

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



DEGRADACION Y DESGASTE EN UN SISTEMA
DE TRANSPORTE NEUMATICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
ESPECIALIDAD EN MATERIALES

P R E S E N T A

JOSE ANTONIO GARCIA MONTEALEGRE

MONTERREY, N. L. OCTUBRE DE 1995

TM

25853

.M2

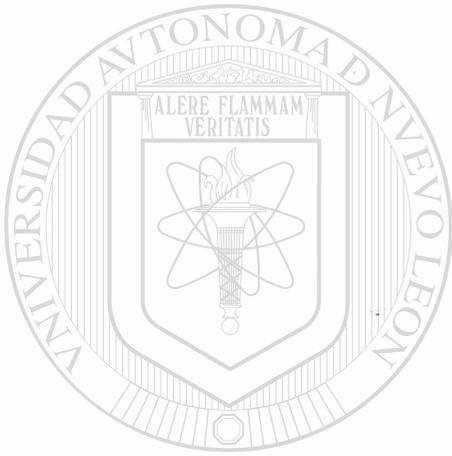
FIME

1995

G37



1020112532



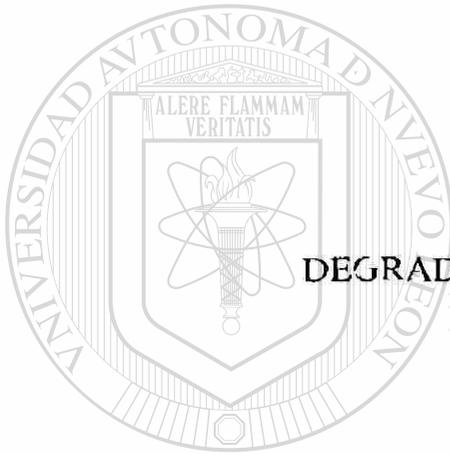
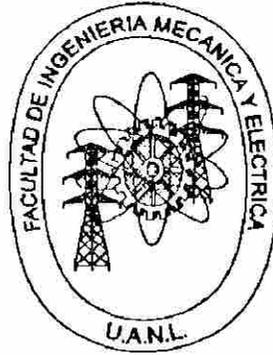
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**DEGRADACION Y DESGASTE EN UN SISTEMA
DE TRANSPORTE NEUMATICO**

UANL

TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE :
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS ®
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
ESPECIALIDAD EN MATERIALES

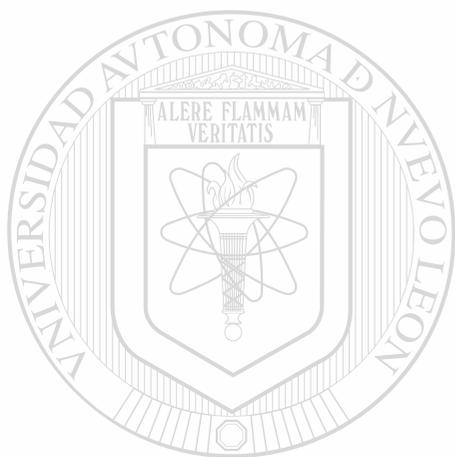
PRESENTA:
JOSE ANTONIO GARCIA MONTEALEGRE

CD. UNIVERSITARIA

OCTUBRE DE 1995

TM
2585²
A7
FNE
995
437

0116-90960



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Dr. Abraham Velasco Téllez

Asesor

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Dr. Alberto Pérez Unzueta

Co-asesor

Dr. Rafael Colás Ortiz

Co-asesor



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



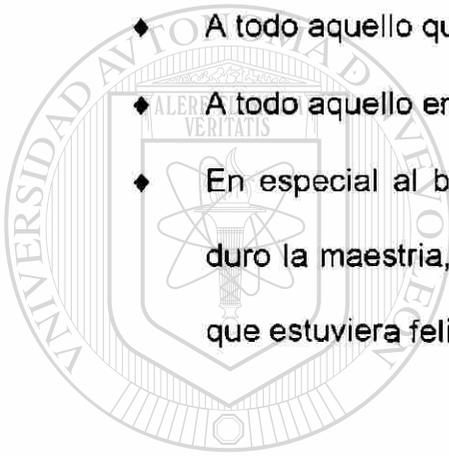
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO TESIS

DEDICATORIAS

- ◆ A lo más grande que Dios me ha dado, mis padres.
- ◆ A la “Nena” por los momentos inolvidables que compartimos.
- ◆ Mis compañeros del DIMAT
- ◆ Maestros del DIMAT.
- ◆ Personal Administrativo.
- ◆ A todo aquello que dejó huella en José Antonio.
- ◆ A todo aquello en lo que dejó huella José Antonio.
- ◆ En especial al breve espacio que me soportó durante todo el tiempo que duro la maestría, al que siempre me acogió entre sus brazos sin importarle que estuviera feliz, triste o enojado “mi cubículo”.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

AGRADECIMIENTOS

- ◆ A Dios por no dejarme caer y permitirme llegar a esta etapa de mi vida, la cual en un momento dado pensé que no llegaría, gracias Dios mío.
- ◆ A mis padres "Doña" Amparo y "Don" Toño por toda su comprensión, apoyo moral, económico y sobre todo por creer en mí y soportarme.
- ◆ Al Dr. Rafael Colás por todo el apoyo recibido durante la maestría, por sus valiosas sugerencias que hicieron posible este trabajo, su ayuda y amistad. Gracias Doc.
- ◆ Al Dr. Ignacio Álvarez Elcoro por su ayuda, apoyo y amistad que me brindó durante mi estancia en HYLSA.
- ◆ Al Ing. Sergio "checo" Caballero por su valiosa ayuda en el trabajo experimental.
- ◆ A tí Ema por todas las horas que te hice pasar tratando de alinear el haz.

Quiero agradecer a las siguientes instituciones por su apoyo recibido durante el tiempo que duró este trabajo.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
A HYLSA ®
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
Y dentro de ella.

- ◆ Al Ing. Ricardo Viramontes.
- ◆ Al Ing. Raúl Mario Montemayor.
- ◆ Al Doc. Abraham Velasco por el apoyo recibido.
- ◆ Al Ing. Marco Aurelio Flores por su apoyo, ideas y comentarios.
- ◆ Al Ing. Humberto Soriano por sus minutos dedicados.

- ◆ A la Lic. Elba Nelly Gámez por su amistad, apoyo, consejos y colaboración en la búsqueda bibliográfica.
- ◆ A Lorena y Edith por su amistad y ayuda administrativa.
- ◆ A todos los compañeros de la planta piloto que de una u otra forma colaboraron en la realización de esta tesis.

A la F.I. M. E.

Y dentro de ella.

- ◆ Al Dr. Alberto Pérez Unzueta por apoyarme con sugerencias, ideas, consejos y sobre todo por darme su amistad.
- ◆ Al Ing. Miguel Cupich por hospedarme durante el tiempo que tardé en escribir ésta tesis.
- ◆ A mis amigos en todo momento: Esther Buenrostro, Julio Cesar González, Ileri Sustaita, Carlos Esparza y Ana María Arato que siempre me escucharon y me soportaron.
- ◆ A mis compañeros del DIMAT: Carlos García, Julio Cesar Morales, Moises Hinojosa, Carlos Martínez, Jesús Talamantes, Esperanza de Aquino, Doris Martínez, Mario y Hugo quienes de una forma u otra pusieron su granito de arena para la realización de esta tesis.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

AI CONACYT por su apoyo económico.

RESUMEN

Dentro de un sistema de transporte neumático existen dos características fundamentales las cuales son: la degradación del material transportado y la erosión que causa este material a los ductos del sistema. Ambos están influenciados por la velocidad de transportación.

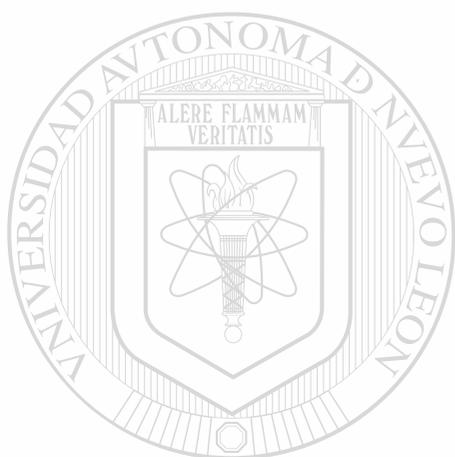
En este trabajo se determina el mecanismo de deformación de dos materiales sometidos a impactos de partículas de tres diferentes tamaños y la relación que tiene la degradación de las partículas en función de su velocidad de impacto.

Para lograr estas velocidades de impacto se utilizó la gravedad como medio impulsor y mediante la caída libre se impactaron pelets de hierro esponja a diferentes velocidades contra dos placas metálicas de diferente composición.

Los materiales que se utilizaron para impactarse fueron un recubrimiento de soldadura tipo Stellite 6 y un acero de tipo ASTM A-335 grado P-11.

Se encontró que el mecanismo de deformación de los dos materiales fue el llamado surcado con formación de borde y que la degradación de los pelets de hierro esponja, considerando su pérdida en peso, es proporcional a la altura y al cuadrado de la velocidad. También se encontró que el tamaño de partícula es fundamental para una degradación fija, ya que a menor tamaño de la misma mayor velocidad de impacto, es decir, se podría transportar más

rápido un material aumentando su velocidad y disminuyendo el tamaño de partícula con el mismo porcentaje de degradación .



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

INDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCION	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivo de la tesis.....	3
CAPITULO 2: FUNDAMENTOS	5
2.1 Producción de fierro esponja.....	5
2.2 El transporte neumático.....	6
2.2.1 Conceptos generales del transporte neumático.....	6
2.2.2 Flujo de gases en los tubos de transporte neumático.....	7
2.2.3 Fase densa y diluida.....	8
2.2.4 Fuerzas que actúan sobre una partícula en un flujo de aire.....	9
2.3 Definición de desgaste.....	10
2.3.1 Tipos y mecanismos de desgaste.....	11
2.4 Definición de erosión.....	12
2.4.1 El mecanismo de la erosión.....	13
2.4.2 El desgaste erosivo.....	14
2.5 La erosión de materiales dúctiles.....	18
2.5.1 Desgaste por deformación plástica.....	19
2.6 La erosión de materiales frágiles.....	25

CAPITULO 3: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

3.1 Descripción del equipo experimental.....	29
3.2 Caracterización del material a desgastar.....	31
3.3 Selección de los pelets de fierro esponja.....	33
3.4 Diseño de experimentos.....	34
3.4.1 Variables a considerar.....	34
3.5 Procedimiento de prueba.....	36

CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSION.

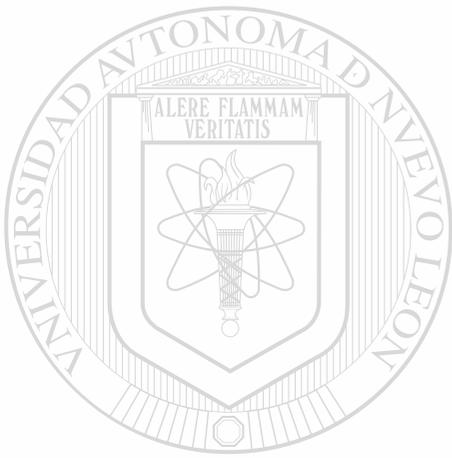
4.1 Desgaste de las placas de impacto.....	37
4.2 Deformación de las placas de impacto en la superficie.....	38
4.3 Observaciones al microscopio electrónico.....	41
4.4 Cálculo de la velocidad de impacto de la partícula.....	47
4.5 Degradación de los pelets de fierro esponja.....	48

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones.....	54
5.2 Recomendaciones.....	55

APENDICE A:	56
--------------------------	----

ANEXO 1	59
----------------------	----



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN[®]
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 1

INTRODUCCION

El transporte neumático de partículas sólidas es un sistema en el cual éstas viajan a través de tubos y son impulsadas por la energía cinética y potencial disponible en el gas transportador. El gas transfiere un momento a el sólido por caída de presión y por la fuerza de arrastre que es ejercida sobre el sólido por el gas.

La transportación de pelets de fierro esponja, impulsadas por gas reformado cuya composición es en su mayoría hidrógeno, a través de tubos es una forma de transporte neumático que se está implementando en una acería local. Esta industria es la primera en utilizar este tipo de transporte para el fierro esponja [1]. El transporte de pelets de fierro esponja a través de tubos minimiza tanto la contaminación del producto como la del medio ambiente. Por otra parte, este sistema ofrece ventajas como el incremento en la automatización y reducción de costos de operación. Este medio de transporte es empleado para transportar los pelets desde los reactores de reducción hasta el horno de aceración.

1.1 Planteamiento del problema

Una de las características del transporte neumático es la degradación que sufren las partículas transportadas. Esta degradación es ocasionada por el impacto de las partículas contra las paredes de los ductos y entre ellas mismas. La degradación de las partículas se ve reflejada en una disminución del tamaño promedio de las mismas, por lo que sus velocidades dentro de los ductos aumenta. Al aumentar la velocidad de las partículas las condiciones dinámicas del sistema cambian y ocasionan una mayor degradación del material transportado. Una fuerte degradación de los pelets trae como consecuencia una generación de partículas muy finas, las cuales pueden ocasionar obstrucción de los filtros o un engrosamiento de las paredes de los ductos.

Otra característica del transporte neumático es la erosión de los ductos, los cuales se ven más afectados al aumentar la velocidad del material transportado. El desgaste erosivo que sufren varios de los componentes del sistema es uno de los problemas más serios y a su vez de los menos entendido debido a una amplia combinación de variables y mecanismos del fenómeno en sí. Un adelgazamiento de las paredes de los ductos, debido al desgaste, se puede convertir en un fuerte problema debido a las presiones y velocidades con las que se maneja el gas transportador, que es sumamente reactivo. Esto también ocasiona un paro de producción y gastos de mantenimiento al cambiar los ductos afectados.

El estudio sistemático de estos dos fenómenos (degradación y desgaste) son la base de esta Tesis. Además de la importancia tanto económica como por seguridad.

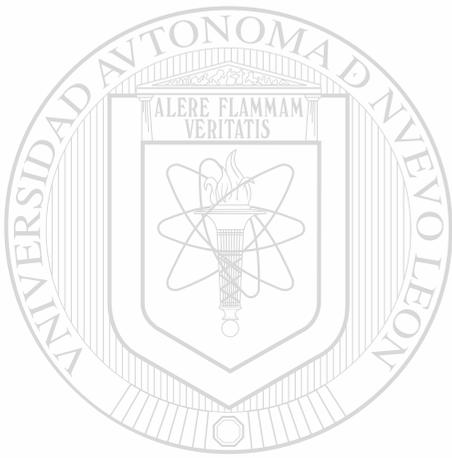
1.2 Objetivos de la tesis

Los objetivos de este trabajo son:

- 1) Implementar un sistema de prueba para poder determinar el grado con el que la velocidad de las partículas afecta la degradación de las mismas.
- 2) Evaluar la dinámica de la degradación de los pelets de fierro esponja.
- 3) Evaluar la dinámica de los mecanismos de desgaste de los tubos del transporte neumático.

Siguiendo el método de modelación tribológica sugerido por Zum Gahr [2], este trabajo se hizo modelando el sistema tribológico a los niveles más básicos posibles. Esto con el objeto de aislar los parámetros primarios del sistema, estudiar los mecanismos de desgaste fundamentales y tratar de describir el comportamiento de la degradación de los pelets de fierro esponja, el cual a la fecha es poco conocido debido a los pocos estudios realizados sobre este fenómeno. Por lo anterior, se realizaron experimentos a temperatura ambiente tomando como medio propulsor la gravedad, con el fin de obtener la relación que existe entre la velocidad de impacto de la partícula, su degradación

y el desgaste de los tubos de transporte neumático. Para esto, se implementó un sistema experimental con el cual, mediante la caída libre, se determinó la velocidad promedio de los pelets de fierro esponja al impactarse contra unas placas metálicas.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 2

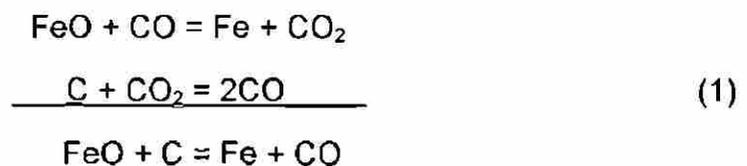
FUNDAMENTOS

2.1 Producción de hierro esponja.

Uno de los procesos más importantes para la producción de hierro es la fusión en alto horno. Este proceso es conveniente cuando se pretender generar altos volúmenes. Otro método alternativo para la obtención del hierro es la fusión en horno de arco eléctrico, que a diferencia del alto horno el calor es suministrado por electricidad a través de unos electrodos de grafito. Este método produce volúmenes menores de hierro que el alto horno [3].

Otros procesos desarrollados para la obtención de hierro, consisten en llevar a cabo la reducción, auxiliado por combustible sólido o agentes reductores gaseosos, a temperaturas por abajo del punto de fusión del hierro. Estos procesos producen un producto sin fundir llamado hierro esponja. Algunas veces la producción de hierro esponja es llamada reducción directa [3].

En uno de estos procesos de obtención de hierro a partir de mineral de hierro, se utiliza carbón para producir el gas reductor CO el cual al combinarse con el mineral de hierro da lugar al hierro metálico mediante la reacción simplificada :



Para tener la mas alta eficiencia del gas reductor CO se utiliza un tamaño pequeño de mineral de hierro altamente reactivo el cual es llamado pelet. Estos son obtenidos a partir de una de las formas de aglomeración del mineral de hierro, el peletizado. Debido al proceso de reducción en el cual el producto final es altamente poroso y debido también al proceso de aglomeraciones el producto de fierro final es llamado pelet de fierro esponja [3].

Tradicionalmente los pelets son transportados por medio de bandas o vagones. Uno de los objetivos es lograr la implementación del transporte de los pelets de fierro esponja por medio de un transporte neumático.

2.2 El transporte neumático.

2.2.1 Conceptos generales del transporte neumático.

El transporte neumático comprende la transportación de una amplia variedad de polvos secos y sólidos granulados en un flujo de gas. En ocasiones el gas utilizado es aire, sin embargo cuando condiciones especiales tales como: riesgo de explosión, salud, peligro de fuego, diferentes gases son utilizados. El transporte neumático de partículas sólidas es realizado por la energía potencial y cinética disponible en el gas transportador. El gas transfiere un momento al sólido por caída de presión y por la fuerza de arrastre que es ejercida sobre el sólido por el gas [4].

Las partes que comprenden un sistema de transporte neumático son [4]:

a) El impulsor (*prime mover*), el cual es un elemento esencial dentro del sistema. Un amplio rango de compresores, ventiladores y bombas de vacío son utilizadas para proveer la energía al gas transportador.

b) Alimentador, mezclador y zona de aceleración: En esta zona los sólidos son introducidos en el flujo de gas y sufren un gran cambio en momento.

Asociado con este cambio, es necesario proveer una zona de aceleración. Si el espacio físico lo permite la zona consiste de un tubo horizontal de una cierta longitud diseñada de tal forma que los sólidos acelerados lleguen a un flujo estable.

c) La zona de transportación: Una vez que los sólidos han pasado la zona de aceleración entran a una zona de transportación, la cual consiste de tubos a través de los cuales viaja el producto.

d) La zona de separación gas-sólido: En esta zona los sólidos son separados del flujo de gas.

2.2.2 Flujo de gases en los tubos de transporte neumático.

El flujo del gas a través de los tubos forma un elemento esencial para cualquier sistema de transporte neumático [4] y estos flujos pueden ser:

- a) El flujo laminar el cual está caracterizado por la velocidad que es más grande en el centro del tubo y decrece grandemente en la pared del mismo y tiene un número de Reynolds pequeño ($Re < 2300$).
- b) El flujo turbulento está caracterizado por un movimiento irregular de las partículas que fluyen en el chorro del gas sin un patrón determinado y tiene un número de Reynolds grande ($Re > 2300$).

El límite entre el flujo laminar y turbulento está definido por el número de

Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu} \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del fluido, v es la velocidad, D el diámetro del tubo, η la viscosidad dinámica del fluido.

2.2.3 Fase densa y diluída.

Dependiendo de la energía disponible para el transporte neumático, éste puede ser en fase densa o diluída. Si la velocidad del gas transportador es bastante alta las partículas del material son suspendidas individualmente dentro de la corriente del gas, entonces tendremos un sistema de transporte de fase diluída (fig.2.1a). En este caso, las velocidades del material pueden ir desde 13 hasta 50 metros por segundo. Cuando el sólido se mueve a bajas velocidades por diferencia de presión del gas, forma pistones u ondas las cuales llenan enteramente el ducto transportador, entonces el transporte neumático se

denomina sistema de transporte de fase densa (fig.2.1d). Para este tipo de sistemas, las velocidades del material varían de 5 a 10 metros por segundo.

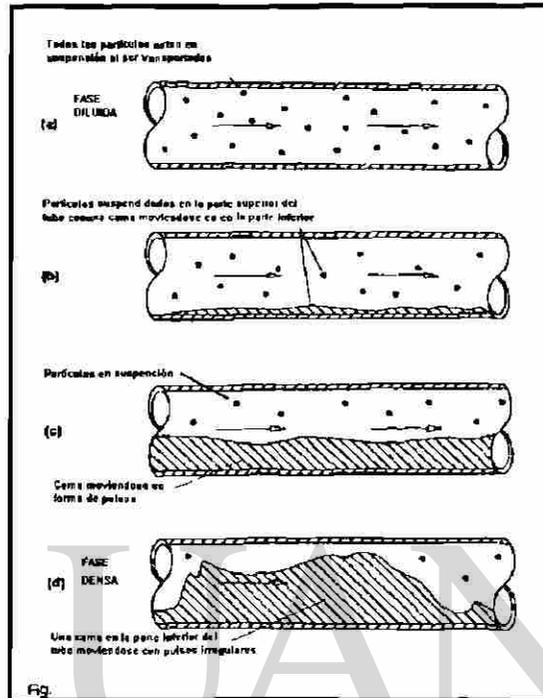


Figura 2.1 Los flujos dentro de un sistema de transporte neumático varían desde (a) fase diluida hasta (d) fase densa. Según Mainwaring [5].

2.2.4 Fuerzas que actúan sobre una partícula en un flujo de aire.

Las fuerzas que actúan sobre una partícula que viaja dentro de un

fluido son [4]:

$$F_D - F_E = m_p \frac{dc}{dt} \quad (3)$$

Donde F_D es la fuerza de arrastre y F_E representa las fuerzas externas.

La fuerza de arrastre (F_D) para una partícula puede ser escrita como:

$$F_D = \frac{3}{4} m_p \frac{C_D \rho}{d \rho_p} (v_s - c)^2 \quad (4)$$

y las fuerzas externas de gravedad (F_g) y electrostáticas (F_e) como:

$$\begin{aligned} F_g &= (m_p - m_f)g \\ F_e &= E_x \left(\frac{q}{m_p} \right) m_p \end{aligned} \quad (5)$$

donde:

C_D = coeficiente de arrastre

m_p = masa de una partícula sólida de diámetro d .

v_s = velocidad del flujo de aire.

m_f = masa de fluido desplazado de un diámetro d .

E_x = campo eléctrico.

(Q/m_p) = carga por unidad de masa.

Como las partículas varían en tamaño o cuando se fracturan

después del impacto el diámetro promedio (d) se puede obtener por medio de una distribución normal logarítmica [4].

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

2.3 Definición de desgaste.

El desgaste se define como la pérdida progresiva de substancia de la superficie operativa de un cuerpo que ocurre como el resultado de un movimiento relativo en la superficie de éste cuerpo [2]. Hay dos enfoques generales para esta definición: el primero describe los resultados de

desgaste y la segunda se basa sobre la naturaleza física del proceso. En el primero, la descripción de la superficie desgastada es fundamental, mientras que el segundo es indicativo del mecanismo de desgaste.

2.3.1 Tipos y mecanismos de desgaste.

Como se mencionó anteriormente, el desgaste puede ser caracterizado basándose en la apariencia de las partes desgastadas o en los mecanismos y condiciones que prevalecen durante la eliminación de material. Clasificaciones tales como: desgaste bajo, desgaste severo, estriación están basadas en la observación de las partes desgastadas. Sin embargo, otras terminologías tales como: desgaste adhesivo, desgaste por delaminación o desgaste erosivo, están basadas en los mecanismos de remoción de material o las condiciones existentes durante el proceso de desgaste.

El desgaste puede ser clasificado de acuerdo a los mecanismos y las condiciones [6] en:

- a) Adhesivo.
- b) Delaminación.
- c) Erosivo.
- d) Abrasivo.
- e) Rozamiento.

- f) Desgaste por impacto.
- g) Fatiga superficial.
- h) Desgaste corrosivo.
- i) Desgaste difusivo.

Los primeros siete tipos ocurren por interacciones mecánicas, mientras los dos últimos son influenciados primordialmente por condiciones especiales del medio circundante. Frecuentemente más de un mecanismo opera simultáneamente y es difícil separar los efectos entre ellos.

2.4 Definición de erosión.

Los efectos perjudiciales de la erosión son cada vez más problemáticos, particularmente en aeronáutica y en cubiertas de varios ventiladores, en compresores y turbinas, sobre aspas de helicóptero, en bombas centrifugadoras, sobre componentes de válvulas y en juntas de tubos y codos

[7].

Existen también efectos benéficos de la erosión, como la limpieza de piezas o superficies por medio de arena a presión (*sandblast*), en taladrado y tunelado para minería [7].

La erosión o desgaste erosivo es la pérdida de material de una superficie sólida debido a un movimiento de contacto relativo con un fluido que contiene partículas sólidas [8]. El término abrasión erosiva se utiliza algunas veces para describir erosión en la cual las partículas sólidas se mueven casi paralelamente a la superficie sólida; el término erosión por impacto se utiliza para describir la

erosión en la cual el movimiento relativo de las partículas sólidas es casi normal a la superficie sólida (fig 2.2).

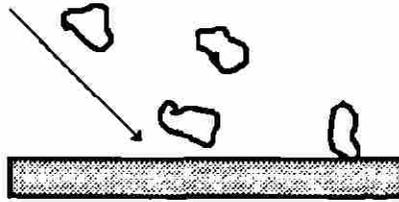


Figura 2.2 Ilustración de erosión, según Hutchings [9].

2.4.1 El mecanismo de la erosión.

En la erosión de metales, algunas veces hay un período de incubación durante la cual una pequeña erosión ocurre. Este etapa de incubación es seguido por un período de aceleración de la razón de desgaste y después hay una región de estado estable [4] (Fig.2.3).

Materiales dúctiles y frágiles tienen diferentes respuestas a impactos múltiples. Estas respuestas están asociadas con el ángulo de impacto. Los materiales dúctiles se comportan mejor al desgaste a grandes ángulos de ataque mientras que los materiales frágiles se desgastan menos a bajos ángulos de impacto [4].

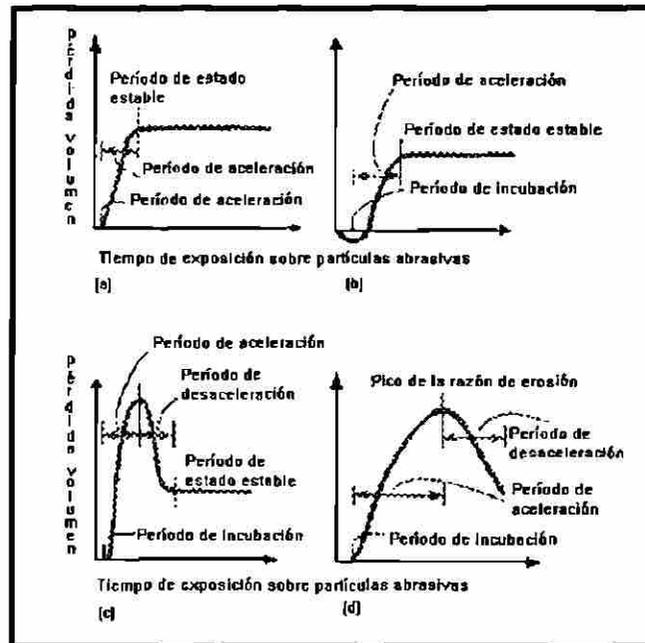


Figura 2.3 Diferentes diagramas donde se presentan los tres estados del desgaste. Según ASM Handbook [10].

La erosión de metales puede consistir de discretos cráteres aislados o uniformemente distribuidos los cuales erosionan la superficie. Los segundos son más comunes para impactos múltiples y consiste en un proceso de eliminación de material por medio de deformación acumulada. Los mecanismos de la deformación acumulada no están aún bien definidos, pero la generación de calor en las superficies se creen que son eventos probablemente involucrados [7].

2.4.2 Desgaste erosivo.

El desgaste erosivo involucra una deformación plástica que se puede modelar de un modo relativamente simple. Hutchings [9] propone una

definición de erosión dada como el cociente entre la masa del material eliminado y la masa de las partículas erosivas que golpean la superficie, de tal forma que E es adimensional.

Para impactos normales de partículas sobre una superficie la erosión está dada, según Rabinowicz [11], por:

$$E = \frac{K\rho U^2}{2H} \quad (6)$$

donde K es un coeficiente de desgaste que puede ser tomado como una medida de la severidad del desgaste, ρ y H son la densidad y dureza del material erosionado y U es la velocidad de impacto de las partículas [11].

Para la erosión de metales [9], K está entre 5×10^{-3} a 10^{-1} . Esta ecuación anterior provee sólo una estimación de los factores que controlan el desgaste erosivo porque ignora las variación de la erosión con el ángulo de impacto, por lo que sería necesario examinar la interacción entre una partícula erosiva dura y la superficie de un material dúctil.

La geometría de la deformación debido al impacto de una partícula depende de la velocidad, forma, orientación de la partícula, y del ángulo de impacto. Estudios del impacto de una sola partícula sobre metales a 30° muestran tres tipos básicos de daños por impacto, ilustrados en la figura 2.4

según Hutchings [9].

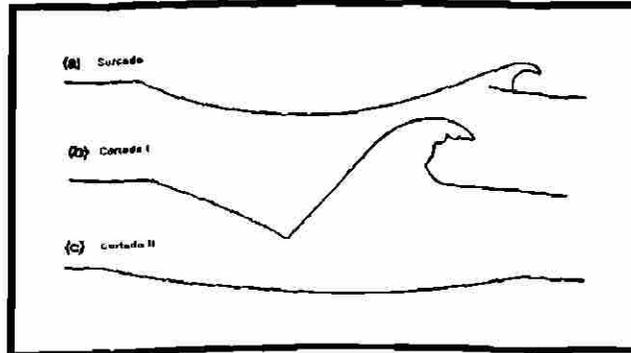


Figura 2.4 Secciones transversales de los sitios de impacto formados por una partícula dura sobre un metal dúctil, las cuales muestran formas típicas. La dirección de impacto va de izquierda a derecha. (a) el surcado por una partícula redonda; (b) el cortado I por una partícula angular deslizada hacia adelante durante el contacto; (c) el cortado II por una partícula angular deslizada hacia atrás. Según Hutchings [9].

Partículas redondeadas deforman la superficie por surcado, desplazando material hacia los lados y hacia el frente de la partícula (fig. 2.4a). Fuertes impactos sobre los bordes de las indentaciones y en sus alrededores llevan al desprendimiento de material endurecido por deformación. Este tipo de

deformación abarca los modos de abrasión por surcado y formación de borde. La deformación causada por una partícula angular depende de la orientación que tenga al golpear la superficie y de que si ésta se desliza hacia adelante o hacia atrás durante el contacto.

En el modo cortado I (fig. 2.4 b), la partícula se desliza hacia adelante indentando la superficie y levantando material en una protuberancia prominente, la cual es susceptible de ser eliminada por impactos subsecuentes. Si la partícula se desliza hacia atrás (fig. 2.4c), ocurre una acción de maquinado, en la cual el borde agudo de la partícula abrasiva corta una viruta de la superficie.

Este es el modo cortado II y ocurre sólo para un intervalo muy estrecho de geometría de las partículas y para algunas orientaciones de impacto.

El desgaste erosivo se asocia con el desprendimiento por ruptura plástica del material desplazado de los sitios de impacto, ya sea de los bordes de las indentaciones o de las protuberancias. Aunque cada impacto desplaza material de la indentación formada, éste no será eliminado como residuo de desgaste hasta que experimente algunos ciclos de deformación plástica y se endurezca severamente por trabajo.

La erosión a ángulos normales por partículas redondeadas, en el cual el cortado no juega un papel muy importante, se puede modelar en dos formas:

1) Suponiendo que la superficie del material se desprende cuando los esfuerzos plásticos acumulados alcanzan un valor crítico.

2) Tratando la erosión como un problema de fatiga a bajos ciclos, los cuales causan deformación plástica que está asociada con los impactos sucesivos de las partículas.

La razón de erosión para ángulos normales puede seguir la siguiente ecuación [9]:

$$E = \frac{K_2 \rho \omega^2 U^3}{\epsilon_c^2 H^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

donde K_2 es un coeficiente de la severidad del desgaste, ω es la densidad de la partícula erosiva esférica, ϵ_c es el esfuerzo plástico crítico en el cual ocurren

desprendimientos de residuos de desgaste, H es la dureza del material. El esfuerzo de falla ϵ_c puede considerarse como una medida de la ductilidad del material bajo condiciones de erosión.

2.5 La erosión de materiales dúctiles

La erosión de materiales dúctiles a ángulos de impacto relativamente bajos puede ocurrir por corte o surcado.

La erosión por corte se considera similar a la formación de virutas en maquinados en donde partes del material son removidos por el impacto de una partícula de borde cortante. Se ha mostrado, con fotografía de alta velocidad y con el impacto de una sola partícula, que el surcado (deformación plástica) ocurre por el impacto de partículas esféricas o angulares con ángulos de 0 a 17° [12]. Aunque la eliminación directa del material puede ocurrir por algunas de

estas condiciones, una parte del material desplazado queda adherido en un borde en la parte final y en las partes laterales de la muesca que es dejada por la trayectoria de la partícula, este material excesivamente deformado es eliminado por impactos subsecuentes en un segundo estado de erosión.

Una de las formulaciones [13,14,15] basada en una partícula angular rígida que erosiona un material dúctil, predice que el volumen desgastado W debido a n partículas de masa total M con velocidad V , impactando a un ángulo

α entre el vector de velocidad y la superficie, y a una presión de flujo horizontal P , puede ser:

$$W \sim n V^2 f(\alpha) / P \quad (8)$$

Aunque la ecuación anterior describe algunos rasgos de erosión de material dúctil a ángulos menores a 45° varias investigaciones y estudios [10] han demostrado que el exponente de V es mayor que 2 (normalmente entre 2 y 3).

2.5.1 Desgaste por deformación plástica.

El desgaste abrasivo es aquel que comprende la eliminación de material por deformación plástica [9]. La fig.2.5 muestra una partícula abrasiva idealizada como un cono de semiángulo α , la cual es deslizada para que produzca una muesca sobre la superficie de un material dúctil, el cual fluye bajo una indentación w , es decir la carga y el desgaste ocurre por la eliminación o remoción de alguna porción del material que es desplazado de la hendidura por la partícula.

La figura 2.5 también muestra que la carga normal de la partícula es soportada por el flujo plástico bajo la misma, lo que genera una presión P que actúa sobre el área de contacto entre la partícula y superficie.

Una vez que el cono se desliza el contacto es sólo sobre la superficie frontal al deslizamiento, la carga normal es soportada entonces sólo por la mitad del área circular proyectada del cono.

La carga soportada es entonces:

$$w = P \frac{\pi a^2}{2} = \frac{1}{2} P \pi x^2 \tan^2 \alpha \quad (8)$$

despejando x^2 nos queda:

$$x^2 = \frac{2w}{P \pi \tan^2 \alpha} \quad (9)$$

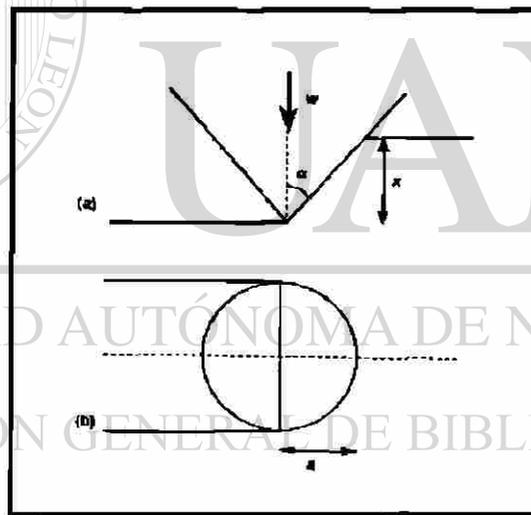


Figura 2.5 Geometría del contacto entre una partícula abrasiva idealizada de forma cónica y una superficie: (a) en elevación, (b) vista en un plano. Según Hutchings [9].

El volumen de material desplazado de la hendidura por el cono en el deslizamiento L a lo largo de la superficie es Lax o $Lx^2 \tan \alpha$. Las cantidades a y x están definidas en la fig. 2.5. Así, si una fracción f del

material desplazado de la hendidura es eliminado como residuos de desgaste, el volumen de residuos producidos por la partícula abrasiva por unidad de distancia de deslizamiento, q , esta dado por:

$$q = f x^2 \tan \alpha \quad (10)$$

Se puede sustituir x^2 de (9) para encontrar :

$$q = \frac{2fw}{\pi P \tan \alpha} \quad (11)$$

Para muchas partículas abrasivas y suponiendo que $P \approx H$, la dureza de indentación del material, podemos entonces mostrar que el volumen total removido Q por unidad de distancia de deslizamiento esta dado por:

$$Q = \frac{kw}{H} \quad (12)$$

donde w es la carga total normalmente aplicada y la constante k depende de la fracción f del material desplazado, y de la geometría de la partícula abrasiva (es decir de α).

El coeficiente de desgaste k , puede ser usado como una medida de la severidad del desgaste. Valores típicos de k en el desgaste abrasivo de metales en un sistema de dos cuerpos (una partícula que está entre dos superficies y permanece fija a una de las superficies), está entre 5×10^{-3} y $50 \times$

10^{-3} . Para la abrasión de tres cuerpos (la partícula entre las dos superficies puede deslizarse o rodar libremente entre ellas) k es mas bajo, típicamente entre 0.5×10^{-3} y 5×10^{-3} .

Las partículas abrasivas pueden deformar el material en una forma en la cual sólo eliminan una parte del material desplazado de la hendidura, o pueden desplazar material sin eliminarlo de la muesca. La fig. 2.6 ilustra las líneas de campo del deslizamiento de tres modos de deformación debido a una cuña rígida bidimensional (una partícula abrasiva idealizada) deslizada de derecha a izquierda sobre un material plástico y rígido [9]. La figura 2.6(a) muestra el modo denominado de corte, en el cual el material es desviado a través de una zona de corte y fluye hacia arriba de la cara frontal de la partícula para formar una viruta. Todo el material desplazado por la partícula es eliminado en la viruta. La fig 2.6(c) describe el caso extremo, el modo llamado de surcado, en el cual una arista de material deformado es empujado hacia adelante de la partícula, semejante a la forma en la que una arruga puede ser empujada a lo largo de una pieza de ropa que está situada sobre una mesa; En este modo, el material no es eliminado de la superficie porque el material del borde que fue levantado fluye por debajo de la partícula.

Un tercer modo de deformación es ilustrado en la figura. 2.6(b) y representa un comportamiento intermedio. Un deslizamiento limitado, o una

completa adhesión, ocurre entre la pared frontal de la partícula y el borde levantado del material.

No es posible construir un campo de líneas de deslizamiento en estado estable debido a este comportamiento intermedio, y la fig.2.6(b) representa un estado en el cual es desarrollado un borde. La deformación consiste en el crecimiento y caída eventual (por corte a lo largo de la línea AD) del borde levantado, en una secuencia repetida. Este modo ha sido llamado formación cuña y permite, semejante al modo de cortado, eliminar material de la superficie.

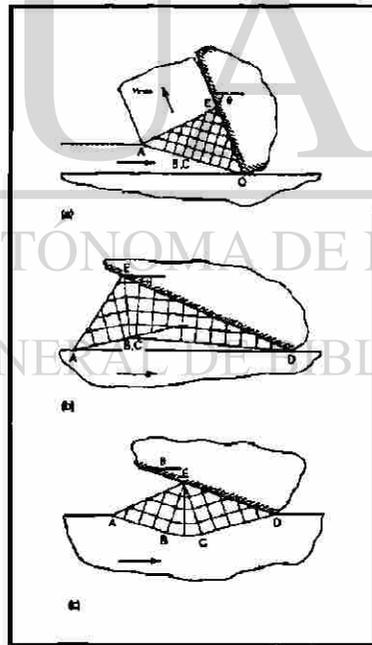


Figura 2.6 Campos de líneas de deslizamiento para la deformación de un material plástico causado por el deslizamiento de derecha a izquierda de un borde rígido bidimensional. (a) corte, (b) formación de borde y (c) surcado. el ángulo θ es llamado el ángulo de ataque. Según Hutching [9]

Los factores controlados son θ , el ángulo de ataque de la partícula, y el esfuerzo en la interfase partícula- superficie. Esto puede ser expresado como la razón entre el esfuerzo de corte en la interfase y el esfuerzo de cedencia de corte del material deformado plásticamente, esta razón es μ . Lubricación perfecta implica $\mu=0$, mientras que adhesión completa lleva a $\mu=1$. Para $\mu=0.5$, sólo dos modos de deformación son posibles: cortado y surcado. Bajos valores de θ favorecen el surcado, mientras que valores más grandes que un valor crítico θ_c llevan a el cortado. Para $\mu > 0.5$, ocurre una transición de los tres modos, empezando con el surcado hasta la formación de cuña y de la formación de cuña a corte siempre y cuando el ángulo de ataque se incremente.

La transición del surcado a corte para la formación de residuos de desgaste ocurre a un ángulo de ataque crítico θ_c . La figura 2.7 ilustra estos regímenes de deformación para el caso de una partícula esférica dura, deslizando sobre un material rígido y plástico [16]. La profundidad de penetración de la esfera determina el ángulo de ataque efectivo, el cual es también graficado en esta figura. Aunque en el modo rígido- plástico ideal θ_c depende sólo de μ , para un material real, éste depende de la razón del trabajo de endurecimiento y de sus propiedades elásticas; específicamente de la razón E/H , es decir el módulo de Young y la dureza de la superficie. θ_c está típicamente entre 30° y 90° para la mayoría de los metales, un alto valor de la razón E / H lleva a un alto valor de θ_c .

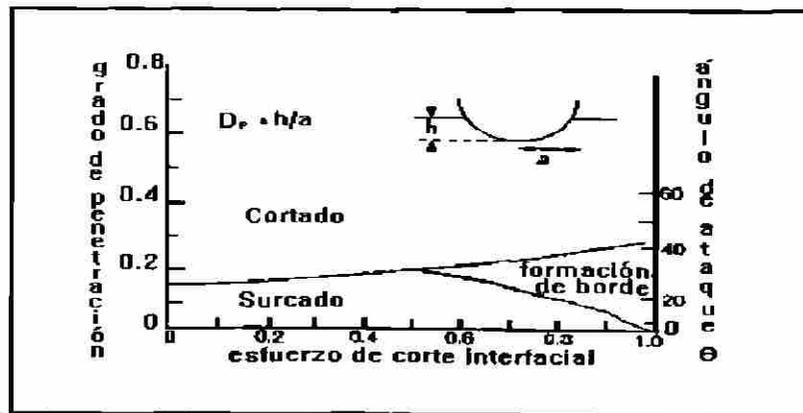


Figura 2.7 Modos de deformación observados en el deslizamiento de una partícula abrasiva sobre un bronce α , un acero de bajo carbono y un acero inoxidable austenítico. La profundidad de penetración de la esfera D_p determina la efectividad del ángulo de ataque θ . Según Hutchings [9].

2.6 La erosión de materiales frágiles.

La erosión de materiales frágiles es atribuida a un fisurado o agrietamiento producido por los esfuerzos Hertzianos que ocurren durante el impacto [17] y por el trabajo de endurecido en el punto donde la fuerza de impacto excede la resistencia del material [18].

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El desgaste por fractura frágil es un mecanismo en el cual es despreciable la contribución de los mecanismos asociados con flujo plástico. Cuando una partícula angular y dura es presionada contra la superficie de un material frágil, deformación plástica local ocurre en el punto de contacto, seguido por la formación de grietas, las cuales pueden llevar al desprendimiento del material y de aquí al desgaste.

La figura 2.8 muestra como se forman las grietas en un sólido frágil sujeto a un punto de carga [19]. Las fisuras crecen bajo un indentador rígido y agudo, el cual genera unos campos de esfuerzos plásticos-elásticos, tales indentadores pueden ser: conos, pirámides o partículas duras e irregulares. En el punto de contacto inicial ocurren esfuerzos muy altos. Si el caso fuera que la punta del indentador tuviera una forma perfectamente aguda (es decir con cero radio de curvatura) habría un extraordinario esfuerzo en este punto. Estos intensos esfuerzos (corte y compresión) son aliviados por flujos plásticos locales y por densificación alrededor de la punta del indentador, la zona de material deformado es indicado por la letra D en la figura 2.8. Cuando la carga sobre el indentador se incrementa hasta un valor crítico, esfuerzos tensiles cruzan el plano medio vertical e inician una fisura mediana, indicada por M en la figura 2.8. Un fuerte incremento en la carga es acompañada por una extensión progresiva de la grieta de tamaño medio, reduciendo la carga la fisura se cierra. Fuertes descargas son acompañadas por la formación y crecimiento de grietas laterales (llamadas L en la figura 2.8).

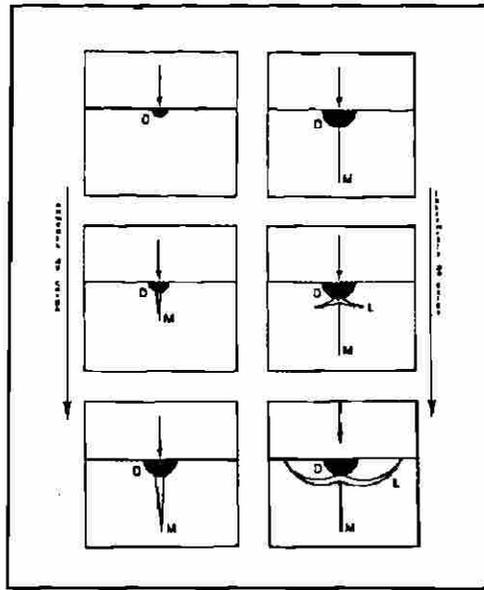


Figura 2.8 Diagrama que muestra la formación de grietas en un material frágil debido a una indentación puntual cuando la carga es aumentada y decrementada normalmente. Según Hutchings [9].

La formación de estas grietas laterales son impulsadas por los esfuerzos elásticos residuales, causados por la relajación del material deformado alrededor de la región de contacto. Cuando se termina la descarga las grietas laterales se curvan hacia arriba hasta la superficie. Las fisuras medianas se propagan bajo la superficie al incrementar la carga sobre el indentador y no crecen fuertemente en la descarga. Las grietas laterales pueden llevar directamente al desgaste.

Las grietas se forman sólo cuando la carga normal sobre el indentador ha excedido un valor crítico w^* . De acuerdo a Evans [20] el valor de w^* depende de la tenacidad a la fractura del material, K_{Ic} y de su dureza H .

$$W^* \propto \left(\frac{K_c}{H}\right)^3 K_c \quad (13)$$

Un modelo para el desgaste abrasivo de materiales frágiles está basado en la eliminación del material por fracturas laterales. Cuando una partícula aguda se desliza sobre una superficie formando una muesca plástica (al igual que si sólo fuera un punto de carga), fisuras laterales crecen y se deflecan hacia arriba, desde la base de la región de la subsuperficie deformada, hasta la superficie libre (Fig. 2.9), impulsados por los esfuerzos residuales asociados con el material deformado [20]. El material es eliminado entonces como virutas de la región delimitada por las grietas laterales y la superficie.

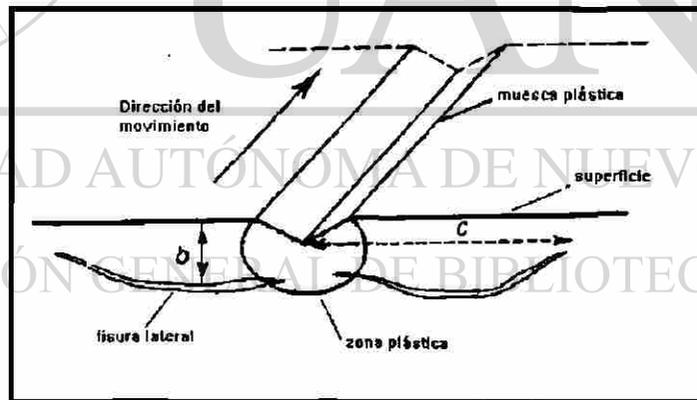


Figura 2.9 Ilustración esquemática de material eliminado en un material frágil por la expansión de las fisuras laterales por debajo de una muesca plástica. Según Hutchings [9].

CAPITULO 3

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Descripción del equipo experimental.

El desgaste es muy difícil de modelar o reproducir. Pruebas a nivel planta son muy difíciles de efectuar por todas las variables involucradas en el proceso y la relación entre ellas. Las pruebas de laboratorio no reproducen todas las características reales pero nos dan una aproximación del comportamiento aislado de variables consideradas.

Considerando lo anterior se pensó en implementar un sistema en el que se pudiese medir la velocidad de la partícula para relacionarla con su degradación, lo que era el objetivo principal de este trabajo.

Para alcanzar nuestro objetivo se pensó en aislar a la velocidad de la partícula y el tamaño de la misma, de variables tales como: temperatura, velocidad, composición del gas transportador, fase de transportación, etc. Esto con el fin de tener los fundamentos de la degradación de los pelets de fierro esponja.

El sistema que se implementó de acuerdo a lo anterior fue tomar a la gravedad como medio propulsor, a la fricción del aire como medio retardador y dejar caer a diferentes alturas los pelets de fierro esponja seleccionados con anterioridad. Estos pelets se impactaron contra unas placas metálicas para tener también datos sobre el desgaste de las mismas.

Para la realización de los experimentos de desgaste y degradación por impacto, se consideró en base a estudios realizados[4] que las variables fueran:

- a) El tamaño de partícula
- b) Velocidad de partícula
- c) El material impactado

Considerando a la velocidad como el parámetro más importante por sí solo, las pruebas se realizaron a 5 diferentes alturas. Estas alturas fueron de 1.11, 2.08, 4.56, 6.35 y 8.36 metros. Para referencia y evitar que el medio ambiente interfiriera con las pruebas se utilizaron 5 tubos colocados en posición vertical como lo muestra la figura 3.1. Las alturas anteriores nos proporcionaron cinco diferentes velocidades de impacto.

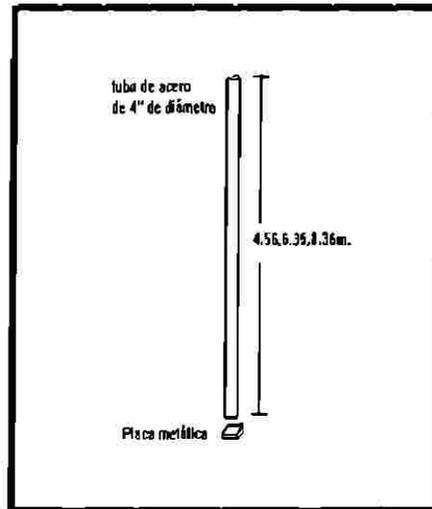


Figura 3.1 Esquema del diseño experimental de transporte neumático.

3.2 Caracterización del material a impactar.

Se utilizaron dos materiales para ser impactados por los pellets de hierro esponja:

a) Recubrimiento metálico tipo stellite 6

b) Acero ASTM A-335 grado P-11

Estos materiales fueron muestras de forma cuadrada de aproximadamente 5.4 cm. de lado por 1/2 cm. de espesor los cuales antes de ser sometidos al impacto se pulieron a espejo y se atacaron con un reactivo químico que colorea la microestructura [23].

La composición química de los dos materiales está dada en la tabla 3.1 en la cual se puede ver los elementos que constituyen cada uno de los materiales probados. Las figuras 3.2 y 3.3 nos muestran la microestructura

de los dos materiales en donde se puede apreciar la diferencia en tamaño y morfología de los granos.

Tabla 3.1 Composición química de los materiales probados.

NOMBRE	DESIGNACION	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
p-11	ASTM A-335	0.05-0.25	0.1-0.60	0.05	0.05	0.50-2.0	1.00-1.20	0.40-0.65

NOMBRE	DESIGNACION	C	Cr	V	BALANCE
Tipo Stellite 6	M-1580	1.0	26.0	5.0	Co

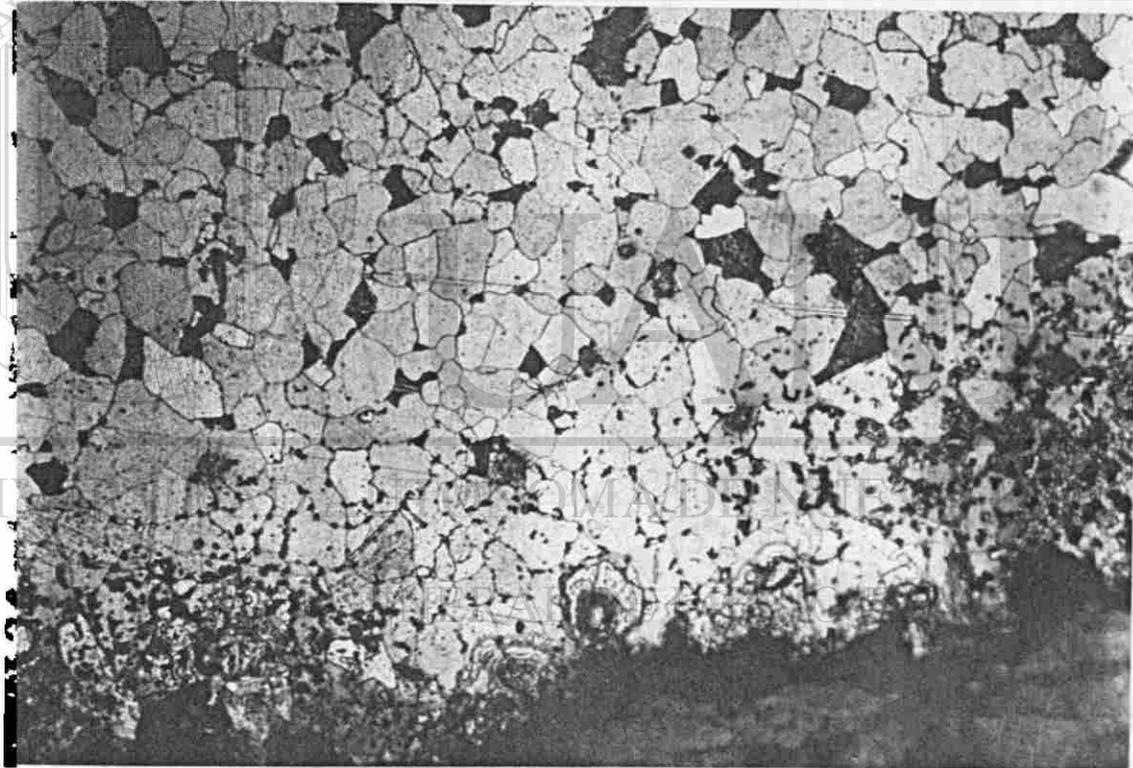


Fig. 3.2 Microestructura del acero tipo p-11.



Figura 3.3 Microestructura del recubrimiento tipo Stellite 6.

3.3 Selección de los pelets de fierro esponja

Las partículas utilizadas para impactar los materiales seleccionados fueron pelets de fierro esponja de tres diferentes números de malla (de 15.62, 12.5 y 9.38 mm) tomadas de las bandas de descarga del reactor de reducción.

Un análisis químico de los pelets utilizados en la realización de los experimentos es mostrada en la Tabla 3.2.

Tabla 3..2 Análisis químico de los pelets de hierro esponja.

compuesto	% peso	compuesto	% peso
Fe total	89.200	Ca O	2.490
Fe metálico	84.790	Ni O	0.082
%metalización	95.056	Cr ₂ O ₃	0.066
C	2.160	Pb O	0.306
S	0.015	Zn O	0.059
P	0.032	Ti O ₂	0.161
Si O ₂	2.615	V ₂ O ₅	0.137
Al ₂ O ₃	0.930	Cu O	0.008
Mg O	0.600	Cd O	0.045
Mn O	0.145		

Un análisis químico de los pelets utilizados, según la Tabla 3.2, nos revela que en su composición existen además del hierro compuestos tales como óxidos de calcio, silicio, magnesio, etc, los cuales están dentro de la denominada ganga.

3.4 Diseño de experimentos.

3.4.1 Variables a considerar.

El desgaste en un sistema de transporte neumático está relacionado a muchas variables las cuales están interrelacionadas entre sí lo que lo hace difícil de predecir. La erosión ocurre como el resultado de un número de diferentes mecanismos dependiendo de la composición, forma y tamaño de las partículas erosivas, su velocidad y ángulo de impacto, la composición y la microestructura de la superficie que está siendo erosionada.

Sin embargo, muchos investigadores [4] han coincidido en señalar que el parámetro más importante por sí solo en desgaste y erosión de tuberías es la velocidad de la partícula y han encontrado que la relación entre erosión y velocidad está dada por:

$$\text{Erosión} = \text{constante} \times (\text{velocidad})^N$$

El exponente N varía de N=2 para materiales dúctiles hasta N=6 para materiales frágiles. Aunque para la mayoría de situaciones industriales [4] se ha adoptado una norma que es bien aceptada y es N=3.

Otra de las variables que consideramos importantes fue el tamaño y la forma redondeada de la partícula ya que, la mayoría de las observaciones experimentales, muestran un claro incremento en la erosión con el incremento en el tamaño de la partícula [4].

Para el estudio de la degradación de los pellets de hierro esponja se necesitaban diferentes velocidades de impacto por lo que se utilizaron cinco diferentes alturas, como se mencionó en la sección 3.1. En cada una de estas alturas se probaron los tres diferentes tamaños de partícula. Esto con el propósito de ver el efecto del tamaño de partícula sobre las placas de impacto y observar la degradación de las partículas a diferentes velocidades de impacto sobre su degradación quedando de la manera como lo muestra la Tabla 3.3.

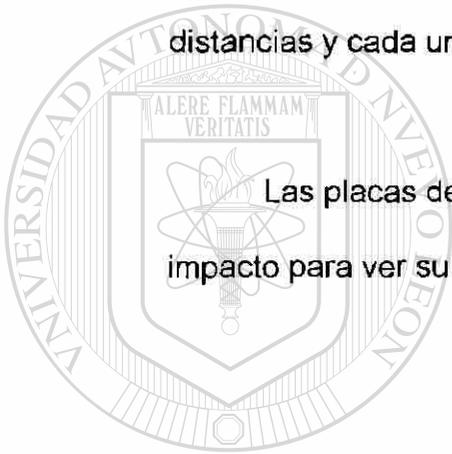
Tabla 3. 3 Condiciones de prueba para los materiales P-11 y recubrimiento tipo stellite 6

<i># de malla</i>	<i>altura</i>				
15.62 mm	1.11 m	2.08 m	4.56 m.	6.35 m.	8.36 m.
12.5 mm	1.11 m	2.08 m	4.56 m.	6.35 m.	8.36 m.
9.38 mm	1.11 m	2.08 m	4.56 m.	6.35 m.	8.36 m.

3.5 Procedimiento de prueba.

El procedimiento experimental consistió en dejar caer 6 muestras de 30 pelets cada una sobre las dos placas de impacto para cada una de las distancias y cada uno de los tres tamaños de malla, ya mencionados.

Las placas de impacto se pesaron antes y después de cada prueba de impacto para ver su variación en peso a las diferentes alturas.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Desgaste de las placas de impacto.

Una vez realizadas las pruebas de impacto sobre las dos placas se determinó que su variación en peso no fue significativa, sin embargo se observó que después de cada prueba la placa aumentaba ligeramente de peso esto debido al polvo que los pelets de fierro esponja dejaban adherido sobre la superficie, lo que se apreció a simple vista.

Esta variación en peso se perdía al limpiar la placa y quedaba una variación en peso despreciable debido a la sensibilidad de la balanza analítica. Sin embargo esta variación, aunque insignificante, no deja de ser de

importancia ya que es sabido [19] que los materiales comunmente exhiben un incremento en la depositación a altos ángulos de impactos. Esta depositación

se incrementa hasta que la superficie se empieza a saturar y a degradar. Esto concuerda con lo que mas adelante se describe que aún después de limpiadas las placas metálicas, si tuvieron material del fierro esponja adherido en el fondo de las muescas dejadas por los pelets.

4.2 Deformación de las placas de impacto en la superficie.

Aunque las placas de impacto no registraron una variación en peso considerable, al observarlas en el microscopio óptico se pudo apreciar las deformaciones en la superficie que los dos materiales sufrieron, figuras 4.1 y 4.2. Estas fotografías son de las secciones más dañadas en donde se muestran las muescas dejadas por los impactos de los pelets sobre los dos materiales. Estas muescas fueron aumentando de tamaño con la altura para los dos materiales.

La placa tipo stellite 6 no sufrió daño detectable al ser impactada con pelets de 12.5 mm a una altura de 6.35 m. Esto se pudo apreciar en el microscopio electrónico de barrido en donde no se observó ninguna deformación plástica. Para la placa P-11 a la misma altura (6.35 m.) y con el

mismo tamaño de pelet (12.5 mm), como lo muestra la figura 4.3, se ve la superficie rayada y se empieza a ver la aparición de cráteres. Los cuales ya se ven mas uniformemente distribuidos a la misma altura (6.35 m.) pero con

tamaño de partícula de 15.62 mm como lo muestra las figura 4.2. Lo mismo sucedió para la placa con recubrimiento tipo Stellite 6 a la misma altura (6.35 m.) y con el mismo tamaño de partícula (15.62 mm) empezaron a aparecer deformaciones como la mostrada en la figura 4.4.



Figura 4.1 Recubrimiento tipo Stellite 6 después de impactado en la que se observan las deformaciones dejadas por los impactos de hierro esponja.

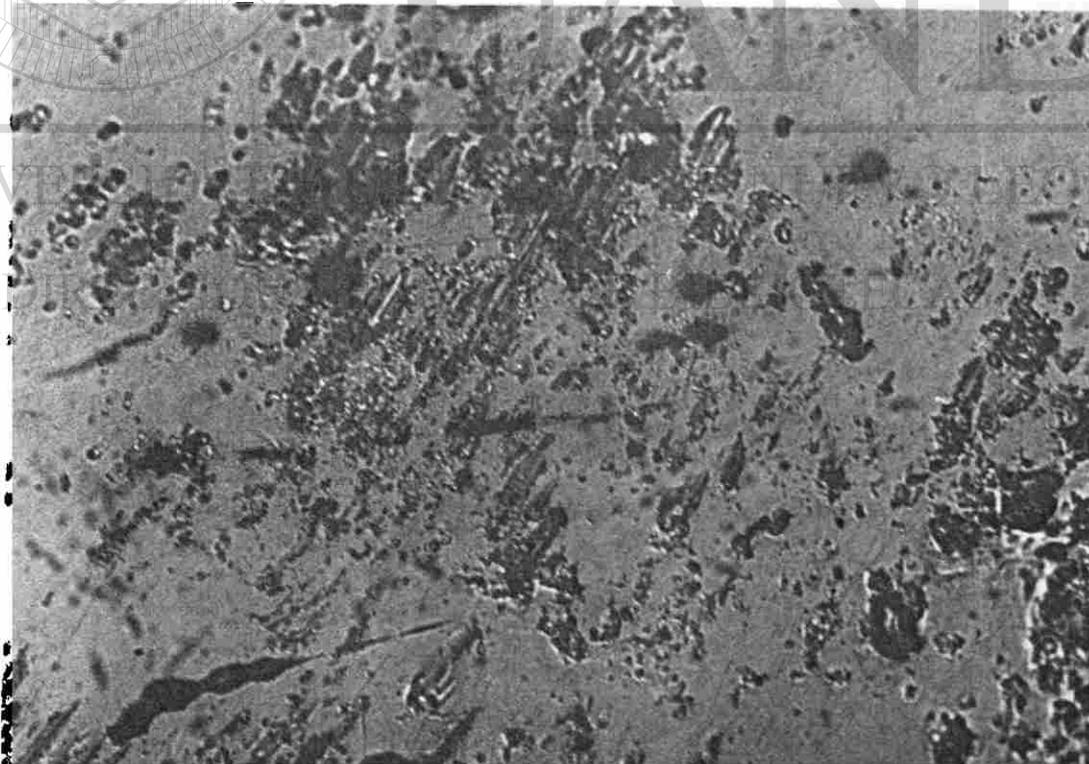


Figura 4.2 Placa de acero grado p-11 después de impactada en la que se observan las deformaciones, en forma de cráteres, formados por los impactos de pellets de hierro esponja,

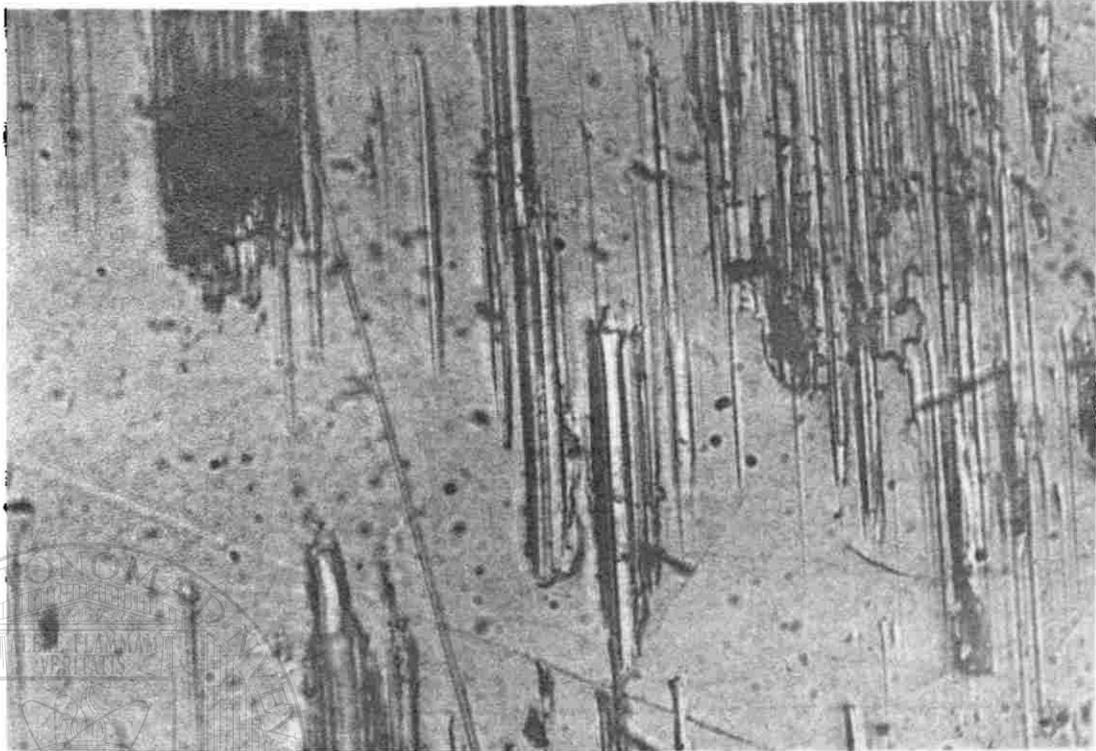


Figura 4.3 Placa de acero grado p-11 después de impactada a 6m. con pelets de 5/8-1/2 en la que se observa el rayado y empieza la aparición de cráteres.

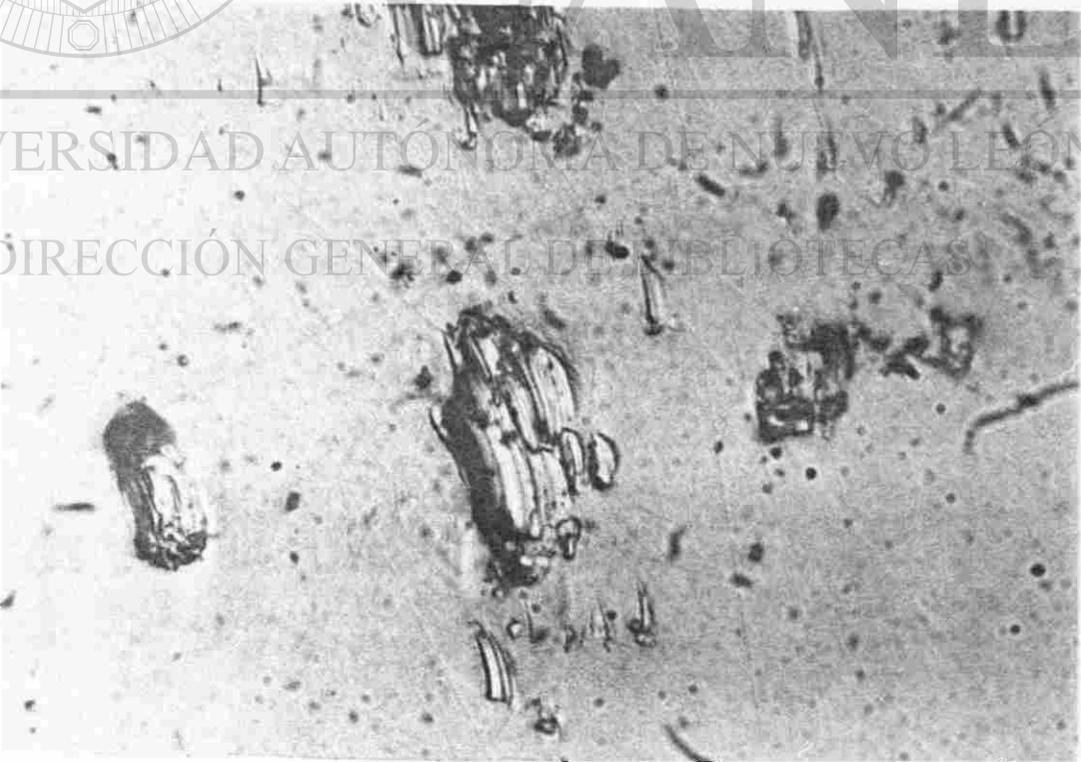


Figura 4.4 Muesca dejada por un pelet de hierro esponja sobre recubrimiento tipo Stellite 6.

4.3 Observaciones al microscopio electrónico.

Los impactos de los pelets sobre los dos materiales observado en el microscopio electrónico de barrido son mostrados en las figuras 4.5 y 4.6. La Fig. 4.5 nos muestra un impacto sobre la placa de acero grado P-11 en donde se aprecia el material removido del sitio de impacto y flujo plástico de material en la parte final de la muesca. La Fig. 4.6 es la huella dejada, sobre el recubrimiento tipo Stellite 6, por el deslizamiento del pelet al impactarse, en ella se puede apreciar la menor cantidad de material removido por el impacto. La fig. 4.7 nos muestra dos huellas de impacto sobre la superficie del acero grado P-11 en donde se puede apreciar el material removido por el pelet. La Fig. 4.8 es una ampliación de uno de los impactos de la fig. 4.7 en donde se aprecia la "proa" levantada del sitio de impacto.

La Fig. 4.9 nos muestra una zona sobre el recubrimiento tipo Stellite 6 en donde se puede apreciar que hay material removido del sitio de impacto en forma de "proa". En la Fig. 4.10 se aprecia una zona de múltiples impacto sobre el acero de grado P-11 donde se ve la formación de "olas" las cuales se endurecen por trabajo debido a impactos posteriores y son eliminadas.

De acuerdo a las imágenes de microscopía electrónica de barrido y según la sección 2.4.2, figura 2.4 el tipo de deformación formada en el acero del tipo P-11 es el denominado surcado por una partícula redonda y en el recubrimiento tipo Stellite 6 es el llamado corte I. Estos tipos de deformaciones

abarca la abrasión por surcado y formación de borde (sección 2.5, fig. 2.6), las cuales serán endurecidas por impactos posteriores para empezar la eliminación de material. Un análisis químico cualitativo fig. 4.11 y 4.12 en el fondo de las muescas, debido a que en algunas se observaba una mancha oscura en el fondo de las deformaciones, nos reveló que había calcio, magnesio, silicio y otros elementos que forman parte de los compuestos del hierro esponja, en especial de la denominada ganga. Esto ratifica lo anteriormente mencionado en la sección 4.1 en donde las placas aumentan de peso en un inicio y es debido a que los finos de hierro esponja se quedan adheridos en el fondo de las muescas.

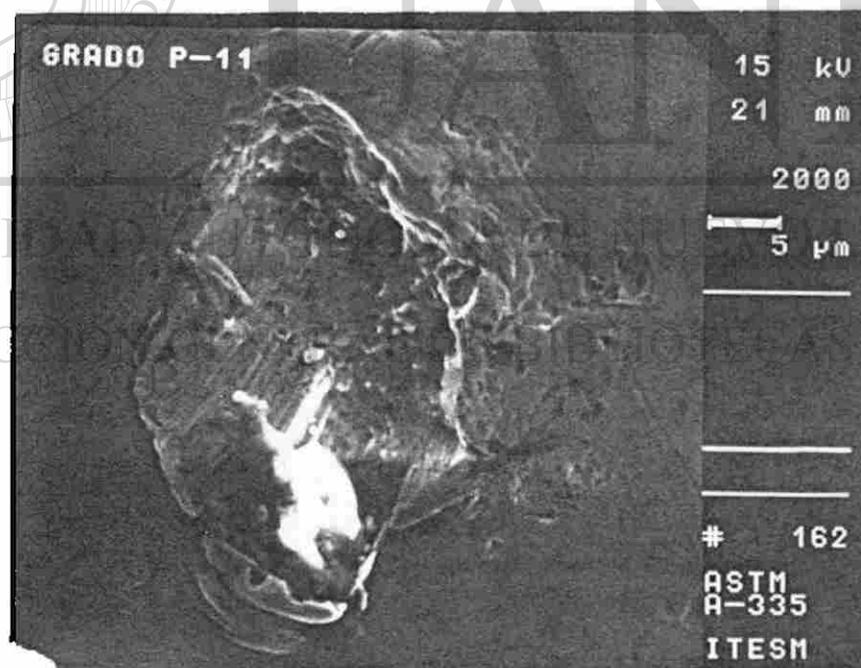


Figura 4.5 Fotografía de microscopio electrónico a 2000x para la placa de acero grado P-11 en la que se observa el flujo plástico y el material que ha sido desplazado y acumulado en la parte final de la muesca.

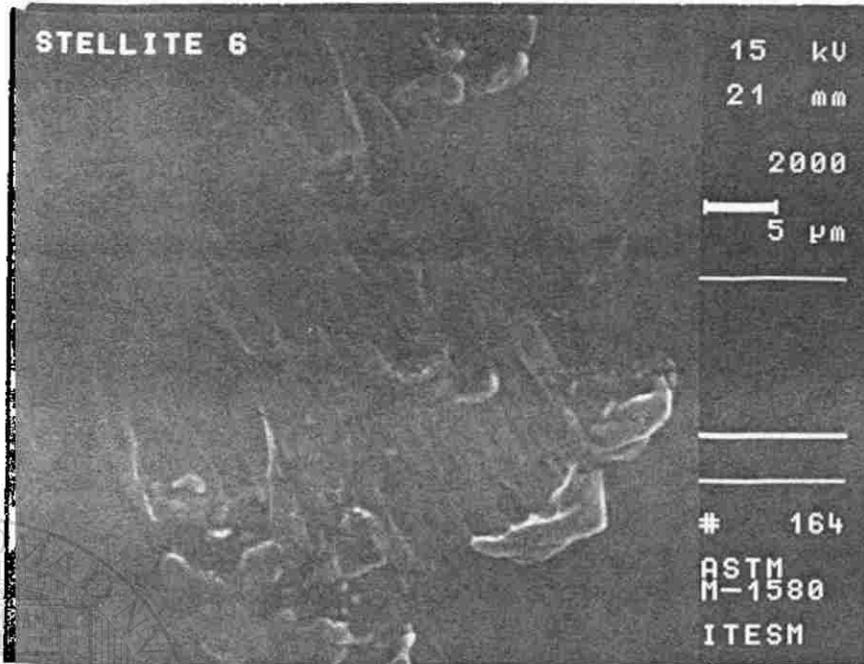


Figura 4.6 Material deformado de la placa con recubrimiento tipo Stellite 6 a 2000x en donde se puede ver que el borde formado al final de la muesca no es tan grande como en la de P-11 y el flujo plástico al final de la muesca es menor.

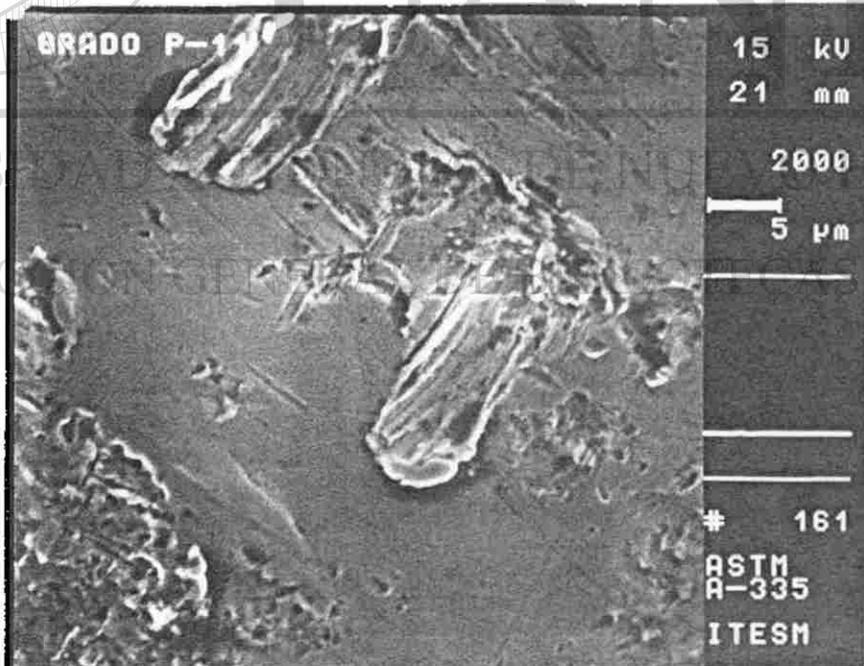


Figura 4.7 Un par de impactos sobre la placa de acero grado P-11 en donde se puede apreciar el borde formado al final de la muesca, esta proa o borde de material desplazado es eliminado por impactos posteriores, 2000x.

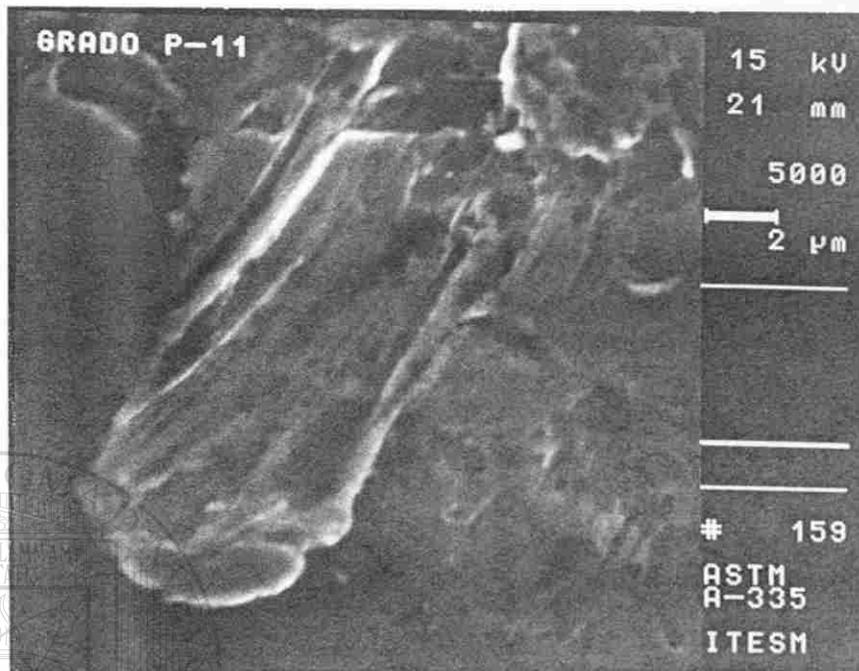


Figura 4.8 Amplificación de uno de los impactos de la figura 4.7 en donde se aprecia la proa levantada al final de la muesca.

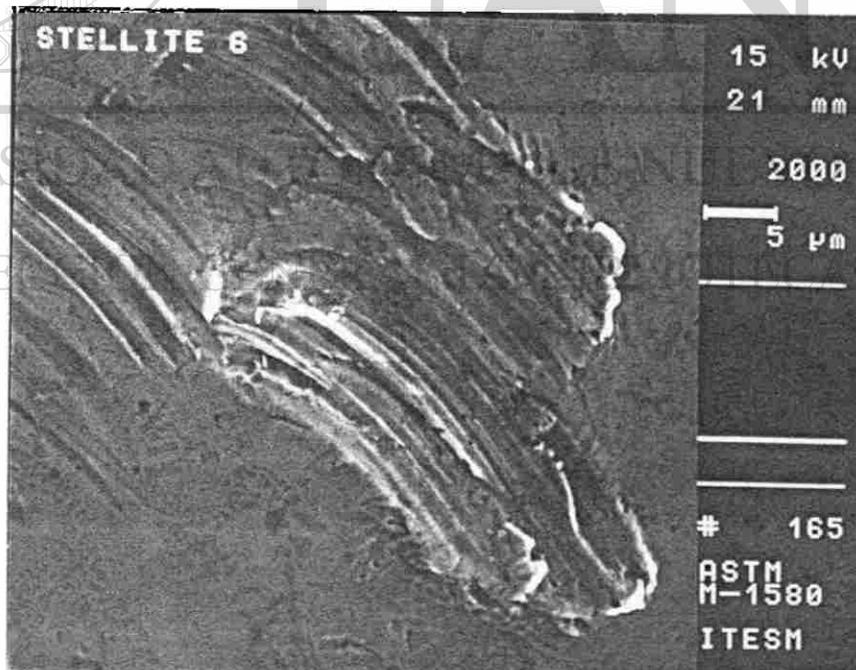


Figura 4.9 Impactos sobre la placa con recubrimiento tipo Stellite 6 a 2000x en donde se aprecia el surcado y formación de borde al final de la muesca dejada por los pellets de hierro esponja.

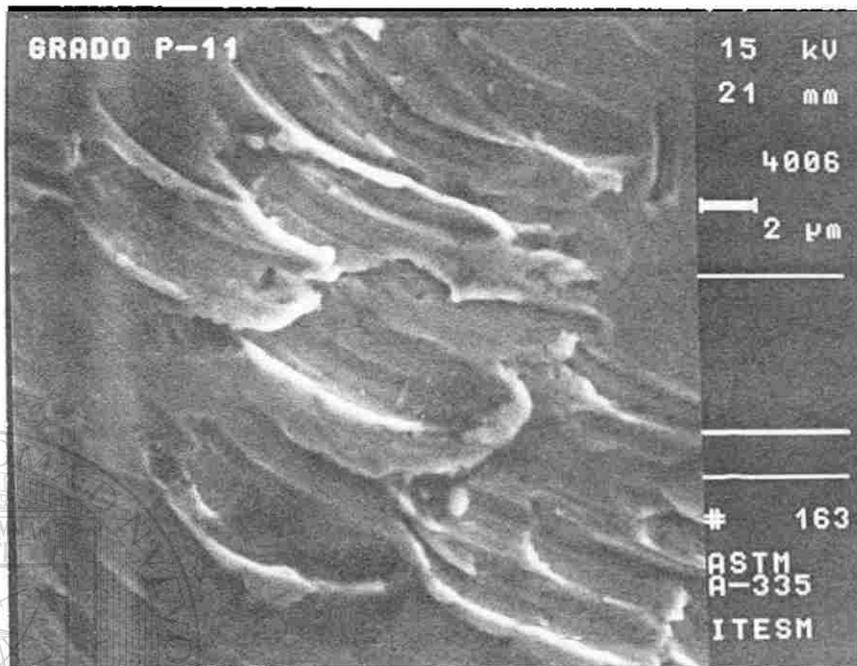


Figura 4.10 Fotografía de microscopio electrónico a 4006x del acero grado p-11 en la cual se observa la deformación en donde se aprecia material desplazado hacia los lados y al final de las muescas.

En base a los resultados obtenidos y a que algunos autores[21] han encontrado fusión de los finos que se desprenden de las partículas al momento del impacto a altas velocidades debido a que hay una generación de calor debido a la energía cinética de la partícula. Es fácil suponer que aunque las velocidades de los pelets de hierro esponja no son tan altas como las reportadas por algunos autores, si llevan una energía que combinada con las altas temperaturas de transporte de los pelets, como originalmente ocurre en planta, puede contribuir a la fusión de los finos de hierro esponja con las

paredes de los tubos para engrosar las paredes de los mismos hasta un espesor crítico para después empezar a desgastarse [20].

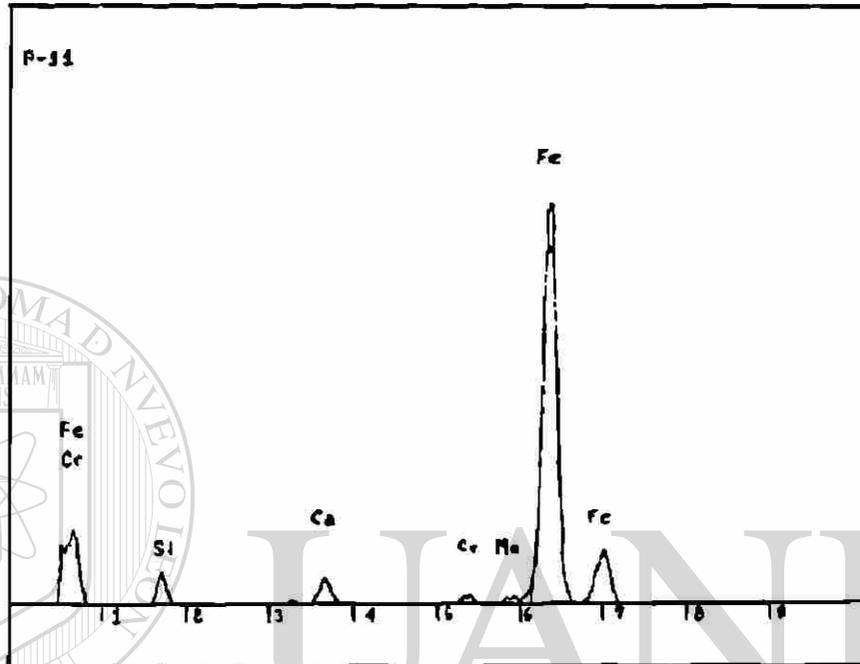


Figura 4.11 Análisis químico cualitativo para las muescas de la placa -11.

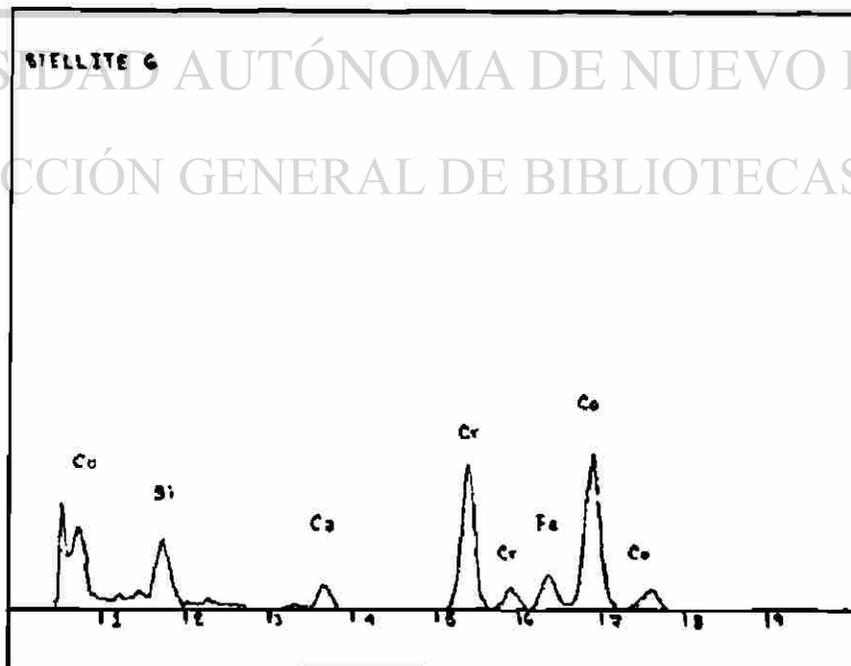


Figura 4.12 Análisis cualitativo para el recubrimiento tipo Stellite 6.

4.4 Cálculo de la velocidad de impacto de la partícula.

Un cuerpo en caída libre empieza a incrementar su velocidad uniformemente hasta un cierto punto en el cual debido a la resistencia del aire su velocidad se vuelve constante. Esta velocidad que un cuerpo alcanza a un tiempo infinito se le denomina velocidad terminal y es la máxima velocidad que una partícula puede alcanzar si se considera la resistencia del medio.

La velocidad de impacto (apéndice B) de la partícula esta dada por :

$$v(t) = \sqrt{\frac{2gm}{\rho A}} \tanh\left[t \sqrt{\frac{\rho A g}{2m}}\right] \quad (12)$$

donde

g = es la gravedad

m = masa de la partícula

ρ = densidad del medio

A = área transversal de la partícula

t = tiempo de caída

Las velocidades de las pruebas tanto de impacto como terminal están dadas en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Velocidades de impacto, terminales y tiempos de las pruebas.

Altura	# malla	vel. Terminal	vel. impacto	tiempo
1.11 m	15.62 mm	21.12 m/s	4.60 m/s	.477 seg
	12.5	19.18	4.60	.477
	9.38	17.51	4.58	.478
2.08 m	15.62	21.12	6.23	.656
	12.5	19.18	6.22	.657
	9.38	17.51	6.18	.658
4.56 m	15.62	21.12	9.01	.980
	12.5	19.18	8.93	.983
	9.38	17.51	8.82	.987
6.35 m.	15.62	21.12	10.41	1.164
	12.5	19.18	10.31	1.169
	9.38	17.51	10.14	1.176
8.36 m.	15.62	21.12	11.70	1.346
	12.5	19.18	11.50	1.357
	9.38	17.51	11.23	1.366

4.5 Degradación de los pelets de fierro esponja.

Las pruebas con pelets de fierro esponja resultó en que una cierta cantidad se quebró por lo que se determinó la degradación de los pelets en función del porcentaje promedio de pérdida en peso. En el anexo 1 se muestran las distribuciones de los experimentos. La tabla 4.5 registra los datos de altura y velocidad de impacto así como del porcentaje en peso perdido y el tamaño de partícula.

Tabla 4.5 Velocidades de impacto y porciento en peso perdido a partir de un tamaño de malla.

Altura	vel. impacto	% degradación	malla inicial
1.11 m	4.60	4.01	15.62 mm
2.08	6.23	5.43	15.62
4.56 m.	9.01	16.76	15.62
6.35 m.	10.41	23.59	15.62
8.36 m.	11.70	32.38	15.62
1.11 m	4.60	1.98	12.5
2.08	6.22	6.0	12.5
4.56 m.	8.93	9.55	12.5
6.35 m.	10.31	15.57	12.5
8.36 m.	11.50	22.70	12.5
1.11 m	4.58	.54	9.38
2.08	6.18	.94	9.38
4.56 m.	8.82	2.5	9.38
6.35 m.	10.14	7.69	9.38
8.36 m.	11.23	13.79	9.38

Al graficar los datos de pérdida en peso contra la altura se encontró que ésta pérdida en peso es una función lineal de la altura y la figura 4.13 muestra

esta relación en donde la recta con mayor y menor pendiente corresponden a tamaños de partícula mayor y menor respectivamente. En ella se puede ver como la pérdida en peso, a una misma altura, aumenta al incrementarse el tamaño de partícula. También se puede observar que la pendiente de las rectas decrecen al disminuir el tamaño de partícula.

Con una extrapolación de estas rectas se determinó las alturas críticas a las cuales el pelet no sufre pérdida en peso. Estas alturas fueron: 0.241,

0.471, 1.472 m para partículas de tamaño de malla 15.62, 12.5 y 9.38 mm respectivamente.

Pérdida en peso en función de la altura

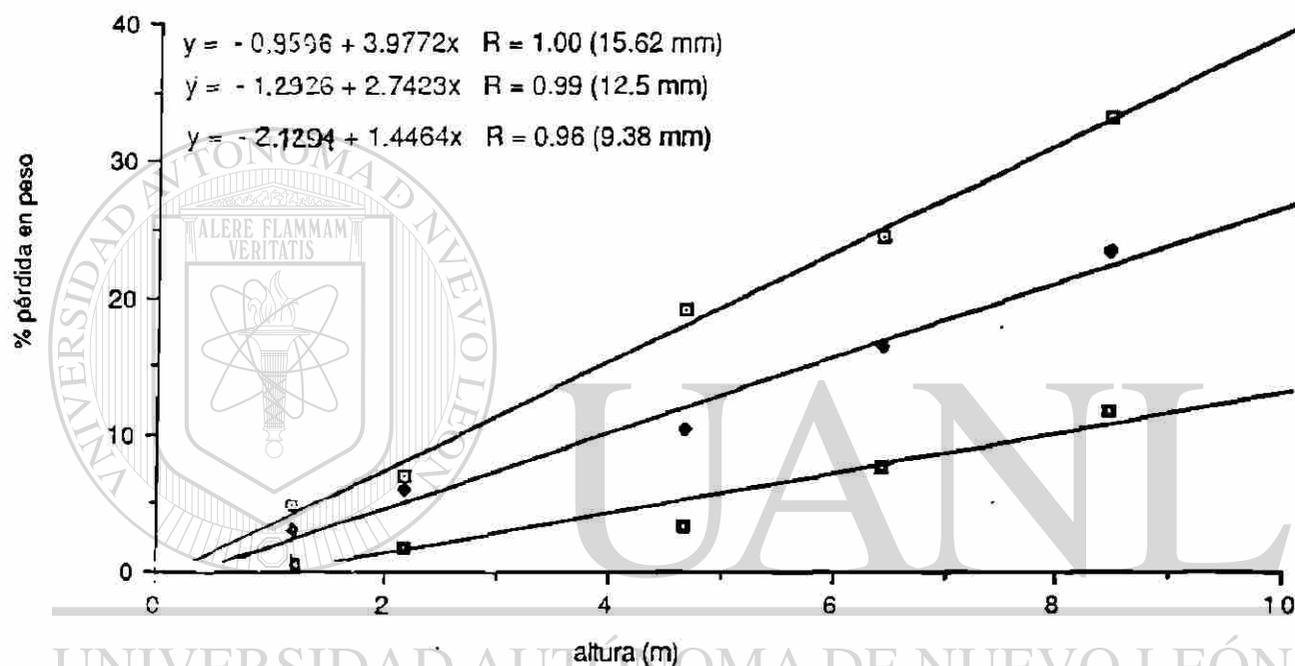


Fig. 4.13 Gráfica de degradación de partícula vs. altura.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Esta relación lineal entre la pérdida en peso de los pelets de hierro esponja y la altura implica, por razones energéticas, una relación lineal entre la pérdida en peso y la velocidad de impacto al cuadrado como lo muestra la figura 4.14. En esta figura a mayor pendiente de la recta mayor tamaño de partícula.

Pérdida en peso en función del cuadrado de la velocidad de impacto

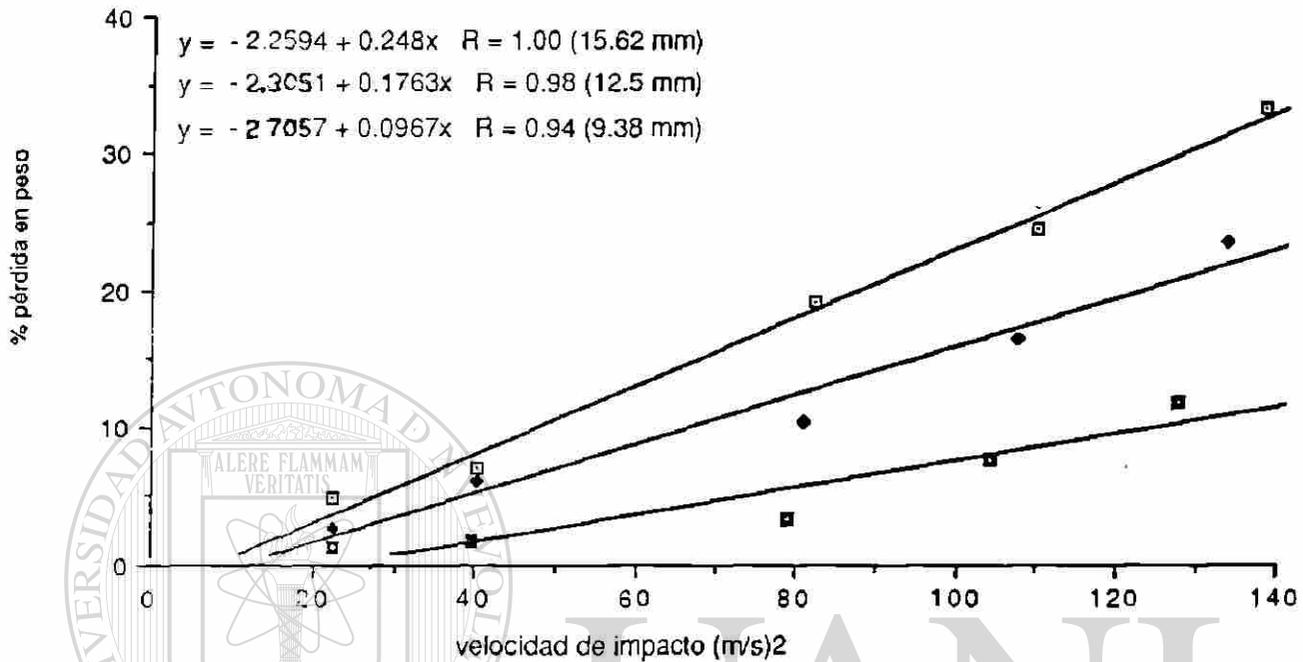


Fig. 4.14 Gráfica de degradación de partícula vs. velocidad de impacto al cuadrado.

En esta gráfica se puede ver como aumenta la pérdida en peso para los pelets de hierro esponja al incrementarse la velocidad y el tamaño de partícula. Otra observación importante que nos da la gráfica es que para un porcentaje de peso perdido fijo la velocidad de impacto crecerá al disminuir el tamaño de partícula. De esta misma gráfica se obtuvieron las velocidades críticas por abajo de las cuales los pelets de hierro esponja no tendrán variación en peso. Las velocidades críticas para las partículas de tamaño 15.62, 12.5 y 9.38 mm fueron de 3.01, 3.61, y 5.28 m/s respectivamente.

Estas velocidades y alturas críticas se graficaron en función del tamaño de partícula obteniéndose la gráfica de la figura 4.15 en la que se observa como disminuyen la velocidades y alturas críticas al incrementarse el tamaño de partícula.

Altura y velocidad crítica en función del tamaño de partícula

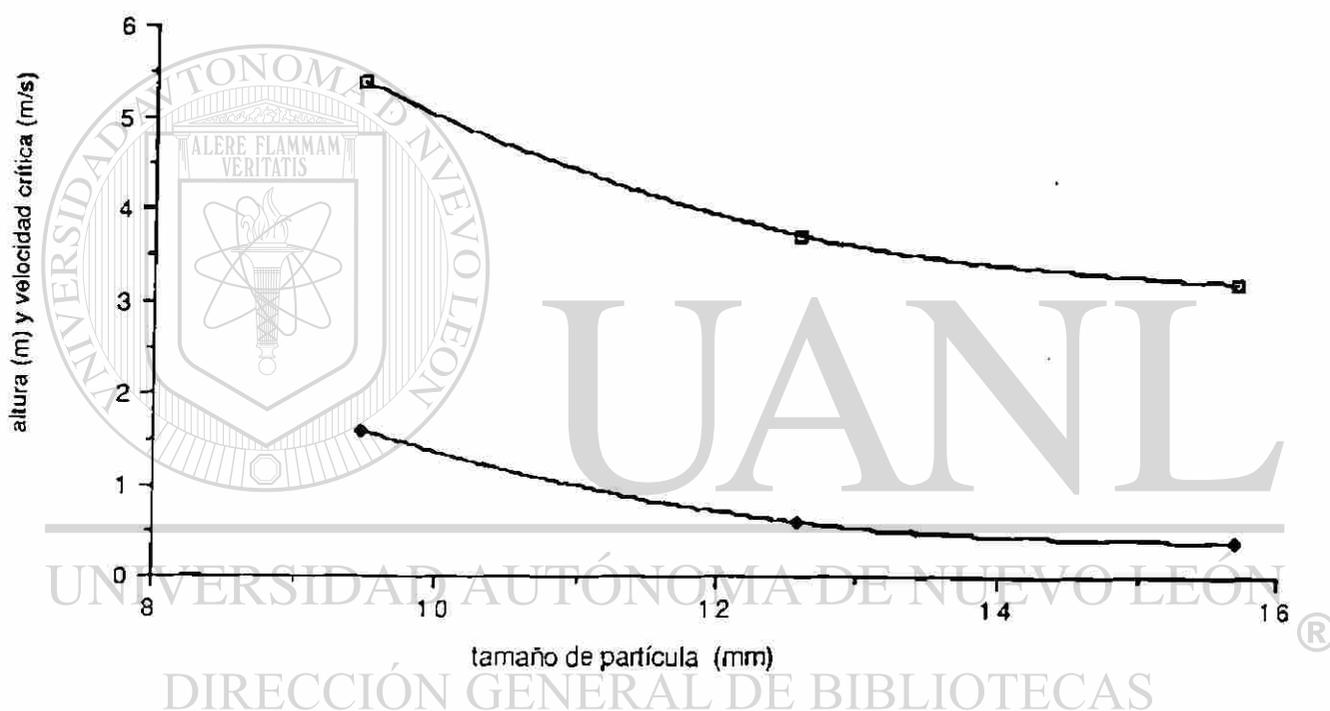
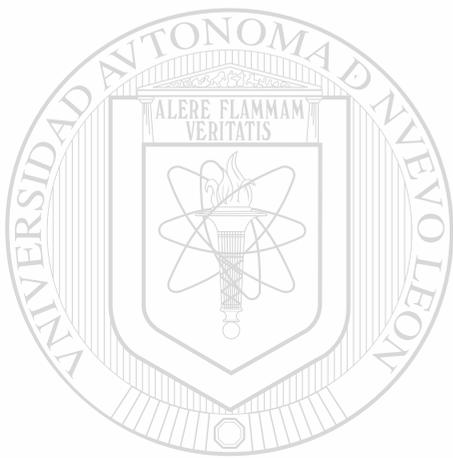


Figura 4.15 Alturas y velocidades críticas en función del tamaño de partícula.

Algunos investigadores [1] de una acería local han determinado la degradación de los pelets de hierro esponja pero en función de la velocidad del gas transportador y no de la partícula. Por lo anterior resulta importante los resultados obtenidos porque puede dar una visión del comportamiento de la degradación de los pelets de hierro esponja para compararlos con los que se

puedan obtener si se logra medir la velocidad de la partícula dentro de los ductos del transporte neumático, objetivo que a la fecha no se ha podido alcanzar pero que se está trabajando sobre ello.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Se implementó una metodología de prueba para la determinación de la degradación del fierro esponja.
2. El acero grado P-11 sufrió mayor deformación y flujo plástico que el recubrimiento tipo Stellite 6.
3. Se determinó la velocidad a la que el recubrimiento tipo Stellite 6 empieza a sufrir deformación, y fue de 10.31 m/s con pelets de 12.5 mm.
4. Se determinó que el mecanismo de desgaste en los dos materiales probados es el de surcado con formación de borde y el de corte I para el acero grado P-11 y recubrimiento tipo Stellite 6 respectivamente.
5. Se determinó que el comportamiento de la degradación de los pelets de fierro esponja considerando el porcentaje en peso perdido a velocidades menores que 12 m/s depende linealmente de la altura y de la velocidad al cuadrado.
6. Se determinaron las alturas y las velocidades críticas por debajo de las cuales los pelets de fierro esponja no tienen pérdida en peso.

7. Para una degradación fija, el tamaño de partícula es fundamental, ya que su velocidad de impacto aumenta al disminuir el tamaño de partícula.
8. Se recomienda hacer una cantidad mayor de 30 experimentos para cada una de las pruebas para tener una mejor distribución de los datos. Esto es debido a que en algunos puntos no hay una diferencia estadísticamente significativa. Esta experimentación pudiese cambiar las pendientes de las rectas.

9. Otra recomendación sería la de hacer pruebas a mayores velocidades para poder tener un espectro más amplio del comportamiento de la degradación de los pelets de fierro esponja. Esto se puede lograr con mayores alturas de prueba o modificando el diseño experimental para que con las mismas alturas se obtengan mayores velocidades. Otro factor que resultaría importante estudiar es el de hacer pruebas con tamaño combinado de partículas para ver su comportamiento y compararlo con el obtenido en este trabajo.

APENDICE A

Para un cuerpo que cae libremente, la resistencia del aire al movimiento se considera como una fuerza que es proporcional al cuadrado de la velocidad, de esta forma su ecuación de movimiento para un cuerpo en caída libre es:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - \frac{\rho A}{2} v^2 \dots\dots\dots(1)$$

dividiendo todo entre la masa m tendremos:

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{\rho A}{2m} v^2 \dots\dots\dots(2)$$

luego si consideramos

$k = \frac{\rho A}{2m}$ tendremos:

$$\frac{dv}{dt} = g - kv \dots\dots\dots(3)$$

despejando dt

$$dt = \frac{dv}{g \left(1 - \frac{k}{g} v^2 \right)} \dots\dots\dots(4)$$

recordando que:

$$\int \frac{du}{a^2 - u^2} = \frac{1}{2a} \ln \frac{1+u}{1-u} \dots\dots\dots(5)$$

tendremos: $\frac{1}{\sqrt{kg}} \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{k}{g}} v}{1 - \sqrt{\frac{k}{g}} v} = t \dots\dots\dots(6)$

utilizando la identidad: $\tanh^{-1} u = \frac{1}{2} \ln \frac{1+u}{1-u} \dots\dots\dots(7)$

y despejando para v tendremos : $v = \sqrt{\frac{g}{k}} \tanh(t\sqrt{kg})$(8)

sustituyendo $k = \frac{\rho A}{2m}$ tendremos: $v(t) = \sqrt{\frac{2gm}{\rho A}} \tanh\left(t\sqrt{\frac{\rho Ag}{2m}}\right)$(9)

La ecuación 9 describe la velocidad en función del tiempo para un cuerpo que cae libremente, considerando la resistencia del aire en la cual se puede ver que para tiempos muy grandes la partícula no continua siempre incrementando su velocidad, sino que llega a un valor de $\sqrt{\frac{2gm}{\rho A}}$, la cual se denomina velocidad terminal y está en función de la masa de la partícula, su área transversal y la densidad del aire.

Si consideramos que $v = \frac{dy}{dt}$ y la sustituimos en la ecuación 9, además de

considerar que: $\tanh u = \frac{\operatorname{senhu}}{\operatorname{cosh} u} = \frac{e^u - e^{-u}}{e^u + e^{-u}} = \frac{e^{2u} - e^{-2u}}{e^{2u} + e^{-2u}}$ y despejando y tendremos:

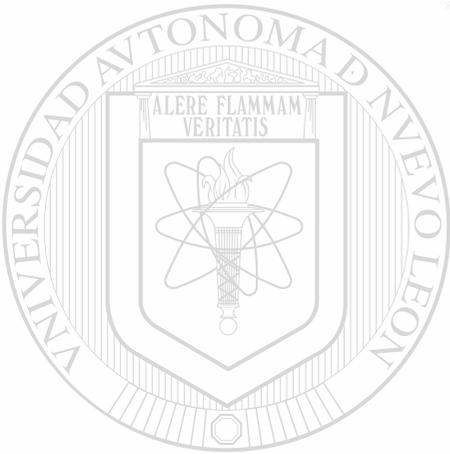
$$y = \frac{2m}{\rho A} \ln \left| \cosh \left(t \sqrt{\frac{\rho Ag}{2m}} \right) \right| \dots\dots\dots(10)$$

Para una altura determinada se puede calcular el tiempo de caída libre si se despeja t de la ecuación 10 quedando:

$$t = \frac{\cosh^{-1} \left[e^{\frac{\rho A g h}{2 \rho A m}} \right]}{\sqrt{\frac{\rho A g}{2m}}} \dots\dots\dots(11)$$

De esta forma la velocidad de impacto se puede calcular de la ecuación:

$$v_{\text{impacto}} = v_{\text{terminal}} \tanh \left[t \sqrt{\frac{\rho A g}{2m}} \right] \dots\dots\dots(12)$$

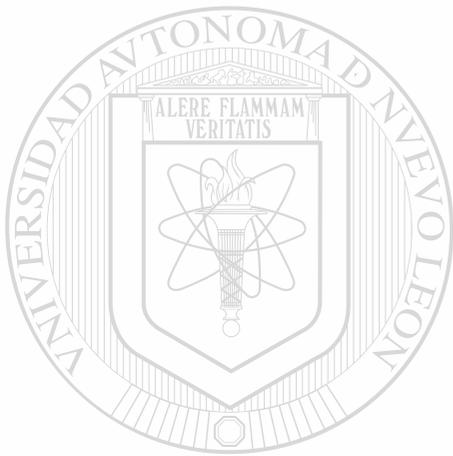


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



ANEXO 1

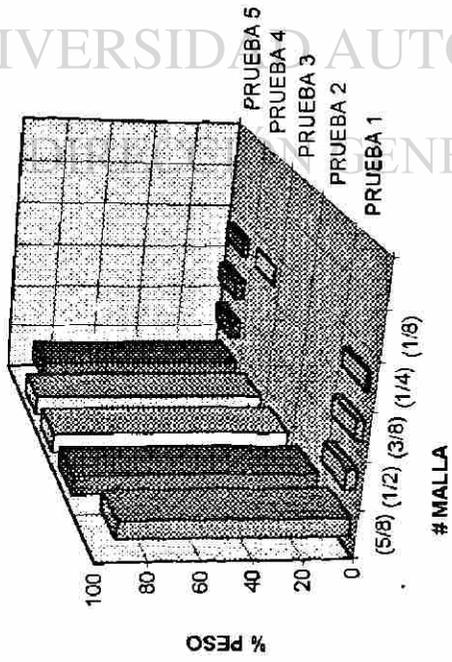
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

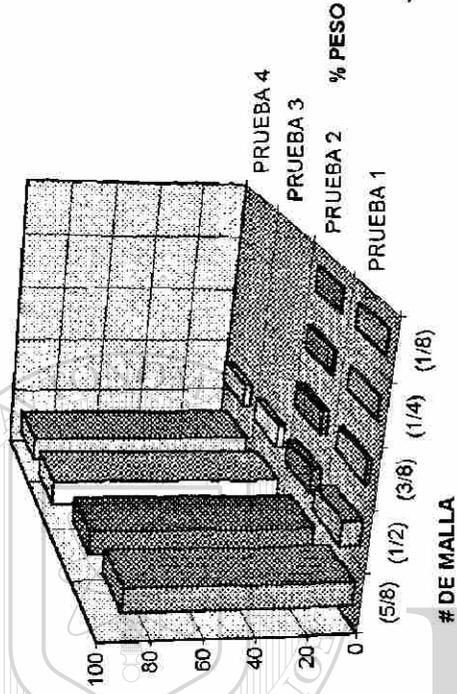
®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

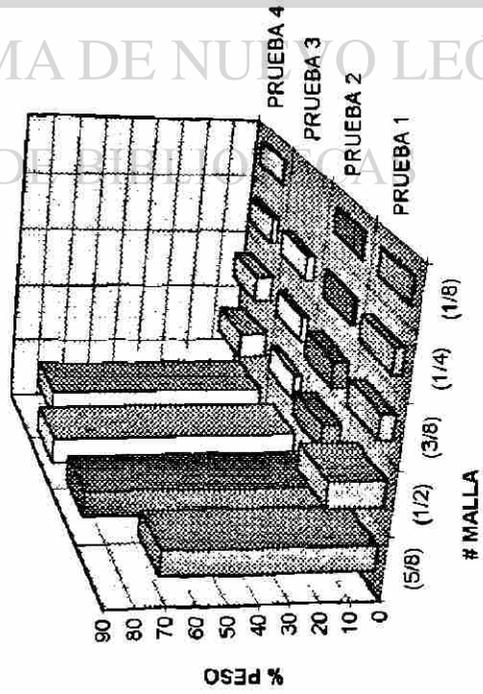
PRUEBAS PARA MALLA 5/8 A 1.11 m.



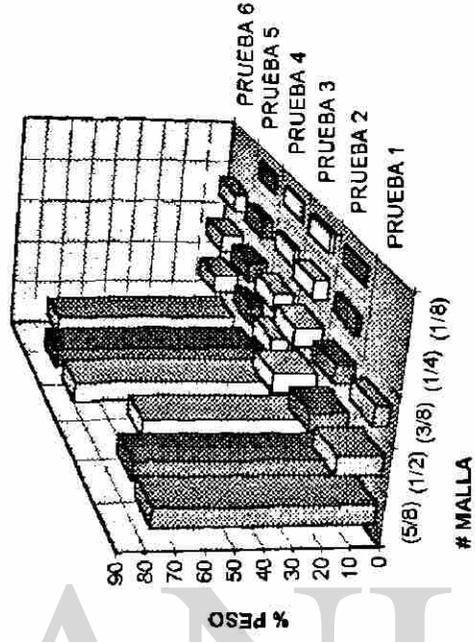
PRUEBA PARA MALLA 5/8 A 2.08 m



PRUEBAS PARA MALLA 5/8 A 4.56 m.

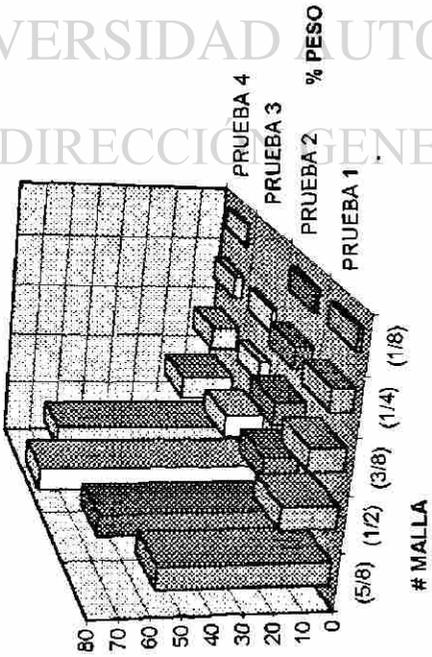


PRUEBAS PARA MALLA 5/8 A 6.35 m.

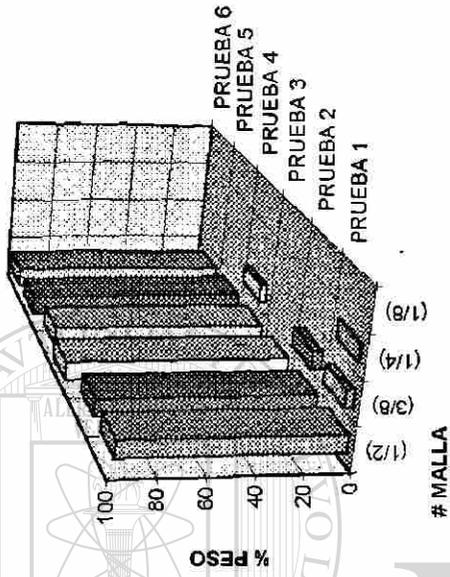


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

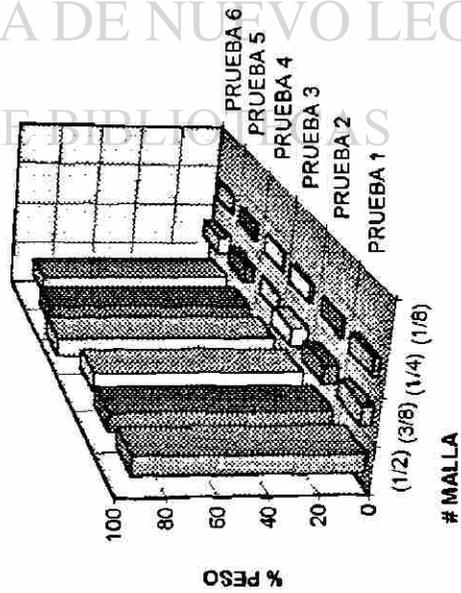
PRUEBA PARA MALLA 5/8 A 8.36 m



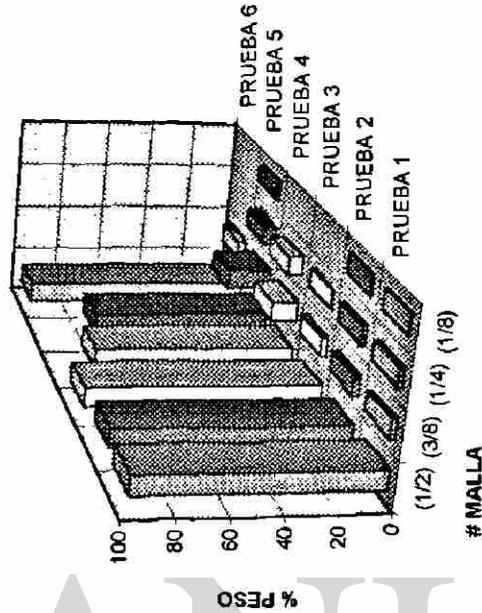
PRUEBAS PARA MALLA 1/2 A 1.11 m.



PRUEBAS CON MALLA 1/2 A 2.08 m

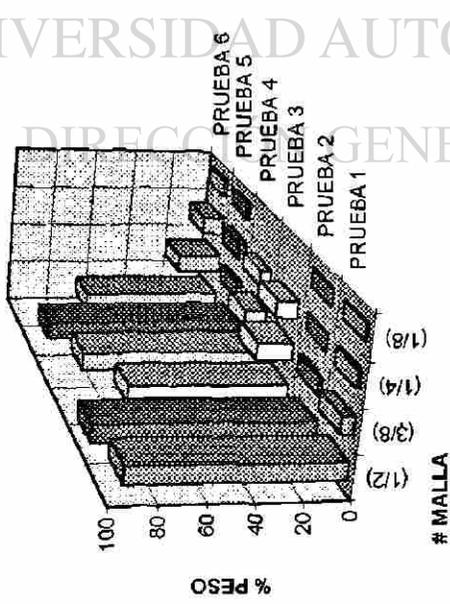


PRUEBAS PARA MALLA 1/2 A 4.56 m.

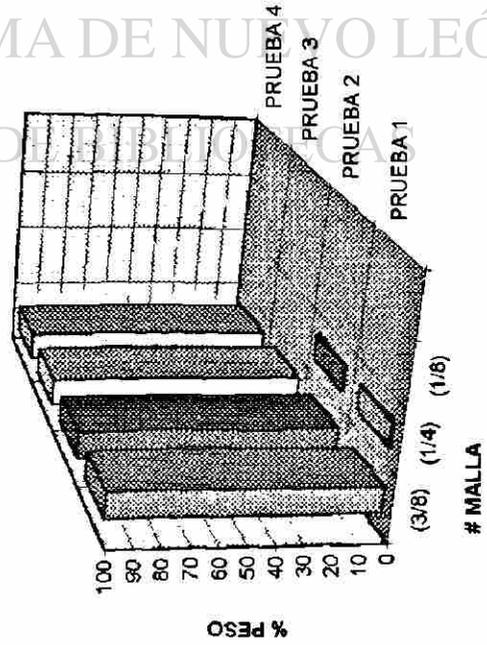


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECA

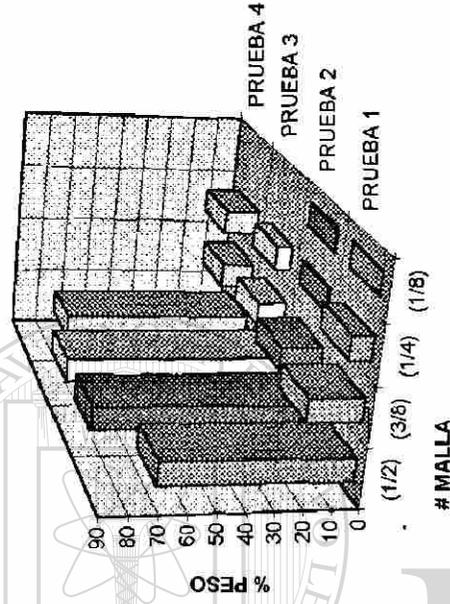
PRUEBAS PARA MALLA 1/2 A 6.35 m.



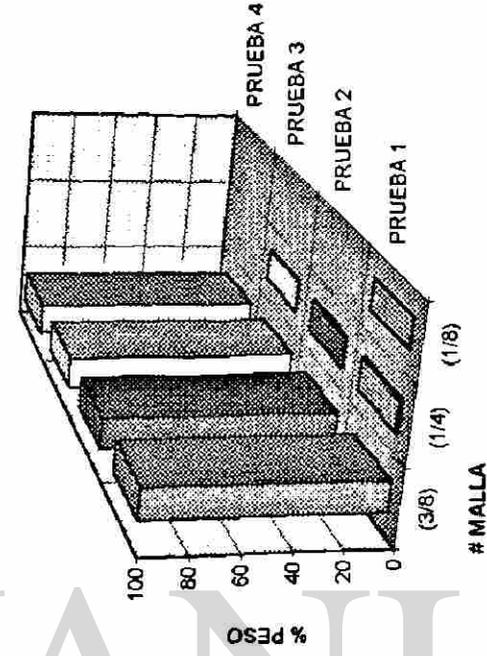
PRUEBAS PARA MALLA 3/8 A 1.11 m.



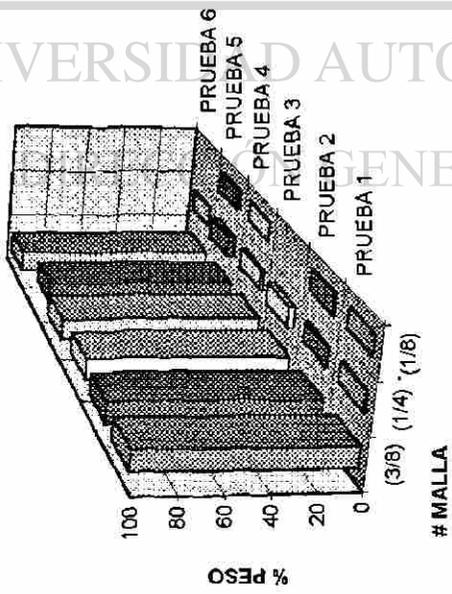
PRUEBAS CON MALLA 1/2 A 8.36 m



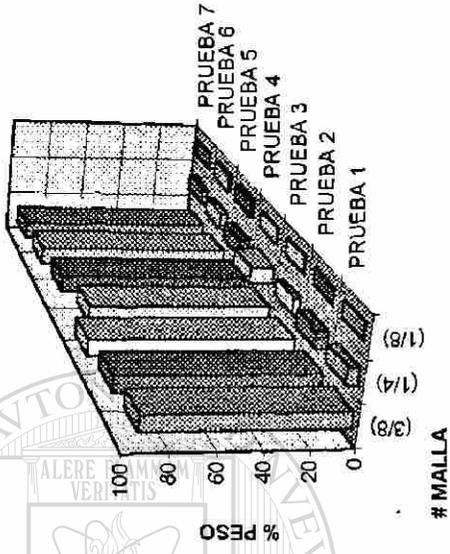
PRUEBAS CON MALLA 3/8 A 2.08 m



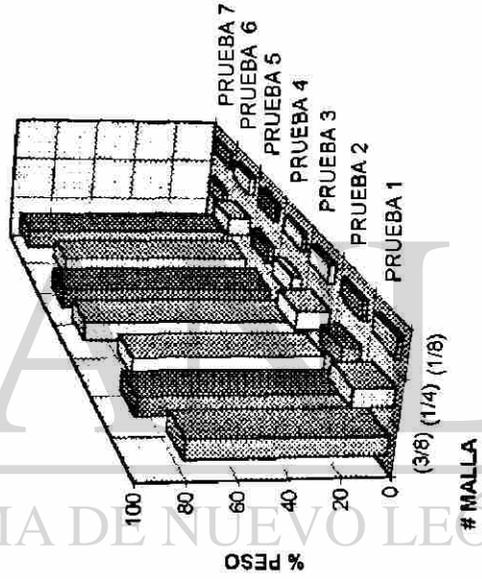
PRUEBAS CON MALLA 3/8 A 4.56 m



PRUEBAS PARA MALLA 3/8 A 6.35 m.



PRUEBAS PARA MALLA 3/8 A 8.36 m.

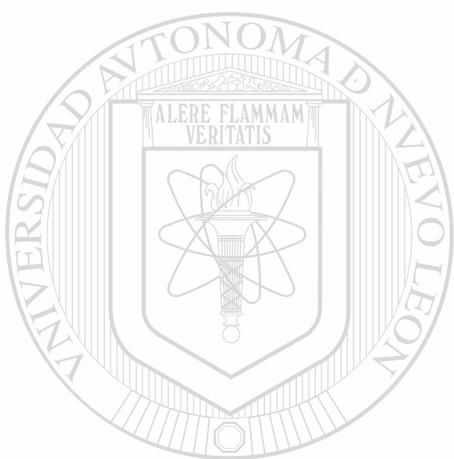


REFERENCIAS

- 1) M. A. Flores, Comunicación personal, Mayo 1995.
- 2) A. Pérez. Wear Resistance of Pearlitic Rail Steels, Tesis Doctoral, University of Leicester, U.K., 1992.
- 3) Terkel Rosenqvist, Principles of Extractive Metallurgy, second edition, McGraw Hill, 1988.
- 4) R. D. Marcus, et al, Pneumatic Conveying of Solids, A theoretical and practical approach, p 431, Chapman and Hall, 1990.
- 5) N. J. Mainwaring, Characterisation of Materials for Pneumatic Conveying, Powder Handling & Processing, Vol. 6, No. 1, January-March 1994.
- 6) S. Jahanmir. On the Wear Mechanisms and The Wear Equations. Fundamentals of Tribology, 1981, p. 455-468.
- 7) Alan V. Leavy, Mechanisms of Combined Erosion-Corrosion of Steels at Elevated Temperatures, University of California, Berkeley California 94720.
- 8) Organisation for Economic Co-Operation and Development, Friction, Wear and Lubrication, Paris, 1969, p. 31.
- 9) I.M. Hutchings, Mechanisms of Wear in Powder Technology: a Review, University of Cambridge, U.K. 1993.
- 10) ASM Handbook, Vol. 11, Failure Analysis and Prevention, Wear Failure, p 145.
- 11) E. Rabinowicz, Friction and Wear of Materials, Wiley, 1965.

- 12) I.M. Hutchings, *Mechanisms of the Erosion of Metals by Solid Particles*, in *Erosion Prevention and Useful Applications*, W.F. Adler, Ed., STP 66, ASTM, Philadelphia, 1979, p 59-76.
- 13) I. Finnie, *Proceedings of the Third U.S. National Congress of Applied Mechanics*, 1958, p 527-532.
- 14) I. Finnie, *Erosion by Solid Particles in a Fluid Stream*, in *Symposium on Erosion and Cavitation*, STP 307, ASTM, Philadelphia, 1962, p 70-82.
- 15) I. Finnie, *Some Observations on the Erosion of Ductile Metals*, *Wear*, Vol. 19, 1972, p 81-90.
- 16) K. Hokkirigawa and K. Kato, *Tribol. Int.*, 21 (1988) 51
- 17) I. Finnie, *Erosion of Surfaces by Solid Particles*, *Wear*, Vol. 3, 1960, p 87-103.
- 18) J.G.A. Bitter, *A Study of Erosion Phenomena-Part IV*, *Wear*, Vol. 5-21, 1963, p 169-190.
- 19) B. R. Lawn and M. V. Swain, *J. Mater. Sci.*, 10 (1975) 113. ®
- 20) A.G. Evans and D. B. Marshall, in D.A. Rigney (ed.), *Fundamentals of Friction and Wear of Materials*, ASM, 1981, pp. 439-452.
- 21) G. P. Tilly, *Erosion Caused by Impact of Solid Particles*, *Trestise on Materials Science and Technology*, Vol. 13.
- 22) A. Velasco, comunicación personal, diciembre 1994.

23) Robert J. Gray, color Metallography, ASM Handbook, Metallography and Microstructure, Vol. 9, 1992.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

