

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION**

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FENOMENO DE  
EROSION SECA EMPLEANDO PARTICULAS ABRASIVAS DE  
SILICA SOBRE ACEROS HERRAMENTALES”**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN CIENCIAS**

**CON ESPECIALIDAD  
EN INGENIERIA MECANICA  
P R E S E N T A**

**CRUZ ALBERTO VALDEZ CAMARGO**

**DIRIGIDA POR:**

**DR. MANUEL VITE TORRES**

**DR. JUAN RODRIGO LAGUNA CAMACHO**



**MEXICO, D.F.**

**2010**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

SIP-14

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 11:00 horas del día 11 del mes de Junio del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E. S. I. M. E. para examinar la tesis de titulada:

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FENÓMENO DE EROSIÓN SECA EMPLEANDO  
PARTÍCULAS ABRASIVAS DE SÍLICA SOBRE ACEROS HERRAMIENTALES”.**

Presentada por el alumno:

**VALDEZ**

Apellido paterno

**CAMARGO**

Apellido materno

**CRUZ ALBERTO**

Nombre(s)

Con registro: 

A	9	4	0	5	3	4
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA MECÁNICA**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

DR. MANUEL VITE TORRES

Presidente

Segundo Vocal

DR. JOSÉ ÁNGEL LODEGARIO ORTEGA HERRERA  
Tercer Vocal

DR. JUAN RODRIGO LAGUNA CAMACHO  
Secretario

DR. EDGAR ERNESTO VERA CÁRDENAS

DR. SAMUEL ALCÁNTARA MONTES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCIA



## Agradecimientos

A la sección de estudios de posgrado e investigación de la E.S.I.M.E. – I.P.N., por la formación profesional que me ha brindado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo brindado que me ha brindado para la realización de mis estudios de posgrado.

A mi asesor de estudios:

Dr. José Ángel ortega Herrera, por su amistad incondicional, por su confianza y ayuda en mi formación profesional.

A mis directores de tesis:

Dr. Manuel Vite Torres, por sus consejos e importantes comentarios en la realización de este trabajo de tesis, por su gran ayuda.

Dr. Juan Rodrigo Laguna Camacho.

A los siguientes profesores:

Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón,

M.C. Jorge Ramos Watanave,

M.C. Sergio Alejandro Villanueva Pruneda.

Por formar parte de la comisión revisora, por los importantes comentarios en la mejora de este trabajo de tesis.

Dr. José Ángel Ortega Herrera.

Dr. Samuel Alcántara Montes.

Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas.

Dr. Valery Romanovich.

A la empresa Terramar, por sus facilidades en la elaboración del prototipo de este trabajo de tesis.

Al Instituto Tecnológico de Culiacán por sus facilidades y apoyo en la construcción del prototipo.

A todos los maestros de la Sección de estudios de posgrado, por haberme brindado su amistad y confianza además de haber colaborado en mi formación profesional.

A mis amigos:

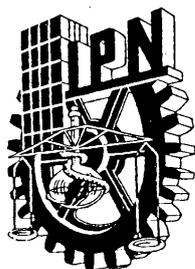
M.C. Ricardo Ernesto Domínguez Rodríguez, por su gran apoyo y orientación.

M.C. Constantino Anaya Hill, por su amistad y orientación.

A mi esposa, por siempre estarme recordándome del pendiente que tenía por concluir

A todos ellos,

Gracias



## **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

### **CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, D.F. el día 25 del mes Mayo del año 2010, el (la) que suscribe **Cruz Alberto Valdez Camargo** alumno (a) del Programa de Maestría con número de registro **A940534**, adscrito a Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de **Tesis bajo la dirección de: Dr. Manuel Vite Torres y Dr. Juan Rodrigo Laguna Camacho** y cede los derechos del trabajo intitulado **“ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FENOMENO DE EROSION SECA EMPLEANDO PARTICULAS ABRASIVAS DE SILICA SOBRE ACEROS HERRAMENTALES”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección [cruza\\_valdez@hotmail.com](mailto:cruza_valdez@hotmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Cruz Alberto Valdez Camargo

---

Nombre y firma

## INDICE GENERAL

Índice de figuras	12
Índice de tablas	17
Simbología	19
Resumen	21
Abstract	22
Justificación	23
Objetivos	24
General	24
Específico	24
Antecedentes	
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN</b>	<b>26</b>
1.1 Introducción	26
<b>CAPÍTULO II ACEROS GRADO HERRAMIENTA</b>	<b>29</b>
2.1 Clasificación	29
2.2 Selección y propiedades	30
2.3 Aceros para trabajo en caliente grupo H	34
2.4 Aceros para trabajo en caliente al cromo	34
2.5 Acero Grado Herramienta H13	36
2.6 Tratamientos térmicos del acero H-13	36

<b>CAPÍTULO III DESGASTE</b>	<b>40</b>
3.1 Mecanismos de desgaste	41
3.1.1 Desgaste Abrasivo	43
3.1.2 Desgaste Adhesivo	44
3.1.3 Desgaste Corrosivo	45
3.1.4 Desgaste Erosivo	46
3.1.5 Desgaste por fatiga	47
3.1.6 Desgaste por fretting	48
3.2 Aplicación útil del desgaste	49
3.3 Categorías y condiciones de pruebas tribológicas	51
3.3 Categorías y condiciones de pruebas tribológicas	51
<b>CAPÍTULO IV EROSIÓN</b>	<b>55</b>
4.1 Desgaste erosivo por partículas sólidas	56
4.2 Propiedades de la partícula	58
4.2.1 Dureza	58
4.2.2 Forma	60
4.2.3 Tamaño de la partícula	62
4.3 Desgaste erosivo por deformación plástica	63
4.3.1 Mecanismo	63
4.3.2 Ángulo de impacto	65

4.3.3 Daños causados en ángulos oblicuos	67
4.3.4 Forma de la partícula y ángulo de impacto	68
4.3.5 La dureza de la superficie	69
4.4 Desgaste erosivo por fractura frágil	69
4.4.1 Mecanismo	69
4.5 Transición dúctil-frágil	72
4.5.1 La dureza de la superficie	72
4.5.2 Energía Cinética	72
<b>CAPÍTULO V MOLDEO</b>	<b>74</b>
5.1 Moldeo de Arena	75
5.2 Control de la arena en el proceso de caja fría	76
5.2.1 Forma de la partícula	76
5.2.2 Granulometría GFN (Grain Fíneness Number)	77
5.2.3 Temperatura de la arena	78
5.2.4 Humedad de la arena	78
5.2.5 pH y Demanda de ácido	79
5.3 Proceso de Caja Fría	79
5.3.1 Etapa de soplado	80
5.3.1.1 Adherencia del corazón hacia la superficie del herramental	80
5.3.1.2 El desgaste erosivo en las cajas de corazones	81
5.4 Estudio de la velocidad de impacto en la caja de corazones	82

5.5 Estudio de las presiones en el sistema de caja fría	83
<b>CAPÍTULO VI FUNDAMENTOS DE DISEÑO</b>	<b>87</b>
6.1 Tipos de diseño	88
6.2 Sistemas Técnicos	88
6.3 Metodología para el diseño de maquinaria	89
6.4 Equipos de pruebas de erosión	91
6.5 Principales variables en el desarrollo del sistema por boquilla	93
6.5.1 Relación longitud – Diámetro boquilla	93
6.5.2 Rugosidad de la boquilla	94
6.5.3 Huellas y ángulo de impacto	95
6.5.4 La velocidad de la partícula	96
<b>CAPÍTULO VII METODOLOGIA DE DISEÑO Y EXPERIMENTACION</b>	<b>98</b>
7.1 Condiciones de prueba	98
7.2 Máquina Prototipo	98
7.2.1 Exploración	100
7.2.2 Ajuste de variables	101
7.3 Máquina de pruebas	106
7.3.1 Subsistema cámaras de erosión	106
7.3.2 Subsistema Sujeción	108
7.3.3 Subsistema cabina	110

7.3.4 Subsistema velocidad de la partícula	110
7.4 Metodología de las pruebas de erosión en el acero H13	113
7.4.1 Caracterización de la partícula erosiva	114
7.4.2 Caracterización del acero a ensayar	115
7.4.3 Evaluación del fluido y alimentación de la partícula	116
7.4.4 Pruebas en el acero grado herramienta H-13	118
<b>CAPÍTULO VIII RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>121</b>
8.1 Máquina Prototipo etapa exploración	121
8.2 Máquina Prototipo, etapa ajuste de variables	124
8.2.1 Selección de las dimensiones de probeta	127
8.2.2 Comportamiento del equipo prototipo etapa 2	128
8.3 Máquina de pruebas	129
8.3.1 Subsistema de erosión	130
8.3.2 Subsistema sujeción	132
8.3.3 Subsistema Cabina	133
8.3.4 Subsistema Velocidad (método doble disco)	134
8.4 Caracterización del sistema de erosión en el H13	138
8.4.1 Resultados de la caracterización de las partículas erosivas	138
8.4.2 Resultados de caracterización del material a impactar	140
8.4.3 Resultado de la evaluación de las condiciones de impacto	142
8.4.4 Resultados del desgaste erosivo en el acero a H13	143

<b>CAPÍTULO IX CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	148
9.1 Diseño del equipo	148
9.2 Pruebas de erosión	148
9.3 Recomendaciones	150
Referencias Bibliográficas	151
Anexos	154
Anexo A : Plano de conjunto	154

## INDICE DE FIGURAS

### Capítulo II

- Fig. 2.1 Diagramas comparativos.
- Fig. 2.2 Templabilidad con respecto al diámetro de la probeta.
- Fig. 2.3 Dureza en función de la temperatura de revenido.

### Capítulo III

- Fig. 3.1 Tipos de abrasión.
- Fig. 3.2 Desgaste Adhesivo.
- Fig. 3.3 Desgaste Corrosivo.
- Fig. 3.4 Erosión por Lodos.
- Fig. 3.5 Desgaste por Fatiga.
- Fig. 3.6 Desgaste por Fretting.
- Fig. 3.7 Aplicación útil del desgaste.
- Fig. 3.8 Diagnostico de desgaste
- Fig. 3.9 Categorías de pruebas tribológicas.
- Fig. 3.10 Mapa de recorrido para pruebas de campo.
- Fig. 3.11 Bancos de pruebas.

### Capítulo IV

- Fig. 4.1 Áreas donde se presenta la erosión.
- Fig. 4.2 Fuerzas de contacto Partículas-Superficie.
- Fig. 4.3 Desgaste para la relación de dureza Partícula ( $H_a$ ) - Superficie ( $H_s$ ).
- Fig. 4.4 Contacto entre una partícula carga normal y una superficie plana.

- Fig. 4.5 Partículas erosivas.
- Fig. 4.6 Superficies de acero AISI 1020 erosionado.
- Fig. 4.7 Desgaste en función del tamaño de la partícula.
- Fig. 4.8 Proceso de penetración de una partícula rígida sobre una superficie plana.
- Fig. 4.9 Erosión con respecto al ángulo de impacto.
- Fig. 4.10 Mecanismos dúctiles propuestos con respecto al ángulo de impacto.
- Fig. 4.11 Daño causado en materiales dúctiles.
- Fig. 4.12 Influencia del ángulo de impacto.
- Fig. 4.13 Resistencia a la erosión contra dureza del material.
- Fig. 4.14 Secuencia del mecanismo por fractura frágil.
- Fig. 4.15 Erosión en materiales frágiles.
- Fig. 4.16 Transición Dúctil-Frágil en acero AISI 52100.
- Fig. 4.17 Transición Dúctil-Frágil.

## **Capítulo V**

- Fig. 5.1 Rutas de moldeo.
- Fig. 5.2 Variedad de formas y tamaños en corazones.
- Fig. 5.3 Clasificación AFS de la forma de la partícula.
- Fig. 5.4 Equipo de pruebas para granulometría.
- Fig. 5.5 Etapas en el proceso de llenado de caja fría.
- Fig. 5.6 Desgaste en herramental.
- Fig. 5.7 Velocidad de partículas en cajas de corazones.

- Fig. 5.8 Corazón.
- Fig. 5.9 Ubicación de los transductores.
- Fig. 5.10 Comportamiento de las presiones del sistema con respecto al tiempo.
- Fig. 5.11 Posición de los vientos inferiores.
- Fig. 5.12 Niveles de llenado del corazón 0.25s.

## **Capítulo VI**

- Fig. 6.1 Sistema en Ensamble-Componentes.
- Fig. 6.2 Equipos de prueba de erosión.
- Fig. 6.3 Influencia de la longitud de la boquilla en la velocidad de la partícula.
- Fig. 6.4 Topografía de las superficies erosionadas a diversos ángulos de impacto.
- Fig. 6.5 Configuración de montaje a diferentes ángulos.
- Fig. 6.6 Efecto de la velocidad en la dispersión de las partículas.
- Fig. 6.7 Diagramas esquemáticos del método de doble disco.

## **Capítulo VII**

- Fig. 7.1 Boquillas de soplo en maquina sopladora.
- Fig. 7.2 Diseño de prototipo para la maquina de exploración.
- Fig. 7.3 Maquina prototipo etapa 1
- Fig. 7.4 Maquina prototipo etapa 2
- Fig. 7.5 Maquina prototipo en pruebas etapa 2
- Fig. 7.6 Tratamientos térmicos en aceros grado herramienta H13.

- Fig. 7.7 Tratamientos térmicos en aceros grado herramienta 4140 y 9840
- Fig. 7.8 Probetas pulidas acabado tipo espejo.
- Fig. 7.9 Subsistemas cámaras.
- Fig. 7.10 Diseño de boquillas.
- Fig. 7.11 Diseño del sistema porta muestras.
- Fig. 7.12 Esquema representativo de placa soporte.
- Fig. 7.13 Subsistema cabina.
- Fig. 7.14 Subsistema velocidad.
- Fig. 7.15 Representación del paso de una partícula por el orificio del disco superior.
- Fig. 7.16 Procedimiento para la obtención de arena.
- Fig. 7.17 Arena utilizada para los ensayos.
- Fig. 7.18 Piezas pulidas utilizadas en la prueba de erosión.
- Fig. 7.19 Evaluación de la presión.
- Fig. 7.20 Ángulos de prueba utilizados en los ensayos.
- Fig. 7.21 Medición de la distancia de impacto.

## **Capítulo VIII**

- Fig. 8.1 Volumen de mezcla
- Fig. 8.2 Erosión en placa de vidrio de 12 mm.
- Fig. 8.3 Erosión en vidrio.
- Fig. 8.4 Dimensiones de huella obtenidas en vidrio.
- Fig. 8.5 Huellas obtenidas en acero AISI 1018 para diferentes ángulos de impacto.

- Fig. 8.6 Representación esquemática de las huellas obtenidas en el acero AISI 1018
- Fig. 8.7 Probetas de acero grado herramienta después de la erosión.
- Fig. 8.8 Humedad en cámara de muestra.
- Fig. 8.9 Sistema maquina de erosión.
- Fig. 8.10 Subsistema de erosión.
- Fig. 8.11 Componentes boquillas.
- Fig. 8.12 Subsistema porta muestras.
- Fig. 8.13 Subsistema cabina.
- Fig. 8.14 Subsistema velocidad.
- Fig. 8.15 Comparación de los porcentajes encontrados de cada tamaño de partícula en las pruebas granulométricas.
- Fig. 8.16 Factor de redondez de la arena utilizada.
- Fig. 8.17 Metalografías en acero grado herramienta H13
- Fig. 8.18 Alimentación de la partícula.
- Fig. 8.19 Huellas de erosión en acero H13
- Fig. 8.20 Inspección del diámetro de boquilla.
- Fig. 8.21 Desgaste erosivo con respecto al ángulo de impacto.
- Fig. 8.22 Desgaste erosivo con respecto a la dureza.

## INDICE DE TABLAS

### Capítulo II

- Tabla 2.1 Clasificación de los aceros herramienta.
- Tabla 2.2 Clasificación de maquinabilidad para aceros grado herramienta.
- Tabla 2.3 Límites de composición química de aceros para trabajo en caliente al cromo.
- Tabla 2.4 Características de procesamiento y servicio en aceros grado herramienta grupo H base cromo.
- Tabla 2.5 Templado y revenido en aceros grado herramienta grupo H base cromo.
- Tabla 2.6 Propiedades mecánicas del acero grado herramienta H13.

### Capítulo III

- Tabla 3.1 Clasificación de los fenómenos de desgaste

### Capítulo IV

- Tabla 4.1 Valores de dureza de partículas abrasivas, fases de hierro y acero.

### Capítulo V

- Tabla 5.1 Vida útil de caja de corazones.
- Tabla 5.2 Presión de magazine 0.25s.

### Capítulo VII

- Tabla 7.1 Diseño de experimentos.

### Capítulo VIII

- Tabla 8.1 Resultados de pérdidas en masa de diferentes aceros grado herramienta.

- Tabla 8.2 Velocidad de los discos para una velocidad de partícula y ángulo entre huellas.
- Tabla 8.3 Tiempos de exposición del orificio del disco superior, y necesario para el paso de las partículas.
- Tabla 8.4 Resultados de la granulometría en la arena prueba 1.
- Tabla 8.5 Resultados de la granulometría en la arena prueba 2.
- Tabla 8.6 Comparación de dureza proveedor contra dureza obtenida.
- Tabla 8.7 Composición química del acero AISI H13
- Tabla 8.8 Valores de rugosidad de las superficies del material a impactar.
- Tabla 8.9 Resultados de pérdida en masa en acero H13
- Tabla 8.10 Valores cuantitativos de la huellas acero H13 Recocido.

## Simbología

A	Área de contacto
F	Fuerza
P	Presión de contacto
$F_N$	Fuerza normal
$F_T$	Fuerza tangencial
$H_a$	Relación de la dureza de la partícula.
$H_s$	Dureza de la superficie a impactar.
$\mu\text{m}$	Micras
H	Dureza
m	Masa
U	Velocidad
t	Tiempo
x	Variable de distancia
$\pi$	3.1416
$A(x)$	Área de contacto
d	Distancia
V	Volumen
$\rho$	Densidad
$\kappa$	Factor que representa la fracción de material removido
E	Erosión real
D	Zona deformada
M	Grieta radial
L	Grieta lateral
r	Tamaño de la partícula
$K_c$	Tenacidad del material

- $\alpha$       Constante de proporcionalidad
- $\sigma$       Densidad de la partícula Erosiva

## Resumen

El presente trabajo muestra el desarrollo de una máquina, empleada para realizar pruebas de erosión en diferentes materiales metálicos con la finalidad de obtener patrones de comportamiento controlados y simular procesos industriales. Para llevar a cabo la prueba se emplea como partícula abrasiva a la arena sílica, impactándose a ángulos de 20°, 40°, 75°, 90°. En la realización de estas pruebas fue necesario el control de la presión de aire, distancias de impacto, geometría de las boquillas, el flujo de arena, etc.

Para el desarrollo de este trabajo fue necesario diseñar y fabricar una maquina erosionador para realizar ensayos respectivos bajo condiciones de laboratorio. . Como principio para la elaboración de la metodología de desgaste erosivo seco, se realizaron varias pruebas preliminares sobre el comportamiento de algunos componentes de la máquina, así como establecer algunas restricciones dimensionales de los especímenes sometidos a desgaste.

También fue necesaria la selección de la morfología de la arena, para lograr la uniformidad de las pruebas. Una vez que se tuvieron todos los parámetros analizados y definidos se procedió a la realización de las pruebas logrando los resultados que se mencionan al final del trabajo.

## ABSTRACT

This work will consist in developing a machine for testing of erosion in different materials in order to obtain controlled behavior patterns and simulate industrial processes. Erosive particles were used as silica sand used in the manufacture of cores, hitting angles of 20 °, 40 °, 75 °, 90 °. This paper does not cover the use of another type of particle erosive or materials to erode.

Pressures were controlled, the impact distances, nozzle geometries, loads of sand, etc. The methodology used in this research is the following. raise the issue, which is part of an industrial process.

To do this will result in the design and construction of a machine for tribological tests under laboratory conditions. As a principle to the development of tribological test methodology, that in order to perform some preliminary tests on the behavior of some components of the machine, together with certain dimensional restrictions of the samples.

## **Justificación**

El desgaste de elementos mecánicos y de componentes de ingeniería representa un costo muy alto en el proceso de producción. En esta región son utilizadas las bandas transportadoras para el manejo de productos agrícolas, así como los implementos para la agricultura, los equipos utilizados en la criba de materiales de construcción entre otras aplicaciones. Todos estos equipos, así como algunos otros que están involucrados a procesos de transformación o beneficio de la materia prima, están sujetos a procesos de desgaste muy severos que al final conducirá a fracturas y a la sustitución prematura de piezas.

Es por eso que surge la necesidad de poder contar con un equipo que represente las condiciones de operación de los elementos mecánicos anteriores lo cual permitirá analizar y caracterizar la naturaleza del contacto de los materiales, para determinar la causa del desgaste de tal manera que las superficies se puedan hacer más resistentes, utilizar algún tipo de recubrimiento que permita reducir la pérdida de masa o si es necesario sugerir cambios en el diseño ingenieril.

## **Objetivo General**

El objetivo fundamental de este trabajo es diseñar, fabricar, instrumentar y poner en operación una máquina tribológica que sea capaz de realizar pruebas de desgaste erosivo en diferentes materiales.

## **Objetivo Especifico**

Contar con un equipo de laboratorio para poder medir el comportamiento de las diferentes propiedades de los materiales sometidos a erosión por partículas solidas.

Poder brindar un mejor servicio a los empresarios de la localidad, y de esta forma poder lograr la vinculación con el sector productivo.

## **ANTECEDENTES**

Los antecedentes de este proyecto son nulos debido a que en la localidad no se le ha dado la importancia correspondiente al fenómeno de desgaste, los agricultores y empresarios no realizan análisis y mucho menos investigación científica para mejorar el rendimiento de su maquinaria y equipo, se han dedicado exclusivamente a producir y reemplazar componentes, sin darse cuenta del gran error que están cometiendo y el elevado costo de producción que tienen.

Analizando las condiciones anteriormente mencionadas, se realizó la investigación documental del porque esa falta de interés, lo cual llevo a la conclusión de un desconocimiento de los fenómenos de desgaste y su comportamiento así como la forma en que podían contrarrestarlo para lograr un mayor rendimiento de la maquinaria y equipo a un costo mas reducido.

Por el lado científico se encontró que los equipos existentes para la realización de pruebas de desgaste eran muy costosas y complejas para las aplicaciones locales, como se menciona en el punto 6.4 del presente trabajo.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

El 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 cualquier componente o elemento mecánico. El desgaste erosivo de estas cajas puede ocasionar que los corazones producidos presenten defectos dimensionales que posteriormente afecten el ensamble de equipos.

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 herramental 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 los elementos mecánicos tengan espesores de pared más delgadas, llegando al extremo de estar fuera de especificación y poniendo en peligro la integridad de la pieza durante su operación.

El sector industrial, 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.

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.

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 desarrolló 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 el comportamiento de 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.

# CAPÍTULO II

## 2. ACEROS GRADO HERRAMIENTA.

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 más severo y un mayor control dimensional [2].

La adición de elementos aleantes proporciona a los aceros propiedades específicas, lo que permite contar con diferentes tipos de aplicaciones en donde se le 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, expuestos a cargas muy grandes y al ablandamiento a altas temperaturas. La mayoría de ellos son primeramente formados o maquinados para darles la forma, después son tratados térmicamente y finalmente maquinados a su dimensión final.

## 2.1 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.

Tabla 2.1 Clasificación de los aceros herramienta.

<b>Grupo</b>	<b>S</b>	<b>Tipo</b>
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

## 2.2 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: Propiedades mecánicas, productividad, mantenimiento, facilidad de elaboración y costo por pieza unitaria hecha por la herramienta [3].

La mayoría de los aceros herramientas deben cumplir con ciertos requerimientos como son dureza, tenacidad, maquinabilidad y resistencia al

desgaste [3]. 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[2].

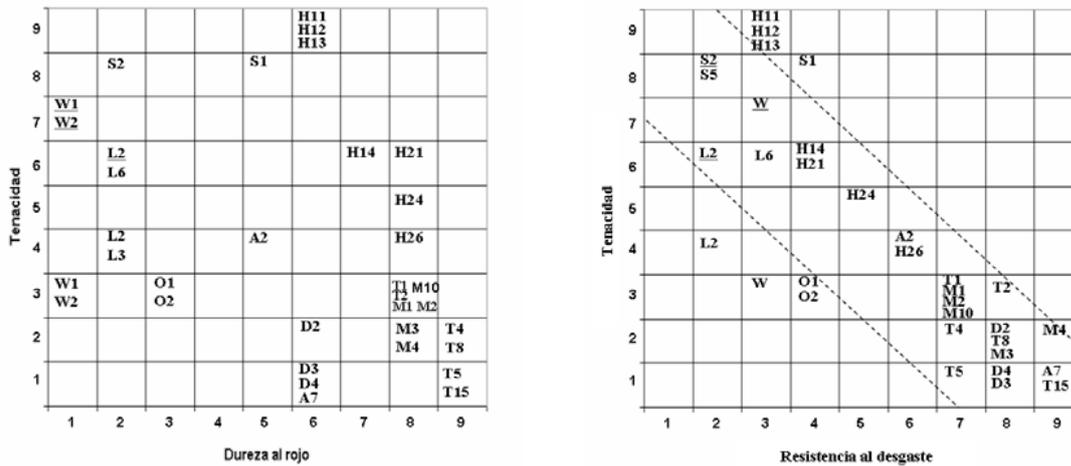


Fig. 2.1 Diagramas comparativos [2].  
Tenacidad contra (a) Dureza al rojo, (b) resistencia al desgaste.

Las gráficas muestran los valores de las diferentes propiedades en los intervalos 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 respuesta 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 se pueden 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. La principal característica 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 %, 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.

<b>Aceros Grado herramienta</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Maquinabilidad %</b>
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].

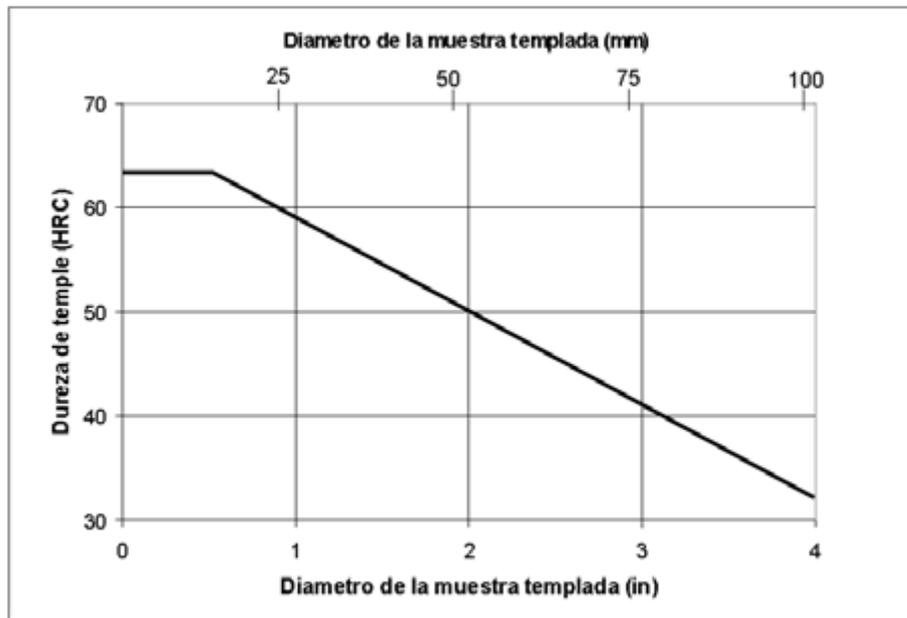


Fig. 2.2 Templabilidad con respecto al diámetro de la probeta [4].  
Efecto del tamaño de sección en la dureza superficial de un acero al 0.54% C.

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].

### 2.3 Aceros para trabajo en caliente grupo H.

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].

### 2.4 Aceros para trabajo en caliente al cromo.

Los aceros para trabajo en caliente al cromo cuentan con adecuada 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.

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.

AISI	Dureza y Templado					Fabricación y Servicio			
	Resistencia a la Decarburización	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].

## **2.5 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 se pueden 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].

## **2.6 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”* [4].

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 templado 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.

Tabla 2.5 Templado y Revenido en aceros grado herramienta grupo H base cromo.

Tipo	Templado			Medio de Templado (a)	Temperatura Revenido °C
	Pre calentamiento °C	Temperatura Templado °C	Tiempo (min.) a la Temperatura		
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<sup>0</sup> 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 [4].

#### *Relevado de Esfuerzos.*

Calentar la pieza entre 650<sup>0</sup> 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. Su objetivo 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<sup>0</sup> - 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 [4].

### *Estabilizado*

En este tratamiento la pieza es llevada a una temperatura de 150<sup>0</sup> a 160 °C para posteriormente enfriarlo a valores de -100<sup>0</sup> a -195 ° C. El revenido deberá ser efectuado inmediatamente después de que las piezas alcancen la temperatura ambiente [4].

### *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 [4].

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 [4].

Tabla 2.6 Propiedades Mecánicas del acero grado herramienta H13.

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) su dureza disminuye abruptamente [4].

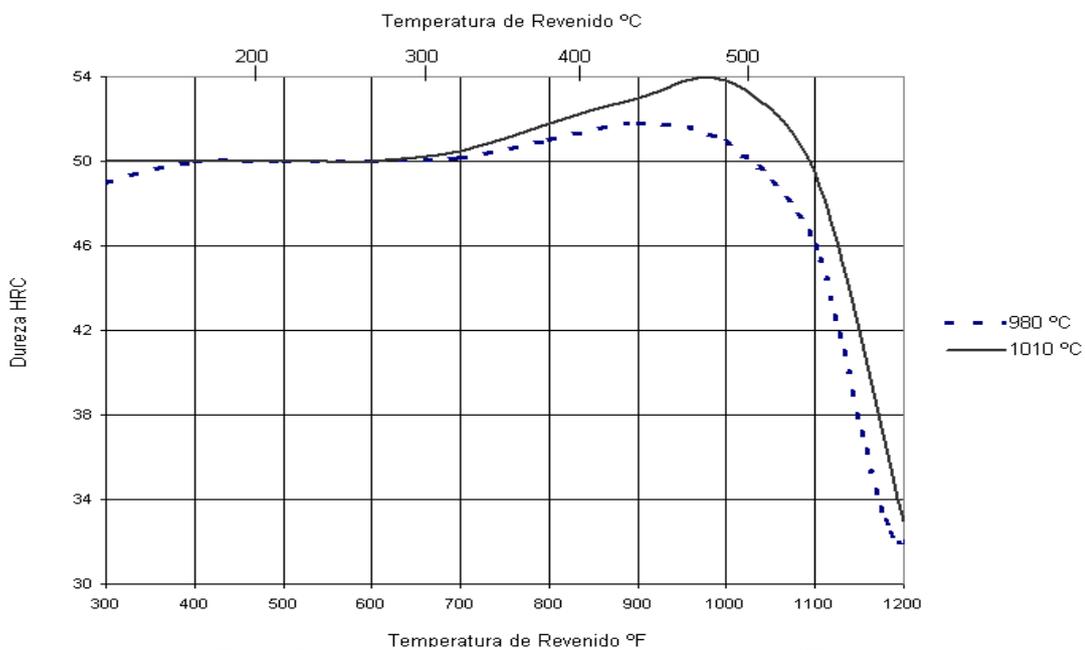


Fig. 2.3 Dureza en función de la temperatura de revenido [5].

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 III

## 3. DESGASTE

La palabra tribología se deriva del griego Τριβος, o tribos, que significa frotar, deslizar o tallar. La definición introducida por el profesor Peter Sost 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. Se puede 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 proporcionado en el *Handbook of wear* [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.

### **3.1 Mecanismos de desgaste.**

El desgaste puede ser definido como el proceso mediante la pérdida de material de una o de ambas superficies, que se encuentran en contacto, 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, se puede 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.

Tabla 3.1 Clasificación de los fenómenos de desgaste.  
Desgaste de acuerdo al tipo de acción tribológica.

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		—			x	x
Solid -Solid (with solid friction, boundary, lubrication, mixed lubrication)		Sliding wear	x	x	x	x
		Rolling wear	x	x	x	x
		Impact wear	x	x	x	x
		Fretting wear	x	x	x	x
Solid -Solid and particles		Sliding abrasion		x		
		Sliding abrasion (three body abrasion)		x		
		Rolling abrasion (three body abrasion)		x		
Solid -fluid with particles		Particle erosion (erosion wear)		x	x	x
Solid -Gas with particles		Fluid erosion (erosion wear)		x	x	x
		Impact wear particle		x	x	x
Solid - fluid		Material, cavitation, cavitation erosion			x	x
		Drop erosion			x	x

### 3.1.1 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 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 primero de ellos 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. Mientras que el otro, el 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 [11].

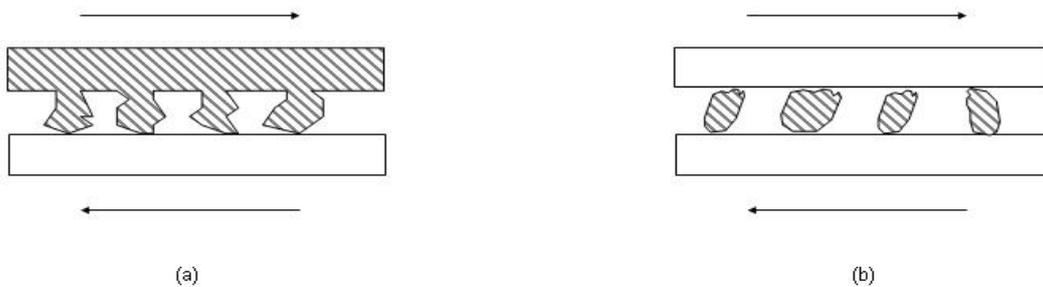


Fig. 3.1 Tipos de Abrasión.  
(a) Abrasión de dos cuerpos y (b) abrasión de tres cuerpos [12].

### 3.1.2 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 produzca antes de la separación de la partícula es mucho mayor, si esta 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, se lleve a cabo. 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].

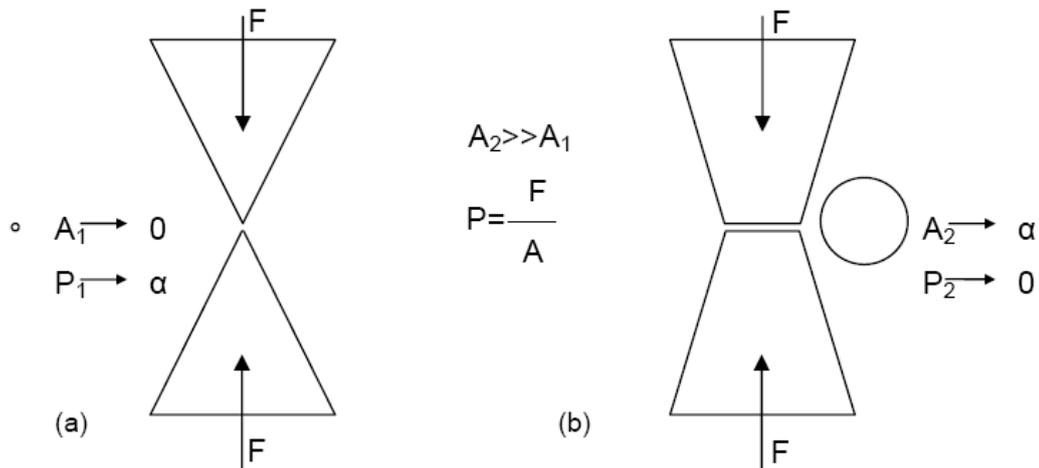


Fig. 3.2 Desgaste adhesivo [8]

Generación del mecanismo de adhesión al ser deformada 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 = Área de contacto, F = Fuerza, P = Presión de contacto

### 3.1.3 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, puede operar en la mayoría de los materiales como lubricante, 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].

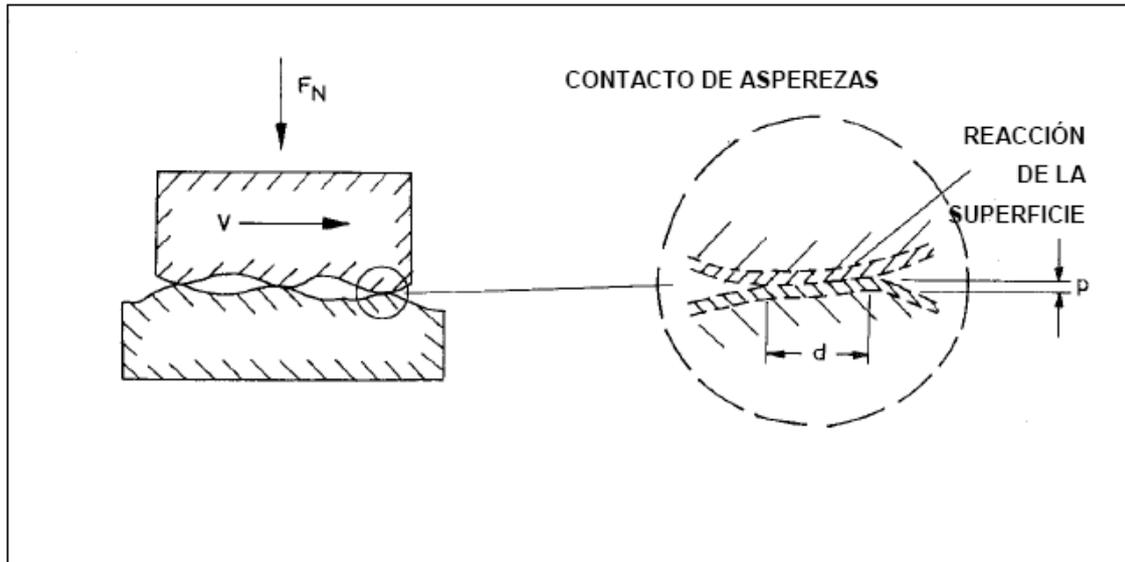
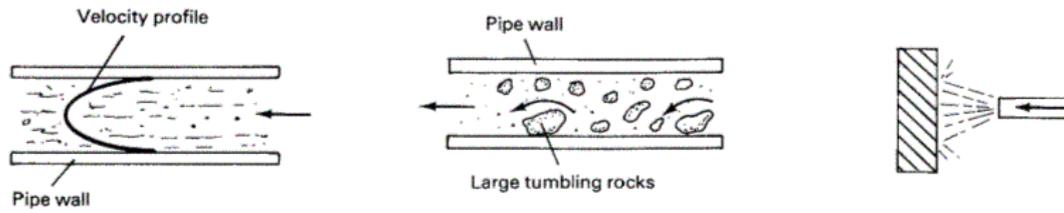


Fig.3.3 Desgaste corrosivo.  
Modelo representativo de la formación de la capa de óxido.

### 3.1.4 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 impacto de una mezcla de partículas sólidas dentro de un fluido 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, es útil, como para la limpieza de equipos, en los que por medio de disparar arena a presión, se obtienen 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, así como la dureza de la superficie, la distancia boquilla-muestra y el ángulo de impacto los cuales son analizados en el capítulo IV.

### 3.1.5 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, se tiene zonas de intensa deformación muy cercanas a la superficie, creando grietas superficiales y sub-superficiales, ver figura 3.5[13].

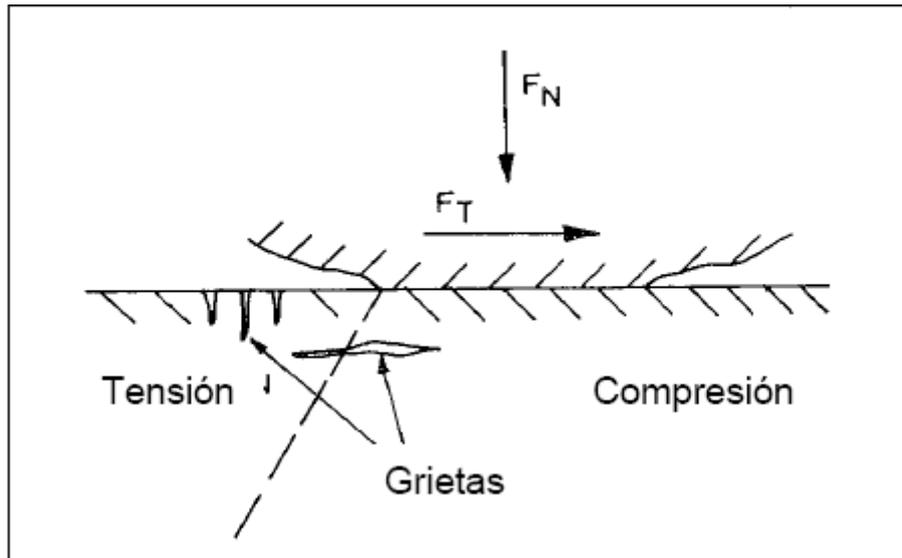
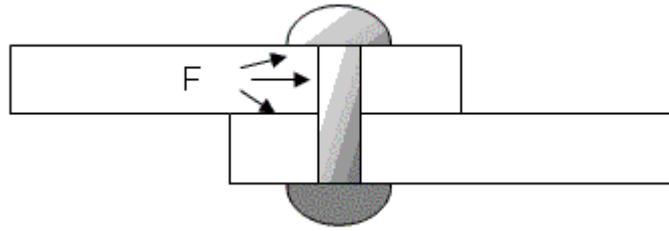


Fig. 3.5 Desgaste por fatiga [10].  
Esquema de la formación de grietas superficiales y sub-superficiales.

### 3.1.6 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 en condición húmeda ha sido mucho mayor que en condición seca. Esto se debe a que este se inicia 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 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 3.7), donde partículas de arena son proyectadas contra la superficie con la finalidad de realizarle una limpieza [14].



**Fig. 3.7 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 3.8).



Fig. 3.8 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].

### 3.3 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 3.9 muestra las categorías, y los tipos de prueba que son llevados a cabo en cada una de ellas [16].

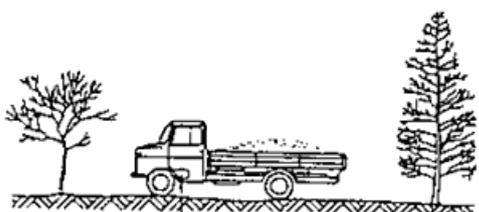
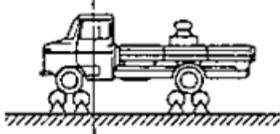
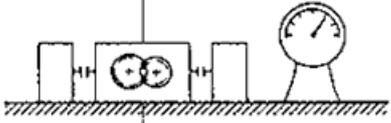
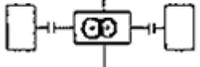
Categoría	Tipo de prueba	Símbolo
I	Pruebas de campo para maquinaria	
II	Pruebas de banco para maquinaria.	
III	Pruebas de banco para sistemas.	
IV	Pruebas de banco para componentes.	
V	Pruebas de modelos.	
VI	Pruebas de laboratorio.	

Fig. 3.9 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 en estudio, realizarlas 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 3.10, se puede observar las condiciones operativas a las que es sometido el vehículo.



Fig. 3.10 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 3.11) 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].



Fig. 3.11 Bancos de pruebas [17].

Capacidad de ensayar el vehículo completo o solo componentes, (a) simulador de carretera de 2 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 pueden 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 permitiendo 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 IV

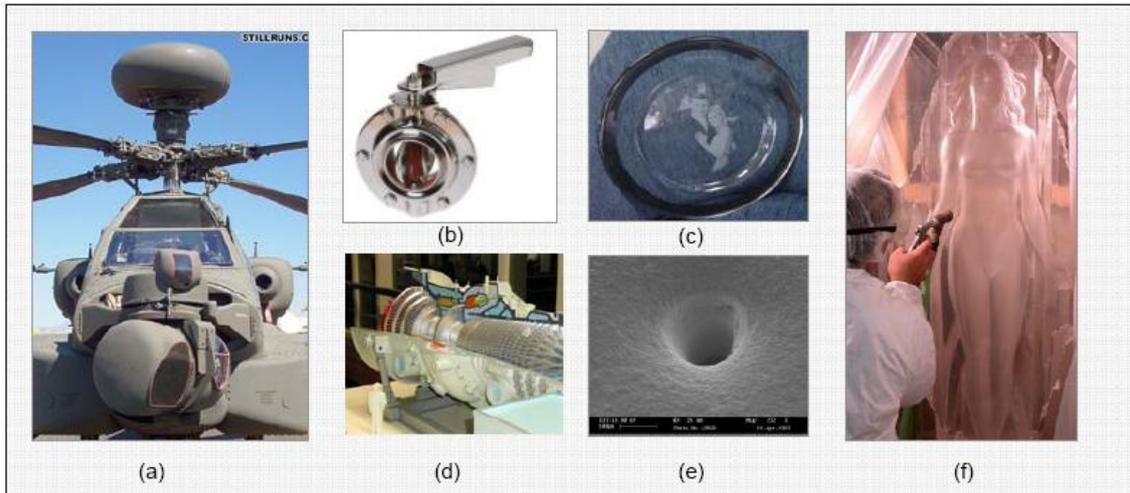
## 4. EROSIÓN

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

La pérdida de material debido al fenómeno de erosión es dependiente de factores interrelacionados que incluyen las propiedades y estructura de los materiales utilizados, 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 maquinado, (f) Esculturas.

#### 4.1 Desgaste erosivo por partículas sólidas.

En algunos casos el desgaste debido al impacto sobre una superficie de partículas sólidas, pudiendo 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 está en contacto con la superficie. Como se muestra 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 las frena durante el impacto de la misma, esta es la fuerza de contacto ejercida por la superficie [12].

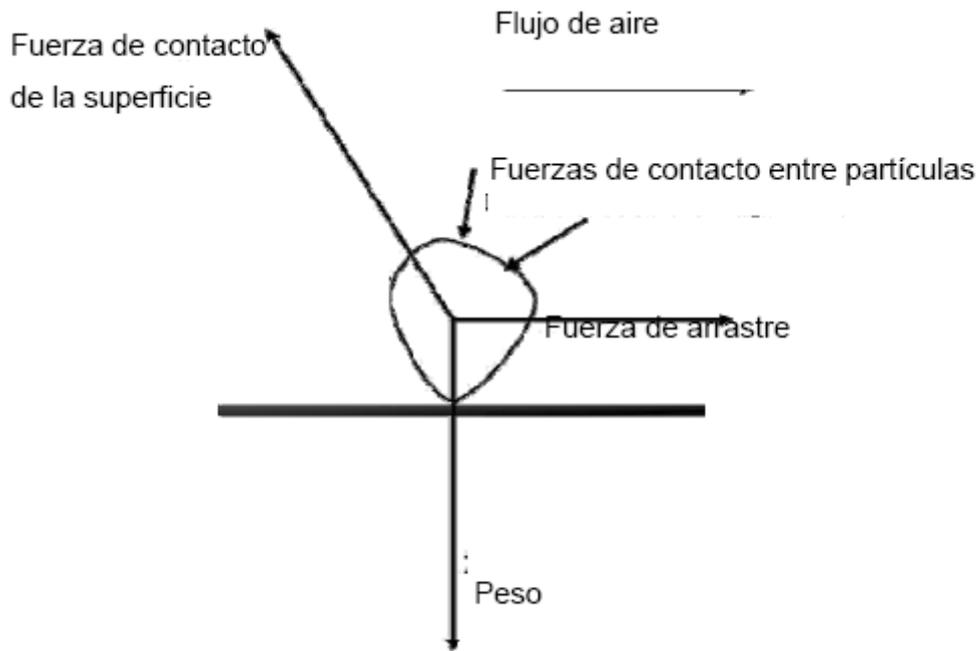


Fig. 4.2 Fuerzas de contacto partícula-superficie.

## 4.2 PROPIEDADES DE LA PARTICULA

### 4.2.1 Dureza.

La dureza es una de las propiedades esenciales de las partículas incidentes [12]. Aquellas con mayor dureza que la superficie a impactar, causan un mayor desgaste que otras partículas con menor dureza. 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, empieza a ser mucho mayor cuando la relación de la dureza de la partícula ( $H_a$ ) y la dureza de la superficie a impactar ( $H_s$ ) es mayor a 1.

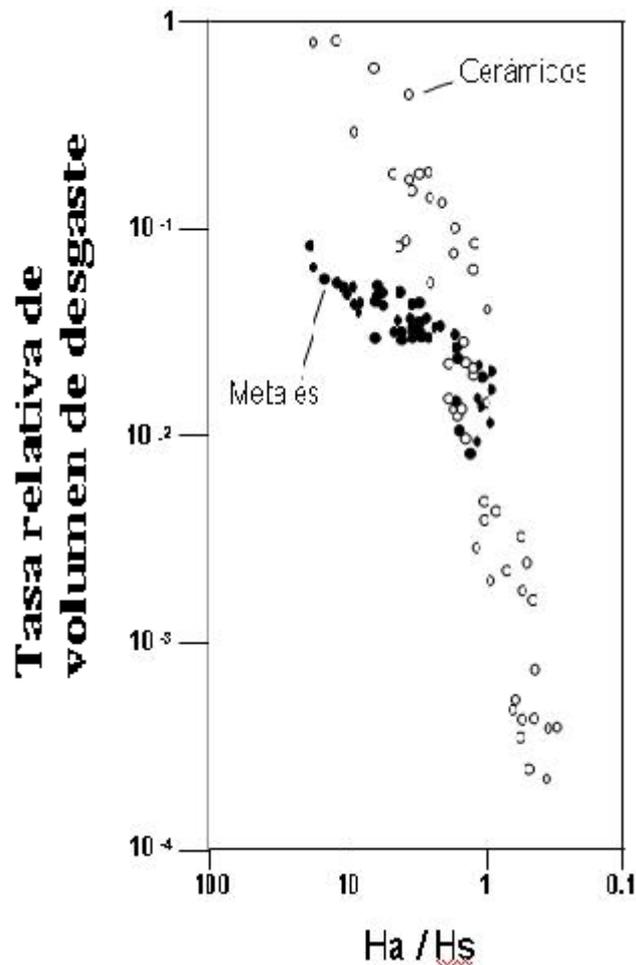


Fig.4.3 Desgaste para la relación de dureza partícula (Ha) – superficie (Hs) [12].

El comportamiento se puede explicar con el estudio de la mecánica de contacto entre una partícula y una superficie plana. Si ésta fluye plásticamente una vez que su punto de cedencia es excedido, ocurre un significativo flujo plástico cuando la presión de contacto alcance alrededor de tres veces su esfuerzo de cedencia uní axial ( $3Y$ ). La deformación sucede si la carga normal de la partícula es incrementada y solo si mantiene la presión de contacto sin deformarse. En caso que la partícula falle, por flujo plástico o fractura frágil antes de que la presión sobre la superficie alcance de tres veces su esfuerzo de cedencia uní axial ( $3Y$ ), 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. Se puede esperar para las que son 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 ver Figura 4.4 (b)) [12].

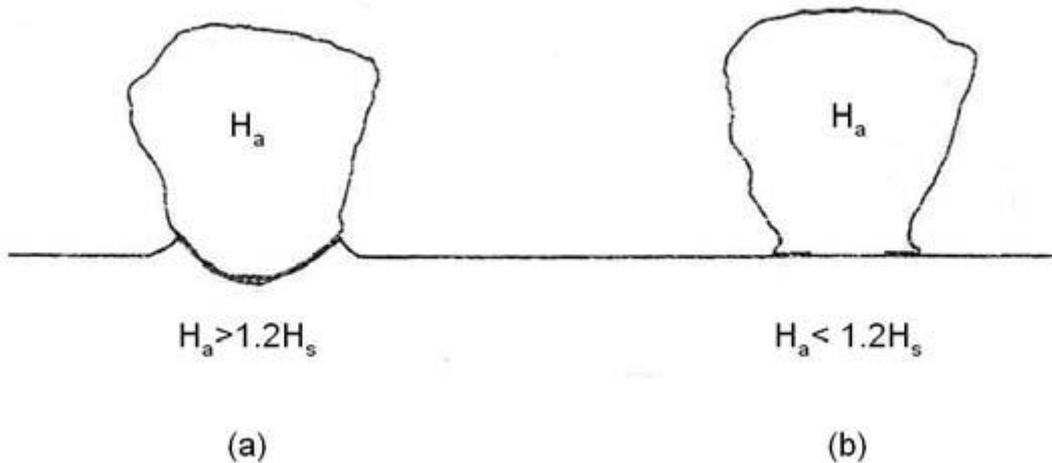


Fig. 4.4 Contacto entre una partícula bajo carga normal y una superficie plana [12].

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). Para 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.

1. Typical abrasive materials

Material Hardness (HV)

Diamond	6000–10000
Boron carbide, B <sub>4</sub> C	2700–3700
Silicon carbide	2100–2600
Alumina (corundum)	1800–2000
Quartz (silica)	750–1200
Garnet	600–1000
Magnetite, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	370–600
Soda-lime glass	~500
Fluorite, CaF <sub>2</sub>	180–190

2. Phases or constituents of steels and cast irons

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 <sub>3</sub> C	840–1100
Chromium/iron carbide, (Fe,Cr) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	1200–1600

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

#### 4.2.2 Forma.

La intensidad del desgaste depende fuertemente de la forma de la partícula; donde aquellas que sean angulares causan mayor desgaste que las que muestran forma redonda [12].

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

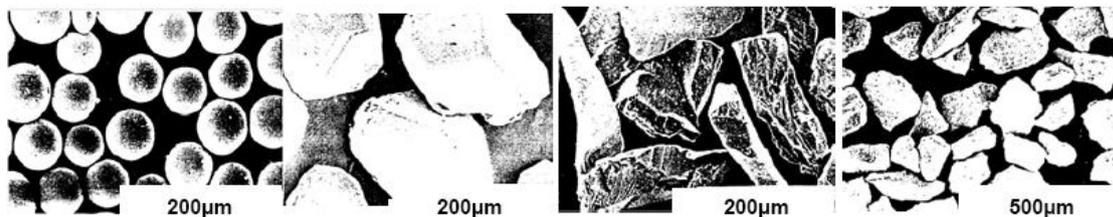


Fig. 4.5 Partículas Erosivas.

(a) Esferas de vidrio, (b) Carburo de Tungsteno, (c) Alúmina, (d) Diamantes [22].

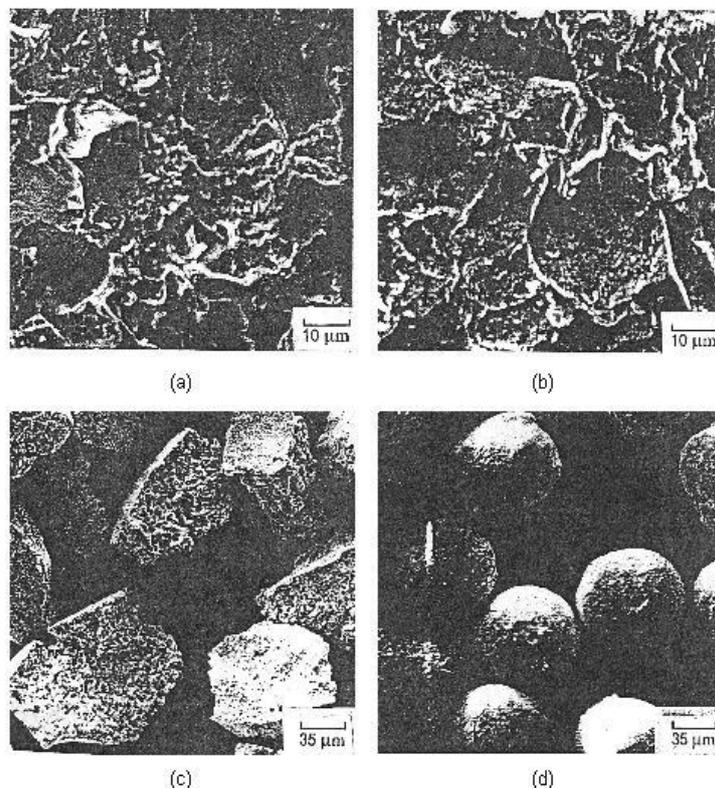
Un método sencillo de obtener información de la forma de la partícula es por medio del factor de redondez, este puede ser definido como el área real de proyección  $A$  y el área de un círculo con el mismo perímetro  $P$  de la proyección.

$$F = \frac{4\pi A}{P^2}$$

[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  $30^\circ$  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 primeras causaron cráteres profundos por lo cual se formaron bordes más grandes a diferencia de las redondas que produjeron cráteres circulares y menos profundos. (Figura 4.6) [18].



**Fig. 4.6 Superficies de acero AISI 1020 erosionado [18].**  
a) Por partículas de acero angulares 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].

### 4.2.3 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  $100\mu\text{m}$ .

La figura 4.7 muestra los resultados obtenidos, donde partículas de  $10\mu\text{m}$  causan alrededor de una cuarta parte del desgaste que causan las partículas de  $100\mu\text{m}$  [24].

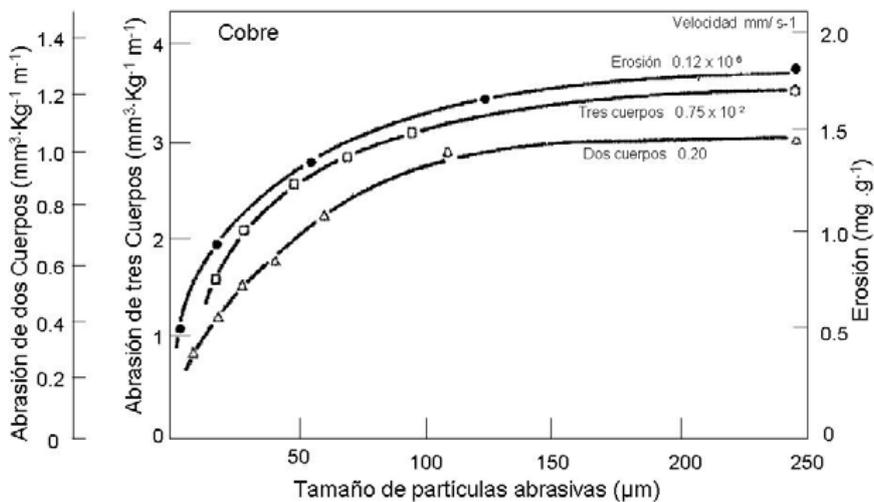


Fig. 4.7 Desgaste en función del tamaño de la partícula [24].  
Desgaste de Cobre por partículas de SiC bajo los sistemas erosión (masa perdida / masa de abrasivo) y en abrasión de dos y tres cuerpos (volumen removido / (carga x distancia))

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 los mismos. 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 efectivos de desgaste[12].

### 4.3 Desgaste erosivo por deformación plástica.

#### 4.3.1 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  $90^\circ$  [12]. La única fuerza que se considera es la fuerza de contacto, ejercida por la superficie, como fue indicado con anterioridad. Se supone que el flujo de material es totalmente plástico con una constante de indentación  $H$  (dureza). La figura 4.8, 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 a su punto de reposo a un tiempo  $t=T$ , ha penetrado una distancia  $d$ .

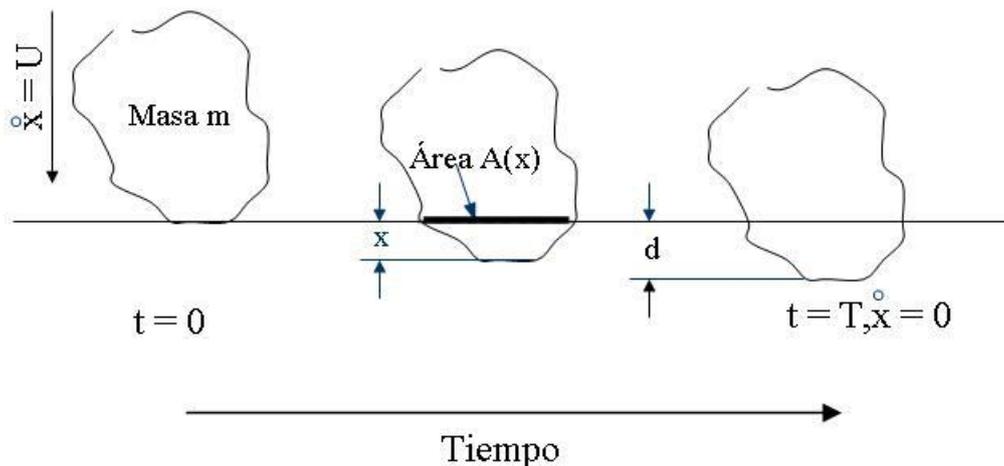


Fig. 4.8 Proceso de penetración de una partícula rígida sobre una superficie plana. Deformación plástica de la superficie, contacto inicial a un tiempo  $t=0$ , partícula en reposo a un tiempo  $t=T$  [12].

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 movimiento de la partícula queda expresada como [12].

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

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  $\rho$  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 debe ser proporcional al total de la masa de partículas erosivas que golpean en él. Dándonos así el valor “real” de la erosión.

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

[4.7]

Donde la  $E$  es adimensional y la ecuación 4.7 se convierte en:

$$E = k\rho \frac{U^2}{2H}$$

[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  $k$  adquirirá 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  $5 \times 10^{-3}$  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 un tanto burda de los factores que controlan el desgaste erosivo; ignorado por ejemplo, el ángulo de impacto.

### 4.3.2 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 4.9, se puede observar como el desgaste muestra un máximo cuando los ángulos de impacto se encuentran entre  $20^{\circ}$  y

30°, en cambio para ángulos de 90° el desgaste se encuentra en valores de una tercera parte del máximo [12,24].

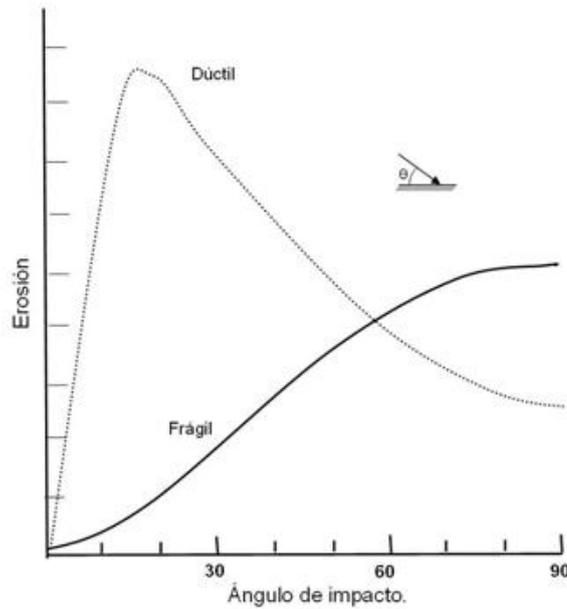


Fig. 4.9 Erosión con respecto al ángulo de impacto.  
(a) Comportamiento dúctil, (b) comportamiento frágil [12].

La figura 4.10, se indica los comportamientos analítico y experimental que encontró Finnie [12] en materiales dúctiles. Para ángulos pequeños, el material experimenta microcorte. Para ángulos mayores, exhibe deformación plástica, dejando apilado material hacia los lados y al frente de la partícula, el cuál será vulnerable a desprenderse por subsecuentes impactos [24].

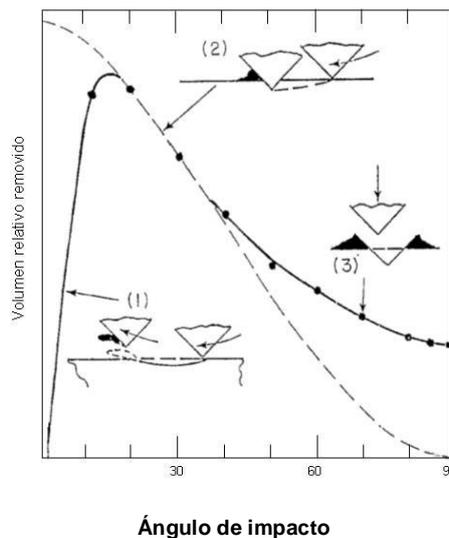
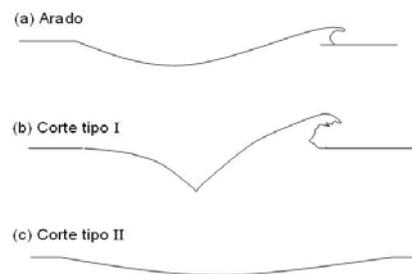


Fig.4.10 Mecanismos dúctiles propuestos con respecto al ángulo de impacto.  
(1) microcorte, (2) apilamiento, (3) indentación [24].

En el caso de ángulos de impacto a  $90^\circ$  las partículas realizan una indentación plástica alrededor de la zona de impactó creando un borde alrededor de la misma. El modelo analítico predice cero deformaciones a ángulos normales de incidencia y los resultados experimentales difieren de ellos. Esto puede ser debido a que durante la erosión solo los primeros impactos en la superficie son a  $90^\circ$  posteriormente la deformación plástica ocurrida por los impactos ocasionan una rugosidad en la superficie, lo que conduce que los próximos impactos se realicen en una distribución de ángulos [24].

### 4.3.3 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  $30^\circ$ . Los tres tipos de daños se encuentran ilustrados en la figura 4.11 donde la dirección de los impactos fue de izquierda a derecha.



**Fig. 4.11 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 4.11(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 4.11 (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 4.11(c).

#### 4.3.4 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]. Para partículas redondas, dicha deformación es menor y más impactos son 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 el impacto a un ángulo de  $90^\circ$ , el material es removido por colisiones vecinas, después de una serie de impactos que generarán un ciclo de deformaciones plásticas. En la figura 4.12(a), se puede apreciar una superficie de aluminio, la cual fue erosionada por partículas esféricas de vidrio a un ángulo de  $90^\circ$  y una velocidad de  $60 \text{ m s}^{-1}$ . La erosión a ángulos pequeños es mayor, aunado a esto, si se utiliza una partícula angular, el proceso es de corte como fue ilustrado en la figura 4.11 y depende en gran parte en el sentido de giro de la partícula antes y durante el impacto. Una superficie erosionada en estas condiciones puede verse en la figura 4.12 (b), en donde partículas angulares de carburo de silicio fueron impactadas a un ángulo de  $30^\circ$  y a una velocidad de  $55 \text{ m s}^{-1}$  en acero de bajo carbono [12].

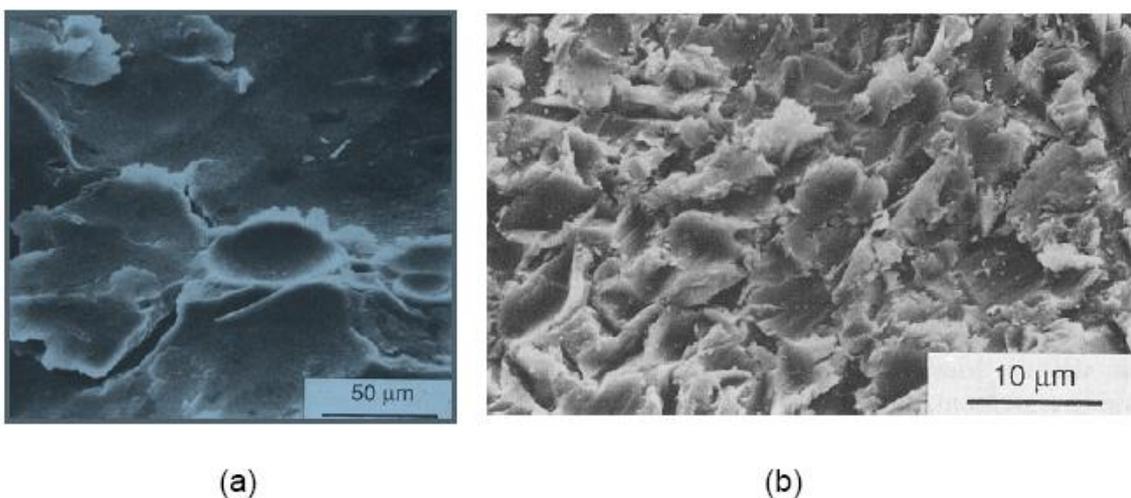


Fig. 4.12 Influencia del ángulo de impacto.  
(a) aluminio erosionado por partículas esféricas de vidrio a un ángulo de  $90^\circ$ , (b) acero suave impactado por partículas angulares de carburo de silicio a un ángulo de  $30^\circ$  [12].

### 4.3.5 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, premisa que no se aplica para materiales sometidos al fenómeno de la erosión ver figura 4.13. Encontrando solamente esta relación para metales puros en estado recocido (siendo la excepción el molibdeno y el tungsteno) [18].

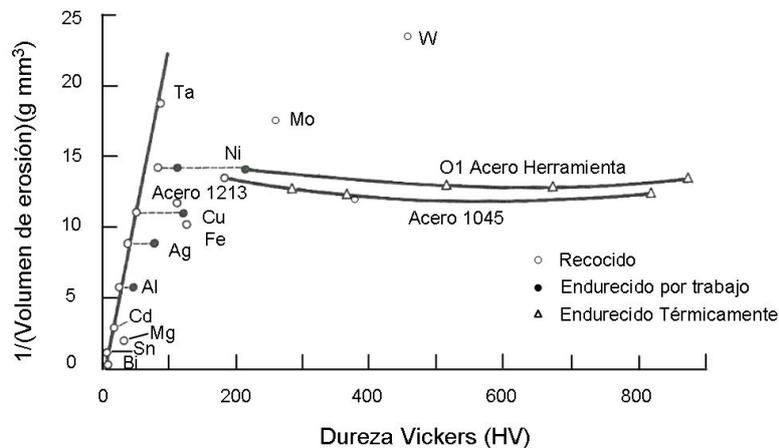


Fig. 4.13 Resistencia a la erosión contra dureza del material. Metales puros y aceros con varios estados de endurecimiento por deformación y tratamiento térmico [24].

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

## 4.4 Desgaste erosivo por fractura frágil

### 4.4.1 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 4.14 [12]. Para el punto inicial de contacto (figura 4.14(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 4.14 (b)). Mayores incrementos en carga serán acompañados por la extensión progresiva de la grieta radial (M) (figura 4.14(c)). Al disminuir la carga ejercida por la partícula la grieta radial (M) se cerrará (figura 4.14 (d)). Mayores disminuciones de carga serán acompañadas de la formación de las grietas laterales (L) (figura 4.14 (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 4.14 (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].

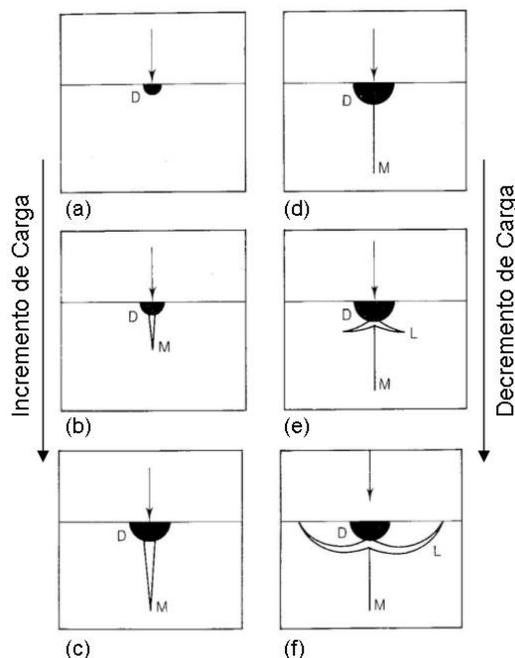


Fig. 4.14 Secuencia del mecanismo por fractura frágil [12].

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].

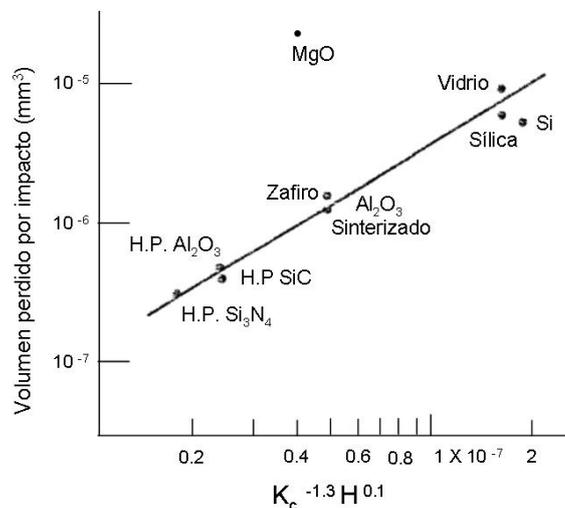
Modelos como el realizado por Wiederhorn [12] predicen la erosión como:

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

[4.9]

Algunas de las consideraciones que propone el modelo son que la erosión (E/p 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 (Kc) [12].

La figura 4.15 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. 4.15 Erosión en materiales frágiles.**  
Comparación de datos experimentales con el modelo analítico [12].

## 4.5 Transición dúctil-frágil

A continuación serán descritos los factores que conducen a un cambio de mecanismo en la erosión [12].

### 4.5.1 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 muy poca 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 4.16).

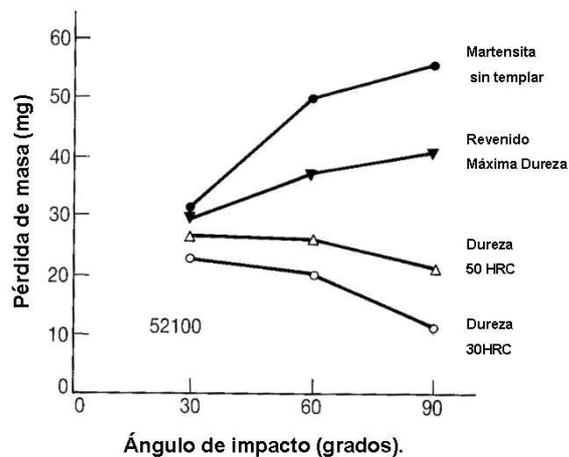


Fig. 4.16 Transición dúctil-frágil en acero AISI 52100 (1% C, 1.5 % Cr) con diferentes tratamientos térmicos en función del ángulo de impacto. (Partículas de arena sílica impactadas a 153 m-s-1)

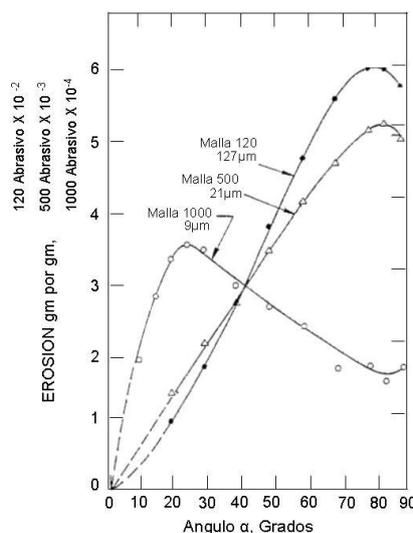
### 4.5.2 Energía Cinética.

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 pequeñas energías, la fuerza de impacto con la que se golpeará la superficie será mínima lo que produce a la vez 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;

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 removido, se realiza por microdeformación plástica [12].

Finnie [24] presentó un estudio de las erosiones en probetas de vidrio causadas por partículas de carburo de silicio(SiC) 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  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

La figura 4.17, muestra los valores de erosión del vidrio para cada una de los tamaños de partícula utilizadas. Para el caso de las pruebas realizadas para una medida de 9  $\mu\text{m}$  se aprecia un comportamiento dúctil como el mostrado en la figura 4.9, Este mecanismo, es debido a que dicha medida contribuye en menor cantidad al valor de energía cinética causando que la energía de impacto en la superficie no produzca la grieta radial, y siendo una microdeformación plástica. Debido a ello, 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  $\mu\text{m}$  presentaron una erosión del orden de  $10^{-3}$  y  $10^{-2}$  respectivamente. En tanto la energía lograda fue suficiente para generar la grieta radial y lateral, propiciando así el desprendimiento de material [24].



**Fig.4.17 Transición dúctil frágil.**  
 Escala de erosión 9  $\mu\text{m}$  (malla 1000), X10-4. Escala de erosión 21  $\mu\text{m}$  (malla 500), X10-3. Escala de erosión 127  $\mu\text{m}$  (malla 127), X10-2 [24].

# CAPÍTULO V

## 5.- MOLDEO

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].

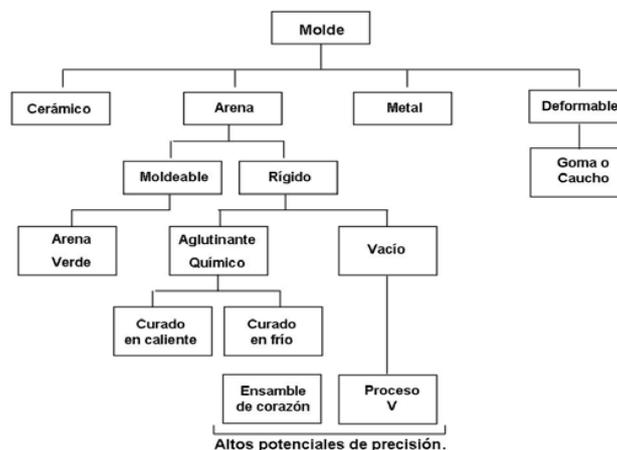


Fig.5.1 Rutas de moldeo [26].

## 5.1 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].

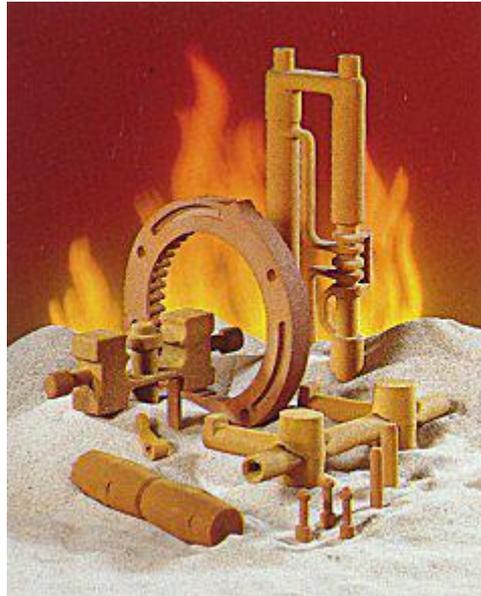


Fig. 5.2 Variedad de formas y tamaños en corazones.

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 el proceso 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 ellos, la arena es revestida con dos reactivos que forman una resina, al ser curada ya sea por procesos de catalización o térmico, es convertida en un plástico sólido que cubre la arena y mantiene su forma durante el vaciado [25].

## 5.2 Control de la arena en el proceso de caja fría.

El control de la arena es imprescindible en el moldeo de corazones ya que 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.

### 5.2.1 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].

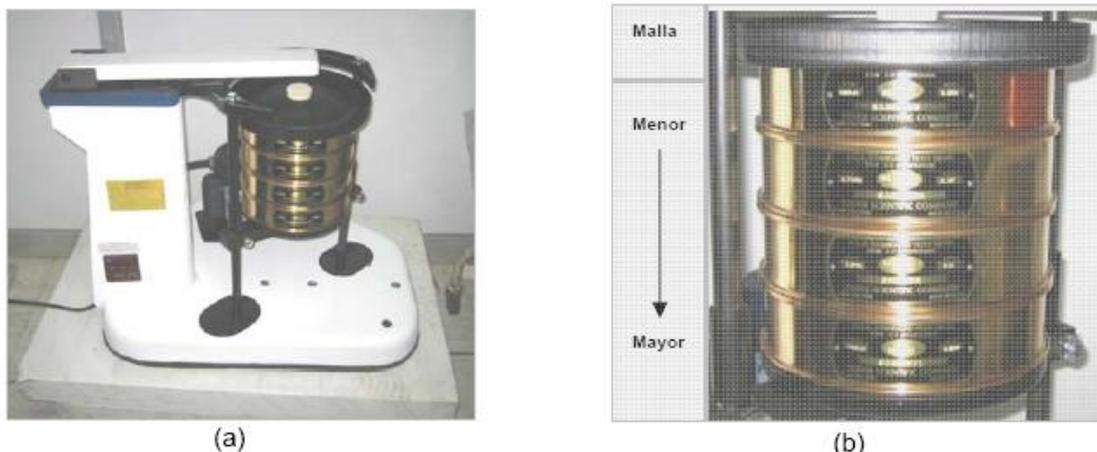
La forma de la partícula afecta las propiedades físicas de los moldes. Los moldes elaborados con aquellas que son redondas poseen una densidad mayor que los producidos con partículas angulares. Debido a que una mayor cantidad de granos pueden ser compactados en un determinado volumen.

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

### 5.2.2 Granulometría GFN (Grain Fineness Number).

La granulometría es una característica que indica el tamaño y la distribución del grano de la arena [28]. Se determina 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].



**Figura. 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].

### **5.2.3 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. La combinación de temperatura por debajo de dicho intervalo provoca que la reacción de las resinas sea retardada, produciendo corazones crudos y disminución de la eficiencia del mezclado en el molino puesto que hay un incremento de viscosidad [28].

### **5.2.4 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.
- Temperatura del aire comprimido mayor a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Depósitos de resina y aditivos destapados.

### 5.2.5 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  los cuales son acumulativos en cada reciclaje [28].

### 5.3 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 sople. 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 ocurre el proceso de extracción del corazón del herramental [30].

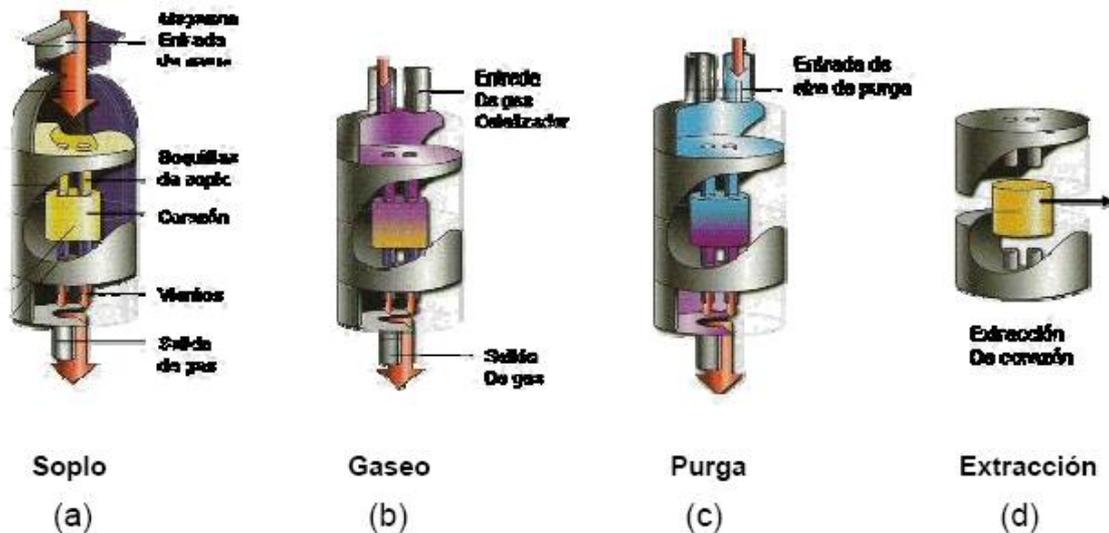


Figura 5.5 Etapas en el proceso de llenado de caja fría [30].

### 5.3.1 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 Soplo Gaseo Purga Extracción 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].

#### 5.3.1.1 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].

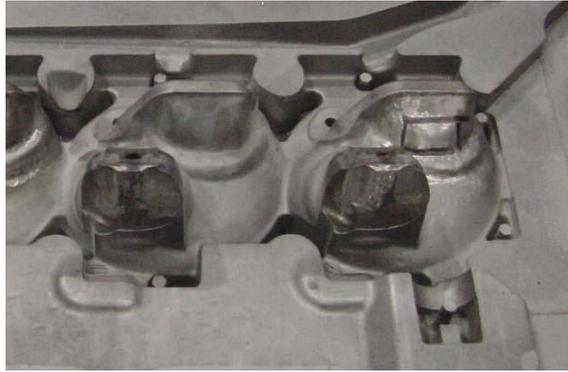
### 5.3.1.2 El desgaste erosivo en las cajas de corazones.

Los herramentales 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.

Materiales	Ciclos de soplado	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 herramentales 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.**

#### **5.4 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 m/s 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.

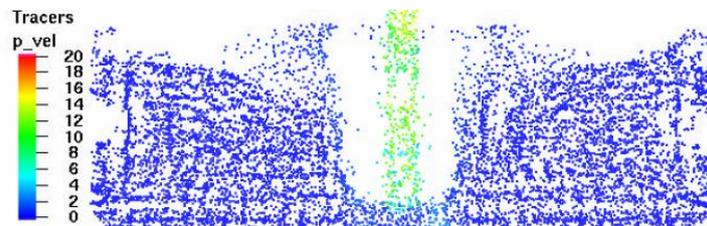


Fig. 5.7 Velocidad de partícula en caja de corazones. Altas relaciones aire- arrastre de partículas [31].

En condiciones de operación como las mostradas en el estudio [31], se puede 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 sople, boquillas y cavidades de la caja Figura 5.9.

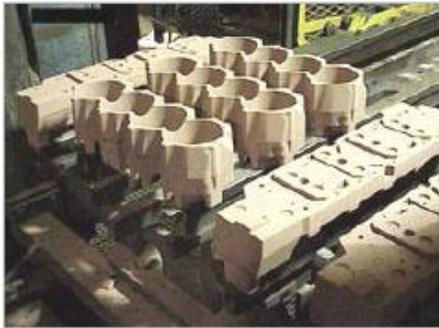


Fig. 5.8 Corazón (chaqueta de agua "783") [32].

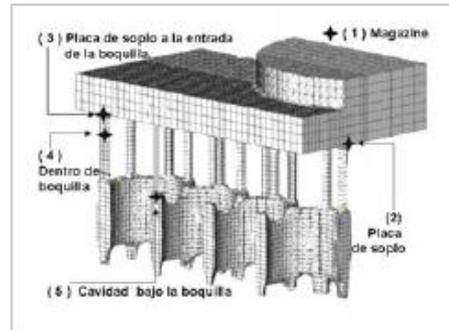


Fig. 5.9 Ubicación de los transductores [32].

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

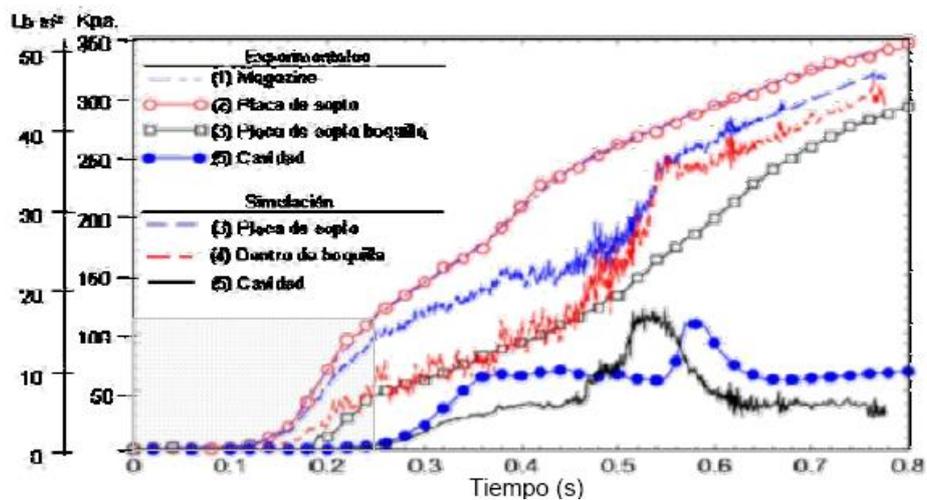


Fig. 5.10 Comportamiento de las presiones del sistema con respecto al tiempo. Grupo superior mediciones, grupo inferior métodos numéricos [32].

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 sople (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 sople 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.

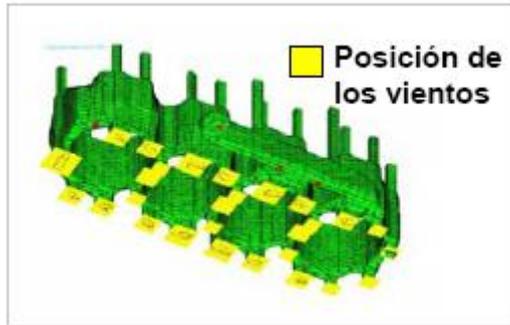


Fig. 5.11 Posición de los vientos inferiores [32].

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	Kpa	Lb·in <sup>2</sup>
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 sopleo comienza a presurizarse, esto es debido a que el llenado ha bloqueado los vientos inferiores de el 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.

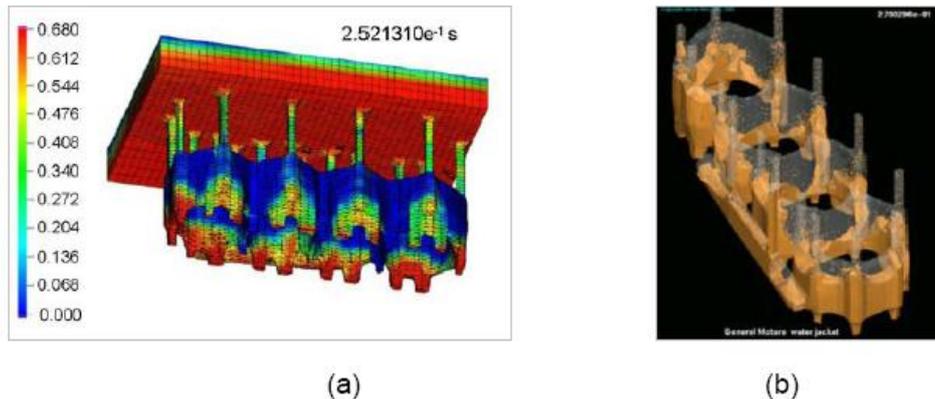


Fig. 5.12 Niveles de llenado del corazón 0.25.  
 (a) modelación de celdas. (b) modelación gráfica

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 (~16.7 psi).

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  $3.5 \text{ m s}^{-1}$  y  $14 \text{ m s}^{-1}$  [31,32].

# CAPÍTULO VI

## 6.- FUNDAMENTOS DE DISEÑO

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, 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 guía 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].

## 6.1 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 del un diseño original, es una invención. Pocas compañías que permitan una invención y que basen su economía y éxito en esta, pues una invención original trae consigo altos riesgos pero que sin embargo también tienen muchas oportunidades que podrían hacer que dominaran 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, 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].

## 6.2 Sistemas Técnicos.

Un sistema técnico consiste de ensambles y componentes que juntos desempeñaran una función. 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 los cuales son de gran ayuda para la selección de materiales en el sistema, (figura 6.1) [35].

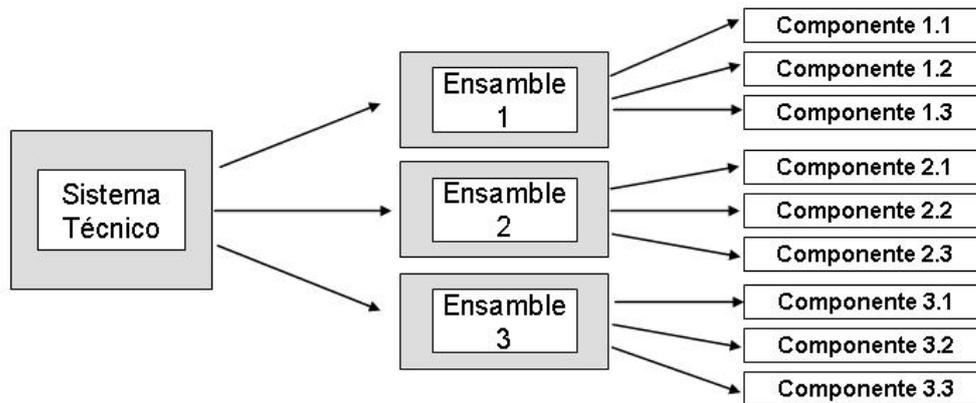


Fig. 6.1 Sistema ensamble-componentes [35].

### 6.3 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 sobre estimada 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 deberán de prepararse actividades para 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 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 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 implemento 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 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.

#### **6.4 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 perdidas 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:

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

$$V_N = \sqrt{2V_T}$$

[6.2]

Donde  $\omega$  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 brazolanzador la cámara es mantenida al vacío. La velocidad de impacto es la velocidad tangencial del brazo.

$$V = V_T = r\omega$$

[6.3]

Donde  $r$  es el radio del brazo y  $\omega$  su velocidad angular. Una de las ventajas de este equipo es que el control de la velocidad de impacto resulta ser simple, lo que permite tener un amplio rango de velocidades comparado con el brazolanzador. La principal característica del brazo rotativo es que se pueden realizar ensayos de baja como de alta erosión.

El sistema de erosión boquilla (figura 6.2 (c)) es el aparato más utilizado para dichas pruebas. 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, éstas salen de la boquilla para ser impactadas en la probeta. Sus principales variables de este aparato son:

- Velocidad de impacto
- Angulo de impacto

No requiere de cámara de vacío ó balanceo dinámico de componentes, ni controles de velocidad de motor. Por lo que resulta ser económico [18].

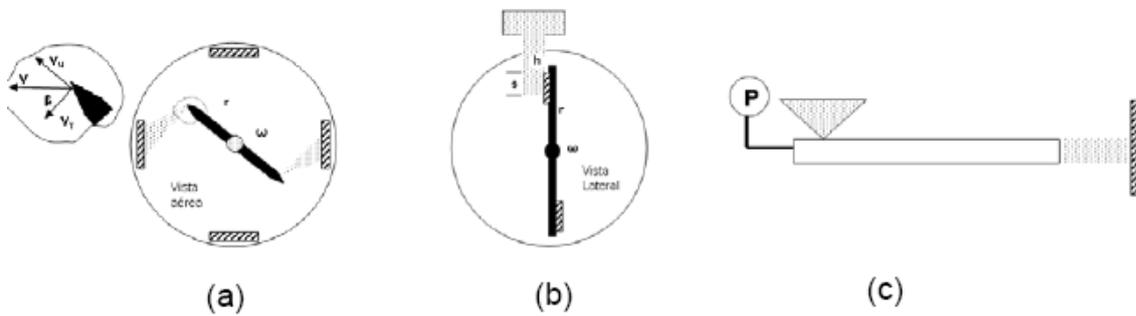


Fig.6.2 Equipos de prueba de erosión.  
(a) brazo lanzador, (b) brazo rotativo, (c) Sistema Boquilla [18].

## 6.5 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.

### 6.5.1 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 mm, esto es aproximadamente el doble de lo que sugiere la ASTM. Otros investigadores como Marshall [38] han utilizado boquillas de 3 m 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 equipos.

La figura 6.3, muestra los resultados de 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<sup>-1</sup> a excepción de la boquilla de 1000 mm donde la velocidad cayó a 42 m·s<sup>-1</sup> [38]. Puede observarse que el valor mas alto de velocidad es de 58 m·s<sup>-1</sup> para la de boquilla de 308 mm en donde para obtener un incremento de velocidad de 4 m·s<sup>-1</sup> (6.8%) con respecto a la obtenida por la boquilla de 85 mm se tuvo que incrementar una longitud de 223 mm (362 %).

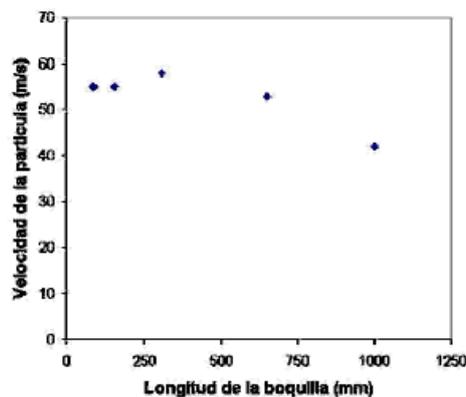


Fig. 6.3 Influencia de la longitud de la boquilla en la velocidad de la partícula.

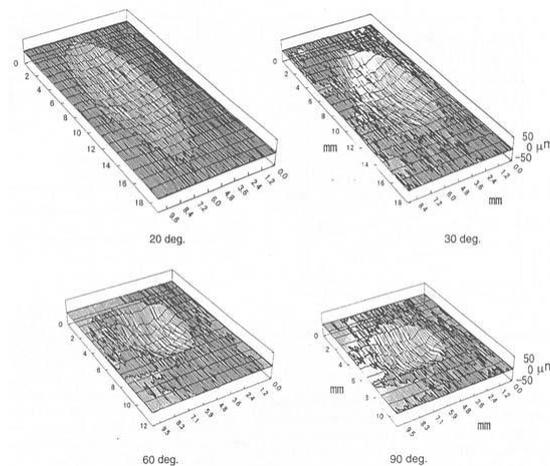
### 6.5.2 Rugosidad de la boquilla

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 donde las paredes son 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  $\mu\text{m}$  a una velocidad de  $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para cada una de las boquillas a utilizar.

### 6.5.3 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 especímenes de aluminio erosionadas con partículas de  $\text{SiO}_2$  de  $49 \mu\text{m}$  de diámetro a una velocidad de  $110 \text{ m/s}$ . 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].

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, ver figura 6.5 tipo 2[39].

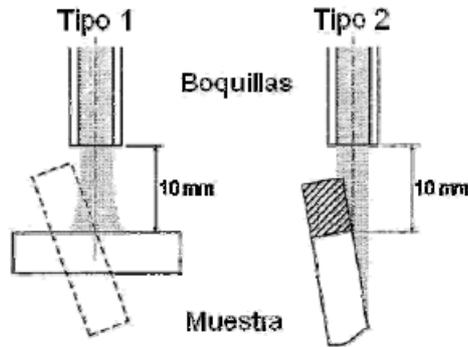


Fig. 6.5 Configuración de montaje a diferentes ángulos [39].

#### 6.5.4 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 ( $\beta^{-1}$  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  $\beta^{-1}$  aumenta, incrementándose así la divergencia [38].

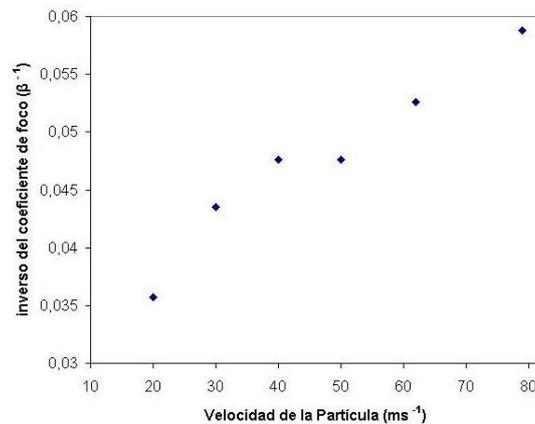


Fig.6.6 Efecto de la velocidad en la dispersión de las partículas [38].

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 ver figura 6.7 [12].

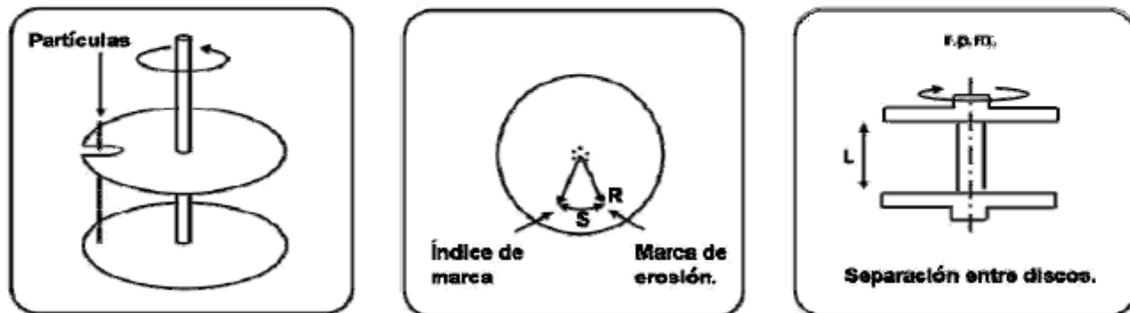


Fig.6.7 Diagramas esquemáticos del método doble disco.  
Derecha, representación del método, centro vista superior, izquierda vista lateral [18].

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

$$V_p = \frac{2\pi RvL}{S}$$

Donde,

$V_p$ , Velocidad de la partícula. ( $m \cdot s^{-1}$ )

$R$ , Radio del arco. (m)

$v$ , Velocidad rotacional. ( $rev \cdot s^{-1}$ )

$L$ , Distancia entre discos (m)

$S$ , Arco entre huellas de erosión. (m)

# CAPÍTULO VII

## 7.- METODOLOGÍA DE DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN.

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 gran cantidad 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, como es el proceso de moldeo. Por otra parte los costos de los mismos.

La secuencia del desarrollo de esta máquina es presentada en el presente capítulo mostrando las principales consideraciones efectuadas y la forma en la que fueron ejecutándose 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.

### 7.1 Condiciones de prueba.

El mecanismo de erosión presentado en las cajas de corazones sucede en las zonas debajo de las boquillas de soplo ver figura 7.1, por lo que un equipo de erosión sistema boquilla es esencial para aproximarse al 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 (60 lb-in-2).
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 además involucraban 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 <sup>0</sup> , 75 <sup>0</sup> , 40 <sup>0</sup> , 20 <sup>0</sup> .
Condición de Humedad:	-40°C Temperatura de rocío.

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.

## 7.2 Máquina Prototipo.

Para explorar las principales variables en el proceso de erosión, se diseño y construyó una máquina prototipo funcional, para así obtener resultados experimentales reproducibles 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.

Este equipo proporcionó 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 funcional puede ser sintetizado en 2 etapas dentro de las cuales se realizaron las pruebas preliminares, estas fueron:

- a) Exploración.
- b) Ajuste de variables

### 7.2.1 Exploración.

Se diseño y construyó un equipo de erosión sistema boquilla, con presiones de trabajo de hasta 10.342 bar (150 lb·in<sup>2</sup>), Como la muestra la figura 7.2.

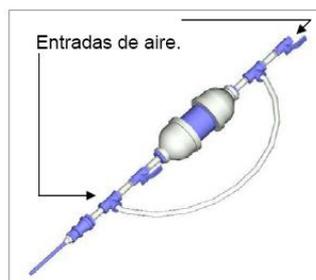


Fig. 7.2 Diseño de prototipo para la etapa de exploración.

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).

Huellas en vidrio.

Se realizaron ensayos preliminares especímenes de vidrio ver 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:  $90^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$

El resto de las condiciones fueron las propuestas en la sección 7.2. Posteriormente se obtuvieron las dimensiones de las huellas del daño superficial en el vidrio.

### **7.2.2 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: El diseño contó con una cámara de mezcla mayor, comparada con la que se tenía en el prototipo inicial. Lo que permitió 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, ver figura 7.4(c).

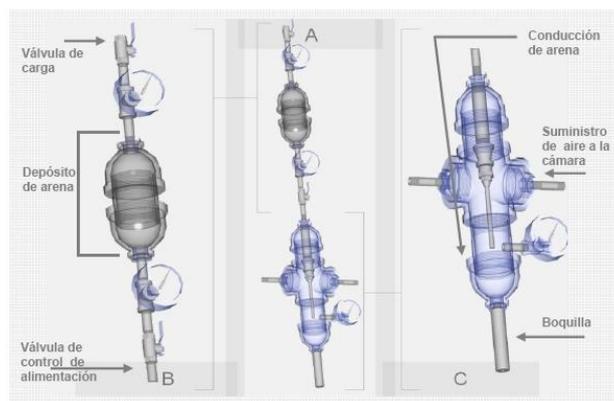
2. Se realizó un nuevo diseño para la boquilla de salida el cual involucró el uso de material acero grado herramienta AISI D2 con dureza obtenida del temple.

3. Solución de los problemas operativos.

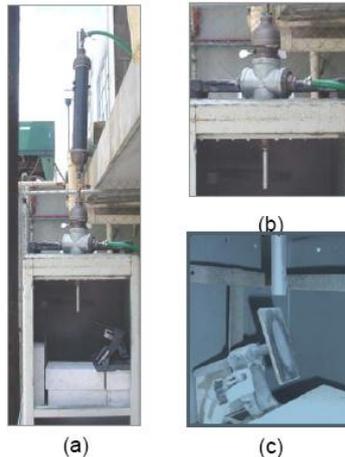
a. Se realizaron modificaciones en la entrada del suministro de aire, recorriendo la entrada principal de aire a un conector T, el cual fue útil también para realizar algunas mediciones de presión. Ver figura 7.4 (b). La otra entrada de aire es directamente suministrada a la cámara de mezcla (figura 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.

Erosión en probetas de acero 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  $20^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  y  $90^{\circ}$ . 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  $20^{\circ}$  y  $90^{\circ}$ . Estas fueron de 100 x 50 x 6.35 mm.

El dispositivo portamuestras ver figura 7.5(c) es colocado con respecto al ángulo de impacto a fin de ser ajustado para cada uno de los ensayos.

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 1020 °C posteriormente se aplicó un doble revenido a 605° C a una de ellas y uno de 520° C a la otra, figura 7.6.(a,b,c)

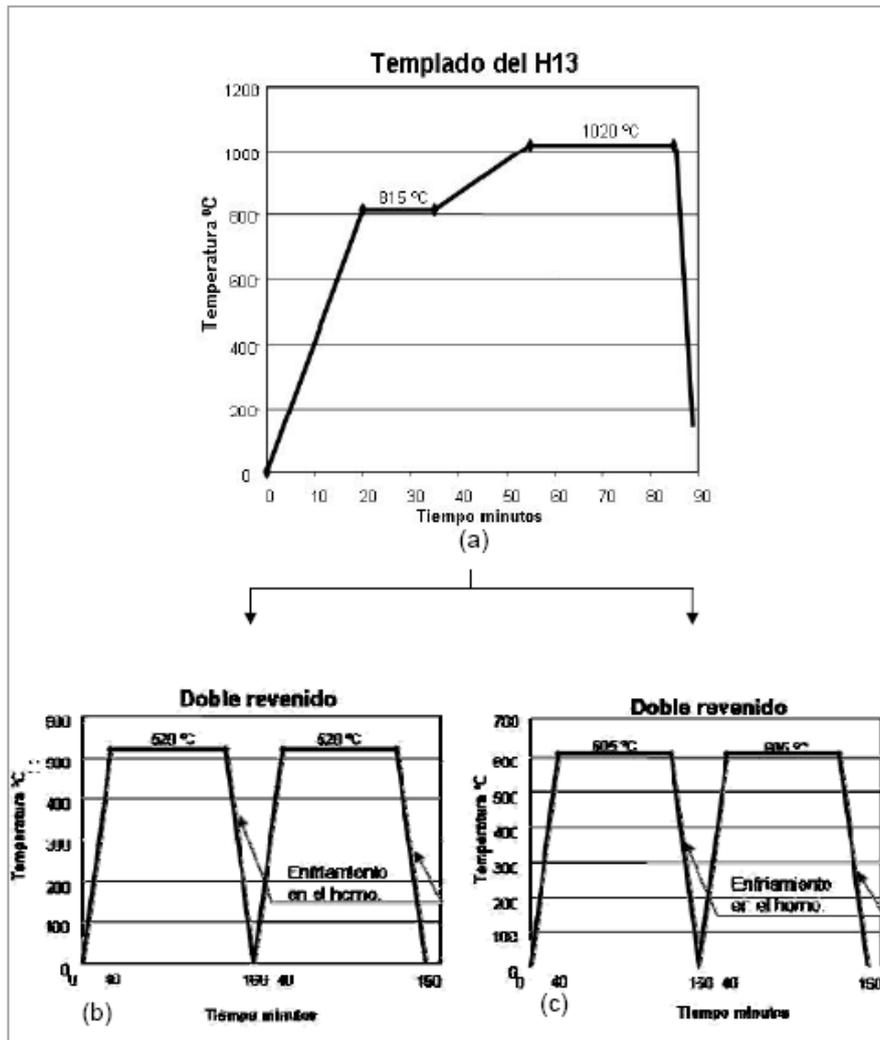


Fig. 7.6 Tratamientos térmicos en acero grado herramienta H-13.

(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 850 °C y posteriormente se aplicaron revenidos a 205° y 520° C. Los tratamientos térmicos son mostrados en las figuras 7.7 (a, b, c).

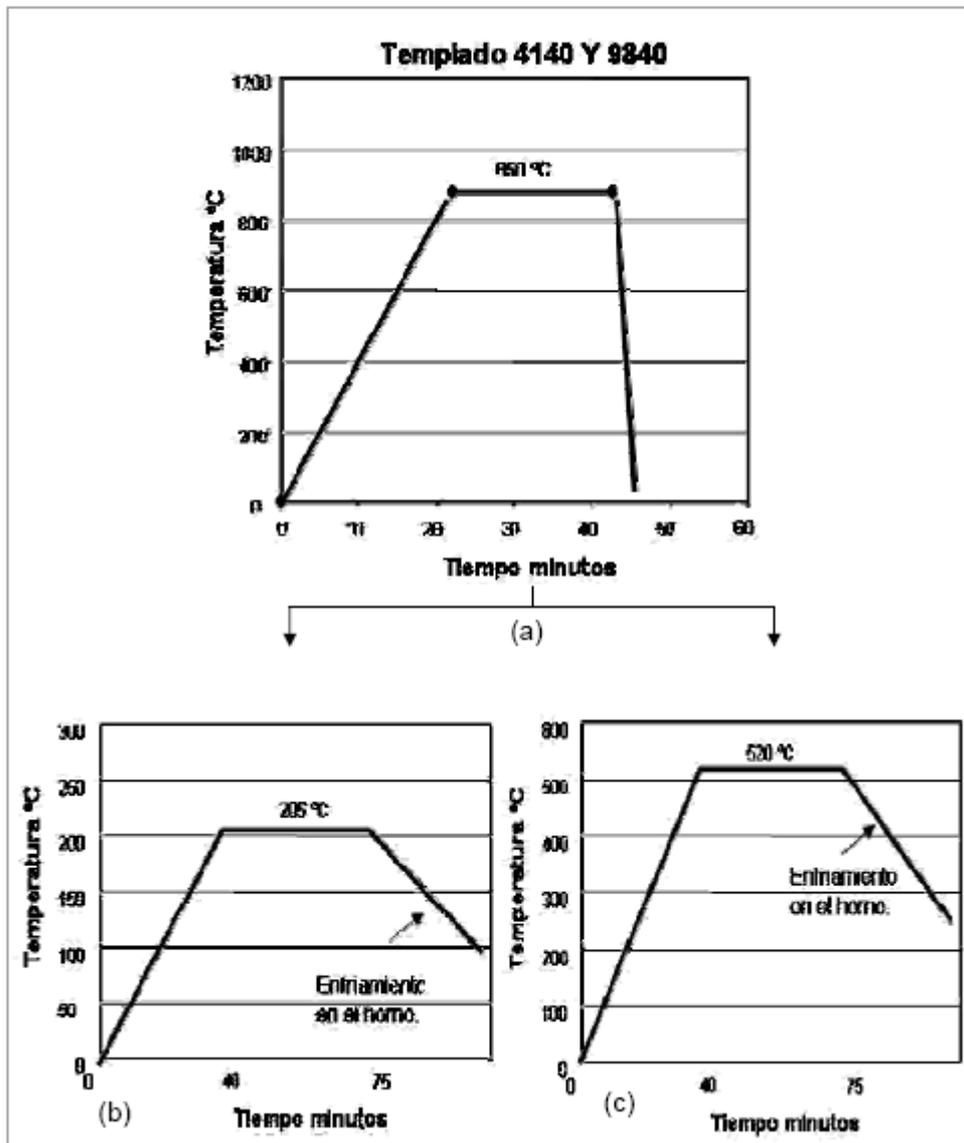


Fig. 7.7 Tratamientos térmicos en acero grado herramienta 4140 y 9840.  
 (a) Templado 850 °C, (b) Revenido 205 °C, (c) Revenido 520 °C [4,5,6]

Una vez realizados los tratamientos térmicos a las probetas respectivas fueron pulidas obteniendo una superficie acabado tipo espejo, ver figura 7.8



Fig. 7.8 Probetas pulidas acabado tipo 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 (90 lb·in<sup>2</sup>). 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.

### **7.3 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 utilizó para ensayos 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 el 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

#### **7.3.1 Subsistema cámaras de erosión.**

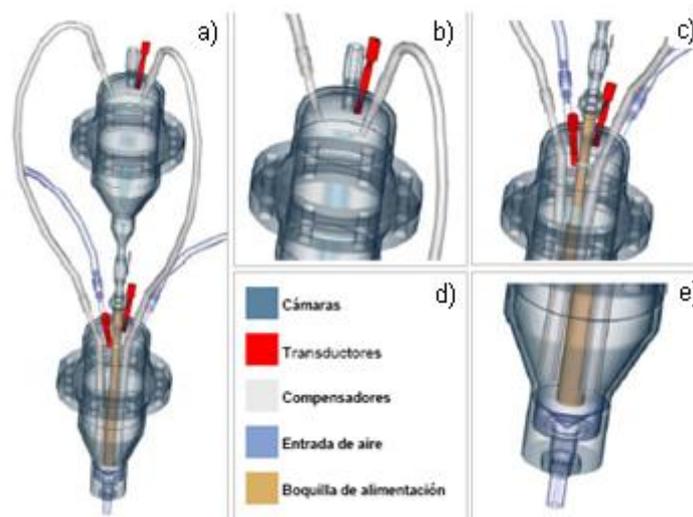
Los principales componentes utilizados fueron bridas ASTM A105, conexiones ASTM A106 y tubos sin costura en cedula 80, ver figura 7.9. Esto permitiría contar con un equipo con capacidades de operación de hasta 10.34 bar en el sistema internacional o métrico.

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 realizó en las tapas de cada una de las cámaras, ver figura 7.9

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.

Se diseñó un sistema de compensación del aire con la finalidad de tener las dos cámaras con la mínima diferencia de presiones ver figura 7.12, el sistema recibió el aire de la cámara de mezcla para ser inyectado en la cámara superior, reduciendo así con esto las caídas de presión presentadas y los tiempos tan cortos de la prueba. Respecto al 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



**Fig. 7.9 Subsistema cámaras.**  
**(a) Subsistema cámara, (b) Cámara Superior, (c) Cámara inferior, (d) Nomenclatura, (e) Salida.**  
**Transductores**

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

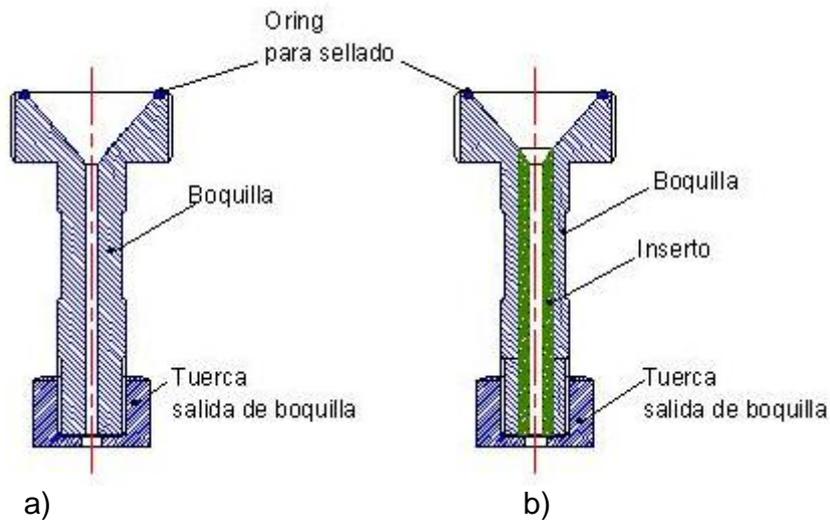


Fig. 7.10 Diseño de boquillas.  
(a) Diseño inicial Boquilla una pieza, (b) Inserto

### 7.3.2 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 ver figura 7.11(a). Así mismo se desarrollo el sistema sujeción del eje el cual fue unido a los espárragos ver figura 7.11(c). La fijación del ángulo se realizó por medio de una aguja indicadora, ver figura 7.11.

La variable de distancia de impacto fue controlada mediante del uso de espárragos que se deslizarían dentro de guías. Mismos que fueron sujetos por medio de tuercas, ver figura 7.11(b).

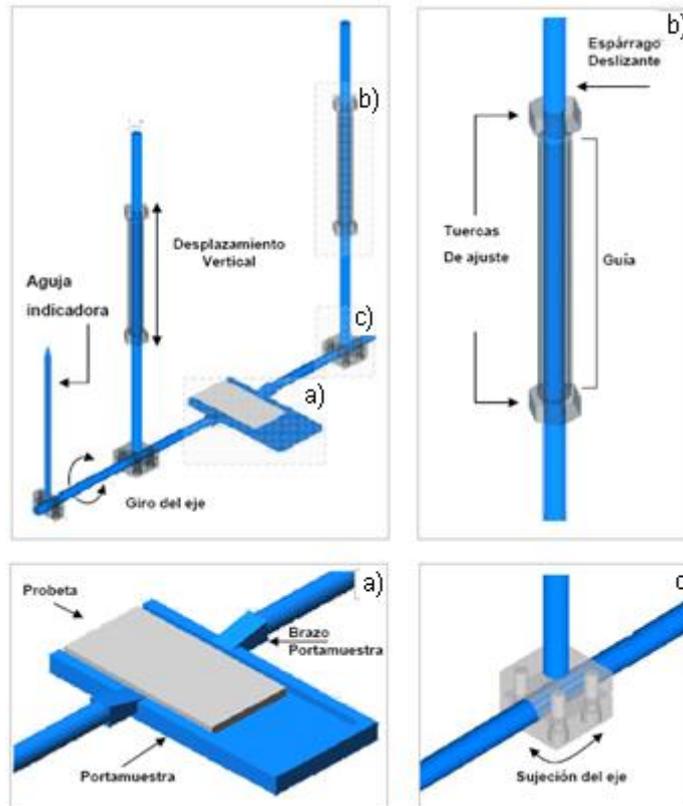


Fig. 7.11 Diseño del sistema portamuestras.  
 (a)Desplazamiento vertical de guías. (b) Portamuestras, (c) sujeción del eje.

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 realizaron a la placa.

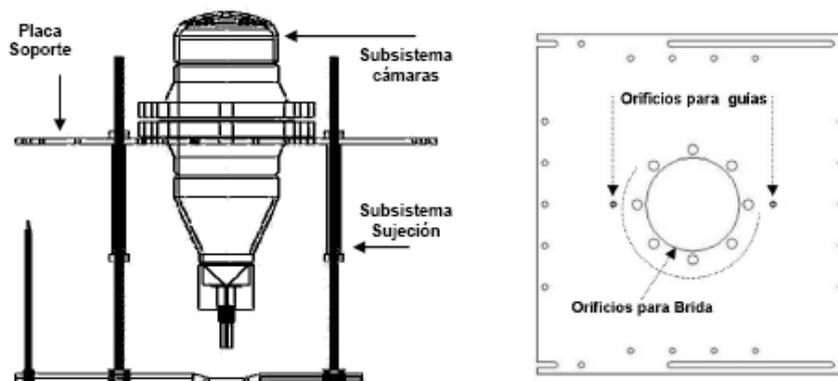


Fig.7.12 Esquema representativo de placa soporte.  
Izquierda vista frontal. Derecha vista superior

### 7.3.3 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.  
(b)

### 7.3.4 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 ella depende la energía cinética con la que se impacta 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 6.5.4

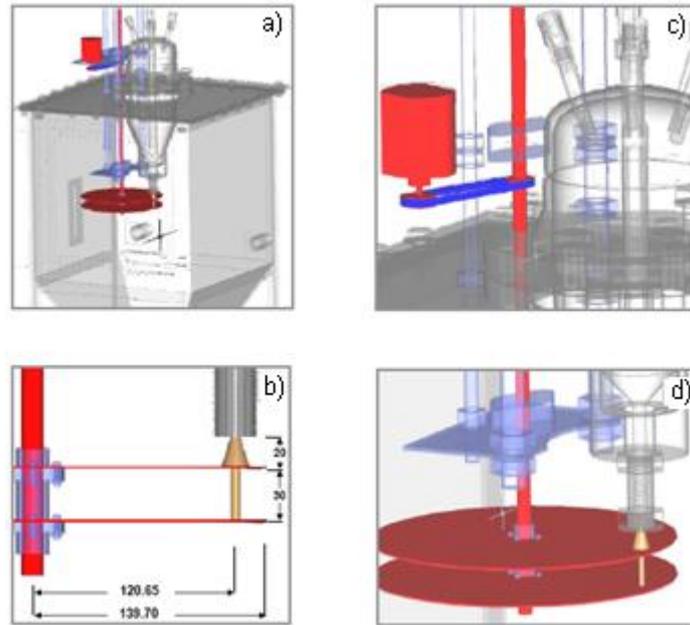
Las principales restricciones en el desarrollo del equipo de determinación de velocidad de partícula DD fueron:

- 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 del ensayo
- Por cuestiones de seguridad se decidió que el diseño permitiera que la operación del subsistema fuera dentro de la cabina y con esta 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 mas 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 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 (solo sin el orificio), ver figura 7.14 (a).

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,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.

### **Análisis del orificio del disco superior y su velocidad angular.**

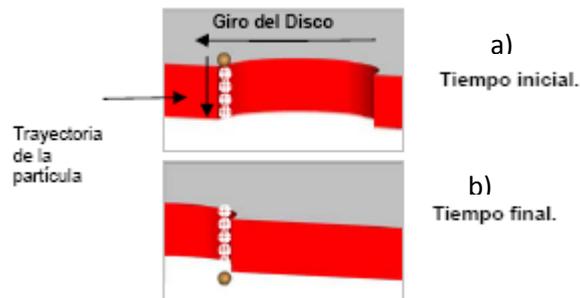
Se analizaron los tamaños de partícula 425, 300, 212 y 150  $\mu\text{m}$  los cuales conforman aproximadamente el 97% de la distribución de arena a utilizar. La velocidad de la partícula supuesta para este análisis fue de  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , para diferentes velocidades de giro del disco.

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

Las revoluciones del disco utilizadas en el presente estudio analítico fueron: 1667, 2000, 2222, 3333 rpm, produciendo huellas con un ángulo de desfasamiento de  $15^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  respectivamente.

La consideración realizada para que se diera con éxito el paso de la partícula a través del disco fue la siguiente: 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 sea impactada en la superficie del disco inferior.

## 7.4 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.

### 7.4.1 Caracterización de la partícula erosiva.

La arena fue proporcionada en costales de 50 kg., obtenida directamente de la línea por personal de Terramar, 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.

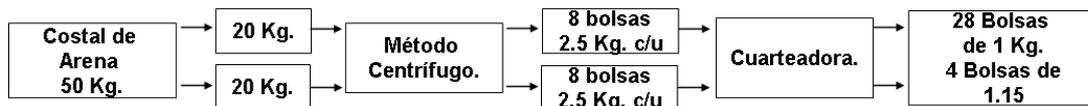


Fig.7.16. Procedimiento para la obtención de la arena.

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

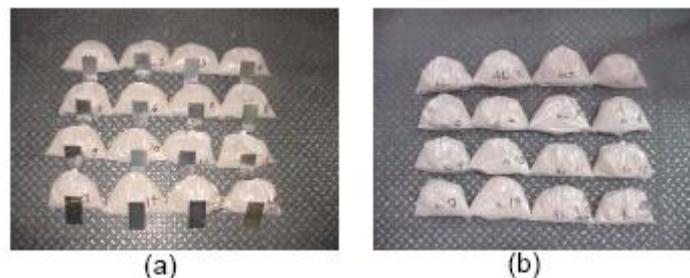


Fig. 7.17. Arena utilizada para los ensayos (Proporcionada por la empresa Terramar).  
 (a) arena utilizada para los ensayos en el acero grado herramienta H-13. (b) Arena utilizada para ensayos de alimentación de partícula.

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.

#### **7.4.2 Caracterización del acero a ensayar.**

Fueron recibidas las probetas de acero grado herramienta H13 por parte del proveedor TERRAMAR 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 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, 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 mantenidas en un baño con acetona dentro de la cámara de ultrasonido por un tiempo de 15 minutos. Las piezas fueron secadas para después ser pesadas en una balanza analítica.

### 7.4.3 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™, figura 7.19. La presión utilizada para las pruebas fue de 1.379 bar (20 Lb·in<sup>2</sup>) y el fluido utilizado fue aire seco, a una temperatura 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 calibrados en el equipo de pruebas, para cada cambio de este, figura 7.20 por medio de la aguja de ángulo.



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, integrados a éste. 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 el de sin presurizar (que fueron aproximadamente de 465 s). 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, las cuales fueron previamente homogenizadas con una

cuarteadora. Fueron obtenidas muestras de arena de cada minuto para cada una de las pruebas, para que posteriormente fueran pesadas.

#### **7.4.4 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 $\mu\text{m}$ .
Forma de la partícula:	Redonda. (figura 8.16)
Carga:	1 Kg.
Alimentación de partícula:	2.46 $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ (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 $\mu\text{m}$ . (tabla 8.8)
Presión de la cámara de mezcla:	1.379 bar (20 $\text{lb}/\text{in}^2$ ).
Fluido conductor:	Aire seco (-40°C punto de rocío).
Temperatura de prueba:	Ambiente.
Diámetro boquilla:	5 mm.
Distancia de impacto:	50 mm.
Ángulos de impacto:	20°, 40°, 75°, 90°.
Velocidad de partícula:	No determinada.

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* descrito en la sección 5.6 de esta tesis.

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.

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. Asimismo fue utilizado para monitorear el diámetro interno de la boquilla. Ya que este no debe exceder más del 10% según ASTM G76 [37].

Finalmente se obtuvieron los valores de pérdida en masa y desgaste erosivo, con sus respectivos gráficos correspondientes de desgaste erosivo con respecto al ángulo de impacto y dureza de la partícula.

# CAPÍTULO VIII

## 8.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

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 (sección 8.2 y 8.3).

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<sup>0</sup>, 40<sup>0</sup>, 75<sup>0</sup> y 90<sup>0</sup>.

### 8.1 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 tuvo 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 contemplada en siguientes pruebas. Para ello, 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.

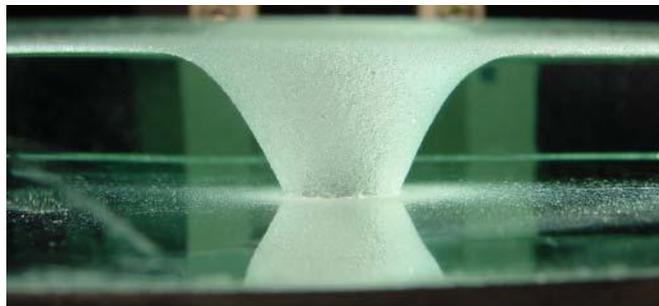


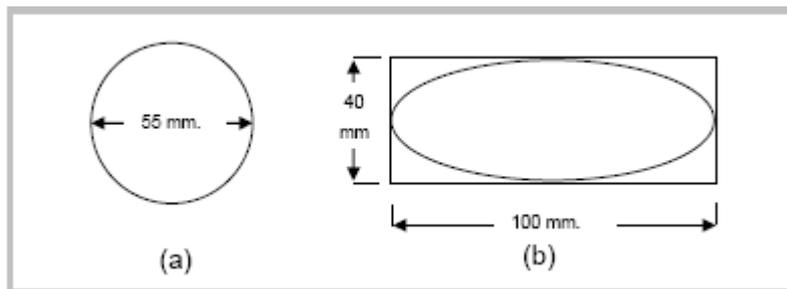
Fig. 8.2 Erosión en placa de vidrio de 12 mm. Vista lateral.

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



**Fig. 8.3 Erosión en vidrio.**  
(a) Ensayo a impactos de  $90^\circ$  (b) Ensayo a impactos a  $20^\circ$

La dispersión de partículas fue interpretada mediante la medición de las huellas, en donde para el caso de impactos a  $90^\circ$ , se midió en un diámetro promedio de 55 mm, mientras que en el vidrio impactado a  $20^\circ$  la elipse se encuentra limitada dentro de un área rectangular de 40 x 100 mm, figura 8.4.



**Fig. 8.4 Dimensiones de huella obtenidas en vidrio.**  
(a) erosionado a  $90^\circ$ . (b) erosionado a  $20^\circ$

En cuanto a aspectos de dimensión, las huellas de desgaste obtenidas pueden ser utilizadas como una aproximación a las huellas que se lograron en las pruebas en el acero grado herramienta. Por lo tanto en demás ensayos 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  $90^\circ$ , 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 puede no ser alcanzada por 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 siguiente diseño, realizar ajustes tanto en las entradas de aire y 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 su objetivo de éste fue únicamente evaluar la funcionalidad del mismo.

### 4. Partículas de arena en el ambiente.

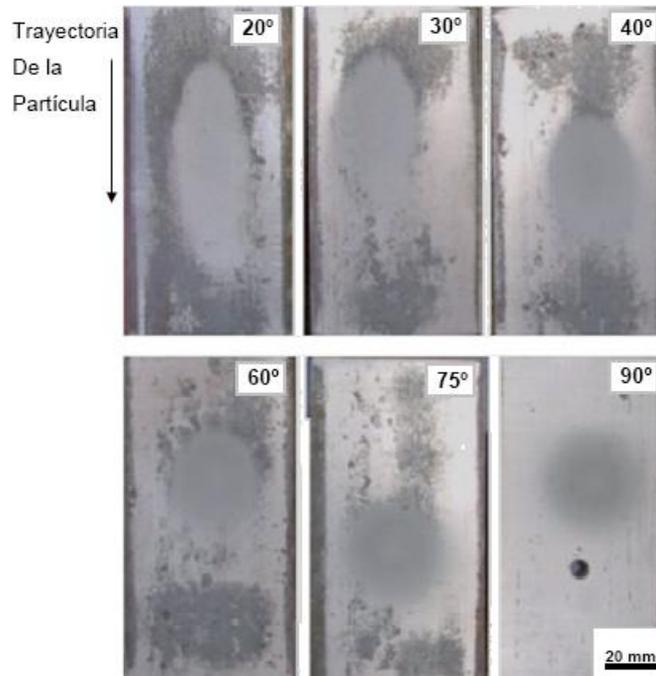
Se presentó una gran cantidad de finos en el ambiente durante las pruebas por lo que para las siguientes pruebas debe ser considerado el uso de una cabina y sistemas de filtración.

5. No se contó con un control de las presiones del sistema durante la prueba respectiva, generándose una caída de presión. El gradiente presentado fue de 4.15 a 1.379 bar (60 a 20 lb·in<sup>2</sup>).

## **8.2 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 pequeños 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 obtenidas en ella, demuestran que la combinación de las huellas generadas en el ángulo de impacto de  $20^{\circ}$  y  $90^{\circ}$  generan tamaños de estas de  $63 \times 34$  mm. Esta combinación puede ser vista en la figura 8.6, donde la huella a el ángulo de impacto de  $90^{\circ}$  resulta en un ancho de 34 mm, mientras que la ocasionada por el impacto de partículas a  $20^{\circ}$  resulta ser mas larga a, aproximadamente, 63 mm.

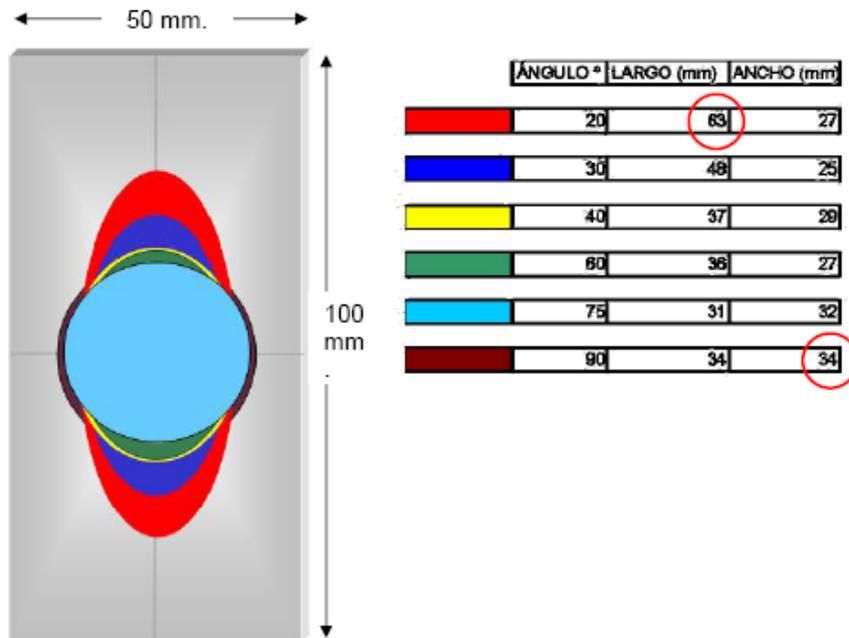


Fig. 8.6 Representación esquemática de las huellas obtenidas en el acero AISI 1018.

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

Los datos de masa se encuentran en gramos.

El desgaste 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 cuantificar la pérdida.

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 sus dimensiones fueron de 35 mm de diámetro promedio, 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.

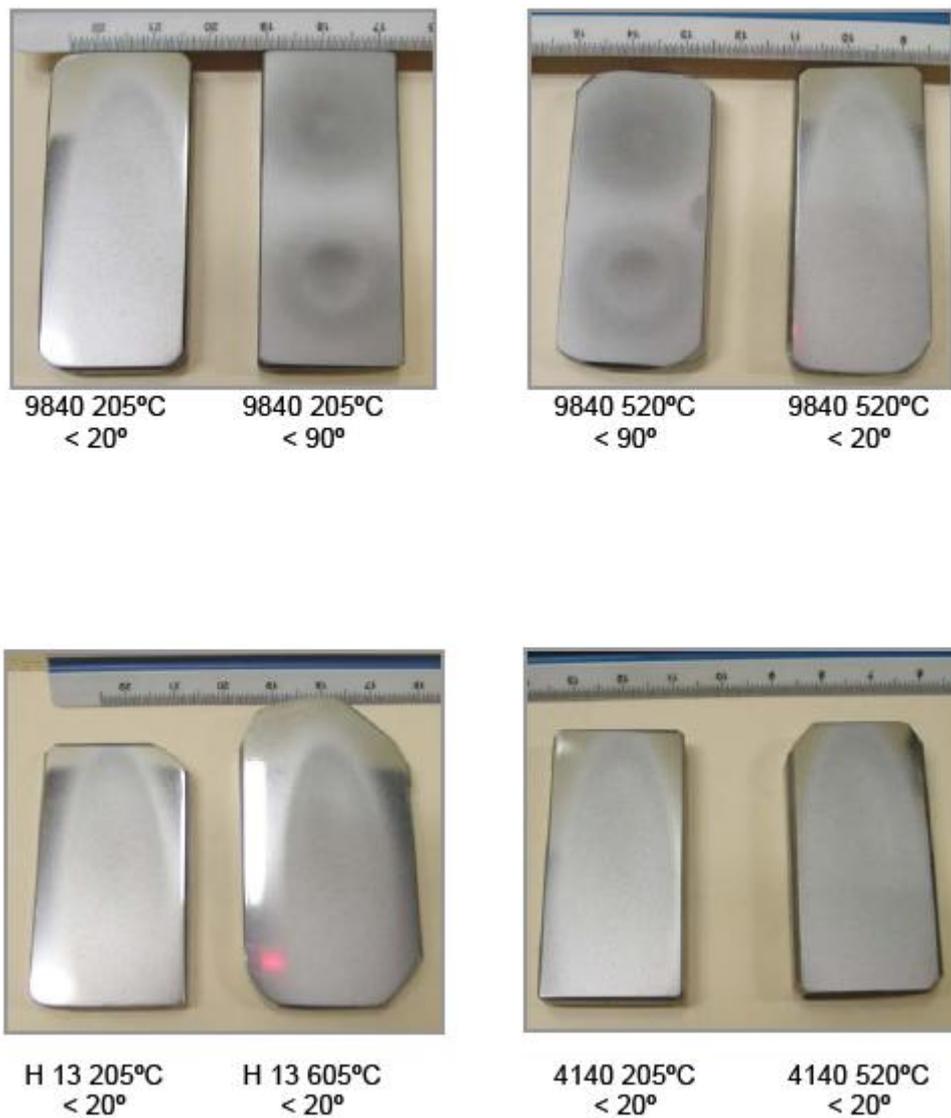


Fig.8.7 Probetas de aceros grado herramienta después de la erosión.

### 8.2.1 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 fueron utilizadas para los ensayos del acero grado herramienta H-13, siendo de 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.

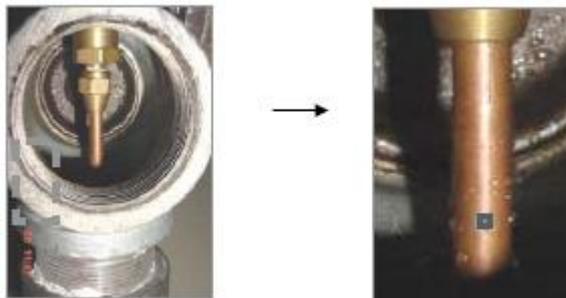
En lo que respecta a la selección del espesor la decisión fue en base a la pérdida de material mostrada en los aceros grado herramienta, la cual no mostró una profundidad excesiva y sí una pérdida de masa aceptable. Se analizó el máximo espesor para que las probetas fueran medidas por la balanza analítica 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.

### **8.2.2 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 descrita en la sección 7.3.2, presentó una mayor vida útil al ser utilizada en 16 ensayos y mantenerse el diámetro interno con una variación de menos del 10% como lo 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 se considera 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, permitió suponer establecer que la arena era forzada a salir y su alimentación no ocurría por gravedad ya que la prueba para el siguiente caso hubiese tardado aproximadamente 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 y la cámara de mezcla menor, por ello 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 en 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, para el caso de las pruebas del acero AISI 1018, 6.25 a 2.75 bar para los ensayos realizados en el acero grado herramienta). Por lo que se realizaron 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 un aire seco.



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

### **8.3 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.



Fig. 8.9 Sistema Máquina de Erosión

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

### 8.3.1 Subsistema de erosión.

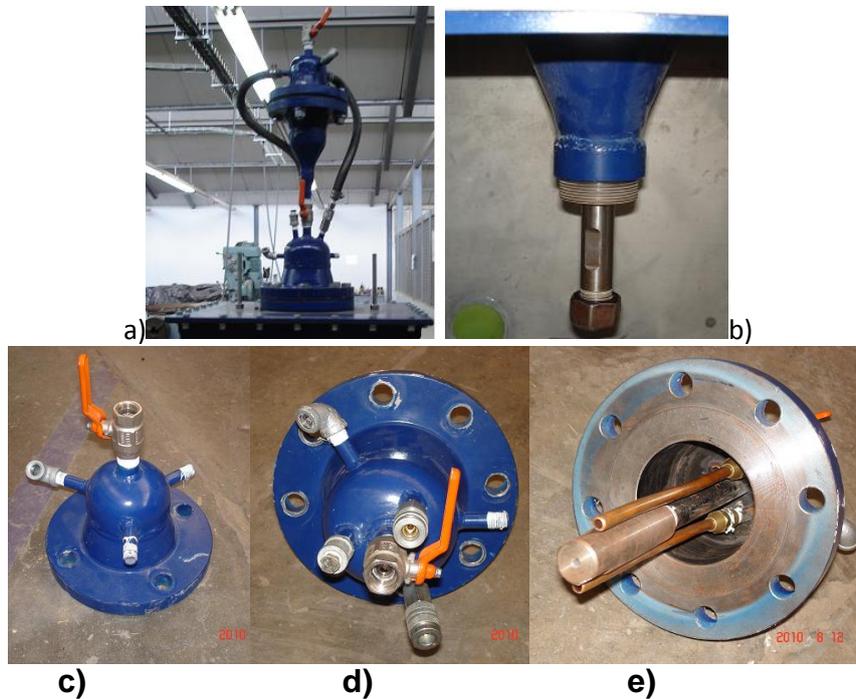
El subsistema de erosión fue acomodado y mantenido en posición vertical por medio de un espárrago pasado sobre las bridas de cada una de las cámaras.

La figura 8.10 (a), muestra los componentes que se encontraron fuera de la cabina mientras que la figura 8.10 (b) presenta los que se encuentran dentro de la misma.

Se obtuvo el arreglo en la tapa superior de la cámara depósito de arena con cuatro entradas, de las cuales tres fueron equidistantes (dos permiten 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, 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, figura 8.10 (e).

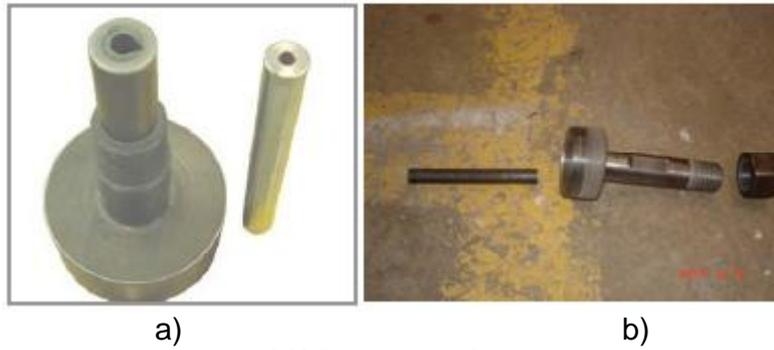
El arreglo obtenido en la parte superior de la cámara de mezcla, figura 8.10 (d) esta constituido por seis conectores equidistantes (dos utilizados para la entrada de aire, dos de recirculación de aire que conectan con la cámara deposito, uno para la medición de presión y uno mas opcional) mientras que uno central permite la entrada de la arena proveniente de la cámara deposito.

En la parte interna de la cámara de mezcla se obtuvo el arreglo de recirculación de aire el cual fue conectado con la cámara deposito, figura 8.10 (e). Esto redujo la diferencia de presión existente entre las cámaras. Con este arreglo se eliminaron los tiempos cortos presentados en la máquina prototipo.



**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

Se realizaron los dos diseños de boquilla propuestos en el capítulo 7 (sección 7.4.1), ver figura 8.11.



**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.

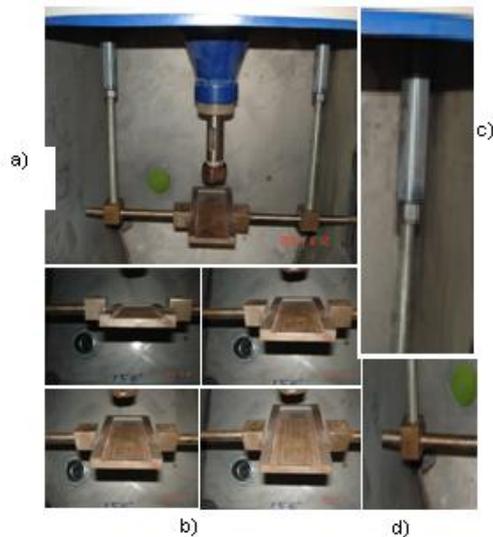
### 8.3.2 Subsistema sujeción.

Los resultados obtenidos en el sistema sujeción son mostrados 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 variable 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 (1,4). El ángulo de impacto es medido y controlado con la aguja indicadora.

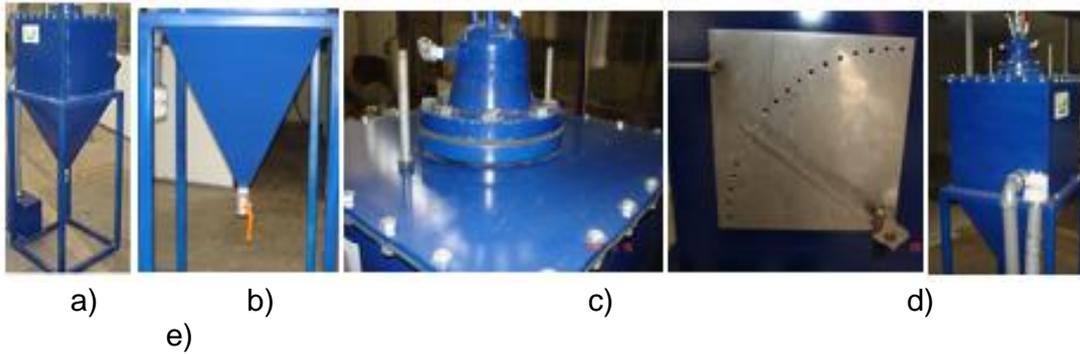
La construcción de los brazos que unen el eje con el portamuestra permitió que el centro del eje de rotación estuviera en el mismo nivel que el de la superficie de la muestra a impactar. Así cualquiera que sea el ángulo de impacto, la distancia boquilla-muestra (distancia de impacto) no variara, figura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



**Fig. 8.12 Subsistema Portamuestra.**  
 (a) Vista General, (b) Portamuestra girado a diferentes ángulos, (c) Guía desplazamiento vertical, (d) Arreglo eje.

### 8.3.3 Subsistema Cabina.

Se obtuvo 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 deben 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 (figura 8.13 (b)). 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 que contiene la placa, donde desempeña una función de unión entre los subsistemas cámara y sujeción además de contribuir en el sellado de la cabina y permitir que el equipo se encuentra en una correcta nivelación (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 eliminar la emisión de finos en el ambiente, ya que cuenta con sistemas de filtración en la parte trasera, figura 8.13 (e).



**Fig. 8.13 Subsistema cabina.**  
 (a) Cabina, (b) Descarga y ángulo de salida, (c) Placa soporte perspectiva superior, (d) placa de giro, (e) Filtración.

### 8.3.4 Subsistema Velocidad (método doble disco).

Se construyó el subsistema de velocidad con las siguientes características:

Los tres espárragos utilizados como guías permiten el ajuste por medio de sus tuercas y contratuercas 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

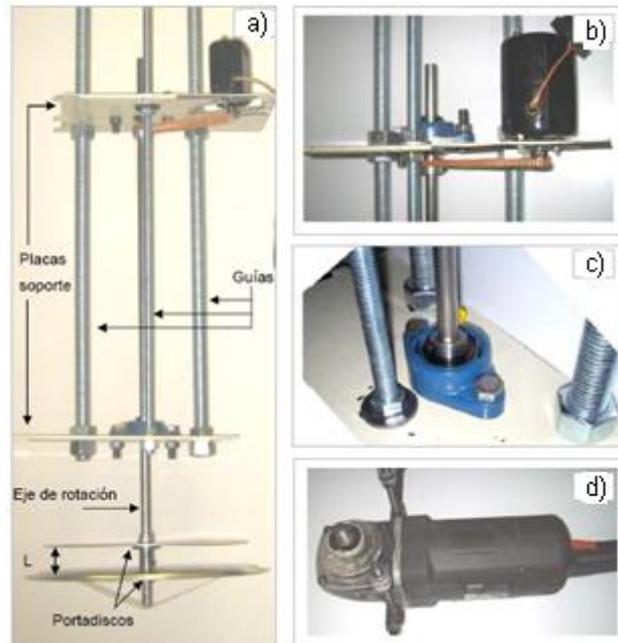
La placa de soporte superior, además de nivelar el eje, tiene la función de realizar el ajuste del sistema de poleas al desplazar el motor y su polea impulsora sobre sus guías, ver figura 8.14 (b).

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 abrasivas entran 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 mm, por lo que es un radio mucho mayor que puede cubrir la huella presentada a impactos a  $90^\circ$ , como fue el caso del acero

AISI 1018 donde la huella de erosión tiene un radio de 17 mm y el acero grado herramienta 9840 donde la huella de erosión tiene un radio de 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 de velocidad angular del DD son mostrados en la tabla 8.2, considerando la 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  $15^{\circ}$  a  $60^{\circ}$ .

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

V part. m-s-1	Angulo de desfaseamiento. (°)										
	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 desfaseamiento 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 desfaseamiento serían muy bajos lo que dificultaría la lectura del arco de desfaseamiento.

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 m-s-1 de la podrían pasar libremente por el orificio del disco superior fueron obtenidos los siguientes resultados: que se presentan en tabla 8.3

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 m·s <sup>-1</sup>	Exposición Disco td (s)	Trayectoria Partícula tp (s)	td-tp (s)	Ángulo entre huellas (°)
425 µm	1667	20	2.1722.E-04	1.2188.E-04	9.5340.E-05	15°
	2000	20	1.8105.E-04	1.2188.E-04	5.9170.E-05	18°
	2222	20	1.6296.E-04	1.2188.E-04	4.1080.E-05	20°
	2778	20	1.3035.E-04	1.2188.E-04	8.4700.E-06	25°
	3333	20	1.0864.E-04	1.2188.E-04	-1.3240.E-05	30°
300 µm	1667	20	2.2315.E-04	1.0938.E-04	1.1377.E-04	15°
	2000	20	1.8600.E-04	1.0938.E-04	7.6620.E-05	18°
	2222	20	1.6742.E-04	1.0938.E-04	5.8040.E-05	20°
	2778	20	1.3391.E-04	1.0938.E-04	2.4530.E-05	25°
	3333	20	1.1116.E-03	1.0938.E-04	1.0022.E-03	30°
212 µm	1667	20	2.2733.E-04	1.0058.E-04	1.2675.E-04	15°
	2000	20	1.8948.E-04	1.0058.E-04	8.8900.E-05	18°
	2222	20	1.7055.E-04	1.0058.E-04	6.9970.E-05	20°
	2778	20	1.3642.E-04	1.0058.E-04	3.5840.E-05	25°
	3333	20	1.1370.E-04	1.0058.E-04	1.3120.E-05	30°
150 µm	1667	20	2.3028.E-04	9.4380.E-05	1.3590.E-04	15°
	2000	20	1.9194.E-04	9.4380.E-05	9.7560.E-05	18°
	2222	20	1.2276.E-04	9.4380.E-05	2.8380.E-05	20°
	2778	20	1.3818.E-04	9.4380.E-05	4.3800.E-05	25°
	3333	20	1.1517.E-04	9.4380.E-05	2.0790.E-05	30°

(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°, ya que para la velocidad de giro que propiciará un desfase de huella de 30° no permite el paso de las partículas de un tamaño de 425µm 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 éstas son cambiadas, en consecuencia las velocidades angulares que se requieren tienen que ser distintas.

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 desfase, 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 (2)) se pensó que podía entregar velocidades de 3500 r.p.m. ya que las velocidades al vacío fueron de 30000 r.p.m. pero el sistema proporcionó solo 1500 r.p.m. Esto fue principalmente por el amperaje que demandaba el sistema, posteriormente se usó un motor de 6000 r.p.m. ac/dc con 15 amperes que mostró un buen comportamiento en el subsistema, figura 8.14 (4).

## 8.4 Caracterización del sistema de erosión en el H13.

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

### 8.4.1 Resultados de la caracterización de las partículas erosivas.

#### Distribución de tamaños.

Los resultados de granulometría se muestran en la tabla 8.4, 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

Nº 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

Nº AFS	47
--------	----

% Finos	2.7
---------	-----

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

Nº 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

Nº AFS	47
--------	----

% Finos	2.3
---------	-----

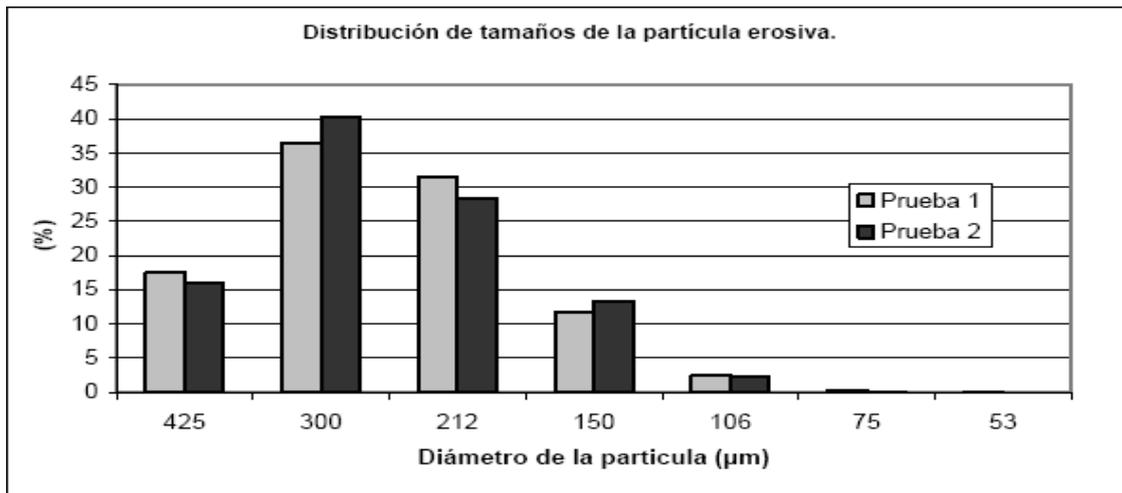


Fig. 8.15 Comparación de los porcentajes encontrados de cada tamaño de partícula en las pruebas granulométrica.

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].

### Geometría.

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.

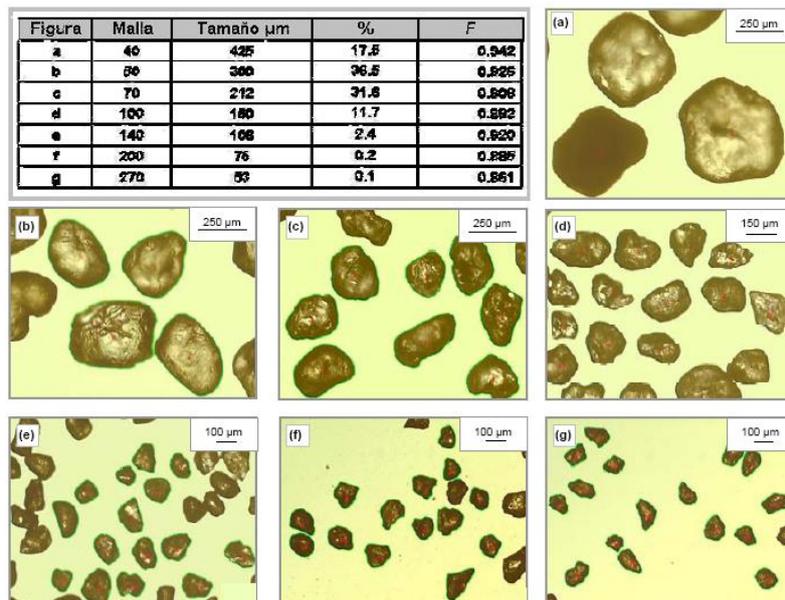


Fig. 8.16 Factor de redondez de la arena utilizada.

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 0.94 a 0.89 para el 97% del total de la arena utilizada.

#### 8.4.2 Resultados de caracterización del material a impactar.

##### Caracterización microestructural.

Las microestructuras observadas fueron ferrita con carburos para el caso de recocido, y de martensita revenida para los casos de temple y revenido.

Algunas micrografías son presentadas en las figuras 8.17.

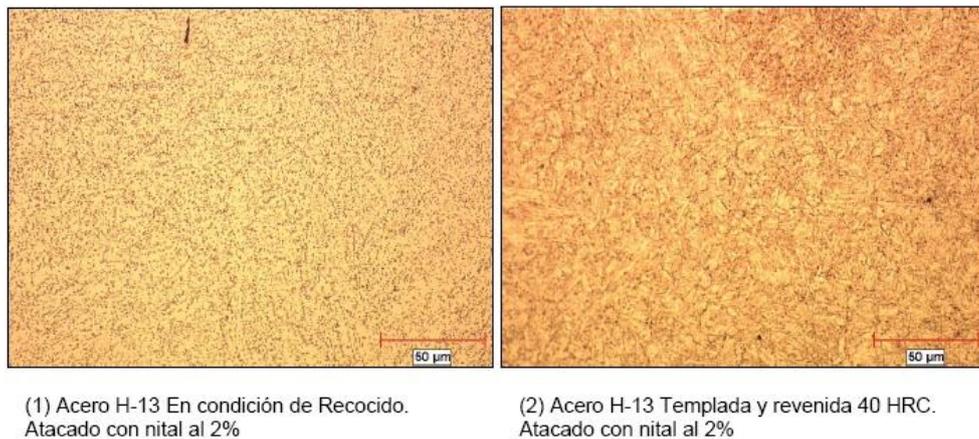


Fig.8.17 Metalografías en acero grado herramienta H-13

##### 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 proveedor vs 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 (1) en el análisis químico (tabla 8.7) están dentro de los límites de composición reportados en la tabla 2.3 de la designación AISI (2).

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	...

### 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 contaron 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 material 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

### 8.4.3 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 (150 g/min,  $2.5 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ ), debido a que la pendiente de la ecuación se encontró en -0.2.

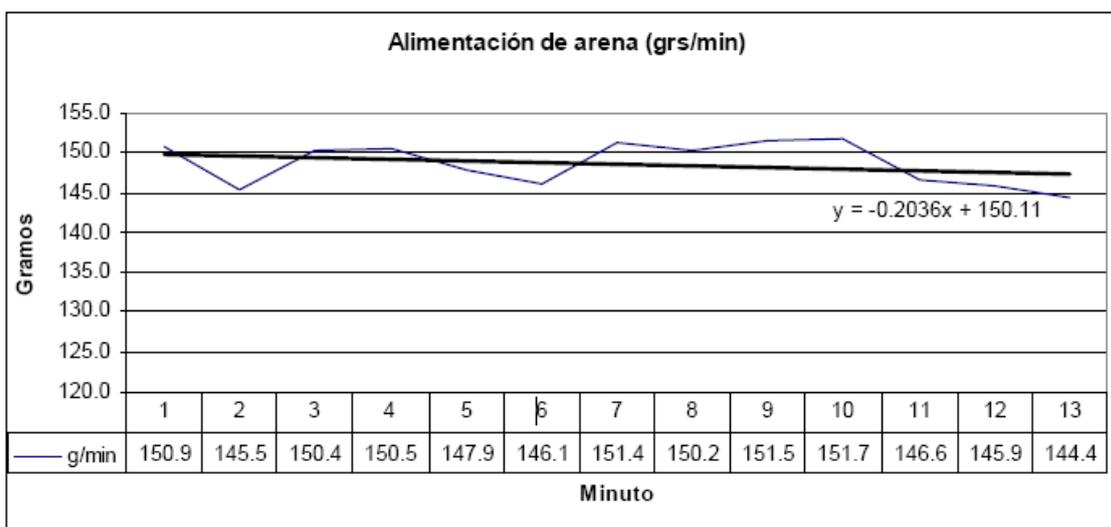


Fig. 8.18 Alimentación de la partícula.  
Prueba realizada para descarga de 1950 g de arena sílica.

#### 8.4.4 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

#### Probetas erosionadas.

El área de las huellas para cada una de las condiciones se encontró muy similar para ángulos de impacto iguales sin importar la dureza de la muestra, figura 8.19. Por lo que se infiere que el chorro de mezcla aire-partícula fue una condición bien controlada dentro del sistema.

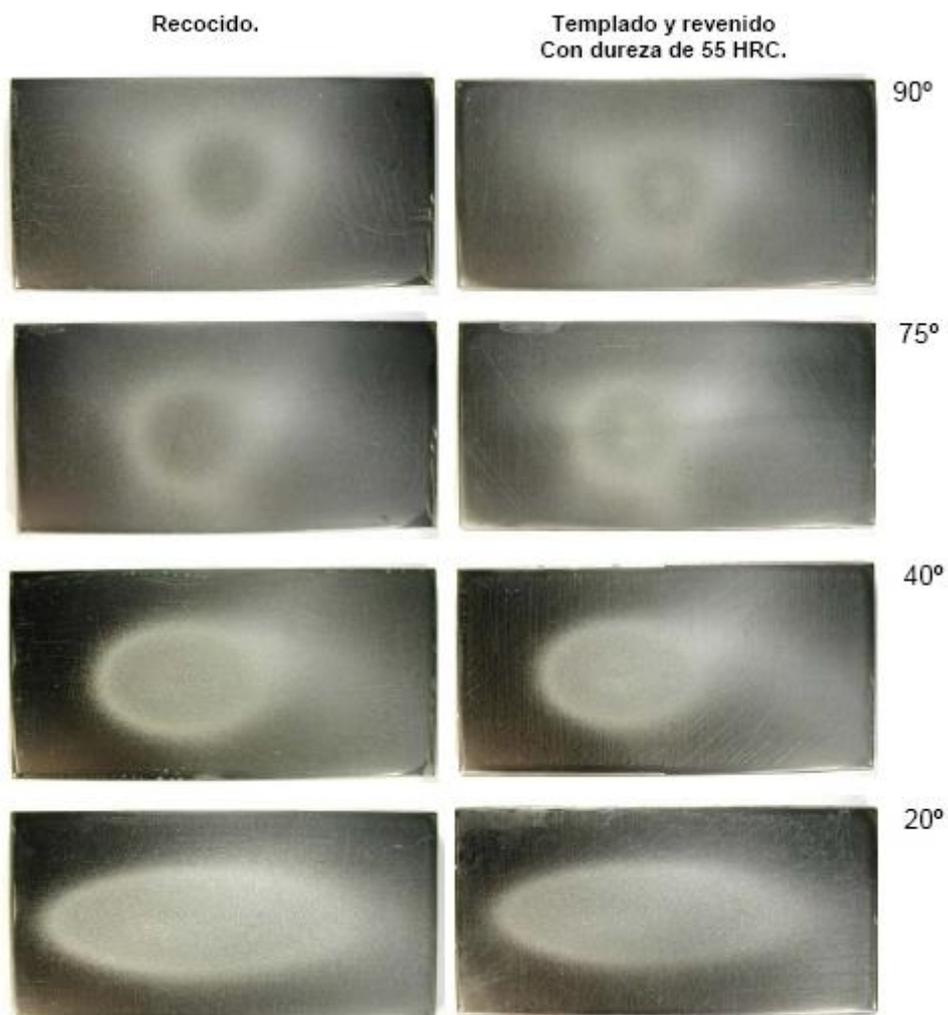


Fig. 8.19 Huellas de erosión en acero H-13.  
La dirección de impacto fue de izquierda a derecha a excepción del ángulo de 90°

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 <sup>2</sup> )	Perímetro (mm)	Caja (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 debido la erosión fueron realizadas dentro del los limite que marco la dimensión de la probeta, por lo que se supone que toda la masa de partículas erosivas utilizada impactó la superficie de la probeta. Por ello, 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.

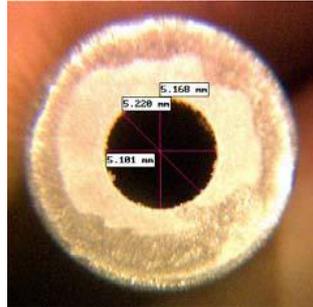


Fig. 8.20. Inspección del diámetro de boquilla.

## 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.

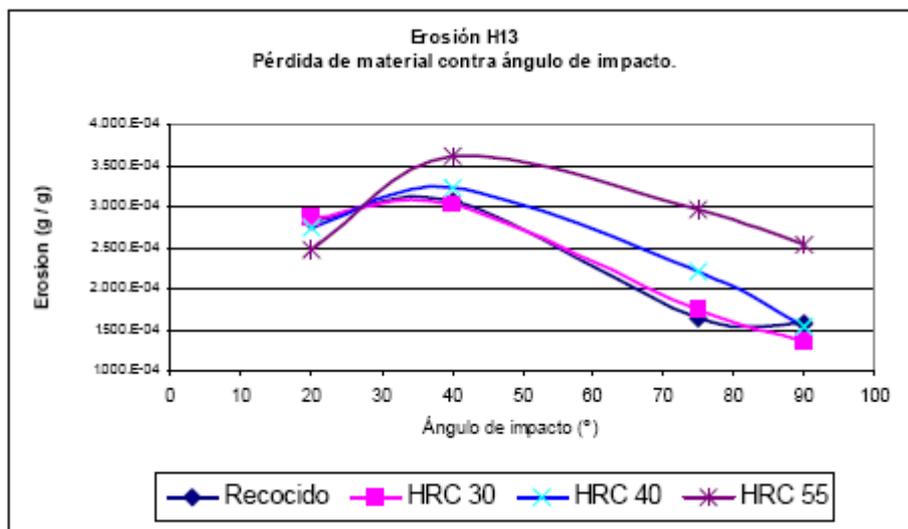


Fig.8.21 Desgaste erosivo con respecto al ángulo de impacto.

El comportamiento de los aceros en las condiciones ensayadas presentaron el mecanismo de desgaste dúctil, debido a que el máximo valor de desgaste en

todas las condiciones ensayadas se encontró en ángulos de impacto de  $40^{\circ}$  (relativamente pequeños) 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  $90^{\circ}$  y  $75^{\circ}$  (grandes) en condición de recocido, templado y revenido con durezas de 30 y 40 HRC fue menor. Se asume que se debe a que la ductilidad del material absorbe gran parte de la energía cinética al indentar la superficie [12]. Además dichos ángulos permitieron una menor pérdida de material dado que es muy difícil que ocurran en un impacto único, requiriéndose impactos posteriores para el desprendimiento ulterior de la plaqueta, mecanismo 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  $90^{\circ}$  que al ángulo de  $20^{\circ}$  esto fue debido a que el comportamiento del mecanismo frágil que mostró dicho acero. 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 materiales erosionados, a excepción del acero H13 con dureza 55 HRC a  $20^{\circ}$  exhibieron un mayor desgaste erosivo comparado con los erosionados a un ángulo de impacto a  $90^{\circ}$ . Aunque la diferencia, fue pequeña a medida que se incrementó la dureza en el material llegando a casos como el comportamiento del material con una dureza 55 HRC en donde los valores de desgaste para los ángulos de impacto a  $20^{\circ}$  y  $90^{\circ}$  se encuentran ligeramente arriba, muy cercanos. Un comportamiento similar fue analizado en la sección 4.6.1, figura 4.17 [12].

Los ángulos de impacto de  $40^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  y  $90^{\circ}$  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 sacrifican los niveles de tenacidad, por lo que el material empezará a fragilizarse [4.6.1].

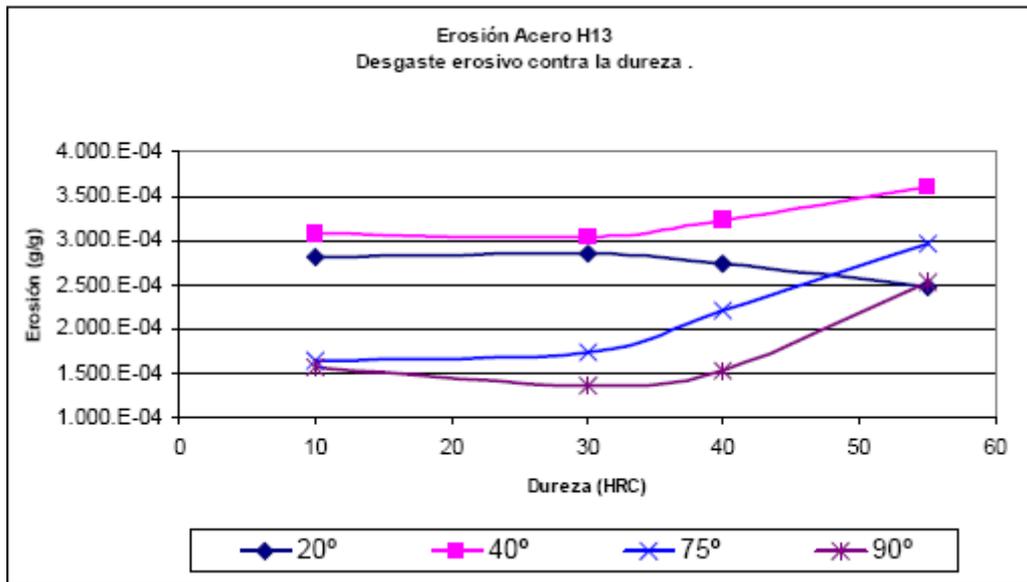


Fig. 8.22 Desgaste erosivo con respecto a la dureza.

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].

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 ver 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.

# CAPITULO IX

## CONCLUSIONES

## RECOMENDACIONES

### 9.1 Diseño del equipo.

Con respecto al diseño del equipo se concluye:

- La elaboración de la máquina prototipo permitió facilitar el desarrollo del equipo final de pruebas.
  
- El equipo (categoría pruebas de laboratorio) diseñado y construido en el presente estudio se aproximó a las condiciones del proceso de moldeo de caja fría utilizadas en la compañía Terramar. 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 al tecnológico de Culiacán 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.

## 9.2 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.
- Se obtuvieron las curvas de desgaste por erosión para las diferentes durezas, mostrando de manera general un comportamiento dúctil en los aceros erosionados [12].
- 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°.

### 9.3 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 ya sea por el método construido (DD) o por alguno de los métodos que recomienda la ASTM G76 [37].

## Referencias Bibliográficas

- 1 Alexander; W. YA. Street, Metal in de Service of Man, penguin books, Middlesex, Inglaterra 1985.
- 2 George A. Roberts, Robert A. Cary, Tools Steel, American Society for metals, metal park, Ohio 44073
- 3 Bain E.C. Functions of the alloyings Elements in steel, American Society for metals (1939), 312 pages.
- 4 Anon, Heat of tool Steels, Iron and steel Industry 10, No. 12 (1937).
- 5 Koebel, N.K. "Methods of determining the degree of Carburization and evaluating controlled atmospheres" in controlled atmospheres ASM (1942)
- 6 Scott, H. "Dimensional Changes accompanying the Phenomena of tempering and aging of toll steels", Trans ASST9, (1926).
- 7 Hutchings I.M. "Tribology Friction and Wear of Engineering Material". Edward Arnold U.K. 1<sup>st</sup>. Edition (1992).
- 8 Leonardo Centre for Tribology at the University of Sheffield, Sheffiel UK.
- 9 Halling J. "Principles of Tribology", The Macmillan Pres, 1975.
- 10 ASM Handbook Volume 18 "Wear". ASM International Material Park Ohio, 1990, 10<sup>Th</sup> Edition.
- 11 Misya A. and Finnie I. Areview of the abrasive wear of metals Trans. ASME J. Eng. Mat. AND Tech, 104-94-101-1982.
- 12 Finnie I., Stevik G.R., Ridgely s.r.: "The influence of Impigment angle on the erosion of Ductile metals by Angular abrasive Particles" Wear 152, 91-98, 1992.
- 13 Rigney D.A. Fundamentals of friction and wear of materials, ASM, 1981.
- 14 Briscoe B.J. and Adams M.J. Tribology in particulate Technology. Adam Hilger, 1987
- 15 ASTM 676-83 "Standard practice for conducting Erotion test by solid particle"
- 16 Centro de Innovación Tecnológica de automatización de Navarra. [www.citean.com](http://www.citean.com)
- 17 ASTM 640-88 "Standard Treminology Realating wear and Erotion"

- 18 Pradip K, Saha, "A Case Study on the abrasive surface Finishing of aluminium flat sheet, the Boeing Company".
- 19 R. Sato, Y. Marimoto, K. Kobayashi, "Material removal mechanisms in non-contact ultrasonic abrasive mechanings.
- 20 Cart. Wright P.A. "Metal Finishing Handbook, Glasrow, Blackie son, Ltd, 1950.
- 21 "Desgaste erosive an cajas de corazones" Nematik S.A., Monterrey N.L. 2006
- 22 G.W. Stachowiak, Wear, Volume 241, Issue 2, 31 July 2000 Pages 214-219.
- 23 Finnien I. and Mcfadden D.H. The Mechanism of Erosion of Ductile Metals Wear 48, U.S. National Congres of applied mechanics, 1958
- 24 Ezra L. Katzin "Metal Casting & molding processes" American Foundrymens Society, 1987.
- 25 Fundamentos de Manufactura Moderna, 3ra. Edicion, Mikell P. Groover, Mc Graw Hill.
- 26 Technical bulletin "The Ashland Process", Foundry produce division. AshInd chemical, 1998
- 27 Manual de entrenamiento, "Procesos de corazones" Nematik, 2003
- 28 Daryl F. Hoyt "Sand Segregation and Surface área Cast Metals Intitute, Febrero, 1997.
- 29 Ashland Chemicals "Training Program For the Novaset Cold Box Binders", 1999, Foundry Products Division.
- 30 Vondra L.F., Dale Snider "Asistems Appraach for the Selection of tooling Material Infoundry", Cast Expo, 1993. American Foundrymens Society, Chicago Illinois.
- 31 Ken Williams and Dale Snider "Sand Core Engineering use of moder Simulations Software", Development & Validation of a new Software package: arena flow.
- 32 Parr, Robert. Principles of Mechanical Desing 1970. Pp 1, 10-28.
- 33 Ashby. M.F., Materials Selection in Mechanical Desing. Pp 5-8.
- 34 Shigley, Joseph. Diseño en Ingeniería Mecánica.
- 35 Standard Practice for Conducting Erosion Test by Solid Particle Impingement Using gas Jets. pp 305-306.

- 36 Stevenson A. Hutchings, I. The Influence of Nozzle Length on the Divergence of the Erodent Particle Stream in a glass-blast, Erosion rig. Elsevier Wear 189 (1995), pp 66-69.
- 37 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.
- 38 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.

## Plano de conjunto

