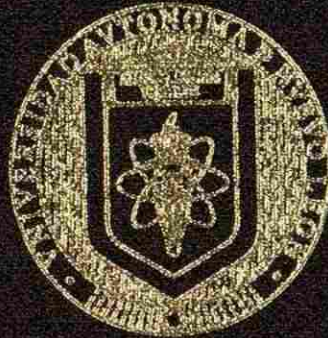


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA PARA
PRUEBAS DE EROSION

TESIS

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

PRESENTA

ALVARO MANUEL TREVINO ACEVEDO

CIUDAD UNIVERSITARIA

JUNIO DEL 2004

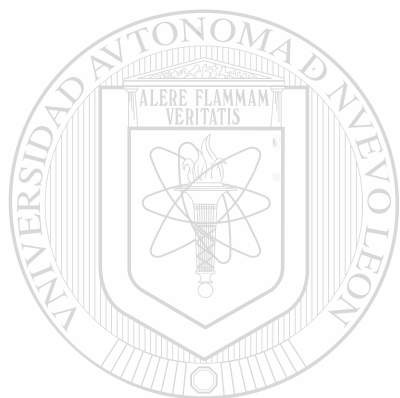
DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA PARA
PRUEBAS DE EROSION

A.M.T.A.

TM
Z5853
.M2
FIME
2004
T74



1020150052



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

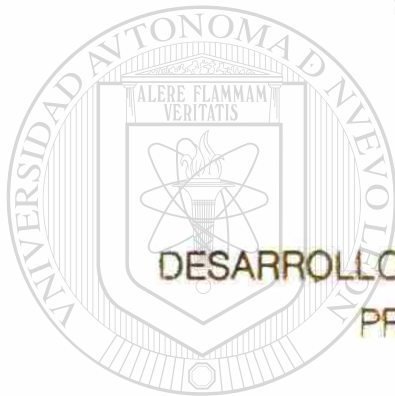
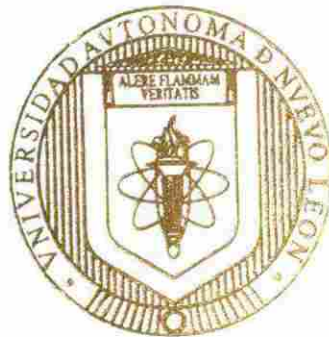
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA PARA
PRUEBAS DE EROSION**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TESIS

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA

CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

ALVARO MANUEL TREVIÑO ACEVEDO

CIUDAD UNIVERSITARIA

JUNIO DEL 2004

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA PRUEBAS DE EROSIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

PRESENTA

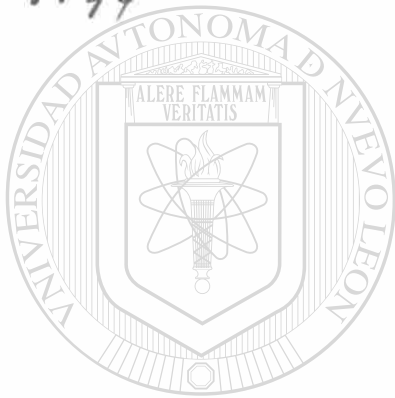
ALVARO MANUEL TREVIÑO ACEVEDO

CIUDAD UNIVERSITARIA

JUNIO DE 2004

989717

TM
Z5853
.H2
FINE
2004
.T74



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

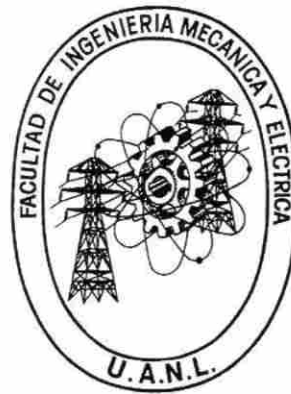


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA PRUEBAS DE EROSIÓN

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TESIS

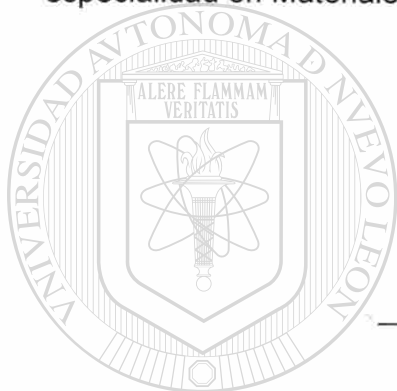
**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

PRESENTA

ALVARO MANUEL TREVIÑO ACEVEDO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Desarrollo de una metodología para pruebas de erosión", realizada por el alumno Alvaro Manuel Treviño Acevedo, matrícula 906049, 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 Javier Pérez Unzueta

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Coasesor

Dr. Rafael David Mercado Solís

Coasesor

Dr. Sergio Haro Rodríguez

Vó. Bo.

Dr. Guadalupe Alan Castillo

División de Estudios de Posgrado

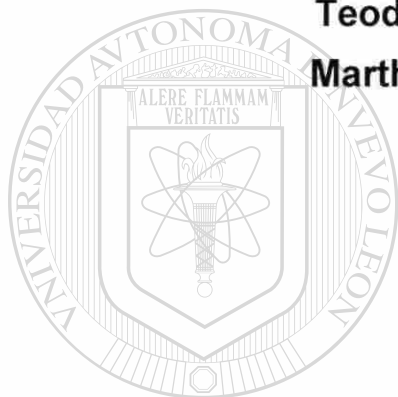
DEDICATORIA

A Dios

A mi Padres:

Teodulo Javier Treviño Sáenz

Martha Elva Acevedo Valencia



A mis Hermanos:

Javier Alberto

Oscar Gerardo

Juan Carlos

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



A mi Novia:

Citlali Reyna Aguirre

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme ser y estar.

Al Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales (PDIM) de la FIME UANL por aceptarme estos dos años.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.

Al Doctor Alberto Javier Pérez Unzueta, por permitirme aprender y trabajar con el, en la solución de diferentes problemas industriales, en este proyecto y la forma de apreciar las situaciones que se presentan en la vida. Gracias por sus enseñanzas, su amistad y su tutoría, pero sobre todo su paciencia. Me ha servido de mucho trabajar con usted.

Al Doctor Colas por su apoyo y amistad pero sobre todo por su disponibilidad.

Al Doctor Mercado por ser mi amigo, "le debo el diseño de la máquina de laminación... ahh y un caldito tlalpeño".

Al Doctor Sergio Haro por recibirme en Zacatecas y apoyarme en la revisión de esta tesis, muchas gracias por todas sus atenciones y consejos.

A todos los Doctores del PDIM por sus enseñanzas y por ser excelentes en sus áreas de investigación.

A los Doctores de Nemark Salvador Valtierra, Abraham Velasco, y José Talamantes por preocuparse, facilitando mi estancia en la compañía así como toda la raza: Mike, Beto, Efrén, Andrés, Jacob, los dos Alejandro, Rodrigo, Guamuchil.

A los futuros Doctores:

Eduardo Rodríguez, muchas gracias por toda tu gran y valiosa ayuda. Estoy totalmente agradecido. Valieron la pena tantas discusiones ¿quieres otra maquinita viejo? Primero paga los tejuinos ahhhhh oye... y la televisión?

Julián Rodríguez gracias por todos los consejos que aunque le hacia como que te tiraba a león si me ayudaron y mucho. AAhhhh y ya termina por que se te acaba la beca maestro.

Efrén gracias por tu compañía aunque la raza diga que eres sucio... "eres mas limpio y puro que la bata de un carnicero". Aaahh y a ver cuando me regalas la batería de 19 placas.

A mi gran amigo Chava gracias por apoyarme en este proyecto. "Hulk" no le grites a tu hermanito porque te vas a poner verde fosforescente ("cuenta saldada" jajaja).

A mis compañeros de generación Adela, Salvador y Nelson por que fuimos poquitos pero recuerden que de lo bueno poco.

A toda la raza de servicio social que me apoyo en este proyecto Víctor Martínez, Laura Esparza, Judith y todos los que falten.

A la raza de la cueva: Lalo, Luis, Queque, Efrén, Jhona, Marco, Niño, Leo, Nieto, Roberto. A las Canadienses Mony, Maritrini, Angelina. Al Moya, Ere y Nancy, A los Dalton: Oscar, Orlando, Luis, Miguel, Jorge, a la pequeña Yury y su palomilla integrada por Juanitus y Lily. A la pareja mas despiadada Rodrigo y Mayra a oye y nos vemos en Marzo. A Dianita y Erin a Jimy, Fer, Chicho, Casta y Eva, a los del IAESTE Sandia, Eva, Leandro, y Anita después te caigo en Croacia, al verano científico Tabasco, Mexicali, Tamaulipas, Chihuahua, a Claudia, la Dra. Dorix, Don Rodolfo por su disponibilidad, a la señora Maricela (prometo ya no asustarla) Y Anita y su futuro babie y a todos los que me falten muchas gracias por este tiempo que pase muy bien con todos ustedes.

A mi amiga Raquel Góngora Hernández por preocuparse por mi, todo el tiempo.

A mis hermanitas Dione (por el equipo de computo), Teresita (gracias por el Elmo) y Gemma (pues que te digo ahh ya se arreglale los frenos al vocho).

A Don Juan por prestarme las maquinas del laboratorio de maquinados. A Alejandro Torres por los recubrimientos. A la Universidad de Venezuela especialmente a la Dra Staia, a Lourdes de Eurocon. A Eliécer Varela de Nibco de México. A Felicia de Mercedes Benz Alabama, A Agustín Alcalá y Alberto Juangorena de KS Industrial.

A La raza de dinámica en especial al Ingeniero Villalobos por prestarme el equipo para realizar algunas mediciones.

A la señora Lulu por ayudarme con las cartas de titulación.

Y a ti estrellita por ser mi mejor amiga por escucharme, quererme y confiar en mi, Citlali te agradezco todos esos jalones de oreja que me diste.

“GRACIAS A TODOS POR TODO”

PRÓLOGO

El avance científico y tecnológico logrado en los últimos años ha puesto una gran demanda en la respuesta de los materiales ingenieriles a las cada vez más rigurosas condiciones de trabajo de componentes mecánicos. Un ejemplo clásico es la tendencia a reducir el peso de los automóviles para reducir el consumo del combustible.

El uso actual de aleaciones de aluminio para monobloques y cabezas de los motores de combustión interna ha sido un gran avance en esta búsqueda de disminuir el peso. Los monobloques y las cabezas son piezas de geometría muy complicada obtenidos por procesos de fundición, donde las cavidades internas son formadas por medio de corazones. Los corazones son fabricados en cajas o moldes por el proceso de soplado. Uno de los principales problemas en la manufactura de los corazones es la erosión ocasionada por el impacto de las partículas de arena en las paredes de los moldes. Una caja erosionada, producirá corazones con variaciones dimensionales que a su vez afectaran las dimensiones de los monobloques o cabezas, poniendo en peligro la integridad y buen funcionamiento de un motor.

Varias soluciones empíricas al problema del desgaste han sido puestas exitosamente en práctica. El valor del presente trabajo es el inicio de una metodología científica para determinar los mecanismos de erosión encontrados en las cajas de corazones. Este trabajo se encuentra enmarcado en un proyecto de largo alcance donde participan las empresas NEMAK (México), MECCANICA BASSI (Italia), ASHLAND CHEMICAL (USA) y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En dicho proyecto, dos candidatos a Doctor realizan su trabajo de investigación y tesis doctorales en determinar los mecanismos básicos de erosión y los diferentes parámetros operacionales que influyen en la vida útil de los moldes. Esta tesis de maestría, se centra en el diseño y construcción de una máquina tribológica para realizar las pruebas de erosión que cubran las condiciones presentes en la operación industrial, pero que también permite realizar estudios básicos del fenómeno de erosión.

Es grato observar que jóvenes científicos, como es el caso del autor del presente trabajo, dirigen su creatividad y talento en la solución de problemas tecnológicos a nivel y proyección mundial.

Dr. Alberto Pérez Unzueta.

San Nicolás de los Garza, Junio 2004

SÍNTESIS

La empresa Nematik, S. A de C. V., líder mundial en desarrollo tecnológico y fabricación de cabezas y monobloques, en conjunto con MECCANICA BASSI fabricante de herramientas con sede en Italia y la U.A.N.L F.I.M.E Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales, han iniciado un estudio sobre el comportamiento tribológico de los herramientas involucrados en la producción de las cajas de corazones.

Este estudio cubre el desarrollo de la metodología para reproducir el desgaste erosivo encontrado en las cajas de corazones a nivel laboratorio para su estudio analítico, se realizó un estudio de las variables que se involucran en el proceso de moldeo, para posteriormente realizar el diseño y construcción de un equipo prototipo que permitió realizar pruebas preliminares en la búsqueda de las condiciones controladas requeridas.

Después del prototipo y análisis de su funcionamiento se diseño y construyó un sistema de erosión para realizar pruebas a nivel laboratorio cuyos resultados permitieran su aplicación a nivel industrial.

El material a analizar fue el acero utilizado en las cajas de corazón del proceso de moldeo de caja fría; acero grado herramienta H-13 en condiciones de recocido y templado y revenido con durezas de 30, 40, 55 HRC para un intervalo de ángulos de impacto. Posteriormente se hizo un diseño de experimentos con la finalidad de aproximar las condiciones del proceso de moldeo en cajas de corazones al equipo diseñado y construido.

Finalmente se obtuvieron las curvas de erosión del acero H-13 y fueron discutidos sus resultados. Obteniendo beneficios tanto industriales como de investigación.

INDICE

Página

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
PRÓLOGO.....	iv
SÍNTESIS	v
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	
1.1 Introducción.....	1
CAPÍTULO 2 ACEROS GRADO HERRAMIENTA	
2.1 Introducción.....	5
2.2 Clasificación.....	6
2.3 Selección y propiedades.....	7
2.4 Aceros para trabajo en caliente grupo H.....	11
2.5 Aceros para trabajo en caliente al cromo.....	12
2.6 Acero Grado Herramienta H13.....	13
2.7 Tratamientos térmicos del acero H-13.....	14
CAPÍTULO 3 DESGASTE	
3.1 Introducción.....	18
3.2 Mecanismos de desgaste.....	19
3.2.1 Desgaste Abrasivo.....	22
3.2.2 Desgaste Adhesivo.....	23
3.2.3 Desgaste Corrosivo.....	24
3.2.4 Desgaste Erosivo.....	25
3.2.5 Desgaste por fatiga.....	26
3.2.6 Desgaste por fretting.....	26
3.2.7 Desgaste Oxidativo.....	27
3.3 Aplicación útil del desgaste.....	28
3.4 Categorías y condiciones de pruebas tribológicas.....	30

CAPÍTULO 4 EROSIÓN

4.1. Introducción.....	33
4.2 Desgaste erosivo por partículas sólidas.....	34
4.3 Propiedades de la partícula.....	35
4.3.1 Dureza.....	35
4.3.2 Forma.....	38
4.3.3 Tamaño de la partícula.....	40
4.4 Desgaste erosivo por deformación plástica.....	42
4.4.1 Mecanismo.....	42
4.4.2 Ángulo de impacto.....	44
4.4.3 Daños causados en ángulos oblicuos.....	46
4.4.4 Forma de la partícula y ángulo de impacto.....	47
4.4.5 La dureza de la superficie.....	48
4.5 Desgaste erosivo por fractura frágil.....	50
4.5.1 Mecanismo.....	50
4.6 Transición dúctil-frágil.....	53
4.6.1 La dureza de la superficie.....	53
4.6.2 Energía Cinética.....	54

CAPÍTULO 5 MOLDEO

5.1 Introducción.....	56
5.2 Moldeo de Arena.....	57
5.3 Control de la arena en el proceso de caja fría.....	58
5.3.1 Forma de la partícula.....	59
5.3.2 Granulometría GFN (Grain Fineness Number).....	60
5.3.3 Temperatura de la arena.....	61
5.3.4 Humedad de la arena.....	61
5.3.5 PH y Demanda de ácido.....	62
5.4 Proceso de Caja Fría.....	63
5.4.1 Etapa de soplado.....	63
5.4.1.1 Adherencia del corazón hacia la superficie del herramental... 64	
5.4.1.2 El desgaste erosivo en las cajas de corazones.....	65

5.5 Estudio de la velocidad de impacto en la caja de corazones.	66
5.6 Estudio de las presiones en el sistema de caja fría.	67

CAPÍTULO 6 FUNDAMENTOS DE DISEÑO

6.1 Introducción.....	72
6.2 Tipos de diseño.....	73
6.3 Sistemas Técnicos.....	74
6.4 Metodología para el diseño de maquinaria.	75
6.5 Equipos de pruebas de erosión.....	77
6.6 Principales variables en el desarrollo del sistema por boquilla.	79
6.6.1 Relación longitud – Diámetro boquilla.	79
6.6.2 Rugosidad de la boquilla.....	81
6.6.3 Huellas y ángulo de impacto.....	81
6.6.4 La velocidad de la partícula.....	83

CAPÍTULO 7 METODOLOGÍA DE DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

7.1 Introducción.....	85
7.2 Condiciones de prueba.....	86
7.3 Máquina Prototipo.	87
7.3.1 Exploración.....	88
7.3.2 Ajuste de variables.....	90
7.4 Máquina de pruebas.....	96
7.4.1 Subsistema cámaras de erosión.	96
7.4.2 Subsistema Sujeción.....	98
7.4.3 Subsistema cabina.....	100
7.4.4 Subsistema velocidad de la partícula.....	101
7.5 Metodología de las pruebas de erosión en el acero H13.....	105
7.5.1 Caracterización de la partícula erosiva.....	105
7.5.2 Caracterización del acero a ensayar.....	107
7.5.3 Evaluación del del fluido y alimentación de la partícula.....	108
7.5.4 Pruebas en el acero grado herramienta H-13.....	110

CAPÍTULO 8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

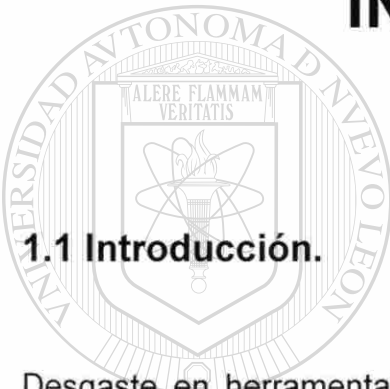
8.1 Introducción.....	113
8.2 Máquina Prototipo etapa exploración.....	114
8.3 Máquina Prototipo, etapa ajuste de variables.	118
8.3.1 Selección de las dimensiones de probeta.	122
8.3.2 Comportamiento del equipo prototipo etapa 2.....	122
8.4 Máquina de pruebas.	124
8.4.1 Subsistema de erosión.	125
8.4.2 Subsistema sujeción.....	127
8.4.3 Subsistema Cabina.....	129
8.4.4 Subsistema Velocidad (método doble disco).....	130
8.5 Caracterización del sistema de erosión en el H13.	135
8.5.1 Resultados de la caracterización de las partículas erosivas.....	135
8.5.2 Resultados de caracterización del material a impactar.	138
8.5.3 Resultado de la evaluación de las condiciones de impacto.....	140
8.5.4 Resultados del desgaste erosivo en el acero a H13.....	141

CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Diseño del equipo.	147
8.2 Pruebas de erosión.....	148
8.3 Recomendaciones.....	149
BIBLIOGRAFÍA	150
LISTA DE FIGURAS.....	153
LISTA DE TABLAS.....	158
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	160

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



1.1 Introducción.

Desgaste en herramientas industriales es una causa que ha despertado el interés de los investigadores en los últimos años, principalmente en la industria metal-mecánica y fundición, donde los herramientas están en contacto con agentes erosivos. Tal es el caso de las cajas de corazones utilizadas para la fabricación de cabezas y monobloques para motores de combustión interna. El desgaste erosivo de estas cajas puede ocasionar que los corazones producidos presenten defectos dimensionales que posteriormente afecten el funcionamiento de un motor.

Durante el proceso de soplado se lleva a cabo la formación del corazón por medio de la inyección de una mezcla de arena sílica y resina, impactándose sobre el herramental. Es aquí donde ocurre el fenómeno de erosión, donde una determinada cantidad de soplos, que son traducidos a una cantidad de partículas de arena sílica, erosionan la superficie del herramental. Esto produce

que el herramienta cambie sus dimensiones. Por consecuencia al existir un cambio de dimensiones en las cajas de corazones, producto de la erosión, existirá un incremento dimensional del corazón. Esto a su vez ocasionará que las paredes de la cabeza o monobloques sean más delgadas, llegando al extremo de estar fuera de especificación y poniendo en peligro la integridad de la pieza durante su operación.

El sector automotriz, siendo uno de los sectores que más apoyo han otorgado al desarrollo tecnológico, ha emprendido un amplio estudio sobre el comportamiento tribológico de los herramientas involucrados en la producción de las cajas de corazones de arena. Las empresas involucradas en este proyecto son: NEMAK S.A. de C.V. empresa de la localidad, líder mundial en la fabricación de cabezas y monobloques de aluminio, MECCANICA BASSI fabricante de herramientas con sede en Italia, y la U.A.N.L. F.I.M.E. Programa Doctoral en Ingeniería en Materiales.

Los avances tecnológicos reflejan la necesidad creciente de optimizar cada vez más los recursos así como satisfacer las necesidades industriales que se tienen, en este caso el establecer los mecanismos de desgaste es esencial para posteriormente estudiarlos y proponer soluciones factibles.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El objetivo de esta tesis es diseñar, construir, instrumentar y poner en operación una máquina tribológica que sea capaz de realizar pruebas de desgaste erosivo en aceros grado herramienta, así como explorar el comportamiento erosivo del acero grado herramienta H-13 para diferentes tratamientos térmicos con un intervalo de durezas, por el impacto de partículas de arena sílica a diferentes ángulos.

El sector industrial requiere de una optimización de los recursos utilizados en su proceso de elaboración de corazones, por lo anterior se realizó toda una metodología para llevar a cabo el estudio del desgaste erosivo producido en el

herramental. Para esto se diseñó y construyó todo un sistema capaz de simular el proceso de erosión, con la versatilidad de realizar un gran número de estudios debido a la gran cantidad de variables que intervienen.

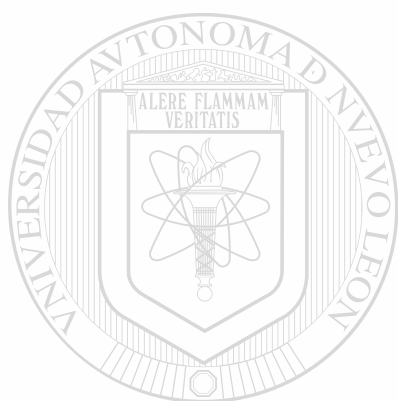
La hipótesis que fundamenta este trabajo es: los mecanismos básicos del fenómeno de erosión encontrados en las cajas de corazón de la industria de la fundición, pueden ser reproducidos a nivel laboratorio para su estudio analítico, si y solo si se cuenta con un sistema de pruebas tribológico que reproduzca de manera controlada las variables del proceso.

El alcance experimental del presente trabajo es: El material a erosionar es acero grado herramienta H-13, en estado recocido y tratado térmicamente a durezas de 30, 40, 55 HRc, utilizando como partícula erosiva la arena sílica empleada en la fabricación de corazones, impactándose a ángulos de 20°, 40°, 75°, 90°. El presente trabajo no contempla la utilización de otro tipo de partícula erosiva o materiales a erosionar.

La metodología empleada en esta investigación fue la siguiente. Se planteó el problema, el cual forma parte de un proceso industrial. Se realizó una serie de visitas a la empresa con la finalidad de analizar el proceso. Una vez establecidas las condiciones operativas se planteó el alcance del presente trabajo el cual fue el comportamiento tribológico de los materiales bajo las condiciones antes mencionadas.

Para esto se trabajó en el diseño y construcción de una máquina para pruebas tribológicas bajo condiciones de laboratorio. Como principio para la elaboración de la metodología de pruebas tribológicas se diseñó y construyó la máquina prototipo, esto con la finalidad de realizar algunas pruebas preliminares las cuales dieron como resultado cómo se comportarían algunos componentes de la máquina, así como establecer algunas restricciones dimensionales del espécimen. Se realizó el diseño y construcción de la máquina contemplando las

condiciones a las que serán elaboradas las pruebas. Se realizaron pruebas de erosión al acero H-13 y se estudiaron los resultados de las curvas de erosión para los diferentes tratamientos térmicos y ángulos de impacto.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 2

ACEROS GRADO HERRAMIENTA.

2.1 Introducción.

La revolución industrial condujo a un fuerte crecimiento de innovaciones tecnológicas y procesos de producción, marcando el cambio de un tipo de economía agrícola a una industrial. La expansión del comercio, la acumulación del capital, aunado al crecimiento de la población, fueron factores determinantes para el inicio de este proceso que se caracterizó por la utilización masiva de materiales tales como el hierro y el acero [1].

Un acero herramienta es cualquier acero utilizado para fabricar herramientas de corte, conformado o bien darle forma a un material introduciéndolo en un componente adaptado para producir una pieza. La demanda de este tipo de aceros es creciente y actualmente tienen aleaciones complejas con alto contenido de elementos aleantes como son: tungsteno, molibdeno, vanadio, manganeso y cromo entre otros. Estos aleantes permiten un incremento en las propiedades para satisfacer un servicio cada vez mas severo y un mayor control dimensional [2].

La adición de elementos aleantes permiten a los aceros tener propiedades específicas, lo que nos permite contar con diferentes tipos de aplicaciones en donde se pueden utilizar, como son: estampado, troquelado, corte, cizallado, estirado, laminado, extrusión, entre otras.

Con unas cuantas excepciones, los aceros para herramientas deben someterse a tratamientos térmicos para desarrollar combinaciones específicas para lograr una alta resistencia al desgaste, a la deformación o a la fractura bajo cargas muy altas y al ablandamiento a altas temperaturas. La mayoría de estos aceros son primeramente formados o maquinados para darles la forma, después son tratados térmicamente y finalmente maquinados a su dimensión final.

2.2 Clasificación.

Existen diversas clasificaciones de los aceros grado herramienta, las cuales pueden ser por condiciones del templado, el contenido de la aleación, o la clasificación basada en la aplicación en que se requiera.

El método de identificación y tipo de clasificación de los aceros para herramientas adoptado por la AISI (American Iron and Steel Institute), tiene en cuenta el método de templado, aplicaciones, características particulares y aceros para industrias específicas. Los aceros para herramientas que más se utilizan se han clasificado en siete grupos y cada uno es identificado por una combinación de letras y números, ver tabla 2.1 [3].

Tabla 2.1 Clasificación de los aceros herramienta [3]

Grupo	S	Tipo
Templables en agua.	W	
Resistentes al impacto.	S	
Para Trabajo en frío	O	Templable en aceite.
	A	Mediana aleación y templable en aire.
	D	Alto carbono, alto cromo.
Para Trabajo en caliente	H	(H1-H19, incluso, base cromo;
		H20-H39, incluso, base tungsteno;
		H40-H59, incluso, base molibdeno)
Alta velocidad	T	Base tungsteno.
	M	Base molibdeno.
Para moldes	P	Aceros para molde (P1-P19, incluso, bajo C
		P20-P39, incluso, otros tipos)
Propósitos específicos.	L	Baja aleación
	F	Carbono-tungsteno

2.3 Selección y propiedades.

Cuando se pretende seleccionar un acero de grado herramienta, no debe limitarse a un solo tipo o a una serie en particular. Algunas de las consideraciones que deben tomarse en cuenta son: las propiedades mecánicas, la productividad, el mantenimiento, la facilidad de elaboración y el costo por pieza unitaria hecha por la herramienta [3].

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La mayoría de los aceros herramientas deberán cumplir con ciertos requerimientos como son dureza, tenacidad, maquinabilidad y resistencia al desgaste [3].

Propiedades comparativas.

Los aceros grado herramienta se califican por sus características de servicio y por la forma en que son procesados, dando lugar a gráficas comparativas como las que se muestran en la figura 2.1, donde la tenacidad, la dureza al rojo y la resistencia al desgaste se encuentran valoradas adimensionalmente del 1 al 9 para diferentes aceros.

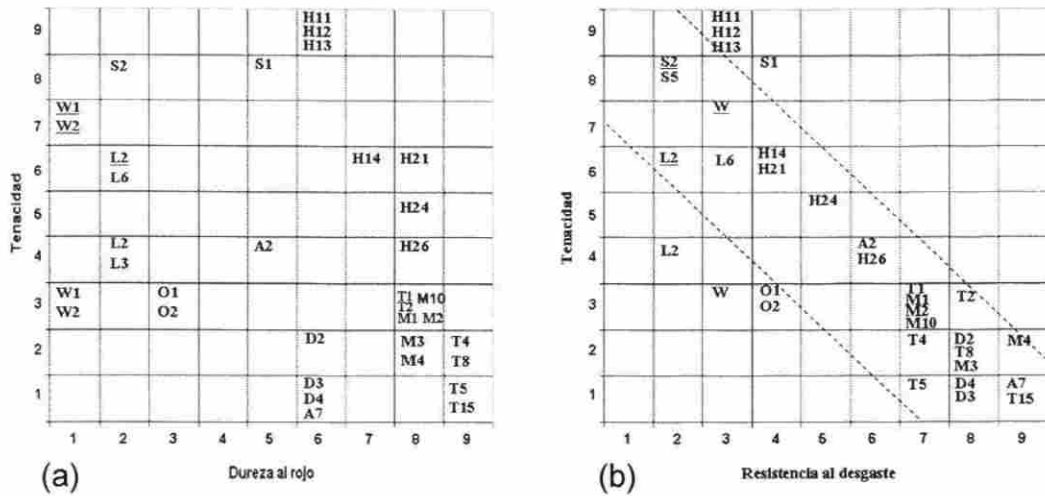


Fig. 2.1 Diagramas comparativos [2].

Tenacidad contra (a) Dureza al rojo, (b) resistencia al desgaste.

Las gráficas muestran los valores de las diferentes propiedades en un intervalo de valores que van del 1 al 9, siendo los valores más altos otorgados para aquellos con las mejores propiedades [2].

Resistencia al desgaste.

Si bien los aceros grado herramienta son considerados como aceros con buena resistencia al desgaste, la cual será dependiente de las condiciones a las que sea sometido el acero. La resistencia al desgaste considerada como una repuesta del material al sistema, será analizada a profundidad en el capítulo de desgaste.

Tenacidad.

Se define como la capacidad de un material para absorber energía durante la deformación, este término es aplicado a los aceros grado herramienta como la capacidad para resistir a la ruptura. Las herramientas deben de ser artículos rígidos. Una ligera deformación plástica en la herramienta, será motivo suficiente para no poder emplearla más. Esta propiedad es óptima en los aceros aleados al bajo y al medio carbono de los grupos S y H, los cuales

forman la base de los aceros aleados resistentes al impacto, ver figura 2.1. Por el contrario, los aceros altos en carbono tienden a ser frágiles y con baja tenacidad dentro de los cuales podemos mencionar los aceros grado herramienta para trabajo en frío [2,3].

Dureza al rojo.

Es la dureza de un material a temperaturas por encima de la temperatura ambiente. Dicha propiedad es esencial para aceros que se emplean a temperaturas por arriba de los 400 °C, y donde se requiere que no exista una variación significativa en su dureza. La dureza al rojo es lograda en aceros que contienen elementos aleantes como el tungsteno, cromo y molibdeno. La figura 2.1(a) muestra los grupos para trabajo en caliente y alta velocidad, como los aceros con mejor dureza al rojo [2,3].

Maquinabilidad.

Debido a que un acero herramienta debe de ser llevado a determinadas dimensiones, la capacidad del material para ser cortado libremente y producir un buen terminado después de que se le maquina es indispensable. El principal factor que afecta a la maquinabilidad es la dureza en condición de recocido, la presencia de carbono en combinación con elementos formadores de carburos, como el vanadio, cromo y molibdeno, reducen notablemente la maquinabilidad [3].

En la Tabla 2.2 se encuentran los valores de maquinabilidad, en donde el acero para herramientas maquinable tipo W se le ha asignado un valor de 100, el cual a su vez equivale a una maquinabilidad del 30% de un acero libre maquinado tipo AISI B1112 el cual es empleado para fabricar tornillos [2].

Tabla 2.2 Clasificación de maquinabilidad para aceros grado herramienta [2].

Aceros Grado herramienta	
Tipo	Maquinabilidad %
O6	125
W1, W2, W5	100 (a)
A10	90
P2, P3, P4, P5, P6	75-90
P20, P21	65-80
L2, L6	65-75
S1, S2, S5, S6, S7	60-70
H10, H11, H12, H13, H14, H19	60-70 (b)
O1, O2, O7	45-60
A2, A3, A4, A6, A8, A9	45-60
H21, H22, H24, H25, H26, H42	45-55 (b)
T1	40-50
M2	40-50
T4	35-40
M3, clase 1	35-40
D2, D3, D4, D5, D7, A7	30-40
T15	25-30
M15	25-30

(a) Equivalente al 30% de la maquinabilidad del acero AISI B1112, (b) Para un rango de durezas de 150 a 200 HB.

Templabilidad.

La templabilidad es referida a la capacidad de endurecimiento de un acero, el cual forma martensita hasta determinada profundidad. El factor más importante que influye a que una determinada dureza sea alcanzada es la masa del metal a templar, ya que en pequeñas secciones el calor es extraíble rápidamente. Un ejemplo es visto en la figura 2.2 en la cual, muestras de diferentes diámetros de un acero con contenido de carbono de 0.54 % es templado. Para las secciones de 13 mm alcanzó una dureza superficial de 63 HRC. A medida que el diámetro de la pieza es mayor los valores de templabilidad disminuyen [4].

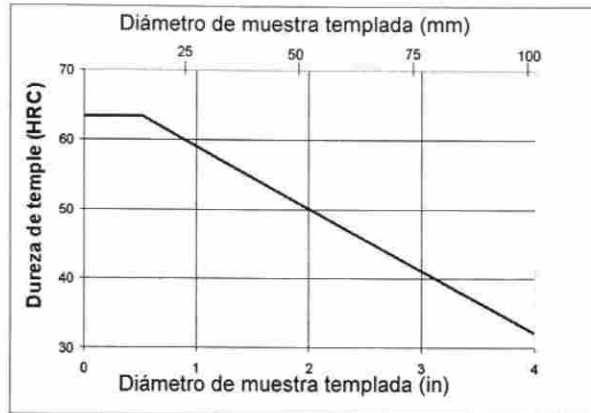


Fig. 2.2 Templabilidad con respecto al diámetro de la probeta [4].
Efecto del tamaño de sección en la dureza superficial de un acero al 0.54% C.

La importancia del carbono en la aleación radica en el máximo de dureza alcanzable que se encuentra para composiciones de 0.60% de carbono. En general la templabilidad de acero aumenta al incrementarse el contenido de elementos aleantes, a excepción del cobalto [4].

2.4 Aceros para trabajo en caliente grupo H.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

El grupo H consta de aceros que son utilizados en operaciones que involucran abrasión y/o altas presiones combinadas con altas temperaturas de trabajo. El grupo de aceros herramienta H usualmente tiene contenidos de carbono que van de 0.30 a 0.45%, así como cromo, tungsteno, molibdeno y vanadio[2].

Este grupo es dividido en tres subgrupos los cuales son: aceros para trabajo en caliente al cromo (Tipos H1 al H19), aceros para trabajo en caliente al tungsteno (Tipos H20 al H39), y aceros para trabajo en caliente al molibdeno (Tipos H40 al H59), ver tabla 2.1 [2].

2.5 Aceros para trabajo en caliente al cromo.

Los aceros para trabajo en caliente al cromo cuentan con buena resistencia al ablandamiento por calentamiento debido a su contenido medio de cromo y a la adición de elementos formadores de carburos como son el molibdeno, tungsteno y vanadio, ver tabla 2.3. Los contenidos de carbono así como el bajo contenido de elementos aleantes proporcionan una buena tenacidad para durezas normales de trabajo de 40 a 55 HRC. Los contenidos de tungsteno y molibdeno incrementan la resistencia en caliente pero disminuyen ligeramente la tenacidad. El vanadio es adicionado para incrementar la resistencia al desgaste erosivo. El contenido de silicio mejora la resistencia a la oxidación a temperaturas de trabajo por arriba de los 800 °C [2].

Tabla 2.3 Límites de composición química de aceros para trabajo en caliente al cromo [2] .

Designación	Composición % En Peso								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
H10	0.35 - 0.45	0.25 - 0.70	0.80 - 1.20	3.00 - 3.75	0.30 max	2.00 - 3.00	...	0.25 - 0.75	...
H11	0.33 - 0.43	0.20 - 0.50	0.80 - 1.20	4.75 - 5.50	0.30 max	1.10 - 1.60	...	0.30 - 0.60	...
H12	0.30 - 0.40	0.20 - 0.50	0.80 - 1.20	4.75 - 5.50	0.30 max	1.25 - 1.75	1.00 - 1.70	0.50 max	...
H13	0.32 - 0.45	0.20 - 0.50	0.80 - 1.20	4.75 - 5.50	0.30 max	1.10 - 1.75	...	0.80 - 1.20	...
H14	0.35 - 0.45	0.20 - 0.50	0.80 - 1.20	4.75 - 5.50	0.30 max	...	4.00 - 5.25
H19	0.32 - 0.45	0.20 - 0.50	0.20 - 0.50	4.00 - 4.75	0.30 max	0.30 - 0.55	3.75 - 4.50	1.75 - 2.20	4.00 - 4.50

El subgrupo H al cromo presenta buena profundidad de templado, los más ampliamente usados son: H11, H12, y H13 los cuales pueden ser templados al aire en secciones de hasta 152 mm. La cantidad de aire utilizado durante el temple y el contenido balanceado de la aleación conducen a una muy baja distorsión durante el templado [2].

Las propiedades más importantes de este grupo se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Características de procesamiento y servicio en aceros grado herramienta grupo H base cromo [2].

AISI	Resistencia a la Decarburización	Dureza y Templado				Fabricación y Servicio			
		Templabilidad	Cantidad de Distorsión	Resistencia al Cracking	Dureza Aprox. HRC	Maquinabilidad	Tenacidad	Dureza al Rojo	Resistencia al Desgaste
H 10	Media	Profundo	Muy bajo	Excelente	39-56	Media-Alta	Alta	Alta	Media
H 11	Media	Profundo	Muy bajo	Excelente	38-54	Media-Alta	Muy alta	Alta	Media
H 12	Media	Profundo	Muy bajo	Excelente	38-55	Media-Alta	Muy alta	Alta	Media
H 13	Media	Profundo	Muy bajo	Excelente	38-53	Media-Alta	Muy alta	Alta	Media
H 14	Media	Profundo	Bajo	Excelente	40-47	Media	Alta	Alta	Media
H 19	Media	Profundo	A. bajo, O. medio	Alto	40-57	Media	Alta	Alta	Media-Alta

El subgrupo se adapta para funcionar en todo tipo de troqueles al calor, especialmente troqueles de extrusión, troqueles para piezas fundidas, troqueles para forja, mandriles y cizallas en caliente [2].

2.6 Acero Grado Herramienta H13.

El acero grado herramienta H13, siendo el material a estudio en el presente trabajo forma parte del subgrupo de aceros para trabajo en caliente al cromo; sus principales elementos aleantes son cromo, molibdeno, vanadio, silicio y manganeso, los límites de composición química están mostrados en la tabla 2.3 [2].

Dentro de sus principales características podemos mencionar: resistencia media a la decarburización, alta templabilidad, muy baja distorsión y una excelente resistencia al choque térmico, ver tabla 2.4. Cuenta con un grado de maquinabilidad de 60 a 70% en estado recocido, ver tabla 2.2. Su nivel de tenacidad es el más alto de los aceros grado herramienta, además de tener media resistencia a la erosión debido a sus altos contenidos de vanadio y

dureza al rojo, ver figura 2.1 y tabla 2.4 [2,5]. Las principales aplicaciones son en formado en frío y en moldes para inyección de aluminio y plomo [2].

2.7 Tratamientos térmicos del acero H-13.

El tratamiento térmico es “una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, a tiempos determinados y aplicados a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas” [3]:

Es importante controlar la atmósfera en la que se encuentra el acero durante el tratamiento térmico o bien empaquetar la pieza para evitar la presencia de escamas o descarburización. Los medios de temple en este tipo de acero son: aceite, baños de sales o mediante corriente de aire, este último procurando que sea de forma homogénea en la pieza y libre de humedad [5].

La Tabla 2.5 muestra los límites de temperatura para el templeado y revenido en el subgrupo de aceros grado herramienta para trabajo en caliente al cromo, así como los tiempos límite del austenizado y el medio de temple.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Tabla 2.5 Templeado y Revenido en aceros grado herramienta grupo H base cromo [2] ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tipo	Templeado				
	Precalentamiento °C	Temperatura Templeado °C	Tiempo (min.) a la Temperatura	Medio de Templeado (a)	Temperatura Revenido °C
H10	815	1010-1040	15-40 (b)	A	540-650
H11, H12	815	995-1025	15-40 (b)	A	540-650
H13	815	995-1040	15-40 (b)	A	540-650
H14	815	1010-1065	15-40 (b)	A	540-650
H19	815	1095-1205	02-05	A ó O	540-705

(e) Tiempos aplicados para tratamiento térmico en horno abierto, (A) Aire, (O) Aceite. Abreviaturas (a) A = aire, O = aceite. (b) tiempos aplicados para tratamientos térmicos en horno abierto.

Las principales consideraciones para la realización de los tratamientos térmicos para el acero H13 son mencionadas a continuación.

Recocido.

En el recocido, la temperatura es llevada lenta y uniformemente por arriba del intervalo de temperatura de transformación. En el acero H13 las superficies deben ser protegidas contra la decarburización mediante empaquetamiento, atmósfera controlada o vacío. El acero es llevado a una temperatura de 845 a 900 °C, usándose el límite inferior para piezas pequeñas. Una vez alcanzada la temperatura de recocido deberá ser mantenida por 1 hora (piezas delgadas) a 4 horas (piezas o secciones grandes). Posteriormente un enfriamiento lento dentro del horno con valores de descenso no mayores a 28 °C/hr, deberá ser realizado hasta alcanzar la temperatura de 540 °C. A partir de esta temperatura un enfriamiento rápido no afectará a la dureza del material. El rango de durezas típicas del material en estado recocido se encuentra entre 12 y 20 HCR [5]

Relevado de Esfuerzos.

Calentar la pieza entre 650 y 675°C mantenerla 1 hora o más. Enfriarla lentamente a temperatura ambiente. Este tratamiento es usado después de haberse tenido un maquinado burdo en la pieza. El objetivo del tratamiento es alcanzar gran precisión en las dimensiones de la pieza para después efectuar el maquinado fino [6].

Templado.

Para este tratamiento térmico también debe ser protegida la superficie contra la decarburización. Las piezas podrán ser introducidas al horno solo a temperaturas por debajo de los 260 °C, elevar la temperatura a una velocidad de calentamiento no mayor a 110 °C / hr hasta alcanzar una temperatura de

815 °C, donde se debe de mantener 1 hora por pulgada de espesor. Austenizar a 995 - 1040 °C durante un tiempo de entre 15 a 40 minutos, siendo el corto tiempo para secciones pequeñas. Una vez llevado a cabo este ciclo, el material deberá ser enfriado con aire seco de manera uniforme. Las durezas promedio de temple se encuentran entre 51 y 54 HRC [5].

Estabilizado

En este tratamiento la pieza es llevada a una temperatura de 150 a 160 °C para posteriormente enfriarlo a valores de -100 a -195 ° C. El revenido deberá ser efectuado inmediatamente después de que las piezas alcancen la temperatura ambiente [5].

Revenido

El revenido es un tratamiento térmico necesario después del templado o estabilizado del acero, su objetivo es liberar los esfuerzos internos generados en el acero por la transformación de la estructura austenítica a martensítica, produciendo una disminución en la dureza, pero aumentando la tenacidad en la pieza [5].

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La tabla 2.6 muestra las propiedades mecánicas del acero H13 a temperatura ambiente para diferentes temperaturas de revenido

Inmediatamente después de que la pieza alcance una temperatura de 52 °C. puede iniciarse el revenido, en donde según la característica deseada será la temperatura de revenido a emplear [5].

Tabla 2.6 Propiedades Mecánicas del acero grado herramienta H13 [6].

Temperatura de Revenido °C	Esfuerzo de Tensión MPa	Esfuerzo de Cedencia MPa	Elongación %	Reducción de Área %	Energía de Impacto (Charpy) J	Dureza HRC
527	1960	1570	13	46,2	16	52
555	1835	1530	13,1	50,1	24	50
575	1730	1470	13,5	52,4	27	48
593	1580	1365	14,4	53,7	28,5	46
605	1495	1290	15,4	54	30	44

(Para barra redonda, templada en aceite desde una temperatura de 1010 °C con doble revenido 2 + 2h a la temperatura indicada).

Es recomendable utilizar las temperaturas de revenido por arriba de los 510 °C, esto sacrificará un poco la dureza del acero, pero mejorará su tenacidad [6]. La figura 2.3 muestra los valores de dureza obtenidos para el acero H-13 a dos diferentes temperaturas de templado, se puede apreciar que para temperaturas de revenido por arriba de 540 °C (1030 °F) la dureza disminuye abruptamente [5]

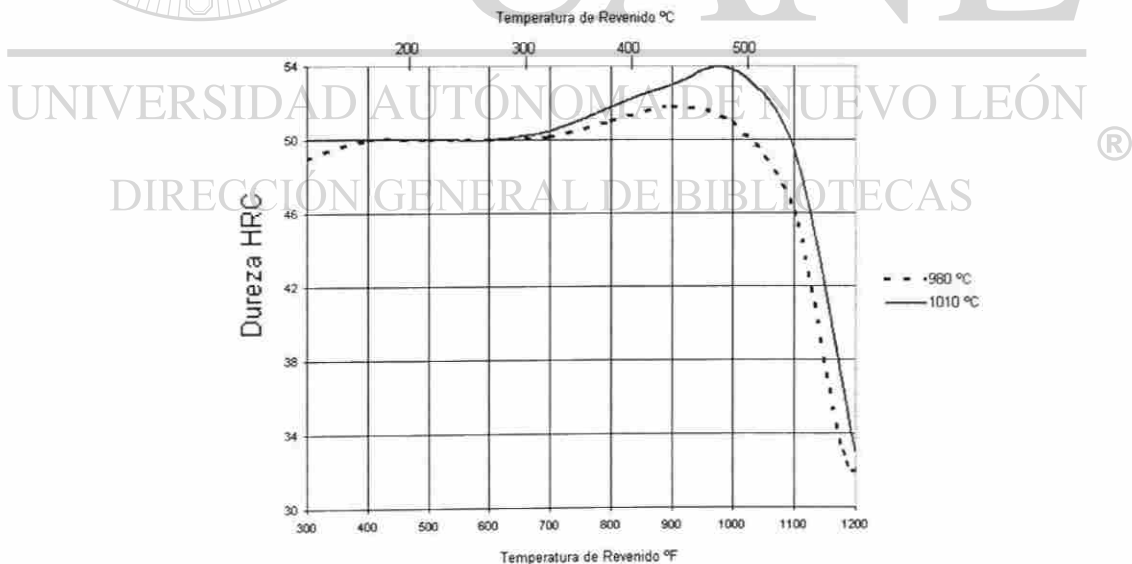


Fig. 2.3 Dureza en función de la temperatura de revenido [5].

Línea punteada, muestra comportamiento del H-13 templado en aire desde una temperatura de 980 °C y doble revenido. La línea continua, muestra el comportamiento del H-13 templado por aire desde una temperatura de 1010 °C y doble revenido.

CAPÍTULO 3

DESGASTE

3.1 Introducción.

La palabra tribología se deriva del griego Τριβος, o tribos, que significa frotar, deslizar o tallar. La definición formal de tribología es: *“la ciencia y tecnología de las superficies interactuando en movimiento relativo y de los temas y prácticas relacionadas”* [7,8].

A pesar de ser un término de reciente creación los tópicos que abarcan su estudio han sido de interés para la humanidad desde que se tuvieron necesidades como la transportación y la alimentación. Podemos decir que desde que el hombre aprendió como hacer fuego o inventó la rueda, ha trabajado con tópicos como son la fricción y el desgaste. La tribología estudia todos los aspectos relacionados con fricción, lubricación y desgaste. El auge de esta ciencia comenzó a tomar gran interés por el año de 1966 donde un estudio realizado por el gobierno de la Gran Bretaña, ahora conocido como el reporte Jost, sugirió que en el Reino Unido se podían lograr ahorros de hasta 500 millones de libras esterlinas, al aplicar tecnología tribológica en el diseño, construcción y operación de maquinaria industrial [7,8].

En la presente y futura situación económica, los materiales y la conservación de la energía están llegando a tener gran importancia. El desgaste y la corrosión son las principales causas de pérdida del material. Cualquier reducción en el desgaste de los materiales traerá considerables ahorros. La fricción por otra parte es una causa seria de la disipación de energía, que al igual que el desgaste traerá significativos ahorros si es controlada [9].

La lubricación es un proceso en donde la fricción y el desgaste entre dos superficies sólidas en movimiento relativo pueden ser reducidos, interponiendo entre las superficies un lubricante. La fricción y el desgaste están basados en interacciones físicas entre dos superficies con movimiento relativo. El rol de la lubricación es el de separar las superficies en movimiento por medio de una película sólida, líquida, o gaseosa que permita el movimiento con bajas resistencias, sin causar ningún daño. Un análisis completo de este tema puede ser visto en el Handbook of Tribology [10].

El tema a profundizar en este capítulo será el desgaste por lo que temas como lubricación y fricción se encuentran fuera del alcance de esta tesis.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

3.2 Mecanismos de desgaste.

El desgaste puede ser definido como el proceso mediante el cual material es desprendido de una o de ambas superficies que se encuentran en contacto, ocurriendo cuando estas se encuentran en movimiento relativo una de la otra [10].

En un buen diseño tribológico, la pérdida de material es un proceso muy lento, pero es estable y continuo. Clasificar los tipos de desgaste que se pueden presentar en un material suele ser difícil. La razón de esta dificultad es que el desgaste o resistencia al desgaste no es una propiedad intrínseca del material,

como lo es el esfuerzo o la dureza, si no que esta en función del sistema en el que opera, esto último fue propuesto por Czichos donde el término “sistema” cubre los materiales de los que son manufacturados los componentes, la naturaleza de la interacción y la interacción con el medio circundante. Como un intento de estandarizar, el trabajo elaborado por Czichos ha sido usado para sentar bases para la especificación alemana DIN 50 320. Esta especificación define cuatro mecanismos básicos: adhesión, abrasión, fatiga y acciones triboquímicas, otros mecanismos como picadura, fretting, erosión, cavitación, etc. son abarcados por los cuatro mecanismos mencionados anteriormente. En la tabla 3.1 podemos observar que la norma DIN muestra los fenómenos de desgaste de acuerdo a la acción tribológica [7].






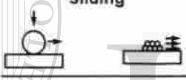




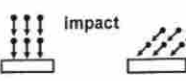


La clasificación del desgaste toma dos aspectos en consideración; el primero es basado en como ocurre el desgaste en las piezas o componentes, como pueden ser picaduras, degradación, y estriación entre otras. El segundo aspecto, mayormente utilizado, toma en consideración las bases del mecanismo o acción tribológica. Dentro de los principales mecanismos de desgaste se encuentran: abrasión, adhesión, corrosión, erosión, fatiga, fretting, oxidación.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 3.1 Clasificación de los fenómenos de desgaste [11].

System structure	Tribological Action (symbols)	Type of wear	Effective mechanisms (individually or combined)			
			Adhesion	Abrasion	Surface fatiga	Tribo-chemical reactions
Solid Interfacial medium (full fluid film separation) -solid	Sliding Rolling 	—			x	x
Solid -Solid (with solid friction, boundary, lubrication, mixed lubrication)	sliding 	Sliding wear	x	x	x	x
	rolling 	Rolling wear	x	x	x	x
	impact 	Impact wear	x	x	x	x
	oscillation 	Fretting wear	x	x	x	x
Solid -Solid and particles	sliding 	Sliding abrasion		x		
	sliding 	Sliding abrasion (three body abrasion)		x		
	rolling 	Rolling abrasion (three body abrasion)			x	
Solid -fluid with particles	flow 	Particle erosion (erosion wear)		x	x	x
Solid -Gas with particles	flow 	Fluid erosion (erosion wear)		x	x	x
	Impact 	Impact wear particle		x	x	x
Solid -fluid	flow osillation 	Material, cavitation, cavitation erosion			x	x
	impact 	Drop erosion			x	x

3.2.1 Desgaste Abrasivo.

En el desgaste abrasivo el material es removido o desplazado de una superficie por partículas duras, de una superficie que es deslizada contra otra.

Existen dos tipos de formas básicas de abrasión. Abrasión por desgaste de dos cuerpos figura 3.1(a) y abrasión por desgaste de tres cuerpos figura 3.1(b). El desgaste por abrasión de dos cuerpos ocurre cuando las protuberancias duras de una superficie son deslizadas contra otra. Un ejemplo de esto es el pulido de una muestra mediante el uso de lijas. Por otra parte el desgaste por abrasión de tres cuerpos se presenta en sistemas donde partículas tienen la libertad de deslizarse o girar entre dos superficies en contacto, el caso de aceites lubricantes contaminados en un sistema de deslizamiento puede ser claro ejemplo de este tipo de abrasión. Los rangos de desgaste en la abrasión de tres cuerpos son generalmente más bajos, que en el sistema abrasión de dos cuerpos [12].

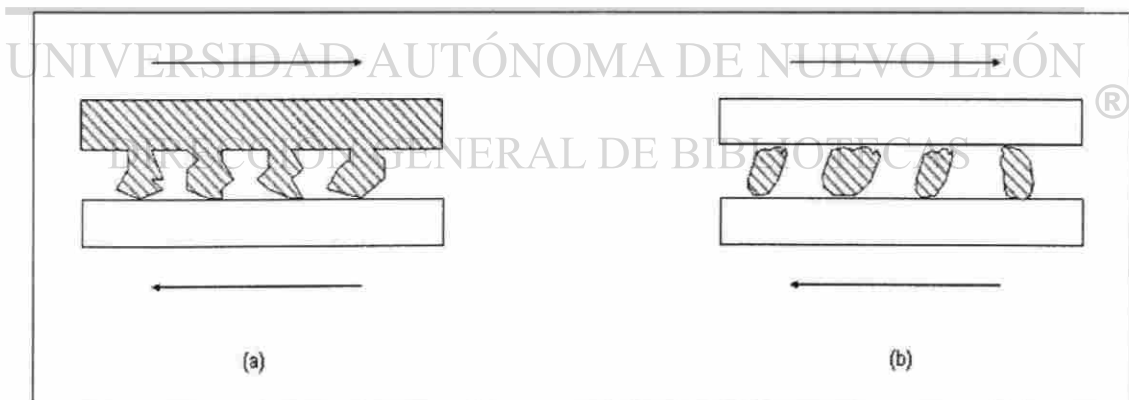


Fig. 3.1 Tipos de Abrasión.
(a) Abrasión de dos cuerpos y (b) abrasión de tres cuerpos [12].

3.2.2 Desgaste Adhesivo.

El desgaste adhesivo ocurre entre dos superficies que se encuentren en contacto, las cuales se adhieren fuertemente formando uniones entre ellas. Un deslizamiento producirá un desprendimiento de material de la superficie suave. Si el material es dúctil, la deformación que se produce antes de la separación de la partícula es mucho mayor, la partícula que ha sido separada de la aspereza puede permanecer unida a la otra aspereza como material transferido de una superficie a otra o puede ser liberada como partícula de desgaste.

En algunos casos, el punto de cedencia del material es excedido y las asperezas se deforman plásticamente hasta que el área real de contacto incrementa lo suficiente para soportar la carga aplicada, de tal modo que las superficies pueden adherirse, ver figura 3.2. Esto causará que la soldadura en frío tome lugar. Deslizamientos continuos causarán que las uniones entre asperezas sean cizalladas y nuevas uniones sean formadas. Algunos factores como partículas de contaminantes pueden ayudar a minimizar esta adhesión, las cuales se dispersan del área de contacto por el movimiento relativo tangencial que ocurre en la interfase [10].

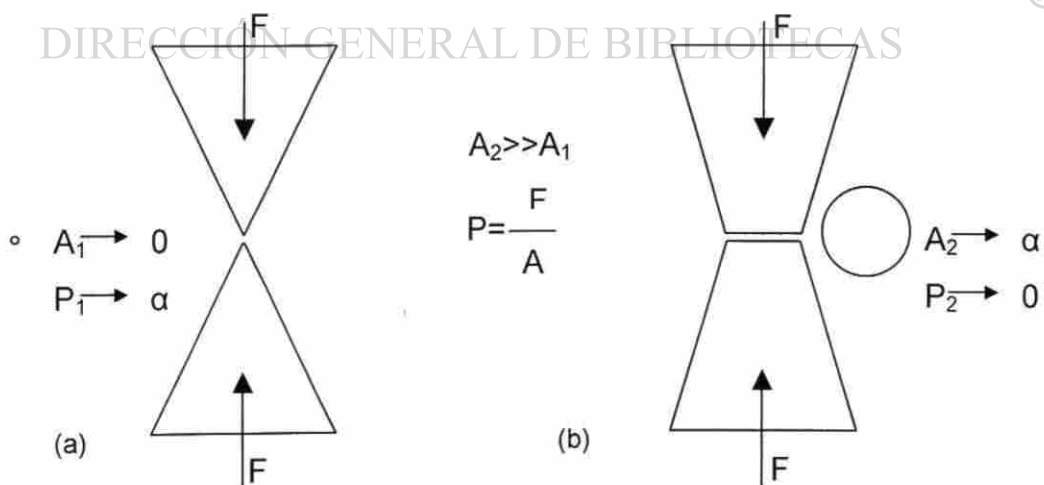


Fig 3.2 Desgaste adhesivo [8]

Generación del mecanismo de adhesión al ser deformadas plásticamente las asperezas. (a) Presión de contacto muy alta debido a la pequeña área de contacto, (b) La partícula es deformada plásticamente aumentando su área de contacto. Produciéndose así la adhesión. $A = \text{Área de contacto}$, $F = \text{Fuerza}$, $P = \text{Presión de contacto}$

3.2.3 Desgaste Corrosivo.

Es caracterizado como la degradación de materiales en donde la corrosión y los mecanismos de desgaste se encuentran involucrados. La combinación de efectos de desgaste y corrosión puede resultar en una pérdida total de material mucho más grande que si se presentarían por adición o individualmente. La deformación plástica por altos esfuerzos de contacto causa endurecimiento por deformación y susceptibilidad al ataque químico. De igual forma la deformación plástica ocurrida en el mecanismo de desgaste por impacto puede hacer que las superficies sean más susceptibles a la corrosión [13].

El modelo de desgaste corrosivo (figura 3.3), es explicado en dos etapas.

- 1.- Formación de una película de óxido en la superficie. Esta película de óxido puede operar como lubricante, en la mayoría de los materiales no es posible ya que dicha película es muy frágil.
- 2.- Al ser esta capa de óxido frágil queda expuesta a los fenómenos de deslizamiento del sistema, siendo esta removida [10].

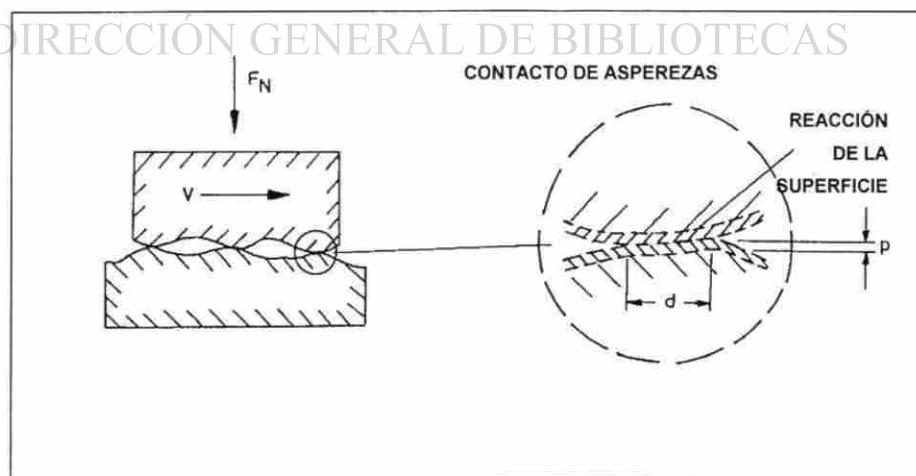


Fig.3.3 Desgaste corrosivo.
Modelo representativo de la formación de la capa de oxido [10].

3.2.4 Desgaste Erosivo.

El desgaste efectuado por el mecanismo de erosión genera la pérdida de material en la superficie, debido a estar expuesta a repetidos impactos de partículas sólidas o líquidas [12].

Erosión por lodos puede ser definida como la pérdida de material que experimenta una superficie debido al flujo de una mezcla de partículas sólidas dentro de un líquido a altas velocidades. Algunos de las formas en que se presenta este tipo de erosión son mostrados en la figura 3.4 [13].

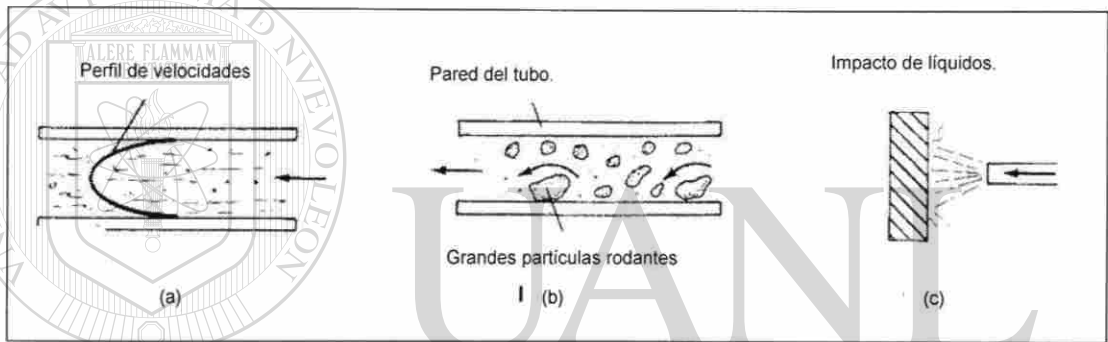


Fig.3.4 Erosión por lodos.

(a)Erosión a altas velocidades, (B) Conducción de rocas en tubería. (c) Impacto de líquidos [14].

La erosión por impacto de partículas sólidas se define como la pérdida de material que resulta de repetidos impactos de pequeñas partículas sólidas. En algunos casos este es un fenómeno útil, como lo son la limpieza de equipos, en los que por medio de disparar arena a presión, obtenemos superficies libres de óxidos, o el usar máquinas de corte bajo este mecanismo, pero también es un serio problema en muchos sistemas ingenieriles [13].

En la erosión por impacto de partículas sólidas se consideran aspectos como: la forma, el tamaño, velocidad y dureza de la partícula erosiva, así como la dureza de la superficie, la distancia boquilla-muestra y el ángulo de impacto los cuales serán discutidos en el siguiente capítulo.

3.2.5 Desgaste por fatiga.

El desgaste por el mecanismo de fatiga es el resultado de esfuerzos cíclicos entre las asperezas de dos superficies en contacto. El coeficiente de fricción es factor determinante, ya que al estar las superficies lubricadas la adhesión es mínima, pero en sistemas con altos coeficientes de fricción, tendremos zonas de intensa deformación muy cercanas a la superficie, creando grietas superficiales y sub-superficiales, las cuales coalescerán (figura 3.5) [13].

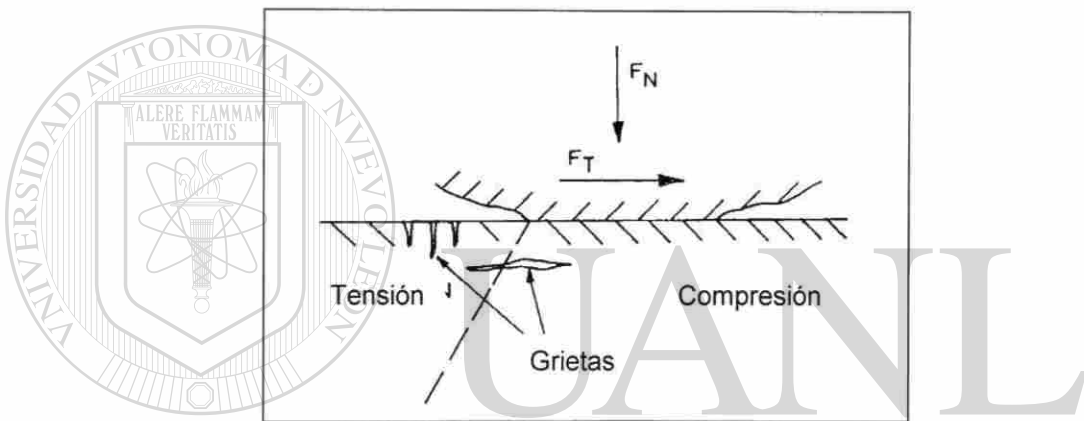


Fig. 3.5 Desgaste por fatiga [10].
Esquema de la formación de grietas superficiales y sub-superficiales.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

3.2.6 Desgaste por fretting.

El fretting se debe a la existencia de movimientos oscilatorios de amplitud pequeña entre dos superficies en contacto. El mecanismo se presenta cuando se mantiene el sistema sometido a un gran número de ciclos. Fretting ocurre entre componentes que tienen como función evitar el movimiento, un ejemplo son los sujetadores de presión. El medio ambiente juega un papel importante en este tipo de desgaste, ya que bajo condiciones húmedas ha sido mucho mayor que en condiciones secas. Esto se debe a que fretting es iniciado por adhesión, amplificado por corrosión, y sus principales efectos son por abrasión. La figura

3.6 indica los lugares que se encuentran propensos a fretting en un remache. La deformación plástica por los altos esfuerzos de contacto causa endurecimiento por deformación y susceptibilidad al ataque químico, el atrapamiento de humedad debido a las hendiduras en este tipo de uniones provoca la corrosión, por último los mecanismos oscilatorios causan abrasión [10].

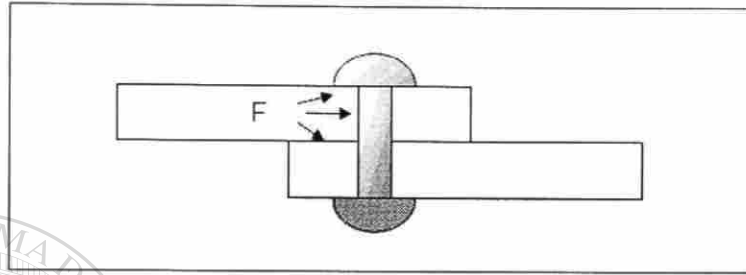


Fig. 3.6 Desgaste por fretting [13].

Lugares que se encuentran propensos a fretting en un remache.

3.2.7 Desgaste Oxidativo.

Se presenta en superficies metálicas bajo deslizamiento sin lubricación o poca lubricación, en presencia de aire u oxígeno. El calor generado por la fricción en contacto deslizante, en presencia de oxígeno provocan la oxidación acelerada, ver la figura 3.7.

El desgaste oxidativo también se puede presentar bajo sistemas de deslizamiento lubricados, en donde el espesor de la película del lubricante se encuentre por debajo de los valores de la rugosidad de las superficies en contacto [13].

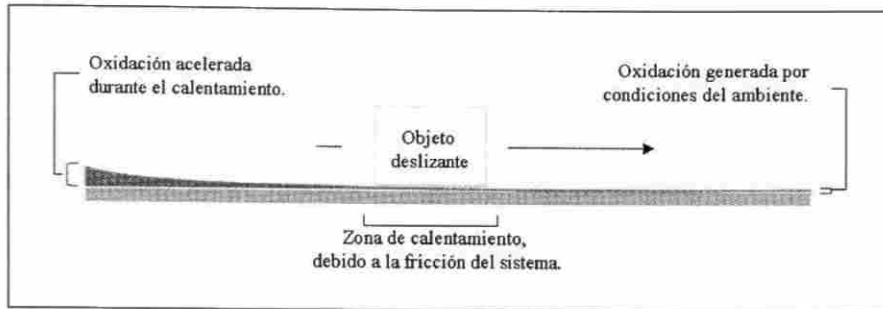


Fig 3.7 Desgaste Oxidativo.

Crecimiento de oxido debido al calor generado por fricción en un contacto deslizante.

3.3 Aplicación útil del desgaste.

Cualquiera que sea el mecanismo de desgaste será considerado como un proceso destructivo. Y en la mayoría de los casos es considerado como un proceso no deseado. Algunos ejemplos de la aplicación del desgaste en forma útil son presentados a continuación.

Por medio del desgaste abrasivo o erosivo se proporciona un acabado a las superficies. Un ejemplo es el uso de papel abrasivo para desprender material de superficies y posteriormente papeles más finos para dar un pulido a la superficie. Otro método útil es el uso del "sand blasting" (figura 3.8), en este proceso partículas de arena son proyectadas contra la superficie con la finalidad de tener una superficie limpia [14].



Fig.3.8 Aplicación útil del desgaste.
Limpieza por medio de mecanismos erosivos.

En muchos sistemas es posible hacer uso de los mecanismos de desgaste ocurridos, para evaluar el progreso de un evento en un sistema mientras éste se encuentra en operación. La ventaja del uso de los mecanismos de desgaste para diagnósticos, es que las observaciones pueden ser llevadas a cabo tanto en operación o cuando el sistema se encuentre averiado.

Un ejemplo práctico es llevado en la medicina del deporte, en donde tanto entrenadores como atletas inspeccionan deformaciones y alteraciones del calzado usado, mostrando especial interés en el desgaste, ya que muestra en forma fidedigna lo que le ocurre a los tobillos y los pies del deportista durante la acción deportiva, encontrando por medio de esta inspección, problemas como pronación o supinación (figura 3.9).

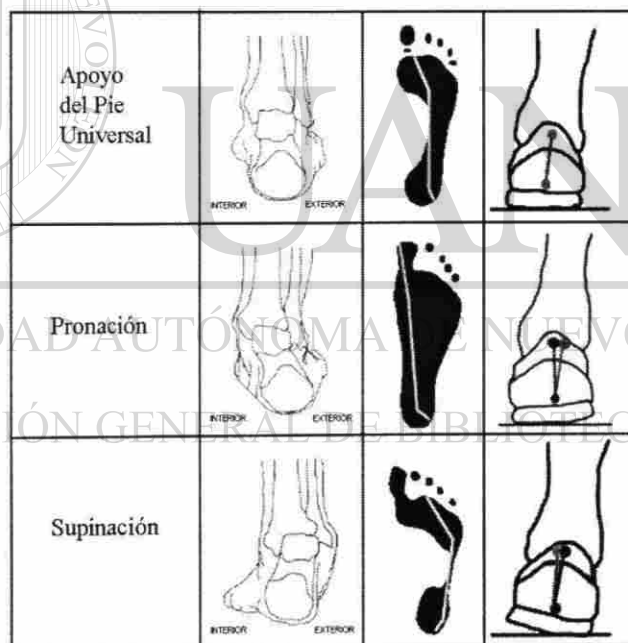


Fig. 3.9 Diagnóstico de desgaste.
Diagnóstico del tipo de pisada por medio del desgaste [15].

Existe una gran cantidad de aplicaciones útiles de mecanismos de desgaste, pero a pesar de esto en general, es considerado como un proceso no deseado [14].

3.4 Categorías y condiciones de pruebas tribológicas.

Las pruebas tribológicas pueden ser agrupadas en seis categorías. Dependiendo de la estructura y función de la maquinaria, sistema, componente o espécimen a ser estudiado, así como de la condición operativa, La figura 3.10 muestra las categorías, y los tipos de prueba que son llevados a cabo en cada una de ellas [16].


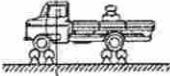

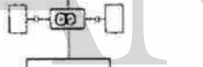


Categoría	Tipo de prueba	Símbolo
I	Pruebas de campo para maquinaria	
II	Pruebas de banco para maquinaria.	
III	Pruebas de banco para sistemas.	
IV	Pruebas de banco para componentes.	
V	Pruebas de modelos.	
VI	Pruebas de laboratorio.	

Fig. 3.10 Categorías de pruebas tribológicas [16].

Como se puede observar, cada categoría presenta condiciones operativas distintas, por lo tanto difieren en alcance y sus resultados no podrán ser extrapolados fácilmente a alguna categoría superior.

Las pruebas de la categoría I representa un desempeño real del objeto bajo estudio, realizar esta prueba requiere en alguno de los casos de generar las condiciones a las que estará desempeñándose el equipo. Un ejemplo de esto es el off road test track en Tuscaloosa County, Alabama E.U.A. que Mercedes

Benz tiene para evaluar a sus vehículos todo terreno. En la figura 3.11 se puede observar las condiciones operativas a las que es sometido el vehículo.

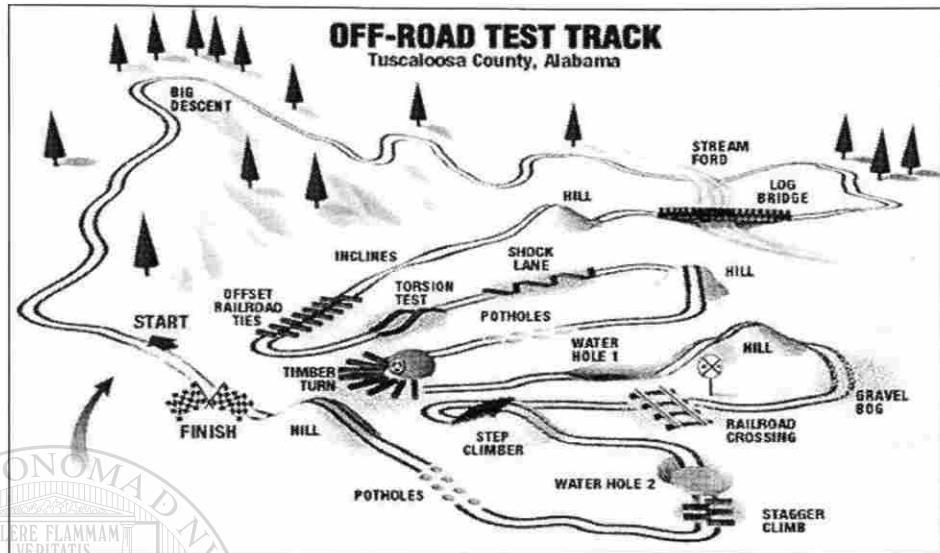


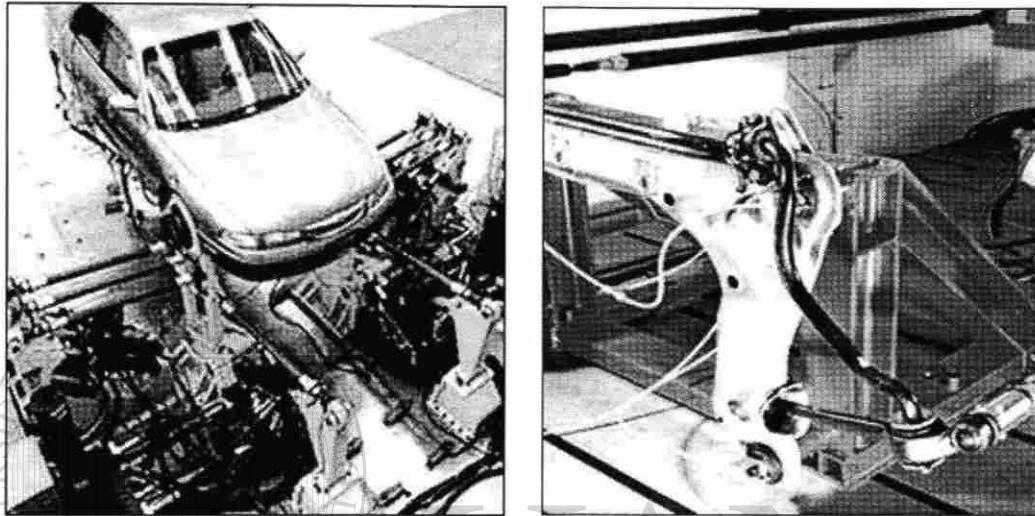
Fig. 3.11 Mapa del recorrido para pruebas de campo.

En vehículos todo terreno. (Autorización Mercedes Benz Tuscaloosa County, Alabama E.U.A.)

En lo que respecta a pruebas de banco se encuentran las categorías que involucran el estudio tribológico de máquinas, sistemas y componentes. En la categoría II las pruebas se llevan bajo algunas simplificaciones del medio o variables operativas, en las cuales condiciones como temperatura y vibraciones entre otras son sustancialmente diferentes a las llevadas en las pruebas de campo. En las pruebas de subsistemas (categoría III) las interacciones de diferentes partes del sistema son reducidas. Tanto las pruebas de componentes (categoría IV) como las pruebas de modelos o componente simple (categoría V) son llevadas bajo condiciones de operación más estrechas.

Es común encontrar compañías con bancos de prueba versátiles, donde pueden llevar a cabo pruebas tribológicas para toda la máquina, algún sistema o componentes, tal es el caso de compañías como CITEAN donde cuentan con laboratorio de vehículo completo (figura 3.12) y componentes para llevar a cabo ensayos con el simulador de carretera o la posibilidad de definir e implementar ensayos particularizados en los módulos de suspensión de uno de los ejes del

vehículo. Una de las ventajas de estas categorías es que son capaces de reproducir las condiciones de uso dentro de sus limitaciones y concentrar en una secuencia breve de tiempo la mayor cantidad de daño. Dentro de los ensayos que puede realizar se encuentran durabilidad, fatiga, análisis estructural, cinemática y dinámica vehicular, acústica y vibraciones [16, 17].



(a)

(b)

Fig. 3.12 Bancos de pruebas [17].

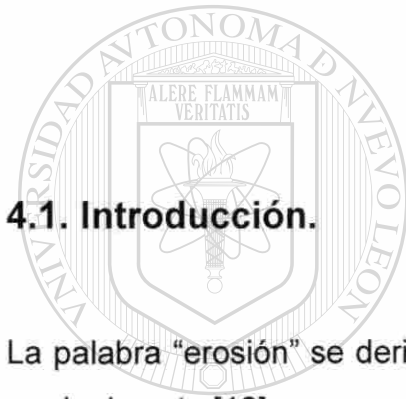
Capacidad de ensayar el vehículo completo o solo componentes, (a) simulador de carretera de dos esquinas y doce grados de libertad, montado sobre una masa sísmica de 500 toneladas capaz de excitar los ejes del automóvil a partir de las señales tomadas en pistas de prueba. (b) simulador de componentes con masa sísmica, actuadores hidráulicos, y controladores digitales.

Las simplificaciones puede variar en diferentes pasos, dando apertura a las pruebas modelo, las cuales son llevadas a cabo bajo periodos cortos y bajo altas cargas y velocidades permitiéndonos estudiar el comportamiento tribológico de los materiales en condiciones extremas.

La categoría VI pruebas de laboratorio, son usadas en el estudio de los principios fundamentales de la fricción y los procesos de desgaste. Las condiciones de éste tipo de pruebas son orientadas hacia el estudio de un fenómeno en específico, mas que simular un comportamiento tribológico real.

CAPÍTULO 4

EROSIÓN



4.1. Introducción.

La palabra “erosión” se deriva del latín “rodere”, que significa roer o desgastar gradualmente [18].

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La pérdida de material debido al fenómeno de erosión es dependiente de factores interrelacionados que incluyen las propiedades y la estructura de los materiales erosionados, las condiciones del medio y las propiedades físicas y químicas de la partícula erosiva [18].

La erosión por partículas sólidas es un fenómeno no deseado en sistemas ingenieriles, como la transportación de sólidos en sistemas neumáticos, turbinas, hélices, componentes de automóviles, sistemas blindados, en procesos de formado, etc. Por otra parte es considerado de gran utilidad en limpieza de superficies, maquinados, decoración y en los últimos años ha sido implementando como un proceso para la generación de micro maquinados [19,20,21].

La Figura 4.1 muestra algunas de las áreas donde se ha tenido gran avance en el control de los mecanismos de erosión.

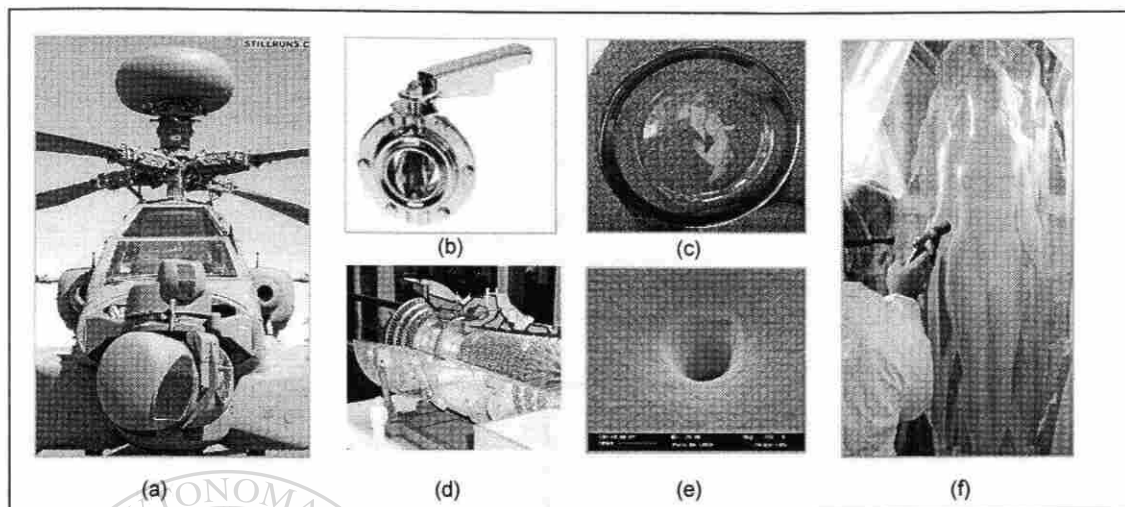


Fig. 4.1 Áreas donde se presenta la erosión.
 (a) Desarrollos militares, (b) Manejo de fluidos con partículas, (c) Decoración, (d) Turbinas, (e) Micro maquinados, (f) Esculturas.

4.2 Desgaste erosivo por partículas sólidas.

El desgaste por partículas sólidas se puede presentar debido a los mecanismos de abrasión y erosión. En abrasión el daño se clasifica en: abrasión de dos cuerpos y abrasión de tres cuerpos (Figura 3.1), los cuales fueron mencionados en el capítulo anterior. En algunos casos el desgaste es debido al impacto de partículas sólidas sobre una superficie, donde las partículas pueden ser conducidas por un gas o un líquido. Este tipo de desgaste es llamado erosión. Algunas veces el término utilizado es el de erosión por partículas sólidas, para distinguirlo de los daños causados por el impacto de líquidos o lodos [12].

En el desgaste erosivo, diversas fuerzas de diferente origen pueden actuar en la partícula que esta en contacto con la superficie. Esto es mostrado en la figura 4.2. Las partículas vecinas pueden ejercer fuerzas de contacto y el flujo del fluido puede causar arrastre. En algunas condiciones la fuerza de gravedad puede tomar importancia, pero la fuerza dominante es la fuerza que desacelera

la velocidad inicial de impacto de la partícula, esta es la fuerza de contacto ejercida por la superficie [12].

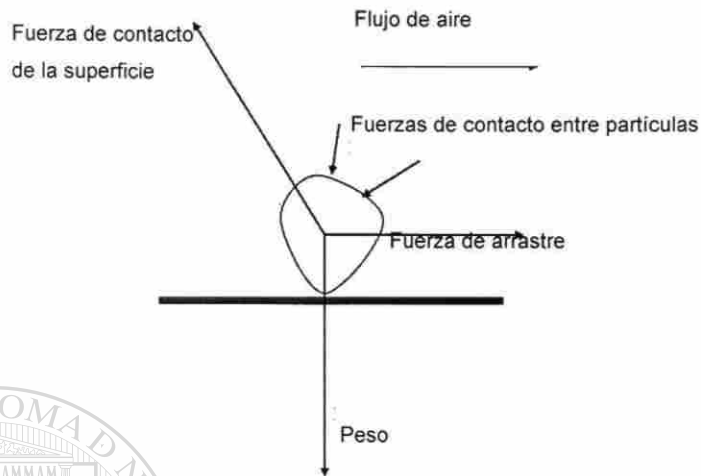


Fig. 4.2 Fuerzas de contacto partícula-superficie.

4.3 Propiedades de la partícula.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

4.3.1 Dureza. ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La dureza es una de las propiedades esenciales de la partícula en relación a la cantidad de desgaste obtenido [12]. Partículas con mayor dureza que la superficie a impactar causarán un mayor desgaste que aquellas partículas con menor dureza que la superficie. Este comportamiento es mostrado en la figura 4.3, donde las magnitudes de desgaste de metales y cerámicos, para el sistema de abrasión de dos cuerpos, empiezan a ser mucho mayores cuando la relación de la dureza de la partícula (H_a) y la dureza de al superficie a impactar (H_s) es mayor a 1.

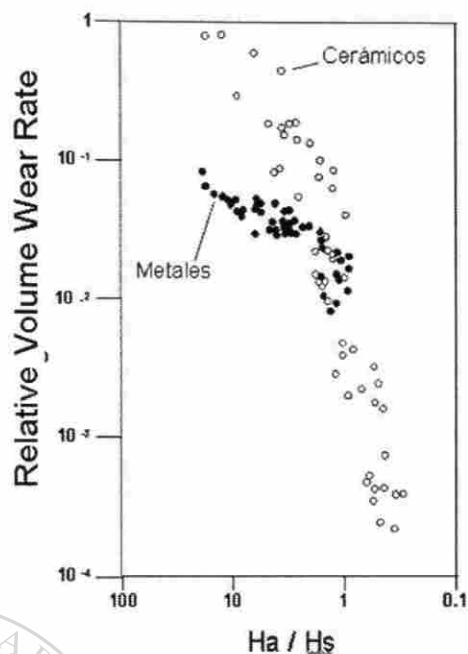


Fig.4.3 Desgaste para la relación de dureza partícula (H_a) – superficie (H_s) [12].

El comportamiento se puede explicar con el estudio de la mecánica de contacto entre una partícula y una superficie plana. Si la superficie del material fluye plásticamente una vez que su punto de cedencia es excedido, ocurrirá un significativo flujo plástico en la superficie cuando la presión de contacto alcance alrededor de tres veces su esfuerzo de cedencia uniaxial ($3Y$). La deformación ocurrirá si la carga normal de la partícula es incrementada y solo si la partícula puede sostener la presión de contacto sin deformarse. Si la partícula falla por flujo plástico o fractura frágil antes de que la presión sobre la superficie alcance alrededor de tres veces su esfuerzo de cedencia uniaxial ($3Y$), ocurrirá insignificante deformación plástica en la superficie [12].

Para partículas esféricas presionadas contra la superficie, la presión de contacto máximo es alrededor de 0.8 veces su dureza de indentación. Podemos esperar que una partícula esférica con dureza H_a cause indentación plástica en una superficie de dureza H_s , si H_s es menor a 0.8 H_a esto es si, $H_a/H_s > 1.25$ (Figura 4.4(a)), para una relación de $H_a/H_s < 1.25$ la partícula será deformada plásticamente (Figura 4.4 (b)) [12].

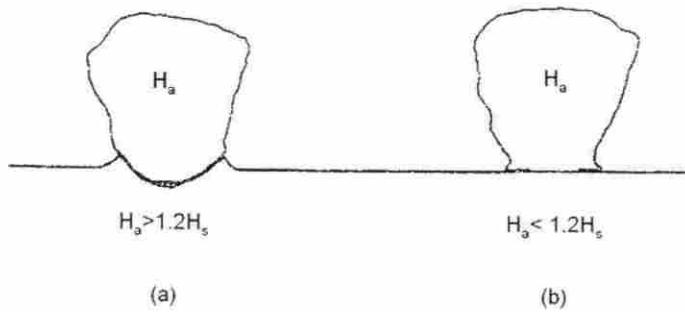


Fig. 4.4 Contacto entre una partícula bajo carga normal y una superficie plana [12].

En la tabla 4.1 se muestran los valores típicos de dureza para una selección de materiales. La sílica es el abrasivo natural mas común, formando cerca del 60% de la corteza terrestre, teniendo una dureza de alrededor de 800 kgf/mm (800 HV). Por otra parte el acero martensítico puede llegar a tener una dureza menor a 1.25 veces la dureza de la sílica, por lo tanto es claro que aceros y metales no ferrosos serán especialmente vulnerables al desgaste erosivo por partículas de sílica.

Tabla 4.1 Valores de dureza de partículas abrasivas, fases de hierro y aceros [12].

<i>1. Typical abrasive materials</i>	<i>Material Hardness (HV)</i>
Diamond	6000-10000
Boron carbide, B_4C	2700-3700
Silicon carbide	2100-2600
Alumina (corundum)	1800-2000
Quartz (silica)	750-1200
Garnet	600-1000
Magnetite, Fe_3O_4	370-600
Soda-lime glass	~500
Fluorite, CaF_2	180-190
<i>2. Phases or constituents of steels and cast irons</i>	
Ferrite, α -Fe	70-200
Pearlite (plain C)	250-320
Pearlite (alloyed)	300-460
Austenite (12% Mn)	170-230
Austenite (low alloy)	250-350
Austenite (high Cr)	300-600
Martensite	500-1000
Cementite, Fe_3C	840-1100
Chromium/iron carbide, $(Fe,Cr)_7C_3$	1200-1600

4.3.2 Forma.

Los rangos de desgaste dependen fuertemente de la forma de la partícula; donde partículas angulares causarán mayor desgaste que partículas redondeadas [12].

Algunas de las formas en las que pueden ser presentadas las partículas erosivas son mostradas en la figura 4.5.

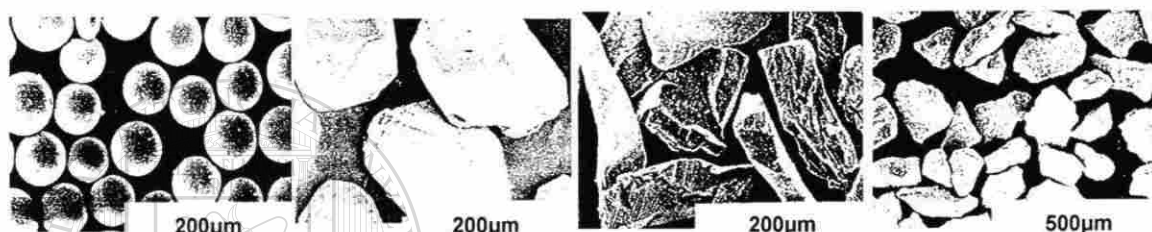


Fig. 4.5 Partículas Erosivas.
(a) Esferas de vidrio, (b) Carburo de Tungsteno, (c) Alumina, (d) Diamantes [22].

Un método sencillo de obtener información de la forma de la partícula es el factor de redondez, este puede ser definido como el área real de proyección A y el área de un círculo con el mismo perímetro P de la proyección.

$$F = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (4.1)$$

Si $F = 1$, la proyección es un círculo; a medida que se aleja de este valor tenderá a ser una partícula angular [12].

Levy llevo a cabo pruebas de erosión en aceros AISI 1020, impactando partículas de acero angulares y esféricas a un ángulo de 30° y a temperatura ambiente, encontrando que los valores de erosión fueron 4 veces mayor en las partículas angulares. La apariencia de las superficies erosionadas indica la razón de la diferencia. Las partículas angulares causaron cráteres profundos por lo cual se formaron bordes más grandes a diferencia de las partículas

redondeadas que produjeron cráteres redondeados y menos profundos. (Figura 4.6) [18].

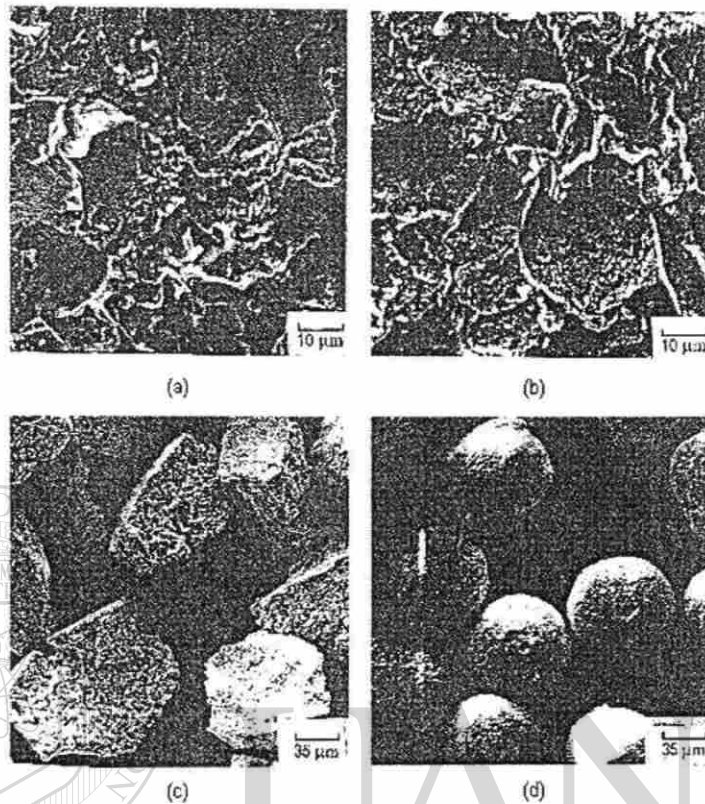


Fig. 4.6 Superficies de acero AISI 1020 erosionado [18].

- a) Por partículas de acero angular b) por partículas de acero esféricas. c) morfología de la partícula angular, d) Morfología de la partícula esférica.

La angularidad de la partícula es medida cuantitativamente muy pocas veces, debido a la dificultad de obtener las características de una forma tridimensional y compleja [12].

Métodos como el "Spike Parameter–Quadratic fit" (SPQ) ha sido uno de los propuestos para describir la partícula por parámetros numéricos [23].

Stachowiak [23] realizó ensayos de erosión a ángulos de 90° en muestras de vidrio, utilizando cuatro formas de partículas. La angularidad de cada uno de los grupos de partículas fue clasificada por el método SPQ, en donde, los valores muy bajos pueden ser traducidos a partículas redondeadas, mientras que para partículas angulares corresponden valores altos de SPQ. La figura 4.7 muestra la correlación entre la angularidad de la partícula y la erosión obtenida [23].

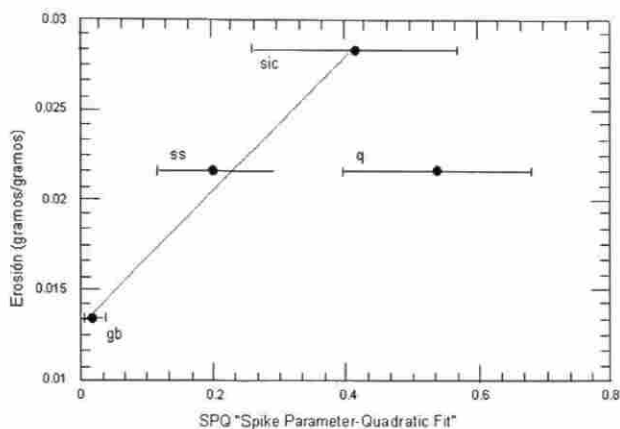


Fig. 4.7 SPQ "Spike-Parameter-Quadratic fit

(gb) Esferas de vidrio, (ss) Arena sílica, (q) Cuarzo (SiC) Carburo de Silicio.
(Tamaño de partículas en el intervalo de 250-300 μ m, partículas fueron de similar densidad)

4.3.3 Tamaño de la partícula.

Se han encontrado diferentes patrones de comportamiento en el desgaste por partículas sólidas tanto en abrasión como en erosión de materiales dúctiles, donde esta involucrado el tamaño de las partículas. Iain Finnie [12] demostró que la cantidad de desgaste es menor cuando el tamaño de las partículas es menor a 100 μ m.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La figura 4.8 muestra los resultados obtenidos, donde partículas de 10 μ m causan alrededor de una cuarta parte de el desgaste que causan las partículas de 100 μ m [24].

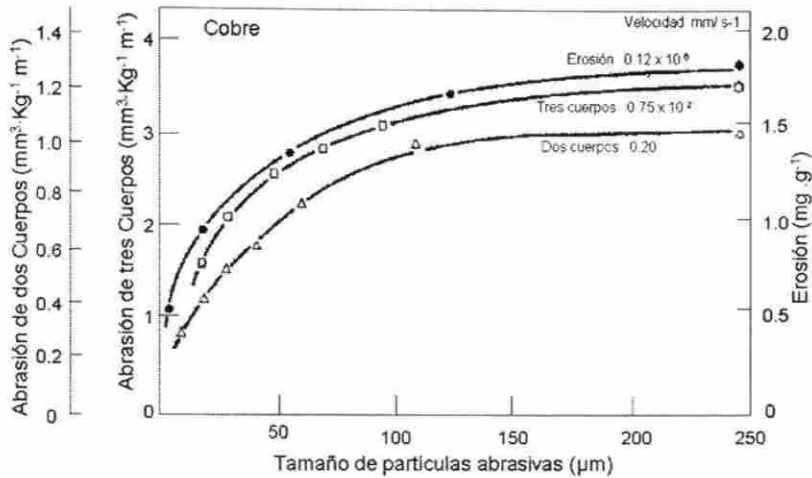


Fig. 4.8 Desgaste en función del tamaño de la partícula [24].

Desgaste de Cobre por partículas de SiC bajo los sistemas erosión (masa perdida / masa de abrasivo) y en abrasión de dos y tres cuerpos (volumen removido / (carga x distancia))

Para materiales frágiles el desgaste involucra fractura frágil y existe una fuerte dependencia con el tamaño de partícula; llegándose a presentar incluso comportamientos dúctiles en el material. Este tema será analizado en la sección de mecanismos dúctil-frágil [24].

Cualquiera que sea el mecanismo dominante, las partículas pequeñas causan afortunadamente menor desgaste. Los métodos de filtración o centrífugos son muy utilizados, debido a que eliminan grandes partículas del sistema y dejan las más pequeñas, disminuyendo así, los rangos de desgaste efectivamente [12].

4.4 Desgaste erosivo por deformación plástica.

4.4.1 Mecanismo.

Para entrar en detalle de los fenómenos que ocurren en este tipo de erosión, se puede examinar el comportamiento de una partícula dura golpeando la superficie a un ángulo de 90° [12]. La única fuerza que se considera es la fuerza de contacto ejercida por la superficie, como fue mostrada con anterioridad en el análisis de fuerzas que interactúan en el contacto de una partícula y una superficie (figura 4.2). Se supone que el flujo de material es totalmente plástico con una constante de indentación H (dureza). La figura 4.9 representa el momento en que una partícula de masa (m), viajando a una velocidad (U), toca la superficie en un tiempo $t=0$. A un tiempo determinado t , la partícula ha penetrado la superficie sólida una distancia x y formando un área de contacto $A(x)$, la cual está determinada por la forma de la partícula. Al llegar la partícula a su punto de reposo a un tiempo $t=T$ ha penetrado una distancia d .

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

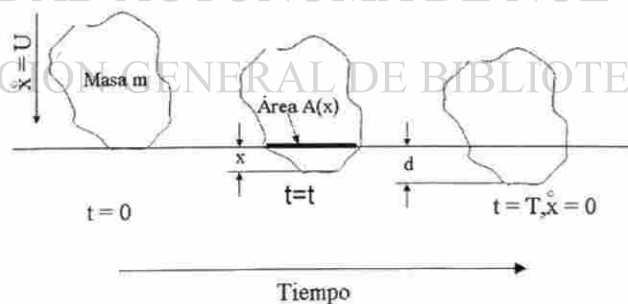


Fig. 4.9 Proceso de penetración de una partícula rígida sobre una superficie plana. Deformación plástica de la superficie, contacto inicial a un tiempo $t=0$, partícula en reposo a un tiempo $t=T$ [12].

La fuerza dominante que desacelera a la partícula será provocada por la presión del flujo plástico actuando sobre el área $A(x)$ y la ecuación de equilibrio queda expresada como [12].

$$m \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) = -HA(x) \quad (4.2)$$

El trabajo realizado por la fuerza retardante, ejercida por la resistencia a ser penetrada la superficie, será igual a la energía cinética inicial de la partícula. Esto puede ser expresado por la siguiente ecuación [12]:

$$\int_0^d HA(x) dx = \frac{1}{2} mU^2 \quad (4.3)$$

El volumen final (V) de la indentación será [12]:

$$V = \int_0^d A(x) dx \quad (4.4)$$

Y considerando la dureza como constante, el volumen (V) del material desplazado será [12]:

$$V = \frac{mU^2}{2H} \quad (4.5)$$

El material desplazado de la indentación puede experimentar diversos destinos: puede ser acomodado por deformación elástica del material, lejos de la marca, puede crear un borde alrededor de la huella, o bien puede ser removido de la indentación como desgaste por viruta, dando lugar a la siguiente ecuación [12].

$$\text{masa del material removido} = k\rho \frac{mU^2}{2H} \quad (4.6)$$

Donde ρ es la densidad del material erosionado y el factor k representa la fracción de material que es removida como material de desgaste.

La suma de la ecuación anterior sobre muchos impactos sugiere que la masa total de material removido de la superficie deberá ser proporcional al total de la masa de partículas erosivas que golpean en él. Dándonos así el valor "real" de la erosión.

$$E = \frac{\text{masa de material removido}}{\text{masa de partículas erosivas golpeando la superficie}} \quad (4.7)$$

Donde la E es adimensional y la ecuación 4.7 será:

$$E = k\rho \frac{U^2}{2H} \quad (4.8)$$

Esta ecuación predice que la erosión es inversamente proporcional a la dureza de la superficie, y el factor k es una medida de la eficiencia de los procesos de desprendimiento de material. El valor de k tomaría el valor de la unidad si fuera el caso de que todo el material desplazado por la erosión fuera removido, los valores de k para los metales se encuentra dentro del intervalo de 5×10^{-3} a 10^{-1} , los cuales son muy similares a los valores observados en el mecanismo de abrasión de dos cuerpos.

La ecuación 4.8 provee sólo una estimación cruda de los factores que controlan el desgaste erosivo; ignora por ejemplo, el ángulo de impacto.

4.4.2 Ángulo de impacto.

Factores como la geometría de la deformación causada por el impacto de partículas duras depende de la velocidad, la forma y orientación de las partículas así como del ángulo de incidencia. En la erosión de los materiales dúctiles el ángulo de impacto es un factor que influye fuertemente en los resultados obtenidos. En la figura 4.10 podemos observar como el desgaste para materiales dúctiles muestra un máximo cuando los ángulos de impacto se encuentran entre 20 y 30° , y posteriormente para ángulos de impacto de 90° el desgaste se encuentra en valores de una tercera parte del máximo [12,24].

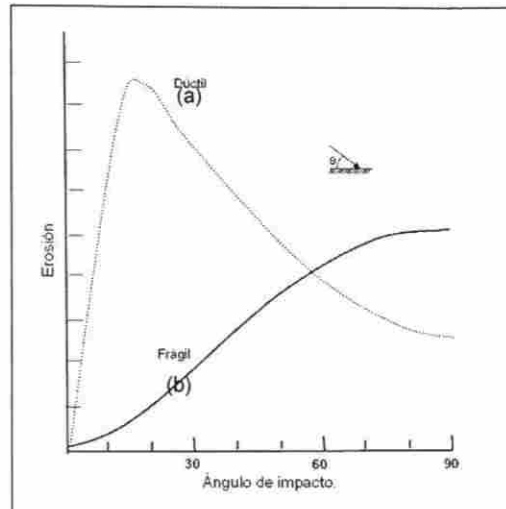


Fig. 4.10 Erosión con respecto al ángulo de impacto.
(a) Comportamiento dúctil, (b) comportamiento frágil [12].

La figura 4.11, muestra los comportamientos analítico y experimental que encontró Finnie [12] en materiales dúctiles. Para ángulos muy bajos el material experimenta microcorte. Para ángulos mayores la superficie del material es deformada plásticamente dejando material apilado hacia los lados y hacia el frente de la partícula, el cual será vulnerable a desprenderse por subsecuentes impactos [24].

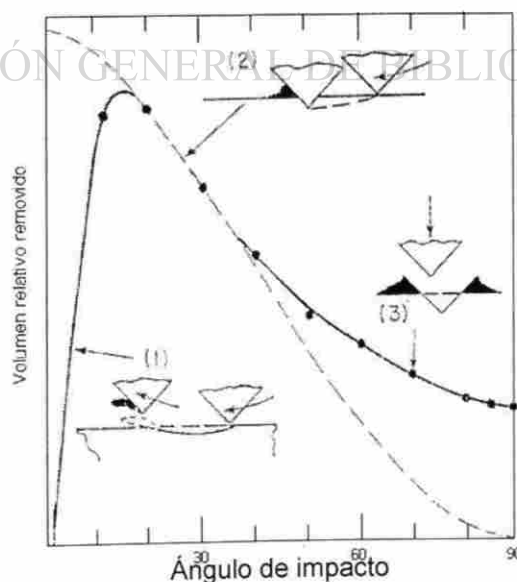


Fig.4.11 Mecanismos dúctiles propuestos con respecto al ángulo de impacto.
(1) microcorte, (2) apilamiento, (3) indentación [24].

En el caso de ángulos de impacto a 90° las partículas efectuarán una indentación plástica alrededor de la zona de impacto creando un borde alrededor de la misma. El modelo analítico predice cero deformaciones a ángulos normales de incidencia y los resultados experimentales difieren de estos. Esto puede ser debido a que durante la erosión solo los primeros impactos en la superficie serán a 90° posteriormente la deformación plástica ocurrida por los impactos generará una rugosidad en la superficie lo que conducirá que los próximos impactos se realicen a una distribución de ángulos [24].

4.4.3 Daños causados en ángulos oblicuos.

Hutchings [12] ha encontrado tres tipos básicos de daño causados en metales por el impacto de partículas sólidas bajo un ángulo de incidencia de 30° . Los tres tipos de daños se encuentran ilustrados en la figura 4.12 donde la dirección de los impactos fue de izquierda a derecha.

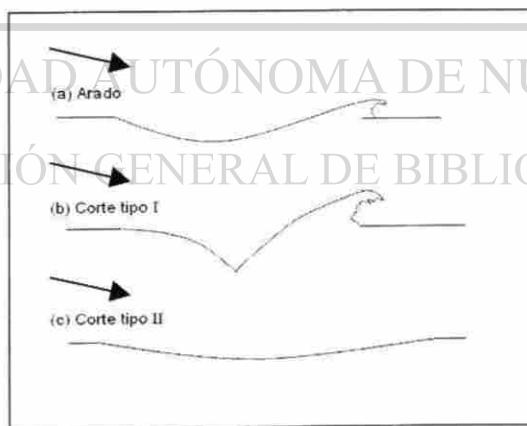


Fig. 4.12 Daño causado en materiales dúctiles.

(a) Arado causado por partícula esférica, (b) Corte tipo I por partícula angular, (c) Corte tipo II por partícula angular [12].

Para partículas redondeadas el desgaste ocasionado fue un arado en la superficie como se muestra en la figura 4.12(a), el cual se caracterizó por desplazar el material hacia los lados y hacia el frente de la partícula. El material

queda fuertemente deformado y futuros impactos de partículas en áreas cercanas, conducirán a la separación del material.

El tipo de daño causado por partículas angulares el desgaste es dependiente de la orientación y de cómo es el giro de la partícula en el momento del impacto con la superficie. En el caso del daño de corte tipo I, mostrado en la figura 4.12(b), las partículas impactadas giraron hacia adelante, indentando la superficie y generando un acumulamiento de material el cual será vulnerable para futuros impactos. Por otra parte si la partícula gira hacia atrás al momento de impactarse, una acción de corte ocurrirá, desprendiendo el material de la superficie como es mostrado en la figura 4.12(c).

4.4.4 Forma de la partícula y ángulo de impacto.

La forma de las partículas influye en los patrones de deformación plástica alrededor de la indentación [12]. Por lo que respecta a partículas redondeadas, la deformación plástica localizada es menor y más impactos serán necesarios para remover los fragmentos de material de la superficie. Un incremento en el ángulo de impacto tiene efectos similares. En un caso extremo donde partículas redondeadas se impactan contra una superficie a un ángulo de 90° , el material será removido por impactos vecinos, después de una serie de impactos que generarán un ciclo de deformaciones plásticas. En la figura 4.13(a) se puede apreciar una superficie de aluminio, la cual fue erosionada por partículas esféricas de vidrio a un ángulo de 90° y una velocidad de 60 m s^{-1} . La erosión a ángulos bajos es mayor, aunado a esto si se utiliza una partícula angular, el proceso será de corte como fue ilustrado en la figura 4.12 y dependerá en gran parte en el sentido de giro de la partícula antes y durante el impacto. Una superficie erosionada bajo este mecanismo puede verse en la figura 4.13(b), en

donde partículas angulares de carburo de silicio fueron impactadas a un ángulo de 30° y a una velocidad de 55 m s^{-1} en acero de bajo carbono [12].

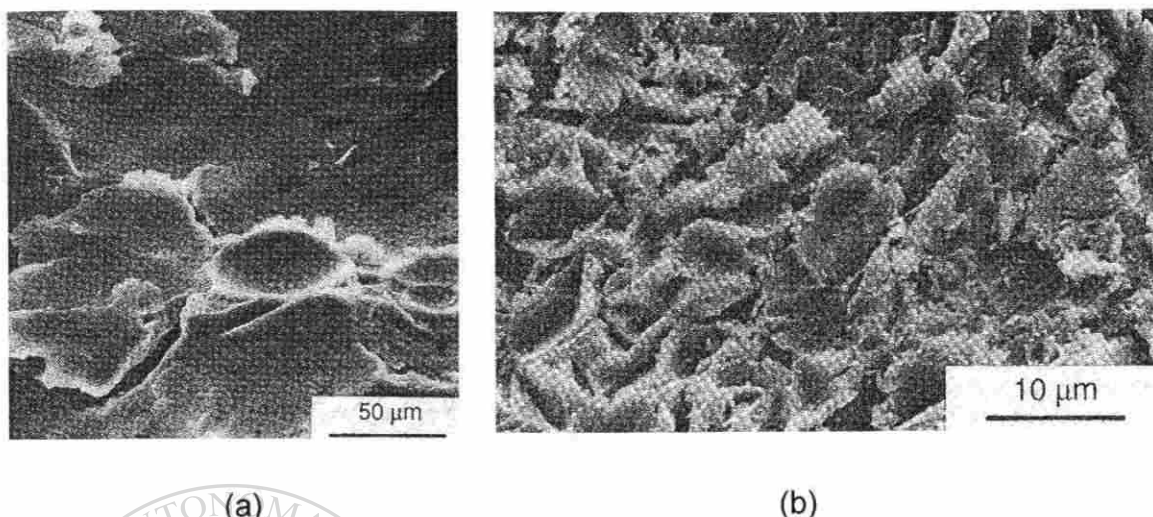


Fig. 4.13 Influencia del ángulo de impacto.
 (a) aluminio erosionado por partículas esféricas de vidrio a un ángulo de 90° , (b) acero suave impactado por partículas angulares de carburo de silicio a un ángulo de 30° [12].

4.4.5 La dureza de la superficie

Una consideración que se tienen que hacer a la ecuación [4.8] es que predice una erosión inversamente proporcional a la dureza. Finnie llegó a la conclusión de que si al elevar la dureza de un material se incrementaba su resistencia al desgaste en mecanismos como abrasión o deslizamiento, esta premisa no se aplicaba para materiales bajo el mecanismo de erosión (figura 4.14). Encontrando solamente esta relación para metales puros en estado recocido (siendo la excepción el molibdeno y el tungsteno) [18].

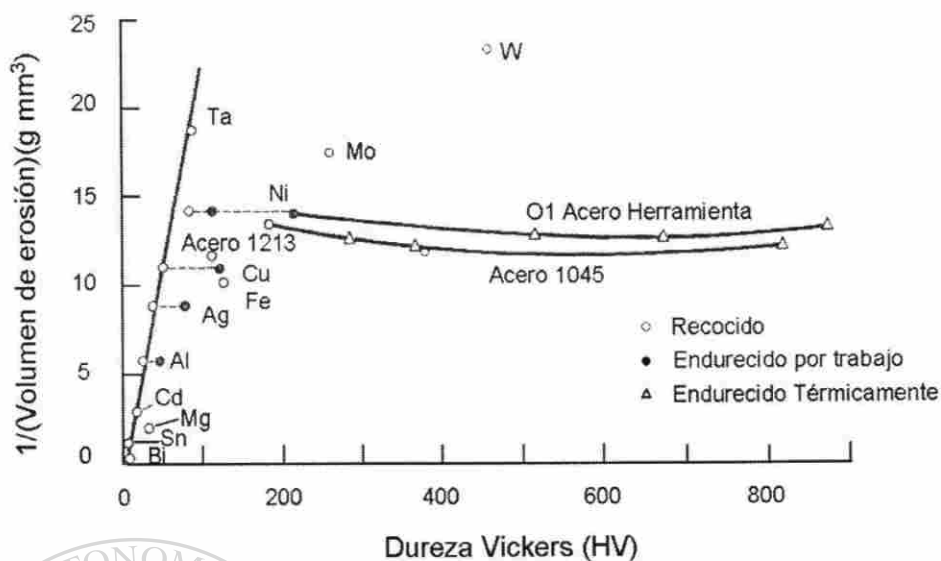


Fig. 4.14 Resistencia a la erosión contra dureza del material. Metales puros y aceros con varios estados de endurecimiento por deformación y tratamiento térmico [24].

El incremento en la dureza de un material no tiene efecto o tiene efecto negativo en su resistencia a la erosión [18].

Se ha demostrado que al incrementar la dureza a los materiales estos exhiben un comportamiento frágil. Esto será mostrado en los mecanismos de transición dúctil frágil.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.5 Desgaste erosivo por fractura frágil

4.5.1 Mecanismo.

Cuando el impacto de partículas genera fractura frágil, el material es removido por la formación de grietas laterales en la sub-superficie del material impactado, propagándose hasta la superficie. En éste mecanismo se tiene una insignificante contribución a los mecanismos asociados con el flujo plástico [12].

La secuencia del mecanismo frágil es mostrada en la figura 4.15 [12]. Para el punto inicial de contacto (figura 4.15(a)) ocurren esfuerzos muy altos que serán relevados por el flujo plástico local. La zona deformada es identificada por la letra D. Cuando la carga del indentador se incrementa a valores críticos los esfuerzos tensiles son desahogados en el plano vertical por la formación de la grieta radial (M) (figura 4.15(b)). Mayores incrementos en carga serán acompañados por la extensión progresiva de la grieta radial (M) (figura 4.15(c)). Al disminuir la carga ejercida por la partícula la grieta radial (M) se cerrará (figura 4.15(d)). Mayores disminuciones de carga serán acompañadas de la formación de las grietas laterales (L) (figura 4.15(e)). La formación de grietas laterales es conducida por los esfuerzos elásticos residuales causados por la relajación del material deformado a lo largo de la región de contacto. Cuando la carga es removida completamente las grietas laterales ascienden hacia la superficie (figura 4.15(f)) conllevado al desprendimiento del material. Por lo tanto el volumen removido será proporcional al cilindro generado por la grieta lateral (L) y la profundidad de la grieta radial (M) [12, 23, 24].

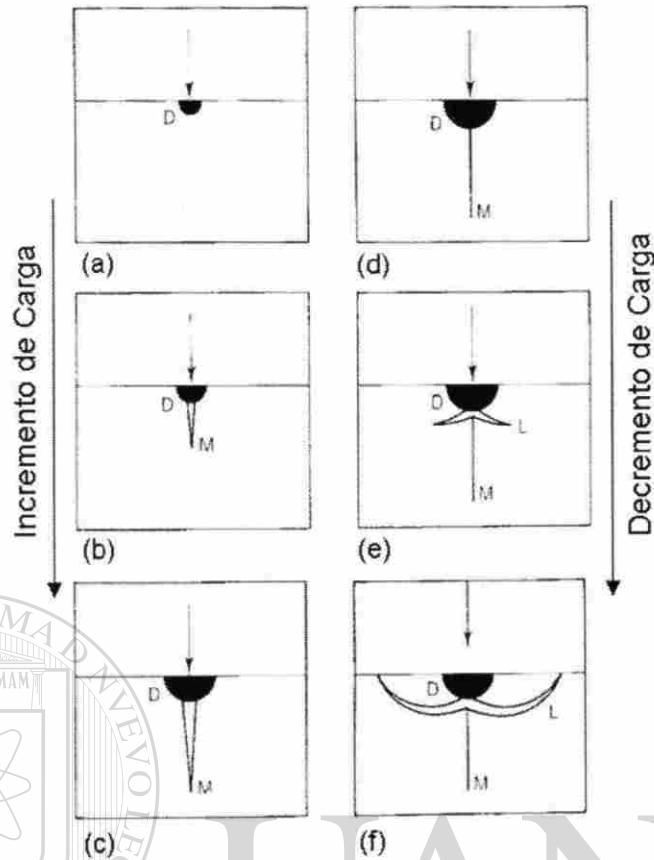


Fig. 4.15 Secuencia del mecanismo por fractura frágil [12].

Este mecanismo es observado principalmente cuando el material es homogéneo y frágil, y las partículas erosivas son lo suficientemente duras y angulares [12].

Los modelos propuestos para el mecanismo de fractura frágil han sido principalmente para ángulos de incidencia normales a la superficie, considerando que el componente normal de la velocidad puede ser usado para superficies erosionadas a ángulos oblicuos. A diferencia de los modelos propuestos para deformación plástica, los modelos de fractura frágil consideran a la tenacidad como la propiedad más importante del material a erosionar, así como el tamaño, densidad y velocidad de la partícula como los factores esenciales en la energía cinética que determinará la cantidad de material removido [12,21,24].

Modelos como el realizado por Wiederhorn [12] predicen la erosión como:

$$\frac{E}{\rho} \propto r^{0.7} U^{2.4} \frac{\sigma^{0.2} H^{0.1}}{K_c^{1.3}} \quad [4.9]$$

Algunas de las consideraciones que propone el modelo son que la erosión (E/ρ volumen removido por masa unitaria) estará en función del tamaño de la partícula (r), la velocidad (U), así como la tenacidad de el material a impactar (K_c) [12].

La figura 4.16 muestra los resultados experimentales de erosión para un grupo de materiales frágiles, graficados contra la ecuación 4.9. En el caso de materiales como el MgO el desprendimiento se dio en las fronteras de grano y no formó grietas laterales [12].

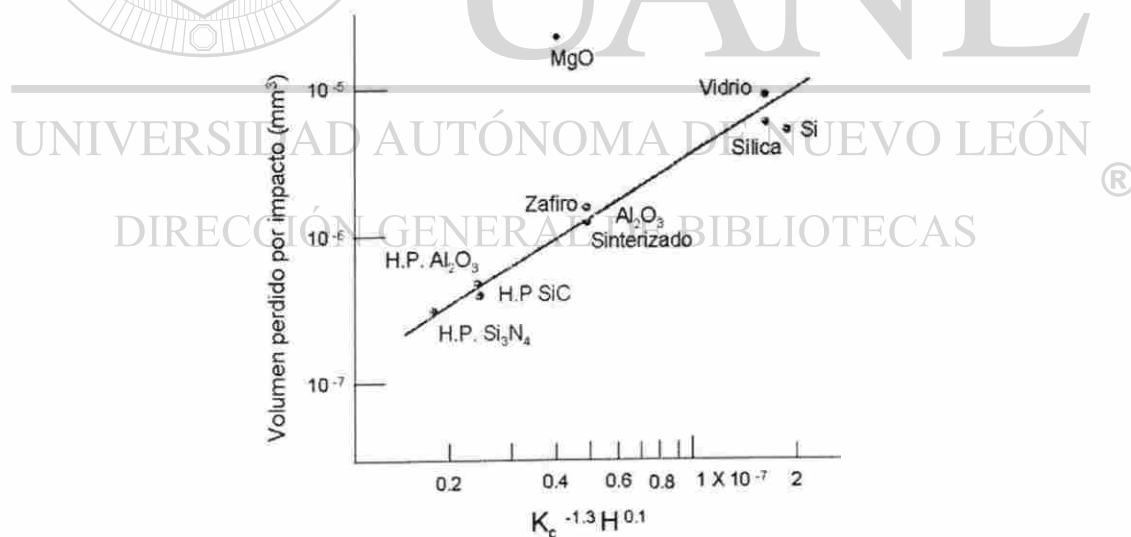


Fig. 4.16 Erosión en materiales frágiles. Comparación de datos experimentales con el modelo analítico [12].

4.6 Transición dúctil-frágil

Se ha considerado que el ángulo de impacto juega un papel importante como fue mostrado en la figura 4.10, pero este comportamiento depende de las condiciones de impacto presentadas en el sistema. A continuación serán descritos los factores que conducen a un cambio de mecanismo en la erosión [12].

4.6.1 La dureza de la superficie.

Los materiales dúctiles al incrementarles su dureza, muestran un comportamiento aparentemente frágil. Aleaciones de alta dureza y baja ductilidad muestran su máximo intervalo de erosión a ángulos normales de impacto.

Guilden [12] llevó a cabo pruebas en el acero AISI 52100 con cuatro diferentes tratamientos térmicos, en donde el acero con la mayor ductilidad y la más baja dureza (Dureza 30 HRC) mostró un comportamiento dúctil, mientras que para el acero con alto valor de dureza (martensita sin revenir), mostró un comportamiento aparentemente frágil (figura 4.17).

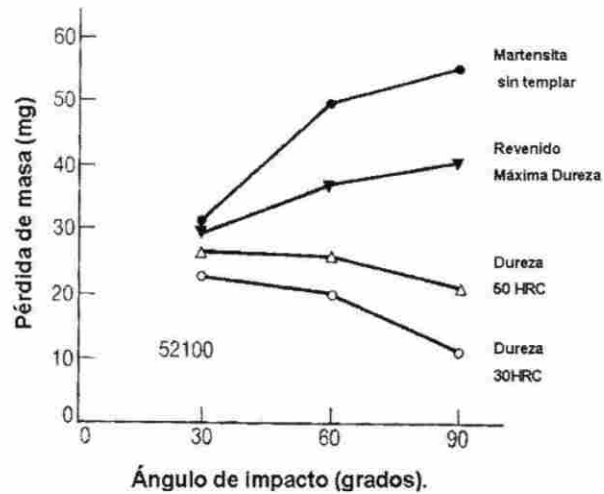


Fig. 4.17 Transición dúctil-frágil en acero AISI 52100 (1% C, 1.5 % Cr) con diferentes tratamientos térmicos en función del ángulo de impacto. (Partículas de arena sílica impactadas a $153 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

4.6.2 Energía Cinética.

Los casos en los que se puede presentar principalmente un mecanismo de transición de dúctil - frágil, es principalmente modificando la energía cinética de la partícula ya que al utilizar energías bajas la fuerza de impacto con la que se golpeará la superficie será mínima lo que producirá que la grieta radial no sea lograda, alcanzando solo a producir una micro-deformación. Los principales factores que modifican la energía cinética de la partícula son, su tamaño, densidad, velocidad. Materiales frágiles como cerámicos, vidrios y algunos polímeros muestran un comportamiento dúctil cuando son impactados con partículas muy pequeñas, debido a que el material es removido por micro-deformación plástica [12].

Finnie [24] realizó un estudio de las erosiones en probetas de vidrio causadas por partículas de carburo de silicio en tamaños de 9, 21 y $127 \mu\text{m}$. La prueba

fue realizada a ángulos de impacto de 0 a 90° y a una velocidad de partícula de 136 m·s⁻¹.

La figura 4.18 muestra los valores de erosión del vidrio para cada una de los tamaños de partícula utilizados. Para el caso de las pruebas realizadas por el tamaño de partícula de 9 µm se aprecia un comportamiento dúctil como el mostrado en la figura 4.10, este mecanismo es debido a que el tamaño de la partícula contribuye en menor cantidad al valor de energía cinética causando que la energía de impacto en la superficie no produzca la grieta radial, y solo sea una micro-deformación plástica. Debido a esto, los valores de erosión para esta condición se encuentran en el orden de 10⁻⁴ mientras que los resultados encontrados por las pruebas donde se utilizó los tamaños de partícula de 21 y 127 µm presentaron una erosión del orden de 10⁻³ y 10⁻² respectivamente. Para el caso de los tamaños de partícula de 21 y 127 µm la energía lograda fue suficiente para generar la grieta radial y lateral, propiciando así el desprendimiento de material [24].

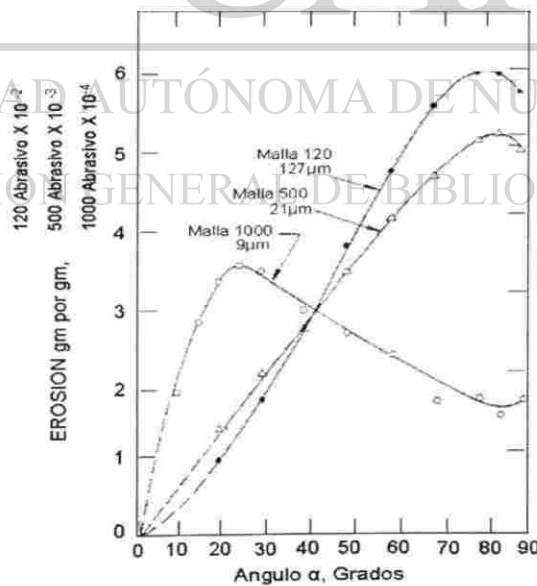


Fig.4.18 Transición dúctil frágil.

Escala de erosión 9 µm (malla 1000), X10⁻⁴. Escala de erosión 21 µm (malla 500), X10⁻³. Escala de erosión 127 µm (malla 127), X10⁻² [24].

CAPÍTULO 5



5.1 Introducción.

MOLDEO

UANL

La fundición ha existido desde tiempos prehistóricos. Una gran variedad de métodos y procesos de moldeo y fundición han sido desarrollados a través del tiempo [25]. Existe una gran variedad de materiales que se pueden utilizar para la fabricación de los moldes como lo son: cerámica, arena, metales y polímeros.

La figura 5.1 muestra rutas de proceso para la fundición. En donde los moldes de arena por los procesos de ensamble de corazones en frío y los procesos de vacío cubren los requerimientos de precisión y rigidez. Esto no significa que el resto de las rutas de proceso de moldeo sean inadecuadas, ya que existen muchos factores que influyen en la selección de un tipo de molde o ruta de manufactura, como lo pueden ser los costos, la disponibilidad del mercado entre otras [26].



Fig.5.1 Rutas de moldeo [26].



5.2 Moldeo de Arena

El moldeo de arena es uno de los procesos de mayor versatilidad, el cual posee un gran número de diseños en cuestión de tamaño, formas y calidad del producto (Figura 5.2) [25].

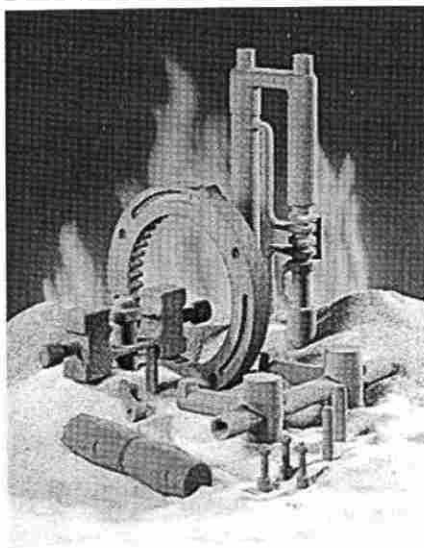


Fig. 5.2 Variedad de formas y tamaños en corazones.

Diferentes tipos de arenas son utilizadas; sílica, zirconio, olivita o cromita, donde las mas utilizadas para fundiciones de aluminio son la sílica y zirconio [25].

El moldeo de arena para corazones puede ser clasificado por procesos de curado como:

- Caja Fría
- No horneado
- Caja caliente

En los procesos de caja fría, el curado se realiza por medio del contacto de un catalizador vaporizado, mientras que en el proceso no horneado se utiliza un líquido catalizador que reacciona con un aglutinante, ambos procesos realizan un curado del corazón a temperatura ambiente. Para el proceso de caja en caliente la mezcla arena-resina es expuesta a fuentes de calor para que ocurra la reacción de polimerización. En estos tres procesos la arena es revestida con dos reactivos que forman una resina, al ser curada ya sea por procesos de catalización o térmicos, es convertida en un plástico sólido que cubre la arena y mantiene su forma durante el vaciado [25].

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

5.3 Control de la arena en el proceso de caja fría.

El control de la arena es imprescindible en el moldeo de corazones ya que esta representa hasta un 99% de la mezcla. Las principales características a controlar en la arena en el proceso de caja fría son:

- Forma de la partícula.
- Granulometría (gfn).
- Temperatura.

- Humedad.
- PH y la demanda de ácido.

5.3.1 Forma de la partícula.

Si bien la forma de la partícula fue definida de acuerdo a la ecuación 4.1 por el factor de redondez, existen normas como las de la AFS (American Foundry Society) que describen la forma de una partícula como redonda sub-angular y angular, figura 5.3 [27].



Fig.5.3 Clasificación AFS de la forma de la partícula. (Izquierda) angular, (centro) Sub-angular, (derecha) redonda [27].

La forma de la partícula afecta las propiedades físicas de los moldes. Los moldes elaborados con partículas redondas poseen una densidad mayor que los producidos con partículas angulares. Esto es debido a que una mayor cantidad de granos pueden ser compactados en un determinado volumen.

Un grano redondo proporciona la mayor permeabilidad y requerirá la menor cantidad de resina para ser recubierto, caso contrario a las partículas sub-angular y angular.

El uso de partículas redondas proporcionan una baja relación área superficial-volumen permitiendo usar bajos niveles de resina hasta en un 0.8% [25,28]. A diferencia de las partículas angulares que proporcionan un alta relación área superficial- volumen conduciendo a el uso de altos contenidos de resina [25].

5.3.2 Granulometría gfn (grain fineness number).

La granulometría es una característica que indica el tamaño y la distribución del grano de la arena [28]. Esta determinado mediante la prueba de análisis de malla y se denomina tamaño de grano AFS (American Foundrymen's Society) gfn (grain fineness number).

La prueba consiste en tomar una muestra representativa de arena y colocarla sobre el juego de mallas. Posteriormente estas se colocan dentro del equipo giratorio (figura 5.4(a)) en el orden mostrado en la figura Fig. 5.4(b) para agitarse durante 15 minutos. Esto permite la migración de las arenas hacia las mallas siguientes. Una vez terminada la operación se pesa el contenido retenido por cada malla, obteniendo así el gfn de la muestra [29].

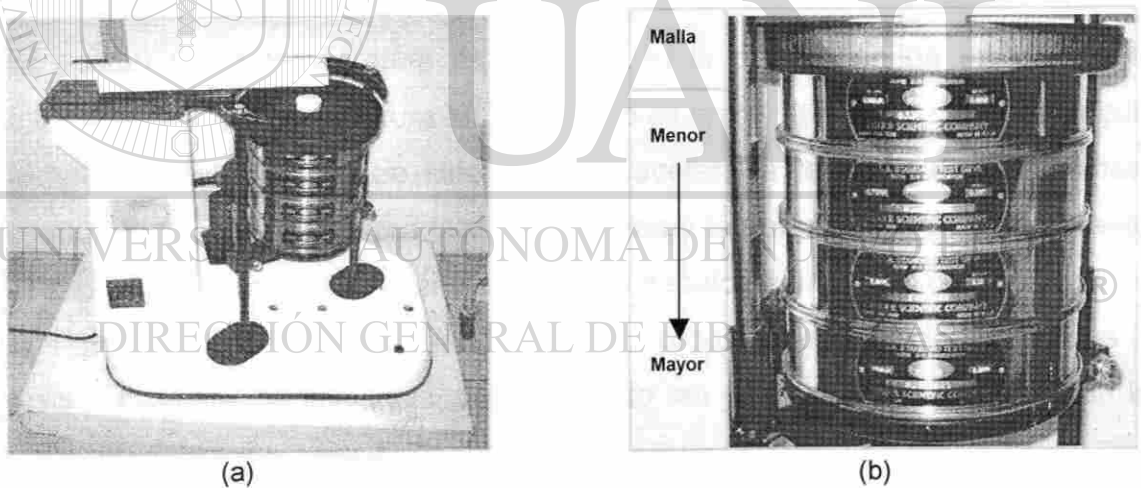


Fig. 5.4 Equipo de pruebas para granulometría.
(a) Equipo giratorio Fisher Scientific Co. (b) Juego de Mallas U.S.A. test sieve.

Los resultados de la prueba determinaran si la arena es gruesa, mediana o fina.

La arena gruesa (gfn menor a 45 y finos menor a 3%) tiene una menor área de superficie, proporcionando las siguientes ventajas:

- Menor cantidad de resina para cubrir el grano.
- Mayor fluidez de la mezcla.
- Mejor permeabilidad del corazón para eliminar los gases durante el vaciado de la pieza.
- El usar menos resina se facilita el desarenado de la pieza, se reduce la suciedad del molde y la emisión de humos [28].

La arena fina (gfn mayor a 55 y finos mayor a 7%) tiene una mayor área de superficie por lo que le da propiedades contrarias a las de la arena gruesa (aumenta la cantidad de resina, menor permeabilidad y desarenado, mayor suciedad y emisión de humos) [28].

5.3.3 Temperatura de la arena.

El control de la temperatura es esencial en la producción de un molde, el intervalo ideal de temperatura en el proceso es entre 18 y 26° C. El trabajar con temperaturas por arriba de este intervalo acelera la reacción de las resinas, produciendo que se reduzca la vida de banco y la fluidez de la mezcla durante el soplado. Las mezclas de temperatura por debajo del intervalo provocarán que la reacción de las resinas sea retardada, produciendo corazones crudos y disminución de la eficiencia del mezclado en el molino al incrementar la viscosidad de las resinas [28].

5.3.4 Humedad de la arena.

La presencia de la humedad mayor a 2% en la arena no es recomendable, debido a que reacciona con la resina degradando sus propiedades. El principal efecto es la disminución en la vida de banco y resistencia del corazón [28].

Las principales fuentes de contaminación de humedad en la arena, resina y en proceso son:

- Condensación en los serpentines del sistema de enfriamiento de la arena.
- Silos y tolvas de almacenamiento mal sellados.
- Alta humedad relativa ambiental.
- Humedad del aire comprimido con punto de rocío mayor a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Depósitos de resina y aditivos destapados.

5.3.5 PH y Demanda de ácido.

Estas características en la arena indican su grado de acidez o alcalinidad. El pH determina el contenido de sustancias alcalinas solubles en agua, mientras que el valor de la demanda de ácido determina las sustancias alcalinas solubles en ácido.

La arena alcalina (con demanda de ácido mayor a 7 y pH mayor a 8) da menor vida de banco, debido a que los componentes alcalinos como el CaO neutralizan una porción de resina y además aceleran drásticamente la reacción entre las dos resinas.

Los factores que influyen para aumentar el pH y la demanda de ácido en la arena son:

- Alto contenido de finos. (Malla 270) ya que en esta malla se concentran las arcillas que es de naturaleza básica.
- La recuperación térmica de la arena. Genera componentes alcalinos como el CaO y la AL_2O_3 los cuales son acumulativos en cada reciclaje [28].

5.4 Proceso de Caja Fría.

En la figura 5.5 se muestra la fabricación de corazones por el proceso de caja fría. Donde la mezcla arena-resina proveniente del magazine es introducida a la caja de corazones a través de las boquillas de soplo. En la etapa de gaseo (figura 5.5(b)) el gas catalizador se introduce mediante el inyector dentro del herramental causando el curado del corazón. Posteriormente en el proceso de purgado se suministra una corriente de aire que asegura la correcta penetración del catalizador en el corazón así como el purgado del exceso de catalizador (figura 5.5(c)). En la cuarta etapa del proceso ocurre el proceso de extracción del corazón del herramental [30].

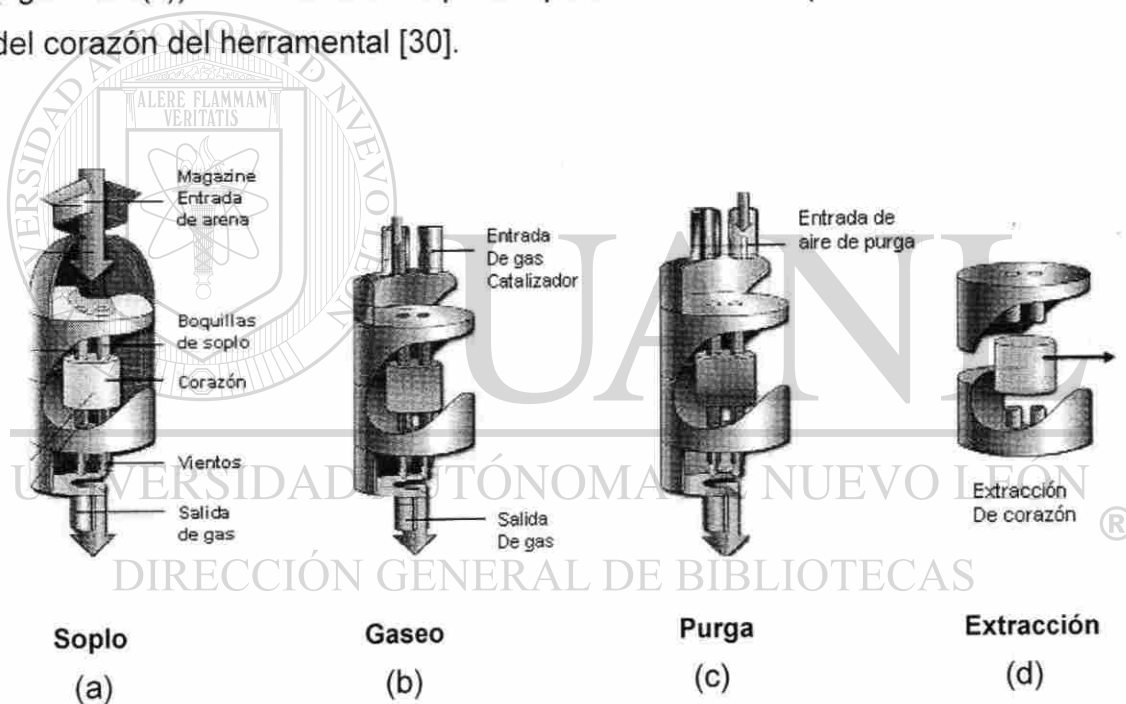


Fig. 5.5 Etapas en el proceso de llenado de caja fría [30].

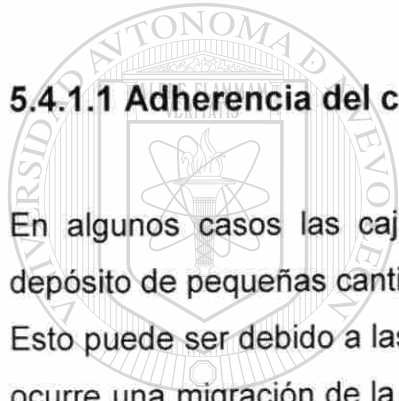
5.4.1 Etapa de soplado.

La mezcla de arena con resina y aditivos se inyecta dentro de la caja de corazones hasta presiones de 80 Psi. Existen herramentales para trabajar con

bajas presiones de soplo donde se pueden obtener corazones bien compactados con presiones de 30 a 40 Psi.

La presión de soplado es un factor determinante en la calidad del corazón debido a que presiones muy bajas producen corazones de baja densidad y resistencia. Mientras que el uso de presiones muy altas si bien provocan una mayor compactación tienen los siguientes efectos:

- La adherencia del corazón hacia la superficie del herramental.
- Desgaste erosivo en la superficie del herramental [28].



5.4.1.1 Adherencia del corazón hacia la superficie del herramental.

En algunos casos las cajas de corazón están sujetas a problemas con el depósito de pequeñas cantidades de arena y resina en su superficie [26].

Esto puede ser debido a las altas velocidades de la mezcla, en donde al chocar ocurre una migración de la resina que recubre el grano hacia la superficie de la caja, presentándose las capas de resina enfrente de los tubos de soplado [28].

Los problemas que causan este depósito de resina son:

- Dificulta el desmoldeo del corazón. Debido a la adherencia con la caja, provocando un mayor consumo de desmoldeante. Esto a su vez genera mayor humedad en el corazón. [28].
- Aumenta el número de corazones rotos debido a la dificultad de extracción de la caja [28].

5.4.1.2 El desgaste erosivo en las cajas de corazones.

Los herramientas usados en el proceso de moldeo están propensos a la erosión por las partículas de arena. Esta erosión puede ocasionar que las piezas obtenidas tengan un cambio en sus dimensiones [26]. La tabla 5.1 muestra la vida útil de algunos materiales utilizados para caja de corazones

Tabla 5.1 Vida útil de cajas de corazones[29].

Materiales	Ciclos de soplo	Resistencia a solventes	Extracción de corazón
Hierro gris	70.000	Excelente	Excelente
Aleación de Al	4.000	Excelente	Buena
Epoxi laminado	60.000	Buena	Regular
Madera barnizada	2.000	Pobre	Regular

La figura 5.6 muestra algunos de los herramientas utilizados en el proceso de moldeo los cuales presentan el mecanismo de desgaste erosivo. Las zonas preferenciales de desgaste se encuentran justo debajo de las boquillas de soplo.

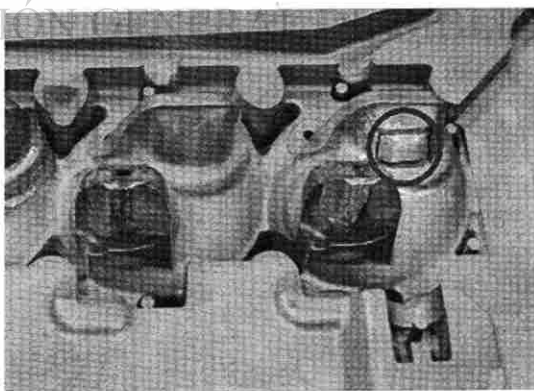


Fig. 5.6 Desgaste en herramental.
Material acero grado herramienta H13.

5.5 Estudio de la velocidad de impacto en la caja de corazones.

Showman y Snider [31] realizaron estudios en el llenado de un corazón tanto por métodos numéricos como experimentales.

El modelo utilizado fue una caja rectangular con dimensiones aproximadas de 300 X 100 X 100 mm. La presión utilizada fue de 3 bar para un tiempo de 2 segundos.

El proceso de llenado observado puede ser dividido en las siguientes fases:

1. Las partículas salen de la boquilla como una columna que golpea fuertemente el fondo de la caja.
2. La arena se distribuye en forma de película delgada.
3. El llenado alcanza las paredes que lo contienen y empieza a elevarse.
4. Cuando aproximadamente la mitad de las paredes son cubiertas los transductores de presión indican el primer incremento en la presión de la caja.
5. La arena empieza a apilarse alrededor de la zona de impacto. Toda la zona central es vigorosamente soplada.
6. El apilamiento de material forma un anillo alrededor de la zona de impacto con una profundidad producida por el chorro de partículas, esta profundidad llega a tocar el fondo de la caja.
7. El toroide crece hasta alcanzar la parte superior de la caja, posteriormente empezara a expandirse hacia las esquinas llenando completamente la caja.

El último movimiento visible de la arena ocurrió a los 1.6 segundos. Después de la salida de las partículas de la boquilla.

La velocidad inicial de las partículas fue de $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ correspondiente a la razón de flujo y el volumen alimentado, esto puede indicar en que el promedio de velocidades debe ser más alto.

El proceso de llenado fue llevado por métodos numéricos en donde se igualó las condiciones de penetración del anillo formado en estudios experimentales. Obteniendo la siguiente distribución de velocidades para un tiempo de 1.245072 segundos, figura 5.7.

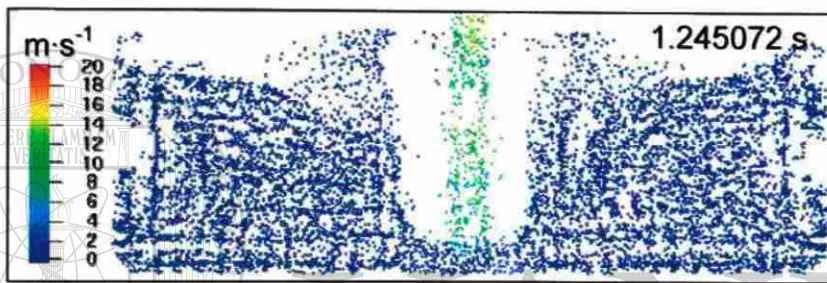


Fig. 5.7 Velocidad de partícula en caja de corazones.
Altas relaciones aire- arrastre de partículas [31].

En condiciones de operación como las mostradas en el estudio antes mencionado [31], podemos establecer que para un tiempo en el proceso, ocurrirá un impacto de partículas a velocidades más altas que las iniciales y que aún estarán impactando la superficie como es mostrado en la figura 5.7.

5.6 Estudio de las presiones en el sistema de caja fría.

Durante la etapa de soplado se presenta un mecanismo de desgaste debido al impacto de partículas duras en las cavidades de la caja. Un estudio del comportamiento de las presiones en el sistema es de gran utilidad para el establecimiento de las presiones de trabajo durante los ensayos de erosión.

Ashland Chemical en conjunto con General Motors y Arena Flow™ [32] realizaron estudios analíticos y experimentales de las presiones en el sistema durante la etapa de soplo en la caja de corazones de una chaqueta de agua ("783" water jacket), figura 5.8. La medición de presión fue realizada por medio de transductores en el acumulador, magazine, placas de soplo, boquillas y cavidades de la caja Figura 5.9.



Fig. 5.8 Corazón (chaqueta de agua "783") [32].

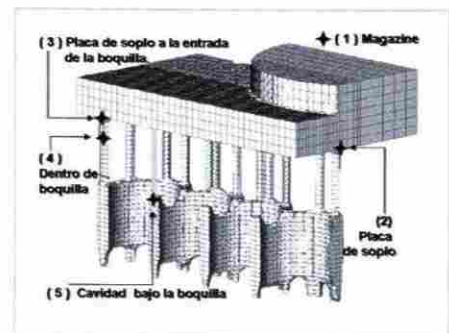


Fig. 5.9 Ubicación de los transductores [32].

La figura 5.10 muestra el comportamiento de la presión con respecto al tiempo de soplado para cada uno de los componentes del sistema.

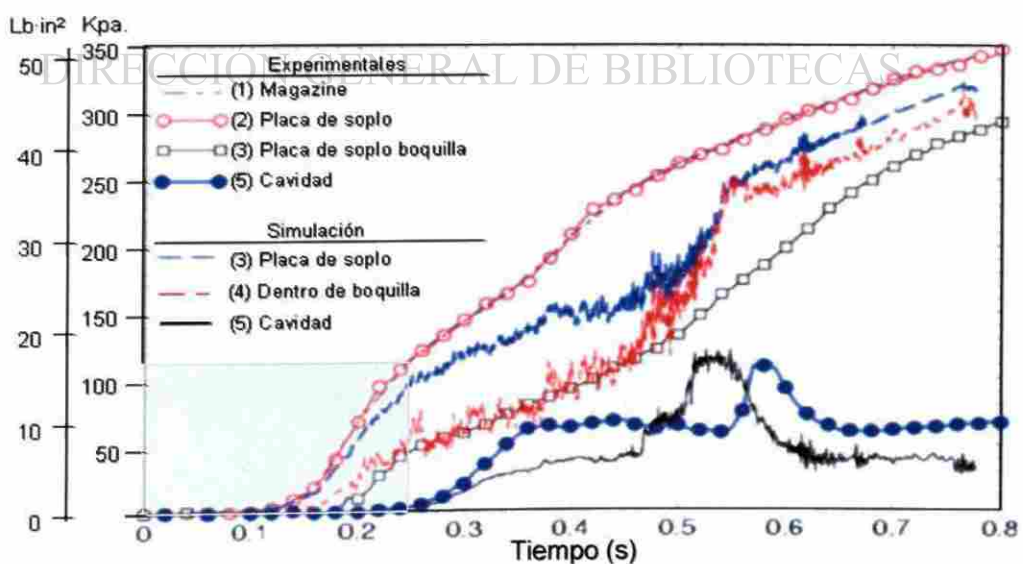


Fig. 5.10 Comportamiento de las presiones del sistema con respecto al tiempo. Grupo superior mediciones, grupo inferior métodos numéricos [32].

El proceso de soplado inicia con la descarga del aire del acumulador, la presión del magazine (1) muestra un incremento gradual a diferencia de la presión del acumulador que a partir de 0.1 segundos ya se encuentra en los niveles de la presión de la línea (460 KPa, 66.7 psi). La presión de la placa de soplo (2) sigue un comportamiento similar a la del magazine para zonas cercanas a él. A medida que la zona de medición se aleja en la dirección del flujo (3) ocurrirá una considerable caída de presión. La caída de presión más grande ocurre a lo largo de la boquilla esto puede ser visto por la presión de la placa de soplo a la entrada de la boquilla (3), la presión dentro de la boquilla (4) y la presión en la cavidad de la caja a la salida de la boquilla (5).

El aire y la arena fluyen hacia la cavidad del corazón, sin embargo el flujo de aire se extrae a través de los vientos de la caja (figura 5.11), manteniéndola a presiones atmosféricas.

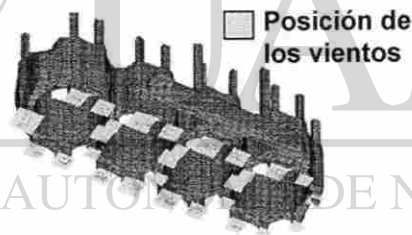


Fig. 5.11 Posición de los vientos inferiores [32].

Para el intervalo de tiempo comprendido entre el 0.12 – 0.25 segundos la presión del magazine se eleva, (ver tabla 5.2), conllevando a un incremento en la velocidad de las partículas que impactan la superficie, mientras que en las cavidades de la caja la presión es atmosférica.

Tabla 5.2 Presión del magazine a 0.25 s.

Presión en el magazine		
Tiempo	KFa	Lb·in ²
0.00	0.00	0.00
0.12	2.00	0.29
0.14	10.03	1.45
0.16	19.37	2.80
0.20	67.40	9.77
0.25	115.51	16.75

La figura 5.10 muestra el comportamiento de las presiones del sistema hasta los 0.8 s donde se puede observar que para el tiempo dado de 0.25 segundos la presión del magazine se encuentra en 115.51 KPa (16.75 psi). Así mismo muestra el comportamiento de la presión dentro de las cavidades del herramental (5) en donde a los 0.25 segundos de transcurrido el proceso de soplado comienza a presurizarse, esto es debido a que el llenado ha bloqueado los vientos inferiores del herramental.

La figura 5.12 muestra la extensión del llenado de la arena a los 0.25 segundos en donde se observa que el fondo de la caja ya se encuentra en altos niveles de llenado por lo que el impacto de partículas ya no será sobre el herramental sino sobre las mismas partículas de arena que ya se encuentran depositadas dentro del herramental.

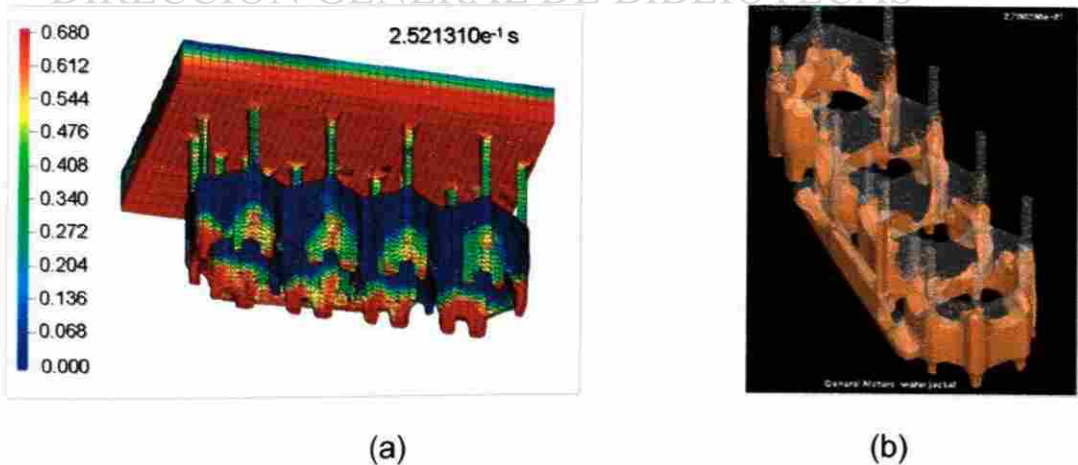


Fig. 5.12 Niveles de llenado del corazón 0.25.
(a) modelación de celdas. (b) modelación gráfica

Es hasta ésta etapa del proceso donde se ha llevado la erosión del herramental mas considerable, en la que se puede destacar que la presión del magazine y la placa de soplo se encuentran a una presión de 115.15 Kpa ($\sim 16.7 \text{ lb in}^{-2}$).

El estudiar el comportamiento de las presiones en el sistema servirá para conocer mejor las condiciones de operación y poderlas reproducir. Por otra parte es importante destacar que la partícula que produce el daño erosivo en el herramental lo hace con un gradiente de velocidades en función de la presión del magazine. Los datos relevantes de velocidad fueron analizados en el tema anterior pero es importante indicar que las velocidades reportadas en este análisis numérico, elaborado por Arena Flow™, se encuentran en un intervalo de 3.5 m s^{-1} y 14 m s^{-1} [31,32].



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 6

FUNDAMENTOS DE DISEÑO



6.1 Introducción.

La ingeniería es una de las actividades más importantes del hombre. Las pirámides de Egipto y los acueductos de la antigua Roma son unos de los primeros logros de la ingeniería. El diseño es una actividad creativa, y no es una exageración decir que los esfuerzos creativos del hombre es lo que más lo distingue de otras formas de vida. La creatividad aplicada a la ingeniería es la habilidad para concebir innovaciones básicas, percibir en una situación esos problemas que pueden ser resueltos fácilmente, idear una solución a nuevos problemas, y combinar conceptos familiares en formas inusuales. Por esta razón el diseño es la parte creativa de la ingeniería [33].

“Es tan amplio el criterio de definición del diseño que prácticamente cualquier objeto puede ser considerado como “diseño”. Aún más, la naturaleza sigue sus propias reglas de diseño, por ejemplo la selección natural o la herencia genética” [34].

El proceso de diseño comienza con traducir una idea en información detallada a partir de la cual un producto o un servicio puede ser ofrecido [35]. En el caso del diseño en ingeniería, es el proceso en el que se utilizan principios científicos y métodos técnicos para llevar a cabo un plan que satisfaga las necesidades o demandas. El definir el concepto en el campo de la ingeniería mecánica nos llevará a la creación de objetos y sistemas de naturaleza mecánica: máquinas, aparatos, estructuras, dispositivos, instrumentos, etc. Donde éstos no solo incluyen el diseño mecánico sino también involucran otras ciencias como lo son la térmica y la de los fluidos [36].

6.2 Tipos de diseño

Las tareas de diseño pueden ser clasificadas en diferentes formas. El diseño de un producto se puede clasificar en forma muy general como [35]:

- Un diseño original.
- Un diseño adaptado.
- Una variante del diseño.

Un *diseño original* (o *invento*) es un nuevo modelo que soluciona una tarea dada. El resultado de un diseño original, es una invención. Existen pocas compañías que permiten una invención y que basen su economía y éxito en esta, pues una invención original trae consigo altos riesgos, pero sin embargo también muchas oportunidades que podrán hacer que se domine el mercado.

Un *diseño adaptado* (o *síntesis*), toma el diseño original y lo adapta a un nuevo producto. Este tipo domina la gran mayoría de las actividades de diseño [35].

Una *variante del diseño* (o *modificación*), involucra la variación de parámetros como tamaño, geometría, propiedades del material, parámetros de control, etc.

para el desarrollo de nuevos diseños más robustos. Este tipo de diseño, usualmente se enfoca a modificar el funcionamiento de un subsistema sin cambiar su configuración [35].

6.3 Sistemas Técnicos.

Un sistema técnico consiste de ensambles y componentes que juntos desempeñarán una función en un diseño de maquinaria dado. Esto puede ser analizado en más de una forma.

Una de las consideraciones puede ser el dividir el sistema en subsistemas conectados los cuales desempeñaran una función unitaria. El resultado de este arreglo es llamado estructura-función del sistema.

La segunda forma de analizar un sistema es llamada ensambles y componentes la cuales son de gran ayuda para la selección de materiales en el sistema, (figura 6.1) [35].

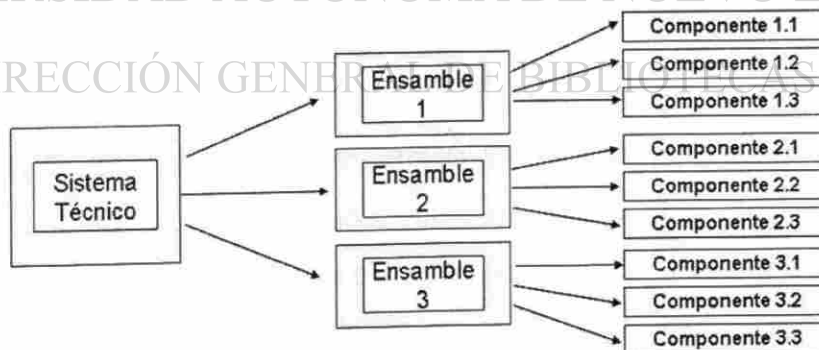


Fig. 6.1 Sistema ensamble-componentes [35].

6.4 Metodología para el diseño de maquinaria.

La complejidad del problema, va a dictar el grado de diseño que es requerido en la solución. Pero el proceso de diseño es esencialmente el mismo para un problema simple o una situación compleja. Es necesario mantener en mente cada uno de los pasos y secuencia referida al proceso de diseño para facilitar un orden en la solución.

Los pasos para el diseño de maquinaria propuesta por Parr [33], son los siguientes:

1. Tener el conocimiento del problema. La importancia de esta actividad es por lo regular sobreestimada y se refiere a considerar toda la información que pueda tener efecto en el diseño.
2. Prepararse para tratar con el problema. Se debe estar familiarizado con el problema y preparado para tratar con éste. Aquí deberá de prepararse actividades de enriquecerse de conocimientos, buscando información y literatura, además de hacer una búsqueda de soluciones a conceptos parecidos al problema que se tiene.
3. Identificar los elementos. Identificar los elementos o variables que serán considerados para el diseño. Básicamente se trata de identificar todos los factores, para dividirlos por su importancia.
4. Análisis de los elementos variables. Analizar las variables que han sido identificadas, principalmente las de mayor relevancia. Es necesario hacer un análisis de cada variable y no menospreciar a alguna de ellas, de igual forma no cerrarse a una sola.

5. Creación del diseño. Producir un nuevo diseño, es un ejercicio de creatividad que requiere eliminar y quitarse las viejas ideas. Una de las formas de hacer esto, es haciendo una lluvia de ideas de las posibles soluciones inclusive pueden ser fantasiosas. Es apropiado realizar diferentes diseños para ser evaluados y comparados.
6. Evaluación de los diseños. Ahora es necesario evaluar los diseños tomando los puntos críticos, en primera instancia y después los menos críticos. Parr, presenta en su texto una lista de criterios que pueden servir de guía para la evaluación.
7. Trabajar el diseño seleccionado. Propone tratar de modificar lo que fue el mejor diseño buscando mejorarlo, por que generalmente sucede una vez que se implemente el diseño de solución, se le encuentra alguna forma de haberlo realizado con alguna mejora, pero quizá para ese tiempo ya sea tarde. Es por esto, que el objetivo de este paso, es encontrar esa posible mejora antes de la implementación.

8. Desarrollo del diseño seleccionado. Mantener el menor número de partes o mecanismos para hacer más eficiente el diseño. Construir un prototipo de prueba para verificar que efectivamente es un buen diseño.

9. Preparar el diseño al detalle. Existen dos razones para realizar el diseño al detalle, la primera es para la creación de los dibujos de manufactura y la construcción y la segunda para su aprobación. En preparación para ser aprobado deber seguirse los siguientes pasos:

- Comprender a fondo la configuración física.
- Comprender los principios en los cuales fue basado el diseño.
- Demostrar que todos los requerimientos se cumplen
- Asegurarse de las limitaciones.

- Tener evidencia de que se cumplen todas las restricciones.
- La validación de los conceptos teóricos.

10. Ganar la aceptación del diseño. Se debe adoptar la función de vendedor, de vendedor de su producto al cual le ha dedicado gran parte del tiempo y que lógicamente debe estar convencido de que ha hecho un buen diseño. Esta labor de venta, se refiera a vender la idea a los usuarios de la maquina o dispositivo realizado.

Si bien estos pasos son propuestos existen un sin fin de procedimientos que pueden llevarse a cabo para la elaboración de diseño de maquinaria.

6.5 Equipos de pruebas de erosión.

Existen diversos tipos de aparatos que han sido utilizados para pruebas de erosión por partículas sólidas [18].

En el sistema de brazo-lanzador mostrado en la figura 6.2(a) las partículas erosivas son alimentadas al brazo por la parte superior, en donde al acelerar las partículas salen disparadas por los extremos del brazo para ser impactadas en las probetas. Algunas de las características de este método son: capacidad de erosionar varias probetas durante la misma prueba, el ángulo de impacto puede variar inclinando las probetas, la velocidad de impacto dependerá de la velocidad del brazo-lanzador. La cámara es normalmente mantenida al vacío para evitar pérdidas hidrodinámicas. Cuando las partículas salen del brazo, estas tendrán una velocidad tangencial V_T y una velocidad normal V_N dadas por la fuerza centrífuga. Bajo condiciones ideales de fricción se asume:

$$V_T = r\omega \quad [6.1]$$

$$V_N = \sqrt{2V_T} \quad [6.2]$$

Donde ω es la velocidad angular ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) y r es la distancia del centro del brazo a su salida.

Las desventajas de este sistema son la complejidad de operación, la baja cantidad de impactos por muestra, la gran cantidad de partículas erosivas para cada prueba y el costo.

El aparato cuyo principio es el brazo rotativo de la figura 6.2 (b) consiste en montar las probetas en los extremos del brazo, las partículas erosivas son alimentadas por caída libre recorriendo una distancia h , hasta ser interceptadas por las probetas, produciéndose así el impacto. Al igual que en el brazo-lanzador la cámara es mantenida al vacío. La velocidad de impacto es la velocidad tangencial del brazo.

$$V = V_T = r\omega \quad [6.3]$$

Donde r es el radio del brazo y ω su velocidad angular. Una de las ventajas de este aparato es que el control de la velocidad de impacto resulta ser simple, permitiendo tener un amplio rango de velocidades comparado con el brazo-lanzador. La principal característica del brazo rotativo es que en él pueden ser llevadas a cabo tanto pruebas de baja como de alta erosión.

El sistema de erosión con boquilla (figura 6.2 (c)) es el aparato más utilizado para pruebas de erosión. Se utiliza un chorro de gas presurizado (aire, nitrógeno, gas inerte, etc.) como el medio para acelerar las partículas erosivas a través de una boquilla. Una vez ocurrido esto, las partículas salen de la boquilla para ser impactadas en la probeta. Las principales variables de este aparato son:

- La velocidad de impacto
- El ángulo de impacto

Este aparato no requiere de una cámara de vacío, balanceo dinámico de componentes ni controles de velocidad de motor. Por lo que resulta ser económico [18].

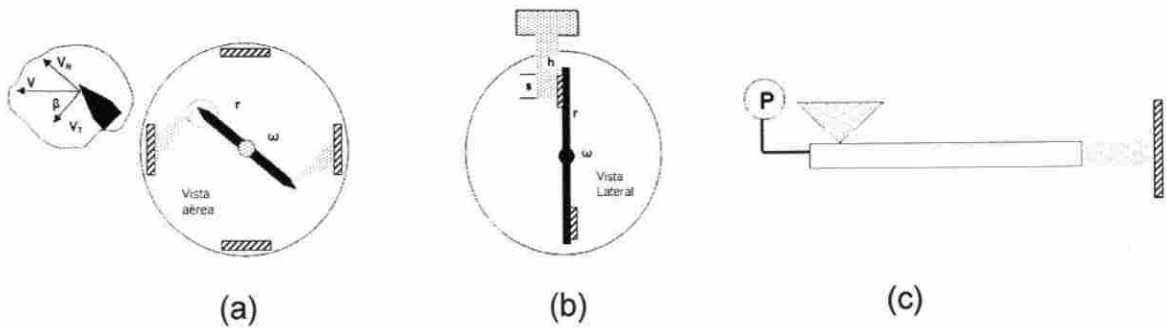


Fig.6.2 Equipos de prueba de erosión.

(a) brazo lanzador, (b) brazo rotativo, (c) Sistema Boquilla [18].

6.6 Principales variables a considerar en el desarrollo del equipo de un sistema por boquilla.

Las pruebas de laboratorio efectuadas con el sistema por boquilla son las más utilizadas para la investigación de los mecanismos de erosión. En el desarrollo de este equipo las principales variables a considerar son descritas en las siguientes secciones.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

6.6.1 Relación longitud – Diámetro boquilla.

La ASTM G76 recomienda el uso de boquillas con dimensiones de 50 mm de longitud y un orificio de 1.5 mm [37]. La norma DIN 50332 sugiere una longitud de 120 mm con un diámetro interno entre 8 y 18 mm dependiendo de las condiciones de prueba [38].

Investigadores como Sheldon [24] han utilizado boquillas con longitudes de 305 mm y diámetros internos de 4.95 mm, la relación longitud-diámetro es de

alrededor de 61.6, esto es aproximadamente el doble de lo que sugiere la ASTM [37]. Otros investigadores como Marshall [38] han utilizado boquillas de 3m de longitud con un orificio de 9.5 mm de diámetro (su relación longitud-diámetro fue de 316) mientras que Andrews [38] utilizó una boquilla de 4 m longitud y 25 mm de diámetro interno (relación de aspecto = 160) [38]. Y. I Oka y Nishimura [39] utilizaron boquillas de 1.5 m. de longitud y 4 mm diámetro interno (relación de aspecto = 375).

El considerar el uso de boquillas con grandes relaciones longitud-diámetro boquilla conduce a altas velocidades de partícula para una presión dada del sistema. Esta consideración no es necesariamente correcta, Hutchings [39,40] demostró que para las relaciones de longitud-diámetro mayor a 20 no es factor importante para el diseño de este tipo de aparatos.

La figura 6.3 muestra los experimentos realizados por Stevenson y Hutchings [39,40] a boquillas de diámetro interno de 4.9 mm y longitudes de boquilla de 85, 154, 308, 650 y 1000 mm, en donde la velocidad de la partícula se encontró en el intervalo de 54 a 58 m·s⁻¹ a excepción de la boquilla de 1000 mm donde la velocidad cayó a 42 m·s⁻¹ [38]. Puede observarse que el valor mas alto de velocidad es de 58 m·s⁻¹ para la de boquilla de 308 mm en donde para obtener un incremento de velocidad de 4 m·s⁻¹ (6.8%) con respecto a la obtenida por la boquilla de 85 mm se tuvo que incrementar una longitud de 223 mm (362 %).

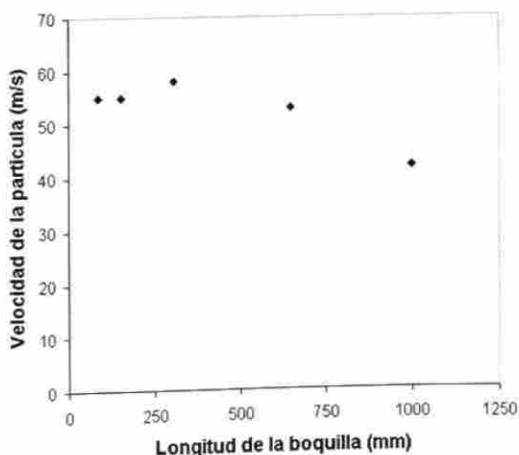


Fig. 6.3 Influencia de la longitud de la boquilla en la velocidad de la partícula.

6.6.2 Rugosidad de la boquilla

La rugosidad interna de la boquilla es un factor importante en la divergencia del chorro de partículas erosivas, Shipway y Hutchings [38] determinaron la divergencia por medio de ligeras películas en la superficie de las muestras impactadas. Encontraron que boquillas con pared interna rugosa causaban huellas de erosión más grandes que aquellas en las que las paredes de boquilla se encontraban pulidas.

Para reducir la divergencia y tener boquillas con las mismas condiciones iniciales de rugosidad, Shipway y Hutchings [38] llevaron a cabo un ciclo de 1 Kg. de carga de arena sílica con distribución de tamaños de 125 a 150 μm a una velocidad de 50 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ para cada una de las boquillas a utilizar.

6.4.3 Huellas y ángulo de impacto

Investigadores como Y. I Oka y Nishimura [39] han realizado estudios en las superficies erosionadas para diversos ángulos de impacto. La figura 6.4 muestra la topografía de 4 muestras de aluminio erosionadas con partículas de SiO_2 de 49 μm de diámetro a una velocidad de 110 m/s. La huella obtenida por las partículas erosivas aumenta en la dirección longitudinal a medida que se reduce el ángulo de impacto. La profundidad de la huella también se encontró ser dependiente del ángulo de impacto.

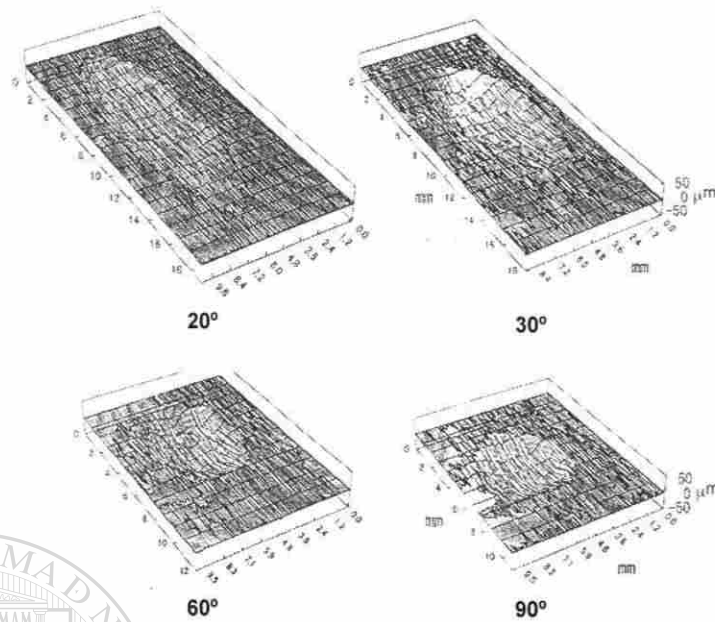


Fig. 6.4 Topografía de las superficies erosionadas a diversos ángulos de impacto. Muestras de aluminio impactadas a 20, 30, 60, 90° [39]

El estudio de la topografía es útil si se desea observar en donde se concentra el daño hecho por el impacto de partículas, rugosidades y qué cantidad de divergencia del chorro de partículas existe durante la prueba [39].

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

El área de impacto debe ser cubierta en su totalidad por las muestras a erosionar. Esto es debido a que las partículas tendrán la oportunidad de impactarse sobre la superficie y obtener un valor de pérdida de masa de la muestra en función del número total de partículas impactadas sobre ella.

Esquemas como el sugerido en la figura 6.5 (tipo 1) puede ser utilizado para ángulos mayores de 20°, mientras que para ángulos muy bajos puede ser utilizado la pieza con una extensión a partir del centro de impacto (figura 6.5 tipo 2) [39].

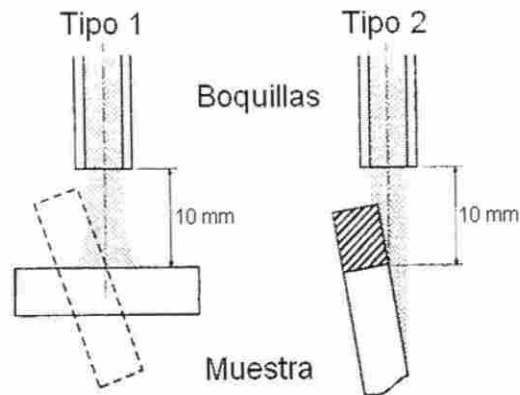


Fig. 6.5 Configuración de montaje a diferentes ángulos [39].

6.4.4 La velocidad de la partícula.

La velocidad de la partícula es otro factor importante a considerar en la divergencia presentada durante la erosión. La figura 6.6 muestra como para bajas velocidades el inverso del coeficiente del foco (β^{-1} valor adimensional en función de la dispersión de partículas a la salida de la boquilla) se encuentra en valores muy bajos. A medida que aumenta la velocidad el valor β^{-1} aumenta, aumentado así la divergencia [38].

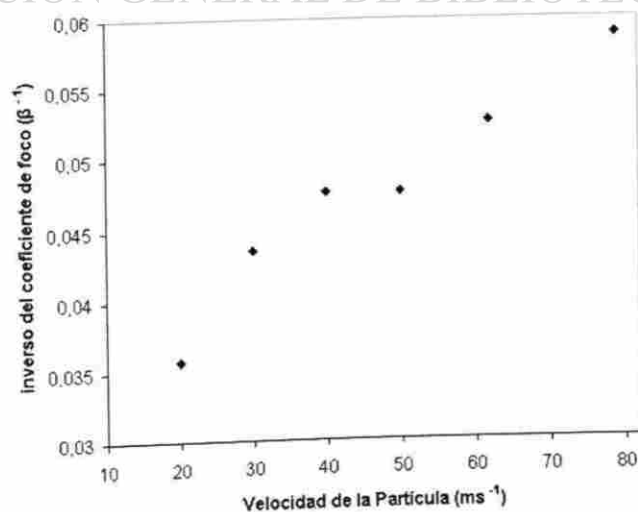


Fig.6.6 Efecto de la velocidad en la dispersión de las partículas [38].

La velocidad recomendada por el estándar ASTM G 76 [37] es de $30 \pm 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y debe ser medida a la distancia de impacto. Algunos de los métodos aceptados para medir la velocidad de impacto de las partículas son: fotografía de alta velocidad, velocímetro láser y doble disco [37]. Por razones económicas este último es el más utilizado.

El sistema doble disco consta de dos discos unidos a un eje que se hacen girar a una velocidad angular conocida, las partículas pasan a través de la ranura del disco superior viajando una distancia L para posteriormente efectuar una marca en el disco inferior a un ángulo de desfaseamiento. [12,18], ver figura 6.7.

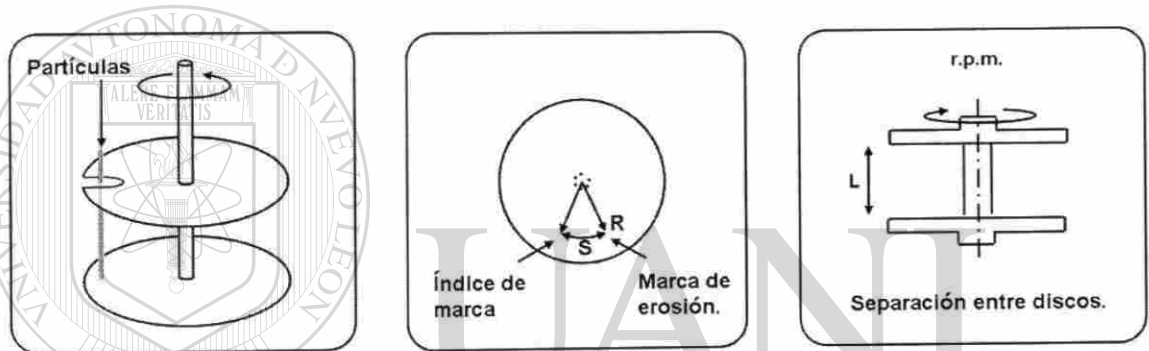


Fig.6.7 Diagramas esquemáticos del método doble disco.

Derecha, representación del método, centro vista superior, izquierda vista lateral [18].

La velocidad de la partícula será determinada por la ecuación 6.1 [18]:

$$V_p = \frac{2\pi RvL}{S} \quad (6.1)$$

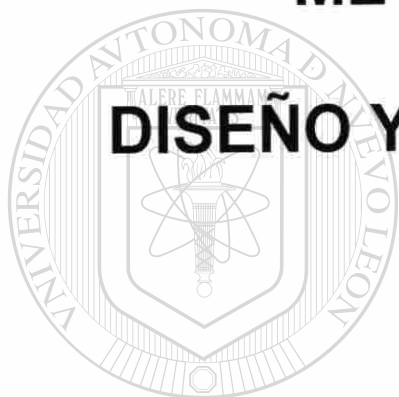
Donde,

V_p ,	Velocidad de la partícula.	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
R ,	Radio del arco.	(m)
v ,	Velocidad rotacional.	$(\text{rev}\cdot\text{s}^{-1})$
L ,	Distancia entre discos	(m)
S ,	Arco entre huellas de erosión.	(m)

CAPÍTULO 7

METODOLOGÍA DE

DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN.



UANL

7.1 Introducción.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

La resistencia al desgaste erosivo es una característica del sistema y no del material [8], por lo que al realizar el estudio de los mecanismos de erosión nos llevará a aproximar las condiciones en las que este ocurre en un sistema real. Una característica fundamental de los ensayos de erosión son las condiciones del sistema, por lo tanto el diseño y manufactura del equipo de pruebas a utilizar es fundamental en el desarrollo de la metodología del estudio de erosión en las cajas de corazones.

En el mercado existe una cantidad limitada de equipos para pruebas de erosión de acuerdo a la norma ASTM G76 [37]. La principal desventaja es que las condiciones operativas marcadas por la norma se encuentran muy alejadas de

las condiciones del proceso a estudiar (proceso de moldeo). Por otra parte los costos de estos equipos son muy altos.

La secuencia del desarrollo del diseño y construcción de la máquina objeto del presente estudio será presentada en este capítulo elaborando una síntesis de las principales consideraciones efectuadas y la forma en la que fueron presentándose durante el proceso de obtención del equipo, así como la metodología de caracterización del sistema para elaborar las pruebas en el acero grado herramienta H13.

7.2 Condiciones de prueba.

El mecanismo de erosión presentado en las cajas de corazones sucede en las zonas debajo de las boquillas de soplo (figura 7.1), por lo que un sistema de erosión de boquilla es esencial para aproximar el fenómeno.

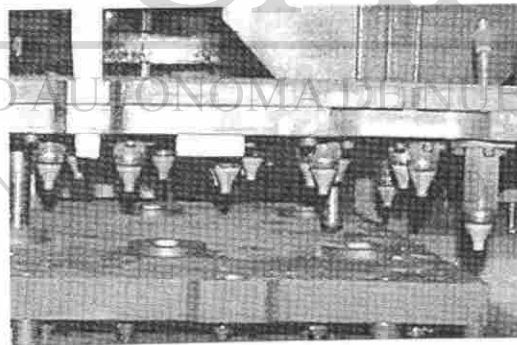


Fig. 7.1 Boquillas de soplo en máquina sopladora.

Las principales condiciones del proceso de moldeo que fueron establecidas inicialmente para el desarrollo del equipo y pruebas preliminares fueron:

Presión de trabajo:	4.15 bar (415 Kpa).
Distancia de impacto:	50 mm.
Diámetro de boquilla:	5 mm.

Longitud de boquilla:	100 mm.
Partícula:	Arena Sílica.
Morfología de partícula:	Redondeada.
Granulometría:	AFS gfn 47.
Temperatura:	Ambiente.

Las condiciones para las pruebas finales involucran también las siguientes condiciones:

Material a impactar:	Acero H13.
Condición del material:	Recocido, templado y revenido con durezas de 30, 40, 55 HRC.
Carga de arena:	1 Kilogramo.
Ángulos de impacto:	90, 75, 40, 20°.
Condición de Humedad:	Punto de rocío -40°C.

Existen una gran cantidad de variables dentro del proceso de moldeo, sin embargo los alcances de este trabajo fueron el establecer las condiciones de operación mencionadas para el desarrollo del equipo de pruebas.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

7.3 Máquina Prototipo.

Para explorar las principales variables en el proceso de erosión, se diseñó y construyó una máquina prototipo, para así obtener información útil para el desarrollo de un equipo final que se utilizará en las pruebas en el acero grado herramienta H13. Para esto se llevaron a cabo pruebas preliminares.

Con este equipo se obtuvo una visión del comportamiento que tendrían los componentes en un diseño final y así ajustar las variables de especial interés.

El método utilizado fue el desarrollo secuencial ya que este permitía mejorar el prototipo en base a iteraciones.

El desarrollo de la máquina prototipo puede ser sintetizado en 2 etapas dentro de las cuales se realizaron las pruebas preliminares, estas fueron:

- a) Exploración.
- b) Ajuste de variables

7.3.1 Exploración.

Se diseñó y construyó un equipo de erosión sistema boquilla, con presiones de trabajo de hasta 10.342 bar (150 lb·in²). El diseño es mostrado en la figura 7.2.

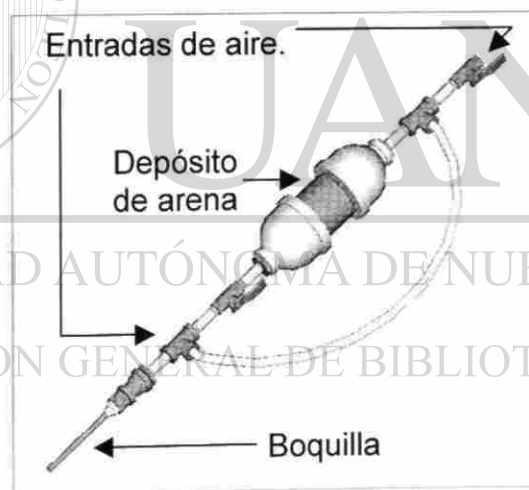


Fig 7.2 Diseño de prototipo para la etapa de exploración.

El equipo cuenta con entradas de aire en la parte superior del depósito de arena y cerca de la entrada a la boquilla (figura 7.2).

7.3.1.1 Huellas en vidrio.

Se realizaron pruebas preliminares en placas de vidrio plano de 12 mm de espesor a partir del equipo prototipo diseñado, figura 7.3.



Fig. 7.3 Maquina Prototipo Etapa 1, Exploración.
Boquilla utilizada: cobre.

Las características de la prueba fueron:

Material a erosionar: Vidrio.

Cantidad de arena: 500 g.

Angulo de impacto: 90, 20°

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El resto de las condiciones fueron las propuestas en la sección 7.2. Se realizaron los ensayos y posteriormente se obtuvieron las dimensiones de las huellas en el vidrio.

7.3.2 Ajuste de variables.

Las modificaciones para el rediseño del prototipo fueron realizadas a partir de los resultados de las pruebas en la etapa 1. Las principales modificaciones fueron:

1. Uso de una cámara de mezcla: en este diseño se contó con una cámara de mezcla mayor, comparada con la que se tenía en el diseño del prototipo inicial permitiendo así la obtención de lecturas de presión usando un manómetro. Además se logro que las partículas fueran conducidas hasta una zona muy cercana a la boquilla de salida, figura 7.4(c).
 2. Se realizó un nuevo diseño para la boquilla de salida el cual involucró el uso de material acero grado herramienta AISI D2 templado y revenido a dureza de 60-62 HRC.
-
3. Solución de los problemas operativos.
 - a. Se realizaron modificaciones en la entrada del suministro de aire, recorriendo la entrada principal de aire a un conector T, el cual fue útil también para realizar algunas mediciones de presión, ver figura 7.4 (b). La otra entrada de aire sería directamente suministrada de la línea a la cámara de mezcla (figura 7.4 (c)).
 - b. El ángulo de impacto fue controlado mediante el dispositivo mostrado en la figura 7.5(c).
 - c. Arena en el ambiente. Para reducir este problema se utilizó una cabina que cubrió la boquilla y el material a impactar, figura 7.5(a).

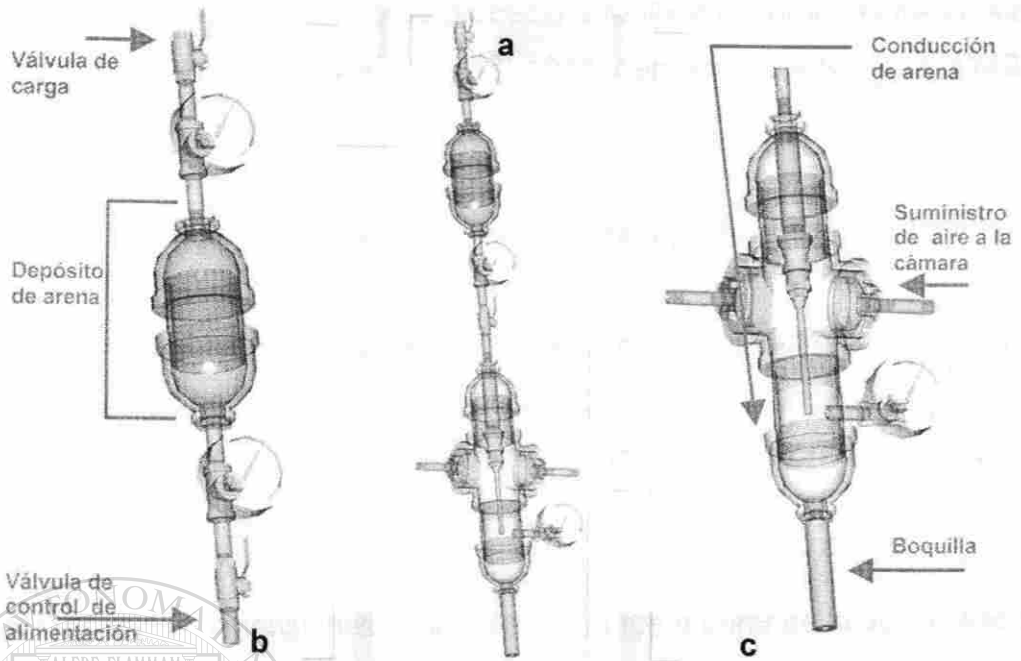


Fig. 7.4 Máquina prototipo etapa 2

(a) Diagrama esquemático máquina completa, (b) Contenedor de arena, (c) Cámara de mezcla.

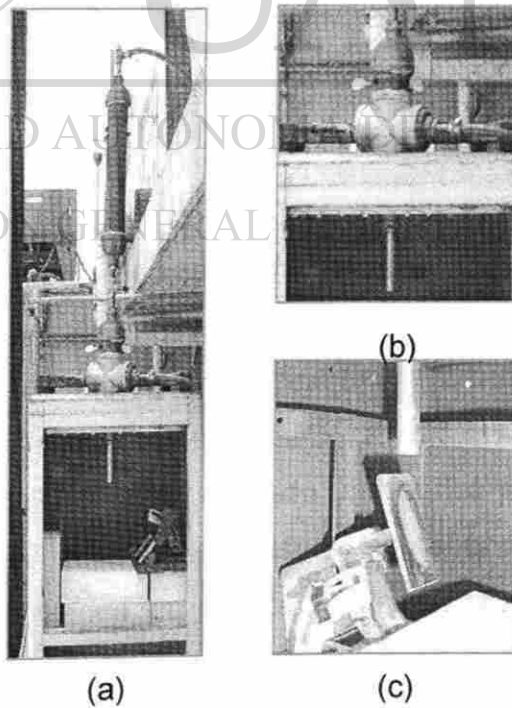


Fig. 7.5 Máquina prototipo en pruebas etapa 2
(a)Equipo completo (b) Cámara de mezcla (c) Dispositivo portamuestra.

El resto del diseño se conservó y se procedió a realizar las pruebas de erosión en probetas de acero estructural tipo AISI 1018 y en aceros AISI H-13, 4140 y 9840

7.3.2.1 Erosión en probetas de acero estructural tipo AISI 1018.

Se realizaron pruebas preliminares en 6 placas de acero estructural tipo AISI 1018 y una carga de arena de 500 g bajo ángulos de impacto de 20, 30, 40, 60,75 y 90°. El resto de las condiciones de operación fueron en base a las descritas en la sección 7.2.

La selección de las dimensiones de las probetas fue a partir de la aproximación obtenida en las huellas de las probetas de vidrio, para los ángulos de 20 y 90°. Estas fueron de 100 x 50 x 6.35 mm.

El dispositivo portamuestras (figura 7.5(c)) utilizado para el montaje de las placas con respecto a el ángulo de impacto fue ajustado para cada uno de los ensayos. Posteriormente se realizaron los ensayos y fueron medidas las dimensiones de las huellas producto de la erosión.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

7.3.2.2 Erosión en probetas de acero grado herramienta.

Esta prueba exploratoria fue llevada a cabo empleando materiales que se utilizarían en las pruebas finales. Se utilizaron aceros H13, 4140 y 9840 de los cuales se obtuvieron dos probetas de cada uno de los primeros dos aceros y cuatro para el caso del 9840. Con la finalidad de obtener durezas similares a las de los materiales empleados en las cajas de corazones se aplicaron los siguientes tratamientos [4,5,6]:

Las 2 probetas de acero H13 fueron templadas a partir de una temperatura de 1020 °C y posteriormente se aplicó un doble revenido a 605° C a una de ellas y de 520° C a la otra, figura 7.6.(a),(b), y (c).

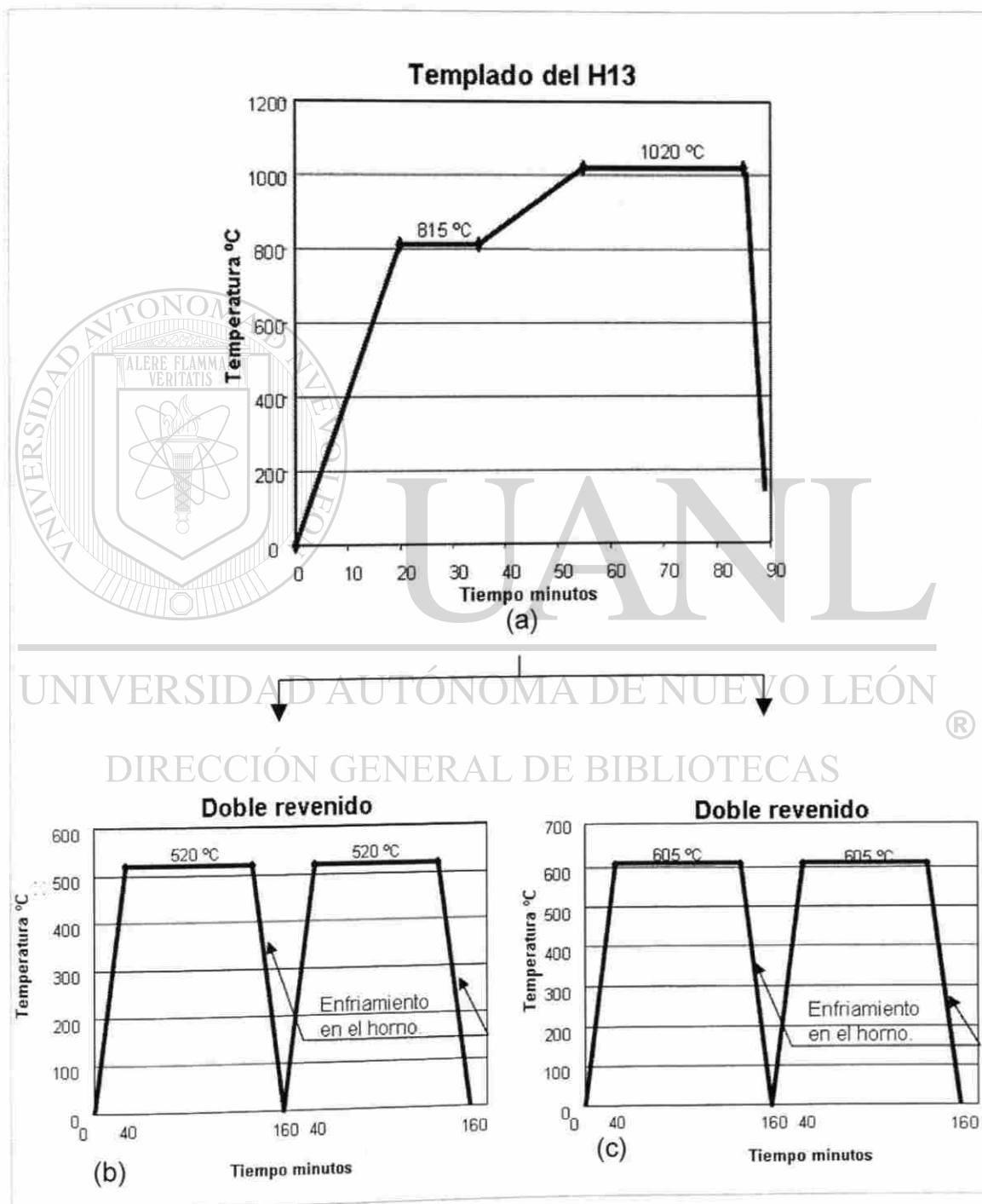


Fig. 7.6 Tratamientos térmicos en acero grado herramienta H-13.
 (a) Templado 1020 °C, (b) Doble revenido 520 °C, (c) Doble revenido 605 °C [4,5,6]

Las probetas del acero 4140 y 9840 fueron templadas a partir de una temperatura de 850 °C y posteriormente se aplicaron revenidos a 205 y 520° C. Los tratamientos térmicos son mostrados en las figuras 7.7 (a),(b) y (c).

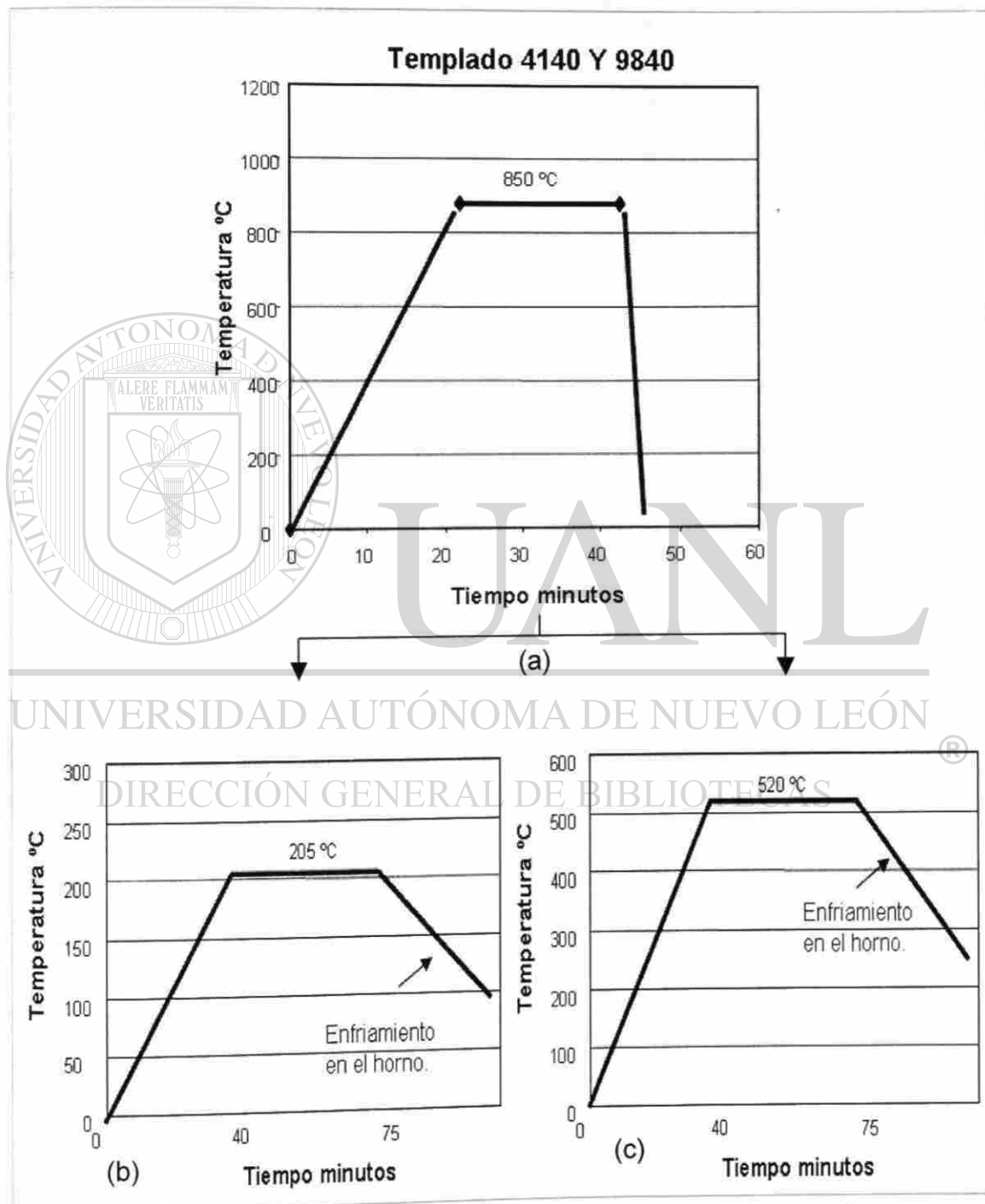


Fig. 7.7 Tratamientos térmicos en acero grado herramienta 4140 y 9840.
(a) Templado 850 °C, (b) Revenido 205 °C, (c) Revenido 520 °C [4,5,6]

Una vez elaborados los tratamientos térmicos las piezas fueron pulidas obteniendo una superficie acabado espejo, figura 7.8

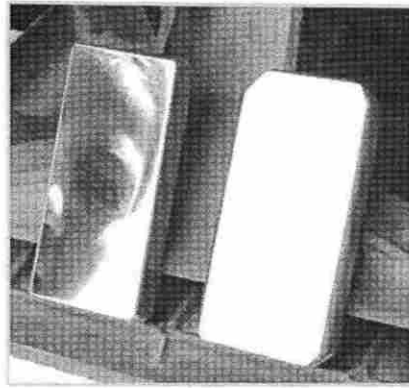


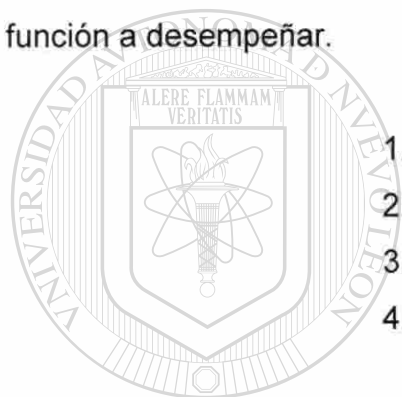
Fig. 7.8 Probetas pulidas acabado espejo.

Los ensayos de erosión en los tres tipos de aceros fueron realizados a un ángulo de impacto de 20° , con una carga de arena de 1000 g y presiones de trabajo de 6.2 bar (620 KPa). Además se ensayaron dos probetas del acero 9840 a 90° . En lo que respecta al resto de las condiciones del sistema se mantuvieron sin cambio. La erosión en cada uno de los materiales fue llevado en 2 tiempos con cargas de 500 g cada uno, ya que la caída de presión no permitía continuar erosionando las probetas, debido a la baja capacidad del compresor utilizado.

7.4 Máquina de pruebas.

En base a los resultados obtenidos en las pruebas preliminares con la máquina prototipo, se realizó el diseño y desarrollo de la máquina que se utilizaría para las pruebas de erosión. Al igual que para el equipo utilizado en las pruebas preliminares, el punto de partida para el diseño fue el uso de componentes estándar, la mayoría de las necesidades presentadas en la máquina prototipo debían de ser atendidas en este diseño final.

El diseño de este equipo fue dividido en cuatro subsistemas de acuerdo a la función a desempeñar.



- 1.- Cámaras de erosión.
- 2.- Sujeción.
- 3.- Cabina.
- 4.- Velocidad de partícula

7.4.1 Subsistema cámaras de erosión.

Los principales componentes utilizados fueron bridas ASTM A105, conexiones ASTM A106 y tubos sin costura en cedula 80, ver figura 7.9. Esto permitiría contar con un equipo con capacidades de operación de hasta 10.34 bar (1034 KPa)

El diámetro interno de las cámaras fue de 152.4 mm siendo éste el mínimo que permitía tener una configuración adecuada para el arreglo que se realizaría en las tapas de cada una de las cámaras, ver figura 7.9 (b) y (c).

Todos los componentes en el sistema que involucraran estancamiento de partículas fueron diseñados con ángulos por arriba del ángulo de reposo de la

arena a utilizar. Los componentes que presentaron esta consideración fueron las reducciones en cada una de las cámaras, la boquilla de conducción de arena y la boquilla de salida, ver figura 7.9 (a) y (e).

Se diseñó un sistema de compensación del aire con la finalidad de tener las dos cámaras con la mínima diferencia de presiones (figura 7.9), el sistema tomaría el aire de la cámara de mezcla para ser inyectado en la cámara superior, reduciendo con esto las caídas de presión presentadas en el prototipo y los tiempos tan cortos de la prueba.

El sellado de la unión de la boquilla de salida con el portaboquillas se logró mediante un sello de anillo, ver figura 7.10.

La alimentación de las partículas de arena fue realizada por medio de una boquilla cerca de la entrada de la boquilla, ver figura 7.9 (a) y (e).

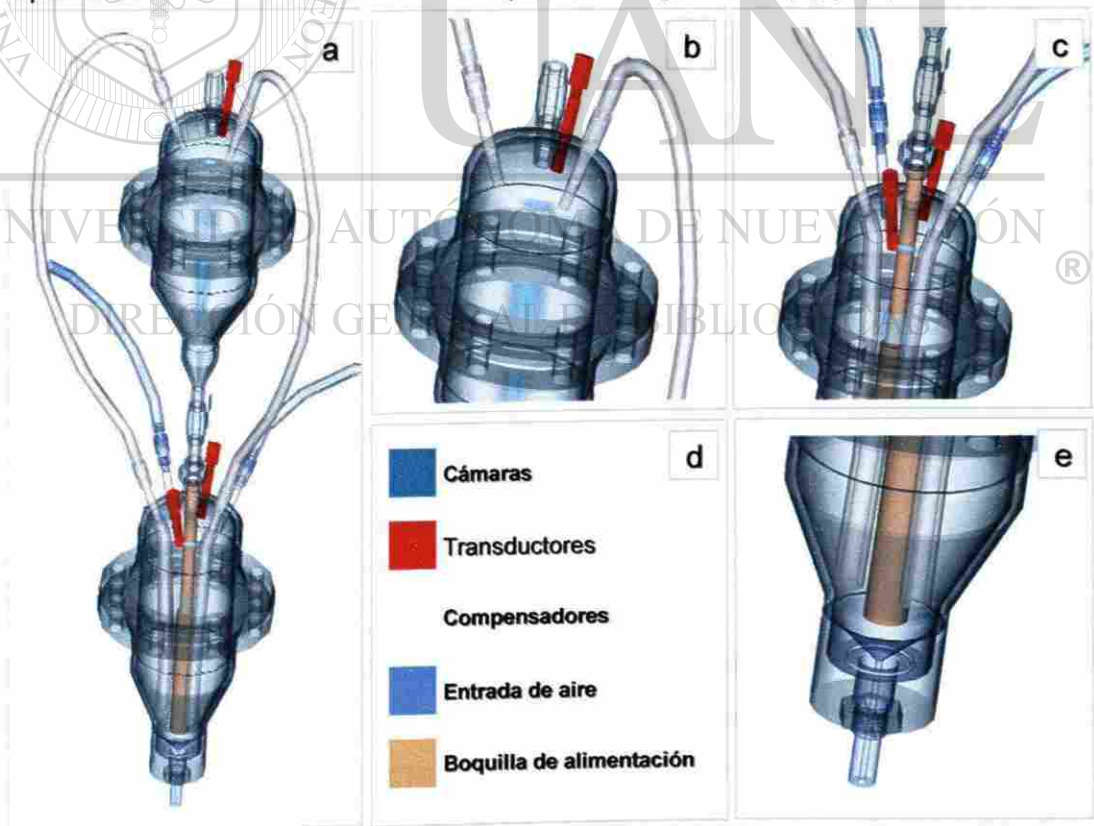


Fig. 7.9 Subsistema cámaras de erosión.

(a) Subsistema cámara, (b) Cámara Superior, (c) Cámara inferior, (d) Nomenclatura, (e) Salida.

El diseño de la boquilla inicial fue de una sola pieza (figura 7.10(a)). Posteriormente se desarrolló el diseño de un inserto, ver figura 7.10 (b).

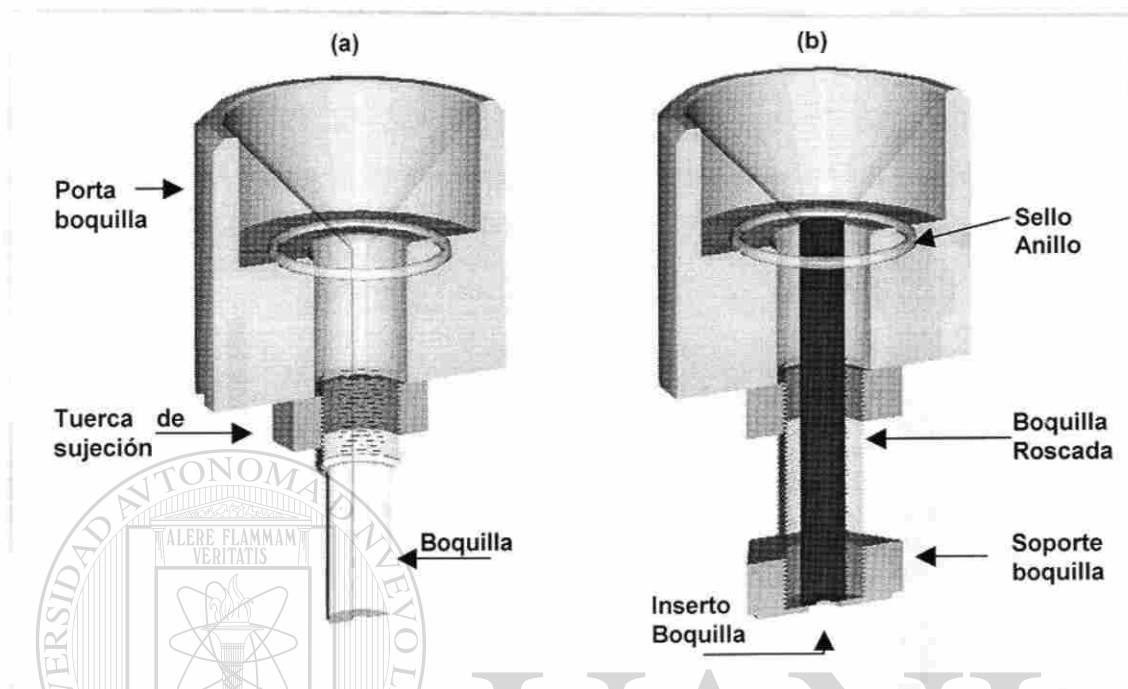


Fig. 7.10 Diseño de boquillas.
(a) Diseño inicial Boquilla una pieza, (b) Inserto

7.4.2 Subsistema Sujeción.

Para el desarrollo de sujeción de las probetas se requería que el equipo contara con las siguientes variables:

- Ángulo de impacto.
- Distancia de impacto.

Controlar la variable ángulo de impacto en el sistema involucró el desarrollo del brazo del portamuestra el cual al girarse permitiera mantener la distancia de impacto constante (figura 7.11 (a)). Así mismo se desarrolló el sistema sujeción del eje el cual fue unido a los espárragos (figura 7.11 (c)). La fijación del ángulo se realizó por medio de un aguja indicadora, ver figura 7.11.

La variable de distancia de impacto fue controlada mediante el uso de espárragos que se deslizarían dentro de guías. Una vez obtenida la distancia de impacto deseada los espárragos eran sujetos por medio de tuercas, ver figura 7.11 (b).

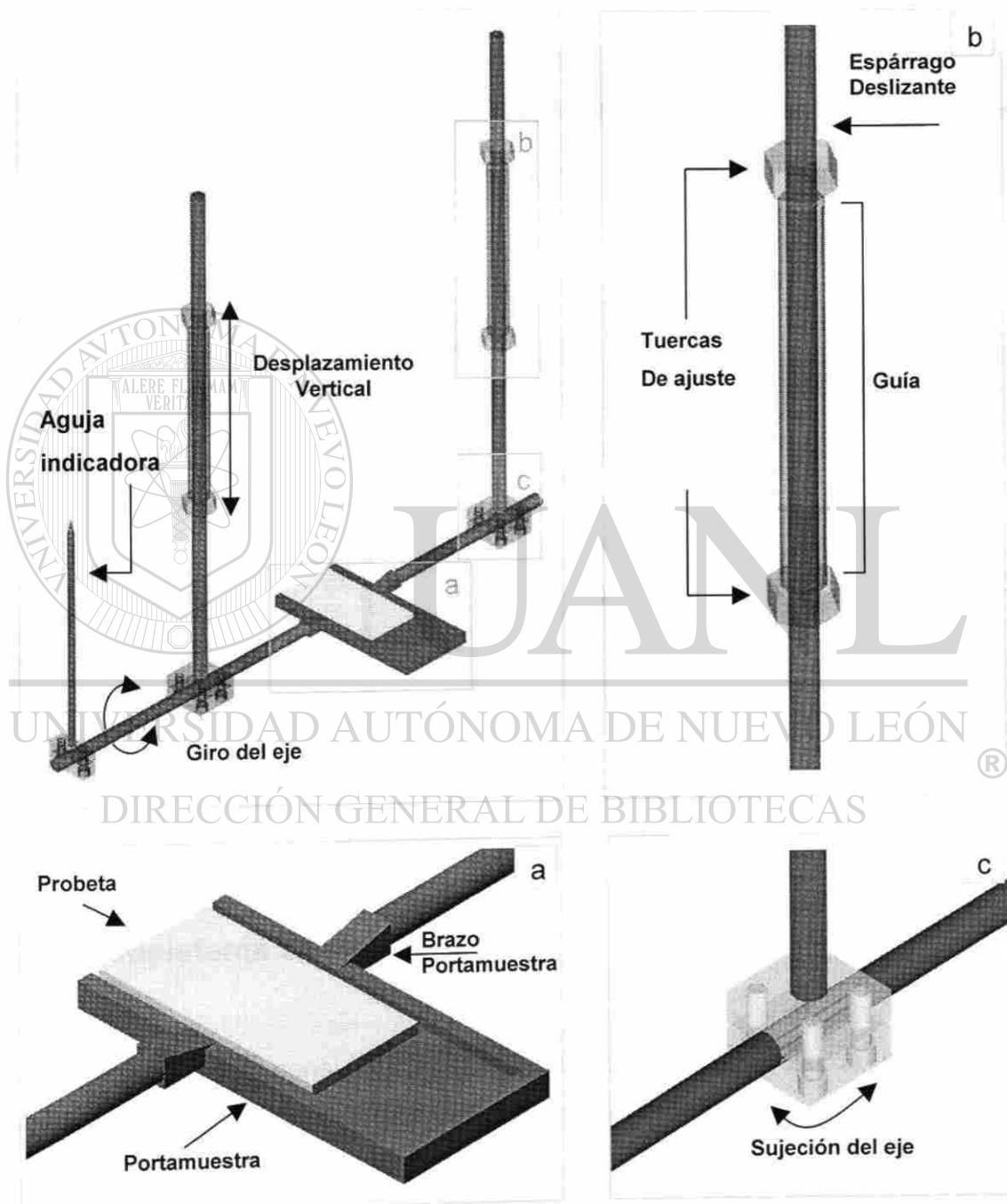


Fig. 7.11 Diseño del sistema portamuestras.
(a) Portamuestras, (b) Desplazamiento vertical de guías., (c) sujeción del eje.

El diseño del subsistema de sujeción fue realizado en conjunto con el diseño del componente que lo soportaría, de igual forma se realizaron algunas consideraciones para que la placa soporte permitiera que el subsistema cámaras fuera montado.

La figura 7.12 (a) representa el arreglo de los subsistemas en la placa soporte. Mientras que la figura 7.12 (b) ilustra las perforaciones que se realizarían a la placa.

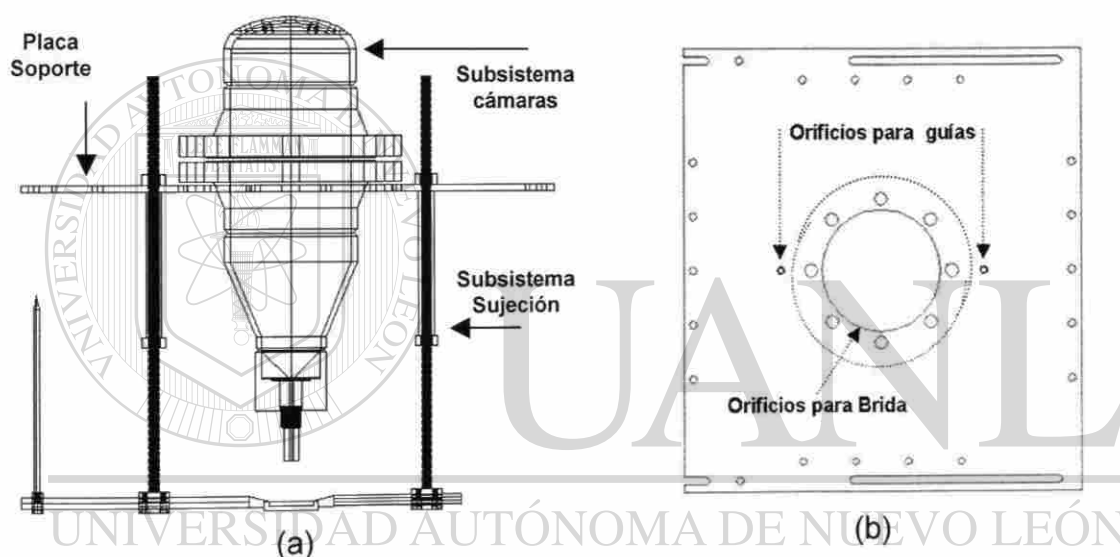


Fig. 7.12 Esquema representativo de placa soporte.
(a) vista frontal, (b) vista superior

7.4.3 Subsistema cabina.

Los puntos críticos a considerar en la cabina fueron el desarrollo de un sistema de filtración y el desahogo de la arena ya impactada.

Se diseñaron salidas de aire (figura 7.13) muy cercanas a la posición del eje del portamuestras, las cuales fueron conectadas a un filtro para de ahí permitir la salida del aire al ambiente. En lo que respecta al desahogo de arena impactada,

se incorporaron componentes a la salida de la tolva para permitir su desahogo. Al igual que en el subsistema cámaras, la cabina fue diseñada con un ángulo mayor al de reposo de las partículas, evitando así estancamiento de arena.

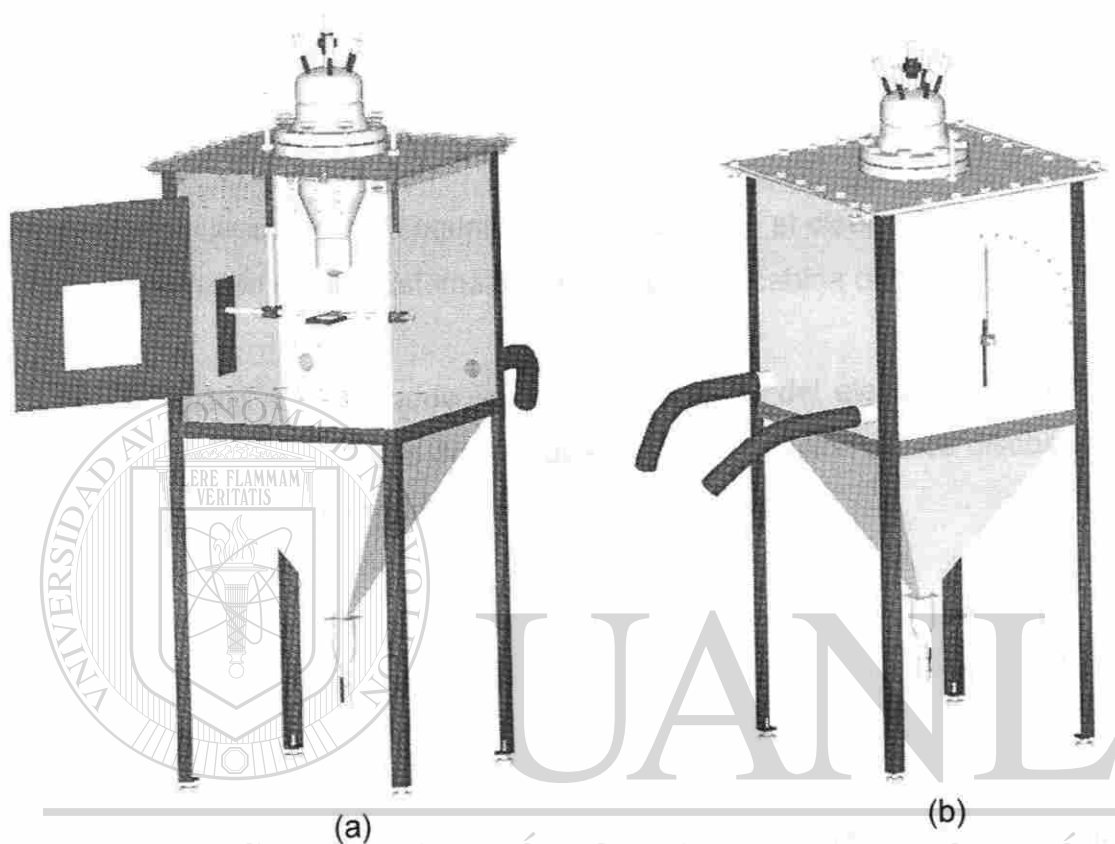


Fig.7.13 Subsistema Cabina.

(a) Perspectiva frontal, (b) Perspectiva trasera.

7.4.4 Subsistema velocidad de la partícula.

La velocidad de la partícula es una característica importante en el fenómeno de erosión como fue visto en la sección 4.3.1, de esta depende la energía cinética con la que impactarán las partículas en la superficie, por lo que un subsistema capaz de medir la velocidad de la partícula debe ser considerado en el diseño.

El método seleccionado para determinar la velocidad de partícula en el equipo fue el de doble disco (DD), a partir de un estudio realizado en la sección 6.4.4.

Las principales restricciones en el desarrollo del equipo de determinación de velocidad de partícula DD fueron:

- La distancia entre discos (L) tendría que ser menor a 50 mm debido a que la medición debe ser realizada a la distancia de impacto utilizada en las pruebas.
- Por cuestiones de seguridad se decidió que el diseño permitiera que la operación del subsistema fuera dentro de la cabina cerrada.
- Facilidad de lectura de la velocidad angular del eje que contuviera los discos. Para esto se decidió que el eje de rotación de los discos saliera de la cabina para poder ser medida su velocidad.
- Optimizar al máximo el diseño que se tenía del equipo para facilitar su montaje y evitar los ajustes de instalación de más componentes, los cuales elevarían los costos.

Dentro del establecimiento de dimensiones bajo las restricciones mencionadas fue propuesto el diseño mostrado en la figura 7.14. [®]

Las dimensiones del disco superior son de 1.5875 mm (1/16 in) de espesor y un radio de 139.7 mm, el orificio con un diámetro de 5 mm fue diseñado a un radio de 120.65 mm, el disco inferior cuenta con las mismas dimensiones (sin el orificio), ver figura 7.14 (b).

El sistema de poleas fue diseñado para ser instalado fuera de la cabina como es mostrado en la figura 7.14 (c). La parte inferior que comprende los discos y uno de los dos soportes de la estructura son introducidos en la cabina permitiendo que el orificio del disco superior se encuentre justo bajo la salida de la boquilla a una distancia de 20 mm, figura 7.14 (b) y (d).

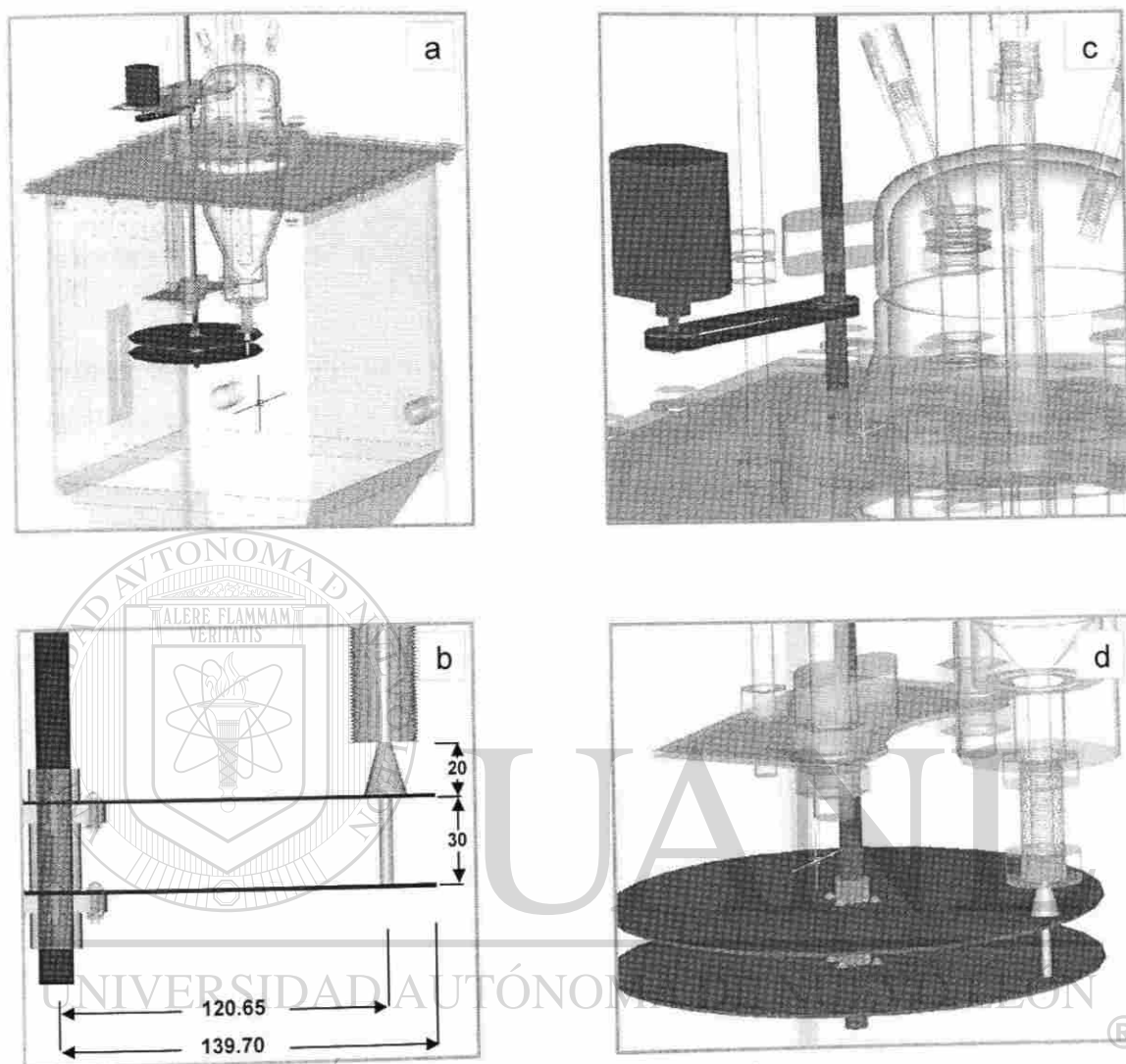


Fig. 7.14 Subsistema velocidad.

(a) Representación del sistema instalado en el equipo, (b) Dimensiones principales en el diseño del (DD) en mm, (c) juego de poleas y motor, (d) zona inferior arreglo de los discos.

Se desarrolló un programa de computo para la obtención de la velocidad angular del DD necesaria para las condiciones establecidas de distancia entre discos a partir de un intervalo de velocidades de partícula y un intervalo de desfases posibles entre las huellas del disco en reposo y en movimiento.

7.4.4.1 Análisis del orificio del disco superior y su velocidad angular.

Se analizaron los tamaños de partícula 425, 300, 212 y 150 μm los cuales conforman aproximadamente el 97% de la distribución de arena a utilizar. La velocidad deseada de la partícula para este análisis fue de $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, para diferentes velocidades de giro del disco.

El objetivo de este estudio fue el determinar de manera analítica el límite de velocidad angular para que la partículas pasaran por el orificio e impactaran en el disco inferior.

Las revoluciones del disco utilizadas en el presente estudio fueron: 1667, 2000, 2222, 3333 rpm, produciendo huellas con un ángulo de desfase de 15, 18, 20, 30° respectivamente.

La consideración realizada para que se diera con éxito el paso de la partícula a través del disco fue: para que una partícula logre pasar por el orificio deberá de recorrer una distancia equivalente a por lo menos dos veces su diámetro y el espesor del disco en un tiempo menor al tiempo que queda expuesta la abertura del disco al paso de la partícula (tiempo que recorre la distancia equivalente al diámetro del orificio menos un diámetro de la partícula), ver figura 7.15.

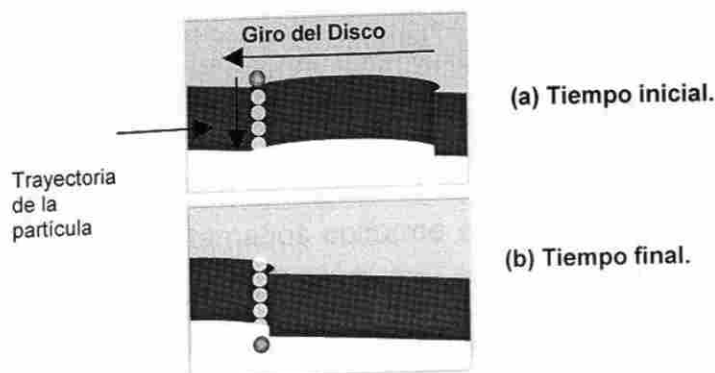


Fig. 7.15 Representación del paso de una partícula por el orificio del disco superior. (a) Tiempo inicial, partícula arriba de la superficie superior del disco, (b) Tiempo final, la partícula se encuentra debajo del disco superior continuando con su trayectoria para ser impactada en la superficie del disco inferior.

7.5 Metodología de las pruebas de erosión en el acero grado herramienta H13.

Se realizó la caracterización de los materiales que conformarían el sistema de erosión así como la evaluación de las condiciones en las que se presentarían los impactos.

Las principales consideraciones fueron:

Partículas erosivas.

Distribución de tamaños, morfología, dureza.

Material a impactar.

Caracterización microestructural, dureza, análisis químico, rugosidad.

Condiciones de impacto.

Presión de la cámara, alimentación de partículas, ángulo de impacto, distancia de impacto, tipo de fluido,

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

7.5.1 Caracterización de la partícula erosiva.

La arena fue proporcionada en costales de 50 kg. obtenida directamente de la línea por personal de Nematik, área de moldeo. Posteriormente, con la finalidad de obtener una distribución de tamaños uniforme en cada uno de los ensayos se realizó una distribución de las arenas por principios centrífugos dividiendo una carga de 20 kg. en 8 contenedores de 2.5 kg. Este procedimiento fue llevado a cabo en dos ocasiones para obtener 16 contenedores de 2.5 kg. cada uno. Posteriormente se utilizó una cuarteadora para obtener 32 bolsas de las

cuales 28 fueron de 1 kg. y 4 de 1.15 kg. El procedimiento se muestra de forma esquemática en la figura 7.16.

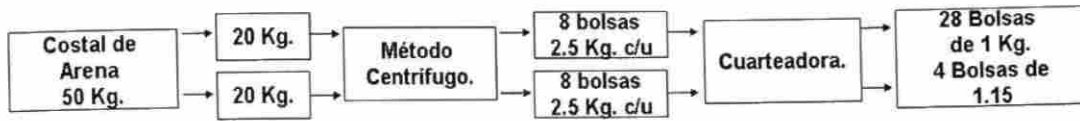


Fig.7.16. Procedimiento para la obtención de la arena.

De estas 32 bolsas de arena 16 fueron utilizadas para los ensayos (figura 7.17(a)) y el resto de la arena fue utilizada en pruebas para la determinación de la alimentación de la partícula (figura 7.17 (b)).

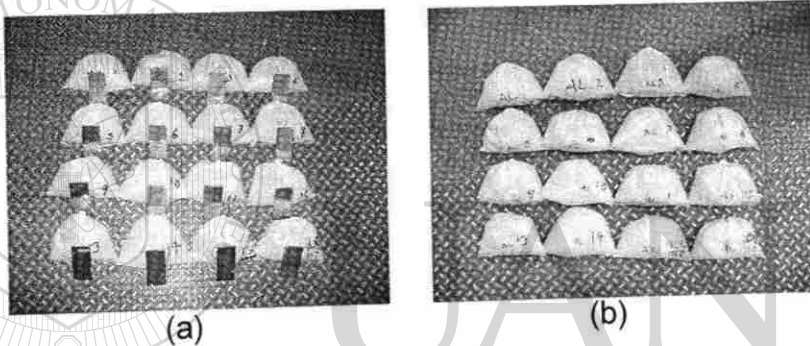


Fig. 7.17. Arena utilizada para los ensayos (Proporcionada por la empresa Nemark).

(a) arena utilizada para los ensayos en el acero grado herramienta H-13. (b) Arena utilizada para ensayos de alimentación de partícula.

De 2 de las bolsas de 1.15 kg. fueron obtenidos 2 muestras de 100 g. aproximadamente en donde fueron llevadas las pruebas de granulometría AFS gfn (sección 5.3.2) . A partir del contenido retenido en cada una de las mallas de la prueba de granulometría AFS gfn fueron seleccionadas 30 partículas para determinar su diámetro y perímetro en el analizador de imágenes y por medio de la ecuación 4.1 obtener el factor de redondez de las partículas.

7.5.2 Caracterización del acero a ensayar.

Fueron recibidas las probetas de acero grado herramienta H13 por parte de MECCANICA BASSI (Italia), con las dimensiones establecidas en base a las pruebas exploratorias de las secciones 7.3.2.1 y 7.3.2.2 (100 x 50 x 5 mm).

Para esta investigación fueron utilizadas 20 probetas dentro de las cuales se encontraban en condiciones de estado recocido, así como templado y revenido con durezas de 30, 40, y 55 HRC.

Una vez identificadas las probetas se realizó su caracterización tomando aleatoriamente 1^m probeta de cada una de las cuatro condiciones para practicarles:

- Caracterización metalográfica.

El análisis metalográfico fue realizado para cada una de las condiciones de tratamiento térmico a utilizar en la prueba. El ataque químico se realizó con nital al 2 %.

- Microdureza.

Los ensayos de dureza Vickers fueron realizados en un microdurómetro con una carga de 300 gf durante 15 s. Los resultados obtenidos fueron convertidos a dureza Rockwell en la escala C (HRC) para efectos de comparación con las durezas reportadas por el proveedor.

- Análisis químico.

Se analizó por espectrofotometría de chispa una muestra para cada una de las condiciones del material entregadas por el proveedor.

El resto de las probetas (16) fueron preparadas superficialmente para su ensayo de erosión, figura 7.18.



Fig.7.18 Piezas pulidas utilizadas en la prueba de erosión.

Una vez concluido el proceso de pulido se realizaron las mediciones de rugosidad en la superficie, dos corridas en el eje "x" (ancho) y dos en "y" (longitudinal), cada medición fue de una longitud de 4 mm y fueron realizadas a una separación de 10 mm entre ellas.

Posteriormente las muestras fueron limpiadas por ultrasonido en un baño con acetona por un tiempo de 15 minutos. Las piezas fueron secadas para después ser pesadas en una balanza analítica.

7.5.3 Evaluación de las condiciones del fluido y alimentación de la partícula.

Presión de las cámaras.

El control de la presión fue realizado utilizando un regulador de presión WATTS™ mientras que los registros de las presiones de las cámaras durante la prueba fueron almacenados por el equipo JUMBO™, ver figura 7.19. La presión utilizada para las pruebas fue de 1.379 bar (137 KPa) y el fluido utilizado fue aire seco, con un punto de rocío de -40 °C.

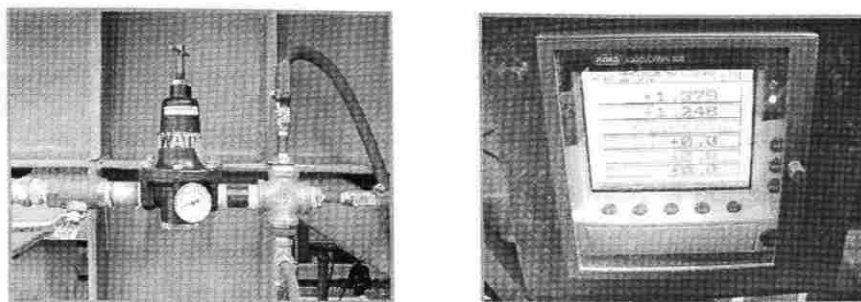


Fig.7.19 Evaluación de la presión.

(a) Control de presión en las cámaras, (b) registro de presiones durante la prueba

Ángulos y distancia de impacto.

Los ángulos de impacto utilizados fueron ajustados en el equipo de pruebas, por medio de la aguja de ángulo, ver figura 7.20.

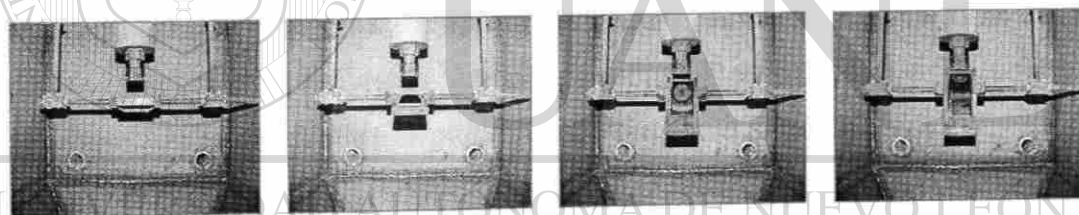


Fig.7.20 Ángulos de prueba utilizados en los ensayos.
Angulo 90,75,40,20° de izquierda a derecha.

Se cuidó que la distancia de impacto (boquilla-muestra) se mantuviera constante en cada uno de los ensayos, figura 7.21.

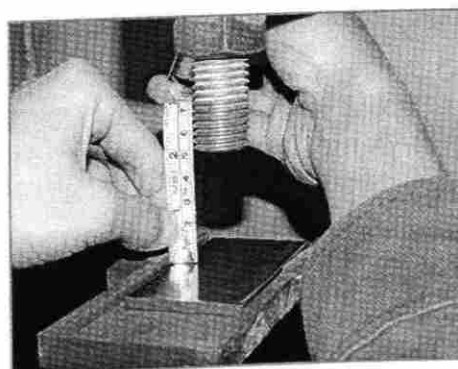


Fig.7.21 Medición de la distancia de impacto.

Alimentación de la partícula.

Debido a que el subsistema fue homogéneo en sus presiones (esto debido al sistema de entradas y recuperación de aire), se realizó la consideración de que la alimentación de la partícula sería por el efecto de gravedad. Esto aunado a que los tiempos de desalojo de la carga de arena fueron prácticamente los mismos tanto con el sistema presurizado, como con el sistema sin presurizar (465 s aproximadamente para ambos casos). Por lo tanto las pruebas para la determinación de la alimentación de la partícula fueron realizadas sin la cámara presurizada.

Las pruebas de alimentación fueron llevadas a cabo con cargas de arena de 1935 y 1150 g, estas arenas fueron previamente homogenizadas con una cuarteadora.

Fueron obtenidas muestras de arena de cada minuto para cada una de las pruebas, posteriormente estas fueron pesadas. Por último fue obtenida la gráfica de la alimentación de la partícula con respecto al tiempo.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

7.5.4 Pruebas en el acero grado herramienta H-13.

Las pruebas en los aceros grado herramienta fueron llevadas a cabo bajo las siguientes condiciones del sistema.

Partícula Erosiva:	Arena Sílica.
Tamaño:	AFS gfn 47.(tabla 8.4)
Forma de la partícula:	Redonda. (figura 8.16)
Carga:	1 Kg.
Alimentación de partícula:	2.47 g·s ⁻¹ (figura 8.18)
Dureza:	975 HV (tabla 4.1)
Material a erosionar:	Acero grado Herramienta H-13.
Dureza del material:	Recocido, 30, 40, 55 HRC.(tabla 8.6)
Dimensiones de las probetas:	100 x 50 x 5 mm.

Rugosidad:	< 1 μm . (tabla 8.8)
Presión de la cámara de mezcla:	1.379 bar (137.9 KPa).
Fluido conductor:	Aire seco (punto de rocío -40°C).
Temperatura de prueba:	Ambiente.
Diámetro boquilla:	5 mm.
Distancia de impacto:	50 mm.
Ángulos de impacto:	20, 40, 75, 90° .

Los ángulos seleccionados fueron debido a las diversas geometrías existentes en las cajas de corazones, lo que implica diversos ángulos de impacto de las partículas en el proceso de moldeo.

Las condiciones del material templado y revenido con durezas de 30 y 40 HRC. fueron consideradas debido a que son las condiciones en las que se encuentran las cajas de corazones en el proceso real de soplado, las condiciones de recocido y templado y revenido con dureza de 55 HRC fueron consideradas por ser los casos extremos de dureza comúnmente alcanzada por este acero.

El cambio de presión fue realizado a partir de un estudio del proceso de llenado de corazones por parte de Ashland Chemical el cual fue descrito en la sección 5.6 de esta tesis.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El diseño de experimentos forma parte de todo un estudio del fenómeno de erosión presentado en las cajas de corazones, el cual fue desarrollado en conjunto con expertos de la industria e investigación. Las principales variables del sistema son el ángulo de impacto y la dureza del material. Por lo tanto para este estudio se utilizaron cuatro combinaciones de durezas del material y cuatro ángulos de impacto de la partícula erosiva. De esta forma se logró estudiar una envolvente similar a la que se encuentra en el proceso de llenado de molde. La clasificación de las probetas con respecto al ángulo y la dureza es mostrada en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Diseño de experimentos en el acero H13.

Condición Probeta	Código Probeta	Ángulo Impacto
Recocida	1.-RO	90
30	1.-30	90
40	1.-40	90
55	1.-55	90
Recocida	2.-RO	75
30	2.-30	75
40	2.-40	75
55	2.-55	75
Recocida	3.-RO	40
30	3.-30	40
40	3.-40	40
55	3.-55	40
Recocida	4.-RO	20
30	4.-30	20
40	4.-40	20
55	4.-55	20

Se realizaron las pruebas de erosión en el acero de acuerdo a la tabla 7.1 y las condiciones operativas mencionadas.

Las huellas dejadas en las superficies de las probetas fueron medidas cuantitativamente por medio de un analizador de imágenes, midiendo la periferia de la huella.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Durante las pruebas fue monitoreado el diámetro interno de la boquilla en un analizador de imágenes. Ya que este no debe exceder variaciones mayores al 10%, según ASTM G76 [37].

Finalmente se obtuvieron los valores de pérdida en masa y desgaste erosivo, así mismo se realizaron las curvas de desgaste erosivo con respecto al ángulo de impacto y dureza de la partícula.

CAPÍTULO 8

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Introducción.

En el presente capítulo se presentan los resultados y discusiones de cada una de las pruebas exploratorias realizadas en la máquina prototipo, las cuales permitieron obtener un análisis del desempeño y realizar una serie de modificaciones en cada una de sus etapas.

La máquina de pruebas de laboratorio fue realizada en base a los resultados y observaciones obtenidos durante las pruebas preliminares utilizando la máquina prototipo 1 (sección 8.2 y 8.3). En este capítulo se discuten las principales variables del sistema y las funciones de sus componentes.

Finalmente fueron obtenidos los principales parámetros de la máquina y el sistema así como las gráficas de erosión para el acero grado herramienta H-13 en condiciones de estado recocido, templado y revenido con durezas de 30, 40,

55 HRC por el impacto de 1 kg. de partículas de arena sílica con distribución AFS gfn 47 y ángulos de impacto 20, 40, 75 y 90°.

8.2 Máquina Prototipo etapa exploración.

Los principales resultados y observaciones encontradas durante las pruebas del equipo prototipo en su etapa de exploración fueron:

- El impacto de partículas conducidas por el flujo de aire no mostró un comportamiento de mezcla, esto fue debido a que el volumen disponible para propiciar la mezcla aire-arena no era lo suficientemente grande. La figura 8.1 muestra el volumen de mezcla con el que contaba el equipo siendo este un conector T de 6.35 mm de diámetro. Debido a éste comportamiento en donde el impacto fue en forma de pequeños soplos se tendría que considerar el uso de una cámara de mezcla mayor.



Fig. 8.1. Volumen de mezcla.

- La boquilla de cobre presentó desgaste severo a la salida. Por lo que no fue considerada en próximas pruebas. Para esto, aceros grado herramienta fueron utilizados como boquilla en la máquina posterior.

- Se presentó un daño localizado en los materiales erosionados. Esto fue un resultado satisfactorio en el equipo de pruebas por lo que se decidió utilizar la misma geometría de boquilla ya que al haber una gran cantidad de impactos en un área muy pequeña asegura que casi el total de las partículas tienen la misma dirección de impacto. La figura 8.2 muestra la vista lateral de una placa de vidrio de espesor de 12 mm, esta fue perforada, formando un cono con una pendiente producto de los impactos de las partículas que rebotaban. De esta forma se puede establecer que la zona de daño severo puede ser obtenida mediante la base del cono la cual fue de 8 mm de diámetro.

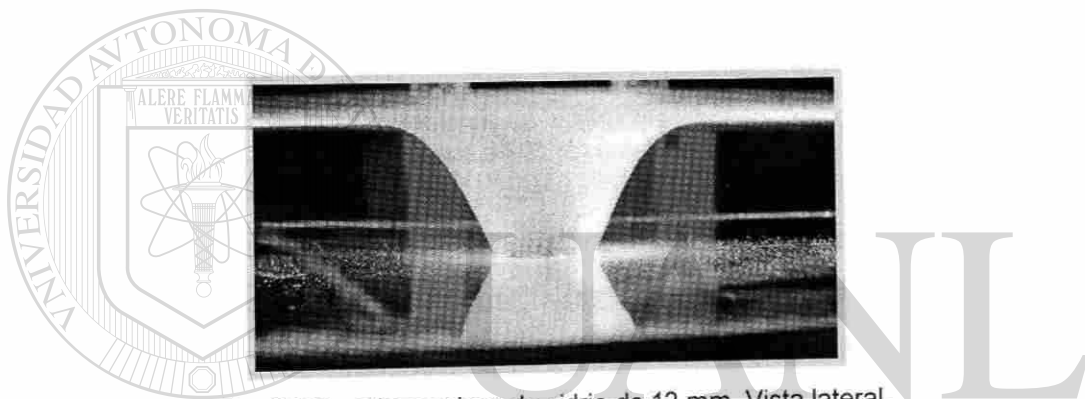


Fig. 8.2 Erosión en placa de vidrio de 12 mm. Vista lateral.

- Se obtuvieron las huellas en la superficie del material para los ángulos de 90° y 20° , figura 8.3.

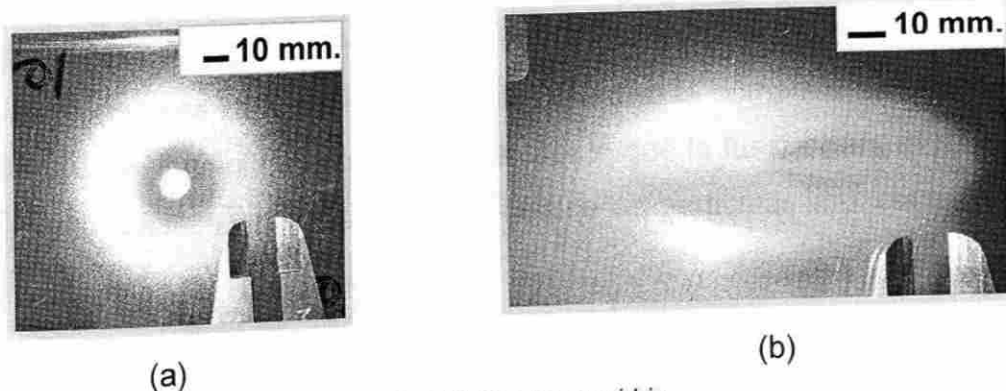


Fig. 8.3 Erosión en vidrio.
(a) Ensayo a impactos de 90° (b) Ensayo a impactos a 20°

La dispersión de partículas fue interpretada mediante la medición de las huellas, en donde para el caso de impactos a 90° , se midió en un diámetro promedio de 55 mm, mientras que en el vidrio impactado a 20° la elipse generada se encuentra limitada por un diámetro mayor de 100 mm y un diámetro menor de 40 mm, ver figura 8.4.

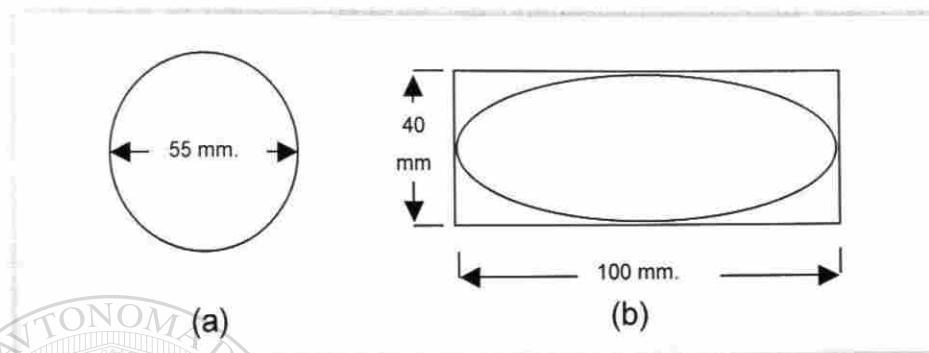


Fig. 8.4 Dimensiones de huella obtenidas en vidrio.
(a) erosionado a 90° . (b) erosionado a 20°

En cuanto a aspectos de dimensión, las huellas de desgaste obtenidas en esta prueba pueden ser utilizadas como una indicación de las huellas que se obtendrán en las pruebas en el acero grado herramienta. Por lo tanto en las siguientes pruebas preliminares se contempló el uso de muestras con dimensiones muy cercanas a las utilizadas en esta prueba.

La gran pérdida de material en el vidrio erosionado a 90° fue debido al mecanismo de fractura frágil en donde la formación de las grietas laterales es el mecanismo de desgaste dominante. Por lo que respecta a los materiales impactados en ángulos oblicuos la componente normal de fuerza de impacto es muy pequeña, por lo que la fuerza para generar la grieta radial es mínima para la mayoría de las partículas impactadas.

- Los principales problemas operativos que se encontraron fueron:

1. Humedad en el sistema.

La presencia de humedad generó que el sistema se bloqueara al presentarse aglomeraciones de arena en el equipo. Por lo tanto para el diseño posterior, se contempló el uso de filtros o de un sistema de purgado.

2. Problemas de accesibilidad al momento de cargar arena.

El principal problema en la carga de la arena fue el tener que remover continuamente la entrada de aire superior. Por lo que se requiere en el futuro diseño realizar ajustes en las entradas de aire así como en la entrada de alimentación de arena.

3. Problemas en el ajuste del ángulo de impacto.

Por tratarse de pruebas exploratorias con el sistema prototipo, variables como el ángulo de impacto no fueron incorporadas al diseño ya que el objetivo de éste fue únicamente evaluar la funcionalidad del sistema de erosión.

4. Partículas de arena en el ambiente.

Se presentó una gran cantidad de finos en el ambiente durante la prueba por lo que para futuras pruebas debe ser considerado el uso de una cabina y sistemas de filtración.

5. No se contó con un control de las presiones del sistema durante la prueba, generándose una caída de presiones durante esta. El gradiente presentado fue de 4.15 a 1.379 bar (415 a 137 KPa).

8.3 Máquina Prototipo, etapa ajuste de variables.

Los resultados durante la utilización del equipo prototipo son presentados en base a las pruebas realizadas y mediante un estudio del comportamiento del equipo en ambas pruebas.

En lo que respecta al estudio de las huellas de desgaste para el acero AISI 1018, la figura 8.5 muestra las huellas producidas para cada uno de los ángulos de impacto utilizados.

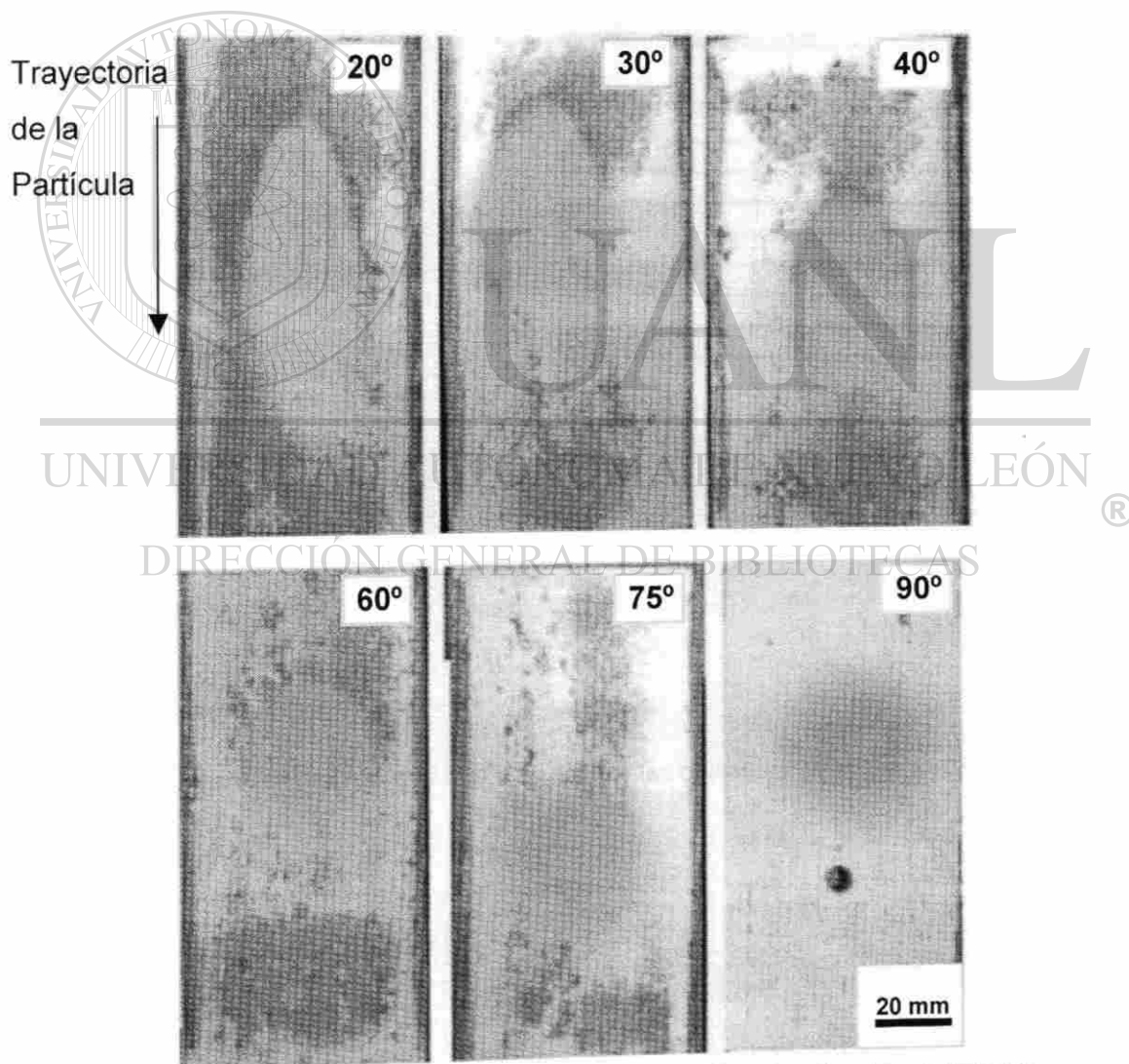


Fig. 8.5. Huellas obtenidas en acero AISI 1018 para diferentes ángulos de impacto. La trayectoria de las partículas fue de arriba hacia abajo para las probetas mostradas a excepción de la probeta impactada a 90°.

La forma de huella generada a ángulos bajos fue aproximadamente elíptica, aunque cabe señalar que en su extremo inferior (con respecto a la dirección de impacto) presentó divergencia, existiendo una mayor dispersión de partículas debido a que la distancia de impacto fue mayor. Las dimensiones de las huellas obtenidas en la presente prueba en el ángulo de impacto de 90° es un círculo de 34 mm de diámetro. Para la prueba a 20° se obtuvo una elipse de 27 X 63 mm. Estos resultados pueden ser vistos en la figura 8.6.

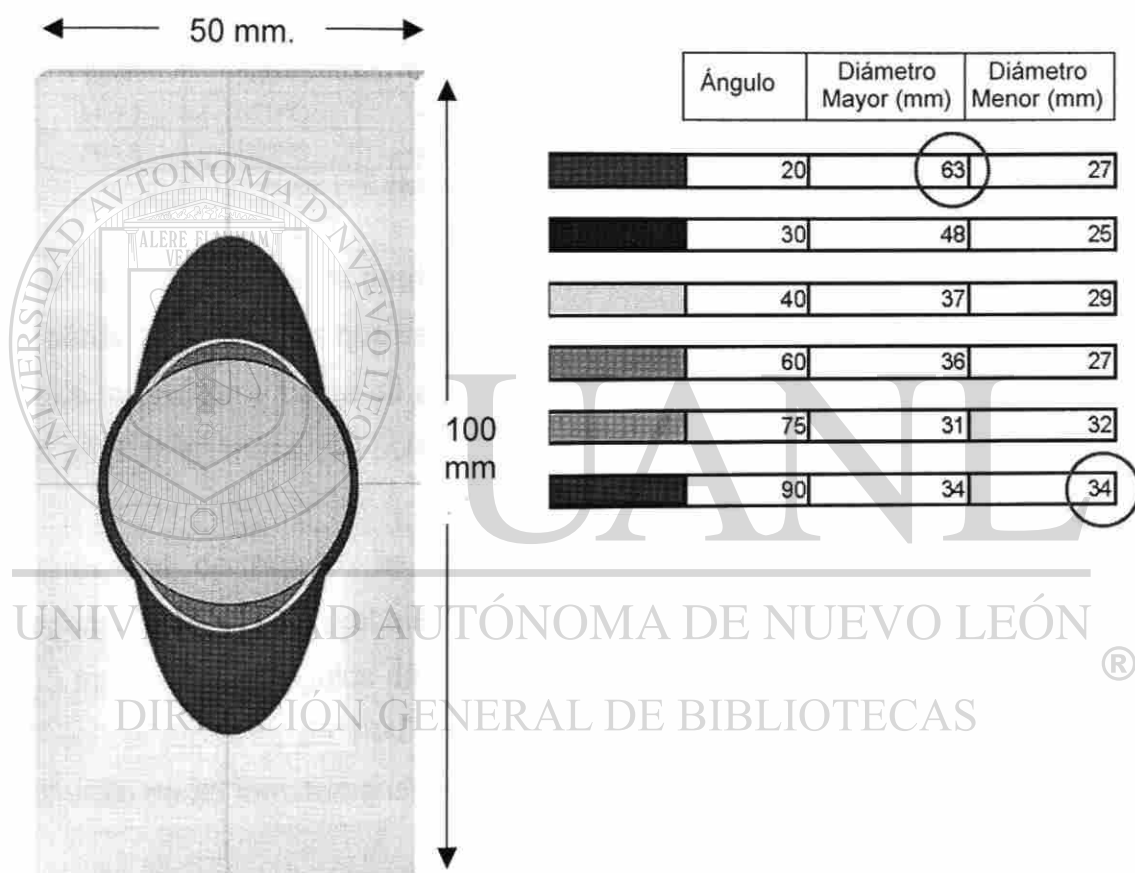


Fig. 8.6 Representación esquemática de las huellas obtenidas en el acero AISI 1018.

Los resultados de la masa inicial, masa final y pérdida en masa de los aceros grado herramienta para los diferentes ángulos de impacto y durezas obtenidas son mostrados en la tabla 8.1.

Tabla 8.1 Resultados de pérdida en masa de diferentes aceros grado herramienta.

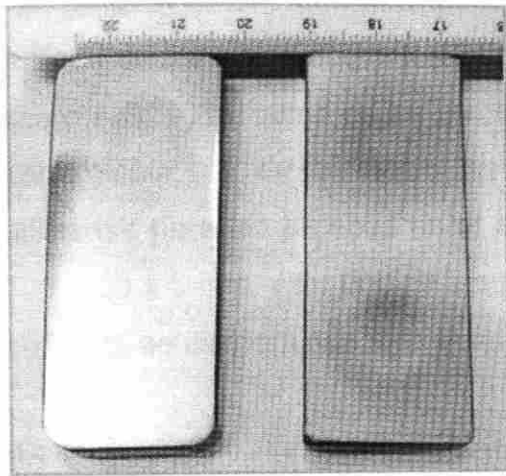
Material	Temperatura Revenido	Dureza HRC	Angulo Impacto	Masa inicial	Masa final	Pérdida en masa
4140	520°C	40.0	20°	208.2366	207.7236	0.5130
4140	205°C	54.0	20°	200.1642	199.5725	0.5917
9840	520°C	40.6	20°	207.3315	206.6174	0.7141
9840	205°C	55.3	20°	206.9115	206.3170	0.5945
9840	520°C	40.6	90°	208.3587	207.9175	0.4412
9840	205°C	55.3	90°	206.0331	205.3619	0.6712
H-13	520°C	54.6	20°	165.8713	165.2861	0.5852
H-13	605°C	43.6	20°	208.6100	207.9524	0.6576

Nota: Los datos de masa se encuentran en gramos.

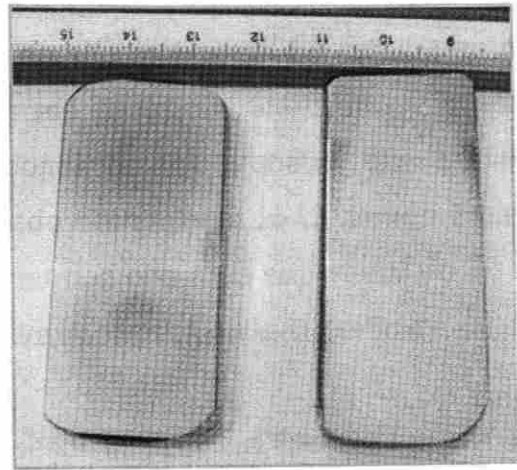
La erosión en los aceros grado herramienta es representativo para la obtención de pérdida en masa ya que se encuentra en el orden de décimas de gramo, por lo que la presión y carga de arena utilizada, fueron suficientes para contar con una pérdida en masa que pueda ser fácilmente detectada.

Las huellas de erosión se presentaron en los límites del área superficial proporcionada por las probetas. Las dimensiones promedio de huella fueron 70 x 35 mm para los ángulos de impacto a 20° mientras que para los impactos de 90° en las probetas de 9840 las dimensiones de huella fueron de un diámetro promedio de 35 mm, tomando en cuenta todos los aceros erosionados.

Los aceros erosionados se muestran en la figura 8.7 en donde se puede observar las huellas producto de la erosión.



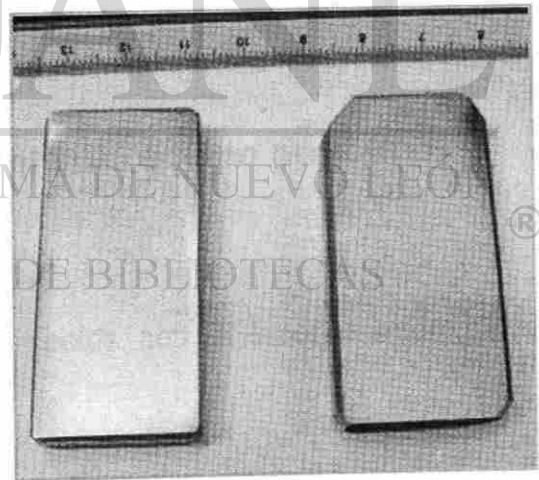
9840 205°C 20° 9840 205°C 90°



9840 520°C 90° 9840 520°C 20°



H 13 205°C 20° H 13 605°C 20°



4140 205°C 20° 4140 520°C 20°

Fig.8.7 Probetas de aceros grado herramienta después de la erosión.

8.3.1 Selección de las dimensiones de probeta.

A partir de los datos obtenidos, tanto en la prueba preliminar del estudio en el acero AISI 1018, como en las pérdidas en masa de los diferentes aceros grado herramienta, se establecieron las dimensiones de las probetas que serían utilizadas para las pruebas en el acero grado herramienta H-13 siendo estas 100 x 50 x 5 mm, esto debido a que al contar con una área superficial de 50 x 100 mm, se asegura que toda la masa erosiva impactará en la superficie.

En lo que respecta a la selección del espesor la decisión fue en base a la pérdida de material mostrada en los aceros grado herramienta, la cual no mostró una profundidad excesiva y sí una pérdida de masa aceptable. Se analizó el máximo espesor para que las probetas fueran medidas por la balanza analítica antes de la prueba siendo esta de 5 mm ya que proporcionaba un peso aproximado de 195 g y un espesor para soportar la pérdida de material por el desgaste erosivo.

8.3.2 Resultados del comportamiento del equipo prototipo

etapa 2.

1. Se eliminó el comportamiento de soplos con la incorporación de la cámara de mezcla.
2. La boquilla utilizada (sección 7.3.2) presentó una mayor vida útil al ser utilizada en los 16 ensayos y mantenerse el diámetro interno con una variación de menos del 10% que sugiere la norma ASTM G76 [5].
3. En lo que respecta a las condiciones de operación del sistema los problemas de accesibilidad para la carga de arena así como el ángulo de impacto fueron resueltos.

4. La presencia de finos en el ambiente no fue eliminada por lo que este problema debía ser considerado en el diseño final de la máquina, utilizando sistemas de filtración.
5. El tiempo promedio de prueba para cada una de las cargas de 500 g fue de 41 segundos. Esto permitía establecer que la arena era forzada a salir y su alimentación no ocurría por gravedad ya que la prueba para el segundo caso hubiese tardado 200 s (duración de vaciado por gravedad de los 200 g de arena). Este efecto fue debido a la diferencia de presiones entre la cámara depósito (mayor presión) y la cámara de mezcla (menor presión), por lo que en el diseño final de la máquina se contempló un sistema en el que la alimentación de presión se realice principalmente a la cámara de mezcla y a partir de ahí sea presurizada la cámara de depósito de arena.
6. Por otra parte los problemas de la presión de la línea no fueron solucionados; la humedad continuó presentándose (figura 8.8), así como un gradiente de presión durante la prueba (4.15 a 1.379 bar = 415 a 137.9 KPa, para el caso de las pruebas del acero AISI 1018), (6.25 a 2.75 bar = 625 a 275 KPa para los ensayos realizados en el acero grado herramienta). Por lo que se requirió realizar las pruebas en la compañía para de esta manera eliminar los problemas asociados con la presión de la línea, ya que contaban con reguladores de presión y aire seco.

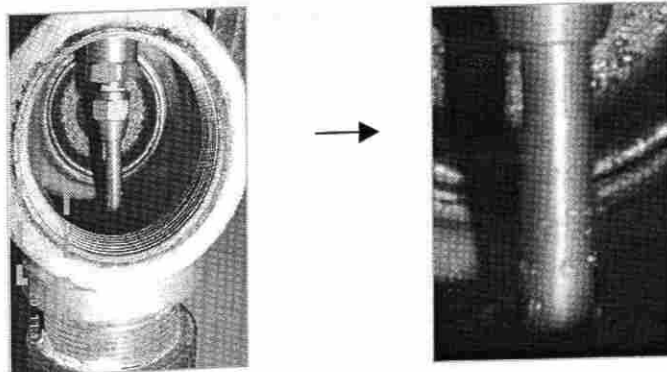


Fig. 8.8 Humedad en cámara de mezcla.
 (a) Cámara de mezcla (b) boquilla interna con presencia de humedad.

8.4 Máquina de pruebas.

Se construyó el equipo de acuerdo a las condiciones y consideraciones citadas en el capítulo 7. La figura 8.9 muestra una vista de la máquina de erosión etapa 3.

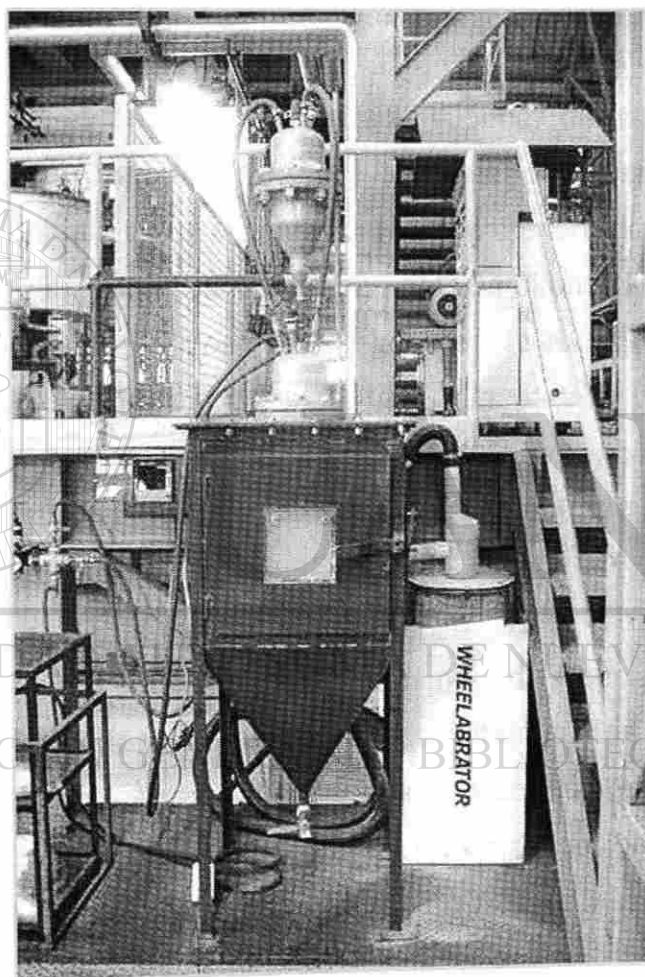


Fig. 8.9 Sistema Máquina de Erosión Etapa 3.

Los resultados del desarrollo del equipo son presentados en los cuatro subsistemas así como una descripción de las principales funciones de sus componentes.

8.4.1 Subsistema de erosión.

El subsistema de erosión fue acomodado y mantenido en posición vertical por medio de un espárrago pasado sobre las bridas de cada una de las cámaras. La figura 8.10 (a) muestra los componentes que se encontraron fuera de la cabina mientras que la figura 8.10 (b) muestra los que se encuentran dentro de la misma.

Se diseñó y construyó el arreglo en la tapa superior de la cámara para el depósito de arena con cuatro entradas, de las cuales tres fueron equidistantes (dos permitían la entrada del aire proveniente de la cámara de mezcla y una la medición de la presión) y una central de 12.7 mm de diámetro para la carga de arena, ver figura 8.10 (c). La descarga de la arena se realiza a través de una reducción de diámetro de 152.4 mm a 12.7 mm para a partir de ahí ser controlada por una válvula esférica. Posteriormente una boquilla conductora permite el suministro de la arena justo en la zona de entrada de la boquilla de erosión, ver figura 8.10 (e).

El arreglo obtenido en la parte superior de la cámara de mezcla es mostrado en la figura 8.10 (d) seis niples se encontraban equidistantes (dos utilizados para la entrada de aire, dos de recirculación de aire que conectaban con la cámara depósito, uno para la medición de presión y uno más opcional) mientras que uno central permitía la entrada de la arena proveniente de la cámara depósito.

En la parte interna de la cámara de mezcla se obtuvo el arreglo de recirculación de aire el cual fue conectado con la cámara depósito, ver figura 8.10 (e). Esto permite mantener la misma presión entre las cámaras. Con este arreglo se eliminaron los tiempos cortos presentados en la máquina prototipo etapa 2.

El subsistema se encontró sellado tanto en las dos cámaras como en el contacto boquilla – portaboquilla, ver figura 8.10 (f).

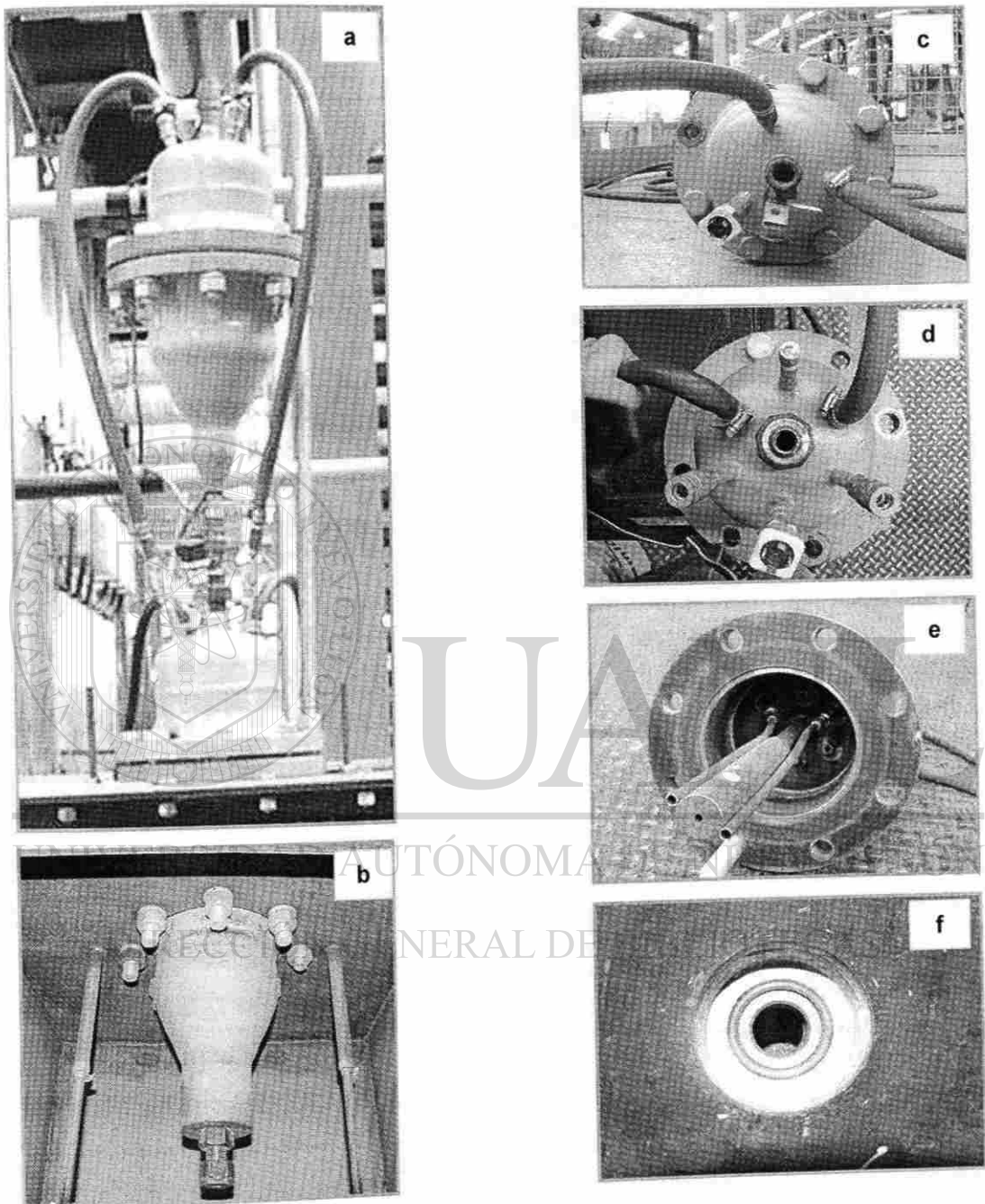


Fig. 8.10 Subsistema erosión.
 (a) Cámara Deposito de arena, (b) Cámara de mezcla, (c) Arreglo de cámara deposito, (d) Arreglo cámara mezcla, (e) Arreglo interno cámara de mezcla, (f) Sellado de boquilla.

Se realizaron los dos diseños de boquilla propuestos en el capítulo 7 (sección 7.4.1), figura 8.11. En este caso el acero grado herramienta empleado para la fabricación del inserto fue H13.

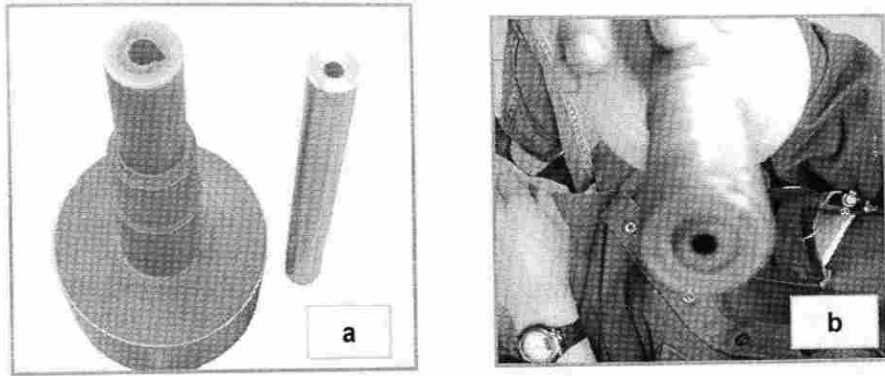


Fig. 8.11 Componentes Boquillas.

(a) Boquilla diseño inicial y nuevo inserto, (b) Boquilla diseño final con inserto montado de material H-13 templado y revenido con dureza de 30 HRC.

8.4.2 Subsistema sujeción.

El sistema sujeción final es mostrado en la figura 8.12.

Las guías restringen el movimiento de toda la estructura del subsistema, permitiendo sólo su desplazamiento vertical por medio de los espárragos al ser giradas las tuercas de sus extremos, este mecanismo permite controlar la distancia de impacto, ver figura 8.12 (c).

Los espárragos fueron soldados de sus extremos inferior a las mordazas transmitiendo así solo el movimiento vertical, las mordazas al ser abiertas permiten el giro del eje cambiando así el ángulo de impacto, debido a que el eje se encuentra unido al portamuestra, figura 8.12 (a) y (d). El ángulo de impacto es ajustado con la aguja indicadora externa (figura 8.12 (e))

La construcción de los brazos que unen el eje con el portamuestra permitió que el centro del eje de rotación estuviera en el mismo nivel que el de la superficie de la muestra a impactar. Así cualquiera que sea el ángulo de impacto, la distancia boquilla-muestra (distancia de impacto) no variará, ver figura 8.12(b).

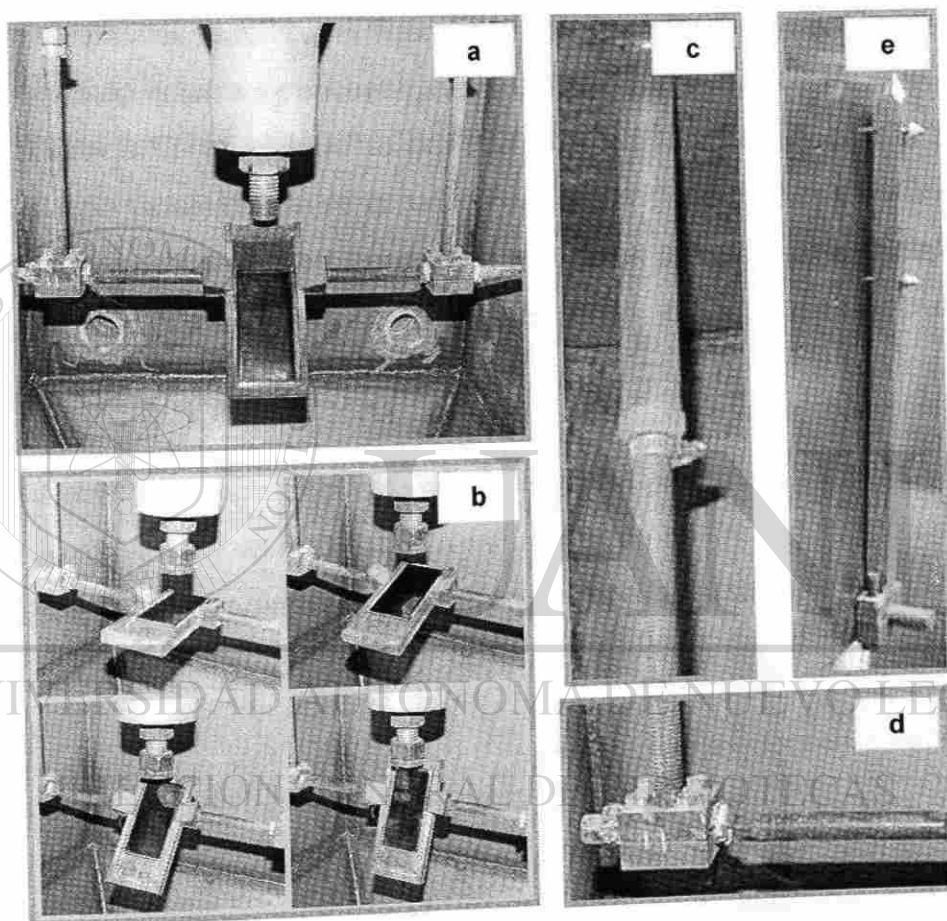


Fig. 8.12 Subsistema portamuestra.
 (a) Vista general, (b) Portamuestra girado a diferentes ángulos, (c) Guía desplazamiento vertical, (d) Arreglo eje (e) Indicador de ángulo.

8.4.3 Subsistema Cabina.

Se construyó una cabina sellada con capacidad de trabajar dentro de ella por medio de la apertura de la puerta frontal. Una vez en operación las pruebas deberán de ser corridas con el subsistema completamente cerrado. El desahogo de la arena se hace abriendo la válvula esférica que se encuentra en la parte inferior de la tolva, ver figura 8.13 (a). Para facilitar la salida de arena, las paredes de la tolva se encuentran a un ángulo mayor que el de reposo de la arena (figura 8.13 (b)). Una de las principales funciones del subsistema es la de soportar toda la estructura de la máquina. La placa central tiene la función de unir los subsistemas cámara de erosión y sujeción además de contribuir en el sellado de la cabina y permitir que el equipo se encuentre en una correcta nivelación, ver figura 8.13 (c).

Otras funciones de este subsistema son las de permitir el control del ángulo desde el exterior (figura 8.13 (d)), y evitar la emisión de finos al medio ambiente, ya que cuenta con un sistema de filtración en la parte trasera, figura 8.13 (e).

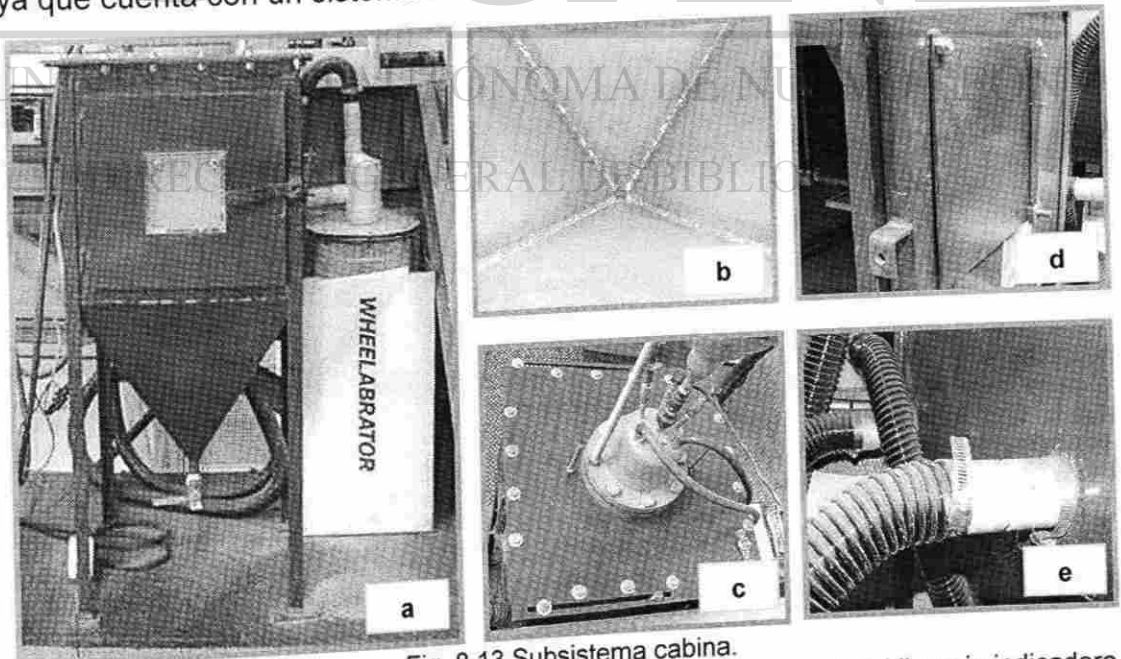


Fig. 8.13 Subsistema cabina.
 (a) Cabina, (b) Tolva vista interna, (c) Placa soporte perspectiva superior, (d) aguja indicadora, (e) Filtración.

8.4.4 Subsistema Velocidad (método de doble disco).

Se construyó el subsistema de velocidad bajo las siguientes características:

Los tres espárragos utilizados como guías permiten el ajuste por medio de sus tuercas y contratueras en tres puntos de cada una de las dos placas que soportan los rodamientos axiales, con esto se nivelan las placas y por consecuencia el eje y los discos, figura 8.14 (a) y (c).

La placa de soporte superior, además de nivelar el eje, tiene la función de realizar el ajuste del sistema de poleas al desplazar el motor y su polea impulsora sobre sus guías, figura 8.14 (b).

Los rodamientos utilizados fueron rodamientos sellados para carga axial, bajo la consideración de que el peso del eje y los discos representarían una carga pequeña, así como el de evitar que las partículas de arena entraran al componente, ver figura 8.14 (c).

La distancia entre discos (L) es una variable en el subsistema al contar con portadiscos con opresores permitiendo un ajuste en el eje de rotación, ver figura 8.14 (a).

La diferencia entre el radio del disco (139.7 mm) y el radio a la zona central de impacto (120.65 mm) fue de 19.05 mm, por lo que es un radio mayor que puede cubrir la huella presentada a impactos a 90° , como fue el caso del acero AISI 1018 (donde la huella de erosión formó un radio de huella = 17 mm) y el acero grado herramienta 9840 (donde la huella de erosión formó un radio de huella = 17.5 mm) de la sección 8.3, aunado a que los impactos en el disco superior serían a una distancia de 20 mm y no de 50 mm, como fue realizado en las diferentes pruebas.

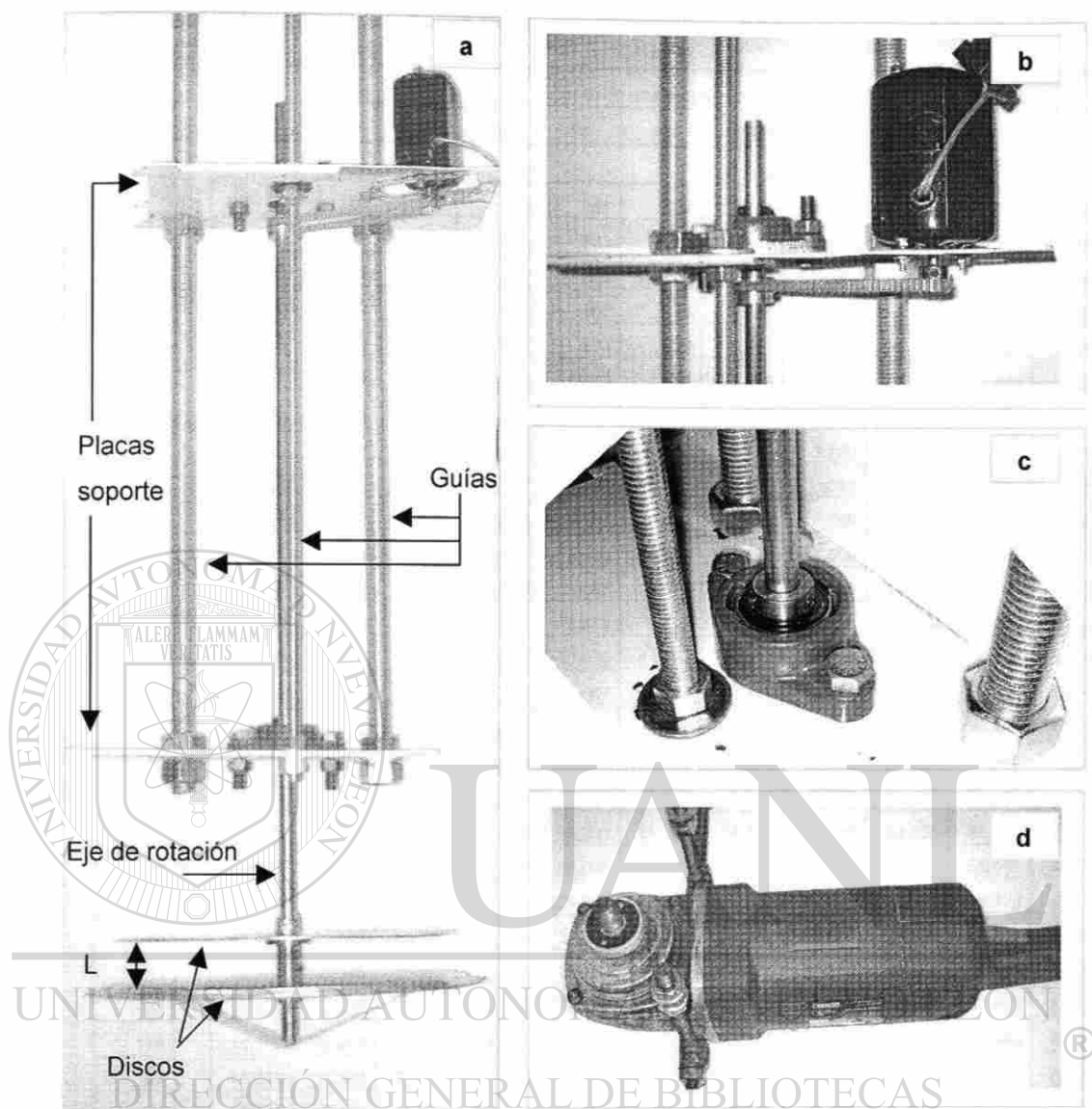


Fig. 8.14 Subsistema velocidad.

(a) Método doble disco, (b) Placa soporte superior, (c) Placa soporte inferior, (d) Ajuste para montaje del motor de 15 amperes.

Los resultados del programa desarrollado para la obtención de velocidad angular del DD son mostrados en la tabla 8.2, bajo la consideración de distancia entre discos de 30 mm, velocidades de partícula en un intervalo entre 1 a 200 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ y ángulos de desfasamiento de huella de 15 a 60°.

Tabla 8.2 Velocidad de los discos para una velocidad de partícula y ángulo entre huellas.

V part. m·s-1	Ángulo de desfasamiento. (°)										
	15	18	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1	83	100	111	139	167	194	222	250	278	306	333
2	167	200	222	278	333	389	444	500	556	611	667
3	250	300	333	417	500	583	667	750	833	917	1,000
4	333	400	444	556	667	778	889	1,000	1,111	1,222	1,333
5	417	500	556	694	833	972	1,111	1,250	1,389	1,528	1,667
8	667	800	889	1,111	1,333	1,556	1,778	2,000	2,222	2,444	2,667
10	833	1,000	1,111	1,389	1,667	1,944	2,222	2,500	2,778	3,056	3,333
15	1,250	1,500	1,667	2,083	2,500	2,917	3,333	3,750	4,167	4,583	5,000
20	1,667	2,000	2,222	2,778	3,333	3,889	4,444	5,000	5,556	6,111	6,667
25	2,083	2,500	2,778	3,472	4,167	4,861	5,556	6,250	6,944	7,639	8,333
30	2,500	3,000	3,333	4,167	5,000	5,833	6,667	7,500	8,333	9,167	10,000
40	3,333	4,000	4,444	5,556	6,667	7,778	8,889	10,000	11,111	12,222	13,333
50	4,167	5,000	5,556	6,944	8,333	9,722	11,111	12,500	13,889	15,278	16,667
60	5,000	6,000	6,667	8,333	10,000	11,667	13,333	15,000	16,667	18,333	20,000
70	5,833	7,000	7,778	9,722	11,667	13,611	15,556	17,500	19,444	21,389	23,333
80	6,667	8,000	8,889	11,111	13,333	15,556	17,778	20,000	22,222	24,445	26,667
90	7,500	9,000	10,000	12,500	15,000	17,500	20,000	22,500	25,000	27,500	30,000
100	8,333	10,000	11,111	13,889	16,667	19,444	22,222	25,000	27,778	30,556	33,333
110	9,167	11,000	12,222	15,278	18,333	21,389	24,445	27,500	30,556	33,611	36,667
120	10,000	12,000	13,333	16,667	20,000	23,333	26,667	30,000	33,333	36,667	40,000
130	10,833	13,000	14,444	18,056	21,667	25,278	28,889	32,500	36,111	39,722	43,333
140	11,667	14,000	15,556	19,444	23,333	27,222	31,111	35,000	38,889	42,778	46,667
150	12,500	15,000	16,667	20,833	25,000	29,167	33,333	37,500	41,667	45,833	50,000
160	13,333	16,000	17,778	22,222	26,667	31,111	35,556	40,000	44,445	48,889	53,333
170	14,167	17,000	18,889	23,611	28,333	33,056	37,778	42,500	47,222	51,945	56,667
180	15,000	18,000	20,000	25,000	30,000	35,000	40,000	45,000	50,000	55,000	60,000
190	15,833	19,000	21,111	26,389	31,667	36,945	42,222	47,500	52,778	58,056	63,333
200	16,667	20,000	22,222	27,778	33,333	38,889	44,445	50,000	55,556	61,111	66,667

A partir de los resultados obtenidos en esta tabla, se realizó el análisis para determinar las velocidades angulares del disco que permitirían el paso de las partículas, el cual fue propuesto en la sección 7.4.4.1

Para altas velocidades angulares de los discos se tendría un ángulo de desfasamiento muy grande facilitando su lectura. Pero esto no sucedería si las partículas no alcanzaran a pasar por el orificio, debido al corto tiempo que quedaría expuesto en el chorro de aire-arena. Por otra parte a velocidades angulares muy bajas, las partículas tendrían mayor oportunidad de pasar el

orificio pero los ángulos de desfase serían muy bajos lo que dificultaría la lectura del arco de desfase.

Del análisis elaborado para el espesor del disco y diámetro de orificio (sección 7.4.4.1), para establecer si las partículas con una velocidad de $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ de la podrían pasar libremente por el orificio del disco superior fueron obtenidos los siguientes resultados:

Tabla. 8.3 Tiempos de exposición del orificio del disco superior y necesario para el paso de las partículas

Tamaño de partícula (μm)	Velocidad disco R.P.M.	Velocidad Partícula $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Exposición Disco td (s)	Trayectoria Partícula tp (s)	td-tp (s)	Ángulo entre huellas ($^\circ$)
425 μm	1667	20	2.1722.E-04	1.2188.E-04	9.5340.E-05	15 $^\circ$
	2000	20	1.8105.E-04	1.2188.E-04	5.9170.E-05	18 $^\circ$
	2222	20	1.6296.E-04	1.2188.E-04	4.1080.E-05	20 $^\circ$
	2778	20	1.3035.E-04	1.2188.E-04	8.4700.E-06	25 $^\circ$
	3333	20	1.0864.E-04	1.2188.E-04	-1.3240.E-05	30 $^\circ$
300 μm	1667	20	2.2315.E-04	1.0938.E-04	1.1377.E-04	15 $^\circ$
	2000	20	1.8600.E-04	1.0938.E-04	7.6620.E-05	18 $^\circ$
	2222	20	1.6742.E-04	1.0938.E-04	5.8040.E-05	20 $^\circ$
	2778	20	1.3391.E-04	1.0938.E-04	2.4530.E-05	25 $^\circ$
	3333	20	1.1116.E-03	1.0938.E-04	1.0022.E-03	30 $^\circ$
212 μm	1667	20	2.2733.E-04	1.0058.E-04	1.2675.E-04	15 $^\circ$
	2000	20	1.8948.E-04	1.0058.E-04	8.8900.E-05	18 $^\circ$
	2222	20	1.7055.E-04	1.0058.E-04	6.9970.E-05	20 $^\circ$
	2778	20	1.3642.E-04	1.0058.E-04	3.5840.E-05	25 $^\circ$
	3333	20	1.1370.E-04	1.0058.E-04	1.3120.E-05	30 $^\circ$
150 μm	1667	20	2.3028.E-04	9.4380.E-05	1.3590.E-04	15 $^\circ$
	2000	20	1.9194.E-04	9.4380.E-05	9.7560.E-05	18 $^\circ$
	2222	20	1.2276.E-04	9.4380.E-05	2.8380.E-05	20 $^\circ$
	2778	20	1.3818.E-04	9.4380.E-05	4.3800.E-05	25 $^\circ$
	3333	20	1.1517.E-04	9.4380.E-05	2.0790.E-05	30 $^\circ$

(td) tiempo de exposición del orificio del disco superior, (tp) tiempo necesario para realizar la trayectoria

Se puede establecer que las velocidades angulares óptimas de los discos para que las partículas puedan pasar e impactar al disco inferior, son aquellas que se encuentran en la tabla 8.2 para huellas de desfase menores a 25 $^\circ$, ya que para la velocidad de giro que propiciará un desfase de huella de 30 $^\circ$ no permitiría el paso de las partículas de un tamaño de 425 μm o mayor.

Es importante notar que esta deducción fue a partir del espesor del disco y el diámetro del orificio diseñado, por lo que si las dimensiones de estas son cambiadas las velocidades angulares requeridas para el paso de las partículas serán diferentes.

El considerar un biselado dará mayor oportunidad al paso de las partículas e incluso las partículas que no pasan por el orificio serán rebotadas hacia fuera del sistema y no desviadas hacia el disco inferior. Sin embargo la vida útil del disco será relativamente baja, ya que el espesor propenso a la erosión será mucho menor. El cambiar el diámetro del orificio del disco a uno mayor tendrá la ventaja de utilizar un mayor ángulo de desfasamiento, pero el diámetro de la huella en el disco inferior será mayor teniendo así dificultad de su lectura.

Para el estudio del comportamiento de las velocidades de giro se utilizó un motor Singer™ a/c con capacidad de 1.2 amperes (figura 8.14 (b)). El sistema arrojó 1500 r.p.m. esto fue principalmente por el amperaje que demandaba el sistema, posteriormente se uso un motor de 6000 r.p.m. ac/dc con 15 amperes donde se obtuvieron velocidades de 9000 rpm para el juego de poleas utilizado.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

8.5 Caracterización del sistema de erosión en el H13.

Los resultados obtenidos son presentados de acuerdo al esquema planteado en la sección 7.5.

8.5.1 Resultados de la caracterización de las partículas erosivas.

Distribución de tamaños.

Los resultados de granulometría se muestran en la tabla 8.4 y 8.5 para las pruebas 1 y 2 respectivamente del análisis de la sección 7.5.1. La figura 8.15 muestra la distribución de tamaño de partícula para ambas pruebas.

Tabla.8.4 Resultados de la granulometría en la arena. Prueba 1

N° de Malla	Tamaño (µm)	Total Acumulado	Retenido por Malla			
			Gramos	%	Factor	Producto
40	425	17.5	17.5	17.5	30	525
50	300	54.0	36.5	36.5	40	1460
70	212	85.6	31.6	31.6	50	1580
100	150	97.3	11.7	11.7	70	819
140	106	99.7	2.4	2.4	100	240
200	75	99.9	0.2	0.2	140	28
270	53	100.0	0.1	0.1	200	20
Fondo		100.0	0.0	0.0	300	0
Total		100.0	100.0	100.0		4672

N° AFS 47

% Finos 2.7

Tabla.8.5 Resultados de la granulometría en la arena. Prueba 2

N° de Malla	Tamaño (µm)	Total Acumulado	Retenido por Malla			
			Gramos	%	Factor	Producto
40	425	15.9	15.9	15.9	30	477
50	300	56.1	40.2	40.2	40	1608
70	212	84.4	28.3	28.3	50	1415
100	150	97.7	13.3	13.3	70	931
140	106	99.9	2.2	2.2	100	220
200	75	100.0	0.1	0.1	140	14
270	53	100.0	0.0	0.0	200	0
Fondo		100.0	0.0	0.0	300	0
Total		100.0	100.0	100.0		4665

N° AFS 47

% Finos 2.3

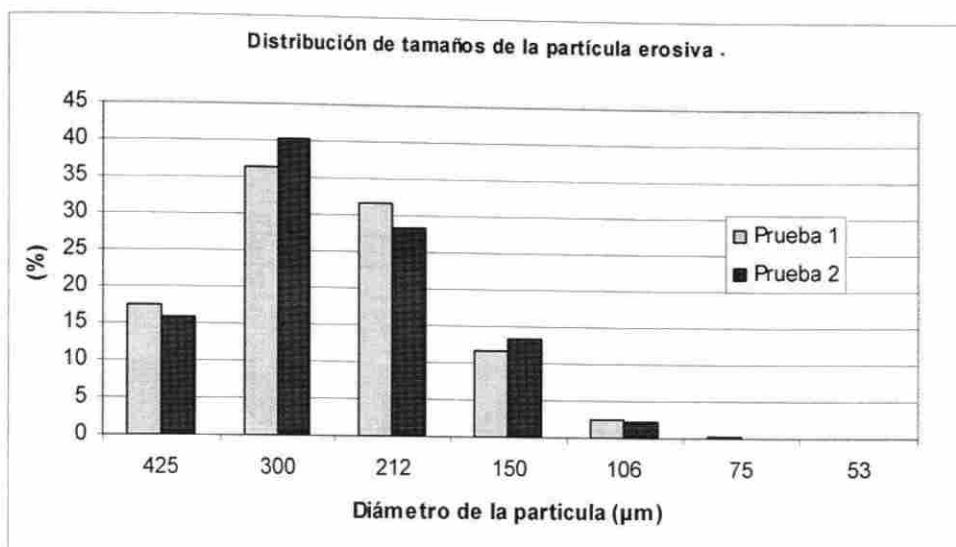


Fig. 8.15 Comparación de los porcentajes encontrados de cada tamaño de partícula en las pruebas granulométrica.

En los resultados de las pruebas de granulometría se observó alrededor del 70% de las partículas analizadas se encuentran en el intervalo de diámetro de 212 y 300 μm . Partículas de tamaños mayores a las 100 μm son consideradas como altamente erosivas [12].

Factor de redondez.

El factor de redondez de las partículas fue determinado a partir de la ecuación 4.1. Los resultados se presentan en la figura 8.16, junto con ejemplos de las morfologías más representativas de los diferentes tamaños de partícula.

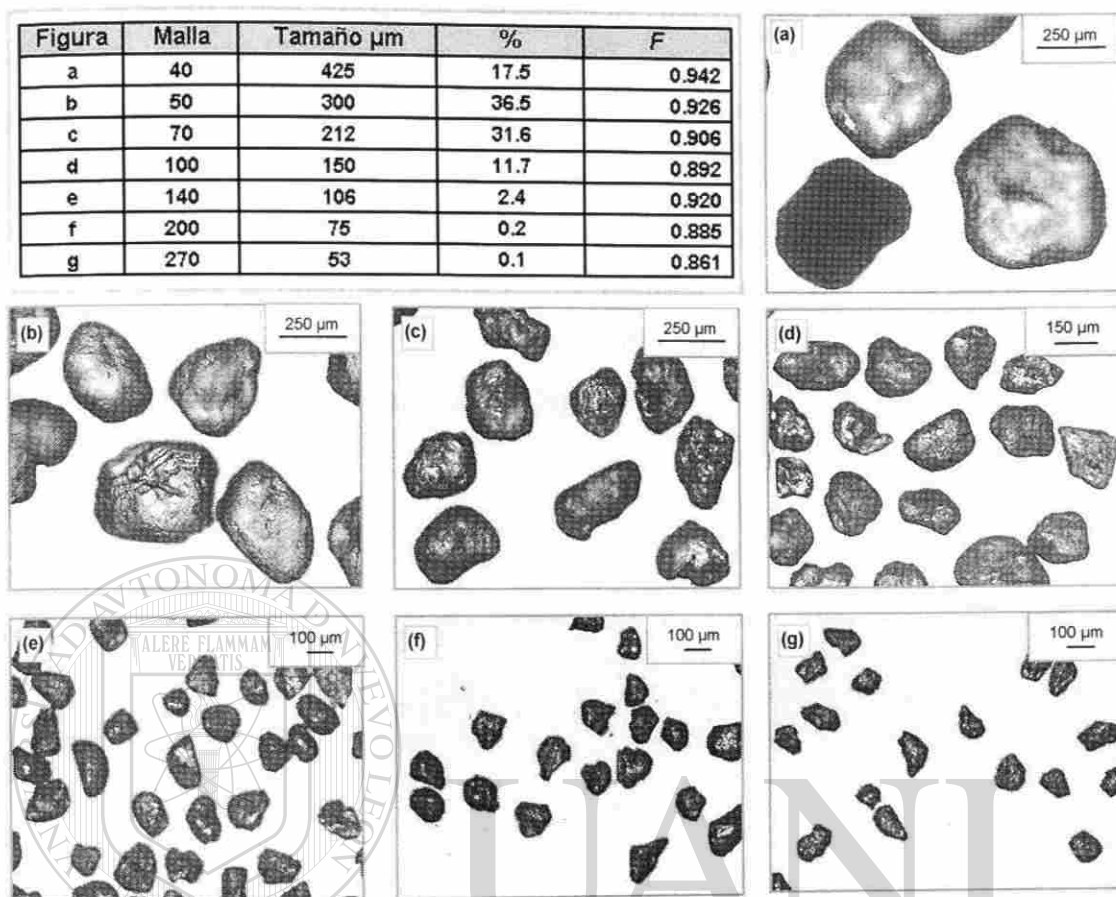


Fig. 8.16 Factor de redondez de la arena utilizada.

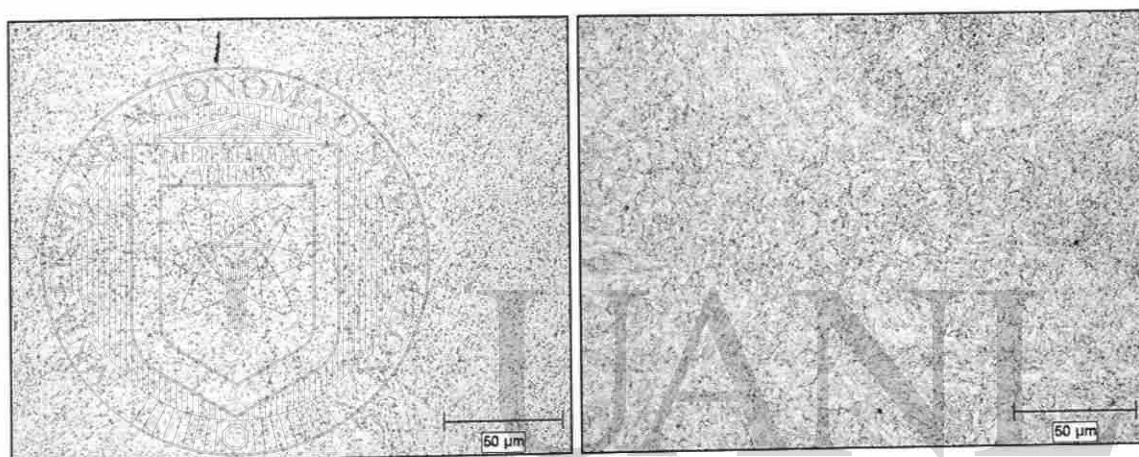
La tabla indica el factor de redondez, tamaño y porcentaje de las partículas de arena que forman. Las figuras muestran la forma de las partículas para sus diferentes tamaños.

Se establece que las partículas erosivas con las que fueron llevadas a cabo las pruebas tienen una forma redonda, debido a que sus factores de redondez se encuentran en un intervalo entre 0.86 a 0.94, y de 0.89 a 0.94 para el 97% del total de la arena utilizada.

8.5.2 Resultados de caracterización del material a impactar.

Caracterización microestructural.

Las microestructuras observadas fueron formadas por ferrita con carburos finos dispersos para el caso del acero H13 en estado recocido. Para los casos del acero templado y revenido, se encontró martensita revenida. Algunas micrografías son presentadas en las figuras 8.17.



(1) Acero H-13 En condición de recocido.
Atacado con nital al 2%.
Ferrita con carburos finos dispersos.

(2) Acero H-13 Templada y revenida 40 HRC.
Atacado con nital al 2%.
Martensita fina revenida

Fig.8.17 Metalografías en acero grado herramienta H-13

Resultados de las pruebas de microdureza.

Las durezas obtenidas del acero H13 para cada una de las condiciones a ensayar son mostradas en la tabla 8.6. Estas fueron similares a las reportadas por el proveedor de herramientas.

Tabla 8.6 Comparación de durezas reportadas por el proveedor contra durezas obtenidas

Dureza HRC Proveedor	Durezas Obtenidas		
	HV.	HRC.	Promedio HRC
Recocida	215.5	14.5	11.5*
	198.0	10.5	
	193.6	9.5	
30.0	298.7	29.5	29.9
	313.1	31.3	
	293.9	28.9	
40.0	388.3	39.6	39.4
	391.4	39.9	
	378.6	38.6	
55.0	607.9	55.7	55.4
	605.9	55.6	
	596.0	55.0	

*La dureza en un durómetro Rockwell es de 92 HRB (10 HRC).

Análisis químico.

Los resultados obtenidos en el análisis químico (tabla 8.7) están dentro de los límites de composición reportados en la tabla 2.3 de la designación AISI.

Tabla 8.7 Composición química del acero AISI H13.

Composición % en Peso									
AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
(1) H13	0.396	0.48	1.02	5.31	0.14	1.23	<0.01	0.94	0.021
(2) H13	0.32 - 0.45	0.20 - 0.50	0.80 - 1.20	4.75 - 5.50	0.30 max	1.10 - 1.75	...	0.80 - 1.20	...

(1) resultados obtenidos en la muestra, (2) composición según AISI [2].

Rugosidad.

Se obtuvieron las cuatro mediciones de rugosidad de cada probeta encontrándose muy similares en su valor de R_q , los resultados se muestran en la tabla 8.8. Los resultados obtenidos demuestran que las superficies fueron

preparadas con una rugosidad por debajo de $1 \mu\text{m}$, cumpliendo así con la norma ASTM G76 [37].

Tabla 8.8. Valores de rugosidad de las superficies del acero H13 a impactar.

Probeta lectura.	Valor Rq
R-20°-1-I	0.12
R-40°-1-I	0.21
R-75°-1-I	0.24
R-90°-1-I	0.56
30 HRC 20°-1-I	0.56
30 HRC 40°-1-I	0.25
30 HRC 75°-1-I	0.45
30 HRC 90°-1-I	0.26
40 HRC 20°-1-I	0.27
40 HRC 40°-1-I	0.19
40 HRC 75°-1-I	0.47
40 HRC 90°-1-I	0.40
55 HRC 20°-1-I	0.96
55 HRC 40°-1-I	0.69
55 HRC 75°-1-I	0.58
55 HRC 90°-1-I	0.68

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

8.5.3 Resultado de la evaluación de las condiciones de impacto.

Pruebas de alimentación de la partícula.

Los resultados de la alimentación de la partícula fueron similares en ambas pruebas. La figura 8.18 muestra los resultados para la prueba de 1950 g.

Se observa que la alimentación de las partículas de arena se mantuvo casi constante a lo largo de la prueba ($148.69 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ promedio, $2.478 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$), y una desviación estándar poblacional $\sigma = 2.5679$.

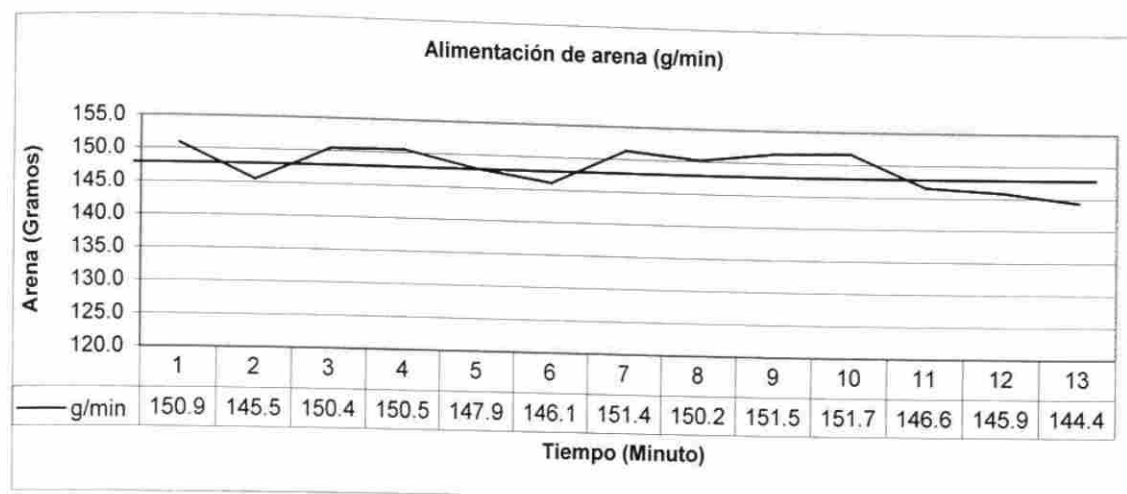


Fig. 8.18 Alimentación de la partícula.
Prueba realizada para descarga de 1950 g de arena sílica.

8.5.4 Resultados del desgaste erosivo en el acero grado herramienta H13.

La comparación de las masas iniciales y finales así como su diferencia y los valores de erosión para cada una de las probetas se presentan en la tabla 8.9.

Tabla 8.9 Resultados de pérdida en masa en acero H13.

Código Probeta	Condición	Ángulo Impacto (°)	Peso inicial (pi)	Peso final (pf)	Pérdida (pi-pf)	Erosión (g/g)
1.-R0	recocida	90	195.6288	195.4717	0.1571	1.571E-04
1.-30	30	90	191.5801	191.4447	0.1354	1.354E-04
1.-40	40	90	192.3626	192.2095	0.1531	1.531E-04
1.-55	55	90	193.2907	193.0371	0.2536	2.536E-04
2.-R0	recocida	75	195.9960	195.8326	0.1634	1.634E-04
2.-30	30	75	194.5540	194.3802	0.1738	1.738E-04
2.-40	40	75	191.0706	190.8496	0.2210	2.210E-04
2.-55	55	75	193.4587	193.1628	0.2959	2.959E-04
3.-R0	recocida	40	193.9188	193.6120	0.3068	3.068E-04
3.-30	30	40	193.6205	193.3175	0.3030	3.030E-04
3.-40	40	40	192.8880	192.5660	0.3220	3.220E-04
3.-55	55	40	192.5915	192.2303	0.3612	3.612E-04
4.-R0	recocida	20	192.4814	192.2006	0.2808	2.808E-04
4.-30	30	20	195.2237	194.9388	0.2849	2.849E-04
4.-40	40	20	188.4097	188.1369	0.2728	2.728E-04
4.-55	55	20	192.4390	192.1923	0.2467	2.467E-04

Los resultados de erosión (g/g) de acuerdo a la ecuación 4.7.

Probetas erosionadas.

El área de las huellas para cada una de las condiciones se encontró muy similar para el mismo ángulo de impacto, independientemente de la dureza de la muestra, ver figura 8.19. Esto demuestra que el chorro de mezcla aire-partícula fue una condición controlada dentro del sistema.

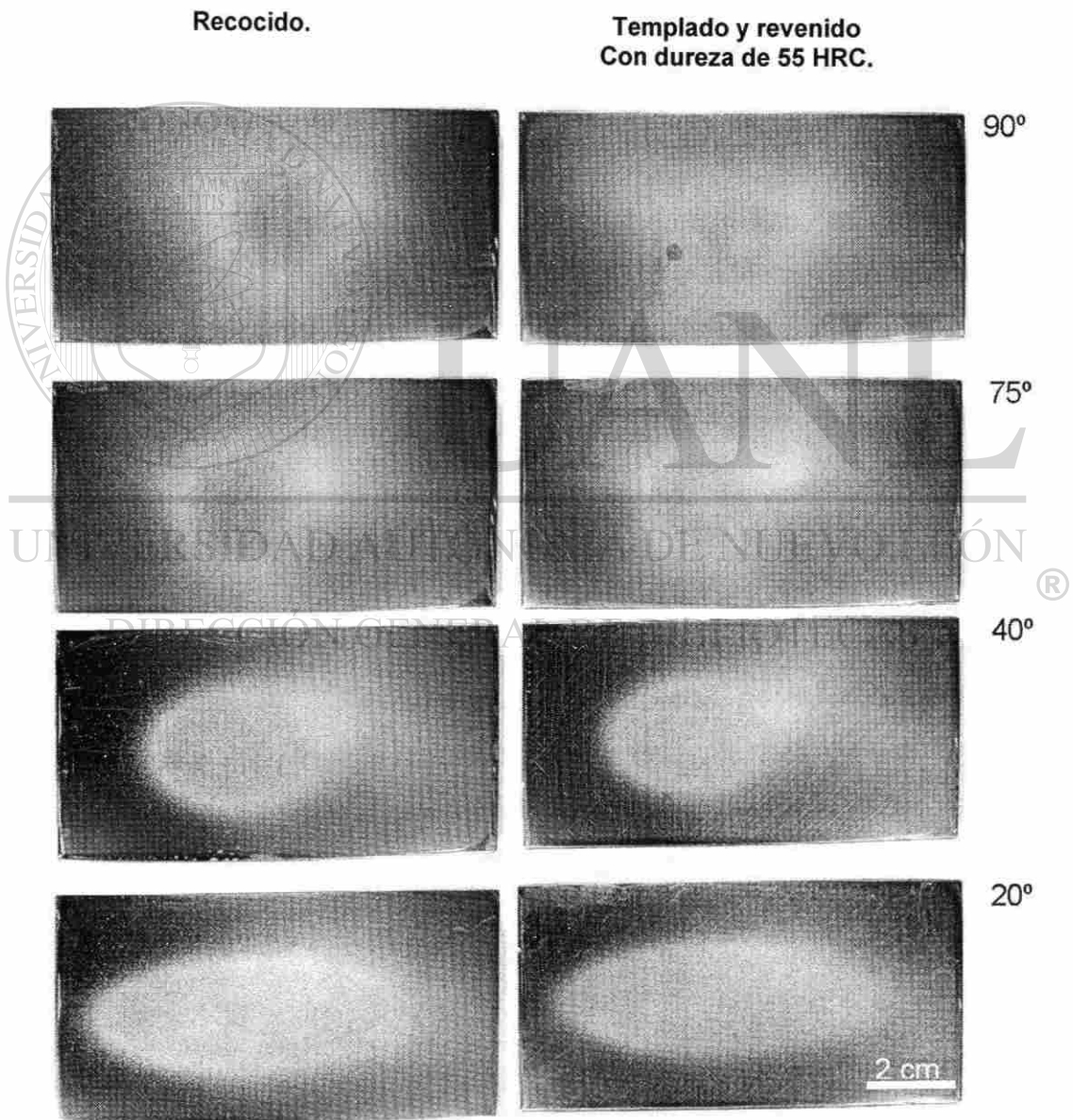


Fig. 8.19 Huellas de erosión en acero H-13.
La dirección de impacto fue de izquierda a derecha a excepción del ángulo de 90°

Se obtuvieron las dimensiones de las huellas ocasionadas por el impacto de partículas en las superficies, tabla 8.10 :

Tabla 8.10. Valores cuantitativos de las huellas acero H-13 recocido.

Ángulo de impacto	Área (mm ²)	Perímetro (mm)	Diámetros (mm)	
			x	y
90	707	94	30,0	30,0
75	712	95	28,4	31,7
40	798	104	25,9	39,0
20	1329	156	25,0	69,0

Las huellas obtenidas producto de la erosión fueron realizadas dentro de los límites que marco la dimensión de la probeta, lo que demuestra que toda la masa de partículas erosivas utilizada impactó la superficie de la probeta. Debido a esta consideración los valores de erosión obtenidos fueron calculados a partir de la ecuación 4.7.

Estudio del diámetro interno de boquilla.

El incremento en el diámetro de boquilla durante los ensayos no sobrepasó del 7 % (figura 8.20) de su dimensión inicial. Pruebas posteriores permitieron determinar una vida útil de boquilla de 25 ensayos bajo las condiciones operativas en las que se realizaron estas pruebas.

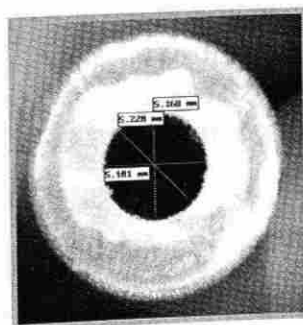


Fig 8.20. Inspección del diámetro de la boquilla.

Gráficos de erosión.

El desgaste erosivo obtenido, es graficado en las figuras 8.21 y 8.22, con respecto al ángulo de impacto y con respecto a la dureza del acero respectivamente.

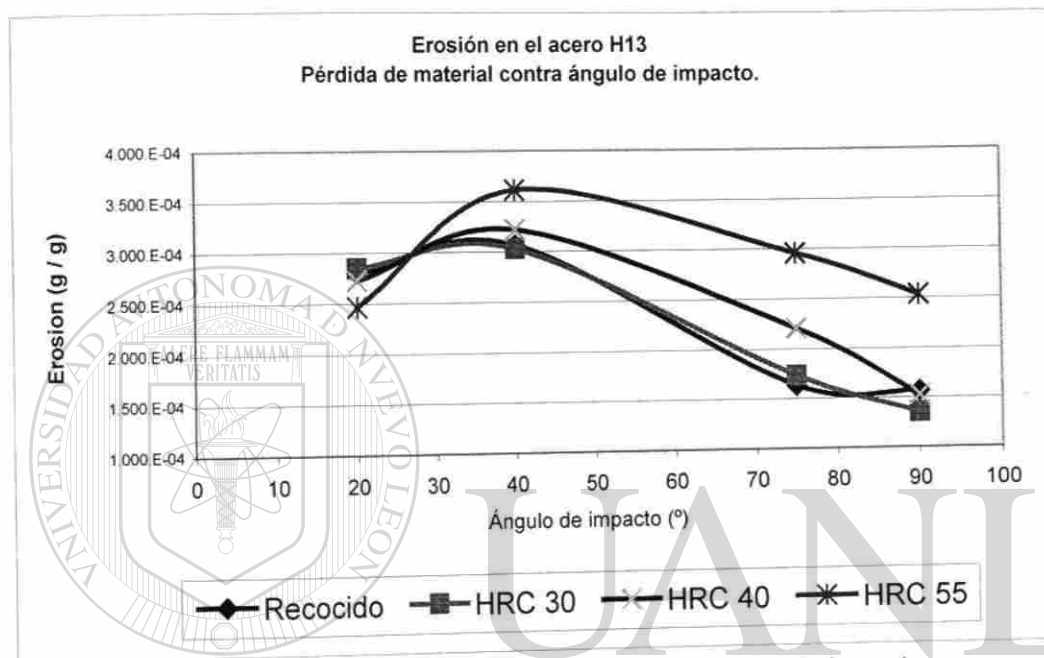


Fig.8.21 Desgaste erosivo con respecto al ángulo de impacto.

El comportamiento de los aceros bajo las condiciones ensayadas presentaron el mecanismo de erosión dúctil, debido a que el máximo valor de desgaste en todas las condiciones ensayadas se encontró en ángulos de impacto de 40° (ángulos bajos) por lo que se infiere que se presentó un desprendimiento de material con los mecanismos de desgaste propuestos por Finnie en la figura 4.11 de la sección 4.3.2 [24].

El desgaste erosivo en las probetas a ángulos de impacto de 90 y 75° (ángulos altos) en condición de recocido, templado y revenido con durezas de 30 y 40 HRC fue menor. Esto se debe a que la ductilidad del material absorbe gran parte de la energía cinética al indentar la superficie [12]. Además los ángulos de impacto a los que fueron erosionadas las probetas permitieron un menor desprendimiento en ellas debido a que en estos ángulos es muy difícil que

ocurran en un impacto único, requiriéndose impactos posteriores para el desprendimiento ulterior de la plaqueta, este mecanismo fue también revisado en la sección 4.3.2 figura 4.11 [24].

Para el caso de las probetas en condición de temple y revenido con dureza de 55 HRC se presentó un desgaste similar a 90° que al ángulo de 20° esto fue debido a que el comportamiento del mecanismo frágil presentado a el ángulo de 90° fue igual que el mecanismo de desprendimiento de material presentado al ángulo de 20° . Una tendencia muy similar fue encontrada por Guilden en aceros AISI 52100 en donde la transición dúctil-frágil se presentaba a medida que se incrementaba la dureza, ver figura 4.17 sección 4.6.1 [12].

Los ángulos de impacto de 40, 75 y 90° para las diferentes durezas mostraron una transición dúctil-frágil a medida que se incrementan los valores de dureza como es visto en la sección 4.5.1. Esto es debido a que al incrementar la dureza del material se reducen los niveles de tenacidad, por lo que el material empezará a comportarse con tendencia mas frágil [4.6.1].

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

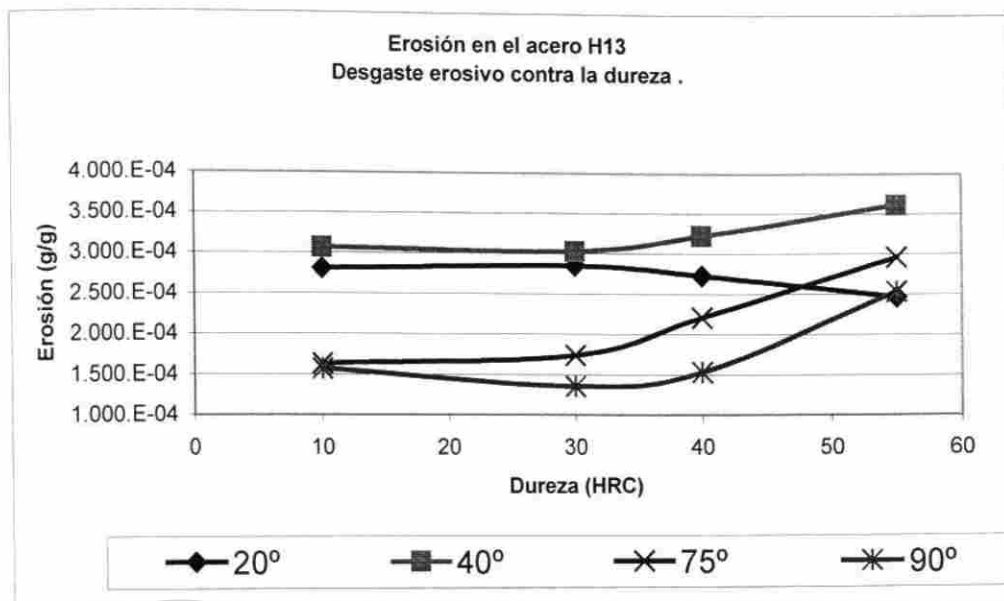


Fig 8.22 Desgaste erosivo con respecto a la dureza.

Las tendencias de los ángulos de impacto 40, 75, 90 demostraron que no existe un incremento en la resistencia a la erosión al incrementar la dureza del material H13 como ha sido discutido para otros materiales [12,18,24]. Al contrario, se observa un incremento en la erosión al incrementar la dureza, ver figura 8.22.

Se observó un incremento en la resistencia a la erosión para la tendencia del ángulo de impacto de 20° a medida que se incrementaba la dureza del material, esto es debido a la dificultad presentada por la partícula de realizar un arado o un microcorte en una superficie con una dureza cada vez más alta. El comportamiento del sistema de erosión realizado difiere de los resultados obtenidos en aceros grado herramienta y AISI 1045 empleados en el sistema de erosión analizado por Finnie, sección 4.4.5 figura 4.14 [12].

El ángulo de impacto de 40° fue el que presentó mayor desgaste para cada una de las durezas del material ensayadas. Esto fue debido al gran desprendimiento de material causado por este ángulo de impacto de las partículas de arena sílica, figura 4.11 [24].

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Diseño del equipo.

Con respecto al diseño del equipo se concluye:

- Se obtuvo un sistema de pruebas tribológicas del tipo erosión en seco, capaz de reproducir la erosión real encontrada en sistemas industriales.
- La elaboración de la máquina prototipo permitió facilitar el desarrollo del equipo final de pruebas.
- El equipo diseñado y construido en el presente estudio se aproximó a las condiciones del proceso de moldeo de caja fría utilizadas en la compañía Nemak. Esto debido a que las variables principales del proceso fueron reproducidas en la experimentación de erosión del acero H13. De esta manera se considera que los resultados obtenidos son aplicables en el diseño de las cajas de corazones.

- La versatilidad del equipo obtenido permite el tener una gran variedad de condiciones experimentales tales como presiones, ángulos de impacto, distancias de impacto, geometrías de boquilla, cargas de arena, alimentación de partículas, tipos de partículas, tipos de fluidos, materiales a impactar etc.; entre otras que puedan ser incorporadas.
- El desarrollo tecnológico realizado demuestra la capacidad para la autosuficiencia en el diseño y construcción de equipos de prueba, lo que permitirá a la Universidad Autónoma de Nuevo León continuar con líneas de investigación en desgaste erosivo en diferentes materiales metálicos, polímeros, cerámicos, y compuestos, conduciendo a resultados de alto valor científico y tecnológico.

8.2 Pruebas de erosión.

Con respecto a las pruebas de erosión, se concluye:

- La cantidad de desgaste presentada en el acero H13 por los mecanismos[®] de erosión es dependiente del ángulo de impacto y de la dureza del acero.
- Se obtuvieron las curvas de desgaste por erosión para las diferentes durezas, mostrando de manera general un comportamiento dúctil.
- Se observó un incremento en la cantidad de desgaste erosivo al incrementar la dureza del material para los ángulos de impacto 40, 75, y 90° .

- Se observó una menor cantidad de desgaste erosivo al incrementar la dureza del material para los ángulos de impacto de 20°.
- Bajas durezas (de hasta 30 HRC) y ángulos de impacto altos (75 y 90 °) produjeron en el material ensayado menor desgaste por erosión.
- Bajas durezas (de hasta 30HRC) y ángulos bajos (20 y 40 °) produjeron en el material mayor desgaste.
- Durezas altas (55 HRC) favorecen el desgaste por erosión en el material ensayado en ángulos mayores a 40°.

8.3 Recomendaciones.

- Del estudio realizado se recomienda para el diseño de cajas de corazones de acero H13 el emplear durezas bajas (inferiores a 30 HRC) y diseños de boquillas de soplo que inyecten la arena a ángulos de incidencia altos (mayores a 40°). Esto incrementará su vida útil.

- Se recomienda hacer estudios de la influencia de la velocidad de la partícula.
- Realizar un mayor número de pruebas a una cantidad mayor de ángulos de impacto y durezas del material en especial a durezas bajas (10 a 30 HRC)
- Obtener la velocidad de la partícula por el método de doble disco o por alguno de los métodos que recomienda la ASTM G76 [37].

Referencias Bibliográficas.

- [1] Acero al día Sidetur Publicación mensual de la Gerencia de Mercadeo No.47 Año 5. Marzo 2001.
- [2] ASM Handbook Volumen 1.10th Edition. Alloys.Wrought Tool Steel. ASM International Materials Park Ohio (1990) pp.757, 758,762, 763 770, 772, 773, 774, 777
- [3] Avner, S. H. Introducción a la Metalurgia Física. 2^{da} Ed, Mc.Graw Hill, 1988, pp 252, 384, 389, 390,392, 393
- [4] ASM "Heat Treater's Guide", Heat Treatment of Steel. Metals Park Ohio (1982) pp.17,20,21
- [5] ASM "Heat Treater's Guide", Hot Work Tool Steels (H Series). Metals Park Ohio (1982) pp.336, 337
- [6] ASM Handbook Volumen 1.10th Edition. Ultrahigh Strength Steels. ASM International Materials Park Ohio (1990) pp. 442, 443
- [7] Pérez Unzueta Alberto. Tesis Doctoral. Wear Resistance of Pearlitic Rail Steels. University of Leicester, UK (1993). pp. 6.2, 6.11
- [8] Pérez Unzueta, Alberto. Notas del curso Tribología U.A.N.L. F.I.M.E. Febrero 2003
-
- [9] Fundamentals of Tribology.The Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts. (1978) Edited by N.P. Suh and N. Saka p 1
- [10] Suh and Saka. Bhushan, Bharat and Gupta, B.K. Handbook of tribology. Materials, Coatings, and Surface Treatments. pp. 2.1, 2.10,2.13,2.16,2.17,2.19,2.20,2.29,
- [11] Deutsche Normen. DIN 50 320. Wear; Terms, Systematic Analysis of Wear Procesess, Classification of Wear Phenomena, 1979.
- [12] Hutchings I.M. Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials.Edward Arnold U.K. 1st Edition. (1992) pp. 133,134, 135, 150-152, 171-173, 175-177,182-186, 194.
- [13] ASM Handbook Volumen 18.Wear.ASM International Materials Park Ohio 1990 10th Edition. pp. 199,223,234,271,276
- [14] Rabinowicz, Ernest. Friction and Wear of Materials. Wiley Interscience. Second edition pp. 126,127,128

- [15] Medicina deportiva en el ultrafondo.
<http://www.webpersonal.net/ultramaraton/medical/pronacion.html>
- [16] ASM Handbook Volumen 18. Systematic Diagnosis of Friction and Wear Test Data ASM International Materials Park Ohio 1990 10th Edition. p. 480
- [17] Centro de Innovación Tecnológica de Automoción de Navarra España
<http://www.citean.com/cas/index.htm>
- [18] Levy, Alan V. Solid particle erosion and erosion-corrosion of materials. ASM (1995). pp. 1, 4, 11, 66, 67.
- [19] Slikkerveer, P.J., Bouten, P.C.P., Veld. F.H. Erosion and damage by sharp particles. WEAR. Elsevier (1998) p. 237
- [20] Verspui, M.A., Slikkerveer, P.J. Simulation model for the erosion of brittle materials. WEAR. Elsevier (1999) p. 446
- [21] Wensink, Henk. Elwenspoek, Miko C. A closer look at the ductile-brittle transition in solid particle erosion. WEAR. Elsevier (2002) pp. 1035, 1039.
- [22] Feng, A., Ball, A. The erosion of four materials using seven erodents-towards an understanding. WEAR. Elsevier (1999) pp. 676
- [23] Stachowiak, G. W. Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear. WEAR. Elsevier (2000) pp. 214-218
- [24] Finnie, Iain. Some reflections of the past and future of erosion. WEAR. Elsevier (1995) pp. 2, 4-8
- [25] Colas, R., Valtierra, S., Velasco, E. Castings Handbook of Aluminum Volume 1 Physical metallurgy and processes. Press 1993 pp. 614-616
- [26] Campbell, John. Castings. pp. 242, 243.
- [27] Handbook Core and Mold test, American Foundrymen's Society, Des Plaines, Illinois. (1963)
- [28] Manual de entrenamiento Proceso de corazones. Nematik 2003
- [29] González, R. Efecto de la temperatura sobre las propiedades físicas de moldes y corazones producidos por el proceso fenol-uretano en caja fría. Universidad Autónoma de Nuevo León, 2001 pp. 17, 18, 44
- [30] El Proceso Ashland; Ashland Chemical, Reporte de Proceso (1999).

- [31] Buchhoz, A. Showman, R. Snider, D. Experiences with modeling the core blowing process.
http://www.ashchem.com/ascc/castings/arena_publications.asp
- [32] Williams, K. Walter, M. Process Modelling: Sand Core Blowing
http://www.ashchem.com/ascc/castings/arena_publications.asp pp1-20
- [33] Parr, Robert. Principles of Mechanical Design 1970. pp. 1, 10-28
- [34] Pérez Unzueta, Alberto. Notas del curso Materiales para Diseño. Diciembre 2003.
- [35] Ashby, M. F. Materials Selection in Mechanical Design. pp. 5-8
- [36] Shigley, Joseph. Diseño en Ingeniería Mecánica.
- [37] Standard Practice for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. pp 305,306.
- [38] Stevenson, A.; Hutchings, I. The influence of nozzle length on the divergence of the erodent particle stream in a gas-blast erosion rig. Elsevier Wear 189 (1995) 66-69 pp 66-69
- [39] Oka, Y.I.; Nishimura M.; Nagahashi K.; Matsumura M. Control and evaluation of particle impact conditions in a sand erosion test facility. Elsevier Wear 250 (2001) 736-743 pp 737-740
-
- [40] Stevenson, A.; Hutchings, I. Scaling laws for particle velocity in the gas-blast erosion test. Elsevier Wear 181-183 (1995) 56-62 pp 56-58

Lista de Figuras

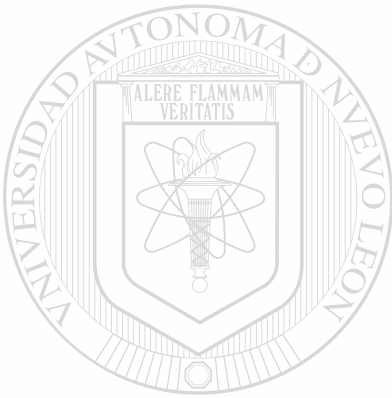
Figura	Descripción	Página
2.1	Diagramas comparativos.	8
2.2	Templabilidad con respecto al diámetro de la probeta.	11
2.3	Dureza en función de la temperatura de revenido.	17
3.1	Tipos de Abrasión.	22
3.2	Desgaste adhesivo.	23
3.3	Desgaste corrosivo.	24
3.4	Erosión por lodos.	25
3.5	Desgaste por fatiga.	26
3.6	Desgaste por fretting.	27
3.7	Desgaste Oxidativo.	28
3.8	Aplicación útil del desgaste.	28
3.9	Diagnostico de desgaste.	29
3.10	Categorías de pruebas tribológicas.	30
3.11	Mapa del recorrido para pruebas de campo.	31
3.12	Bancos de pruebas.	32
4.1	Áreas donde se presenta la erosión.	34
4.2	Fuerzas de contacto partícula-superficie.	35
4.3	Desgaste para la relación de dureza partícula-superficie.	36
4.4	Contacto entre partícula bajo carga normal y una superficie plana.	37
4.5	Partículas erosivas.	38

4.6	Superficies de acero AISI 1020 erosionado.	39
4.7	SPQ "Spike-Parameter-Quadratic fit".	40
4.8	Desgaste en función del tamaño de la partícula.	41
4.9	Penetración de una partícula rígida sobre una superficie plana.	42
4.10	Erosión con respecto al ángulo de impacto.	45
4.11	Mecanismos dúctiles con respecto al ángulo de impacto.	45
4.12	Daño causado en materiales dúctiles.	46
4.13	Influencia del ángulo de impacto.	48
4.14	Resistencia de la erosión contra dureza del material.	49
4.15	Secuencia del mecanismo por fractura frágil.	51
4.16	Erosión en materiales frágiles.	52
4.17	Transición dúctil-frágil en acero AISI 52100	54
4.18	Transición dúctil-frágil.	55
<hr/>		
5.1	Rutas de moldeo.	57
5.2	Variedad de formas y tamaños en corazones.	57 [®]
5.3	Clasificación AFS de la forma de la partícula.	59
5.4	Equipo de pruebas para granulometría.	60
5.5	Etapas en el proceso de llenado en caja de corazones.	63
5.6	Desgaste en herramental.	65
5.7	Velocidad de partícula en caja de corazones.	67
5.8	Corazón (chaqueta de agua "783").	68
5.9	Ubicación de los transductores.	68
5.10	Presiones del sistema con respecto al tiempo.	68

5.11	Posición de los vientos inferiores.	69
5.12	Niveles de llenado del corazón 0.25 s.	70
6.1	Sistema de ensamble-componentes.	74
6.2	Equipos de prueba de erosión.	79
6.3	Influencia de la longitud de la boquilla en la velocidad de la partícula.	80
6.4	Topografía de las superficies erosionadas.	82
6.5	Configuración de montaje a diferentes ángulos.	83
6.6	Efecto de la velocidad en la dispersión de las partículas.	83
6.7	Diagramas esquemáticos del método doble disco.	84
7.1	Boquillas de sopro en máquina sopladora.	86
7.2	Diseño de prototipo para la etapa de exploración.	88
7.3	Máquina prototipo etapa 1 Exploración.	89
7.4	Máquina prototipo etapa 2.	91
7.5	Máquina prototipo en pruebas etapa 2.	91
7.6	Tratamientos térmicos en acero grado herramienta H-13.	93
7.7	Tratamientos térmicos en acero grado herramienta 4140 y 9840.	94
7.8	Probetas pulidas acabado espejo.	95
7.9	Subsistema de cámaras.	97
7.10	Diseño de boquillas.	98
7.11	Diseño del sistema portamuestras.	99
7.12	Esquema representativo de placa soporte.	100
7.13	Subsistema Cabina.	101
7.14	Subsistema velocidad.	103

7.15	Paso de una partícula por el orificio del disco superior.	104
7.16	Procedimiento para la obtención de la arena.	106
7.17	Arena utilizada para los ensayos.	106
7.18	Piezas pulidas utilizadas en la prueba de erosión.	108
7.19	Evaluación de la presión.	109
7.20	Ángulos de prueba utilizados en los ensayos.	109
7.21	Medición de la distancia de impacto.	109
8.1	Volumen de mezcla.	114
8.2	Erosión en placa de vidrio de 12 mm. Vista lateral.	115
8.3	Erosión en vidrio.	115
8.4	Dimensiones de huella obtenidas en vidrio.	116
8.5	Huellas en acero AISI 1018 para diferentes ángulos de impacto.	118
8.6	Representación de las huellas obtenidas en el acero AISI 1018	119
8.7	Probetas de acero grado herramienta después de la erosión.	121
8.8	Humedad en cámara de mezcla.	123
8.9	Sistema Máquina de Erosión.	124
8.10	Subsistema cámaras.	126
8.11	Componentes boquillas.	127
8.12	Subsistema portamuestra.	128
8.13	Subsistema cabina.	129
8.14	Subsistema velocidad.	131
8.15	Porcentajes encontrados de tamaño de partícula.	136

8.16	Factor de redondez de la arena utilizada.	137
8.17	Metalografías en acero grado herramienta H-13.	138
8.18	Alimentación de la partícula.	141
8.19	Huellas de erosión en acero H-13.	142
8.20	Inspección del diámetro de la boquilla.	143
8.21	Desgaste erosivo con respecto al ángulo de impacto.	144
8.22	Desgaste erosivo con respecto a la dureza.	146



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

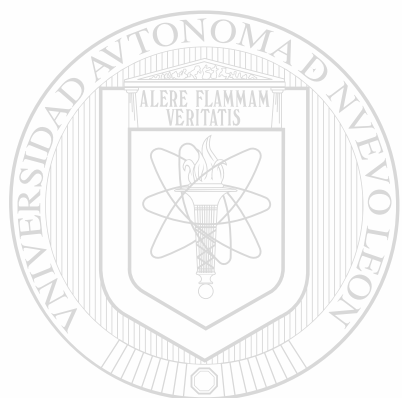


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Lista de Tablas

Tabla	Descripción	Página
2.1	Clasificación de los aceros herramienta.	7
2.2	Clasificación de la maquinabilidad para aceros grado herramienta.	10
2.3	Limites de composición química de aceros para trabajo en caliente al cromo.	12
2.4	Características de procesamiento y servicio en aceros grado herramienta grupo H base cromo.	13
2.5	Templado y Revenido en aceros grado herramienta grupo H base cromo.	14
2.6	Propiedades Mecánicas del acero grado herramienta H-13.	17
3.1	Clasificación de los fenómenos de desgaste.	21
4.1	Valores de dureza de partículas abrasivas, fases de hierro y aceros.	37
<hr/>		
5.1	Vida útil de cajas de corazones.	65
5.2	Presión del magazine a 0.25 s.	70
7.1	Diseño de experimentos en el acero H13.	112
8.1	Resultados de pérdida en masa de diferentes aceros grado herramienta.	120
8.2	Velocidad de los discos para una velocidad de partícula y ángulo entre huellas.	132
8.3	Tiempos de exposición del orificio del disco superior y necesario para el paso de las partículas.	133
8.4	Resultados de la granulometría en la arena. Prueba 1.	135
8.5	Resultados de la granulometría en la arena. Prueba 2.	135

8.6	Comparación de durezas reportadas por el proveedor contra durezas obtenidas.	139
8.7	Composición química del acero AISI H13.	139
8.8	Valores de rugosidad de las superficies del acero H13 impactar.	140
8.9	Resultados de pérdida en masa en acero H13.	141
8.10	Valores cuantitativos de las huellas acero H-13 Recocido.	143



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



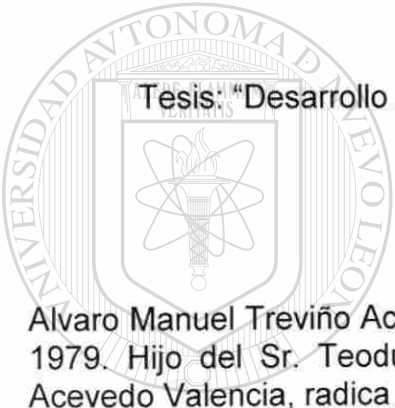
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Alvaro Manuel Treviño Acevedo

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

Tesis: "Desarrollo de una metodología para pruebas de erosión".



Alvaro Manuel Treviño Acevedo nació en Monterrey, Nuevo León el 3 de Marzo 1979. Hijo del Sr. Teodulo Javier Treviño Sáenz y de la Sra. Martha Elva Acevedo Valencia, radica en Monterrey, N.L.

Curso sus estudios profesionales en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, obteniendo el título de Ingeniero Mecánico Administrador durante el año 2001.

En Febrero del 2002 inicia sus estudios de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Especialidad en Materiales, becado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), dentro del Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales (PDIM) de esta misma facultad.

