

El proceso actual de formación de partículas de desgaste ha sido estudiado² por medio de una punta (con cierta carga sobre ella) colocada sobre un disco giratorio. De dichos experimentos se ha concluido que una unión inicial metal-metal es cortada por el movimiento friccional, y un pequeño fragmento de dicha superficie llega a unirse a la otra superficie. Cuando el deslizamiento continúa, este fragmento constituye una nueva aspereza que puede depositarse una vez más a la superficie original. Este elemento de transferencia pasa repetidamente de una superficie a otra y va aumentando de tamaño al unirse con otros elementos del mismo tipo, hasta formar una partícula de capas de ambos materiales afectados. Algunas condiciones térmicas y dinámicas pueden incrementar esta rapidez de crecimiento y provocar finalmente la liberación de la partícula como una partícula de desgaste (fig 3.3²).

FLUJO ↓	DESGASTE EN UNA FASE SIMPLE	DESGASTE DE FASES MÚLTIPLES					
		PARTÍCULA SÓLIDA		PARTÍCULA LÍQUIDA		VAPOR DE GAS	PARTÍCULA
		SUPERFICIE DE DESGASTE EN MOVIMIENTO	FLUJO Y PARTICULAS EN MOVIMIENTO	SUPERFICIE DE DESGASTE EN MOVIMIENTO	FLUJO Y PARTICULAS EN MOVIMIENTO	SUPERFICIE DE DESGASTE EN MOVIMIENTO	FLUJO Y PARTICULAS EN MOVIMIENTO
SÓLIDO	1 	4 	5 	10 —	11 —	16 —	17 —
LÍQUIDO	2 	6 	7 	12 —	13 	18 —	19
GAS	3 	8 	9 	14 —	15 	20 —	21 —

Figura 3.2 Procesos típicos de desgaste¹³.

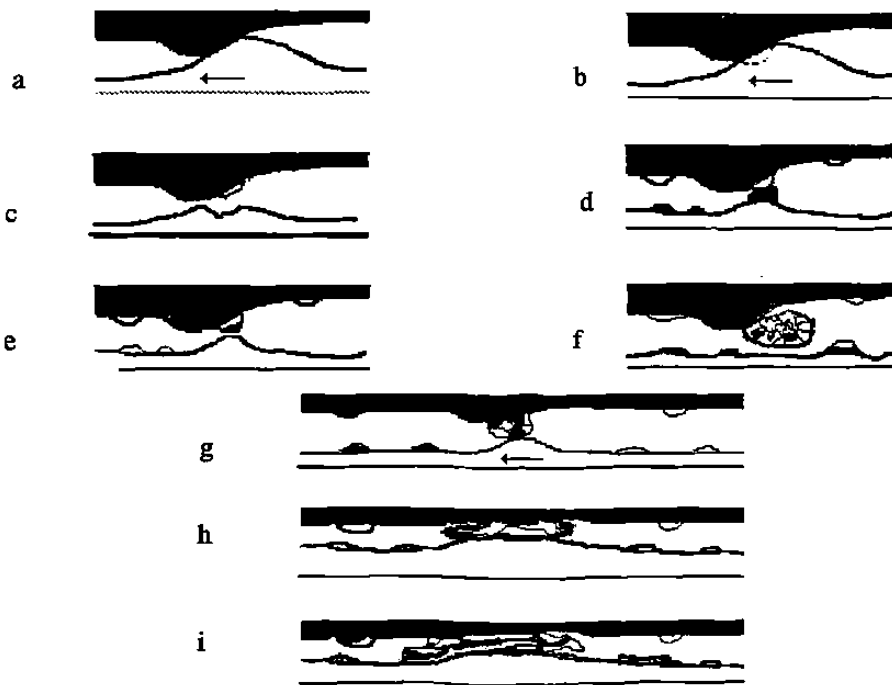


Figura 3.3 Formación de una aspereza².

3.3.2 Desgaste abrasivo

Se define el desgaste abrasivo como el mecanismo en el cual el material es removido o desplazado de la superficie por partículas duras o algunas protuberancias duras, forzadas contra y deslizándose a lo largo de la superficie^{2,14}.

En el proceso de desgaste abrasivo, las asperezas del metal más duro presionan la superficie del metal más suave, provocando un flujo plástico en la superficie del material más suave en los puntos en donde ésta estuvo en contacto con la aspereza. Cuando se impone un movimiento tangencial, la superficie del material más duro remueve el material más suave por efectos combinados de microcorte y microgrietas.

Generalmente se presentan dos tipos de situaciones de este tipo de desgaste, una donde la superficie más dura del par metálico en contacto funciona como la partícula abrasiva (desgaste de dos cuerpos) y otra cuando el material más duro abrasivo es un tercer cuerpo, por lo regular partículas más pequeñas libres para rolar o deslizarse entre las dos superficies y además lo suficientemente duras para abraer una o las dos superficies en contacto con ellas (desgaste de tres cuerpos fig 3.4²). La razón de desgaste debido a la abrasión de tres cuerpos es generalmente menor que la debida a la de dos cuerpos, aunque los variados mecanismos de remoción de material difieren solamente en importancia relativa más que en naturaleza. Otros términos como el de abrasión de bajo y alto esfuerzo son empleados para describir implícitamente las características de las partículas en el proceso de desgaste abrasivo. En la abrasión de alto esfuerzo, el esfuerzo de las partículas abrasivas es excedido, así que son fracturadas durante el proceso de desgaste, mientras que en la abrasión de bajo esfuerzo las partículas permanecen sin romperse.

3.3.3 Desgaste por erosión de partículas sólidas

La erosión por partículas sólidas es la pérdida de material que resulta de repetidos impactos provenientes de pequeñas partículas sólidas. Este tipo de desgaste también incluye el proveniente de partículas duras transportadas por un medio líquido (slurry) o gaseoso e impactándose sobre una superficie a una velocidad significativa, mayor que 1 m/s (Fig 3.4 c)², pero descarta el desgaste por cavitación que involucra la formación y colapso de burbujas de vapor en un líquido y el de pequeños cuerpos líquidos en un gas o vapor, los cuales tienen un mecanismo de daño al material parecido, sintéticamente causado por el impacto de pequeñas presiones localizadas debidas a un choque líquido¹².

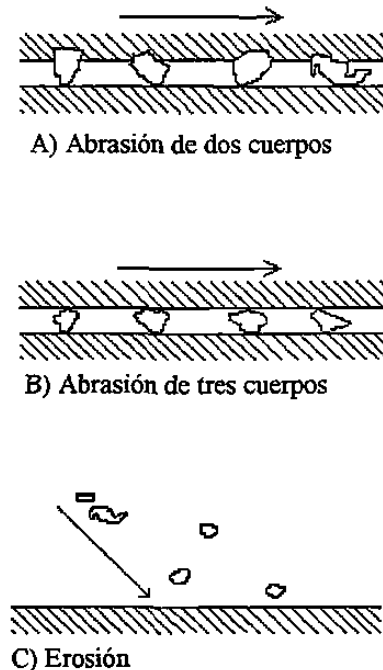


Figura 3.4 Diferencias entre a)abrasión de dos cuerpos, b)tres cuerpos y c)erosión².

El desgaste erosivo de partículas sólidas difiere de la abrasión de dos o tres cuerpos, principalmente en el origen de fuerzas entre las partículas y la superficie desgastada. La erosión de partículas sólidas se refiere a una serie de partículas incidier.do y rebotando en la superficie, mientras que en la abrasión el desgaste es el resultado del

deslizamiento de las partículas abrasivas a través de la superficie bajo una fuerza externa constante aplicada. En cambio en la erosión varias fuerzas de diferente origen pueden actuar en una partícula que esté en contacto con una superficie sólida. Algunas de estas fuerzas se muestran en la figura 3.5².

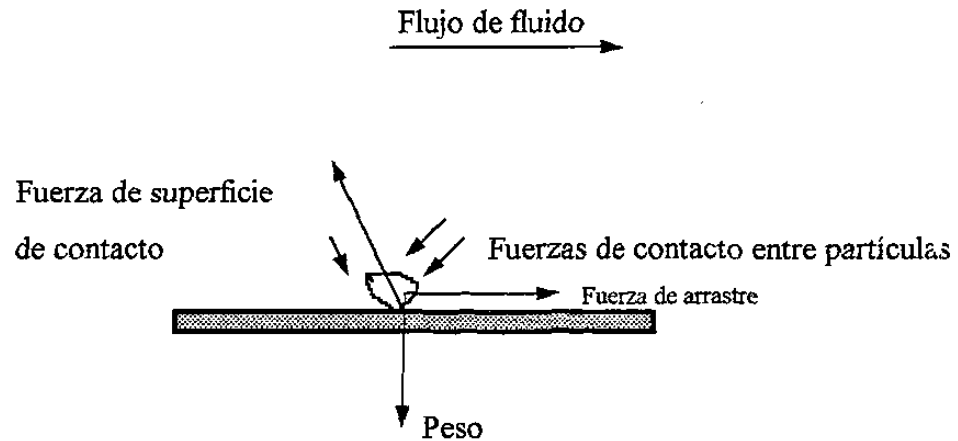


Figura 3.5 Fuerzas que actúan en una partícula en contacto con una superficie sólida².

Fuerzas de contacto aparecen cuando varias partículas interactúan en el proceso, mientras que las fuerzas de arrastre actúan sobre las partículas cuando éstas son sometidas en una corriente de flujo. Otras debidas a la gravedad pueden ser importantes en algunas condiciones. Sin embargo la fuerza dominante en una partícula erosiva, la cual es principalmente responsable del decremento de la velocidad inicial de impacto, es la fuerza que se transmite por contacto a la superficie. En la erosión, el grado de desgaste depende de el número y masa de las partículas individuales incidentes en la superficie, y en su velocidad de impacto.

En algunos casos una clara distinción entre erosión o abrasión puede ser difícil de encontrar, principalmente en distribuciones de partícula en fase densa en medios líquidos o gaseosos, en la cuales un grupo de partículas pueden manejarse y deslizarse en la superficie de la tubería, y puede ser clasificado como abrasión¹⁵.

La geometría de la deformación de los materiales ingenieriles debido al golpeteo de partículas duras varía grandemente dependiendo de la clase de material, el estado del material al cual fue sometido previamente (historia térmica, tratamientos superficiales, esfuerzos previos) y a los parámetros operacionales asociados con el proceso de erosión, tales como velocidad y ángulo de impacto, tipo y forma de la partícula erosiva.

En la erosión el ángulo de impacto se define relativo al plano de la superficie del material a erosionar^{2,3,4}, como se muestra en la figura 3.6². La erosión de materiales dúctiles (la mayoría de los metales) depende fuertemente del ángulo de impacto (fig 3.6 a) y presenta una razón máxima de desgaste cuando el ángulo de incidencia se encuentra entre 20° y 30°. Mientras que los materiales frágiles presentan un máximo deterioro en ángulos normales.

Estudios de partículas simples impactando a 30° sobre el material, muestran tres tipos básicos de daño superficial (Fig 3.7)². Surcado, cuando partículas redondeadas desplazan el material hacia los lados y adelante en el sentido de viaje de la partícula. Los otros dos tipos de deformación se presentan cuando las partículas tienen puntas angulares. El tipo de corte I, cuando la partícula rueda hacia adelante indentando la superficie y levantando material en forma de punta prominente, la cual es vulnerable a remoción por subsecuentes impactos cercanos. Mientras que el tipo de corte II involucra el que una partícula rueda hacia adelante y hacia atrás, como un maquinado, donde las esquinas puntiagudas de la partícula abrasiva pueden cortar virutas de la superficie.

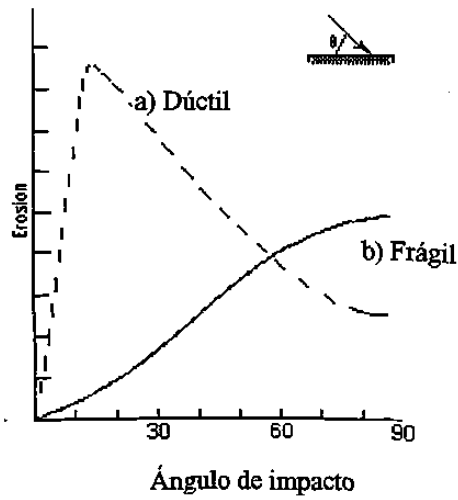


Figura 3.6 Dependencia típica de la erosión con el ángulo de impacto².

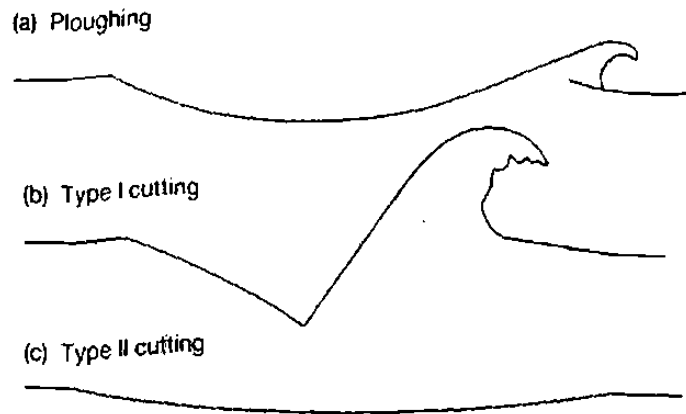


Figura 3.7 Sitios de impacto formados por partículas duras en un metal dúctil. Con dirección de impacto de izquierda a derecha. A) Tipo surcado, b) Tipo de corte I, c) Tipo de corte II².

3.4 Leyes de desgaste

El desgaste para tres tipos de mecanismos, adhesión, abrasión y delaminación, se ha encontrado que guarda una proporcionalidad a la carga normal aplicada y la distancia de deslizamiento^{13,14}.

La siguiente relación (la llamada ecuación de Archard²) establece una proporción inversa del desgaste con la dureza del material:

$$\frac{Vol}{S} = \frac{kN}{H} \quad (3.1)$$

donde:

Vol : volumen removido

N: carga normal aplicada

S: distancia deslizada

k: coeficiente de desgaste

H:dureza del material

Esta ecuación emplea la dureza como propiedad única del material. Aunque el coeficiente de desgaste depende de varias propiedades intrínsecas del material, no es posible describir cuantitativamente la influencia de dichas propiedades y relacionarlos de una forma simple con el coeficiente de desgaste.

Otra aseveración importante es que la ecuación de Archard se emplea para contactos plásticos, es decir, la razón de desgaste es proporcional al área real de contacto y no puede ser aplicable a casos que involucren contactos elásticos.

La razón de erosión, E , se expresa comúnmente en términos de masa o volumen de material removido por unidad de masa de material erosivo que impacta la superficie a analizar. Sin embargo es más frecuente el manejo de volumen desgastado, ya que permite la comparación de pérdida de espesor para materiales de diferente densidad. Se asume además que las dimensiones de el área erosionada y la concentración de partículas son indiferentes, sobre todo para flujos diluidos. Los metales y cerámicos difieren en la dependencia de E con el ángulo de impacto, y también en su respuesta con la velocidad, tamaño y forma de la partícula³.

E , la razón de erosión, generalmente muestra una dependencia con la velocidad de la partícula a cierta potencia^{2,3,4}, es decir:

$$E = kv^n \quad (3.2)$$

donde k es una constante y n generalmente depende de el material y las condiciones de erosión. El valor de n toma valores de 2 a 2.5 para metales y 2.5 a 3 para cerámicos, aunque se han encontrado algunos valores fuera de estos rangos.

Otra dependencia importante de la erosión es con respecto al ángulo de incidencia de la partícula³. La ecuación 3.3 muestra esta dependencia.

$$E = \frac{k \rho \operatorname{sen} \theta v^2}{2H} \quad (3.3)$$

donde:

k es la constante de desgaste del material

ρ es la densidad del material

θ : el ángulo de incidencia de la partícula sobre el material

v : la velocidad de la partícula incidente y

H : la dureza del material.

3.5 Equipo y procedimientos de evaluación de desgaste

Debido a que es difícil medir el desgaste en una planta de operación, diferentes equipos se usan para simular las condiciones de desgaste. Así, se han desarrollado equipos de prueba enfocados a la erosión. Uno de éstos, conocido como máquina “sand blast”, (con designación estándar ASTM G 76-83)¹⁶ tuvo varias precauciones en su diseño e instalación, a fin de asegurar que la distancia de aceleración permitiera alcanzar una velocidad terminal de las partículas. Otro problema de este equipo es el control de la velocidad de las partículas para una amplia distribución del tamaño de ellas y asegurar un *ángulo constante* de ataque. Pero quizás la mayor desventaja que presente, resulte en un gran número de pruebas a realizarse. Debido a que sólo un cupón puede probarse al mismo tiempo.

Otro equipo utilizado para pruebas de erosión consiste en un disco giratorio. Las muestras a probar son colocadas frente y en derredor del extremo libre del disco y las partículas abrasivas son dirigidas por el movimiento rotatorio del disco hacia los especímenes de prueba, de tal forma que un buen control del disco genera una velocidad constante de impacto de las partículas. Este equipo provee un buen control sobre la velocidad de las partículas y el *ángulo* de ataque. Otras de las ventajas de este equipo es el número de ensayos (veinte) que se pueden realizar al mismo tiempo y bajo las mismas condiciones de velocidad de partículas y carga de sólidos, pero con una variación del *ángulo* de ataque.

CAPÍTULO 4

DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PARTÍCULAS EN TRANSPORTE NEUMÁTICO

4.1 Introducción

El medir la velocidad de un objeto suena una tarea sencilla. Multiplicidad de arreglos matemáticos y dispositivos diferentes pueden emplearse para calcular y medir éste fundamental vector físico. En el ramo de la física de altas energías la construcción de gigantescos y costosos anillos (más de 500 m de radio) se utilizan para producir colisiones de las partículas fundamentales. En el siglo pasado un arreglo complejo de lentes y espejos se utilizaron para medir la velocidad de la luz. En la rama de fluidos y como aspecto teórico los métodos diferenciales Lagrangianos se han empleado para calcular microscópicamente la velocidad de un diferencial de fluido. Mientras que en el ramo ingenieril de transporte neumático la velocidad de las partículas transportadas es, junto con otros parámetros, una clave indicadora del desgaste propio de la tubería.

Uno de los objetivos de esta tesis, es encontrar la velocidad de las partículas cuando éstas se encuentran en condiciones de transporte neumático. El que no sea una partícula única la que esté en movimiento, y el que se encuentre impelida en toda su trayectoria por una fuerza proporcionada por el movimiento mismo del gas transportador, el cual no es aire, sino un gas explosivo con alto contenido de hidrógeno y que se encuentra a altas temperaturas hace complicada esta determinación.

Refiriéndonos a la consulta bibliográfica se encontró que algunos han determinado la velocidad de las partículas con la ayuda de un equipo de fotografía^{6,17} de alta velocidad (figura 4.1a), con medidores de flujo¹⁸ (figura 4.1 b), mientras que otros la han determinado por medio de un péndulo balístico⁷ (figura 4.1 c). Todos ellos a temperatura ambiente y con atmósferas estables. Dadas las características de la presente investigación se optó por desarrollar un método para medir en forma experimental la velocidad de las partículas (figura 4.1 d).

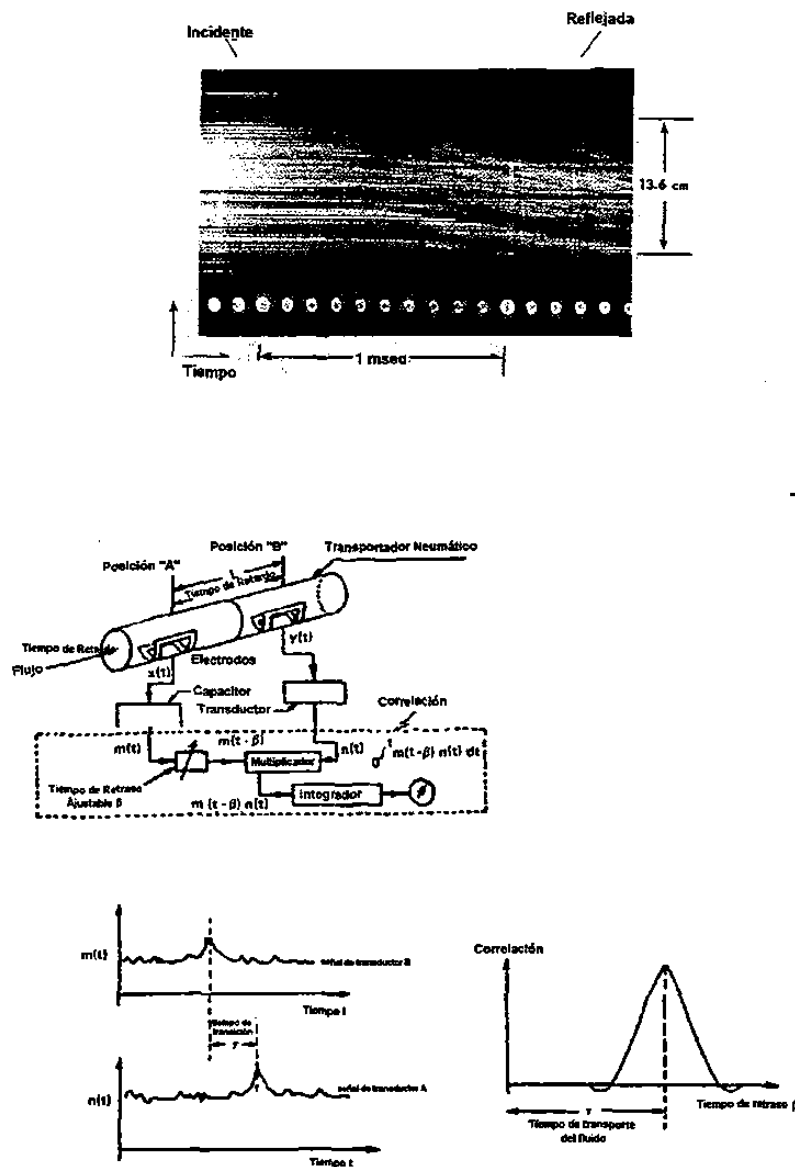


Figura 4.1. Instrumentos para medir velocidad de partículas, a) Fotografía tomando la interacción de partículas de vidrio con el choque de onda³, b) Por medio de señales de un transductor¹. Continúa.

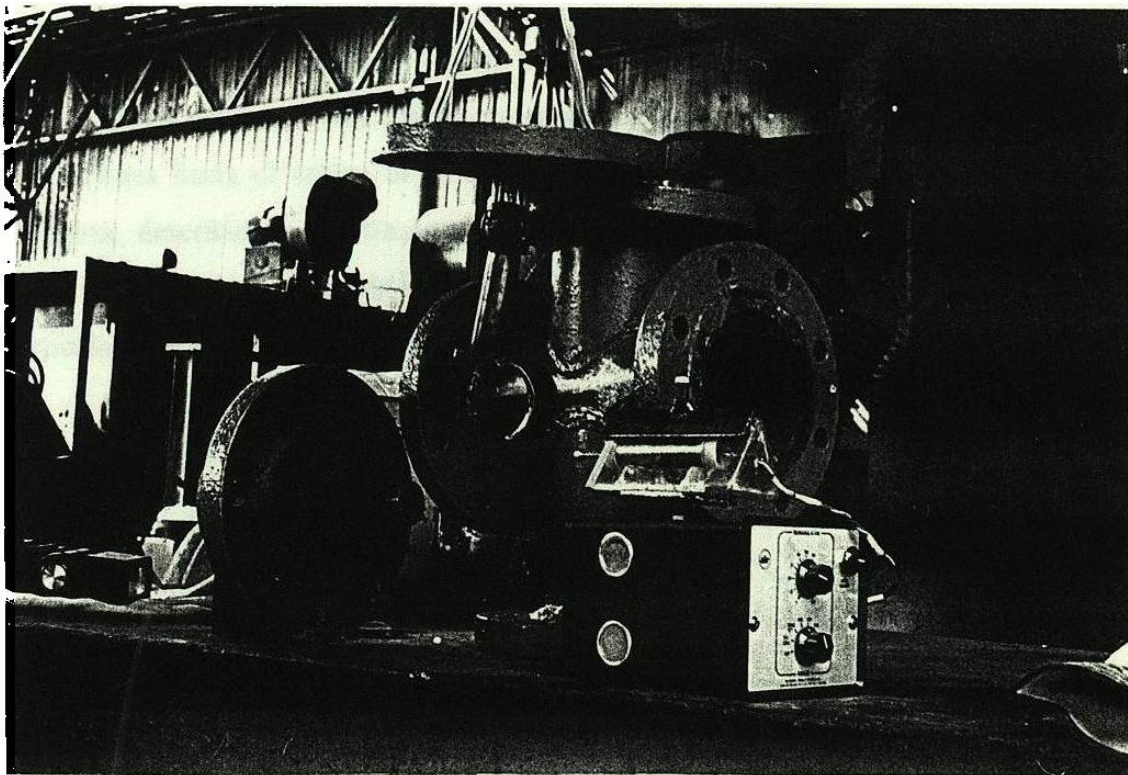
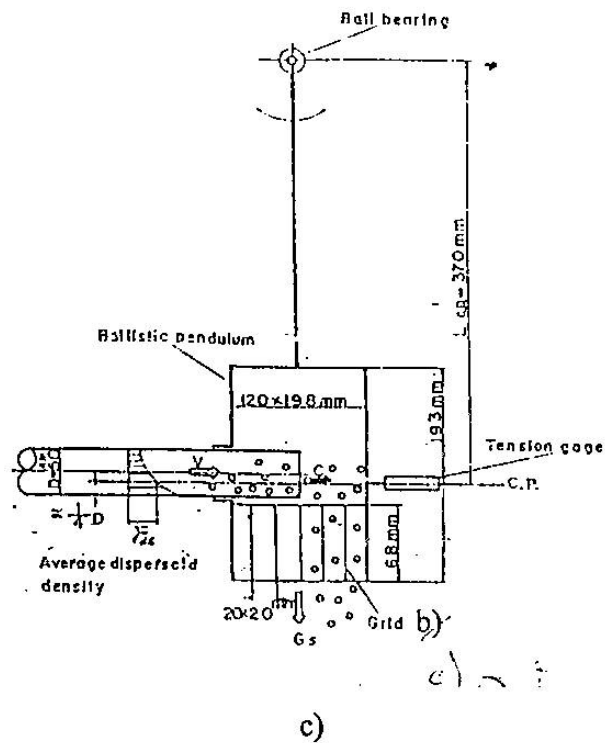


Figura 4.1Continuación.- Instrumentos para medir velocidad de partículas, c) Con péndulo balístico⁷, d) Fotografía de un arreglo, péndulo - transductor.

Para el primer paso del método se consideraron las palabras de D'Alembert: "Lo único que vemos directamente en el movimiento de un cuerpo es que recorre cierta distancia y que necesita cierto tiempo para hacerlo. Es a partir de esta idea que debiera ser posible extraer todos los principios de la mecánica, si queremos demostrarlos en forma clara y precisa"¹⁹. Esto indujo a medir la velocidad de la partícula por tiro horizontal.

4.2 Tiro horizontal

Antes de proceder con el análisis físico y matemático, es preciso definir el concepto de velocidad de partículas aquí empleado. Como es bien sabido, la velocidad es un vector que posee magnitud, dirección y sentido. En éste trabajo se emplea literalmente el término velocidad, ya que se obtiene una medida de la rapidez de la misma, y se asume que la dirección y sentido de las partículas es el que lleva el gas en el ducto horizontal.

Cuando una partícula es lanzada horizontalmente, como es el caso de partículas de fierro esponja dentro de una tubería, se encuentra que al salir de la tubería las partículas son atraídas hacia el centro de la tierra con una aceleración gravitatoria, como es de esperarse, describiendo una trayectoria parabólica. Entonces puede obtenerse la velocidad de las partículas en la salida de la tubería midiendo la distancia en línea recta que alcanza la partícula referente al pie de la punta de salida de la tubería (fig. 4.2).

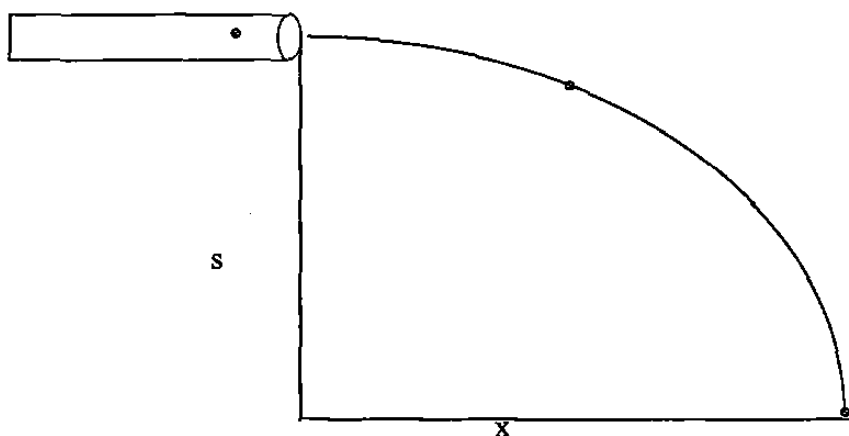


Figura 4.2 Esquema de un tiro horizontal.

Sin considerar el efecto del aire en las partículas, se tendría que el tiempo (t) que tarda la partícula en describir la trayectoria parabólica es el mismo que tardaría la partícula en caída libre²⁰.

Así sustituyendo t de la ecuación de caída libre (4.1) en la ecuación de la trayectoria parabólica (4.2):

$$s = \frac{1}{2}gt^2 \quad (4.1)$$

$$v_p = \frac{x}{t} \quad (4.2)$$

se tiene:

$$v_p = x \frac{\sqrt{2sg}}{2s} \quad (4.3)$$

Donde s es la altura en caída libre, x es el alcance medido de las partículas, g la aceleración gravitatoria y v_p la velocidad de la partícula.

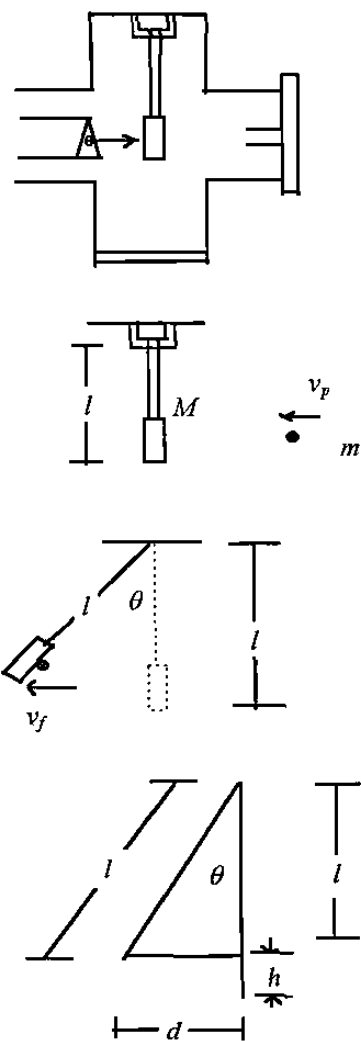
Si la partícula cayera libremente por efectos únicos del campo gravitacional, los valores obtenidos a partir de (4.3) serían correctos, pero si la fuerza de arrastre frena el movimiento, debemos considerar dicha fuerza.

4.3 Extrapolación de medio y temperatura

Debido a que el objetivo de la presente tesis es encontrar la velocidad de las partículas de fierro esponja en gas reductor y a altas temperaturas, se trabajó con un péndulo balístico, el cual serviría como un testigo detectando los desplazamientos que sobre él mismo imprimían las partículas de mineral reducido al ser transportadas por el gas.

4.3.1 Diseño del péndulo balístico

Las ecuaciones de diseño del péndulo balístico (4.4), (4.5), (4.6) y (4.7) en esta investigación, son adaptaciones de las ecuaciones generales de balance de energía y de conservación de ímpetu^{20,21,22}. Así como ecuaciones que involucran la geometría del sistema particular a analizar.



$$\frac{1}{2}(M + m)v_f^2 = (M + m)gh \quad (4.4)$$

$$MV + mv_p = (M + m)v_f \quad (4.5)$$

$$h = l(1 - \cos\theta) \quad (4.6)$$

$$\theta = \text{sen}^{-1} \frac{d}{l} \quad (4.7)$$

$$M = m \left(\frac{v_p}{\sqrt{2gh}} - 1 \right) \quad (4.8)$$

De la ecuación 4.8 se observa que la masa del péndulo (M) dependerá de la masa de partículas (m) que impulsen el movimiento, así como de la velocidad de las partículas (v_p). En la experimentación se trabajó con un péndulo de acero inoxidable con una masa de 78 g y con uno de acrílico con masa de 45 g.

4.3.2 Extrapolación para cambio de medio transportador

El que las ecuaciones (4.6) y (4.7) no involucren pérdidas por fricción, no afecta las mediciones para la velocidad de partículas, ya que al cambiar el gas transportador, gas R por aire, se colocaron los mismos péndulos para rastrear los mismos desplazamientos, sólo que ahora se registraron los diferentes flujos manejados con el nuevo gas. De tal forma que las pérdidas de energía que se presentaran en la primera medición serían las mismas pérdidas que se presentarían para el segundo desplazamiento. En la sección 6.1 se muestran los resultados de desplazamientos obtenidos en aire y gas R a temperatura ambiente.

4.3.3 Extrapolación en base a temperaturas

Para eslabonar los flujos de gas y velocidad de partículas arriba mencionados con los buscados a altas temperaturas se procedió a efectuar un escalonamiento en base a las fuerzas de arrastre presentes en ambas condiciones. Así, bajo condiciones isocinéticas e isodinámicas se tiene que la fuerza de arrastre a una temperatura uno debe ser igual a la fuerza de arrastre a una temperatura dos. Es decir:

$$F_D \perp T_1 = F_D \perp T_2 \quad (4.9)$$

Sustituyendo (4.10) y la fuerza de arrastre^{9,23,24} dada por (4.11) en (4.9) se tiene:

$$u = v_g - v_p \quad (4.10)$$

$$F_D = \frac{CA_p \rho u^2}{2} \quad (4.11)$$

donde u es la velocidad relativa, v_g y v_p la velocidad del gas y la partícula, respectivamente. C es el coeficiente de arrastre, A_p el área de la partícula y ρ la densidad del gas.

$$\frac{1}{2} C_D \rho (v_g - v_p)^2 A_p \perp_{T1} = \frac{1}{2} C_D \rho (v_g - v_p)^2 A_p \perp_{T2} \quad (4.12)$$

eliminando elementos comunes:

$$\rho (v_g - v_p)^2 \perp_{T1} = \rho (v_g - v_p)^2 \perp_{T2} \quad (4.13)$$

Como la densidad ρ depende de la temperatura (T), la presión (P) y el peso molecular (PM) del gas en la forma:

$$\rho = \frac{(12.19 \cdot PM)P}{T} \quad (4.14)$$

y sustituyendo (4.14) en (4.13)

$$\frac{(12.19 \cdot PM)P}{T} (v_g - v_p)^2 \perp_{T1} = \frac{(12.19 \cdot PM)P}{T} (v_g - v_p)^2 \perp_{T2} \quad (4.15)$$

eliminando términos comunes:

$$\frac{1}{T} (v_g - v_p)^2 \perp_{T1} = \frac{1}{T} (v_g - v_p)^2 \perp_{T2} \quad (4.16)$$

arreglando términos:

$$T_2 (v_g - v_p)_1^2 = T_1 (v_g - v_p)_2^2 \quad (4.17)$$

Resolviendo para v_{g1} :

$$(v_g - v_p)_1 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{2}} (v_g - v_p)_2 \quad (4.18)$$

arreglando términos:

$$v_{g1} = v_{p1} + (v_g - v_p)_2 \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.19)$$

con la ecuación (4.19) se obtiene el valor de v_g a temperatura ambiente y que al someterlo a T_2 se obtenga una velocidad de partícula igual a las obtenidas experimentalmente para T_1 .

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTACIÓN

5.1 Descripción de materiales y medios de transporte

5.1.1 Descripción del material a transportar

Tanto para las pruebas de velocidad de partículas como para las pruebas de desgaste se utilizó fierro esponja. Este material está constituido principalmente por 90% de Fe y una pequeña cantidad de ganga (SiO_2 , C, CaO). El material fue cribado y tamizado. Se trabajó con una granulometría de +1/16 - 1/8 de pulgada.

5.1.2 Descripción del gas transportador

A fin de transportar los finos de fierro esponja y para calcular la velocidad de éstos últimos, se utilizó aire y un gas reductor constituido principalmente por hidrógeno llamado comúnmente gas reformado o gas R, y cuya composición química en volumen se presenta en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Composición típica de gases (% en volumen).

Gas	O	H	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ O
Aire	21	-	-	-	-	79	-
Gas R	-	71	16	8	3-4	1	1

5.1.3 Descripción del material para pruebas de desgaste

Para las pruebas de desgaste en relación con la velocidad de la partícula incidente, se utilizaron cupones de aproximadamente 6 x 6 x 0.6 cm. Los cupones fueron cortados de un tubo sin costura de acero ASTM A106 grado B, de microdureza 200 Vickers y de microestructura ferrítica y perlita mostrada en la figura 5.1. La composición química del acero se especifica en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Composición química del acero ASTM A106 grado B (% en peso).

Acero	C	P	Si	MnO	Ni	Cr	S
ASTM A106 - B (nominal)	0.3	-	0.1 mín	0.29-1.06	-	-	-
ASTM A106 - B (muestra)	0.16	0.016	0.19	0.74	0.014	0.028	0.007

5.2 Descripción del equipo

5.2.1 Descripción del equipo para las pruebas de desgaste

A fin de evaluar el desgaste presente en las líneas de tubería en un sistema de transporte neumático particular, se utilizó un equipo que emulara las condiciones esenciales del sistema, a saber, un calentador, una zona de alimentación del material, una zona de aceleración y enfriadores del gas (ver figura 5.2).

La relación de dichas zonas con el objetivo de este trabajo es el siguiente: el gas transportador pasa a través del calentador (zona 1, de la figura 5.2) donde se eleva su temperatura hasta una temperatura deseada. Continúa su trayectoria hasta el punto (2, de la fig 5.2) donde se agrega el material a través de una dosificadora. Así ambos, mineral de hierro esponja y gas formando un flujo de dos fases, son impelidos hasta llegar a la zona de impacto (punto 3, de la figura 5.2), donde se encuentran los cupones de acero. La zona 4 representa un ciclón, el cual separa el mineral del gas.

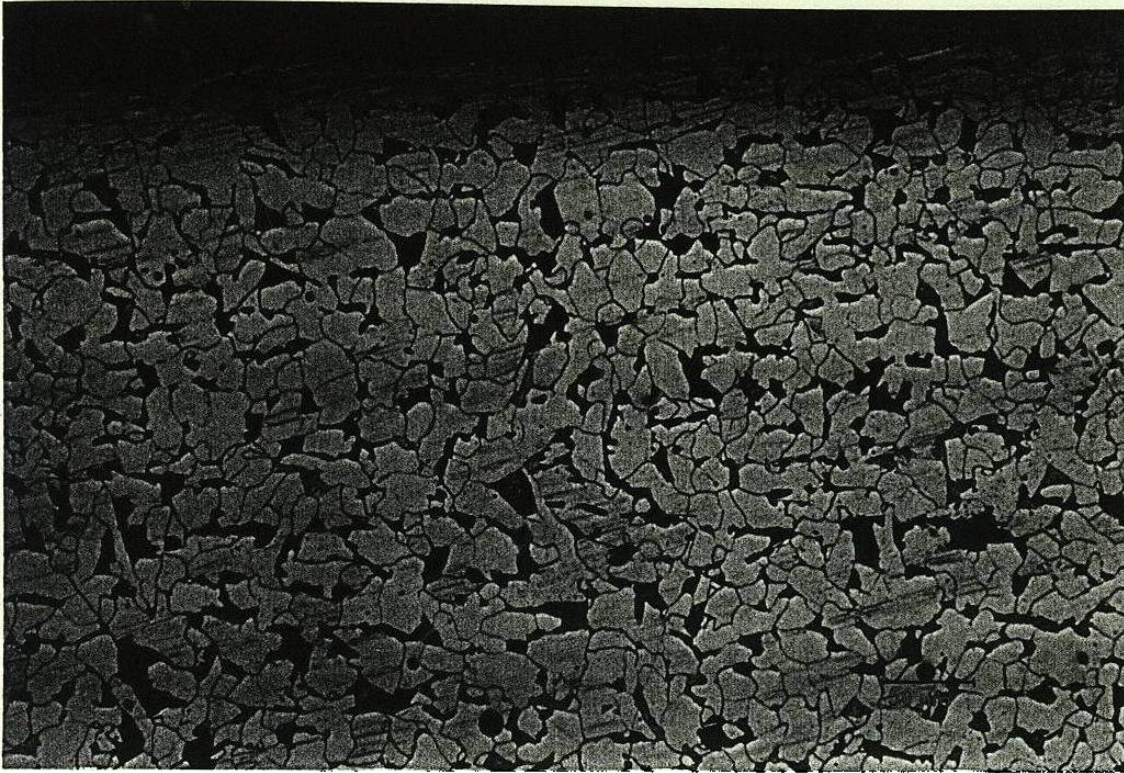


Figura 5.1 Microestructura del acero ASTM A106 B a 200 X. Atacada con Nital 2%.

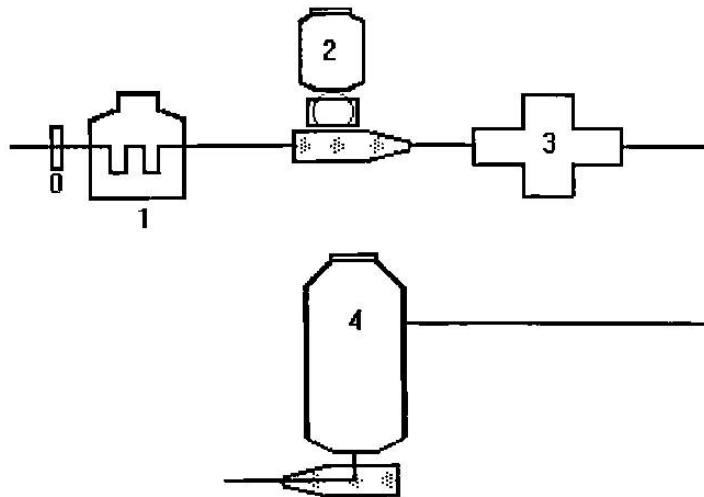


Figura 5.2 Esquema de la planta con las zonas básicas de transporte neumático.

En la figura 5.3 se muestra una ampliación de la zona de impacto, en donde los cupones de acero se colocan frente a la tubería que transporta el mineral con gas R. Los cupones están contenidos en un portamuestras que cuelga de una brida.

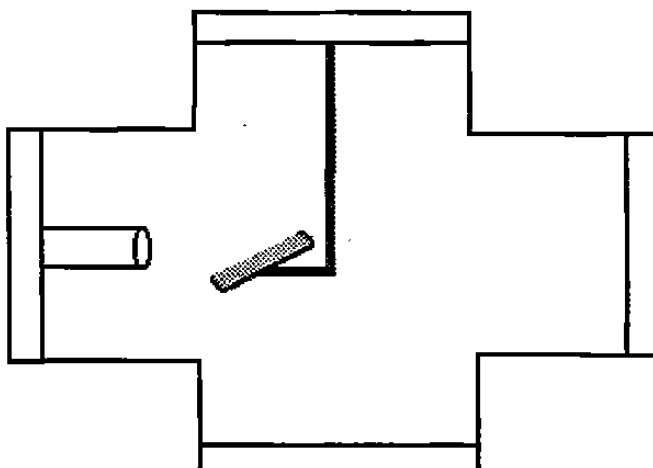


Figura 5.3 Cupón de acero colocado en un portamuestra.

Para las pruebas en caliente se colocaron termopares en la zona 1, 2, 3 y 4 de la figura 5.2. Los termopares utilizados fueron de Cromel - Alumel con precisión de ± 2.2 °C. Las lecturas fueron registradas automáticamente en un graficador tipo Yew.

5.2.2 Descripción del equipo para medir la velocidad de las partículas

Para relacionar los valores de desgaste obtenidos en los cupones con parámetros de operación del sistema, se procedió a calibrar el equipo encontrando la velocidad de las partículas con el flujo suministrado para alcanzar tales velocidades.

Se utilizaron placas de orificio de acero inoxidable 316, con un ángulo de biselado de 45° para medir el flujo de gas en la línea. Dichas placas se conectaron a un registrador de presión diferencial, (flow register pressure register, frpr) mostrado en la figura 5.4. Ya que el flujo de gas está relacionado directamente con las presiones diferencial y absoluta del gas en la tubería^{25,26,27}. La precisión del frpr es del orden de ± 3 metros cúbicos normales por hora (m³nh) de flujo de gas transportador.

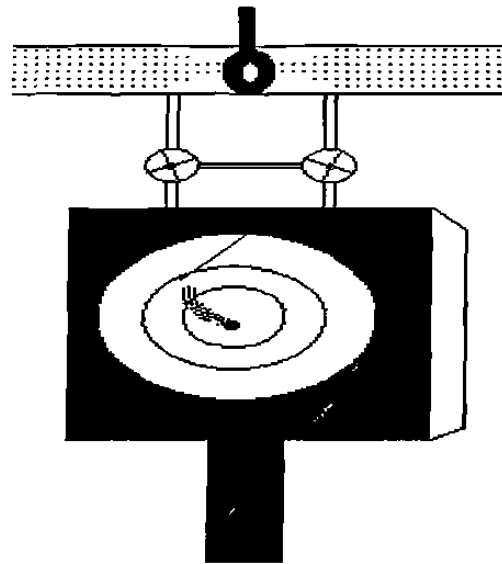


Figura 5.4 Esquema de placa de orificio y registrador de presión (frpr).

Para medir la masa de mineral que descarga la dosificadora en razón de gramos por minuto y en base a rev/min de la misma, se eliminó una parte de la tubería dejando un canal abierto continuo a la dosificadora (figura 5.5) a fin de atrapar la masa que proviniera de ella. Con un cronómetro se midieron intervalos de tiempo de 10 y 300 segundos durante el cual se recogió el mineral. Posteriormente se pesó el material en una báscula con precisión de ± 0.1 g.

Para medir la velocidad de las partículas transportadas con aire, se estableció un arreglo representado en la figura 5.5. En donde se prescindió del portamuestras y de la tolva receptora especificadas previamente en las zonas 3 y 4 de la fig 5.2.

En la salida de la tubería se detectó la distancia o alcance de las partículas. Para medir esta distancia se colocaron contenedores fuera de la tubería para recoger las partículas. Se pesaron las partículas (con una báscula con precisión de ± 0.1 g) encontradas en cada contenedor, y se definió el alcance promedio como la distancia en la cual se recibió la mayor concentración de sólidos (figura 5.6). Las distancias se midieron con cintas métricas ordinarias, sin embargo la precisión del alcance promedio es de \pm el largo de un contenedor, es decir ± 30 cm.

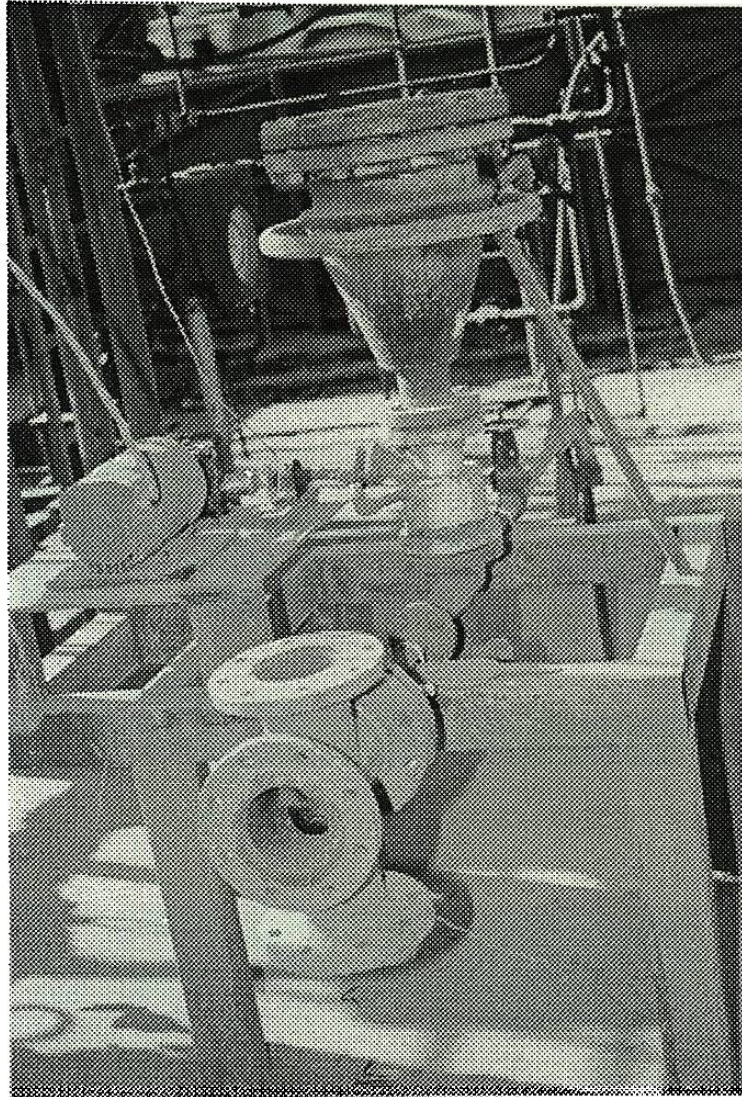


Figura 5.5 Fotografía de la zona de transporte, descarga y salida de las partículas.

En la figura 5.7 se muestran los péndulos balísticos utilizados en las pruebas de flujo de gas - velocidad de las partículas. Junto a cada péndulo se colocó un transductor (figura 5.8), el cual detectaba los desplazamientos de su brazo y los traducía a señales de corriente (figura 5.9) que se registraron en un graficador Yokogawa con precisión de $\pm 100\mu\text{V}$. La calibración del transductor se hizo colocando la punta del transductor en forma vertical y colocando sobre ella pesas estándar, midiendo los desplazamientos para cada masa.

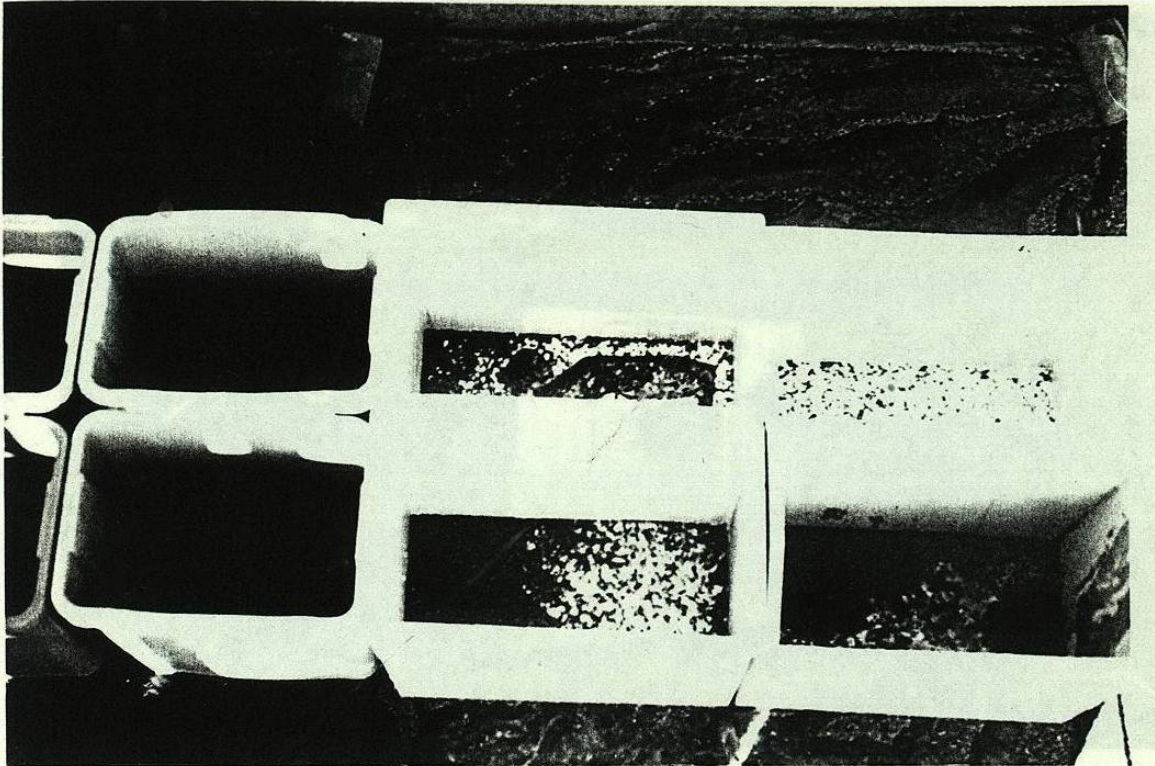


Figura 5.6 Fotografía de los contenedores utilizados en el tiro horizontal.

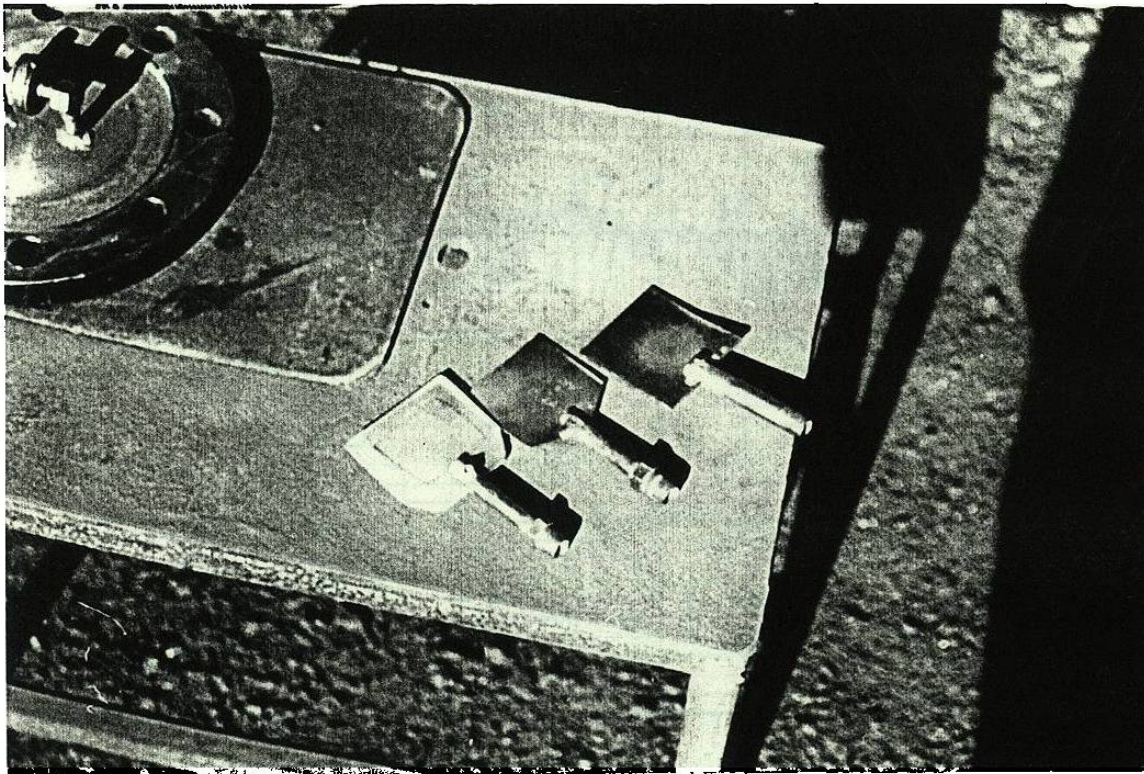


Figura 5.7 Péndulos balísticos utilizados.

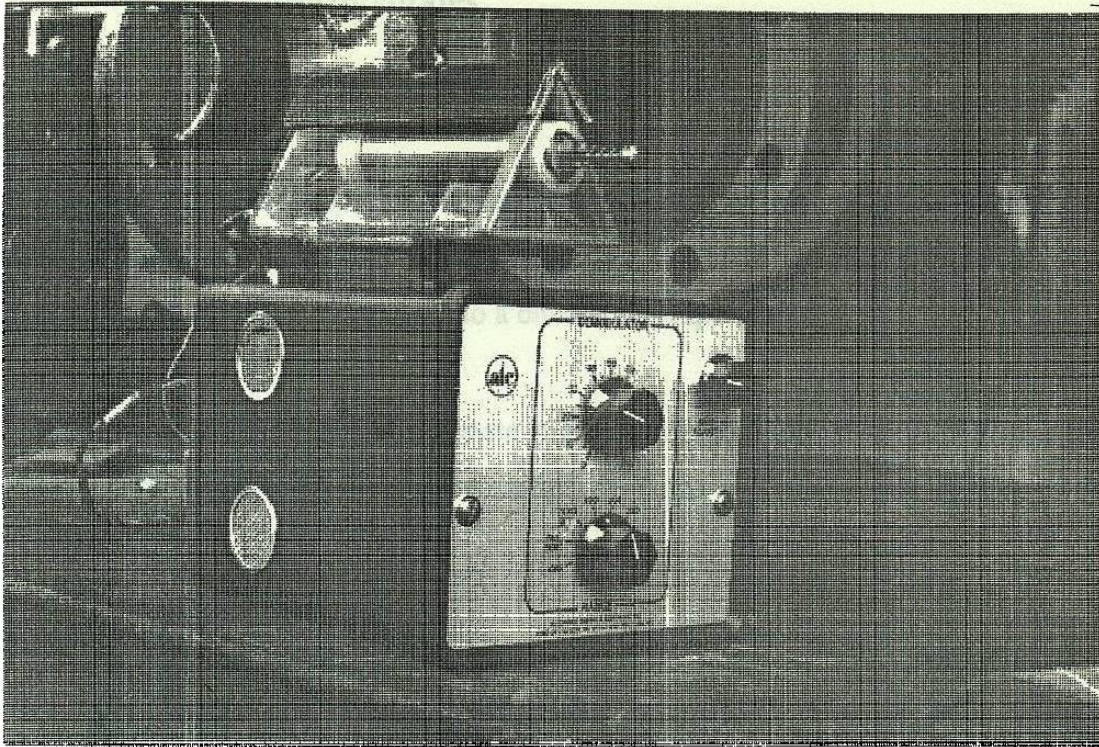


Figura 5.8 Fotografía del transductor.

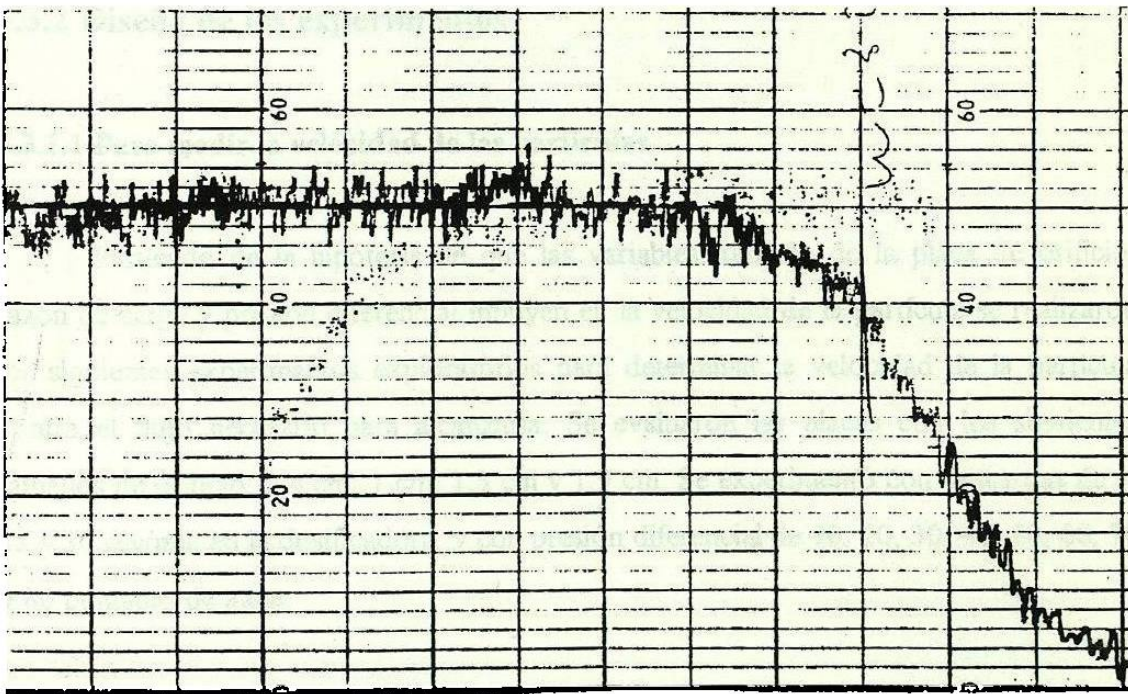


Figura 5.9 Desplazamientos registrados por el Yew.

5.3 Condiciones experimentales

5.3.1 Objetivo de los experimentos

- Obtención de un método para encontrar la velocidad de las partículas cuando éstas son componentes de un flujo de dos fases, gas R y fierro esponja. Con gas R como medio de transporte y transportando a diferentes temperaturas.
- Observar cualitativamente el desgaste presente en tubos de acero ASTM A106-B, bajo condiciones de transporte neumático de fierro esponja en gas R a diferentes temperaturas.
- Estimar cuantitativamente el desgaste presente en tubos de acero ASTM A106-B, bajo condiciones de transporte neumático de fierro esponja en gas R a diferentes temperaturas.

5.3.2 Diseño de los experimentos

5.3.2.1 Para medir la velocidad de las partículas

Partiendo de la hipótesis de que las variables: tamaño de la placa de orificio, razón de carga y presión diferencial influyen en la velocidad de la partícula se realizaron los siguientes experimentos exploratorios para determinar la velocidad de la partícula contra el flujo necesario para alcanzarla. Se evaluaron las placas con los siguientes tamaños de orificio: 0.4 cm, 1 cm, 1.3 cm y 1.9 cm. Se experimentó con descargas de 3, 15 y 30 rev/min en la dosificadora, y con presión diferencial de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 y 80 pulgadas de agua.

Realizados los experimentos exploratorios se determinó seguir evaluando solamente para placas de 1 y 1.3 cm, manejar presiones diferenciales en un rango de 10 a 80 pulgadas de agua, y descargas del mineral de 3 y 15 rev/min. En la tabla 5.3 se enlistan los experimentos significativos realizados.

5.3.2.2 Para medir la razón de desgaste

Deseando conocer el desgaste representativo de un sistema particular de transporte neumático y debido a que en la actualidad no es posible medir en planta tal desgaste, se logró simular las condiciones del transporte neumático para un sistema de flujo de fase diluida con finos de mineral, con pruebas de laboratorio y con limitaciones debidas a la capacidad energética y de diseño mismo del equipo.

A fin de establecer el diseño de experimentos se plantearon las siguientes preguntas: ¿qué tipo de acero se evaluaría? ¿de qué dimensiones se cortarían las muestras? ¿a qué temperaturas se efectuarían los ensayos? ¿cuánto tiempo duraría la prueba? ¿qué flujos (m³/h) se manejarían? ¿cuánta carga se agregaría? y ¿a qué ángulo de impacto se pondrían los cupones?

Otros investigadores¹⁵ encontraron que el acero al carbono presenta un grado de desgaste mayor que el de otros aceros así, se tomó el acero A106-B para evaluar su desgaste. Se probó con un ángulo de impacto de 30° ya que según la literatura², está en el rango en el cual los materiales dúctiles presentan un mayor grado de desgaste. La temperatura, la velocidad de las partículas y por consiguiente el flujo de gas necesario, se tomaron en base a las condiciones reales requeridas en un sistema de transporte neumático de esta naturaleza. Por otra parte las dimensiones de los cupones se fijaron en base a las dimensiones y geometría del equipo. Sin embargo se realizaron experimentos exploratorios para resolver las variables tiempo de prueba y carga de mineral impactante en los cupones. En la tabla 5.4 se enlistan los experimentos para las pruebas de desgaste.

Tabla 5.3 Experimentos para la obtención de la velocidad de las partículas en aire.

No	Placa (plg)	Descarga (rev/min)	Presión diferencial
1	0.394	15	20
2	0.394	15	50
3	0.394	15	60
4	0.394	15	80
5	0.394	3	30
6	0.394	3	45
7	0.394	3	65
8	0.394	3	80
9	0.394	3	98
10	0.5	15	10
11	0.5	15	25
12	0.5	15	33
13	0.5	15	40
14	0.5	15	50
15	0.5	15	60
16	0.5	15	70
17	0.5	15	80
18	0.5	3	10
19	0.5	3	20
20	0.5	3	30
21	0.5	3	40
22	0.5	3	50
23	0.5	3	60

Tabla 5.4 Experimentos para pruebas de desgaste.

Prueba	Temperatura °C	V _p m/s
1	300	9
2	400	12
3	500	12
4	575	12

5.3.3 Condiciones de prueba

Las condiciones de prueba para los experimentos de laboratorio, se enlistan en las tablas 5.5 y 5.6, para la velocidad de las partículas y para desgaste de transporte en fase diluida, respectivamente.

Tabla 5.5 Condiciones de prueba para el cálculo de velocidad de las partículas

Variable	Condición
Flujo	40 a 180 mcnh
Presión	2.98 kg/cm ²
Materiales transportados	finos de fierro esponja
Granulometría	0.32 cm a 0.16 cm
Velocidad de carga	20 g/s
Atmósfera	aire y gas R

Tabla 5.6 Condiciones de prueba para desgaste.

Temperatura	300,400,500 y 575 °C
Presión	2.98 kg/cm ²
Materiales transportados	finos de fierro esponja
Granulometría	+ 0.32 cm, - 0.16 cm
Tiempo total de prueba	3.3 hrs
Carga transportada	200 kg
Velocidad de carga	20 g/s
Atmósfera	reductora, gas R
Velocidad de la partícula	12 m/s c/prueba
Densidad del gas	0.35 g/cm ³ a temperatura ambiente
Ángulo de impacto	30°

5.3.4 Procedimiento experimental

5.3.4.1 Procedimiento experimental para obtener la velocidad de las partículas.

- Se midió el alcance de las partículas cuando éstas eran transportadas por aire a diferentes flujos (medidos por el frpr) en un canal abierto. Así se obtuvo una gráfica de V_p contra flujo de aire a temperatura ambiente (ver figuras 6.1 y 6.2).
- Con canal cerrado, se igualaron las condiciones de flujo y V_p encontradas anteriormente. Se instaló un péndulo balístico y se obtuvieron los desplazamientos que presentaba dicho instrumento bajo tales condiciones. Obteniéndose entonces para

cierto flujo de aire a temperatura ambiente, una velocidad de partícula y un desplazamiento efectuado en el péndulo (ver tablas 6.1 y 6.2).

- Con canal cerrado y transportando el mineral con gas R a temperatura ambiente, se varió el flujo de entrada hasta conseguir en el péndulo los desplazamientos obtenidos con aire. Se registraron tales flujos y se obtuvo así una gráfica de flujo de gas R, velocidad de la partícula y desplazamientos del transductor a temperatura ambiente (ver figura 6.3).

5.3.4.2 Procedimiento experimental para las pruebas de desgaste

Se cortaron cupones de los tubos de acero A106 grado B, con dimensiones aproximadas de 5.7 X 5.4 cm. Los cuales se lijaron y pulieron con lija SiC hasta grado 600, a fin de eliminar puntos propios del material que pudieran confundirse con los esperados para las pruebas de desgaste. Se pesaron las muestras y se pusieron a prueba por 3.3 horas bajo condiciones de servicio estipuladas en la tabla 5.6. Después de dicha operación se limpiaron las muestras con ultrasonido, se secaron y se pesaron (con una balanza analítica de ± 0.1 mg) a fin de detectar cambios de masa resultantes ocasionadas por el desgaste y se analizaron ópticamente para medir tales huellas.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la experimentación, tanto para encontrar la velocidad de las partículas en un flujo de dos fases en condiciones de transporte neumático como para el análisis cualitativo y cuantitativo de desgaste en los cupones de acero ASTM A106-B.

6.1 Resultados concernientes a la velocidad de las partículas.

Para encontrar la velocidad de las partículas (en aire a temperatura ambiente) por tiro horizontal es necesario determinar el alcance de las partículas. En estos experimentos el alcance promedio se obtuvo detectando la distancia en la cual el mayor número de partículas de fierro esponja incidían preferentemente en un punto. En la figura 6.1 se muestran algunas gráficas de material recolectado, después de ser transportadas y disparadas en tiro horizontal, contra alcance de las mismas. En a) y b) se muestra que para la placa de 1 cm y con 15 rev/min en la dosificadora, un incremento de flujo repercute en un incremento del alcance. En c) y d) un comportamiento similar se muestra con placa de 1.3 cm y la misma razón de descarga. Mientras que en e) y f) para igual flujo con una sola placa, producen alcances muy similares.

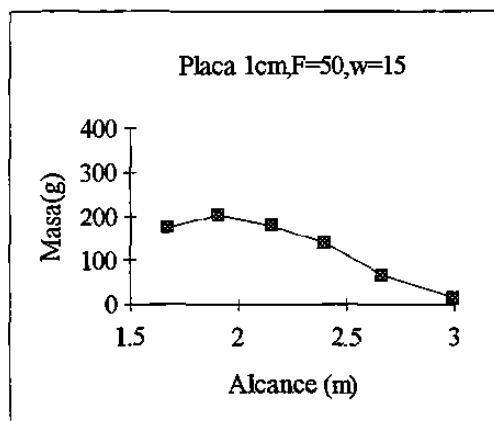
Registrando el flujo necesario para obtener tales velocidades de partícula y graficando ambos parámetros, se obtuvieron las gráficas mostradas en la figura 6.2. En donde se muestra también el sondeo necesario de placas de orificio para obtener un flujo suficiente para el transporte de las partículas, así como el sondeo de descarga ($w =$

revoluciones/minuto) de la dosificadora. Ambas gráficas son con aire como gas transportador y a temperatura ambiente.

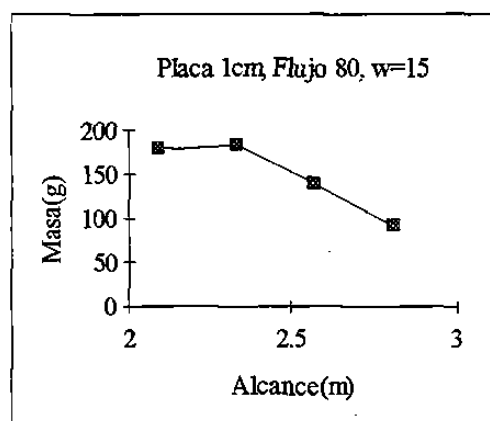
La figura 6.2 a), referente a una velocidad angular en la dosificadora de 15 rev/min, se observa que para velocidades de partícula de 5 a 10 m/s resulta indistinto el uso de placas de orificio, sea la de 1 ó 1.3 cm. Para velocidades mayores de 10 m/s la placa de orificio de 1 cm resulta limitada ya que no genera un flujo mayor de aire y por consecuencia no incrementa la velocidad de la partícula. Sin embargo la placa de 1.3 cm permite alcanzar dichos flujos y abarcar una velocidad de hasta 12 m/s.

En la figura 6.2 b) con una velocidad angular de 3 rev/min se presenta el mismo patrón, sólo que la velocidad máxima alcanzada resulta ser de 9 m/s, menor a la generada con $\omega = 15$.

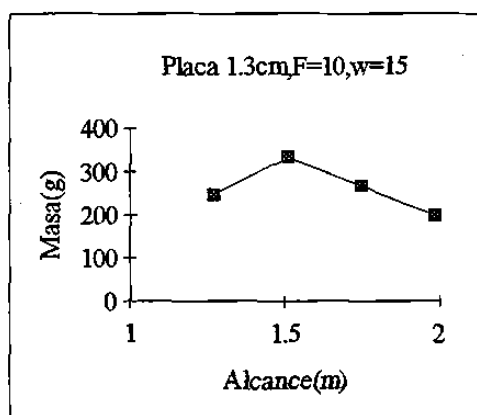
Comparando ahora por velocidad angular en la dosificadora (fig 6.2) se tiene que con menor descargas de mineral es posible alcanzar una mayor velocidad de partículas, lo que indica que un incremento en la carga de material a transportar disminuye la velocidad de éstas, debido a que el sistema se vuelve menos diluido y la razón concentración de partículas - concentración de gas aumenta, disminuyendo v_p . Resulta entonces que la elección de la placa de orificio, entre 1 ó 1.3 cm, o ambas indistintamente, se basa en la velocidad particular que se desea, así como de la descarga a emplear.



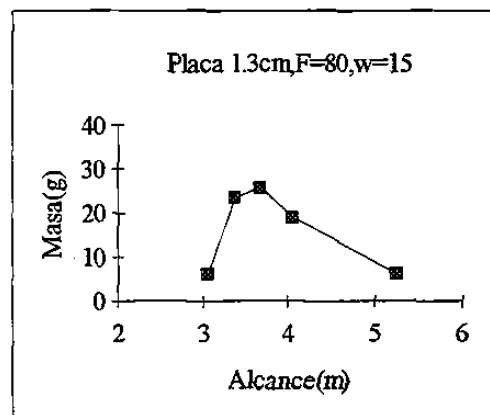
a)



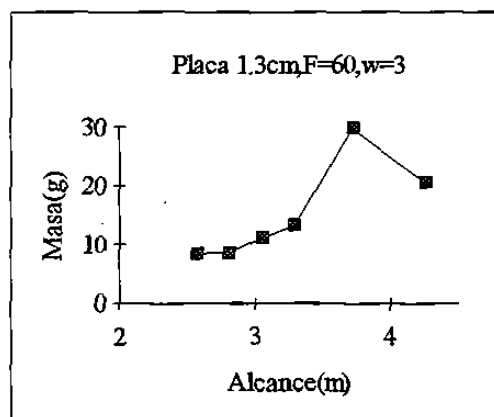
b)



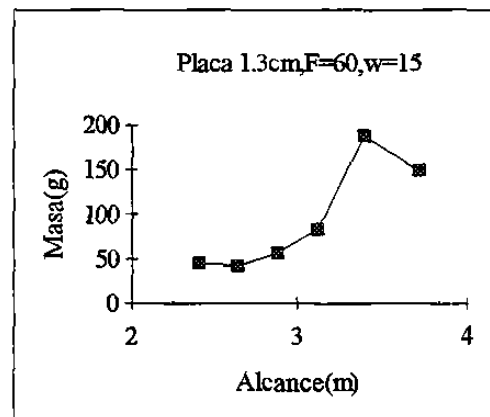
c)



d)

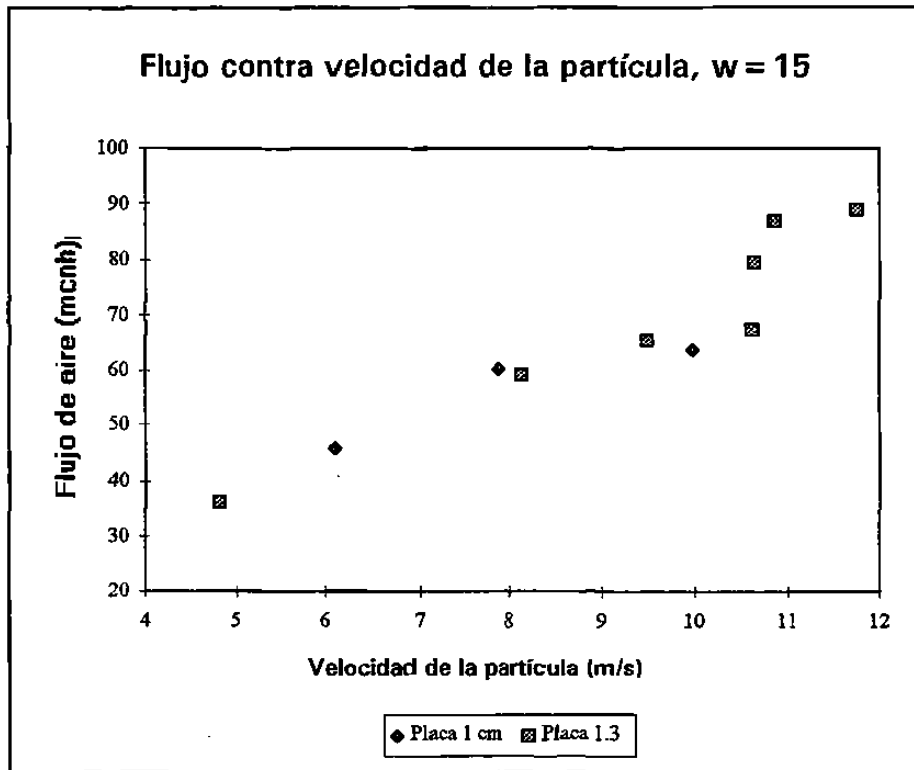


e)

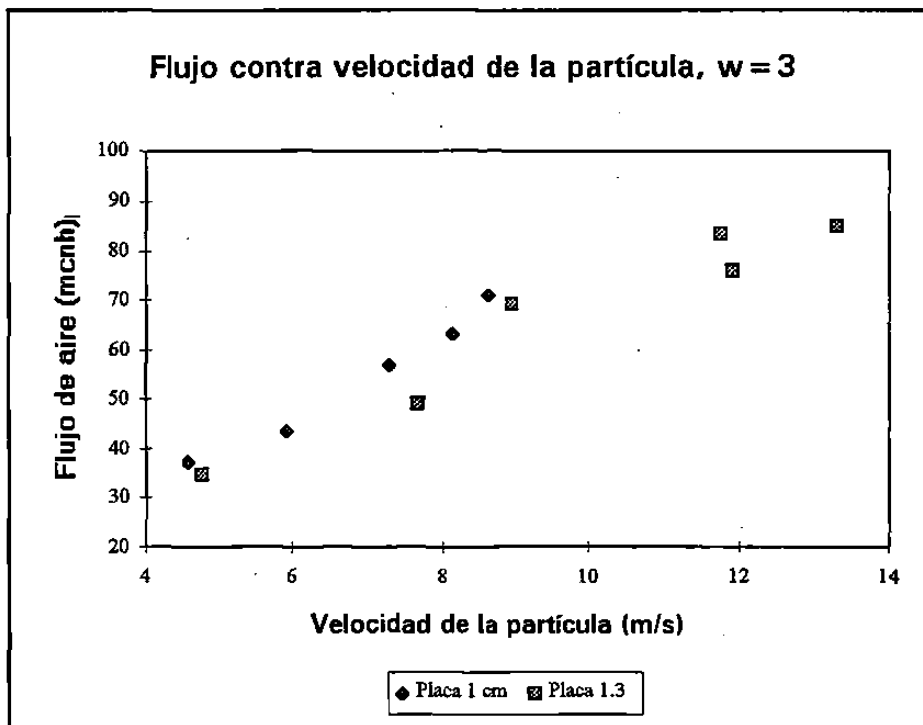


f)

Figura 6.1 Gráfica de masa de mineral de hierro esponja contra alcance. Con placa de 1 cm para a) y b), mientras que c), d), e) y f) con orificio de 1.3 cm. Los flujos F dados en mc/h, y w en rev/min.



a)



b)

Figura 6.2 Gráfica de flujo de aire a temperatura ambiente contra velocidad de las partículas con dos placas de orificio y con descargas de la dosificadora de a) $w = 15$ rev/min, b) $w = 3$ rev/min.

Instalado el péndulo balístico en la línea de tubería se procedió a repetir los datos de flujo y velocidad de partículas mostrados en la gráfica 6.2 con aire y a temperatura ambiente pero con una sola placa de orificio (1.3 cm) y con flujo de canal cerrado a fin de conocer los desplazamientos ocasionados en el péndulo bajo esas condiciones. En la tabla 6.1 se muestran los desplazamientos obtenidos.

Tabla 6.1 Desplazamientos detectados por el péndulo en aire a temperatura ambiente.

Vp (m/s)	Flujo de aire(mcnh)	Desplazamientos (mV)
8.12	59.17	-102.5 , -102
9.49	65.47	-101.2 , -101.8
10.7	77.9	-98.8 , -100.4
11.76	89.17	-94 , -94.8

Tomando como puntos de pivote los desplazamientos mostrados en la tabla 6.1, se cambió el gas transportador, ahora con gas R y se varió el flujo hasta obtener tales desplazamientos. En la tabla 6.2 se muestran los mismos desplazamientos del péndulo pero con el flujo de gas R necesario para encontrarlos. Mientras que en la figura 6.3 se muestra la gráfica de flujo (mcnh) de gas R contra la velocidad de la partícula, a temperatura ambiente.

Tabla 6.2 Desplazamientos detectados por el péndulo con gas R a temperatura ambiente.

Desplazamientos (mV)	Flujo de gas R (mcnh)
-102.5 , -102	128.1
-101.2 , -101.8	138.4
-98.8 , -100.4	153.7
-94 , -94.8	175.1

De la tabla 6.1 y 6.2 se observa que las partículas generan desplazamientos sobre el péndulo y el transductor y que los flujos necesarios para determinadas v_p varían considerablemente según sea aire o gas R el transportador empleado. En la figura 6.3 se visualiza claramente ésta información y resulta que para el gas R es necesario aplicar mayor flujo que para el aire, ésto debido a la menor densidad del gas R (0.3) comparada con la del aire (1.0).

Un comportamiento similar se observa en la figura 6.4 en el que se analiza sólo el gas R como gas transportador. En tal figura se muestra que con un incremento en la temperatura del gas, menor flujo se necesita para rastrear determinadas velocidades de partículas. Ésto puede deberse a que al aumentar la temperatura el gas se comporta más idealmente, con mayor velocidad promedio de sus moléculas, que provocan un mayor movimiento en las partículas y por lo tanto una menor cantidad de flujo de gas por volumen requerido. Esta gráfica no contradice la hipótesis de que al incrementar la temperatura mayor velocidad de partícula sea esperada. Sólo que la figura hace referencia a v_p fijas, es decir sólo a esas velocidades nos interesa el flujo de gas requerido, así resulta que al aumentar la temperatura menor flujo de gas es necesario.

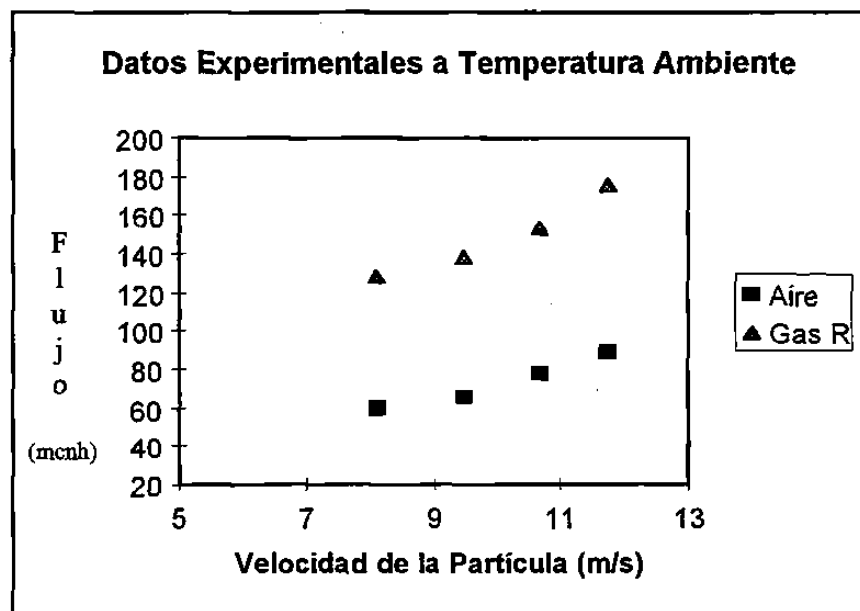


Fig. 6.3 Datos experimentales de velocidad de partículas y flujo de aire y gas R.

Con $v_g = Q/A_T$ y (4.19) se obtuvo el flujo de gas R necesario para obtener las velocidades de la partícula (ver tabla 6.1) a diferentes temperaturas. Estos valores se grafican en la figura 6.4. En donde se muestra que al incrementar la temperatura del gas R, menor flujo del mismo se requiere para rastrear las velocidades de partículas obtenidas con aire a temperatura ambiente.

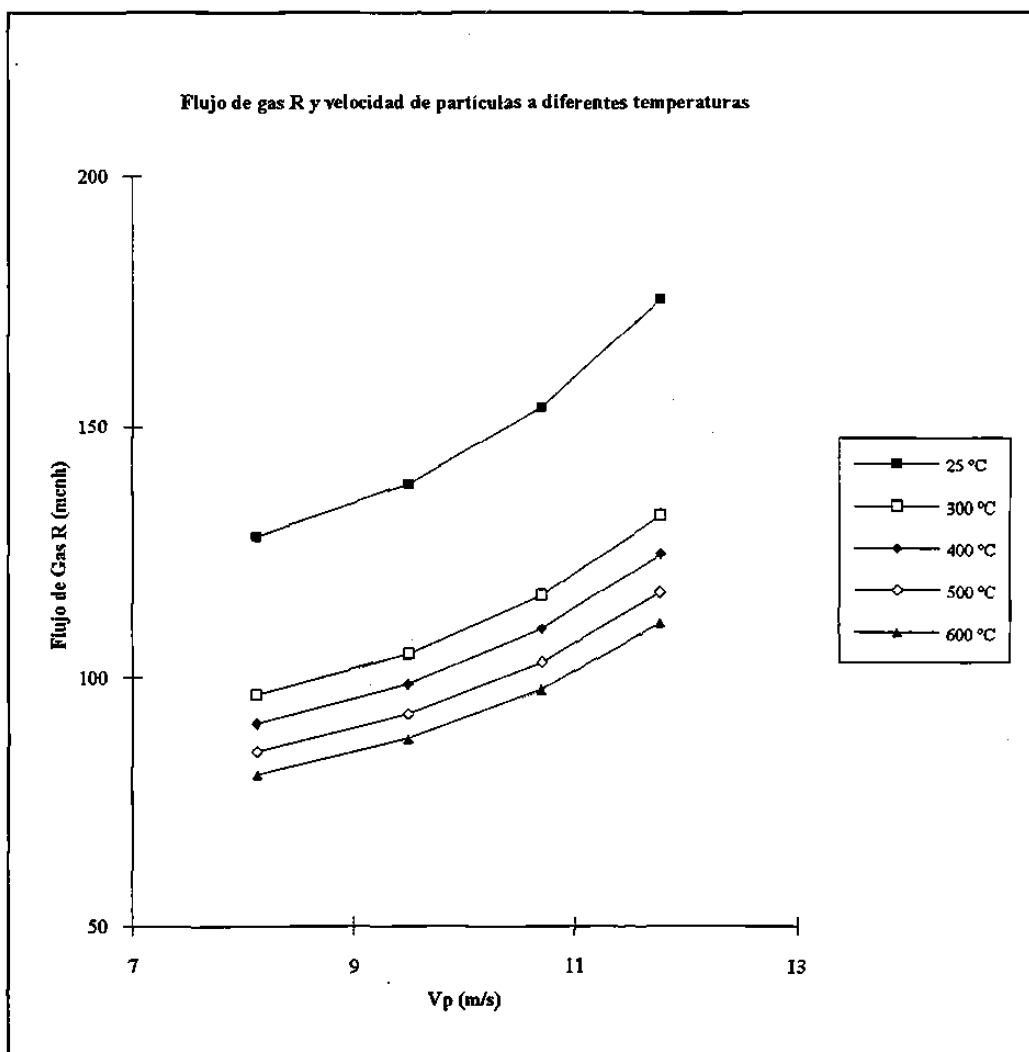


Figura 6.4 Datos teóricos de flujo de gas R contra velocidad de la partícula a diferentes temperaturas.

6.2 Resultados concernientes a la razón de desgaste

6.2.1 Resultados cualitativos

En la figura 6.5 se muestran los cupones de acero ASTM A106 - B después de trabajar en transporte neumático con 200 kg de fierro esponja impactando a un ángulo de 30° con respecto al flujo de gas R a temperaturas de 400, 500 y 565 °C y con una velocidad de la partícula de 12 m/s. En el centro superior de los cupones se observa el daño sufrido por desgaste. Estas zonas fueron micrografadas (figuras 6.6 y 6.7) con un analizador de imágenes. Los puntos en blanco resultan ser zonas efectivas de daño ocasionadas por el impacto del material transportado. Las micrografías 6.8 y 6.9 fueron tomadas con un microscopio electrónico de barrido (SEM) para proveer un acercamiento de tal daño. Se observa que el desgaste sufrido fue por remoción del material en la dirección del flujo de partículas.

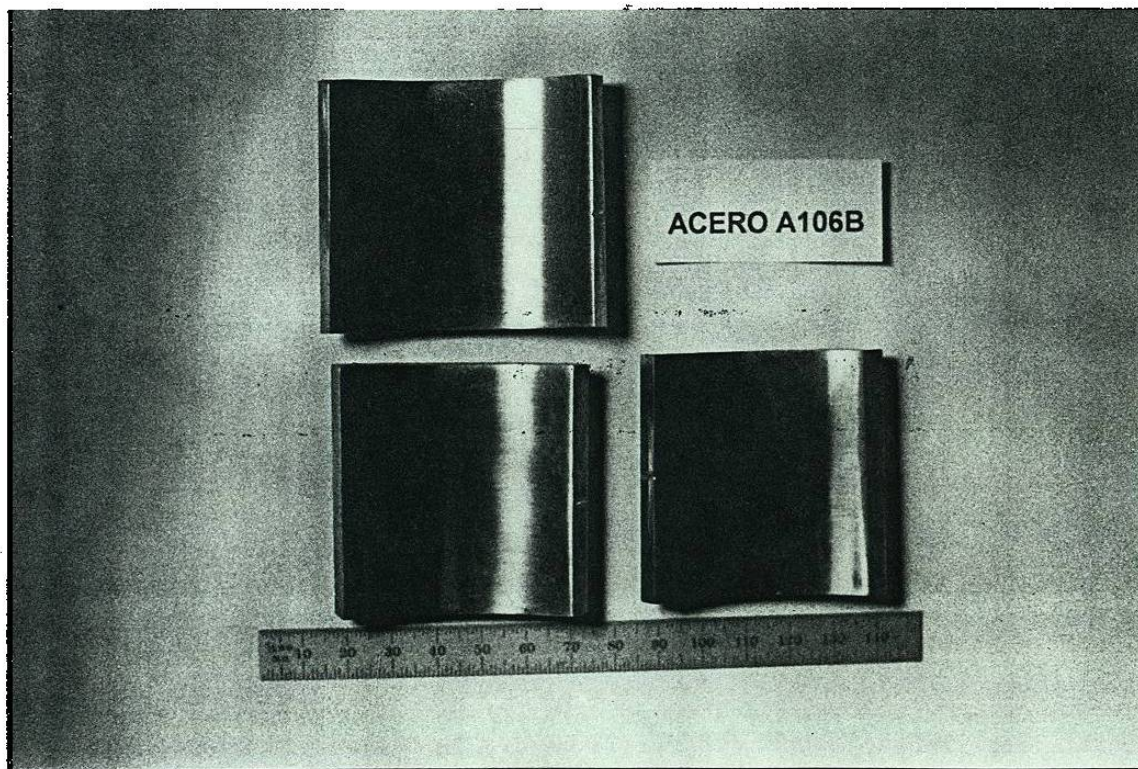


Figura 6.5 Cupones de acero ASTM A106-B.

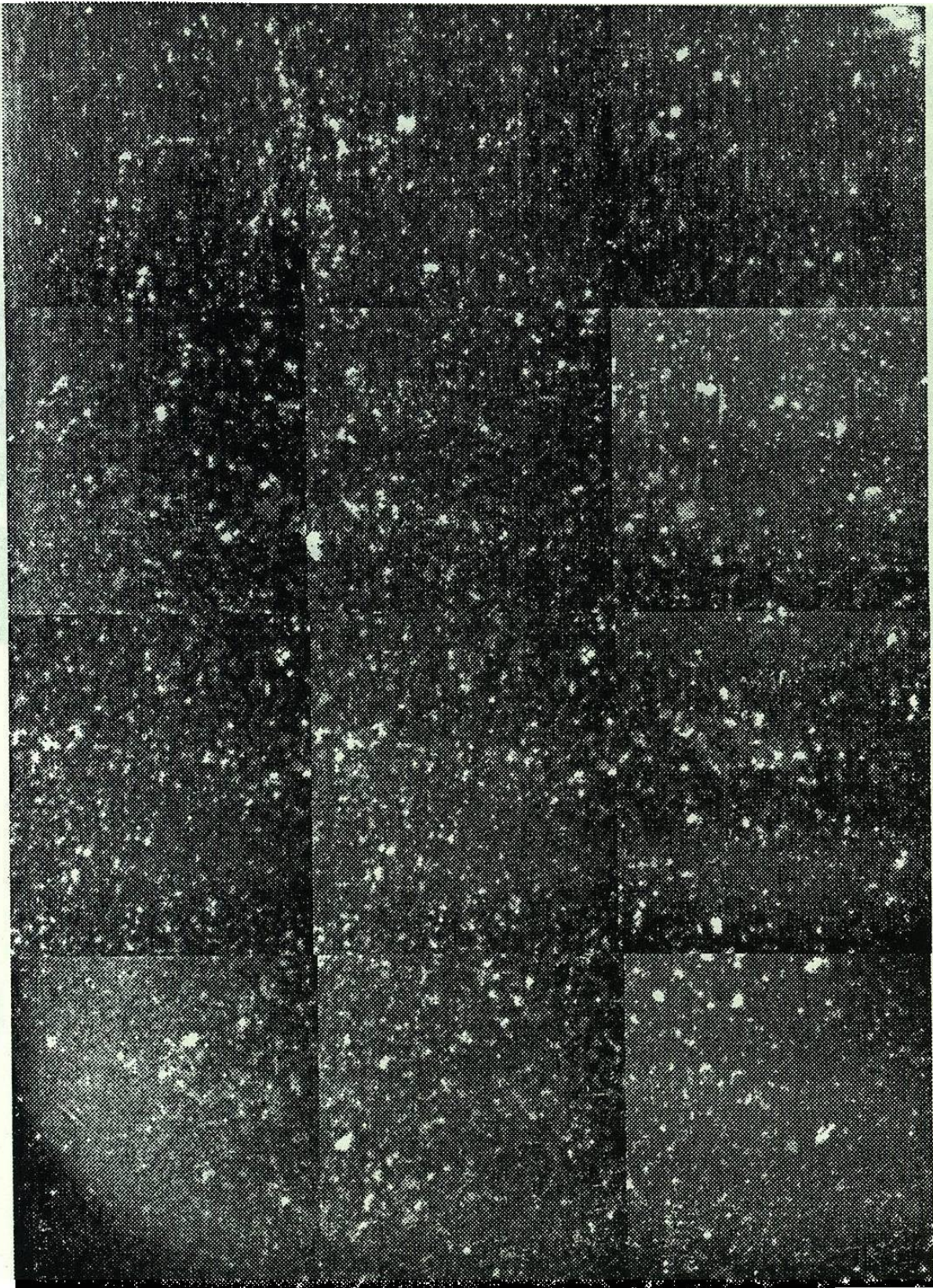


Figura 6.6 Fotografía digitalizada de acero al carbono desgastada por transporte de 200 kg de fierro esponja a 400 C.

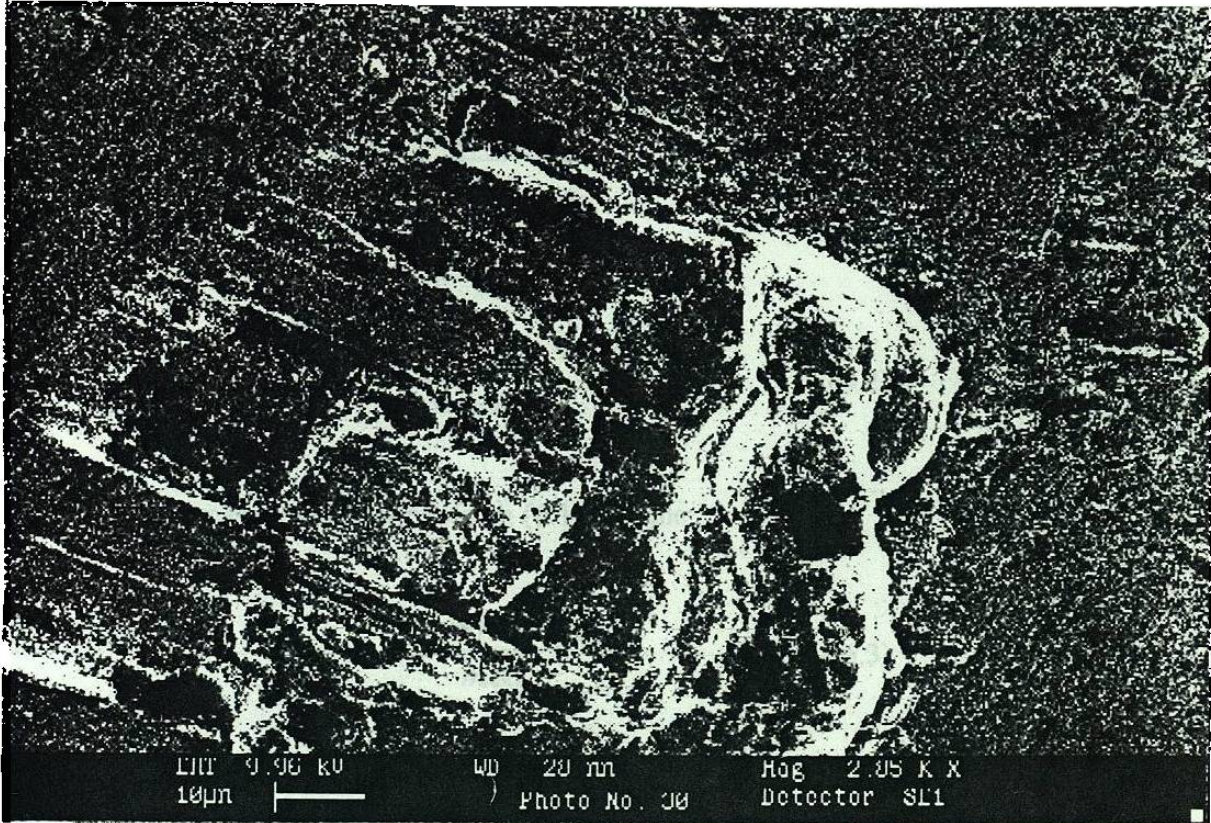


Figura 6.7 Remoción de material de acero al carbono, a 2 KX.

6.2.2 Resultados cuantitativos

Para relacionar el desgaste con el parámetro físico velocidad de partícula, se partió de la ecuación de erosión (3.3), la cual se describe a continuación:

$$E = \frac{k \rho \operatorname{sen} \theta v^2}{2H} \quad (3.3)$$

debido a que el valor particular de k no es conocido, E permanece indefinido.

A fin de encontrar la constante k del material se procedió a medir la razón de erosión \bar{E} para los cupones de acero A106-B en forma experimental.

Para esto se consideró que:

$$E = \frac{\textit{masa}_{\textit{removida}}}{\textit{masa}_{\textit{transportada}}} \quad (6.1)$$

como

$$\rho = \frac{\textit{masa}}{\textit{volumen}} \quad (6.2)$$

despejando masa y sustituyéndola en (6.1) se tiene:

$$E = \frac{\rho \cdot \textit{Volumen}_{\textit{removido}}}{\textit{masa}_{\textit{transportada}}} \quad (6.3)$$

como

$$\textit{Volumen} = \textit{Área} \cdot h \quad (6.4)$$

donde h es el espesor removido y sustituyendo en (6.3) se tiene:

$$E = \frac{\rho (A_{\textit{removida}} \cdot h)}{\textit{masa}_{\textit{transportada}}} \quad (6.5)$$

Así con (6.4) se puede obtener una razón de erosión conociendo el Área removida del material a investigar, la profundidad que dejan los impactos, la carga transportada de material erosivo y la densidad del acero.

Los resultados macroscópicos de los cupones de acero muestran dos zonas preferentes de desgaste. Someramente una zona leve y otra severa. Ambas zonas se muestran esquemáticamente en la figura 6.8.

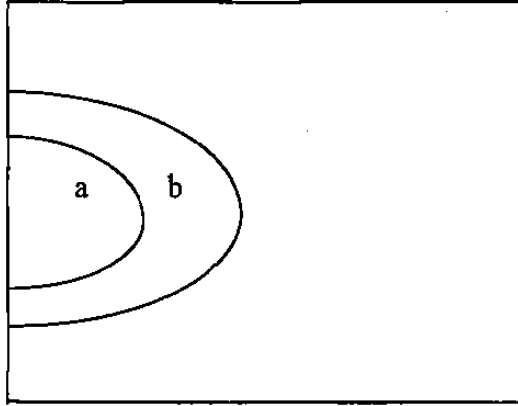


Figura 6.8 Esquema de un cupón con dos áreas de desgaste: a) severo y b) leve.

El área dañada se obtuvo con un analizador de imágenes, en donde se detectaron las huellas impresas por el desgaste (figura 6.6), se magnificaron y finalmente se midieron. Para el área de trabajo, se midieron recuadros de las imágenes obtenidas previamente. Dividiendo el área dañada entre el área de trabajo, se minimiza el error de medición. Descartando el obtener mayor desgaste en una amplia zona de trabajo debido a una mayor incidencia de huellas en esa área. En la figura 6.9 se muestra la gráfica de A_d/A_t para diferentes temperaturas. Donde A_d/A_t es el área removida de la ecuación 6.5. Se observa un incremento del área removida conforme se eleva la temperatura de operación.

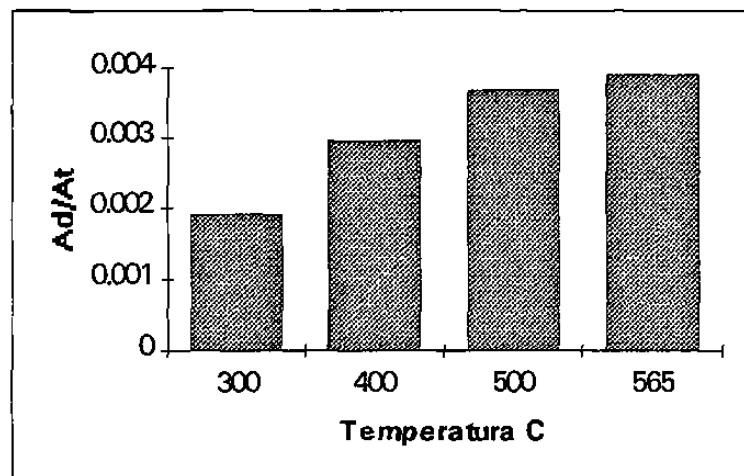


Figura 6.9 Razón Área dañada - Área trabajo para el acero al carbono a diferentes temperaturas de trabajo.