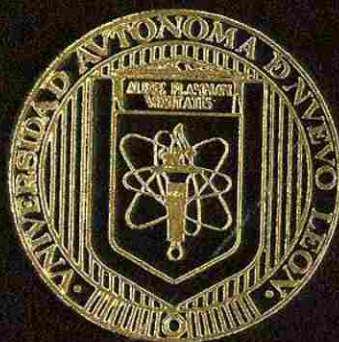


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESGASTE DE ACEROS ALEADOS EN SISTEMAS  
DE TRANSPORTE NEUMATICO

POR:

DORA IRMA MARTINEZ DELGADO

TESIS

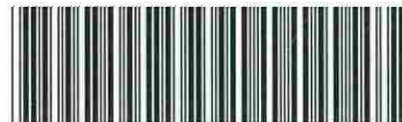
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA  
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

CD. UNIVERSITARIA

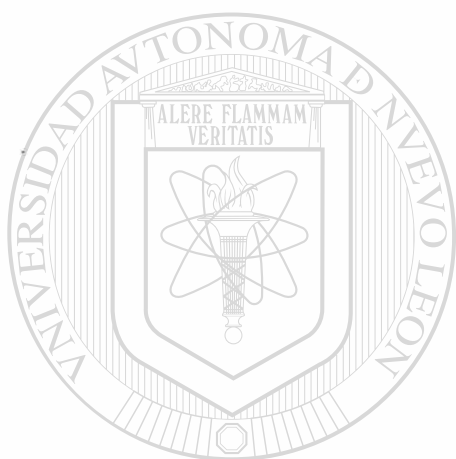
SEPTIEMBRE DE 1996

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
1996  
M374

AMERICAN  
LIBRARY  
SERIALS  
ACQUISITION  
DEPARTMENT  
UNIVERSITY OF  
MICHIGAN  
LIBRARY



1020116665



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

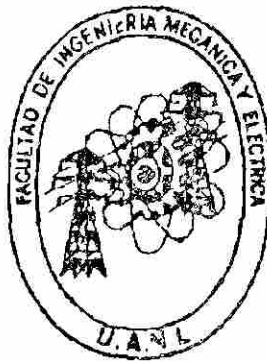


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**DESGASTE DE ACEROS ALEADOS EN SISTEMAS DE TRANSPORTE  
NEUMÁTICO**

**POR**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**DORA IRMA MARTÍNEZ DELGADO**

**DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS**



**T E S I S**

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

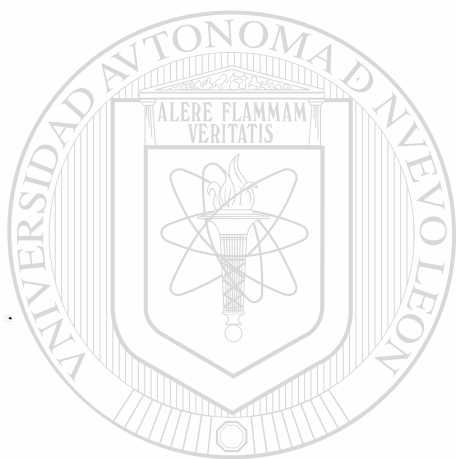
**CD. UNIVERSITARIA**

**SEPTIEMBRE DE 1996**



TM  
Z5853  
.M2  
FINE  
1996  
M374

0117-26360

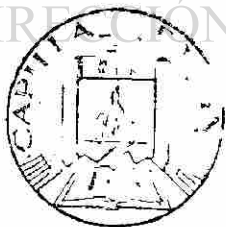


# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

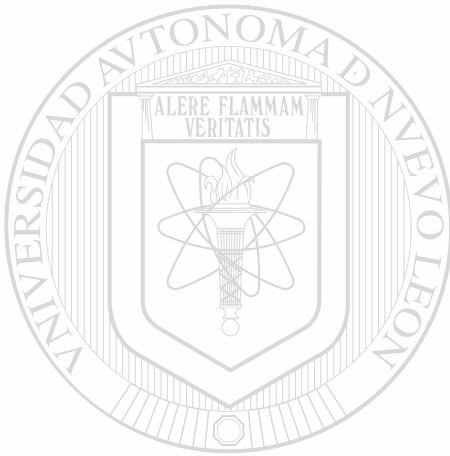


FONDO TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis: Desgaste de Aceros Aleados en Sistemas de Transporte Neumático realizada por Dora Irma Martínez Delgado sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis



Asesor  
Dr. Alberto Pérez Unzueta

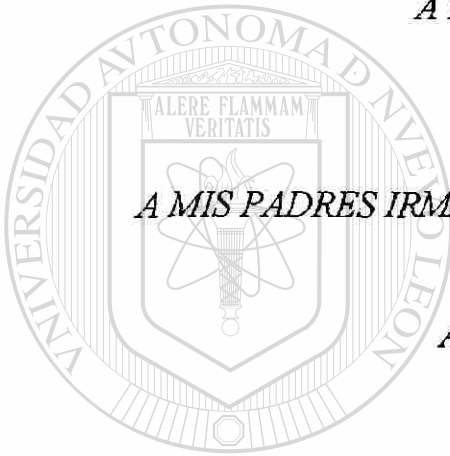
Coasesor  
Dr. Abraham Velasco Tellez

Coasesor  
Dr. Rafael Colás Ortiz

Vo. Bo.  
M. C. Roberto Villarreal Garza  
División de Estudios de Postgrado

# DEDICATORIA

*A DIOS SOBRE TODAS LAS COSAS.*



*A MIS PADRES IRMA Y JERONIMO POR TODO SU CARIÑO Y APOYO*

*BRINDADO*

*A LO LARGO DE ESTA ETAPA.*

---

*A MIS HERMANOS CARLOS, JAIME, PATY Y CESAR POR SU CARIÑO Y  
COMPRESION A LO LARGO DE ESTA ETAPA CURSADA.*

*DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS*

*A TODOS MIS AMIGOS QUE ME HAN ACOMPAÑADO SIEMPRE EN  
TODO MOMENTO.*

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo económico brindado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León. A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica en especial al Doctorado de Ingeniería en Materiales y dentro de ella a mis maestros y compañeros.

Al Dr. Alberto Pérez por su valioso asesoramiento y confianza brindada a lo largo de este trabajo.

Al Dr. Abraham Velasco Téllez por sus valiosos comentarios, asesoramiento y apoyo dentro y fuera de este trabajo.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz por su valiosa participación en el asesoramiento de este trabajo.

Al los Doctores: Ubaldo Ortiz, Carlos Guerrero, Juan A. Aguilar y Patricia Rodríguez por su apoyo y consejos durante el estudio de la Maestría.

Al Ing Ricardo Viramontes Brown por todo su apoyo recibido en la empresa HYLSA y por sus valiosos comentarios. Dentro de la empresa al Ing. Marco Flores e Ing. Alberto Soriano por su tiempo y valiosos comentarios en este trabajo. Dentro de la planta piloto al Ing. Sergio Caballero, Ing. Juan Carlos y Sr. Ernesto Martínez por su ayuda prestada. A Lorena, Edhit, Esmeralda y Paloma por su excelente trato y ayuda brindada a lo largo de este trabajo.

Al Lic. Andrés Fuentes, Cristóbal y Juan de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas por su ayuda y amistad de siempre. A Margarita Mezzetti Fausto por su participación siempre cordial y cumplida.

A mis compañeros de generación Esperanza, Miguel, Efrén y Manuel Paláfox por todos los momentos que compartimos en las buenas y en las malas, bien muchachos.

A todos mis amigos y amigas que me acompañaron durante mis estudios dentro y fuera del DIMAT.



# ÍNDICE

	Página
<b>Lista de Figuras</b>	v
<b>Lista de Tablas</b>	vii
<b>Resumen</b>	ix
<b>Capítulo 1 Introducción.</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2 Aceros.</b>	<b>3</b>
2.1 Introducción	3
2.2 Clasificación	5
2.3 Aceros al Carbono	6
2.4 Aceros Aleados	8
2.4.1 Elementos de Aleación	9
2.4.2 Efecto de los Elementos de Aleación en el Proceso de Temple	11
2.4.3 Efecto de los Elementos de Aleación en el Proceso de Revenido	11
2.5 Aceros Inoxidables	13
2.6 Aceros Resistentes al Calor para Tubería	15
<b>Capítulo 3 Transporte Neumático.</b>	<b>17</b>
3.1 Fundamentos	17
3.2 Clasificación del Material Transportado	21
3.3 Descripción y Operación de un Sistema de Transporte Neumático	
3.3.1 Diagrama de Estado	24
3.3.2 Flujo Horizontal y Vertical	27
3.3.3 Sistemas de Vacío y Presiones Positivas	28
3.4 Aplicación a las Industrias	29
3.4.1 Industria de la Alimentación	29
3.4.2 Industria de la Pulpa y el Papel	30
3.4.3 Industria del Cemento	31
3.4.4 Industria del Plástico	32
3.4.5 Industria de Metales Ferrosos	33

<b>Capítulo 4</b>	<b>Desgaste.</b>	34
	4.1 Fundamentos	34
	4.2 Clasificación del Desgaste	35
	4.2.1 Desgaste Adhesivo	36
	4.2.2 Desgaste Abrasivo	38
	4.2.3 Desgaste Erosivo	41
	4.2.4 Desgaste por Fatiga	44
	4.2.5 Desgaste Corrosivo	45
	4.2.6 Desgaste por Rozamiento	46
	4.2.7 Desgaste por Cavitación	47
	4.3 Efecto de la Microestructura en el Desgaste	48
	4.4 Desgaste en Aceros	49
	4.4.1 Desgaste de Aceros al Carbono y Aleados	49
	4.4.2 Desgaste del Acero Inoxidable	50
	4.5 Control de Varias Formas de Desgaste	51
<b>Capítulo 5</b>	<b>Experimentación.</b>	53
	5.1 Introducción	53
	5.2 Descripción de la Planta Piloto	54
	5.3 Composición Química de los Materiales y Gas	55
	5.4 Procedimiento Experimental	57
	5.4.1 Medición de Espesores	57
	5.4.2 Preparación Metalográfica	58
	5.4.3 Ensayo de Microdureza	60
	5.5 Equipo Utilizado	61
<b>Capítulo 6</b>	<b>Resultados y Discusión.</b>	62 <sup>R</sup>
	6.1 Inspección Visual	62
	6.2 Espesores de Pared	64
	6.3 Metalografía	72
	6.4 Microdurezas	84
	6.5 Comparación Cuantitativa de los Aceros y Predicción de Desgaste	90
<b>Capítulo 7</b>	<b>Conclusiones.</b>	98
	<b>Referencias.</b>	99
	<b>Resumen Autobiográfico.</b>	101

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
2.1	Diagrama de fases carburo de hierro - hierro	4
3.1	Patrones de flujo en una línea de tubería horizontal	21
3.2	Situación de flujo de pistones	23
3.3	Diagrama de estado para transporte horizontal	24
4.1	Procesos típicos de desgaste	36
4.2	Representación esquemática de la generación de partículas de desgaste como resultado del proceso adhesivo	38
4.3	Representación esquemática de las diferencias entre (a) dos cuerpos, (b) tres cuerpos en el desgaste abrasivo	39
4.4	Los dos mecanismos de formación de surcos en los metales	40
4.5	Diagrama de las fuerzas que actúan sobre una partícula en contacto con una superficie sólida	42
4.6	Representación esquemática del desgaste por fatiga debido a la formación de grietas en la superficie y sub superficie	44
4.7	Modelo de desgaste corrosivo	46
4.8	Representación esquemática de la erosión por cavitación debido al impacto de burbujas de líquido	47
5.1	Esquema de la línea de tubería en el ensayo	54
5.2	Planta piloto de transporte neumático	55
5.3	Sistema de identificación para lecturas de espesores	58
5.4	Descripción de los instrumentos usados en el ataque del AISI 304	59
5.5	Descripción de los ensayos de microdureza	60

6.1	(a) Fotografía del tramo de tubo del acero al carbono, (b) Acero inoxidable (c) Acero tipo P-11	63
6.2	Diferencias de espesor de las cuatro secciones del acero 1005	70
6.3	Diferencias de espesor de las cuatro secciones del acero inox. 304	70
6.4	Diferencias de espesor de las cuatro secciones del acero tipo P-11	70
6.5	Microestructura del AISI 1005 a 200 x sin desgaste	73
6.6	Microestructura del AISI 1005 a 200 x desgastado	73
6.7	AISI 1005 zona inferior desgastada a 400x	74
6.8	AISI 1005 zona inferior desgastada a 400x	74
6.9	(a) Acero 1005 desgastado zona superior a 400x. (B) borde a 200x	75
6.10	Microestructura del inox. 304 sin desgastar, zona inferior a 200x	77
6.11	Microestructura del 304 desgastado, zona inferior deformada 200x	77
6.12	Inox. 304, zona inferior desgastada a 400x	78
6.13	Inox. 304, zona inferior desgastada a 400x	78
6.14	(a) Acero inoxidable 304, zona superior (norte) a 400x. (b) a 200x	79
6.15	Microestructura del P-11 sin desgastar, zona inferior a 200x	81
6.16	Microestructura del P-11 desgastado, zona inferior deformada a 200x	81
6.17	Acero tipo P-11 zona inferior desgastada a 400x	82
6.18	Acero tipo P-11 zona inferior desgastada a 400x	82
6.19	(a) Acero P-11 desgastado, zona superior a 200x. (b) borde interior	83
6.20	Gráfica de microdureza inicial del acero al carbono	85
6.21	Gráfica de microdureza final de la superficie deformada	85
6.22	Gráfica de microdureza inicial del acero inoxidable 304	87
6.23	Gráfica de microdureza final de la superficie deformada del 304	87
6.24	Gráfica de microdureza inicial del acero tipo P-11	89
6.25	Gráfica de microdureza final de la superficie deformada del P-11	89
6.26	Comparación cuantitativa de los tres aceros en la zona sur	91
6.27	(a) Comportamiento del acero al carbono con respecto a la pérdida de espesor en función del tiempo. (b) Acero inoxidable. (c) Acero tipo P-11	97



## LISTA DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
2.2.1	Principales tipos de aceros de aleación estándar	6
2.3.1	Propiedades mecánicas típicas y aplicaciones de los aceros de carbono ordinario	8
2.4.1	Distribución aproximada de los elementos aleantes en aceros de aleación	10
2.4.2	Efectos específicos de los elementos de aleación en el acero	12
2.5.1	Propiedades mecánicas típicas y aplicaciones de aceros inoxidable	15
3.2.1	Clasificaciones de fases del transporte neumático	21
3.3.1	Comparación de velocidades en sistemas de presión y de vacío con diferentes materiales	28
4.5.1	Propiedades de un material preferidas para el control de un proceso en particular de desgaste	51
5.3.1	Composición química (% en peso) de los aceros	55
5.3.2	Condiciones del experimento	56
5.3.3	Composición del gas (% en volumen)	56
5.3.4	Composición típica del hierro esponja	56
6.2.1	Datos iniciales de espesor de pared del A.C. Identificación a 90°	64
6.2.2	Espesores de pared finales del acero al carbono	64
6.2.3	Diferencias de espesores y porcentaje de pérdida del A.C.	65
6.2.4	Datos iniciales de espesor de pared del 304. Identificación a 90°	66
6.2.5	Espesores finales del acero inoxidable 304	66
6.2.6	Diferencias de espesores y porcentaje de pérdida del 304	67
6.2.7	Datos iniciales de espesor de pared del acero tipo P-11	68
6.2.8	Espesores finales del acero tipo P-11	68

6.2.9	Diferencias de espesores y porcentaje de pérdida del P-11	69
6.4.1	Valores promedios de microdureza Vickers en la zona no deformada del acero AISI 1005	84
6.4.2	Valores promedios de microdureza Vickers en la zona no deformada del acero inoxidable 304	86
6.4.3	Valores promedios de microdureza Vickers en la zona no deformada del acero A335 tipo P-11	88
6.5.1	Comparación cuantitativa de los tres tipos de aceros	90
6.5.2	Ecuaciones de predicción de desgaste de los tres aceros	92
6.5.3	Predicción de desgaste para los tres tipos de aceros	95



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## RESUMEN

El desgaste en sistemas de transporte neumático se presenta en el equipo y en las líneas de tubería, poniendo en riesgo tanto la seguridad del material transportado como la del personal de trabajo. Una de estas secciones, la cual es tubería horizontal, es sometida a condiciones de trabajo severas durante un período de tiempo en el transporte de fierro esponja (mineral de fierro reducido) en una planta piloto. El transporte de fase densa a bajas velocidades presentó un desgaste abrasivo en las  $\frac{3}{4}$  partes de la tubería, siendo en la zona inferior el mayor daño debido al efecto de la gravedad.

El siguiente trabajo describe el daño causado a tres segmentos de tubos de aceros (acero AISI 1005, inoxidable AISI 304 y ASTM A335, Grado P-11) utilizados en el proceso de transporte neumático de pélets de fierro esponja de fase densa a 300°C durante un período de 15 días; se estudió el mecanismo o mecanismos de desgaste presentes.

Se investigó la evolución de la microestructura de los aceros después de someterlos a desgaste, caracterizándolos utilizando microscopía óptica. Se determinó la pérdida de volumen que presentaba la sección de mayor desgaste. Además se realizaron pruebas de microdureza de las diferentes condiciones estudiadas, como resultado se obtuvo que la zona de mayor desgaste para los tres materiales fue la zona inferior. De microscopía óptica se observa una deformación plástica en la superficie interna.

Utilizando como modelo el desgaste erosivo, como primera aproximación, se predice el tiempo de vida media de los tubos para un espesor crítico de la tubería que es sometida a altas presiones, con relación a parámetros de transporte neumático.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Un sistema de transporte neumático involucra la transportación de sólidos en forma granular, polvos y trozos, en seco por medio de un gas. Algunas de las ventajas del uso del sistema neumático son la flexibilidad de la trayectoria, seguridad, fácil de automatizar y controlar. Las desventajas que se presentan en este tipo de sistemas son un alto consumo energético, desgaste y abrasión del equipo, la degradación de las partículas transportadas, distancias limitadas [1, 12, 20]. Algunas de estas limitaciones son mas bien económicas que técnicas.

Al utilizar el proceso de transporte neumático para los pélets de hierro esponja en fase densa a una determinada temperatura en un sistema integral de una planta de reducción directa, se ha encontrado que el mecanismo de desgaste que actúa en las líneas de tuberías horizontales es el abrasivo [2].

### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Cuando se transporta material abrasivo dentro de una atmósfera reductora se requiere un mayor cuidado sobre el fenómeno de desgaste involucrado. El desgaste que se lleva a cabo en las paredes de la tubería en estos sistemas depende de gran medida de la concentración y velocidad del material. El transporte de fase densa a bajas velocidades presenta un desgaste abrasivo en las  $\frac{3}{4}$  partes del tubo, siendo en la zona inferior el mayor daño debido al efecto de la gravedad [20]. Teniendo establecidas las propiedades intrínsecas de los materiales utilizados en las tuberías se puede encontrar la relación de estas con la resistencia al desgaste que se está llevando a cabo.



El objetivo de este trabajo es evaluar los rangos de desgaste en diferentes materiales que pueden ser utilizados en la fabricación de tubos para transporte neumático y determinar una predicción de desgaste de los materiales en base a condiciones establecidas del proceso de transporte. Como hipótesis se establece que los rangos de desgaste se pueden evaluar en función de los parámetros del sistema tribológico, tales como la dureza y microestructura del material y de los parámetros de operación.

Para realizar un estudio sistemático sobre las propiedades tribológicas de la tubería, se seleccionaron tres aceros: AISI 1005, Inoxidable AISI 304, ASTM A335 Grado P-11. Dentro de una línea horizontal de tubería, se insertaron tres segmentos de tubo, uno de cada material, de aproximadamente 30 cm de longitud. Esta línea es parte de una planta piloto a escala de 1/100 de un proceso de reducción directa. Estos segmentos de tubo estuvieron sometidos a condiciones reales de transporte neumático. Después del período de ensayo, se realizaron las determinaciones del volumen desgastado y se estudiaron las superficies a fin de encontrar los mecanismos de desgaste presentes. Las técnicas de estudio a emplear son: lecturas de espesores por ultrasonido, análisis microestructural por microscopía óptica y análisis de microdureza. Los valores de la razón de desgaste permitieron realizar una predicción de la vida útil de los tubos estudiados.

El régimen de transporte neumático es en fase densa donde el material se mueve a bajas velocidades, por lo que se tiene un control de la razón del flujo de sólidos en el sistema. Dentro de algunas limitaciones en este trabajo se tiene la de no tener un control en la masa inicial y final de los tramos de tubería por cuestiones de manipulación del proceso y no existe la facilidad de realizar pruebas continuas a diferentes temperaturas.

# CAPÍTULO 2

## ACEROS

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Los metales y sus aleaciones poseen muchas propiedades útiles en la ingeniería, lo que es útil para extensa gama de aplicaciones en diseños. El hierro y sus aleaciones (principalmente el acero) representan aproximadamente el noventa por ciento de la producción mundial de metales, fundamentalmente debido a la combinación de su buena resistencia, tenacidad y ductilidad con su relativo bajo costo [24]. Cada metal tiene propiedades especiales para proyectos de ingeniería y su utilización se adapta tras un análisis comparativo de costos con otros metales y materiales.

Las aleaciones basadas en el hierro, las llamadas aleaciones ferrosas, donde podemos hallar una diversidad de combinaciones del hierro con otros metales para formar aceros, aceros aleados, aceros especiales y fundiciones de hierro. De las más importantes o de interés industrial se manejan los aceros aleados que pueden definirse como aquellos cuyas propiedades características se deben a algún elemento diferente al carbono, aunque todos los aceros al carbono contienen moderadas cantidades de manganeso (hasta del 0.90%) y silicio (hasta del 0.30%) no se consideran aleados, debido a que la función principal de ellos es actuar como desoxidantes, se combinan con el oxígeno y con el azufre para reducir el efecto nocivo de dichos elementos.

El diagrama de fases Fe - Fe<sub>3</sub>C de la figura 2.1 contiene las siguientes fases sólidas: ferrita ( $\alpha$ ), austenita ( $\gamma$ ), cementita (Fe<sub>3</sub>C), y ferrita  $\delta$ .

Ferrita ( $\alpha$ ). Esta fase es una solución sólida de carbono en la red cristalina del hierro cubico centrado en el cuerpo (BCC). Como se indica en el diagrama, el carbono es muy poco soluble en ferrita ( $\alpha$ ), alcanzando la máxima solubilidad sólida, de un 0.02 % a 723°C. La solubilidad del carbono en ferrita ( $\alpha$ ) disminuye a un 0.005 % a 0°C.

Austenita ( $\gamma$ ). La solución sólida intersticial de carbono en hierro ( $\gamma$ ) se llama austenita. La austenita tiene estructura cristalina cubica centrada en las caras (FCC) y mucha mayor solubilidad para el carbono que la ferrita ( $\alpha$ ). La máxima solubilidad del carbono en austenita es del 2.08 % a 1148°C y disminuye a un 0.8 % a 723°C.

Cementita (Fe<sub>3</sub>C). El compuesto intermetálico Fe<sub>3</sub>C se llama cementita. Tiene límites despreciables de solubilidad y una composición del 6.67 % en carbono y 93.3 % en hierro. Es un compuesto duro y frágil.

Ferrita ( $\delta$ ). La solución sólida intersticial de carbono en hierro  $\delta$  se llama ferrita ( $\delta$ ). Tiene estructura cristalina (BCC) como la ferrita ( $\alpha$ ), pero con una constante de red mayor. La máxima solubilidad del carbono en ferrita  $\delta$  es de 0.09 por 100 a 1465°C.

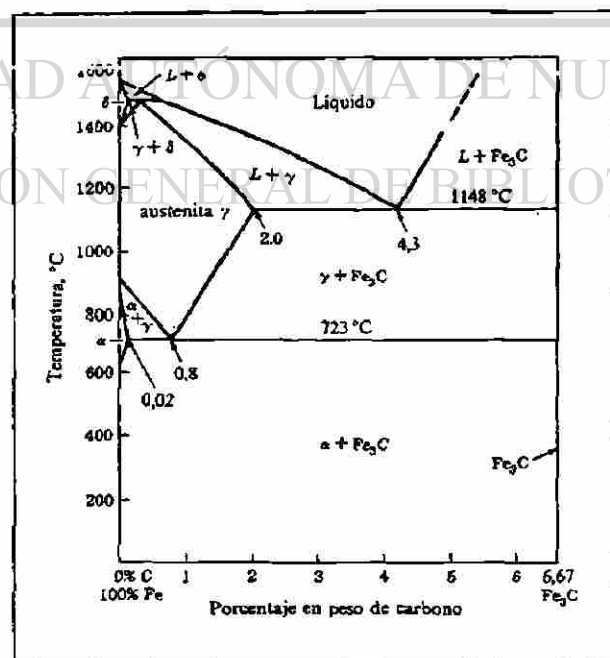


Figura 2.1 Diagrama de fases carburo de hierro - hierro[24].

Las aleaciones de hierro y carbono que tienen desde una pequeña cantidad (aproximadamente un 0.03 %) a un 1.2 % de carbono, y de un 0.25 a un 1 % de manganeso y menores cantidades de otros elementos (silicio, fósforo y azufre y otros) reciben el nombre de aceros ordinarios al carbono.

Un acero que contiene un 0.8 % de C se denomina acero eutectoide, puesto que se forma una estructura eutectoide de ferrita y  $Fe_3C$  cuando se enfría lentamente la austenita de esta composición por debajo de la temperatura eutectoide [23, 24]. Si un acero contiene menos de un 0.8 % C, recibe el nombre de acero hipoeutectoide, y si el acero contiene más de 0.8 % C, se designa como acero hipereutectoide. Variando la forma de calentamiento y enfriamiento de los aceros, se pueden obtener diferentes combinaciones de las propiedades mecánicas de los aceros.

## 2.2 CLASIFICACIÓN

Los aceros reciben su designación de acuerdo con un código AISI (American Iron and Steel Institute) - SAE (Society of Automotive Engineers) de cuatro cifras o dígitos. Los dos primeros dígitos indican el principal elemento o grupo de elementos de aleación, y los últimos dígitos indican las centésimas del % de carbono en el acero. Por ejemplo, el número 1030 del código AISI-SAE para un acero, indica que el acero es un acero ordinario *sin* aleantes y que contiene un 0.30 % de carbono nominal. Todos los aceros ordinarios al carbono contienen manganeso, como un elemento de aleación para aumentar la resistencia [6, 19]. El contenido de manganeso de la mayoría de los aceros de carbono ordinario varía entre el 0.30 a 0.90 %. La tabla 2.2.1 muestra los principales tipos de aceros de aleación estándar.

Tabla 2.2.1. Principales tipos de aceros de aleación estándar [24].

10xx	Aceros al carbono
13xx	Manganeso 1.75
40xx	Molibdeno 0.20 ó 0.25; o molibdeno 0.25 y azufre 0.042
41xx	Cromo 0.50, 0.80 ó 0.95, molibdeno 0.12, 0.20 ó 0.30
43xx	Níquel 1.83, cromo 0.50 ó 0.80, molibdeno 0.25
44xx	Molibdeno 0.53
46xx	Níquel 0.85 ó 1.83, molibdeno 0.20 ó 0.25
47xx	Níquel 1.05, cromo 0.45, molibdeno 0.20 ó 0.25
48xx	Níquel 3.50, molibdeno 0.25
50xx	Cromo 0.40
51xx	Cromo 0.80, 0.88, 0.93, 0.95 ó 1.00
51xxx	Cromo 1.03
52xxx	Cromo 1.45
61xx	Cromo 0.60 ó 0.95, vanadio 0.13 ó min 0.15
86xx	Níquel 0.55, cromo 0.50, molibdeno 0.20
87xx	Níquel 0.55, cromo 0.50, molibdeno 0.25
88xx	Níquel 0.55, cromo 0.50, molibdeno 0.35
92xx	Silicio 2.00 ó 1.40 y cromo 0.70
50Bxx	Cromo 0.28 ó 0.50, +Boro
51Bxx	Cromo 0.80, +Boro
81Bxx	Níquel 0.30, cromo 0.45, molibdeno 0.12, + Boro
94Bxx	Níquel 0.45, cromo 0.40, molibdeno 0.12, + Boro

### 2.3 ACEROS AL CARBONO

Generalmente los aceros al carbono pueden contener arriba del 2 % del total de elementos aleantes y puede ser subdivididos en aceros de bajo carbono, medio carbono, alto carbono, y ultra alto carbono:

**Aceros de bajo carbono.** La categoría más grande de esta clase de aceros es el producto plano (láminas o cintas) usualmente laminado en caliente o en condiciones de recocido. El contenido de carbono para estos aceros de alta formabilidad es muy bajo, menos de 0.10% C, con un máximo de 0.4% de Mn. Entre los usos típicos están en los paneles de automóviles, láminas delgadas, y productos de alambre.

**Aceros de medio carbono.** Son similares a los aceros de bajo carbono, excepto que los intervalos de carbono están entre 0.30 a 0.60 % y el manganeso de 0.60 a 1.65 %. Incrementando el contenido de carbono aproximadamente 0.5 % acompañándolo con un incremento de manganeso permite a los aceros de medio carbono a ser utilizados en el temple. Algunos usos de aceros de medio carbono incluyen flechas, cigüeñales, ejes, bridas de acoplamiento, engranes, y piezas forjadas.

Aceros de alto carbono: contienen de 0.60 a 1.00 % C con contenidos de manganeso de 0.30 a 0.90 %. Los aceros de alto carbono son utilizados para alambres de alta resistencia.

Aceros de ultra alto carbono: Son aleaciones experimentales conteniendo aproximadamente de 1.25 a 2.0 % C. Estos aceros son procesados termomecánicamente para producir microestructuras que consisten de granos ultra finos, equiaxiales de ferrita y una distribución uniforme de finas partículas pro - eutectoides de carburos esféricos, discontinuos [19]. Tales microestructuras en estos aceros tienen un comportamiento superplástico.

El uso en la industria del acero al carbono resulta satisfactorio para aquellas condiciones donde la resistencia y otras propiedades mecánicas no son muy severas, como la temperatura y atmósferas no altamente corrosivas. Dado a su templabilidad relativamente baja limita la resistencia que puede obtenerse, excepto en secciones regularmente delgadas. Otra desventaja que muestra el acero al carbono es la reducción en la dureza con el incremento en la temperatura de revenido debido a este comportamiento disminuirá su aplicabilidad para piezas que requieren dureza a temperaturas por arriba de la ambiente.

Para superar estas deficiencias de los aceros de carbono ordinario, se han desarrollado aceros de aleación que contienen elementos que mejoran sus propiedades.

En la tabla 2.3.1 se muestran las características mecánicas típicas de algunos tipos de aceros AISI-SAE. Los aceros ordinarios bajos en carbono tienen relativamente baja resistencia y alta ductilidad. Estos aceros se utilizan para fabricar láminas destinadas a aplicaciones de conformado, tales como guardabarros y paneles de cuerpo para automóviles.



A medida que el contenido en carbono de los aceros de carbono ordinario aumenta, los aceros se hacen más resistentes pero menos dúctiles. Los aceros con contenido medio en carbono (1020 - 1040) se emplean para engranajes y ejes. Los aceros altos en carbono (1060 - 1095) se utilizan, por ejemplo, para ballestas, portamatrices, cuchillas y hojas de tijeras.

Tabla 2.3.1 Propiedades mecánicas típicas y aplicaciones de los aceros de carbono ordinario [24].

Número AISI - SAE de aleación	Composición química, % en peso		Tratamiento	Resistencia a la tensión		Esfuerzo de fluencia		Elongación (%)	Aplicaciones típicas
	C	Mn		Ksi	Mpa	Ksi	Mpa		
1010	0.10	0.40	Laminado en caliente.	40 -60	276-414	26 - 45	179-310	28 - 47 30 - 45	Planchas y flejes para trefilado, cables, clavos, tornillos, bielas, barras para reforzamiento de hormigón.
			Laminado en frío	42 -58	290-400	23 - 38	159-262		
1020	0.20	0.45	Recién laminado	65	448	48	331	36 36	Ejes, engranajes, chapas de acero y secciones estructurales.
			Recocido	57	393	43	297		
1040	0.40	0.45	Recién laminado	90	621	60	414	25 30 20	Ejes, clavos, tuberías de gran resistencia a la tracción, engranajes.
			Recocido	75	517	51	352		
			Revenido	116	800	86	593		
1060	0.60	0.65	Recién laminado	118	814	70	483	17 22 13	Alambres para resortes, troqueles de forja, ruedas de ferrocarril.
			Recocido	91	628	54	483		
			Revenido	160	110	113	780		
1080	0.80	0.80	Recién laminado	140	967	85	586	12 25 12	Alambres de música, resortes helicoidales, troqueles de forja, cinceles.
			Recocido	89	614	54	373		
			Revenido	189	1304	142	980		
1095	0.80	0.95	Recién laminado	40	966	83	573	9 13 10	Troqueles, cuchillas, cizallas, hojas de tijeras, cables de alta resistencia a la tracción.
			Recocido	95	655	55	379		
			Revenido	183	1263	118	814		

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 2.4 ACEROS ALEADOS

Los aceros de aleación generalmente cuestan más que los aceros ordinarios, pero para muchas aplicaciones son los únicos materiales que pueden ser utilizados con garantía frente a los requerimientos de ingeniería.

### 2.4.1 Elementos de aleación

El propósito de los elementos de aleación es la de mejorar una o varias propiedades del acero. En seguida se enlistan algunos de los más importantes propósitos o objetivos por los cuales se añaden a los aceros los elementos aleantes [23].

- Aumentar la templabilidad.
- Mejorar la resistencia a temperaturas comunes.
- Mejorar las propiedades mecánicas tanto a altas como a bajas temperaturas.
- Mejorar la tenacidad a cualquier dureza o resistencia mínima.
- Aumentar la resistencia al desgaste.
- Aumentar la resistencia a la corrosión y
- Mejorar las propiedades magnéticas.

Los elementos de la aleación pueden clasificarse de acuerdo con la forma en que se distribuyen en los dos constituyentes principales de un acero recocido. Los denominados Grupo 1.- Elementos que se disuelven en la ferrita y Grupo 2.- Elementos que se combinan con carbono para formar carburos simples o complejos. Con referencia al grupo 1 tenemos el efecto causado por los elementos que se encuentran ampliamente disueltos en ferrita como el níquel, aluminio, silicio, cobre y cobalto. Cualquier elemento disuelto en ferrita aumenta su dureza y su resistencia de acuerdo con los principios generales del endurecimiento por solución sólida [23].

En el grupo 2 encontramos que la presencia de elementos que forman carburos influyen en la temperatura de endurecimiento y el tiempo necesarios para obtener un calentamiento total y uniforme; los carburos encontrados en los aceros son duros y frágiles, su efecto en las propiedades tensiles a temperatura ambiente es análoga, sin importar la composición específica [23].

Los carburos son lentos de disolver y pueden no disolverse en austenita. Esto hace que disminuyan los contenidos de carbono y aleación en la austenita a una cantidad por debajo de la cual tiene el acero en general. Los carburos no disueltos también actúan para reducir el crecimiento de grano. Ambos efectos tienden a reducir la templabilidad. Cuando están disueltos en austenita, los elementos formadores de carburo favorecen grandemente el endurecimiento profundo [23].

Aunque todos los carburos encontrados en los aceros son compuestos duros y frágiles, los carburos de cromo y vanadio resultan excepcionales en dureza y resistencia al desgaste. La dureza y la resistencia al desgaste de los aceros aleados ricos en carburos las determinan en gran medida la cantidad, el tamaño y la distribución de estas partículas duras. A su vez, estos factores son controlados por la composición química, el método de manufactura y el tratamiento térmico. En la tabla 2.4.1 se da la distribución aproximada de los elementos aleantes en aceros de aleación.

Tabla 2.4.1. Distribución aproximada de los elementos aleantes en aceros de aleación [24].

Elemento	Disuelto en ferrita	Combinado en carburo	Combinado como carburo	Compuesto	Estado elemental
Níquel	Ni			Ni <sub>3</sub> Al	
Silicio	Si			SiO <sub>2</sub> · M <sub>x</sub> O <sub>y</sub>	
Manganeso	Mn	Mn	(Fe, Mn) <sub>3</sub> C	MnS; MnO · SiO <sub>2</sub>	
Cromo	Cr	Cr	(Fe, Cr) <sub>3</sub> C Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>		
Molibdeno	Mo	Mo	Mo <sub>2</sub> C		
Tungsteno	W	W	W <sub>2</sub> C		
Vanadio	V	V	V <sub>4</sub> C <sub>3</sub>		
Titanio	Ti	Ti	TiC		
Niobio	Nb	Nb	NbC		
Aluminio	Al			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; AlN	
Cobre	Cu (pequeña cantidad)				
Plomo					Pb

### 2.4.2 Efecto de los elementos de aleación en el proceso de temple

Todos los elementos de aleación en los aceros desplazan los diagramas tiempo - temperatura - transformación (TTT) y en transformación de enfriamiento continuo (TEC) a periodos o tiempos más largos, lo que permite obtener totalmente martensita aún en secciones gruesas con bajas velocidades de enfriamiento.

La templabilidad, o capacidad para el temple, de un acero, se refiere a la facilidad con que se forma la martensita. Los aceros aleados tienen una alta templabilidad aún en el enfriamiento al aire produce martensita [6].

### 2.4.3 Efecto de los elementos de aleación en el proceso de revenido

Conforme se incrementa la temperatura de revenido, la dureza decrece continuamente. El efecto general de los elementos de la aleación es retardar la rapidez de suavizamiento, de manera que los aceros aleados requerirán una temperatura mayor de revenido para obtener una dureza dada [23]. Los elementos que permanecen disueltos en ferrita, como el níquel, el silicio, y en alguna extensión el manganeso, tienen muy poco efecto sobre la dureza del acero revenido.

Sin embargo, los elementos que forman carburos, como el cromo, el tungsteno, el molibdeno y el vanadio, tienen un efecto notable sobre el retardo del suavizamiento. No sólo aumentan la temperatura de revenido, sino que cuando están presentes en altos porcentajes, las curvas de suavizamiento para estos aceros mostrarán un intervalo en el cual la dureza puede aumentar al incrementarse la temperatura de revenido. Este comportamiento, característico de los aceros aleados que contienen elementos de formación del carburo, se conoce como endurecimiento secundario y se cree que se debe a la precipitación retardada de los finos carburos aleados [23, 24]. En la tabla 2.4.2 se describen los efectos de los elementos causados en el acero.

Tabla 2.4.2. Efectos específicos de los elementos de aleación en el acero [23].

ELEMENTO	SOLUBILIDAD SÓLIDA		INFLUENCIA EN LA FERRITA	INFLUENCIA EN LA AUSTENITA (PROF/DIST. DE DUREZA)	INFLUENCIA EJERCIDA POR MEDIO DEL CARBURO		FUNCIONES PRINCIPALES
	EN HIERRO GAMMA	EN HIERRO ALFA			TENDENCIA A FORMAR CARBURO	ACCIÓN DURANTE EL REVENIDO	
Aluminio	1.1% (aumentado por C)	36%	La endurece considerablemente por solución sólida	Si se disuelve en austenita, aumenta ligeramente la templabilidad	Negativa (grafítica)	...	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desoxida eficazmente</li> <li>2. Restringe el crecimiento de grano (por formación de óxidos o nitruros dispersos)</li> <li>3. Elemento de aleación en la nitruración del acero</li> </ol>
Cromo	12.8% (20% con 0.5% C)	Ilimitada	La endurece ligeramente; aumenta la resistencia a la corrosión	Aumenta la templabilidad moderadamente	Mayor que Mn; menor que W	Contrarresta ligeramente al suavizamiento	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aumenta la resistencia a la corrosión y a la oxidación</li> <li>2. Aumenta la templabilidad</li> <li>3. Añade alguna resistencia a altas temperaturas</li> <li>4. Resiste la abrasión y al desgaste (con alto contenido de carbono)</li> </ol>
Cobalto	Ilimitada	75%	La endurece considerablemente por solución sólida	Cuando está disuelto disminuye la templabilidad	Similar al Fe	Mantiene la dureza por efecto de la solución sólida	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Contribuye a conservar la dureza al rojo, endureciendo la ferrita</li> </ol>
Manganeso	Ilimitada	3%	La endurece marcadamente; reduce la plasticidad	Aumenta moderadamente la templabilidad	Mayor que Fe, menor que Cr	Muy poca, en porcentajes usuales	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Contrarresta la fragilidad debida al azufre</li> <li>2. Aumenta a bajo costo la templabilidad</li> </ol>
Molibdeno	3% ± (8% con 0.3% C)	37.5% (menor con temperatura disminuida)	Proporciona un sistema de endurecimiento por envejecido en los aceros aleados con alto Mo-Fe	Aumenta fuertemente la templabilidad (Mo > Cr)	Fuerte; mayor que Cr	Se opone al suavizamiento, por endurecimiento secundario	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eleva la temperatura del inicio de crecimiento del grano de la austenita</li> <li>2. Profundiza el endurecimiento</li> <li>3. Contrarresta la tendencia a la fragilidad por revenido</li> <li>4. Aumenta las resistencias a alta temperatura, a la fluencia y a la dureza al rojo</li> <li>5. Mejora la resistencia a la corrosión en aceros inoxidables</li> <li>6. Forma partículas resistentes a la abrasión</li> </ol>
Níquel	Ilimitada	10% (independiente del contenido de carbono)	La hace resistente y tenaz por solución sólida	Aumenta ligeramente la templabilidad pero tiende a retener austenita con alto contenido de carbono	Negativa (grafítica)	Muy poca, en pequeños porcentajes	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hace resistentes los aceros no templados o recocidos</li> <li>2. Hace tenaces los aceros perlítico-ferríticos (especialmente a baja temperatura)</li> <li>3. Austeniza las aleaciones de hierro al alto cromo</li> </ol>
Fósforo	0.5%	2.8% (independiente del contenido de carbono)	La endurece fuertemente por solución sólida	Aumenta la templabilidad	Despreciable	...	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aumenta la resistencia del acero al bajo carbono</li> <li>2. Aumenta la resistencia a la corrosión</li> <li>3. Mejora la maquinabilidad en los aceros de cortado libre (aceros rápidos)</li> </ol>
Silicio	2% ± (9% con 0.35% C)	18.5% (no cambió mucho con el contenido de carbono)	La endurece con pérdida en plasticidad (Mn < Si < P)	Aumenta moderadamente la templabilidad	Negativa (grafítica)	Sostiene la dureza por solución sólida	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se emplea como desoxidador de propósito general</li> <li>2. Elemento de aleación para lámparas eléctricas y magnéticas</li> <li>3. Mejora la resistencia a la corrosión</li> <li>4. Aumenta la templabilidad de los aceros que no tienen elementos grafítizadores</li> <li>5. Hace resistentes los aceros de baja aleación</li> </ol>
Titanio	0.75% 1% ± con 0.20% C)	6% ± (menos con temperatura disminuida)	Proporciona un sistema de endurecimiento por envejecido en aleaciones con alto contenido de Ti-Fe	Probablemente aumenta muy fuerte la templabilidad al estar disuelto. Los efectos del carburo reducen la templabilidad	La mayor que se conoce (2% de Ti hace que el acero con 0.50% de carbono no se pueda endurecer)	Los carburos persistentes probablemente no se afectan. Algún endurecimiento secundario	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fija el carbono en partículas inertes <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Reduce la dureza martensítica y la templabilidad en aceros al cromo medio</li> <li>b) Previene la formación de austenita en aceros al alto cromo</li> <li>c) Previene el agotamiento localizado de cromo en aceros inoxidables durante un largo calentamiento</li> </ol> </li> </ol>
Tungsteno	6% (11% con 0.25% C)	33% (menos con temperatura disminuida)	Proporciona un sistema de endurecimiento por envejecido en aleaciones con alto W-Fe	Aumenta fuertemente la templabilidad en pequeñas cantidades	Fuerte	Se opone al suavizamiento por endurecimiento secundario	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Forma partículas duras y resistentes a la abrasión en aceros para herramientas</li> <li>2. Promueve la dureza y la resistencia a altas temperaturas</li> </ol>
Vanadio	1% (4% con 0.20% C)	Ilimitada	La endurece moderadamente por solución sólida	Aumenta fuertemente la templabilidad cuando está disuelto	Muy fuerte (V < Ti o Cb)	Máxima por endurecimiento secundario	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eleva la temperatura de inicio de crecimiento del grano de la austenita (promueve el grano fino)</li> <li>2. Aumenta la templabilidad (cuando está disuelto)</li> <li>3. Resiste el revenido y produce un marcado endurecido secundario</li> </ol>

## 2.5 ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidable son seleccionados como materiales de ingeniería por su excelente resistencia a la corrosión en muchos medios. La resistencia a la corrosión del acero inoxidable se debe a su alto contenido de cromo, debe contener un mínimo de 12 % de Cr. El cromo forma una película delgada, adherente, estable de óxido de cromo que protege efectivamente al acero contra muchos medios corrosivos [23, 24]. La presencia del níquel eleva la resiliencia del acero, formando la estructura de austenita.

En general, hay cuatro tipos básicos o principales de aceros inoxidables: ferríticos, martensíticos, austeníticos y endurecidos por precipitación.

**Aceros Ferríticos:** Son los que contienen como componente principal al cromo, en proporciones del 14 al 30%. El contenido de carbono es bajo, del orden de 0.05 a 0.25% y por ello, estos aceros no admiten prácticamente el temple. El elemento fundamental es la ferrita (BCC, hierro del tipo  $\alpha$ ). Debido a su estructura, los aceros inoxidables ferríticos tienen buena resistencia mecánica y moderada ductilidad derivada del endurecimiento por solución sólida y el endurecimiento por deformación. Cuando los contenidos de carbono o de cromo son ambos altos, la precipitación de partículas de carbono proporcionan un endurecimiento por dispersión, pero también fragiliza la aleación [6]. Los aceros inoxidables ferríticos tienen excelente resistencia a la corrosión, una moderada conformabilidad y son relativamente baratos.

**Aceros Martensíticos:** Contienen al cromo como componente principal, en proporciones que oscilan entre el 12 y el 18% con suficiente carbono (0.15 a 1.00 %). Cuando son templados adquieren estructura martensítica -dura- y, según sea este contenido de carbono, se obtiene la dureza de forma graduada. Debido a que pueden templar al aire, los aceros martensíticos no se prestan bien a la soldadura, ya que los puntos soldados quedan duros y quebradizos, produciéndose fuertes tensiones en el material.

En este grupo de aceros la resistencia a la corrosión es mayor cuando están templados y pulidos. Algunas aplicaciones de estos aceros son : cuchillos de alta calidad, bolas para rodamientos y válvulas.

**Aceros Austeníticos:** Los aceros inoxidable austeníticos tienen como principales componentes al cromo (12 - 25 %) y al níquel (8 - 25 %). Se caracteriza por su buena resistencia a la tracción, de unos 580 MPa, así como por su buena tenacidad y ductilidad. El límite de fluencia del acero austenítico, sin embargo, es bajo relativamente, de unos 290 MPa, el material no es magnético [16]. Son muy resistentes al impacto y difíciles de maquinarse, a menos que contengan azufre y selenio.

Los aceros inoxidable austeníticos FCC tienen excelente ductilidad, conformabilidad y resistencia a la corrosión. La resistencia se obtiene por un endurecimiento extenso por solución sólida [6], y los aceros inoxidable austeníticos pueden ser trabajados en frío para obtener resistencias mayores que las de los aceros inoxidable ferríticos. Los aceros austeníticos pueden soldarse fácilmente, obteniéndose soldaduras tenaces y seguras, estos aceros no son ferromagnéticos como los ferríticos y martensíticos [16]. Desafortunadamente, los altos contenidos de níquel y de cromo hacen costosas a estas aleaciones.

**Aceros inoxidable endurecibles por precipitación:** Estos aceros generalmente se tratan con un recocido en aceria y surgen en esa condición. Después de formados, se envejecen para alcanzar el valor en dureza y resistencia deseados. En general, tienen menor contenido de níquel reduciendo de esta manera la estabilidad de la austenita. Estos aceros pueden tener también elementos como cobre y aluminio, que tienden a formar precipitados aleados coherentes.

En la tabla 2.5.1. se presentan algunas propiedades mecánicas y aplicaciones de los aceros inoxidable.



Tabla 2.5.1. Propiedades mecánicas típicas y aplicaciones de aceros inoxidables [24].

Número AISI - SAE de aleación	Composición química, % en peso	Tratamiento	Resistencia a la tensión		Esfuerzo de fluencia		Elongación 2 en 2 %	Aplicaciones típicas
			Ksi	Mpa	Ksi	Mpa		
Aceros inoxidables ferríticos								
430	17 Cr, 0.012 C	Recocido	75	517	50	345	25	Aplicaciones generales, no endurecible; usos: vehículos, equipamiento de restaurantes.
446	25 Cr, 0.20 C	Recocido	80	552	50	345	20	Aplicaciones a alta temperatura, calentadores
Aceros inoxidables martensíticos								
410	12.5 Cr, 0.15 C	Recocido Q & T†	75	517	40	276	30	Termotratables de uso general; piezas de máquinas, válvulas
440A	17 Cr, 0.70 C	Recocido Q & T†	105 265	724 1828	60 245	414 1690	20 5	Cuchillería, cojinetes, herramientas quirúrgicas
440C	17 Cr, 1.1 C	Recocido Q & T†	110 285	759 1966	70 275	276 1897	13 2	Balas, cojinetes, anillos - guía, piezas de válvulas
Aceros inoxidables austeníticos								
301	17 Cr, 7 Ni	Recocido	110	759	40	276	60	Aleación de alto grado de endurecimiento por acritud
304	19 Cr, 10 Ni	Recocido	84	580	42	290	55	Equipamiento químico y de procesamiento de alimentos
304L	19 Cr, 10 Ni, 0.03 C	Recocido	81	559	39	269	55	Bajo carbono para soldadura, depósitos químicos
321	18 Cr, 10 Ni, Ti = 5 x %C min	Recocido	90	621	35	241	45	Aceros estabilizados para soldaduras; equipos de fabricación de vasijas de presión
347	18 Cr, 10 Ni, Cb (Nb)=10 x C min.	Recocido	95	655	40	276	45	Aceros estabilizados para soldadura, vagones cisterna para productos químicos
Aceros inoxidables endurecidos por precipitación								
17 - 4PH	16 Cr, 4 Ni, 4 Cu 0.03 Cb (Nb)	Endurecidos por precipitación	190	1311	176	1207	14	Engranajes, levas, ejes, piezas de turbinas y aeronaves

## 2.6 ACEROS RESISTENTES AL CALOR PARA TUBERÍA

Los aceros resistentes al calor cromo - molibdeno contienen 0.5 a 9 % Cr y 0.5 a 1.0 % Mo. El contenido de carbono es usualmente de 0.20 %. El cromo provee mejora a la oxidación y resistencia a la corrosión y el molibdeno aumenta la resistencia a elevadas temperaturas. Estos aceros son generalmente suministrados en condición de normalizado, templado o de recocido [19, 23]. Los aceros al cromo - molibdeno son ampliamente utilizados en las industrias de combustible, gas y en plantas de energía nuclear.

La resistencia al desgaste de los aceros al cromo - molibdeno es derivada principalmente de dos fuentes: al reforzamiento de la matriz ferrita por solución sólida del carbono, molibdeno, y cromo y la precipitación endurecedor por carburos. Generalmente la resistencia al desgaste, pero no siempre, se incrementa con altos contenidos de molibdeno y cromo.

El acero 1.0 Cr - 0.5 Mo (ASTM A335, Grado P-7) es utilizado para tubería, tubo de alambique desintegrador y tubos para boiler para un servicio de temperaturas de 510 a 540 °C. Para temperaturas de hasta 590 °C, un acero 1.25 Cr - 0.5 Mo (ASTM A335, Grado P-11) puede ser utilizado [19].

Estas aleaciones son del tipo al molibdeno que es un elemento de aleación relativamente costoso, tiene una solubilidad limitada en hierros  $\alpha$  y  $\gamma$  y es un fuerte formador de carburo. Además, ejerce un fuerte efecto sobre la templabilidad y, de manera semejante al cromo aumenta la dureza y resistencia a alta temperatura de los aceros. Los aceros con molibdeno son menos susceptibles al fragilizado, debido al revenido, que los demás aceros aleados. Este elemento se utiliza más a menudo en combinación con níquel o cromo o en ambos [23]. Para aplicaciones de carburización, mejora la resistencia al desgaste de la superficie endurecida y la tenacidad de la porción interna.

## CAPÍTULO 3

# TRANSPORTE NEUMÁTICO

### 3.1 FUNDAMENTOS

El transporte neumático como medio de transporte de sólidos (polvos, sólidos granulares, peletizados, etc.) en un medio seco por un flujo de gas, regularmente aire, se ha empleado desde hace tiempo, como en el año de 1887 en una línea de productos agrícolas [20]. Desde ese tiempo, este proceso ha sido desarrollado y encontrado una amplia aplicación en la industria.

El rango de materiales adecuados para el transporte neumático es grande.

Generalmente todos los polvos y materiales granulares pueden ser transportados. Los materiales grandes y densos requieren una alta velocidad del gas para operación y un alto consumo de potencia. Una regla en el transporte es que el diámetro interior del tubo deberá ser por lo menos tres veces más grande que el tamaño extenso del material a ser transportado para prevenir que se bloquee la tubería. Los materiales ideales para transportar son de un flujo libre, no abrasivos y no fibrosos. Sin embargo, con el desarrollo de nuevas operaciones de transporte se pueden manejar materiales cohesivos, abrasivos y fibrosos a bajas velocidades del gas.

En el transporte neumático las partículas son movidas por el transporte del flujo de gas, ambos el fluido y las partículas están en movimiento, cuando las dos velocidades se aproximan una a la otra, el sistema se vuelve hacia a una situación de flujo de fase simple.

## VENTAJAS Y DESVENTAJAS MECÁNICAS, ECONÓMICAS Y DE SERVICIO

### Ventajas :

En varios sistemas mecánicos de transportación, cuando los cambios de dirección son necesarios, se requieren de varios puntos de transferencia. En estos medios que requiere de una serie de implementos, que incrementa a su costo y problemas de control. Con una línea de tubería como la estructura del transporte neumático, codos de radios cortos son utilizados para cambiar de dirección, evitando interferencias, y requiriendo un mínimo de estructuras de soporte. Las líneas de las tuberías incrementan grandemente la limpieza. Las uniones de los tubos son herméticas, ya sea por soldadura o por acoplamiento por compresión.

Otras de las ventajas de un sistema de transporte neumático son las siguientes:

- Libre transportación de polvos de una amplia variedad de productos.
- Flexibilidad en trayectoria, puede ser transportados verticalmente y horizontalmente por la adición de codos en la línea de tubería.
- Distribución y mejora de diferentes áreas en la planta.
- Bajos costos de mantenimiento y mano de obra disponible.
- Múltiples usos, las líneas de tubería pueden ser utilizadas para una variedad de productos.
- Fácil automatización y control.

### Desventajas :

Las ventajas en el transporte neumático son más que las desventajas, las cuales tienden a desaparecer considerablemente con el transcurso de los años. En muchos casos el capital inicial es más alto que para otros sistemas de transporte. Esto, sin embargo, puede ser compensado por la calidad y posible reducción de daño en los productos [12, 20].

Otras desventajas de un sistema de transporte neumático son las siguientes:

- Alto consumo de energía.
- Desgaste y abrasión del equipo y tubería.
- Un diseño incorrecto puede dar como resultado la degradación de las partículas transportadas.
- Distancias limitadas.
- Dada la virtud del flujo tan complejo que toma lugar, este requiere altos niveles de técnica para diseños, operación y mantenimiento del sistema.

Limitaciones :

El principal factor limitante en el uso del transporte neumático es usualmente el material a ser transportado. Los materiales a ser transportados, previos a recientes avances en el desarrollo de tanques de sopro, son clasificados como secos y relativamente de libre flujo. Desde estos desarrollos, materiales lentos, abrasivos, y húmedos son transportados con facilidad.

Los materiales fibrosos no deberán ser transportados neumáticamente, excepto posiblemente a bajas velocidades, del tipo de fase densa del sistema de presión (tanque soplador). La excepción ocurre cuando una parcial degradación del material empieza al ser transportado, por lo cual, no es consecuente el uso del transporte neumático.

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS CONSTITUYENTES DE UN TRANSPORTE NEUMÁTICO

Los componentes principales de un sistema de transporte neumático considerados en cuatro zonas se describen a continuación :

### I. Zona de Primer Movimiento

Esta zona es de gran importancia en el sistema. Sus constituyentes son: compresores, ventiladores, abanicos, y bombas de vacío que son necesarios para suministrar la energía para el transporte del gas. Es necesario identificar la razón del flujo del gas y la presión (positiva o negativa) para una transportación fiable.

## II. Zona de Alimentación, Mezcla y Aceleramiento

Es considerada como una de las más cruciales, en esta zona en particular los sólidos son introducidos dentro de la corriente del gas. Un cambio en el momentum ocurre cuando los sólidos son mezclados con el flujo del gas, asociado con este cambio existe la necesidad de tener una zona de aceleración, la cual consiste de una pieza de tubería horizontal de una cierta longitud en la cual los sólidos son acelerados para llegar a un estado de flujo estacionario.

## III. Zona de Transporte

Después de pasar la zona de aceleración, los sólidos entran dentro de la zona de transporte, que consiste de tuberías. La selección de las líneas de tuberías se basa en un numero de factores que incluyen productos no abrasivos, requerimientos de presión, temperatura, etc. Esta zona también consta de un gran numero de codos y diversidad de válvulas para cambiar la dirección del flujo.

---

## IV. Zona de Separación Gas - Sólido

En esta zona los sólidos son separados de la corriente del gas en la cual ellos son transportados. Con un sistema de presión que son únicamente necesarios para mantener una disminución en la presión a través del colector la cual deberá ser suficiente para separar los sólidos del gas. La selección de un adecuado sistema de separación sólido - gas depende de un numero de factores, el principal es el tamaño de los sólidos requeridos para ser separados de la corriente del gas [20].

### 3.2 CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL TRANSPORTADO

El transporte neumático de sólidos puede ser separado en dos principales áreas. Cuando nos referimos a la razón de masas ( $\mu$ ), estas son llamadas:

- fase diluida.
- fase densa:           régimen de flujo inestable  
                                  régimen de flujo inestable / estable  
                                  régimen de flujo estable

La razón de masas ( $\mu$ ), es definida como la razón de flujo de masas de los sólidos transportados ( $G$ ) entre la masa del aire de transporte ( $Q$ ). Esta razón nos define dos tipos de fase como se describe en la tabla 3.2.1.

Tabla 3.2.1. Clasificaciones de fases del transporte neumático [20].

Sistemas	Razón de flujo de masas
fase diluida	0 - 15
fase densa	más de 15

El siguiente esquema muestra los patrones típicos que toman lugar en las diferentes fases :

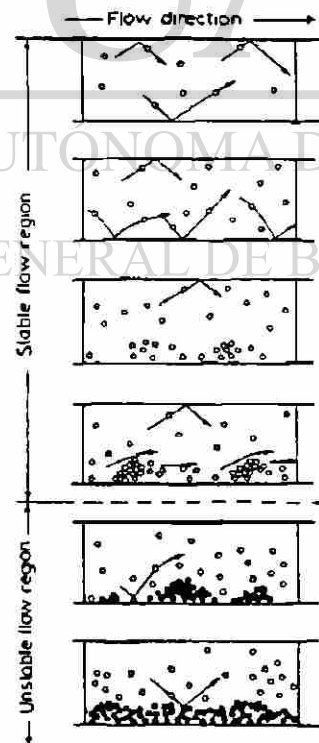


Figura 3.1 Patrones de flujo en una línea de tubería horizontal [20].



### **Fase Diluida**

La fase diluida del sistema involucra en general grandes volúmenes de gas a altas velocidades. El chorro de gas maneja a los materiales como partículas discretas por medio de fuerzas de arrastre y de elevación actuando individualmente sobre las partículas [8, 9]. El flujo es cuasi - estacionario y la presión de caída por unidad de longitud es baja. Los sistemas de fase diluida son de los más utilizados en el transporte neumático.

### **Fase Densa**

La fase densa es caracterizada por las bajas velocidades y altas razones de carga en masa, en relación con las altas presiones de caída. La reducción de la velocidad de gas a valores más bajos que la velocidad de saltación (en un flujo horizontal) da como resultado una distribución no uniforme de sólidos sobre la sección transversal de la línea de tubería.

El proceso de transporte toma lugar cuando una cierta porción de sólidos sigue a través de la zona superior de la sección transversal del tubo junto con una alta concentración de flujo, que corresponde a un movimiento de expansión de la capa superior. Este movimiento de la capa se desarrolla a bajas velocidades en la parte inferior de la sección transversal. Dependiendo de las características de los sólidos, la velocidad del gas, de la razón del flujo de sólidos y de otros factores como la rugosidad de los tubos, tamaño del tubo, etc., los patrones de flujo en la fase densa empiezan a variar de un régimen inestable a estable o a un régimen intermedio, inestable - estable.

Los patrones de flujo en la fase densa pueden variar de condiciones en las cuales los sólidos están completamente compactados en el tubo y moverse como un continuo pistón denso o situaciones donde los sólidos sobre el fondo del tubo se desplazan en forma de una serie de dunas seguida de una capa de fase diluida de sólidos en lo alto de las dunas. La situación de flujo estable resulta de un proceso de transporte suave (fluido) donde la situación inestable es caracterizada cuando algunas veces surge una presión violenta en el rompimiento del movimiento de capas [12, 20].

Las características de los sólidos a ser transportados son más importantes en el movimiento de una fase densa que en una fase diluida. Para un gran número de pruebas en fase densa el movimiento tiene que ser horizontal. Cuando se considera el transporte vertical, la materia completa choca y se produce la formación de tapones. El tamaño de la partícula y del tubo es crítico en el análisis del fenómeno de impacto en este tipo de transporte.

Los sistemas de transporte neumático de baja velocidad son más populares por reducir el desgaste de la tubería y degradación de los materiales transportados. En muchas situaciones en el flujo horizontal de pistones la concentración de sólidos y el flujo como partes integrales son separadas por bloques (intervalos) de aire. Esta situación también toma lugar en el flujo vertical. Diseños específicos utilizan este concepto y han introducido un flujo de aire secundario para asegurar que los espaciamientos de pistones sean iguales. Este procedimiento resulta efectivo en el transporte de materiales cohesivos o bien se provee un flujo conveniente para otros sólidos menos cohesivos. Las velocidades asociadas con tales flujos son generalmente bajas cuando se comparan con las altas velocidades de la fase diluida de sistemas de transporte.

El total de pérdida de presión para un sistema de flujo de pistones separados por bloques de aire puede ser determinada por la pérdida debida a un pistón y un bloque de aire y multiplicando este número por el número de unidades presentes en la línea de tubería. La figura 3.2 considera la situación de flujo de pistones.

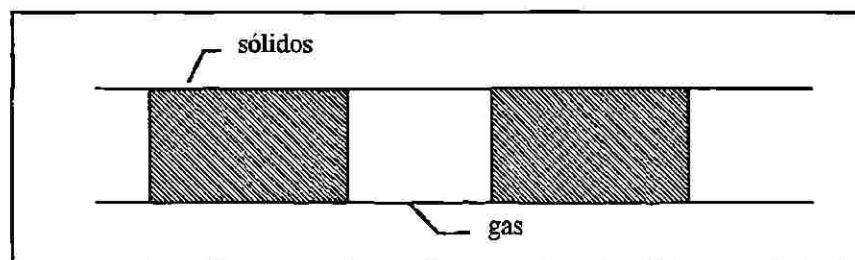


Figura 3.2 Situación de flujo de pistones.

### 3.3 DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

Una descripción general de los procesos de transportación que toman lugar en el sistema de transporte neumático se da a continuación.

#### 3.3.1. Diagrama de estado

La transición de una fase diluida a una fase densa se describe por la curva de presión mínima. Esta curva conecta todos los mínimos de cada razón de flujo de masas en el diagrama de estado. Esta curva de mínima presión depende principalmente del tamaño y la forma de las partículas y del material del tubo [18, 20].

El diagrama de estado (figura 3.3) se basa en un sistema de flujo horizontal y es un esquema del gradiente de presión ( $\Delta p/L$ ) en un punto cualquiera en la línea de tubería contra la velocidad del gas superficial ( $v$ ). En el diagrama se muestran varias secciones transversales en las líneas de tuberías para un punto en particular.

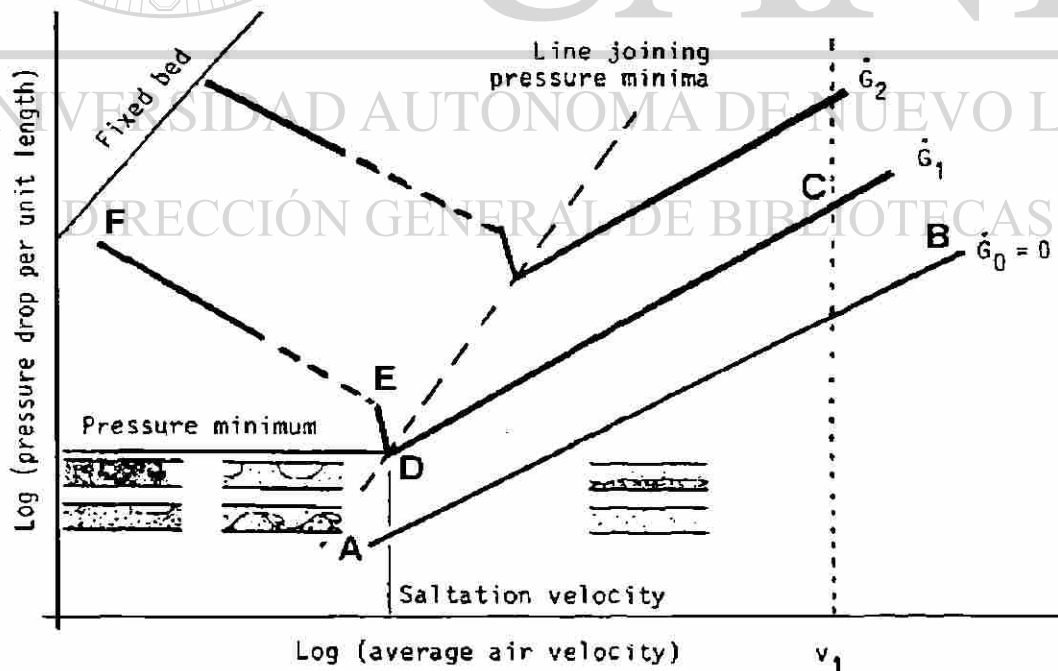


Figura 3.3. Diagrama de estado para transporte horizontal [20].

La línea AB representa la pérdida por fricción para una línea de tubo horizontal para gas únicamente. A una velocidad de aire ( $v_1$ ), partículas de sólidos de tamaño homogéneo son introducidas dentro de una tubería a una razón constante de  $\dot{G}$ . Como un resultado de la fuerza de arrastre sobre las partículas sólidas y también debido a la interacción de la partícula y la pared (fricción de sólidos) la presión de caída se incrementa de B a C.

Cuando la velocidad del aire decrece a lo largo de la recta CD, la velocidad de la partícula es reducida y la razón de flujo de masa ( $\mu$ ) es incrementada, resultando una pequeña pérdida por fricción de los sólidos. El punto D representa la condición a la cual todos los sólidos pueden ser transportados en suspensión, como en la fase diluida, con la velocidad de aire previa y la razón de sólidos impuesta ( $\dot{G}$ ). Con esta consideración el sistema deberá operar en un estado de flujo estacionario. La velocidad de aire crítica correspondiente al punto D es llamada velocidad de saltación.

El punto D, el punto de saltación, decrece ligeramente, con la velocidad del gas lo que resulta en una deposición substancial de sólidos (formación de fondo). Esto da como resultado un incremento en la resistencia a la fricción en el punto E. Esta situación produce una reducción en el área de la sección transversal del tubo y, de esta forma, se promueve un área de alta velocidad para efecto de transportación de sólidos.

Dependiendo de la presión disponible y de la naturaleza de los productos, se encuentran dos tipos de fondo en los sistemas de transporte neumático. Los llamados fondos estacionarios estables resultan de una deposición permanente sobre la zona inferior del tubo. Este fondo permanece en condiciones prevalecidas de velocidad de aire y de la razón de concentración de sólidos en existencia. Efectivamente, este fondo prevé la reducción de área en la sección transversal del tubo y facilita el flujo de la fase diluida sobre él.

Con algunos sólidos es posible el efecto de movimiento del fondo típico en la fase estable densa. En esta situación, dos tipos de flujo prevalecen en la tubería. El movimiento del fondo lleva una alta concentración de sólidos y ,por encima de él, es común encontrar que la transportación de fase diluida toma lugar. Dependiendo de las características del material y la disponibilidad de la presión en el primer movimiento, una etapa transitoria ocurre frecuentemente en la cual el fondo estacionario es transformado en un fondo en movimiento. De esta particular situación surge una presión violenta y ,si una presión inadecuada es disponible, puede ocurrir que el sistema se bloquee.

Para una operación efectiva de una fase diluida, la velocidad debe ser ligeramente mayor que la velocidad de saltación. También se tiene la necesidad de que el sistema opere a altas presiones teniendo como resultado que los alimentadores puedan suministrar estas presiones.

Al reducir la velocidad del gas (línea EF), el flujo de sólidos es llevado parcialmente en suspensión sobre la capa de sólidos ya formada que también se conduce como flujo de pistones en el fondo estacionario a si mismo. Así, una característica de la alta carga de sólidos es el incremento en presión. En el diagrama de estado, una curva característica para cada flujo de masa sólida pasa a través de una presión mínima a la velocidad de saltación.

La importancia es la curva obtenida para conectar la presión mínima para cada condición de la razón flujo de sólidos. En particular, esta curva puede ser trasladada a la derecha para indicar que para altas cargas de los sólidos, la velocidad de saltación se incrementa.

El proceso en fase densa es más complicado que en una fase diluida. Una investigación teórica de altas fluctuaciones en presiones y la variabilidad de la concentración de sólidos es difícil, entonces uno depende de datos empíricos. Una investigación sistemática tiene que ser llevada en un planta piloto para tener resultados de datos técnicos y para trabajar sobre relaciones fundamentales.

### 3.3.2. Flujo horizontal y vertical

Un importante factor el cual no ha sido apreciado es la diferencia entre el flujo que toma lugar en tuberías verticales que es distinto de las que se lleva en tuberías horizontales.

En términos de velocidad de saltación, un punto similar, el punto de impacto, es utilizado para definir la mínima velocidad de transporte para una tubería vertical. Existe una estricta diferencia entre la velocidad de saltación (tubo horizontal) y la velocidad de impacto (tubo vertical).

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La mínima velocidad de gas para una línea horizontal es mayor que la requerida para efecto de libre transportación en una línea vertical. En el caso de partículas finas, la velocidad de transporte horizontal es 3 ó 5 veces mayor que la requerida para el transporte vertical. Para partículas granulares la diferencia entre las velocidades horizontales y verticales es mucho más pequeña [18, 20].

### 3.3.3. Sistemas de vacío y presiones positivas

Aunque se describe el mecanismo de flujo que toma lugar en un sistema de vacío de una forma similar al que se presenta en un sistema de presión positiva, en la práctica indica que no es lo mismo. Deberá aparecer que un mecanismo de flujo toma lugar si bien en ambas situaciones de flujo, en términos de definición, se describe como fase diluida.

Se describe el flujo en sistemas de vacío cuando empieza el núcleo del flujo en el cual los sólidos son conducidos dentro del núcleo central resultando un envoltura de partículas y la pared del tubo. En tales sistemas la degradación de las partículas es baja que en un sistema equivalente de presión positiva.

Como característica que diferencia un sistema de presión positiva a un sistema de presión negativa, se tiene la velocidad del gas “libre” requerida para efecto de transportación. La velocidad de transporte requerida para la operación libre de un sistema de vacío es más grande que la requerida para un sistema equivalente de presión positiva de fase diluida como se indica en la tabla 3.3.1.

Tabla 3.3.1. Comparación de velocidades en sistemas de presión y de vacío con diferentes materiales[20].

MATERIAL	DENSIDAD DE MASA (kg/m <sup>3</sup> )	VELOCIDAD SISTEMA DE PRESIÓN (m/s)	VELOCIDAD SISTEMA DE VACÍO (m/s)
alumbre	800	19.8	33.5
carbonato de calcio	440	19.8	33.5
granos de café	672	13.7	22.9
cal hidratada	480	12.2	27.4
malta	449	16.8	30.5
avena	400	16.8	30.5
sal	1440	25.3	36.6
almidón	640	16.8	27.4
azúcar	800	18.3	33.5
trigo	769	16.8	32.0



### 3.4 APLICACIÓN A LAS INDUSTRIAS

La aplicación del transporte neumático en el manejo de materiales entre procesos de manufactura y sus divisiones ha proporcionado adaptabilidad y una completa disponibilidad de la materia prima, así que la economía que se da no es sólo en los procesos, sino en toda la distribución de la planta. Las divisiones de la plantas que eran acoplamientos cerrados debido al problema de manejo de los materiales son ahora capaces de separarse para mejorar la operación.

#### 3.4.1. Industria de la Alimentación

Los molinos de alimentos reciben granos enteros, como el maíz, sorgo, avena, cebada, trigo y muchos otros alimentos que son para productos de aceite vegetal, granos, almidón y otros comestibles en el proceso industrial. Los molinos de alimentos procesan estos materiales para formular comida para el ganado, aves de corral, vaquería y perros. Efectividad y facilidad en el manejo de la masa es necesaria en esta industria. Sobre un grueso margen en utilidad de un 3 - 8% del costo total, los costos de manufactura aumentan únicamente del 6 - 10% [12]. Esto es entonces imperativo para un control muy cerrado de los costos de manejo de materiales, el cual es una buena parte de el costo de manufactura.

En molinos pequeños y grandes se utiliza el transporte neumático para la operaciones de descarga, como en una planta de transferencia, incluyendo pélets terminados. El uso económico del transporte neumático es determinado primeramente por el material a ser transportado. En muchos molinos ambos sistemas, neumático y mecánico, son utilizados en la operación de descarga de esta forma ambos tienen ventajas y limitaciones y son relacionados al material transportado.

Una ventaja importante del sistema de descarga en vacío sobre el sistema mecánico utilizando una fuerza de pala mecánica es la gran reducción de pérdida en el manejo o merma. Otra importante ventaja del sistema de vacío, y uno que recibe los más favorables comentarios de los operadores de molinos, es la seguridad.

El manejo de los ingredientes de alimentos es realizado por sistemas de vacío y de baja presión. Después los ingredientes son procesados, algunos de los productos terminados son peletizados para en caso de futuro manejo y eliminación de pérdida de polvos. Algunos productores y procesadores ven al transporte neumático para materiales de comida peletizados con desconfianza, sin embargo, existe quienes lo ven favorable. El promedio de los pélets duros pueden ser transportados con relativa poca degradación y atrición.

#### **3.4.2. Industria de la Pulpa y el Papel**

El transporte neumático tiene una amplia aplicación en los molinos de pulpa y el papel para el manejo de masas químicas secas, pedazos de madera, corteza, polvo de sierra, y pulpa seca. También se utiliza para el transporte de trozos de madera, polvos de sierra en los molinos de sierra y enchapado, plantas de madera terciada, las cuales suplen una gran porción de los requerimientos de madera para los molinos de pulpa.

Los modernos molinos de pulpa reciben pulpa de madera en forma de trozos, polvo de sierra, y leños. Los trozos y polvos son producidos de tablas y residuos de madera terciada y recolectados en los molinos por rieles de carro, camionetas, o barcasas. Los leños son cortados previamente en trozos. Después de los cortes, los trozos son colectados para almacenamiento.

Después los trozos y rebabas son descargados por medios mecánicos y los trozos son colectados de los almacenes, sistemas de transporte neumático de baja presión toman el problema del manejo. Este procedimiento puede llevarse a cabo en el procesamiento del trozo de madera. Una de esas instalaciones de transporte de los trozos y rebabas de madera se coloca a la salida del almacén; llevados del almacén a través de múltiples alimentadores para controlar correctamente las mezclas de piezas de madera, rebabas, y combinaciones de trozos para liberar las puertas y que se lleve el transporte de trozos y rebabas a los acumulamientos.

### 3.4.3. Industria del Cemento

En la industria del cemento, de la manufactura a través del envío a la distribución y uso, ha recibido el gran impacto, como en las otras industrias, de la utilización del transporte neumático. Ha sido en esta industria la aceptación de la bomba del fluido - sólido para manejo de este material como potencia. También se tiene un alto uso de los tanques sopladores en las operaciones de transporte.

El molino del cemento fue probablemente la primer industria básica en incluir en los circuitos de manufactura el transporte neumático como una práctica estándar de transporte en el manejo del material entre las varias etapas de manufactura.

El cemento tiene su origen en la piedra de caliza y otros materiales que contienen caliza, más otros materiales de mismas propiedades químicas para su conversión en un proceso de horneado, usualmente un horno rotatorio. Estas materias primas son mucho más tratables para manipulación en transporte neumático.

### 3.4.4. Industria del Plástico

El transporte neumático ha tenido un gran impacto en la industria del plástico, debido al crecimiento de ésta. Los primeros sistemas utilizados fueron aproximadamente en 1930 para el transporte de resinas fenólicas, seguidas por moldes de madera, utilizados como hendiduras para el moldeo de resinas las cuales forman partes de teléfonos, componentes de radio y aislantes eléctricos [12]. La manufactura de tales resinas donde la primera aplicación del transporte neumático es operar en planta entre divisiones de los procesos de manufactura.

Conforme otros materiales han sido desarrollados, de nuevo la manufactura es más fácil con la ventaja del transporte neumático donde se muestra más vigorosamente en tales operaciones. Estos materiales incluyen resinas vinílicas, acetato celulosa, nylon, polietileno, poliestireno, polipropileno y otros compuestos de fenol, urea, y poliéster. Cuando el moldeo y la extrusión de estos plásticos se incrementa al punto donde estas operaciones justifican la manipulación de masas, el transporte neumático es utilizado. Entre la manufactura y el uso, métodos de transporte han sido empleados para proteger el material de peligros. Esto ha sido principal en el desarrollo en la carga de las masas en los rieles de carga y camiones para evitar la contaminación de las superficies.

En el transporte de plásticos, algunas consideraciones especiales son necesarias. La contaminación deberá ser llevada en lo más mínimo absoluto, no únicamente de la materia exterior, sino también en la manipulación de diferentes materiales colorantes como el polietileno, el cual es moldeado y extruído en todos los colores del espectro.

La temperatura del aire en el transporte u otros medios de transporte deberá ser cuidadosamente controlada, especialmente en sistemas de presión. Algunas veces, el calor de compresión del aire u otro medio en el ventilador aumenta la temperatura de transporte del aire o medio al punto donde afecta las propiedades físicas de los plásticos a transportar.

### 3.4.5. Industria de Metales Ferrosos

En los pasados 20 años, las fundidoras de hierro y acero han sido beneficiadas en el manejo de las materias primas y en la manipulación en planta para aprovechar la materia prima para sus procesos. El tanque de soplado, medios de baja y media presión, utilizando velocidades de transporte bajas en el sistema de tubería, ha hecho esto posible.

Materias primas tales como la bentonita, ligadura de caliza y carbón son de los principales materiales que pueden ser manipulados neumáticamente. Estos materiales son recibidos en masa de trenes los cuales son descargados por sistemas de vacío. Desarrollos reciente incluyen la inyección neumática de materiales tales como coque, óxido de níquel, caliza tratada y caliza dolomítica a través de cúpulas y lanzas en hornos de carbonización [12, 20].

La mayoría de estos materiales son abrasivos y, en el desarrollo de estos sistemas, se requiere una cooperación entre metalurgistas, personal de operación y el ingeniero de transporte neumático para obtener el mejor diseño posible. Los sistemas más utilizados consisten de tanques sopladores a baja presión utilizando válvulas de aire y alimentadores resistentes a la abrasión. La operación de presión y la información del volumen del aire es propia del sistema.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

A través del uso de transporte neumático, las pérdidas de material son reducidas a un mínimo. Así mismo, se puede obtener una alta exactitud al elevar automáticamente cualquier partida en forma continua. Adicionalmente, el flujo del material es monitoreado continuamente. Estas características de operación contribuyen para mantener la economía y uniformidad del producto.

# CAPÍTULO 4

## DESGASTE

### 4.1 FUNDAMENTOS

Uno de los problemas que se presenta en todos los sistemas mecánicos es el desgaste que generalmente es definido como la pérdida progresiva o desplazamiento de material de una superficie como un resultado del movimiento relativo entre dos superficies en contacto y bajo carga [10].

El desgaste está relacionado íntimamente a la fricción y lubricación; el estudio de estos tres temas es conocido como tribología [10]. Aunque los aparatos utilizados para una prueba tribológica frecuentemente pueden ser utilizados para fricción, desgaste y lubricación, estos son fenómenos distintos. Consecuentemente, los procedimientos de prueba e interpretación varían.

Las pruebas de desgaste son comúnmente desarrolladas para evaluar materiales científicos y de ingeniería con el propósito de seleccionar aquellos materiales para una determinada aplicación. La durabilidad de la mayoría de los productos metálicos depende de la condición de sus superficies y del deterioro de la misma debido al uso.

### Parámetros que influyen en el desgaste:

Una variedad de parámetros tienen influencia en todos los mecanismos de desgaste:

- **Propiedades del Material:**

Composición, tamaño de grano, energía de superficie, estructura cristalina, microestructura, estabilidad de fase, plasticidad, grado de endurecimiento por deformación, fractura, conductividad térmica, capacidad calorífica etc.

- **Parámetros de Diseño:**

Forma, carga, tipo de movimiento, rugosidad, vibración, tiempos de ciclos, etc.

- **Parámetros del Medio Ambiente:**

Temperatura, humedad, atmósfera, contaminación, etc.

- **Parámetros de lubricación:**

Tipo de lubricante, estabilidad del lubricante, mecanismo de lubricación, etc.

Estos parámetros son aplicados a ambas superficies de los cuerpos en contacto [7, 10].

---

## 4.2 CLASIFICACIÓN DEL DESGASTE

Varios tipos de mecanismos de desgaste ocurren, por ejemplo, adhesivo, abrasivo, fatiga, corrosivo, rozamiento, desgaste erosivo por partículas sólidas, fluidos y cavitación, los cuales ocurren en diferentes medios para diferentes procesos. Sin embargo esta clasificación es ambigua e imprecisa.

La clasificación de los procesos de desgaste basadas sobre los tipos de contactos en uso, como fases simples y fases múltiples, se muestra en la figura 4.1 [5]. El desgaste en fases simples, como el movimiento relativo de sólido, líquido, o gas sobre una superficie deslizándose causando la remoción de material de la superficie.



El movimiento relativo puede ser deslizamiento (unidireccional o reciproco) o rodamiento. En el desgaste de fases múltiples, también resulta del movimiento de sólidos, líquido, y gases contra la superficie, pero en este caso, actúan como un transportador de una segunda fase (partículas, asperezas, gotas de líquido, y burbujas de gas) que producen desgaste.

FLUIDO	DESCGASTE EN UNA FASE SIMPLE	DESCGASTE DE FASES MÚLTIPLES					
		PARTICULA SOLIDA		PARTICULA LIQUIDA		VAPOR DE GAS	PARTICULA
		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 4.1 Procesos típicos de desgaste [5].

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.2.1 Desgaste Adhesivo

El proceso de desgaste adhesivo es iniciado por las uniones interfaciales adhesivas que forman entre si los materiales sólidos que están en contacto a escala atómica. Cuando una carga normal es aplicada, las presiones locales sobre las asperezas son extremadamente altas. En algunos casos, los esfuerzos tensiles son excedidos y las asperezas se deforman plásticamente hasta que el área real de contacto se incrementa suficientemente para soportar la carga aplicada.

En la ausencia de películas superficiales, las superficies deberán adherirse fuertemente, pero muy pequeñas cantidades de contaminantes minimizan, o regularmente previenen, la adhesión bajo una carga puramente normal. Sin embargo, movimientos relativos tangenciales en las interfaces actúan para dispersar la película de contaminantes en el punto de contacto, y la soldadura en frío de las uniones toma lugar.

Las observaciones siguientes son generalmente hechas sobre los mecanismos de adhesión:

- La adhesión interfacial metálica de ligadura depende de la estructura electrónica de los cuerpos en contacto. Esto ha sugerido que la fuerte adhesión ocurre si un metal puede actuar como un donador de electrones y el otro como un aceptador.
- El desgaste adhesivo es directamente relacionado con la tendencia de diferentes materiales de formar soluciones sólidas o compuestos intermetálicos con otros.
- La estructura cristalina ejerce una influencia sobre los procesos de desgaste adhesivo. Los metales hexagonales en general exhiben bajo desgaste adhesivo en comparación con metales de estructura cúbica centrada en el cuerpo y cúbica centrada en las caras.
- La orientación cristalina tiene influencia en el funcionamiento del desgaste adhesivo. En general, bajo desgaste adhesivo es observado para planos de alta densidad atómica y de baja energía superficial.

El desgaste resultante del proceso adhesivo ha sido descrito por la ecuación de Archard [5, 13] :

$$W_{ad} = \frac{V}{L} = K \frac{F_N}{H} \quad (1)$$

donde  $W_{ad}$  = razón de desgaste, por ejemplo; volumen desgastado por unidad de distancia deslizada

$K$  = coeficiente de desgaste

$V$  = volumen de desgaste

$L$  = distancia deslizada

$F_N$  = carga normal

$H$  = la dureza del material bajo estudio

Esta ecuación emplea la dureza como la única propiedad del material, pero en la literatura [5] se ha encontrado que el coeficiente de desgaste  $K$  depende de varias propiedades de los materiales. Sin embargo, no es posible describir cuantitativamente la influencia de las propiedades de los materiales sobre el coeficiente de desgaste con una relación simple. Además, esta ecuación es relevante para contactos con deformación plástica. La cual implica que la razón de desgaste es proporcional al área de contacto. La figura 4.2 muestra este tipo de desgaste.

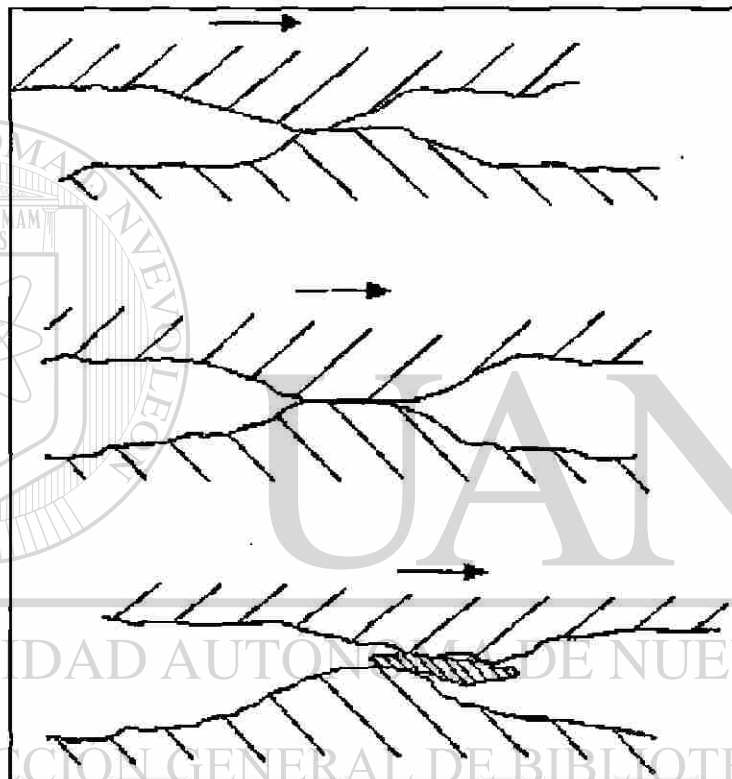


Figura 4.2 Representación esquemática de la generación de partículas de desgaste como resultado del proceso adhesivo [5].

#### 4.2.2 Desgaste Abrasivo

El desgaste abrasivo ocurre cuando cualquiera aspereza, superficie dura o una superficie blanda con partículas duras embebidas en su superficie se desliza sobre un material blando. Una acción de surcado o arado toma lugar. Cuando el desgaste abrasivo es el resultado de partículas de desgaste sueltas y contaminantes, es llamado desgaste abrasivo de tres cuerpos como se observa en la figura 4.3. El desgaste abrasivo intencional es producido por ruedas de moler, limas y papel de lijar.

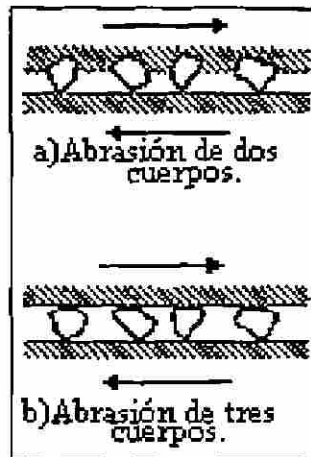


Figura 4.3 Representación esquemática de las diferencias entre (a) dos cuerpos, (b) tres cuerpos en el desgaste abrasivo [13].

### Teoría de dos cuerpos del desgaste abrasivo

En el desgaste abrasivo de dos cuerpos, donde partículas duras o asperezas superficiales soportadas rígidamente son forzadas a moverse contra la superficie de un material blando, se forman ranuras o surcos. Este proceso puede o no conducir a la eliminación o remoción de metal. Los dos casos extremos, mismos que tienen que ser identificados, se muestran en la figura 4.4. El primer caso es una ranura plástica, que es referida como surcado o arado, en el cual una proa es formada adelante de las partículas abrasivas y el material es continuamente desplazado a los lados formando crestas adyacentes para el desarrollo de el surco. En el segundo caso de la formación del surco, el metal es completamente desprendido de la superficie por el mecanismo de microcorte [17]. Por otra parte esto puede ser identificado como un caso extremo en el cual el volumen del surco es igual al volumen del material removido y no existen crestas en los costados del surco.

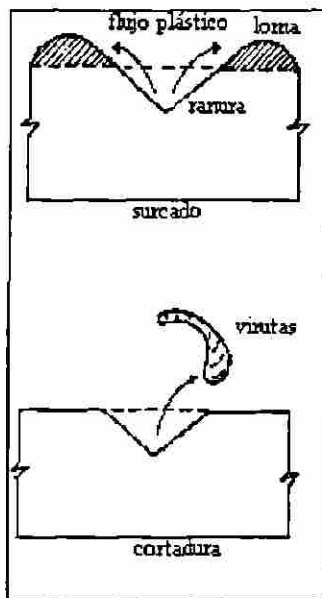


Figura 4.4 Los dos mecanismos de formación de surcos en los metales [17].

La indentación de dureza en un material es un importante factor en el análisis del desgaste abrasivo debido a que controla la profundidad de penetración de las partículas abrasivas [10, 17].

La teoría de desgaste expresa el volumen total de partículas generadas  $W$ , por unidad de longitud deslizada como:

$$\frac{W}{L} = K \frac{P}{H} \quad (2)$$

donde:  $P =$  Carga aplicada

$H =$  Dureza del material desgastado

$K =$  Coeficiente del desgaste abrasivo

Los coeficientes de desgaste abrasivo son generalmente más grandes que para el desgaste adhesivo [10, 13].

### **Teoría de tres cuerpos de desgaste abrasivo.**

El desgaste abrasivo de tres cuerpos ocurre cuando la superficie es frotada contra un grupo de partículas desprendidas. Por lo general todos los problemas de desgaste abrasivo en la industria son de tres cuerpos. Este tipo de desgaste puede ser dividido en dos categorías, llamadas desgaste abrasivo de tres cuerpos abierto y cerrado. La diferencia entre ellos es únicamente en la intensidad del contacto entre las partículas abrasivas y la superficie. El desgaste abrasivo de tres cuerpos cerrado ocurre cuando las partículas abrasivas son atrapadas entre la superficie. El desgaste abrasivo de tres cuerpos abierto ocurre cuando la superficie es frotada y deslizada contra las partículas abrasivas sueltas.

La efectividad del desgaste abrasivo de tres cuerpos en remover el material es menor que otros procesos de remoción de material. Una gran energía es requerida antes de desprender cualquier material. Lo contrario al desgaste abrasivo de tres cuerpos, el desgaste abrasivo de dos cuerpos es un proceso muy efectivo para remover material, aunque el más efectivo es el proceso de cortadura. Esta comparación puede ser utilizada para predecir el funcionamiento de desgaste de un material basada sobre los conocimientos de algunos procesos comunes como el corte y afilado de metales [10, 22].

#### **4.2.3 Desgaste Erosivo**

Erosión es un mecanismo de desgaste definido como el material removido de una superficie por la acción de numerosos impactos individuales de partículas sólidas o líquidas. Este tipo de desgaste no debe ser confundido con el desgaste abrasivo o el producido por deslizamiento, debido al mecanismo de material removido.

El desgaste erosivo a veces se manifiesta como un ligero pulido de las superficies expuestas a la corriente de componentes presentes en el flujo de partículas, o de curvas o de otras estructuras deflectantes del flujo.

En la erosión varias fuerzas de diferentes orígenes pueden actuar sobre una partícula en contacto con una superficie sólida, como se muestra en la figura 4.5. Partículas vecinas pueden ejercer fuerzas de contacto y un flujo de corriente, si está presente, puede causar fuerzas de arrastre. Dentro de algunas condiciones, la gravedad puede ser importante. Sin embargo, la fuerza dominante sobre las partículas erosivas, la cual es principalmente responsable de la desaceleración de su velocidad inicial de impacto, es usualmente la fuerza de contacto ejercida por la superficie [13]. En el desgaste abrasivo, veíamos que el aumento de material removido dependía de la carga normal presionando las partículas contra la superficie y sobre la distancia de deslizamiento. En erosión, el grado de desgaste depende, en lugar de ello, del número y masa de partículas individuales estrellándose en la superficie y de su velocidad de impacto [10, 13].

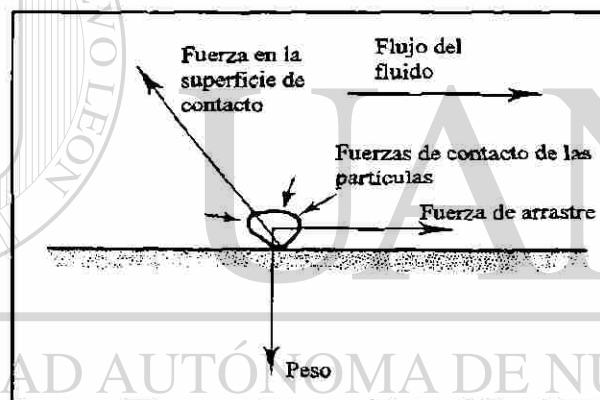


Figura 4.5 Diagrama de las fuerzas que actúan sobre una partícula en contacto con una superficie sólida [13].

Como en el caso de abrasión, el mecanismo de desgaste erosivo puede involucrar deformación plástica y fractura frágil. La erosión generalmente involucra flujo plástico, donde algunos materiales frágiles pueden desgastarse predominantemente por flujo o por fractura dependiendo de las condiciones del impacto.

Aunque la superficie y naturaleza de las partículas abrasivas y erosivas pueden diferir en varios procesos, en el resultado del proceso de desgaste tienen mucho en común.



Desgaste erosivo por deformación plástica:

$$E = K\rho \frac{mv^2}{2H} \quad (3)$$

donde  $\rho$  = densidad del material erosionado  
 $K$  = factor adimensional  
 $m$  = la masa de partículas transportadas  
 $v$  = la velocidad inicial de las partículas  
 $H$  = dureza del material erosionado

Realizando una comparación de la ecuación con la que determina el desgaste abrasivo se encuentra que ambas predicen la razón de desgaste, que son inversamente proporcionales a  $H$ , la dureza de la superficie. El papel de la carga normal aplicada en el desgaste abrasivo es el jugado en la erosión por la cantidad  $\rho v^2/2$ . En ambos casos, la severidad de desgaste es determinada por los coeficientes adimensionales  $K$ , que es la medida de la eficiencia del proceso de remover material. Si todo el material desplazado por las partículas erosivas es removido,  $K$  deberá ser la unidad. En los metales,  $K$  se encuentra típicamente en el rango de  $5 \times 10^{-3}$  a  $10^{-1}$ , valores similares observados en la abrasión de dos cuerpos [10, 13].

La ecuación 3 de erosión da solamente una estimación de los factores que controlan el desgaste erosivo, ignorando la variación de la razón erosiva con el ángulo de impacto. La geometría de la deformación debida al impacto de las partículas duras dependen de la velocidad de impacto, de la forma y orientación de las partículas y del ángulo de impacto [13].

#### 4.2.4 Desgaste por Fatiga

Este tipo de desgaste es producido cuando contactos repetidos ocurren sobre superficies en deslizamiento y rodamiento. Todas las máquinas involucran variaciones periódicas de esfuerzos. Un elemento de metal en la superficie de un eje rotatorio está sujeto a esfuerzos recíprocos de cedencia. La aceleración de contacto de un cojinete en rodamiento es una experiencia continua en la aplicación y una relevación de esfuerzos hertzianos. La superficie de un cojinete conformado deberá experimentar repetidos esfuerzos sobre una microescala debido al paso de las asperezas sobre la superficie en rotación [5, 21]. Todos estos esfuerzos repetidos en contacto de rodamiento o deslizamiento pueden llevar a una falla por fatiga. Los materiales son raramente perfectos, y la posición exacta de la falla deberá ser influenciada por inclusiones, porosidad, microgrietas y otros factores como se observa en la figura 4.6.

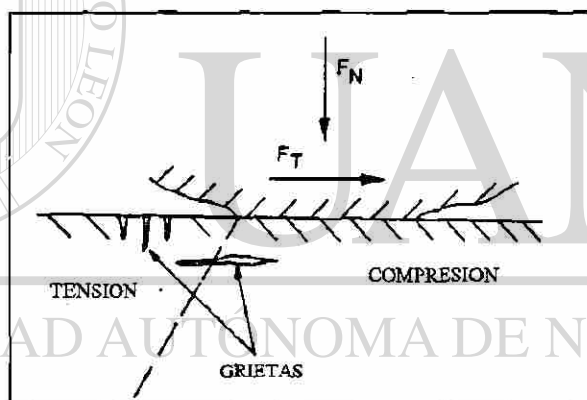


Figura 4.6. Esquema del desgaste por fatiga debido a la formación de grietas en la superficie y sub superficie [5].

Halling derivó una expresión de la razón de desgaste utilizando un modelo que incorpora el concepto de falla por fatiga como una simple falla por deformación plástica [5]. La expresión para el volumen de desgaste por unidad de deslizamiento es :

$$W_{fa} = K \frac{\eta \gamma}{\bar{\epsilon}_1^2 H} F_N \quad (4)$$

- donde :
- $\eta$  = distribución lineal de asperezas
  - $\gamma$  = define el tamaño de partícula como constante
  - $\bar{\epsilon}_1$  = esfuerzo de falla en un ciclo de carga
  - $H$  = dureza del material suave
  - $K$  = coeficiente de desgaste

#### 4.2.5 Desgaste Corrosivo

El desgaste debido a la adhesión, abrasión, y fatiga puede ser explicado en términos de interacciones de esfuerzos y propiedades de deformación de las superficies, pero en desgaste corrosivo, la interacción dinámica entre el medio ambiente y el material de las superficies juega un papel muy importante. Estas interacciones dan un incremento para procesos de etapas cíclicas:

- En la primera etapa, el contacto de superficies reaccionan con el medio ambiente y los productos de reacción son formados sobre la superficie.
- En la segunda etapa, la remoción de los productos de reacción ocurre como un resultado de la formación de grietas o abrasión en el contacto de las interacciones de las superficies.

En este proceso, resulta un incremento en la reactividad de las asperezas debido al incremento de la temperatura y cambios en las propiedades mecánicas de las asperezas.

Quin ha propuesto una teoría para explicar el desgaste en aceros suponiendo que capas de asperezas tribo - químicas en la superficie son desprendidas a un cierto espesor crítico como se observa en la figura 4.7. La expresión está dada por:

$$W_{corr} = \frac{dA_c \exp[-Q/(R_c T_c)]}{3\varepsilon^2 \rho^2 vH} F_N \quad (5)$$

- donde  $\rho$  = densidad de la capa oxidada  
 $A_c$  = constante de Arrhenius  
 $Q$  = energía de activación  
 $R_c$  = constante del gas  
 $T_c$  = temperatura de contacto  
 $\varepsilon$  = espesor crítico de la capa de reacción  
 $v$  = velocidad de deslizamiento  
 $F_N$  = fuerza normal aplicada  
 $d$  = diámetro de contacto de la aspereza

Esta expresión indica que la razón de desgaste depende de los siguientes grupos de parámetros de los contactos de superficie:

- Parámetros de operación ( $F_N$ ,  $v$ ,  $T_c$ )
- Constantes generales y parámetros del material ( $A_c$ ,  $Q$ ,  $R_c$ ,  $\rho$ ,  $H$ )
- Grados de interacción ( $d$ ,  $T_c$ ,  $\varepsilon$ )

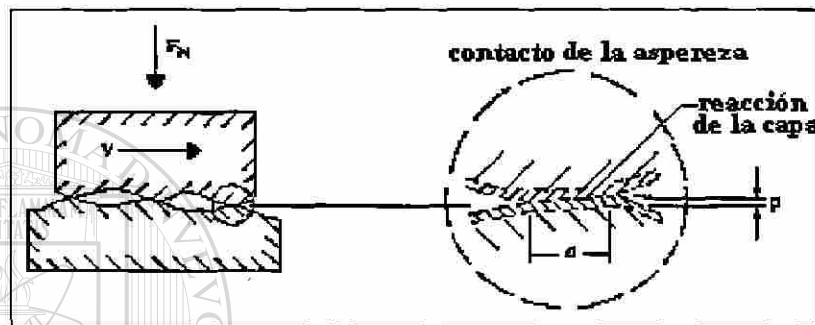


Figura 4.7 Modelo de desgaste corrosivo [5].

#### 4.2.6 Desgaste por Rozamiento

Este tipo de desgaste ocurre cuando existe un movimiento oscilatorio con muy pequeños desplazamientos en el contacto de superficies bajo carga. Pequeñas partículas de desgaste son formadas a través del mecanismo de adhesión [5, 21]. Debido a la pequeña amplitud de movimiento las partículas de desgaste no son arrastradas o removidas del sistema. Las partículas producidas contribuyen al desgaste a través de la acción abrasiva. Cuando el material es acero, lo cual es usualmente el caso, una tercer forma de desgaste entra en juego. Las partículas de desgaste oxidadas y generalmente, más duras que el metal base, exponen el metal limpio a futura oxidación. El incremento del desgaste por rozamiento en atmósferas húmedas es considerablemente más alto que el observado en atmósferas secas.

#### 4.2.7 Desgaste por Cavitación

El desgaste por cavitación surge cuando un sólido y un fluido están en movimiento relativo y se forman burbujas en el fluido, volviéndose inestables e impactándose contra la superficie del sólido, como se observa en la figura 4.8.

El daño por cavitación ocurre generalmente en máquinas en el manejo de fluidos como propulsoras marinas, hidro combustibles, presas, en las válvulas y en otras turbinas hidráulicas. En la erosión por cavitación, el impacto del líquido provoca el impacto de las burbujas de gas con la superficie a relativamente altas velocidades. Las burbujas se estrellan en la superficie sólida y se colapsan en el impacto, este fenómeno provoca un choque de ondas sobre la superficie sólida resultando en la liberación del material de la superficie.

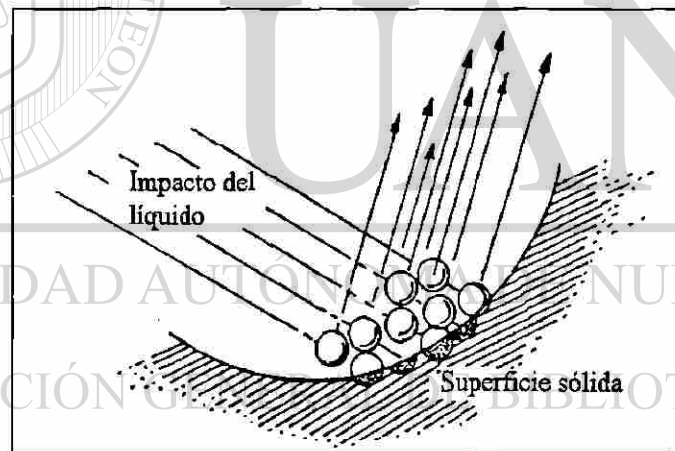


Figura 4.8. Esquema de erosión por cavitación debido al impacto de burbujas de líquido [5].

La erosión por cavitación se caracteriza por un período de incubación en el cual poco o ningún daño ocurre, seguido por un período de desgaste a razón constante. La duración del período de desgaste es determinado por el estado de la superficie inicial y está completamente relacionado con el límite de resistencia en las pruebas mecánicas de fatiga. Una vez que la cavitación ha comenzado, el incremento de material removido se relaciona a los esfuerzos presentes, a la dureza y al máximo esfuerzo tensil.

### 4.3 EFECTO DE LA MICROESTRUCTURA EN EL DESGASTE

Se ha encontrado que el desgaste abrasivo depende de la estructura cristalina y de la orientación. Alison [10] demostró que el desgaste en los metales cúbicos es cerca de dos veces la proporción en los metales hexagonales, lo cual fue atribuido al bajo endurecimiento por trabajado de los metales hexagonales. La microestructura es también importante, la austenita y la bainita de igual dureza son más resistentes a la abrasión que la ferrita, perlita, o martensita [10]. Esto es debido a la alta capacidad de endurecimiento por deformación y ductilidad de la austenita. Una forma común de modificar las propiedades de un material es produciendo una segunda fase. Los tratamientos térmicos pueden causar la formación de precipitados que dan como resultado un incremento en la dureza y en el esfuerzo a la cedencia.

En general, los precipitados incoherentes duros o partículas tales como los carburos pueden ser útiles en la disminución del desgaste abrasivo. La relación entre el tamaño de partícula y el tamaño de grano abrasivo es importante. Gran parte de los granos abrasivos tienden a crear grandes fragmentos de desgaste. Cuando las partículas incoherentes son pequeñas en comparación a los granos de desgaste y fragmentos de desgaste, estas pueden incluirse con la matriz, adhiriendo un poco mas de resistencia a la abrasión del material. Si los granos abrasivos son muy pequeños, referente a las partículas duras, y los espacios entre las partículas son grandes, entonces los granos son capaces de desprender las partículas duras, permitiendo así la salida de ellas o son desalojadas por ocasionales granos abrasivos grandes.

El desgaste adhesivo está directamente relacionado con la tendencia de diferentes materiales en contacto a formar soluciones sólidas o compuestos intermetálicos. La compatibilidad metalúrgica, como es indicado por la mutua solubilidad, representa el grado de atracción intrínseca de los átomos de metales en contacto para cada uno.

Evidencias experimentales indican que la razón de desgaste  $W$  de los metales es aproximadamente proporcional a la carga normal  $F_N$ . Sin embargo, en el caso de soluciones sólidas, la razón de desgaste no se ha encontrado correlacionada con la dureza [5]. La clave para entender los efectos microestructurales sobre la razón de desgaste, en muchos casos, consiste en el entendimiento de la deformación de la subsuperficie, nucleación de grietas y aspectos de propagación como una función de la microestructura.

Puesto que los metales bcc son en general más duros que los metales fcc y hcp, la razón de desgaste exhibida por éstos es generalmente menor que para las otras dos clases de metales. El tamaño y forma del grano también tiene influencia sobre las razones de desgaste. La textura también presenta relación al desgaste de los metales fcc cuando los planos clivados están orientados favorablemente para provocar la propagación de grietas.

## 4.4 DESGASTE EN ACEROS

### 4.4.1 Desgaste de Aceros al Carbono y Aceros Aleados

En los aceros de bajo carbono, la resistencia a la abrasión es básicamente una función de la dureza y contenido de carbono. Otras adiciones de elementos pueden realizarse para conseguir un completo endurecimiento y otras propiedades mecánicas.

Los aceros al carbono muestran una pobre resistencia al desgaste y alto daño de la superficie durante el deslizamiento en seco. El uso de estos aceros para deslizamiento de superficies en contacto requiere tratamientos superficiales, como endurecimiento o recubrimiento y la selección de una capa “compatible” de material como bronce, metal babbitt o antifricción [7,10]. Cuando los minerales duros se encuentran en contacto con el acero, el desgaste es muy rápido a menos que la superficie del acero este endurecida o recubierta con un material muy duro.



Los aceros están sujetos a un acelerado desgaste en un ambiente corrosivo. Un acero no protegido es también susceptible al desgaste por rozamiento o la formación de óxidos desprendidos entre las dos superficies en contacto en un movimiento oscilatorio a baja amplitud. Es posible impartir una amplia variedad de microestructuras en los aceros por medio de tratamientos térmicos, con lo que las propiedades de desgaste pueden ser relacionadas a microestructuras específicas.

La resistencia al desgaste de los aceros ferríticos es mejorada por el endurecimiento en la superficie. La dureza máxima depende del contenido del carbono del acero y de la transformación martensítica [10] (esto es, de la eficiencia del temple). El contenido del carbono afecta la dureza y resistencia al desgaste a través de la formación de carburos simples o complejos. Las propiedades de desgaste dependen del tipo, forma, tamaño, y distribución de los carburos presentes, en adición a las propiedades de la matriz (por ejemplo, dureza, tenacidad, y estabilidad).

#### **4.4.2 Desgaste del Acero Inoxidable**

Las aleaciones de alto cromo son considerablemente favorecidas sobre las de Ni - Cr o hierros blancos perlíticos, debido a su mejor resistencia al impacto en condición de tratamiento térmico [10]. Las aleaciones de 25% Cr son esencialmente utilizadas en condiciones que requieren una resistencia extra a la corrosión o oxidación, las aleaciones 15Cr3Mo deberán ser utilizadas donde exista la necesidad de secciones transversales gruesas, debido a su alta templabilidad.

#### **Corrosión - Erosión en aceros inoxidable:**

La corrosión de un metal o aleación puede ser acelerada cuando se presenta un abrasivo que remueve la capa de óxido protectora. Esta forma de ataque es especialmente significativa cuando el espesor de la capa de óxido es un importante factor en determinar la resistencia a la corrosión. En el caso de aceros inoxidables, la erosión de la película pasiva puede conducir a alguna aceleración de ataque.

## Oxidación

Debido a los altos contenidos de cromo, los aceros inoxidables tienden a ser altamente resistentes a la oxidación. Factores importantes son considerados en la selección de aceros inoxidables para el uso a altas temperaturas como la estabilidad de la composición y microestructura de un grado superior térmicamente expuesto y la adherencia del óxido a una escala superior de un ciclo térmico [4]. Dado que muchos aceros inoxidables utilizados a altas temperaturas son de grado austeníticos con relativo alto contenido de níquel, es necesario poner cuidado en la posibilidad de un ataque de sulfidización.

## 4.5 CONTROL DE VARIAS FORMAS DE DESGASTE

El desgaste es un proceso complejo de remoción de material, en el cual una variedad de eventos toma lugar independiente o simultáneamente. Con el fin de prevenir o reducir el desgaste, se deberá entender primero los factores que contribuyen al desgaste. Las propiedades que son relevantes para el control de un mecanismo particular de desgaste se resumen en la tabla 4.5.1 [5].

Tabla 4.5.1. Propiedades de un material preferidas para el control de un proceso en particular de desgaste.

MECANISMO DE DESGASTE	PROPIEDADES DEL MATERIAL QUE FAVORECEN LA RESISTENCIA AL DESGASTE
ADHESIVO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja solubilidad de las superficies en contacto</li> <li>• Resistencia al reblandecimiento térmico a la temperatura de interfases durante el deslizamiento</li> <li>• Baja energía de superficie</li> </ul>
ABRASIVO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor dureza en la superficie que del medio abrasivo</li> <li>• Bajo coeficiente de endurecimiento por trabajado</li> </ul>
EROSIVO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta dureza para bajos ángulos de impacto</li> <li>• Alta tenacidad para grandes ángulos de impacto</li> <li>• Los tratamientos térmicos no tienen influencia sobre la resistencia a la erosión</li> </ul>
FATIGA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia subsuperficial a la deformación, nucleación de grietas y razón de crecimiento.</li> </ul>
CORROSIVO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia al medio corrosivo cuando no estén pasivados</li> </ul>
ROZAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia a la corrosión del medio ambiente</li> <li>• Capaz de formar productos de corrosión blandos</li> <li>• Total inmiscibilidad de las superficies en contacto</li> <li>• Alta resistencia a la abrasión</li> </ul>

El desgaste abrasivo puede ser controlado dándole un acabado de pulido fino a las superficies friccionadas y reduciendo los contaminantes abrasivos. El desgaste por corrosión puede ser reducido cambiando materiales que no reaccionen con las atmósferas corrosivas o seleccionando lubricantes que deberán prevenir o controlar la corrosión.

La vida de la superficie determinada por el desgaste de fatiga depende de la resistencia a la fatiga de los materiales y variando inversamente a la primer potencia del número de esfuerzos cíclicos y a la cuarta potencia de la carga [21]. La fatiga de la superficie puede ser controlada cambiando las aleaciones que posean altos esfuerzos de cedencia y reduciendo la carga o velocidad. Un aceite de alta viscosidad puede ayudar a prolongar la vida del material.

Las velocidades de desgaste adhesivo son usualmente bajas y pueden ser reducidas todavía más con el cambio de lubricantes. De los tipos menos comunes de desgaste, el rozamiento puede ser controlado o eliminado reduciendo la carga e incrementando la amplitud de movimiento lo suficiente como para atraer lubricante fresco. Cambiando de lubricante a una grasa o uno tipo sólido que, deberá permanecer en el sistema, también ayudará. El método más efectivo es el flujo continuo en el sistema con la circulación del aceite.

La más efectiva y práctica solución del daño erosivo es el evitar las partículas impactantes, pero esto es imposible. Una superficie endurecida resistente al desgaste deberá ser cambiada o dispuesta, tal que se deforme elásticamente más bien que plásticamente.

Finalmente, el daño por cavitación puede ser frecuentemente remediado por un diseño conveniente y un buen mantenimiento. Este puede además ser controlado cambiando a materiales resistentes a la fatiga. Ciertos agentes anti espuma son también efectivos en el escape de entrada de gases para eliminar una fuente de cavitación.

## CAPÍTULO 5

# EXPERIMENTACIÓN

### 5.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis cualitativo de los mecanismos de desgaste en tres diferentes materiales y cuantificar las pérdidas de material por el desgaste sufrido a una temperatura determinada en una atmósfera reductora. A continuación se describen las condiciones a que fueron sometidas los tres tramos de tubería colocados en una línea horizontal que se encuentra a una altura aproximada de 4 metros del nivel superficial conectada con la línea principal de la planta utilizada a nivel piloto de transporte neumático (figura 5.2). La línea empleada más comúnmente es de acero al carbono AISI 1005 debido a sus propiedades mecánicas y a su relativo bajo costo.

Los tres segmentos de tubería de diferentes aceros utilizados en la prueba se caracterizaron y se obtuvieron sus longitudes y espesores iniciales. Se colocaron en el orden, que se muestra en la figura 5.1. Se analizaron los tres tipos de aceros metalográficamente antes y después de someterlos a prueba.

Como una segunda parte se efectuaron pruebas para obtener el perfil de microdureza antes y después de la prueba en la superficie interior hasta una profundidad aproximada de 200  $\mu\text{m}$  del tubo. Así mismo se describe el equipo utilizado.

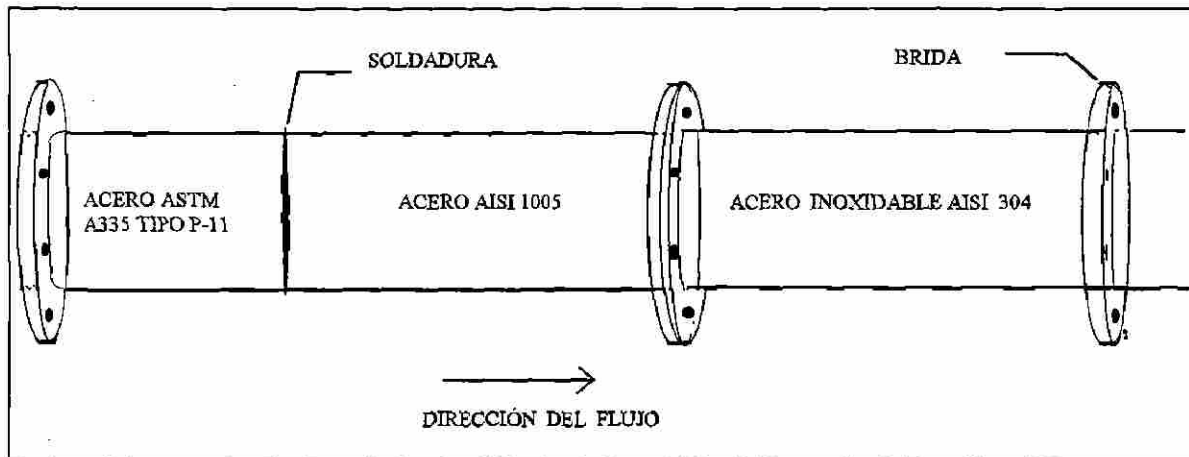


Figura 5.1. Esquema de la línea de tubería en el ensayo.

## 5.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO

La figura 5.2 describe esquemáticamente la planta piloto de transporte neumático en escala de 1/100 del proceso industrial, en este esquema se ven las opciones de transporte que son factibles en el proceso de reducción directa (DRI) con la fabricación del acero en el horno de arco eléctrico (EAF). Los gases inertes, el nitrógeno, el gas natural y gas procesado pueden ser utilizados en la transportación en caliente del hierro esponja.

Los siguientes conceptos básicos son incluidos en esta planta piloto:

- La muestra de captura del DRI en caliente está localizada inmediatamente debajo de una válvula rotatoria del reactor de descarga.
- El transporte es realizado a la misma razón de frecuencia como la razón de producción del reactor.
- El gas proceso utilizado como gas de transporte. Es el mismo que provee la presión y la temperatura a la muestra de captura del DRI. Un desplazamiento positivo del tornillo rotatorio tipo compresor es utilizado para reciclar el gas.
- Un calentador de gas de fuego directo es utilizado para el calentamiento el gas de transporte a una temperatura requerida.
- El gas de proceso que hace posible el circuito de transporte neumático es tomado de la descarga al lado del compresor de reducción del gas.

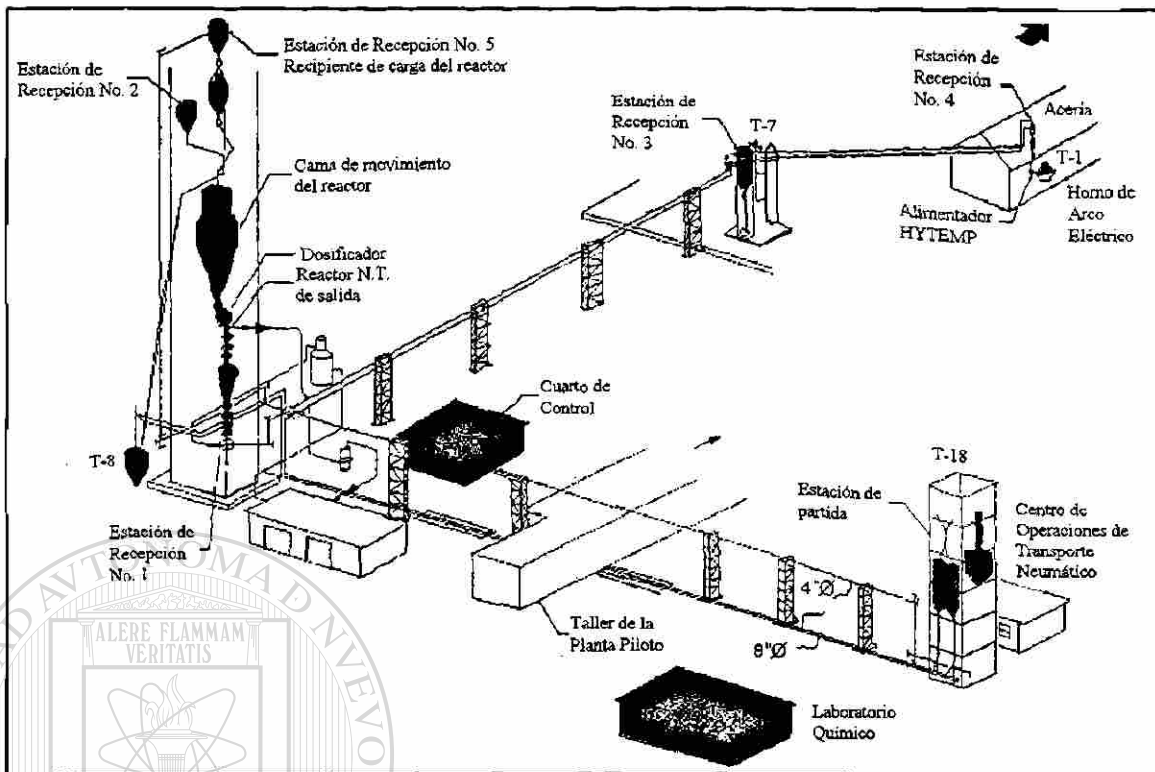


Figura 5.2 Planta piloto de transporte neumático [2].

### 5.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS MATERIALES Y GAS

En la tabla 5.3.1 se da la composición química (% en peso) de los tubos utilizados y se describen las condiciones de operación del ensayo:

Tabla 5.3.1. Composición química (% en peso) de los aceros.

ACERO	Mn	C	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
AISI 1005 NOMINAL	0.35 máx.	0.06 máx.	-	0.04 máx.	0.05 máx.	-	-	-
AISI 1005 MUESTRA	<b>0.25</b>	<b>0.049</b>	<b>0.001</b>	<b>0.016</b>	<b>0.035</b>	<b>0.035</b>	<b>0.027</b>	-
AISI 304 NOMINAL	2	0.08	1	0.045	0.03	18-20	8 - 10.5	-
AISI 304 MUESTRA	<b>1.73</b>	<b>0.07</b>	<b>0.293</b>	<b>0.022</b>	<b>0.003</b>	<b>18.09</b>	<b>10.18</b>	-
ASTM A335-P11 NOMINAL	0.30 - 0.60	0.05 - 0.15	0.5 - 1	0.025	0.025	1-1.5	-	0.44 - 0.65
ASTM A335-P11 MUESTRA	<b>0.47</b>	<b>0.127</b>	<b>0.398</b>	<b>0.02</b>	<b>0.012</b>	<b>1.15</b>	<b>0.039</b>	<b>0.52</b>

Dimensiones de los tubos:      diámetros externos :                      10.16 cm.  
 espesor promedio de la pared :                      0.563 cm.

A continuación se dan las condiciones de prueba de transporte a las que fueron sometidos todos los tubos en la línea de tubería.

Condiciones de prueba:

Tabla 5.3.2. Condiciones del experimento

<b>temperatura</b>	323 - 350 °C
<b>presión</b>	68.95 MPa
<b>materiales transportados</b>	pélets de hierro esponja
<b>granulometría</b>	[0.635 - 0.3175] cm
<b>tiempo total de prueba</b>	15 días
<b>carga transportada</b>	117 toneladas
<b>velocidad de carga.</b>	1 ton/hr.
<b>atmósfera</b>	reductora
<b>velocidad del gas</b>	29.37 m/seg.
<b>densidad del gas</b>	0.35 g/cm <sup>3</sup>

Composición del gas (% en volumen)

Tabla 5.3.3. Composición del gas (% en volumen).

H	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
71%	16%	8%	3-4%	1%	1%

Material erosivo

Las partículas erosivas, pélets de hierro esponja granulares de malla  $\left[ +\frac{1}{4}, -\frac{1}{8} \right]$ , consiste principalmente de hierro como elemento con un pequeño incremento de ganga. Una composición química típica (% en peso) se muestra en la tabla 5.3.4.

Tabla 5.3.4. Composición típica del hierro esponja.

	C	Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	otros
Hierro Esponja	2	90	1.55	5	1.45



## 5.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En principio, para obtener las relaciones cualitativas y cuantitativas del fenómeno de desgaste, una sección de la tubería del sistema de transporte neumático fue compuesta por tres diferentes materiales, segmentos de aproximadamente 30 cm de longitud: acero al carbono AISI 1005, ASTM A335 Grado P-11 y un acero inoxidable AISI 304. Este sistema trabajo durante 15 días con las condiciones de prueba anteriormente mencionadas. Los tubos fueron removidos y la superficie interna fue evaluada por microscopía óptica. Los espesores de las paredes de los tubos fueron determinados por medio de un aparato de ultrasonido. Después de esto, se procedió a la preparación de muestras metalográficas que se analizaron por microscopía óptica, finalmente se realizaron pruebas de microdureza en la superficie interna (cortes transversales) de la sección inferior de los tubos dado que fue la que más desgaste sufrió.

### 5.4.1. MEDICIÓN DE ESPEORES

Al tener los tramos de la tubería se clasificaron: la dirección del flujo de partículas transportadas, el tipo de acero y las secciones que estuvieron en la parte inferior y superior, se utilizó el sistema de identificación de coordenadas cardinales medidas a cuatro posiciones sobre la circunferencia - superior, el fondo y los dos lados (a 90° de la zona superior) como se muestra en la figura 5.3, para tener un mejor manejo en las lecturas. Se optó por cortar los tubos cada 10 cm para mejorar su manipulación al estar realizando las lecturas de espesores. Se realizaron alrededor de 20 mediciones en cada sección, llevando a cabo el tratamiento estadístico de datos para obtener el intervalo de confianza de las lecturas dadas por el aparato de ultra sonido DM2 debidamente calibrado para cada tipo de acero. Este instrumento funciona con el mismo principio de un sonar. Un estello de ultrasonido es transmitido por un transductor sobre el material de prueba. El sonido atraviesa el material de prueba hasta alcanzar un material de características físicas substancialmente diferentes. El sonido es entonces reflectado de nuevo al sensor.

La medición precisa del tiempo requerido que el pulso del ultrasonido hace en total de la travesía en el material es utilizado por el instrumento DM2 para determinar el espesor del material de prueba.

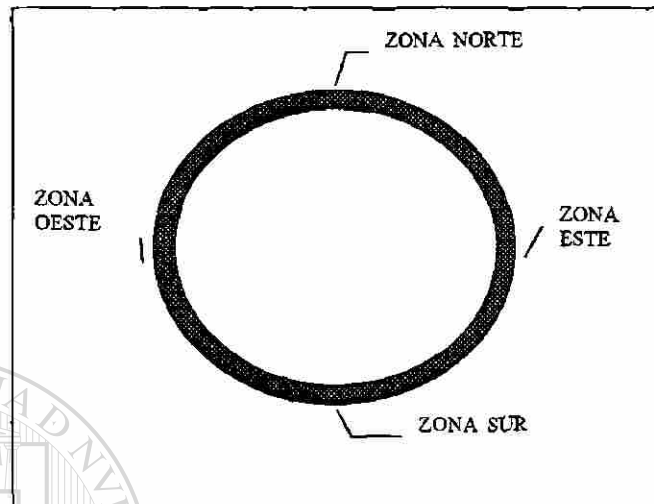


Figura 5.3. Sistema de identificación para lecturas de espesores.

### 5.4.3. PREPARACIÓN METALGRÁFICA

Se seleccionó la sección inferior ya que era la que presentaba a simple vista una banda de desgaste y la mayor pérdida de espesor según resultados de la medición de espesores por ultrasonido. Se procedió a cortar estos tubos para obtener muestras representativas, los cortes analizados fueron transversales para observar una mejor área de deformación subsuperficial.

Una vez obtenidas las muestras debidamente identificadas, se siguió la preparación metalográfica la cual consiste primero en el desbaste grueso, seguido por el pulido fino para obtener superficies de calidad metalográfica. Finalmente se realizó el ataque químico para revelar la microestructura del acero. Se optó por revelar principalmente la frontera de grano para observar la deformación plástica de los granos subsuperficiales.

Una vez obtenidas las imágenes en el microscopio óptico se compararon con las imágenes de superficies de los tubos no sometidos a desgaste también debidamente identificadas. A continuación se describen los reactivos utilizados en el ataque químico para los tres tipos de aceros y el procedimiento de ataque [11, 15]:

*Acero al Carbono*. Reactivo utilizado:

<i>Nombre común</i>	<i>Composición</i>	<i>Procedimiento</i>
Nital	98% alcohol 2% HNO <sub>3</sub>	Por inmersión de la superficie durante 20 - 45 seg. Limpiándola con alcohol y secándola con aire tibio.

*Acero tipo P-11*. Reactivo utilizado:

<i>Nombre común</i>	<i>Composición</i>	<i>Procedimiento</i>
Nital	98% alcohol 2% HNO <sub>3</sub>	Es inmersa la superficie durante 20 - 45 seg. Limpiándola con alcohol y secándola con aire tibio.

*Acero AISI 304*. Reactivo utilizado:

<i>Nombre común</i>	<i>Composición</i>	<i>Procedimiento</i>
Acido Nítrico concentrado	93% HNO <sub>3</sub> 7% alcohol	Se realiza electrolíticamente con un voltaje de 1.1 volts durante 30 - 60seg. Limpiándola con alcohol y secándola con aire tibio.

Se describe el ataque electrolítico en la figura 5.4.

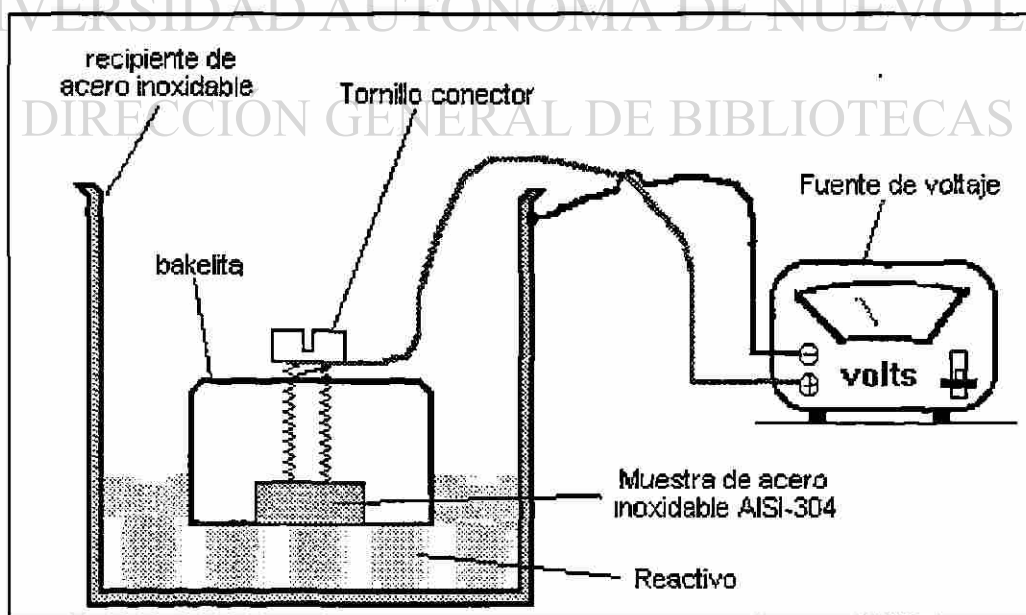


Figura 5.4. Descripción de los instrumentos usados en el ataque del AISI 304.

#### 5.4.4. ENSAYOS DE MICRODUREZAS

Los ensayos de microdureza se realizaron con un microdurómetro con una carga de 25 g y un tiempo de 10 segundos, se seleccionó esta carga dado que las zonas de deformación observadas fueron aproximadamente de 200  $\mu\text{m}$  de la superficie interior hacia la exterior (de la pared del tubo) del corte transversal utilizado y la huella de indentación es en promedio de 10  $\mu\text{m}$ . Se realizaron 20 lecturas de microdureza y se elaboró el tratamiento de datos correspondiente. En la figura 5.5 se describe las zonas de indentación realizadas para cada tipo de acero.

Aunque el área deformada plásticamente de los aceros desgastados no se presenta uniforme, según las imágenes mostradas por microscopía óptica, se prefirió realizar los ensayos de microdureza en dichas áreas, ya que representan la zona de interés para las pruebas de desgaste.

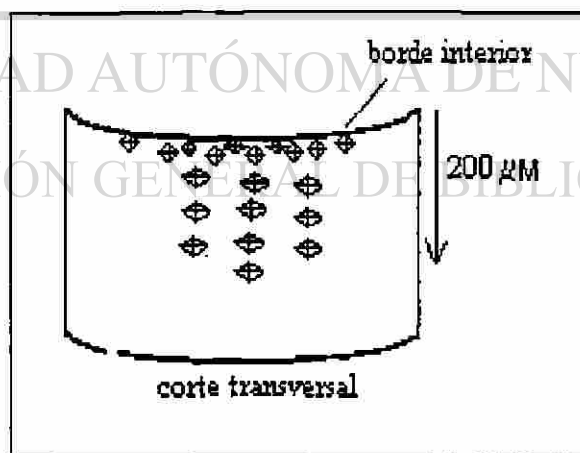


Figura 5.5. Descripción de los ensayos de microdureza.

## 5.5 EQUIPO UTILIZADO

1.- Ultrasonido

Marca: Krautkramer Branson

Modelo: DM2 LCD

Resolución:  $\pm 0.0001$ in. ( $\pm 0.1$ mm)

2.- Microscopio óptico

Marca: Olympus

Modelo: PMG3

Microscopio de platina invertida, con campo claro, campo oscuro, luz polarizada, contraste Nomarski y filtros integrados.

3.- Microdurómetro

Marca: Shimadzu

Identador: diamante pirámidal Vickers

Micrómetro ocular:

Escala máxima de medida: 200 $\mu$ m.

Escala estándar: Cada división de 20 $\mu$ m.

Escala de medición: Cada división de 0.5 $\mu$ m.

El método de carga es de palanca por un sistema eléctrico de carga automática y el área de campo es de 120 X 120 mm.

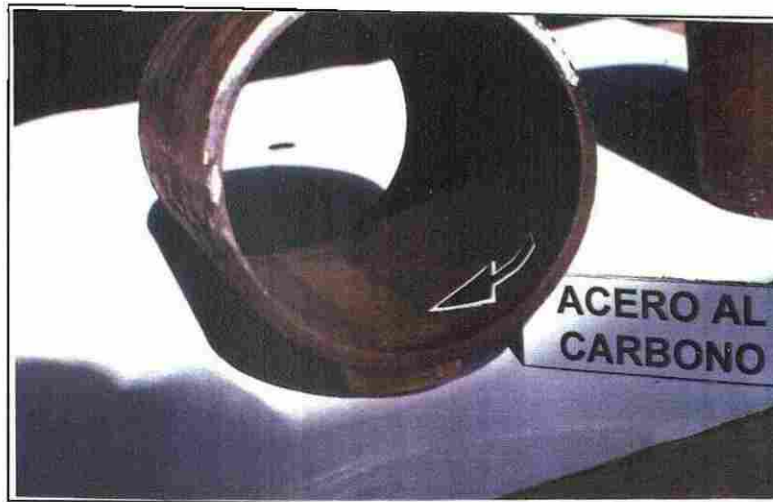
## CAPÍTULO 6

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en este estudio. Como una primera parte se muestran los tramos de tubos después de removerlos de la línea principal de la planta piloto y se dan los datos obtenidos en las mediciones de espesores, la pérdida estimada de espesor por sección de cada acero y se calcula la constante de desgaste dada por la ecuación de Archard [13]. Como una segunda parte se dan los resultados relacionados directamente con la microestructura como las metalografías para las diferentes condiciones del material y las gráficas de microdureza contra profundidad de la capa de deformación plástica. Con lo referente a la discusión se compara cuantitativamente el volumen perdido de los tres tipos de aceros y cambios observados en las microdurezas. Se propone un modelo que nos indica el desgaste sufrido en condiciones de proceso y se predice el comportamiento a altas temperaturas.

### 6.1 INSPECCIÓN VISUAL

Después de efectuar las pruebas se observa que en la zona sur de los tres tubos se presentó una banda de desgaste. Esta banda se muestra en la figura 6.1 (a), (b) y (c), respectivamente para los aceros al carbono, inoxidable 304 y tipo P-11. Esta tiene un arco de aproximadamente 3 cm a lo largo de los tubos. La banda de desgaste se observa con mayor intensidad en el acero al carbono y presenta adherencia de polvo del fierro esponja transportado. La superficie interna del acero inoxidable 304 se ve relativamente menos dañada. El acero tipo P-11 presenta también esa banda.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.1 (a) Fotografía del tramo de tubo del acero al carbono donde se observa en la zona inferior la banda de desgaste. (b) Acero inoxidable 304 también en este acero es apreciable una banda de desgaste de aproximadamente 3 cm de arco. (c) Acero tipo P-11, en este acero se presenta la banda de desgaste muy levemente.

## 6.2 ESPEORES DE PARED

Se realizaron 20 mediciones por cada sección (figura 5.3) del tubo, obteniéndose el promedio, desviación estándar y varianza suponiendo que los datos siguen una distribución normal, por lo cual se tiene un intervalo de confianza del 95%. Estos resultados se tienen antes y después de iniciar la prueba para los aceros al carbono e inoxidable 304, para el acero tipo P-11 se tienen sólo los finales (después de la prueba). Dados los valores finales de los espesores, se obtienen las pérdidas del espesor de la pared para cada sección. En las siguientes tablas se resumen los resultados para cada tipo de acero:

### ACERO AL CARBONO

A continuación se describen los datos iniciales de los espesores de cada sección del tubo acero al carbono:

Tabla 6.2.1. Datos iniciales de espesor. Identificación a 90°. Acero al carbono.

	SUR (ZONA INFERIOR)	ESTE	NORTE (ZONA SUPERIOR)	OESTE
PROMEDIO	5.024 mm	5.003 mm	4.993 mm	5.044 mm
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.4	0.6320	0.583	0.734
VARIANZA	0.16	0.4	0.34	0.54

En la siguiente tabla se muestran los promedios de cada sección del tubo desgastado en cuatro diferentes posiciones, la distancia promedio de cada posición es aproximadamente 10 cm.

Tabla 6.2.2. Espesores finales del acero al carbono.

	SUR (ZONA INFERIOR)	ESTE	NORTE (ZONA SUPERIOR)	OESTE
POSICIÓN 1	4.892 mm	5.022 mm	4.998 mm	4.927 mm
POSICIÓN 2	4.8907 mm	4.969 mm	4.9314 mm	4.932 mm
POSICIÓN 3	4.9136 mm	4.9364 mm	4.953 mm	4.902 mm
POSICIÓN 4	4.8717 mm	4.933 mm	4.906 mm	5.012 mm
<b>PROMEDIO</b>	<b>4.892 mm</b>	<b>4.9657 mm</b>	<b>4.9474 mm</b>	<b>4.943 mm</b>
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>	<b>0.584</b>	<b>1.411</b>	<b>1.34</b>	<b>1.630</b>
<b>VARIANZA</b>	<b>0.341</b>	<b>1.992</b>	<b>1.795</b>	<b>2.659</b>



Diferencias de espesores. La siguiente tabla da los resultados finales de la pérdida de espesor por sección y el porcentaje de desgaste sufrido.

Tabla 6.2.3. Diferencias de espesores y porcentaje de pérdida. Acero al carbono.

	DIFERENCIAS DE ESPESORES	PERDIDA DE ESPESOR(mm)	% DE PERDIDA INICIAL
SUR (ZONA INFERIOR)	5.024 - 4.892 =	0.132	0.026
ESTE	5.003 - 4.965 =	0.0381	0.007
NORTE (ZONA SUPERIOR)	4.993 - 4.947 =	0.0462	0.009
OESTE	5.044 - 4.943 =	0.1016	0.020

Cálculos de la pérdida de volumen y de la constante de Archard para el acero al carbono en la sección sur (zona inferior), dado que es la que sufrió mayor pérdida de espesor.

Datos de las muestras:

Dureza (H):	202 HV
Longitud inicial (L):	30.5 cm
Área de desgaste (A):	2.701 cm <sup>2</sup>
Volumen desgastado (V):	4.70 x 10 <sup>-6</sup> cm <sup>3</sup> /ton
Carga aplicada (W):	3.313 kg

Con la ecuación de Archard [13] para el mecanismo de desgaste abrasivo obtenemos la constante de desgaste que nos indica la probabilidad de desprendimiento de material al estar en contacto con la superficie.

La ecuación (2) indica el máximo volumen de desgaste que puede ocurrir. Sustituyendo los valores anteriores encontramos que el valor para la constante K es de 1.0 x 10<sup>-3</sup> para el acero al carbono.

### ACERO INOXIDABLE TIPO 304

A continuación se describen los datos iniciales de los espesores de cada sección del tubo acero inoxidable 304:

Tabla 6.2.4. Datos iniciales de espesor. Identificación a 90°. Acero inoxidable.

	SUR (ZONA INFERIOR)	ESTE	NORTE (ZONA SUPERIOR)	OESTE
PROMEDIO	6.148 mm	5.862 mm	6.146 mm	6 mm
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.80	0.74	0.83	0.67
VARIANZA	0.64	0.56	0.7	0.46

En la siguiente tabla se muestran los promedios de cada sección del tubo desgastado en cuatro diferentes posiciones, la distancia promedio de cada posición es aproximadamente 10 cm.

Tabla 6.2.5. Espesores finales del acero inoxidable 304.

	SUR (ZONA INFERIOR)	ESTE	NORTE (ZONA SUPERIOR)	OESTE
POSICIÓN 1	6.112 mm	5.878 mm	6.120 mm	6.004 mm
POSICIÓN 2	6.052 mm	5.835 mm	6.151 mm	5.930 mm
POSICIÓN 3	6.024 mm	5.932 mm	6.028 mm	6.031 mm
POSICIÓN 4	6.002 mm	5.859 mm	6.033 mm	5.953 mm
PROMEDIO	6.047 mm	5.876 mm	6.083 mm	5.980 mm
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1.627	1.4	2.11	1.56
VARIANZA	2.648	1.95	4.45	2.45

### Diferencias de espesores

La siguiente tabla da los resultados finales de la pérdida de espesor por sección y el porcentaje de desgaste sufrido.

Tabla 6.2.6. Diferencias de espesores y porcentaje de pérdida. Acero inoxidable.

	DIFERENCIAS DE ESPESORES	PERDIDA DE ESPESOR(mm)	% DE PERDIDA INICIAL
SUR (ZONA INFERIOR)	6.149 - 6.047 =	0.101	0.016
ESTE	5.862 - 5.876 =	-0.014	+ 0.002
NORTE (ZONA SUPERIOR)	6.146 - 6.083 =	0.063	0.010
OESTE	6.0 - 5.979 =	0.019	0.003

Cálculos de la pérdida de volumen y de la constante de Archard para el acero inoxidable en la sección sur (zona inferior), dado que es la que sufrió mayor pérdida de espesor se enfocan los siguientes resultados.

#### Datos de las muestras:

Dureza (H):	294 HV
Longitud inicial (L):	30.5 cm
Área de desgaste (A):	3.454 cm <sup>2</sup>
Volumen desgastado (V):	4.54 x 10 <sup>-6</sup> cm <sup>3</sup> /ton
Carga aplicada (W):	2.93 kg

Con la ecuación de Archard [13] para el mecanismo de desgaste abrasivo obtenemos la constante de desgaste que nos indica la probabilidad de desprendimiento de material al estar en contacto con la superficie.

La ecuación (2) indica el máximo volumen de desgaste que puede ocurrir. Sustituyendo los valores anteriores encontramos que el valor para la constante K es de 1.4 x 10<sup>-3</sup> para el acero inoxidable 304.

### ACERO AISI A335 TIPO P-11

A continuación se describen los datos iniciales de los espesores de cada sección del tubo acero tipo P-11:

Tabla 6.2.7. Datos iniciales de espesor. Identificación a 90°. Acero P-11.

	SUR (ZONA INFERIOR)	ESTE	NORTE (ZONA SUPERIOR)	OESTE
PROMEDIO	6.134 mm	6.172 mm	5.943 mm	5.60 mm
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	5.5	3	6	0.5
VARIANZA	30.25	9	36	0.25

En la siguiente tabla se muestran los promedios de cada sección del tubo desgastado en tres diferentes posiciones, la distancia promedio de cada posición es aproximadamente 8 cm.

Tabla 6.2.8. Espesores finales del acero tipo P-11.

	SUR (ZONA INFERIOR)	ESTE	NORTE (ZONA SUPERIOR)	OESTE
POSICIÓN 1	6.22 mm	5.85 mm	5.82 mm	6.23 mm
POSICIÓN 2	6.19 mm	5.83 mm	5.86 mm	6.23 mm
POSICIÓN 3	6.13 mm	5.70 mm	5.80 mm	6.22 mm
PROMEDIO	6.18 mm	5.79 mm	5.83 mm	6.23 mm
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1.37	2.55	1.07	0.24
VARIANZA	1.89	6.54	1.14	0.06

Diferencias de espesores. La siguiente tabla 6.2.9. da los resultados finales de la pérdida de espesor por sección y el porcentaje de desgaste sufrido.

Tabla 6.2.9. Diferencias de espesores y porcentaje de pérdida. Acero P-11.

	DIFERENCIAS DE ESPESORES	PERDIDA DE ESPESOR(mm)	% DE PERDIDA INICIAL
SUR (ZONA INFERIOR)	6.15 - 6.17 =	-0.013	+0.002
ESTE	6.17 - 5.77 =	0.396	0.064
NORTE (ZONA SUPERIOR)	5.94 - 5.82 =	0.118	0.019
OESTE	5.61 - 6.22 =	-0.614	+0.109

Con respecto a este acero se obtuvieron algunas irregularidades dado que la información inicial de los espesores fue dada a esta investigación, dado que no existió tramo de tubo testigo (sin someterlo a desgaste). Por lo tanto, el valor de pérdida de espesor por diferencia de medición no es confiable para este acero. Sin embargo se realizan mediciones de la zona cercana a la parte sur y sobre esta zona, donde se encuentra una banda de desgaste (figura 6.1 (c)). Estimando esta área se toman los valores para la ecuación (2) de Archard.

Datos de las muestras:

Dureza (H):	243 HV
Longitud inicial (L):	16.5 cm
Área de desgaste (A):	3.31 cm <sup>2</sup>
Volumen desgastado (V):	3.11 x 10 <sup>-7</sup> cm <sup>3</sup> /ton
Carga aplicada (W):	1.5 kg

La ecuación (2) indica el máximo volumen de desgaste que puede ocurrir.

Sustituyendo los valores anteriores encontramos que el valor para la constante K es  $3.17 \times 10^{-3}$  para el acero tipo P-11.

Los resultados de las tablas 6.2.3, 6.2.6, 6.2.9 se representan gráficamente en las figuras 6.2, 6.3 y 6.4 donde se muestra las diferencias de espesor por el total de toneladas transportadas para los tres tipos de aceros en cada sección identificada.

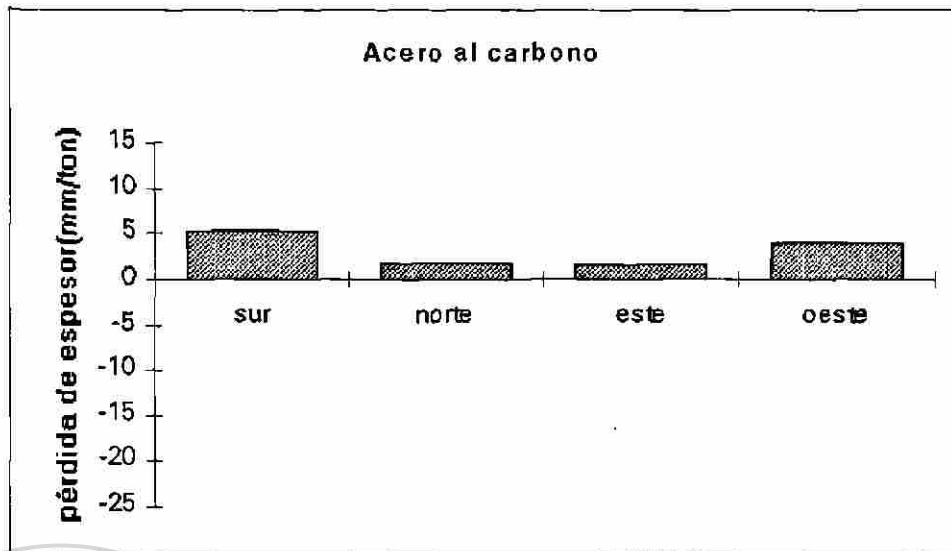


Figura 6.2 Diferencias de espesor de las cuatro secciones del acero 1005.

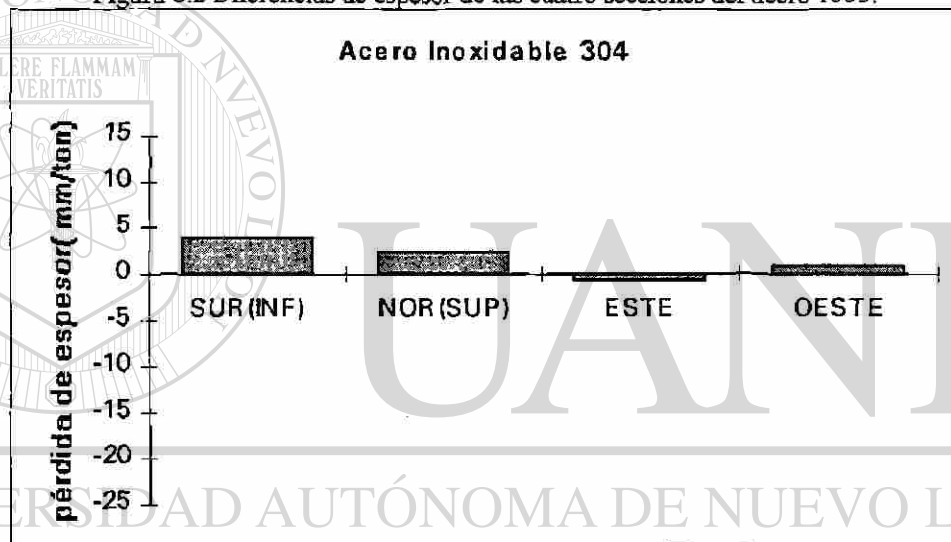


Figura 6.3 Diferencias de espesor de las cuatro secciones del acero inox. 304.

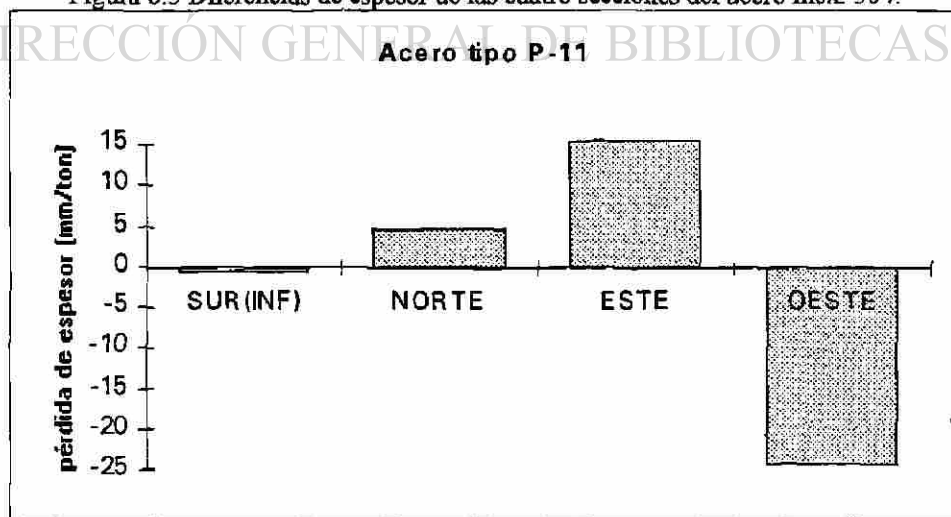


Figura 6.4 Diferencias de espesor de las cuatro secciones del acero tipo P-11.

En las figuras anteriores se grafica la pérdida de espesor por el total de toneladas transportadas que sufrieron las cuatro secciones estudiadas, se puede observar que la zona inferior (sur) tiene la mayor pérdida de espesor, lo que era de esperarse dado que es la que está sometida a altas cargas del material y a bajas velocidades. La zona superior presenta menor pérdida de espesor, esto debido al menor contacto con el flujo de sólidos. Los dos lados del tubo presentan una pérdida de espesor no simétrica, como se observa en las figuras 6.2 y 6.3 tal comportamiento involucra una variación en el flujo de partículas por efecto de presiones de caída puesto que los segmentos fueron colocados en una sección cerca de la válvula rotatoria del reactor de descarga del hierro esponja.

La figura 6.3, también presenta un comportamiento similar que el acero al carbono, la zona sur es la que sufrió mayor pérdida de espesor. En el acero inoxidable se observa que la zona superior tuvo mayor desgaste que los lados del tubo tal medición es considerable y el lado este tiene un incremento de espesor por lo que se tiene dos posibilidades de estos resultados que exista un error en la lecturas iniciales y finales o que exista una probable adherencia del material transportado en la zona donde se observa un incremento de espesor, lo que no fue posible constatar en este trabajo.

---

La figura 6.4 muestra los resultados del acero tipo P-11, en la que se encuentra una total incongruencia con los otros aceros dado que no se tuvo el segmento de tubería sin desgastar para realizar las mediciones iniciales como en el caso de los otros aceros, por lo tanto teniendo en consideración la importancia de los datos cuantitativos en el desgaste no podemos concluir sobre este acero.

### 6.3 METALOGRAFÍA

#### *ACERO AL CARBONO.*

A continuación se describen las micrografías (figuras 6.5, 6.6, 6.7, 6.8) obtenidas del acero al carbono antes y después de someterlo a prueba. Las muestras del acero AISI 1005 presentan una matriz ferrítica con una distribución uniforme de tamaño de grano promedio de  $8.3 \mu\text{m}$  con una desviación estándar de  $2.3 \mu\text{m}$  (tamaño 6 según la norma ASTM E112 - 88) según la figura 6.5. Al obtener la muestra después de la prueba se observa en la figura 6.6 una deformación plástica en la subsuperficie de aproximadamente  $66 \mu\text{m}$  de profundidad, ésta no se encuentra uniformemente en toda el área analizada, por lo que se tiene una variación en la profundidad de la capa deformada plásticamente. Las zonas deformadas presentan un alargamiento de los granos subsuperficiales provocando la formación de microgrietas como se observa en la figura 6.7. Algunas zonas deformadas plásticamente presentan también desprendimientos de material, las cuales pueden llegar hasta  $15 \mu\text{m}$  de profundidad como se observa en la figura 6.8. Debido a que el acero presenta una dureza menor en comparación con los otros dos aceros la deformación que sufrió fue mayor ya que la resistencia a la abrasión es menor, puesto que está relacionada con el contenido de carbono y la formación de carburos.

Las figuras 6.9 (a), (b) muestran el daño sufrido en la zona superior del tubo, en ellas se observa que no ha sufrido un daño severo la parte superior. Las áreas que presentan deformación plástica son de aproximadamente  $25 \mu\text{m}$ , la magnitud de desgaste en esta zona es menor que en la zona inferior del tubo, esto es debido a que no existe un contacto directo con el flujo de sólidos en el transporte de fase densa, aunque existen impactos de sólidos debido a la velocidad de saltación que algunas partículas desarrollan en la zona superior del material.





Figura 6.5. Microestructura del AISI 1005 sin desgastar, zona inferior a 200X

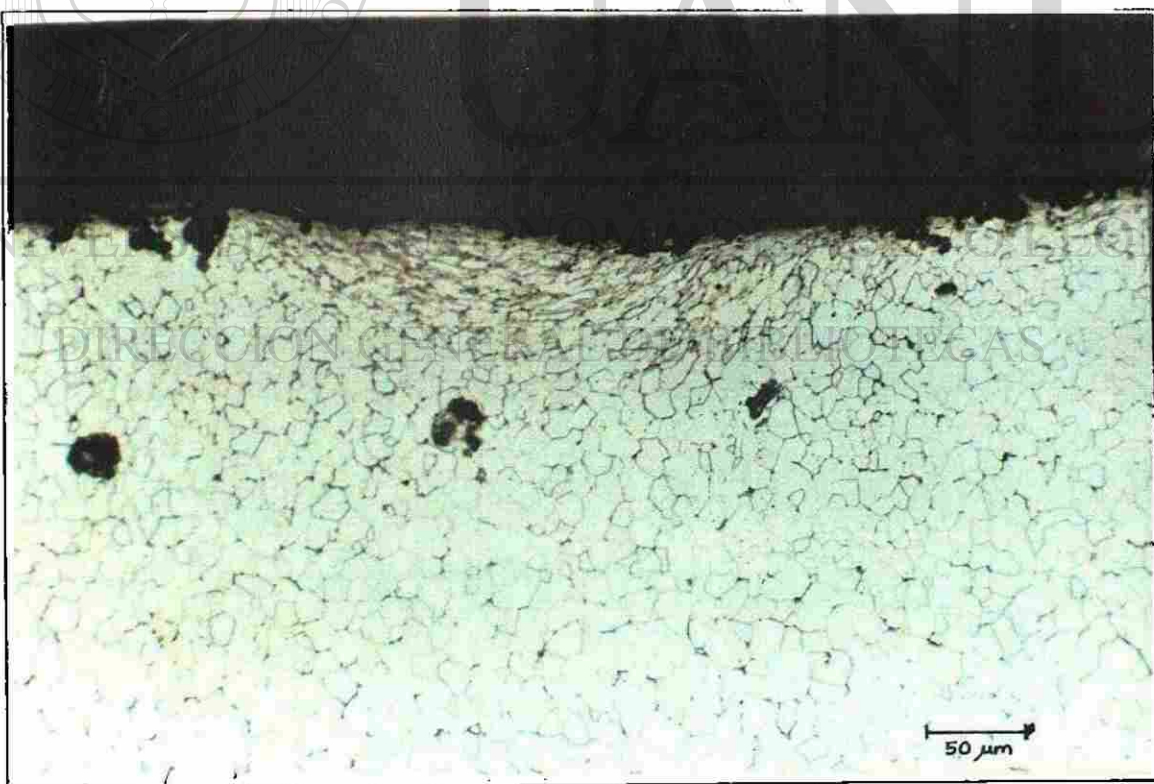


Figura 6.6. Microestructura del AISI 1005 desgastado, zona inferior deformada a 200X .

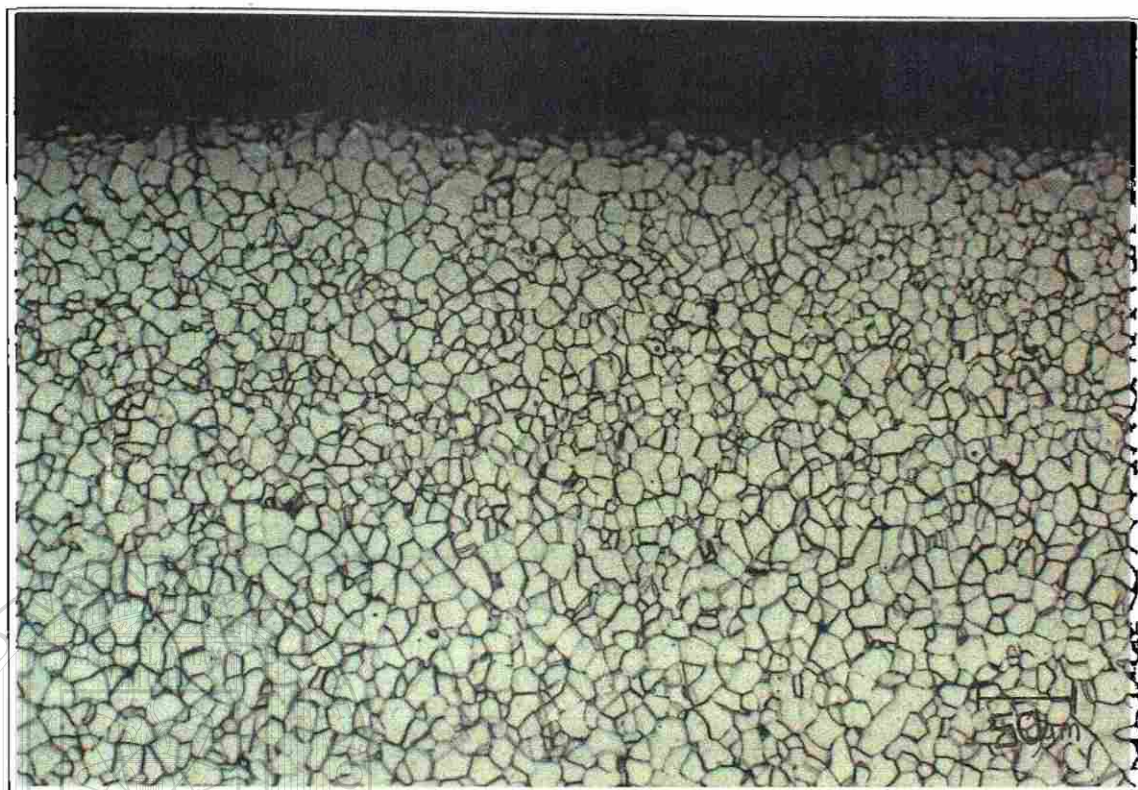


Figura 6.7. AISI 1005 zona inferior desgastada a 400X



Figura 6.8. AISI 1005 zona inferior desgastada a 400X.





(a)



(b)

Figura 6.9 (a) Acero AISI 1005 desgastado zona superior. borde interior a 400 x. (b) borde exterior 200x.

### *ACERO INOXIDABLE 304.*

A continuación se describen las micrografías (figuras 6.10, 6.11, 6.12, 6.13) obtenidas del acero inoxidable 304 antes y después de someterlo a prueba. Las muestras del acero inoxidable presentan una matriz austenítica con una distribución uniforme de tamaño de grano promedio de  $58.63 \mu\text{m}$  con una desviación estándar de  $5.7 \mu\text{m}$  (tamaño 2 según la norma ASTM E 112 - 88) según la figura 6.10. Con respecto al testigo (muestra sin desgastar) se observa en la figura 6.11 una capa delgada de deformación plástica en la superficie interior de aproximadamente  $50 \mu\text{m}$ , como en el caso del acero al carbono ésta no se encuentra uniformemente en toda el área analizada, incluso existe mayor región que no tiene daño superficial. En las áreas de mayor desgaste se observan desprendimientos de material como se observa en la figura 6.12. Esto es debido al efecto de los impactos de los sólidos que viajan tangencialmente en la tubería horizontal.

Los granos austeníticos del acero inoxidable 304, presentan una leve zona deformada en la que se puede observar el inicio de la formación de micro grietas como se puede ver en la figura 6.13, la dureza de este material es mayor que los otros aceros lo que representa una mayor resistencia a la deformación que se está llevando a cabo en la sub superficie.

También se analizaron muestras de la zona superior donde se encontró que las áreas de deformación son mínimas y la profundidad de algunas de ellas fue aproximadamente  $10 \mu\text{m}$ . Las figuras 6.14 (a), (b) muestran el daño sufrido en la zona superior del tubo, en ellas se observa claramente que no ha sufrido un daño severo la zona superior incluso se puede llegar a pensar que el daño podría ser nulo. Al igual que el acero AISI 1005 la zona superior estuvo sometida a menor contacto con el flujo de sólidos.



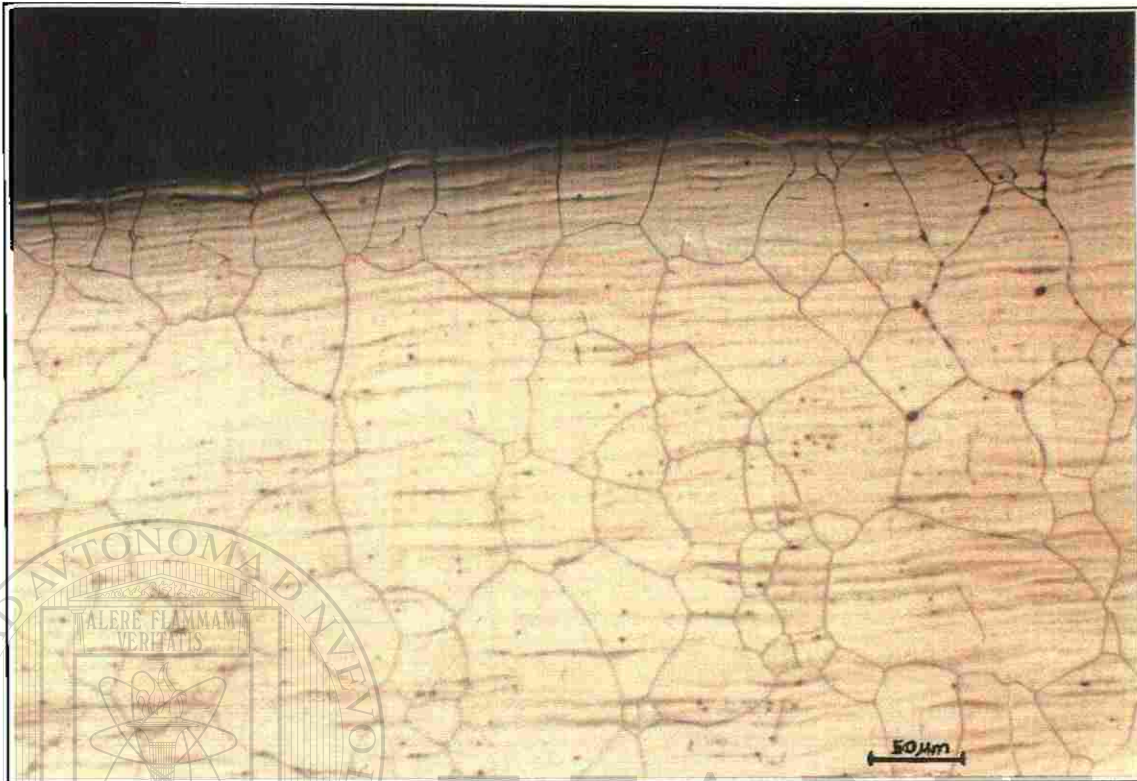


Figura 6.10. Microestructura del Inox. 304 sin desgastar, zona inferior a 200X.



Figura 6.11. Microestructura del Inox. 304 desgastado, zona inferior deformada a 200X .

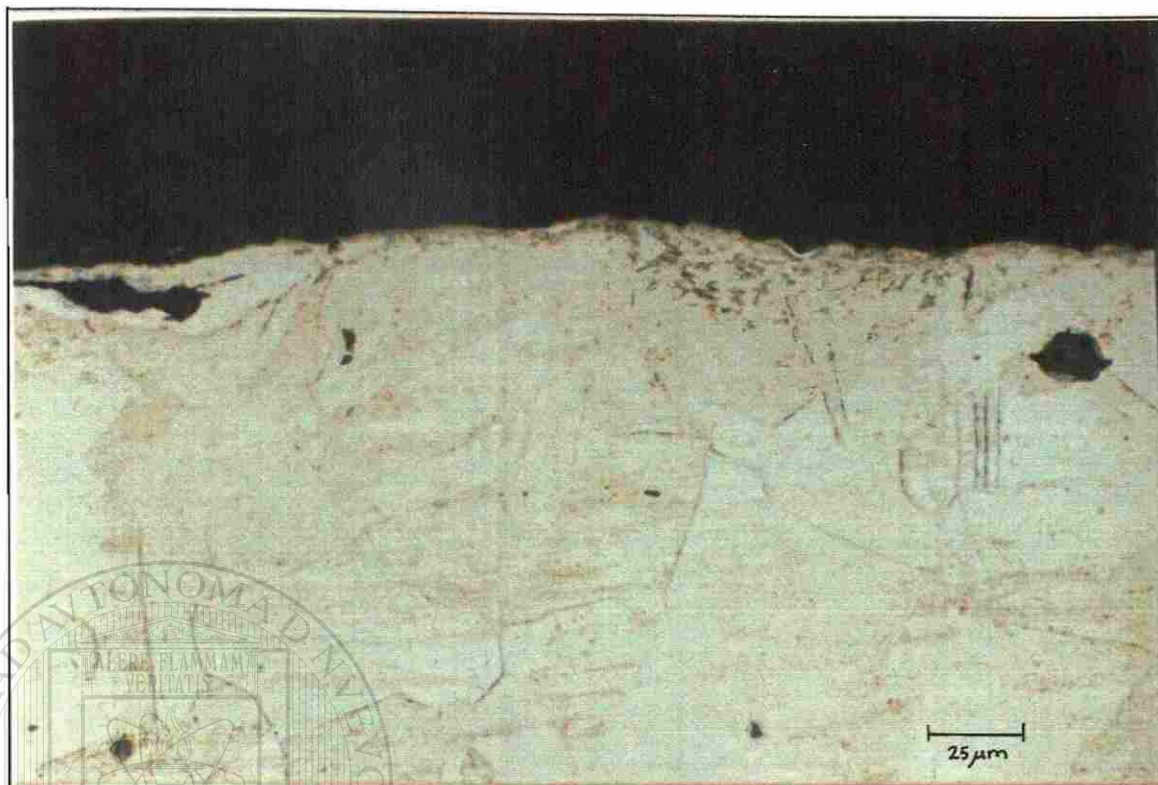
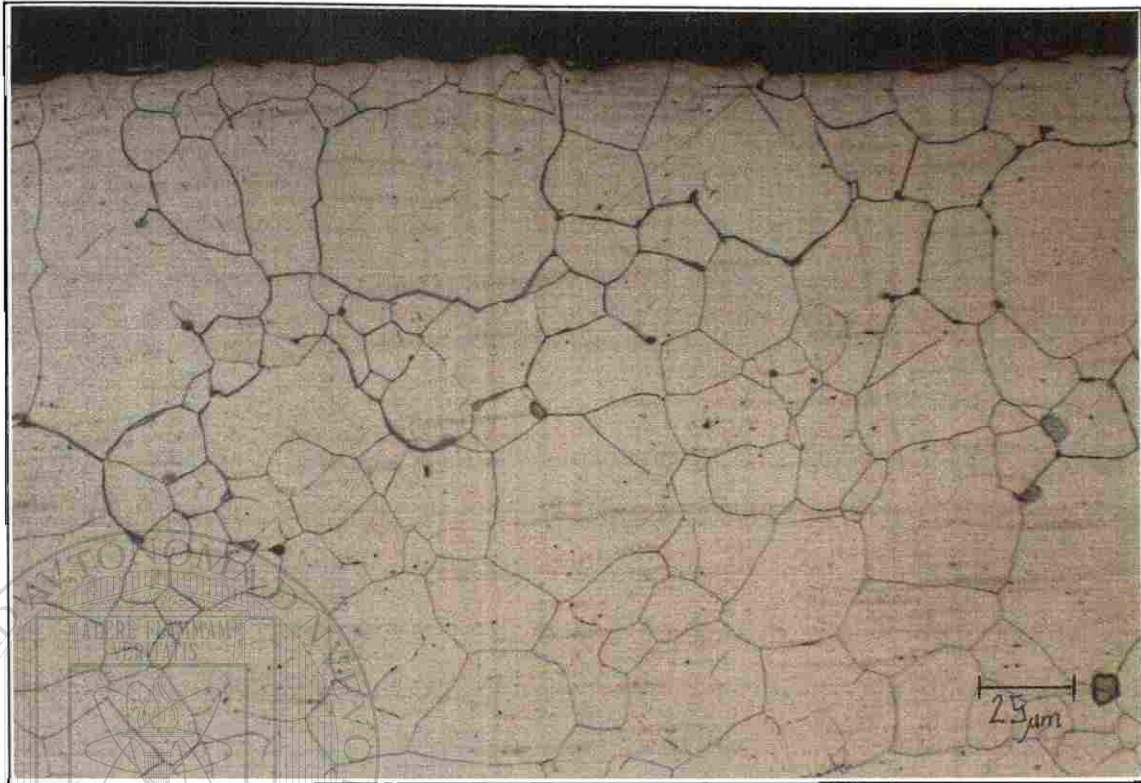


Figura 6.12. Inox. 304 zona inferior desgastada a 400X.



Figura 6.13. Inox. 304 zona inferior desgastada a 400X.





(a)



(b)

Figura 14 (a) Acero Inoxidable 304. Zona superior, borde interior a 400x. (b) borde interior a 200 x.

### *ACERO AISI A335 TIPO P-11.*

A continuación se describen las micrografías (figuras 6.15, 6.16, 6.17, 6.18) obtenidas del acero tipo P-11 antes y después de someterlo a prueba. Las muestras del acero P-11 presenta una microestructura formada por una matriz de ferrita (áreas claras), con islas de perlita (áreas oscuras) con una distribución uniforme de tamaño de grano promedio de  $15.32 \mu\text{m}$  con una desviación estándar de  $1.8 \mu\text{m}$  (tamaño 5 según la norma ASTM E 112 - 88) ver figura 6.15. El testigo presenta una decarburización de aproximadamente  $200 \mu\text{m}$  en la superficie interna y externa de la pared del tubo debido al proceso de manufactura, lo que implica que la superficie interna de la pared que está en contacto con el material transportado está formado por ferrita. Al obtener la muestra después de la prueba se observa en la figura 6.16 una deformación plástica en la superficie interior de aproximadamente  $41 \mu\text{m}$ , ésta no se encuentra uniformemente en toda el área analizada, como puede observarse en la micrografía. Al igual que los otros aceros se observan en la figura 6.17 desprendimientos de material.

Dado que este tubo presenta una decarburización tenemos una menor resistencia a la penetración de la deformación. Este acero presenta una dureza promedio en la superficie mayor que el acero al carbono, por lo que presentó menor profundidad de la capa deformada. Los granos deformados presentan un alargamiento en lo que es el flujo plástico que se realizó en la zona inferior del tubo como se puede observar en la figura 6.18. El transporte de fase densa del material, donde el ángulo de impacto de los sólidos fue cero o muy pequeño, afecta de una manera grave a esta zona, si la concentración de sólidos o la razón del flujo de sólidos aumenta, el desgaste que se lleve a cabo aumentará considerablemente.

Al igual que los aceros al carbono e inoxidable, las muestras tomadas de la zona superior del tubo del acero A335- P11, como se muestran en las figuras 6.19 (a) y (b), no presentan un daño tan severo como en la zona inferior y, comparándola con la deformación plástica sufrida en esa zona, se puede estimar que es de aproximadamente  $20 \mu\text{m}$ , lo que se comprueba en las lecturas de espesores.





Figura 6.15. Microestructura del P-11 sin desgastar, zona inferior a 200X.



Figura 6.16. Microestructura del P-11 desgastado, zona inferior deformada a 200X .

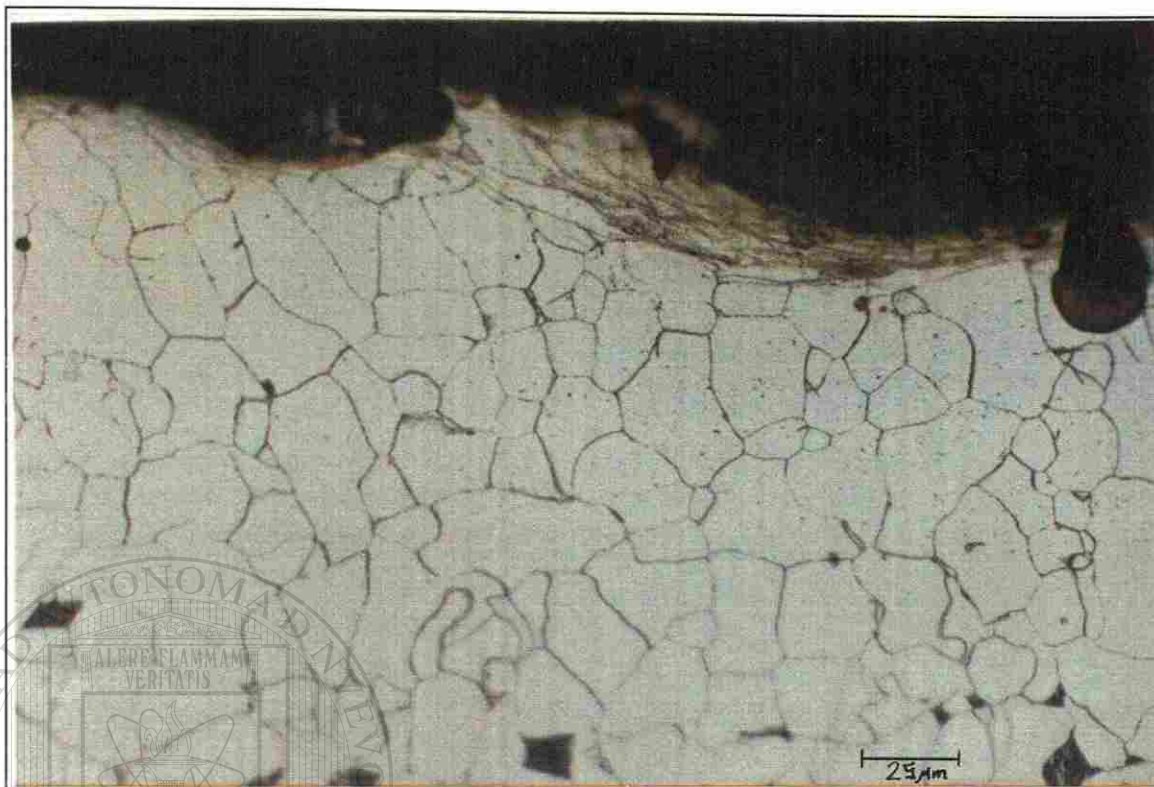


Figura 6.17. Acero P-11 zona inferior desgastada a 400X.

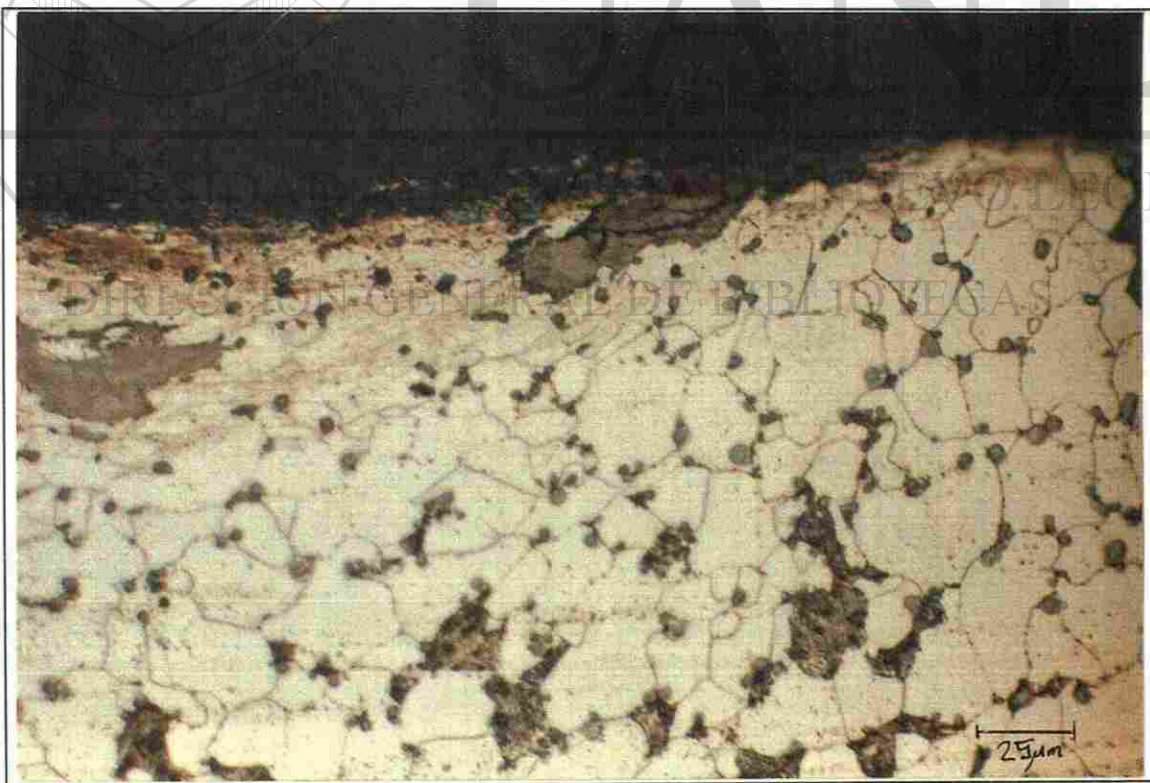


Figura 6.18. Acero P-11 zona inferior desgastada a 400X.





(a)



(b)

Figura 19 (a) Acero P-11 Desgastado. Zona superior, borde interior a 200x. (b) borde interior a 200 x.

## 6.4 MICRODUREZAS

### ACERO AL CARBONO.

Recopilando los datos del ensayo de microdureza antes y después de la prueba y elaborando un tratamiento estadístico, se dan a continuación el comportamiento de los datos en función de la profundidad de la superficie inferior al interior de la pared del tubo. En las gráficas de las figuras 6.20 y 6.21 se observa un endurecimiento en la sub superficie debido a la deformación plástica que se llevó a cabo, la profundidad alcanzada es aproximadamente de 66  $\mu\text{m}$  y se aprecia un reblandecimiento del material base del acero AISI 1005 una dureza promedio inicial de 202 HV a una dureza promedio de 177 HV. Este reblandecimiento se debe a un recocido parcial, el cual conduce a una recuperación del acero al carbono que es sometido durante un intervalo de tiempo a una temperatura de 323  $^{\circ}\text{C}$ . Durante la recuperación, la resistencia del acero trabajado se reduce sólo ligeramente, pero su ductilidad generalmente aumenta [24]. Se obtuvo la desviación estándar de la media de todos los datos de microdurezas para conseguir el intervalo de confianza como se describe en la tabla 6.4.1.

Tabla 6.4.1 Valores promedios de microdureza Vickers en la zona inferior del acero al carbono en la zona no deformada.

	INICIAL	FINAL
$X + 2\sigma$	229	201
$X$	202	177
$X - 2\sigma$	175	153

En la figura 6.21 se observa el comportamiento de las microdurezas del acero AISI 1005 desgastado. El comportamiento observado de la gráfica sigue la forma de una función de potencia que se puede expresar de la siguiente forma:

$$D(\text{HV}) = 585.51 x^{-0.23}$$

donde: D = microdureza del material y x = a la profundidad de indentación.

Tal relación nos da una idea del endurecimiento que se lleva a cabo en el proceso de transporte de material en fase densa.

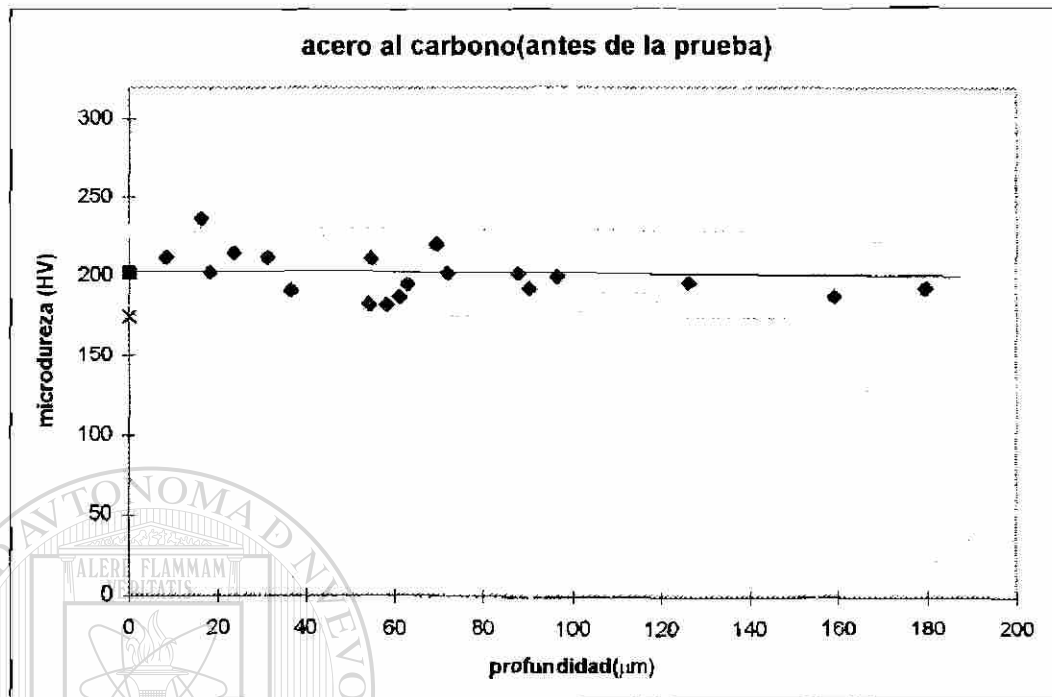


Figura 6.20 Gráfica de microdureza inicial del acero al carbono.

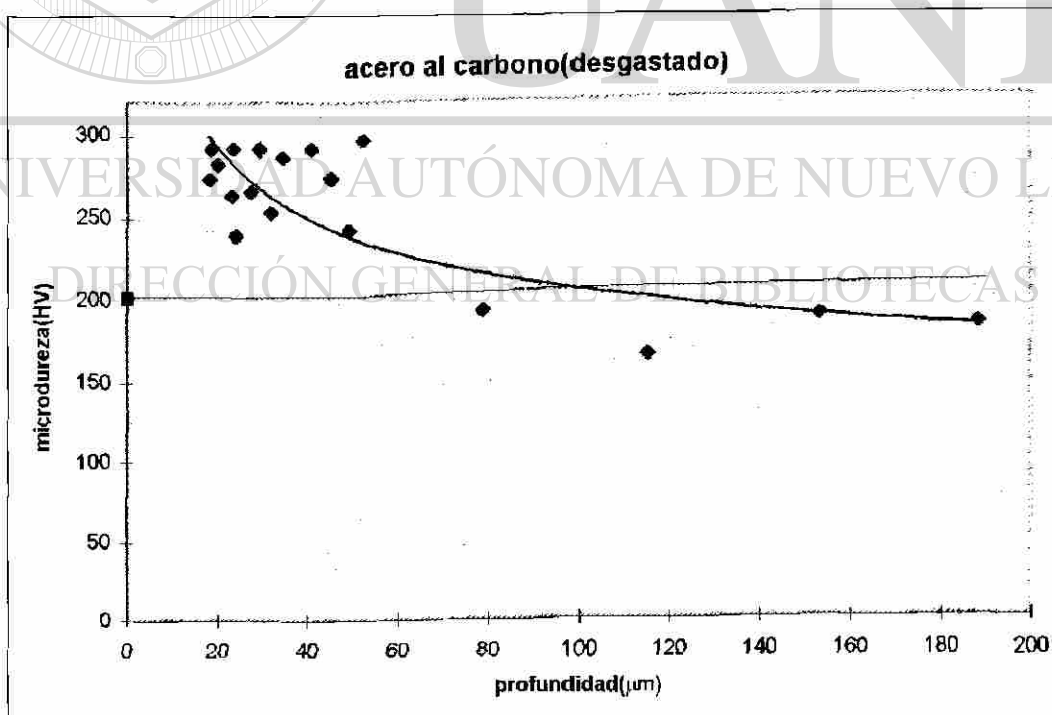


Figura 6.21 Gráfica de microdureza final de la superficie interna deformada.

### ACERO INOXIDABLE 304.

De la información obtenida de los datos de los ensayos de microdurezas antes y después de la prueba y elaborando un tratamiento estadístico, se dan a continuación el comportamiento de los datos contra la profundidad de la superficie inferior al interior de la pared del tubo en las gráficas de las figuras 6.22 y 6.23. En ellas se observa un endurecimiento debido a la deformación plástica que se llevo a cabo, en la zona deformada que es aproximadamente 50  $\mu\text{m}$ . Se obtuvo la desviación estándar de la media de los datos para conseguir el intervalo de confianza en la muestra antes de la prueba, como se describe en la tabla 6.4.2.

Tabla 6.4.2. Valores promedios de microdureza Vickers en la zona interior del acero inoxidable en la zona no deformada

	INICIAL
$X + 2\sigma$	368
$X$	294
$X - 2\sigma$	220

Se encontró que el material base no sufre de ningún grado de reblandecimiento dado que consiste de una estructura de austenítica que presenta resistencia a un recocido de proceso.

Al igual que el acero al carbono, en la figura 6.23 se observa el comportamiento del perfil de microdurezas siguiendo la relación  $D(HV) = 522.74 x^{-0.09}$  para el acero inoxidable austenítico 304.

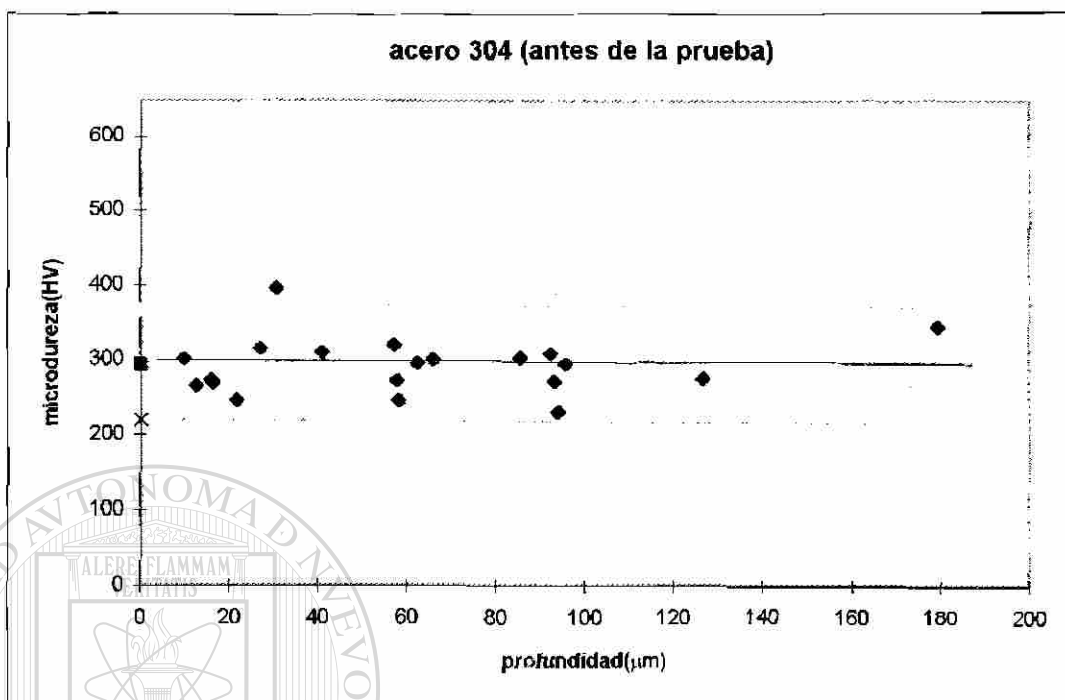


Figura 6.22 Gráfica de microdureza inicial del acero inoxidable 304.

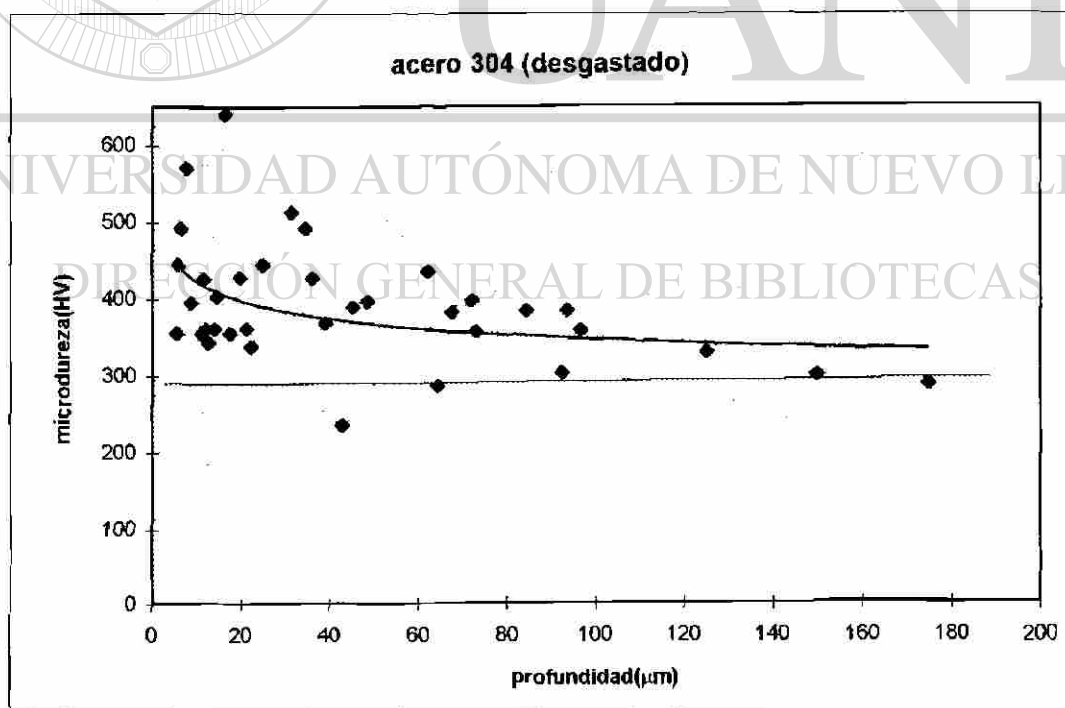


Figura 6.23 Gráfica de microdureza final de la superficie interna deformada del acero 304.

*ACERO TIPO P-11.*

Siguiendo con el mismo procedimiento que los aceros anteriores, se tomaron los datos del ensayo de microdurezas antes y después de la prueba y se elaboró un tratamiento estadístico, se dan a continuación el comportamiento de los datos en las gráficas de las figuras 6.24 y 6.25. En ellas se observa un endurecimiento debido a la deformación plástica que se llevo a cabo, ésta se encuentra aproximadamente a  $41 \mu\text{m}$ . Se obtuvo la desviación estándar de la media de los datos para conseguir el intervalo de confianza como se describe en la tabla 6.4.3. para la muestra antes del ensayo.

Tabla 6.4.3. Valores promedios de microdureza Vickers en la zona interior del acero tipo P-11 en la zona no deformada.

	INICIAL
$X + 2\sigma$	276
$X$	243
$X - 2\sigma$	209

Se encontró que el material base no sufre de ningún grado de reblandecimiento, como puede observarse en la figura 6.25, dado que consiste de una estructura de perlítica que presenta resistencia a un recocido de proceso.

En la figura 25 se observa el comportamiento del perfil de microdurezas, que al igual que los otros aceros sigue la misma función  $D(HV) = 851.68 x^{-0.22}$ .



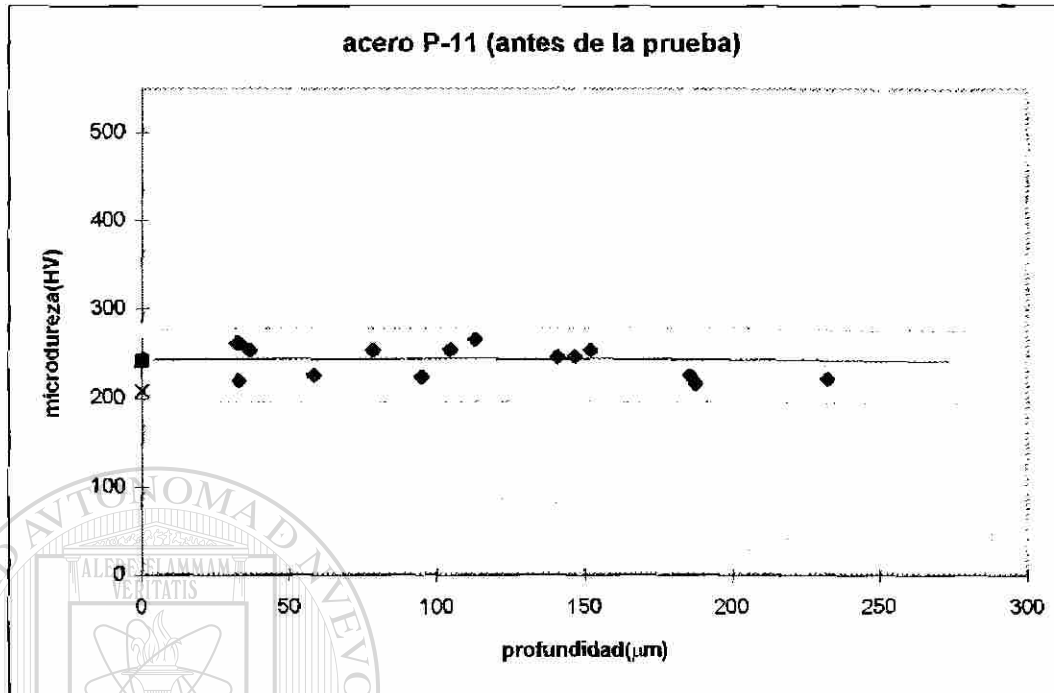


Figura 6.24 Gráfica de microdureza inicial del acero tipo P-11 en la superficie interna.

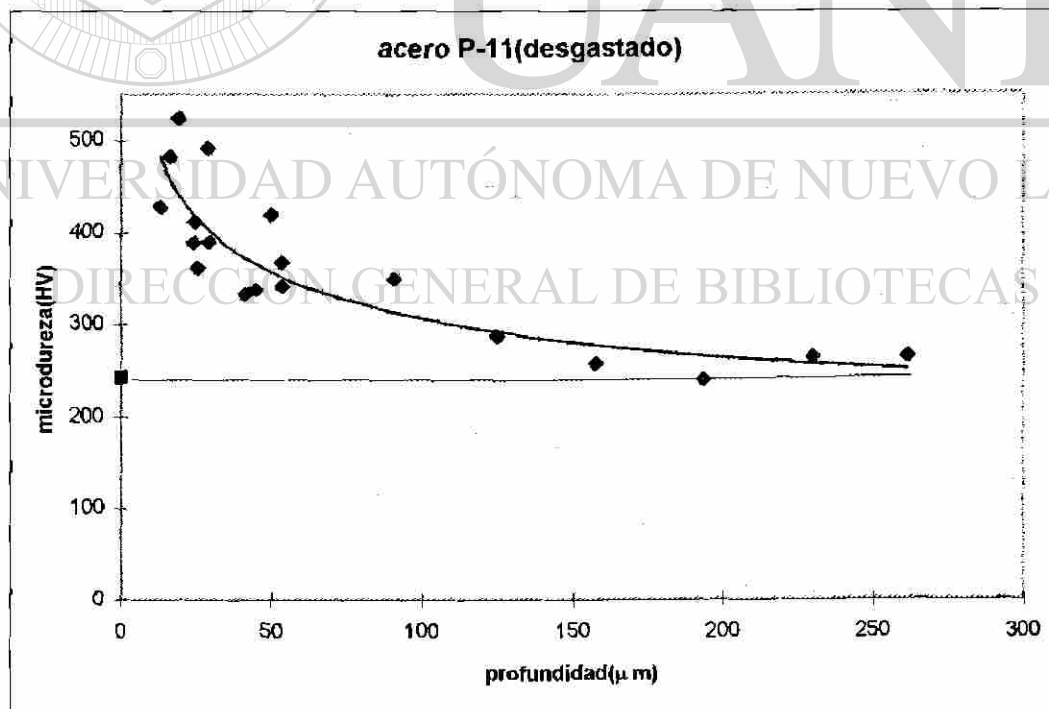


Figura 6.25 Gráfica de microdureza final del acero tipo P-11.

## 6.5 GRÁFICA DE COMPARACIÓN Y PREDICCIÓN DE DESGASTE

En la siguiente figura 6.26 y tabla 6.5.1 se ilustra la comparación cuantitativa de los tres aceros utilizados en la prueba en la sección de mayor desgaste, en ella se observa que el acero más afectado es el acero al carbono, después el acero inoxidable y por último el acero P-11 aunque este acero no lo podemos comparar cuantitativamente con el resto dado que los valores obtenidos no representan lo observado metalográficamente, por lo tanto, no podemos obtener conclusiones con él.

La diferencia del porcentaje de pérdida de espesor del acero al carbono y el acero inoxidable es de un 3% lo que nos indica que no existe una diferencia marcada para estos aceros, por lo que los podemos utilizar en el proceso de transporte neumático a una temperatura de 320 - 350°C. Teniendo en cuenta las ventajas técnicas y económicas.

Tabla 6.5.1. Comparación cuantitativa de los tres tipos de aceros.

MATERIAL	Masa Transportada (tons)	Volumen perdido (cm <sup>3</sup> )	Volumen perdido por tonelada (cm <sup>3</sup> /ton)	Porcentaje de pérdida de espesor
Acero AISI 1005	117	0.557	0.00476	0.026 %
Acero Inoxidable AISI 304	117	0.532	0.00454	0.016 %
Acero A335 Grado P-11	117	0.0365	.00031	0.002 %

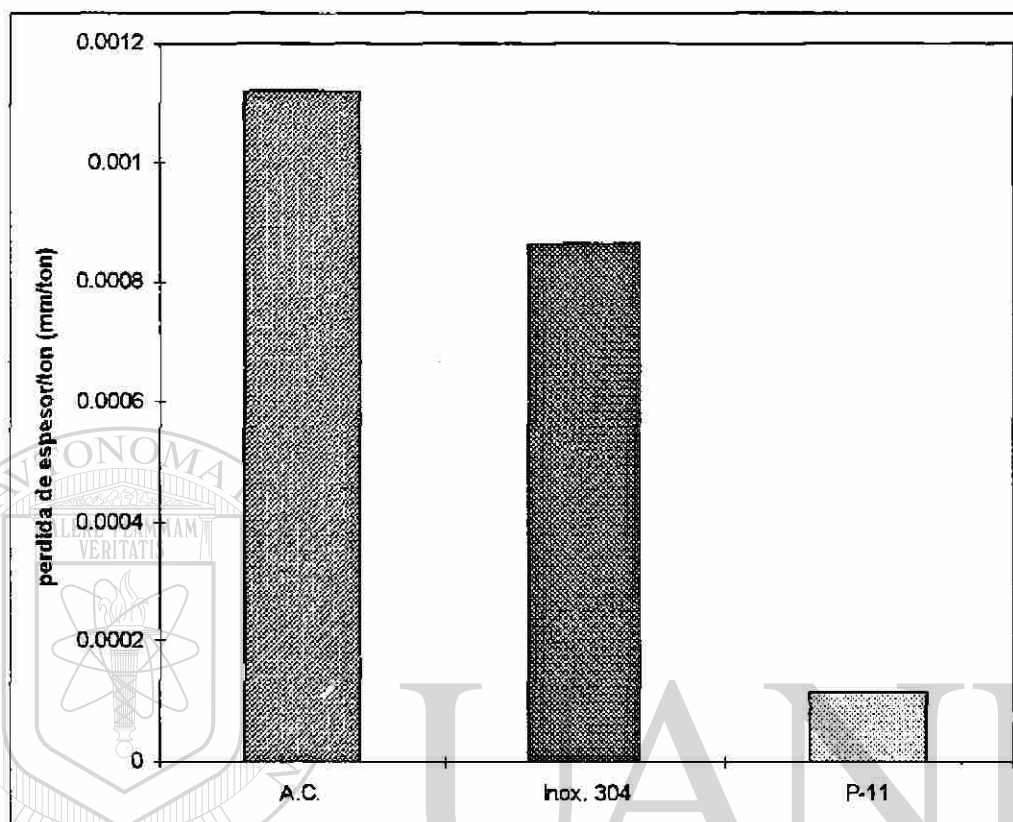


Figura 6.26 Comparación cuantitativa de los tres diferentes aceros en la zona sur.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## PREDICCIÓN DE DESGASTE

Con respecto a este punto, se toma en consideración que el mecanismo de desgaste actuando en mayor grado en el sistema de transporte neumático de fase densa es el de abrasión, por lo tanto, se manejan las expresiones matemáticas encontradas en la literatura [5, 10] relacionadas con los parámetros de operación del proceso y las propiedades del material.

$$W_{ab} = \frac{V}{L} = K \frac{Q}{H} \quad (6)$$

donde:  $W_{ab}$  = el total de volumen removido por unidad de distancia deslizada.

$Q$  = es el total de carga aplicada.

$H$  = la dureza del material.

$K$  = la coeficiente de desgaste.

La siguientes ecuaciones representan los valores encontrados de las pruebas de este trabajo :

Tabla 6.5.2. Ecuaciones de predicción de desgaste de los tres aceros.

MATERIAL	COEFICIENTE DE DESGASTE <b>K</b>	ECUACIONES DE VOLUMEN DESGASTADO
ACERO AL CARBONO	$1 \times 10^{-3}$	$V_{AC} = [1.53 \times 10^{-8}] * L * ton.$
ACERO INOXIDABLE 304	$1.4 \times 10^{-3}$	$V_{INOX} = [1.42 \times 10^{-8}] * L * ton.$
ACERO A335 GRADO P-11	$3.17 \times 10^{-3}$	$V_{P-11} = [1.89 \times 10^{-8}] * L * ton.$

Los valores de los coeficientes de desgaste encontrados para los tres aceros son aproximados a los datos dados en la literatura [13]. Para los resultados del acero P-11 no se tiene una confiabilidad del 100%, dado que no se tuvo certeza de las mediciones de espesores, pero se observó en las micrografías el daño que sufrió y el endurecimiento que tuvo durante el proceso.

Una vez obtenidas estas ecuaciones, se determinó que podíamos encontrar el valor crítico de material transportado para la resistencia de las paredes de los tubos, según el volumen de material que se desprende del espesor de dichos tubos.

El tiempo de vida estimado para los tubos con estas condiciones de proceso de transporte neumático se obtiene de la siguiente manera:

El área desgastada que se presentó en la zona inferior de los tubos se mostró microscópicamente como una banda de aproximadamente de ancho de 3 cm. A lo largo de los segmentos de los tres diferentes tubos que son de 30 cm de longitud. Simulando el área afectada con la geometría de un rectángulo se encuentra el valor de dicha área que es de 90 cm<sup>3</sup>. Además se utilizó el dato inicial de que se transporta 1 ton/hr.

Desgaste erosivo por deformación plástica:

$$\text{La masa del material removido} = K\rho \frac{mv^2}{2H} \quad (7)$$

donde  $\rho$  = densidad del material

$K$  = factor adimensional

$m$  = la masa de partículas transportadas

$v$  = la velocidad inicial de las partículas

$H$  = dureza del material erosionado

La relación lineal observada en el estudio estacionario de erosión tiene una simple definición  $E$  a ser utilizada:

$$E = \frac{\text{masa de material removido}}{\text{masa de partículas transportadas}} \quad (8)$$

entonces :

$$E = K\rho \frac{mv^2}{2H} \quad (9)$$

La velocidad para fases densas es relativamente baja, entre 2 y 8 m/s, dependiendo de la concentración de sólidos y el diámetro de la tubería [9, 18, 20]. De los datos proporcionados por la empresa HYLISA [2] se sabe que el flujo de pélets en la prueba realizada en este trabajo la velocidad de los pistones es aproximadamente de 2.5 a 3 m/s, por lo que se encuentra muy cercano a la literatura; una vez conocida la variable de la velocidad procedemos a evaluar las ecuaciones anteriores.

Determinando el valor de la erosión de la ecuación (8) relacionada con los datos iniciales y encontrados en la prueba de la siguiente forma:

$$E = \frac{\text{masa removida}}{\text{masa transportada}} \Rightarrow E = \frac{\rho(A_d \cdot h_c)}{m_t} \quad (10)$$

Una vez conocido el valor de la erosión, se obtuvieron los coeficientes K para cada tipo de acero de la ecuación (7), como forma adicional que nos da una razón del comportamiento de los materiales en el mecanismo de desgaste erosivo tangencialmente [13].

Se procedió a determinar la cantidad de masa transportada despejándola de la ecuación (10) para un valor crítico de espesor de la pared del tubo, el cual se considera crítico para la resistencia de los materiales a la presión ejercida en el proceso de transporte neumático. Utilizando el dato inicial de transporte de 117 toneladas transportadas por 15 días encontramos el tiempo de vida estimado para un  $h_c$  igual a 1 mm con la misma proporción.

En la siguiente tabla se dan las predicciones esperadas para los tres tipos de aceros en base al comportamiento observado en este trabajo.

Tabla 6.5.4 Predicción de desgaste para los tres tipos de aceros.

ACEROS	VALOR DE EROSIÓN	COEFICIENTE K	MASA TRANSPORTADA CRÍTICA PARA UNA PERDIDA DE h=1mm.	TIEMPO DE VIDA MEDIA (MESES)
AL CARBONO	$8.02 \times 10^{-8}$	$4.46 \times 10^{-3}$	887 toneladas	3.7
INOX. 304	$6.13 \times 10^{-8}$	$4.97 \times 10^{-3}$	1160 toneladas	4.8
GRADO P-11	$8.26 \times 10^{-9}$	$5.53 \times 10^{-4}$	8610 toneladas	35.6

De los resultados anteriores podemos apreciar que la diferencia en vida estimada entre el acero al carbono y el inoxidable 304 es relativamente pequeña. Los valores de las constantes para cada acero no las podemos comparar entre sí debido a que son de materiales diferentes, si tuvieramos el mismo acero a diferentes condiciones de proceso podríamos evaluar aquellas que presentarán los valores más bajos de desgaste, pero nos dan una idea del daño que están sufriendo ya que estas representan la probabilidad de material desprendido.

Con las ecuaciones anteriores podemos ajustar un modelo básico de desgaste en nuestro sistema asociándolas con parámetro del transporte neumático de la siguiente manera:

Del trabajo de Marcus et al. [20], se sabe que el volumen de sólidos  $V_s$  en un diferencial de longitud  $dl$  es:

$$V_s = nV_p = \frac{G}{\rho_p c} \cdot dl \quad \text{y} \quad c = V_g - W_s \quad (11)$$

- donde  $V_p$  = volumen de las partículas  
 $G$  = razón de flujo de sólidos  
 $\rho_p$  = densidad de las partículas  
 $c$  = velocidad promedio de las partículas  
 $V_g$  = velocidad del gas  
 $W_s$  = velocidad de deslizamiento  
 $n$  = número de partículas

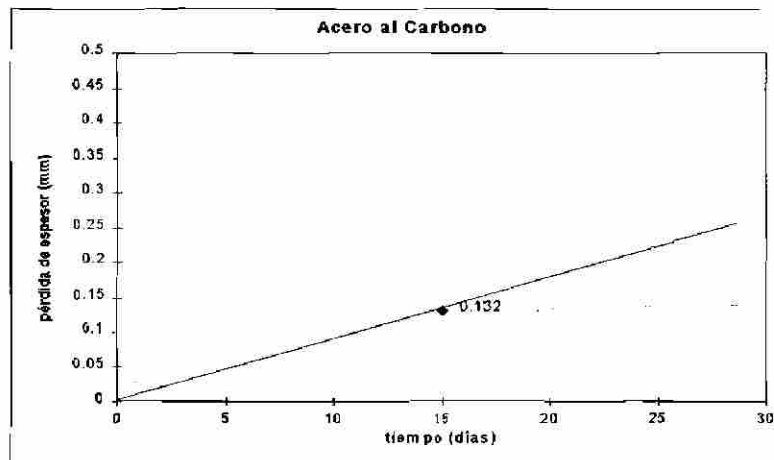
Utilizando estos parámetros en la ecuación (7) tenemos la relación de desgaste de los materiales con los parámetros más importantes de un proceso de transporte neumático. -Las ecuaciones (6) y (7) siguen una relación lineal que es una primera aproximación en nuestro trabajo experimental.

En la figura 6.27 se observan gráficas de los posibles comportamientos de los aceros según las ecuaciones anteriores, donde se gráfica la pérdida de espesor en función del material transportado. Se muestra una recta que pasa por el punto obtenido en este trabajo que proviene de la ecuación (6) y una curva que puede presentarse si la dureza de la superficie del material se incrementa por efecto de la deformación plástica producida en el proceso de transporte de los pélets de hierro esponja. Así que se tiene un posible comportamiento de desgaste entre estas dos curvas según el funcionamiento de las propiedades del material.

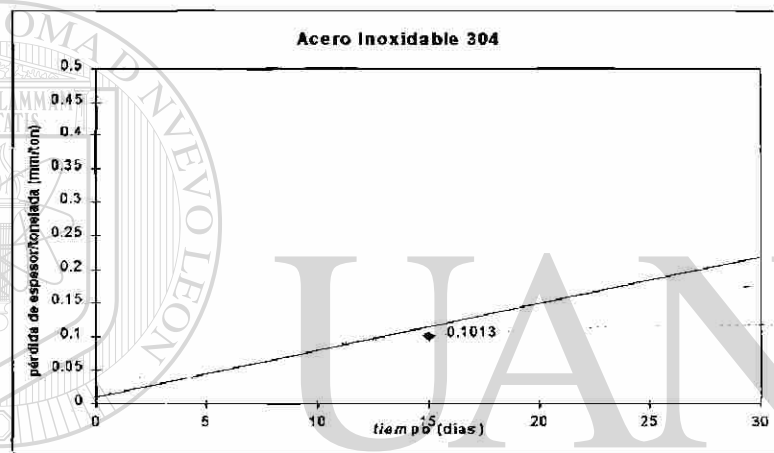
Los resultados obtenidos aquí nos conducen a una justificación para futuros trabajos. Claramente una matriz de pruebas es ahora requerida que considere un número de productos diferentes. Los materiales de los tubos y condiciones de flujo se llevan para cuantificar este efecto.

La diferencia en la caída de presión que ocurre en los sistemas de transporte neumático para tubos de diferentes materiales es afectado por sus respectivas rugosidades relativas, en la misma manera que el flujo de fase simple. Sin embargo, el efecto del impacto de las partículas tiene que ser considerado por ser dominante en todo, que la inclinación de suspensión de flujo que aquí no es considerada.

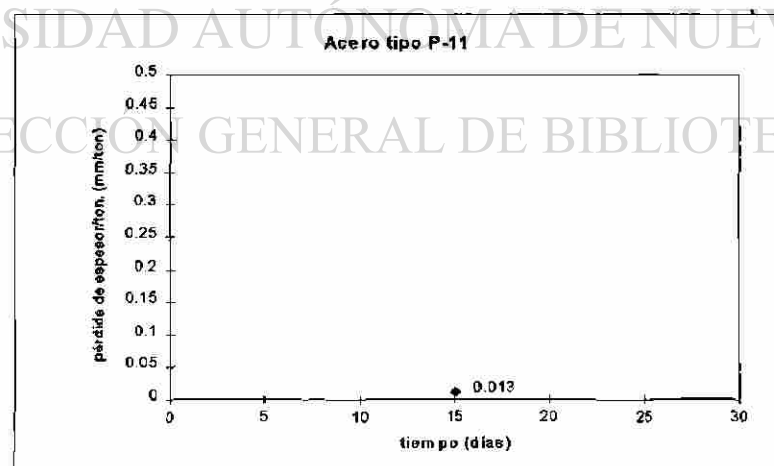




(a)



(b)



(c)

Figura 6.27 (a) Comportamiento del acero al carbono con respecto a la pérdida de espesor en función del tiempo, según las ecuaciones de predicción de desgaste. (b) Comportamiento del acero inoxidable 304. (c) Acero tipo P-11, con el resultado obtenido no se puede realizar una conclusión.

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSIONES

1. El estudio realizado sigue un procedimiento sistemático para cuantificar y determinar el mecanismo de desgaste sufrido por una planta de transporte neumático a una escala industrial. La resistencia a la abrasión relativa de tres diferentes aceros fue evaluada.
2. Se determinó que la zona de mayor desgaste para los tres tipos de aceros es la zona inferior de la línea horizontal en prueba, debido al transporte de material en fase densa que se realiza a bajas velocidades, el acero que mayor desgaste sufrió fue el acero al carbono.
3. De las micrografías obtenidas en la zona de mayor desgaste se observa que en el acero al carbono tiene mayor profundidad de deformación plástica y posibles desprendimientos de material debido a la abrasión de la fase densa de los pélets de fierro esponja.
4. Los tres tipos de aceros presentan un endurecimiento en la zona inferior causada por la capa deformada que se originó por la deformación plástica a la que fueron sometidos.
5. Las ecuaciones utilizadas para una predicción de desgaste con respecto al material transportado, permite predecir la vida útil del equipo. Esta depende de las propiedades intrínsecas del material como de las condiciones de proceso de transporte neumático. Estos resultados pueden ser utilizados para la selección del material y planeamiento de un mantenimiento preventivo.

## REFERENCIAS

- [ 1 ] A.J. Burnett, U.K. Wear in Pneumatic Conveying Pipelines. Powder Handling and Processing, Volume 5, No. 2, June 1993.
- [ 2 ] Abraham Velasco, Marco A. Flores. HYLSA . Comunicación personal, Junio 1995. HYL III HYTEMP® Pneumatic Transport System Description, Seminar. June 93.
- [ 3 ] Adrián Inchaurre Zabala. Aceros Inoxidables y Aceros Resistentes al Calor. Editorial LIMUSA, Primera edición 1981.
- [ 4 ] Alan V. Levy, University of California. Mechanisms of Combined Erosion - Corrosion of Steels at Elevated Temperatures. 1989.
- [ 5 ] Bharat Bhushan, B. K. Gupta. Handbook of Tribology, Materials, Coatings, and Surface Treatments. McGraw-Hill, Inc. 1991.
- 
- [ 6 ] Donald R. Askeland, La Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial Iberoamérica, 1987.
- [ 7 ] E. Hornbogen, Metallurgical Aspects of Wear. Microstructure and Wear. Paper presented October, 1979.
- [ 8 ] Esperanza Deaquino. Desgaste en Transporte Neumático, Tesis de Maestría. UANL, Monterrey, México (1996).
- [ 9 ] F. Rizk, Germany. Pneumatic Transport in Dilute and Dense Phase. Paper, September 30 - 1981.
- [ 10 ] Friction, Lubrication, and Wear Technology. ASM Handbook. Volume 18. 1990.

- [ 11 ] Gunter Petzow. Metallographic Etching. Compliments of Buehler, 1978.
- [ 12 ] H.A. Stoess, Jr.; P. E. Pneumatic Conveying, Second Edition. Edited by Wiley, 1983.
- [ 13 ] I. M. Hutchings. Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials. Edited by Edward Arnold, 1992.
- [ 14 ] Johannes Daniel Mohlmann, Thesis, Parameters Influencing the Pneumatic Conveying of Large Rock Particles, August 1985.
- [ 15 ] Metallography and Microstructures. ASM Handbook Volume 9. 1990.
- [ 16 ] Modesto Ortuño, Trabajado del Acero Inoxidable. Editorial CEAC, Primera edición Abril 1967.
- [ 17 ] N. P. Suh, H-C. Sin and N. Saka. Fundamental Aspects of Abrasive Wear. Conference on the Fundamentals of Tribology. June 1978.
- [ 18 ] P. C. Arnold and P. W. Wypych, Australia and A. R. Reed. U.k. Advances in the Design of Pneumatic Transport Systems. Paper, 1994.
- 
- [ 19 ] Properties and Selection: Irons, Steels, and High - Performance Alloys. ASM Metals Handbook Volume 10. 1990.
- [ 20 ] R. D. Marcus, L. S. Leung, G. E. Klinzing and F. Rizk. ET AL. Pneumatic Conveying of Solids. A theoretical and practical approach, 1990.
- [ 21 ] Robert W. Bruce, ASLE Alcoa Laboratories. Fundamentals of Lubrication. Nov. 1988.
- [ 22 ] Satryo Soemantri, Indonesia. The Mechanisms of Abrasive Wear in Steels. Volume 14, Number 2 of Bulk Solids Handling. April/June 1994.
- [ 23 ] Sydney H. Avner, Introducción a la Metalurgia Física, Segunda Edición. Editorial McGRAW - HILL, Enero 1983.
- [ 24 ] William F. Smith. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Editorial McGraw-Hill Segunda edición. Agosto 1993.

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Dora Irma Martínez Delgado

Candidato para el Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería con Especialidad en  
Materiales

Tesis: Desgaste de Aceros Aleados en Sistemas de Transporte Neumático

Dora Irma Martínez Delgado nació en Monterrey, Nuevo León, México, el 12 de Octubre de 1972. Es hija del Sr. Jerónimo Martínez Gzz. y de la Sra. Irma Delgado Palacios. Tiene el título de Licenciado en Física obtenido en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, habiendo terminado sus estudios profesionales en 1993. Ingresó al Programa de Graduados en Ingeniería en la Facultad de Mecánica y Eléctrica en la Maestría en Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales como becario del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en Febrero de 1994.

