CAPÍTULO 7

METODOLOGÍA DE DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN.

7.1 Introducción.

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

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

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

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

7.2 Condiciones de prueba.

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

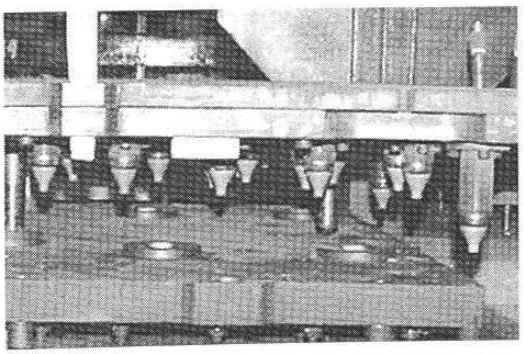


Fig. 7.1 Boquillas de soplo en máquina sopladora.

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

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

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

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

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

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.

7.3 Máquina Prototipo.

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

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

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

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

a) Exploración.

b) Ajuste de variables

7.3.1 Exploración.

Se diseño y construyó un equipo de erosión sistema boquilla, con presiones de trabajo de hasta 10.342 bar (150 lb·in^2). El diseño es mostrado en la figura 7.2.

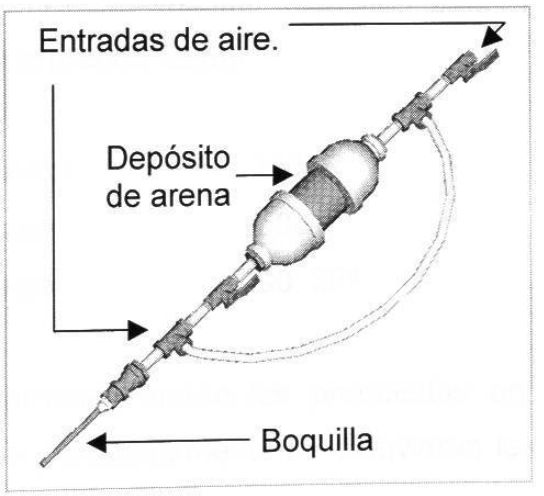


Fig 7.2 Diseño de prototipo para la etapa de exploración.

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

7.3.1.1 Huellas en vidrio.

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

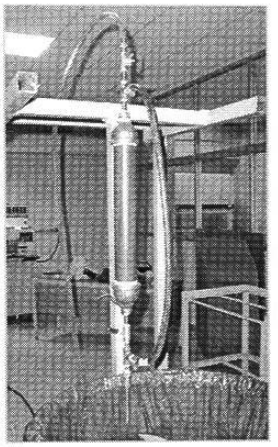


Fig. 7.3 Maquina Prototipo Etapa 1, Exploración.
Boquilla utilizada: cobre.

Las características de la prueba fueron:

Material a erosionar:	Vidrio.
Cantidad de arena:	500 g.
Angulo de impacto:	90, 20°

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

7.3.2 Ajuste de variables.

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

1. Uso de una cámara de mezcla: en este diseño se contó con una cámara de mezcla mayor, comparada con la que se tenía en el diseño del prototipo inicial permitiendo así la obtención de lecturas de presión usando un manómetro. Además se logro que las partículas fueran conducidas hasta una zona muy cercana a la boquilla de salida, figura 7.4(c).

2. Se realizó un nuevo diseño para la boquilla de salida el cual involucró el uso de material acero grado herramienta AISI D2 templado y revenido a dureza de 60-62 HRC.

3. Solución de los problemas operativos.
    a. Se realizaron modificaciones en la entrada del suministro de aire, recorriendo la entrada principal de aire a un conector T, el cual fue útil también para realizar algunas mediciones de presión, ver figura 7.4 (b). La otra entrada de aire sería directamente suministrada de la línea a la cámara de mezcla (figura 7.4 (c)).

    b. El ángulo de impacto fue controlado mediante el dispositivo mostrado en la figura 7.5(c).

    c. Arena en el ambiente. Para reducir este problema se utilizó una cabina que cubrió la boquilla y el material a impactar, figura 7.5(a).

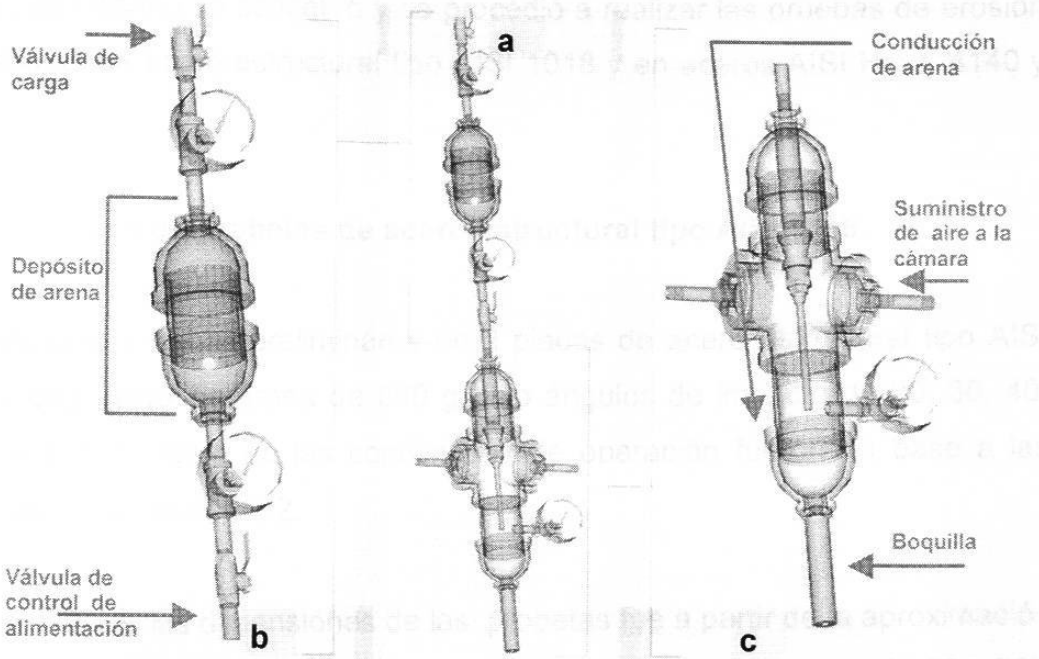


Fig. 7.4 Máquina prototipo etapa 2
(a) Diagrama esquemático máquina completa, (b) Contenedor de arena, (c) Cámara de mezcla.

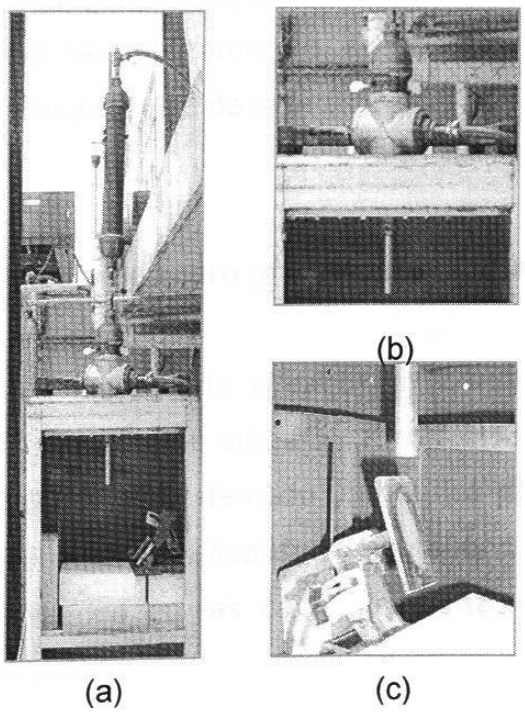


Fig. 7.5 Máquina prototipo en pruebas etapa 2
(a)Equipo completo (b) Cámara de mezcla (c) Dispositivo portamuestra.

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

7.3.2.1 Erosión en probetas de acero estructural tipo AISI 1018.

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

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

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

7.3.2.2 Erosión en probetas de acero grado herramienta.

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

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

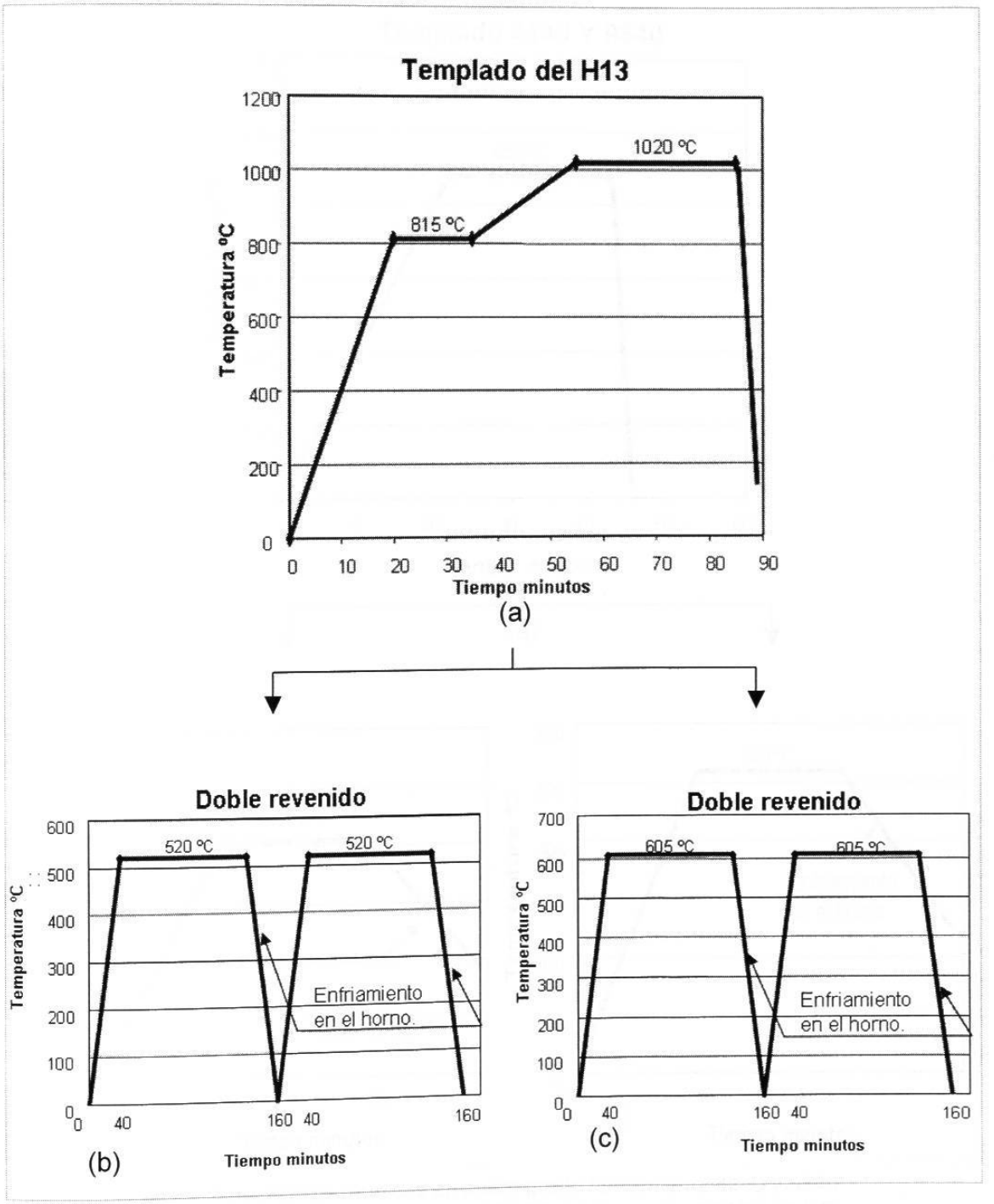


Fig. 7.6 Tratamientos térmicos en acero grado herramienta H-13.
(a) Templado 1020 °C, (b) Doble revenido 520 °C, (c) Doble revenido 605 °C [4,5,6]

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

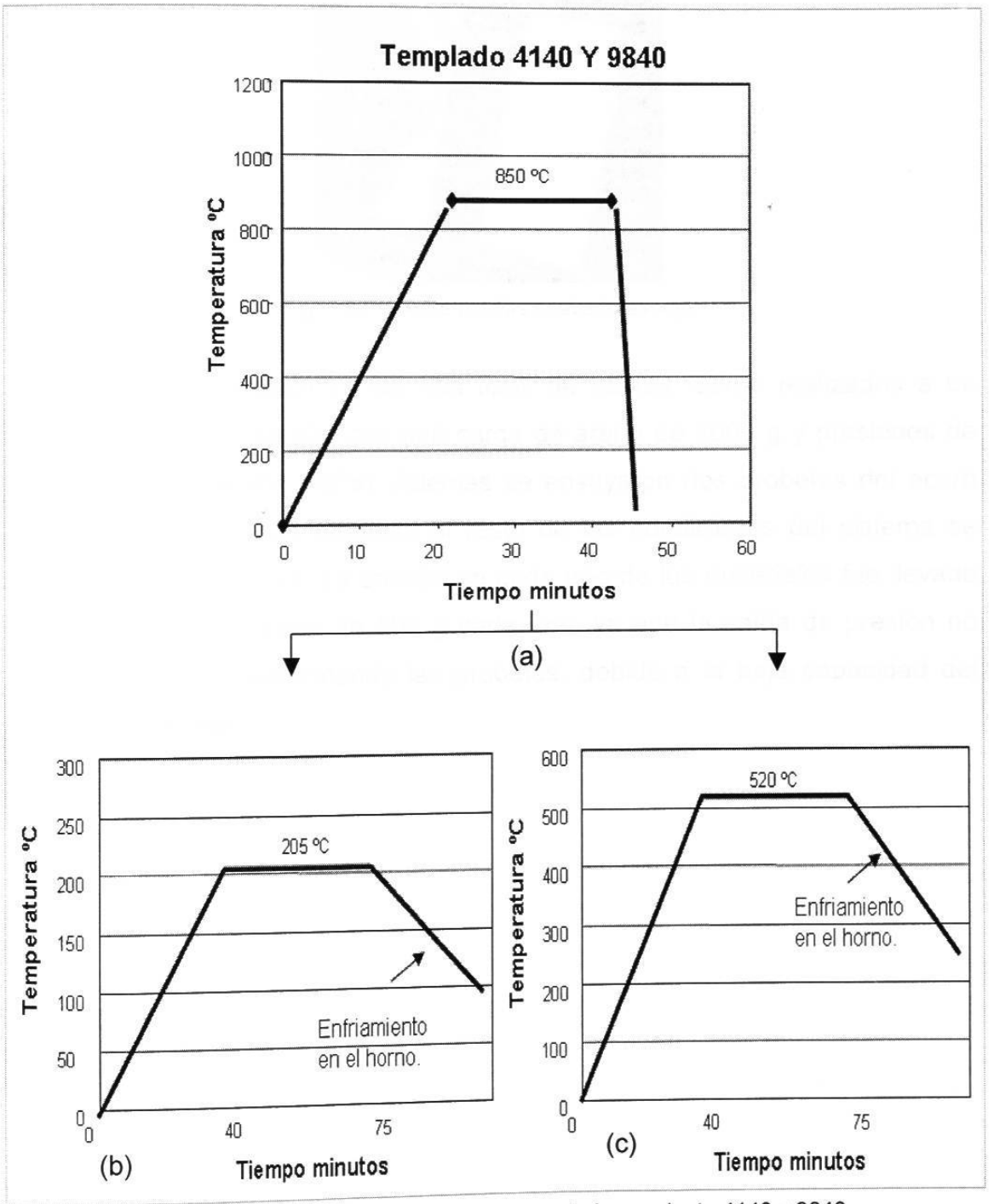


Fig. 7.7 Tratamientos térmicos en acero grado herramienta 4140 y 9840.
(a) Templado 850 °C, (b) Revenido 205 °C, (c) Revenido 520 °C [4,5,6]

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

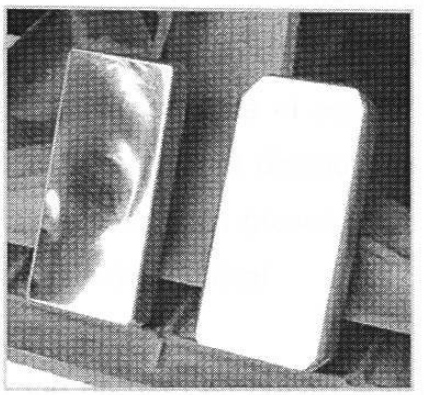


Fig. 7.8 Probetas pulidas acabado espejo.

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

7.4 Máquina de pruebas.

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

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

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

7.4.1 Subsistema cámaras de erosión.

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

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

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

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

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

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

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

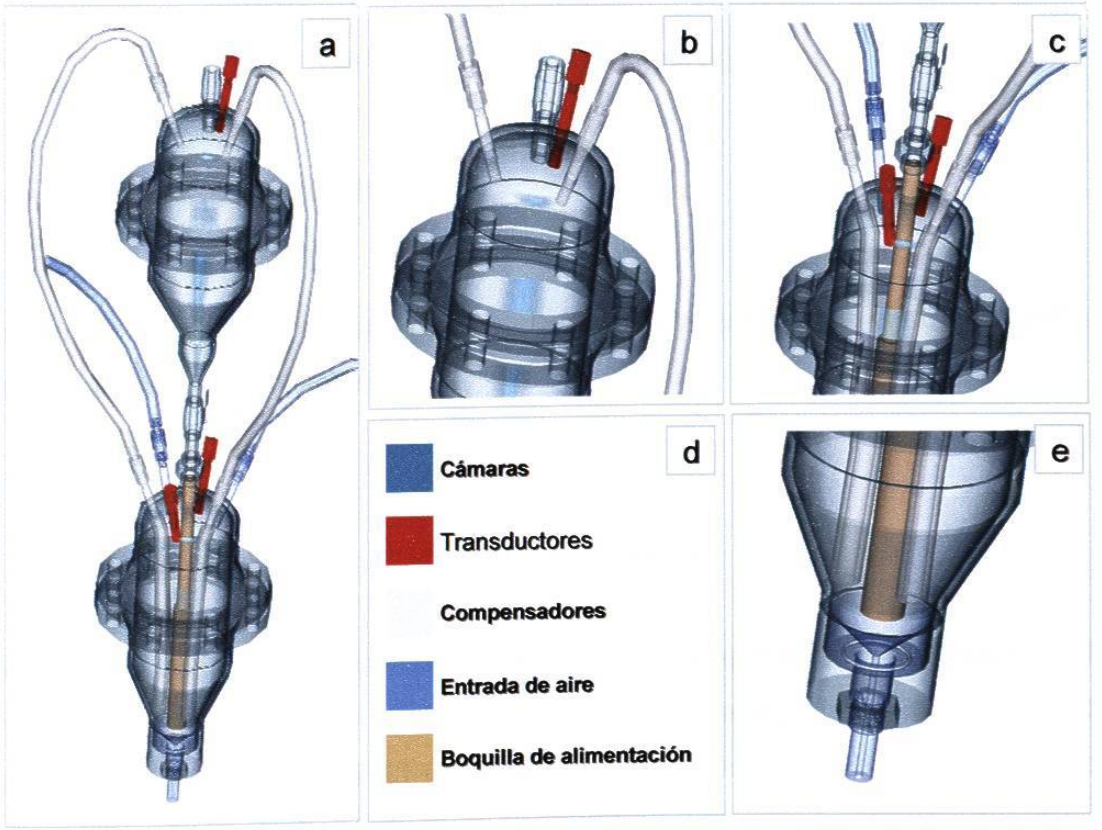


Fig. 7.9 Subsistema cámaras de erosión.
(a) Subsistema cámara, (b) Cámara Superior, (c) Cámara inferior, (d) Nomenclatura, (e) Salida.

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

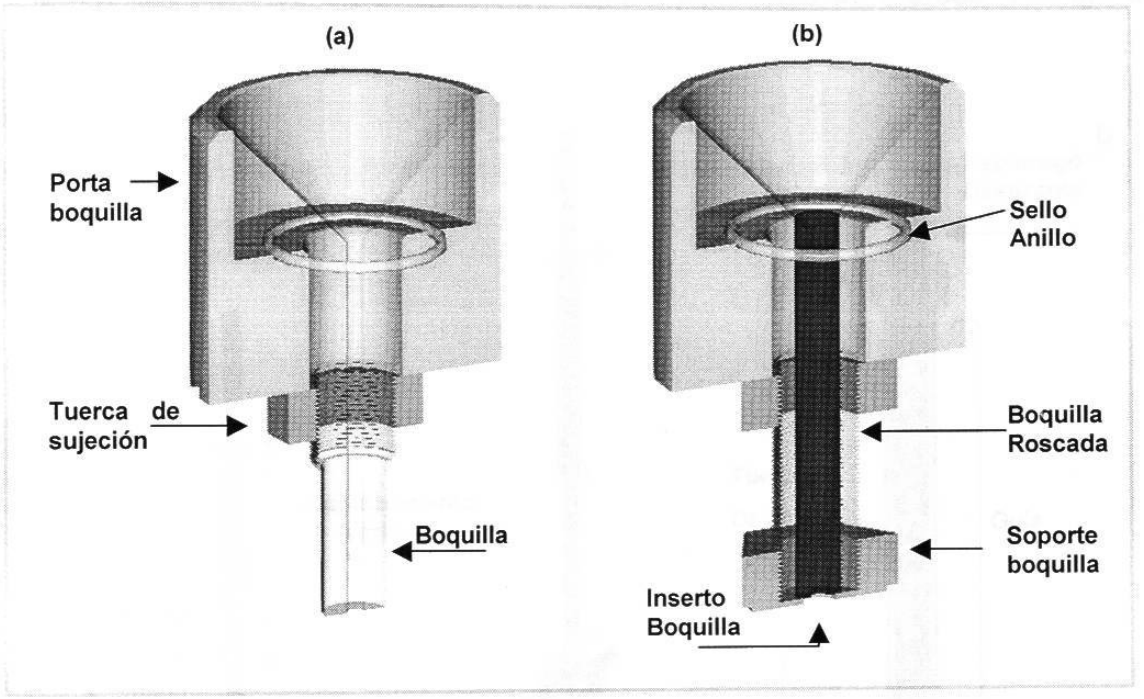


Fig. 7.10 Diseño de boquillas.
(a) Diseño inicial Boquilla una pieza, (b) Inserto

7.4.2 Subsistema Sujeción.

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

- Ángulo de impacto.
- Distancia de impacto.

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

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

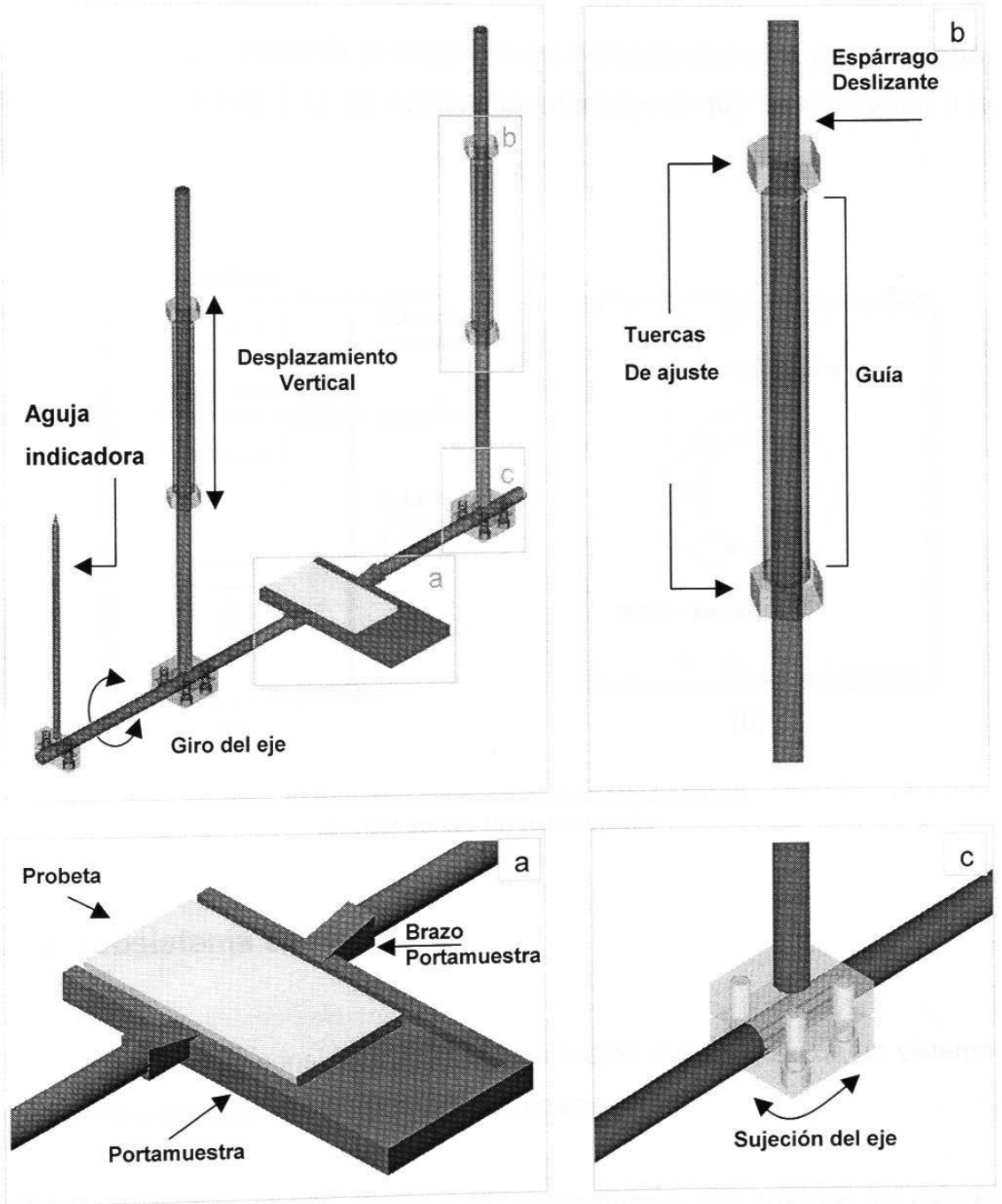


Fig. 7.11 Diseño del sistema portamuestras.
(a) Portamuestras, (b)Desplazamiento vertical de guías., (c) sujeción del eje.

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

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

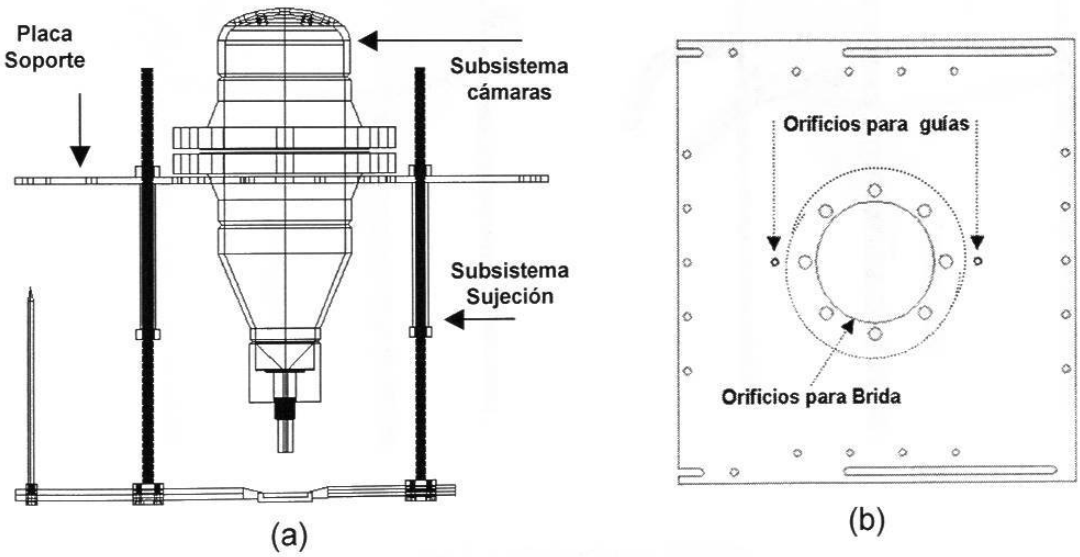


Fig.7.12 Esquema representativo de placa soporte.
(a) vista frontal, (b) vista superior

7.4.3 Subsistema cabina.

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

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

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

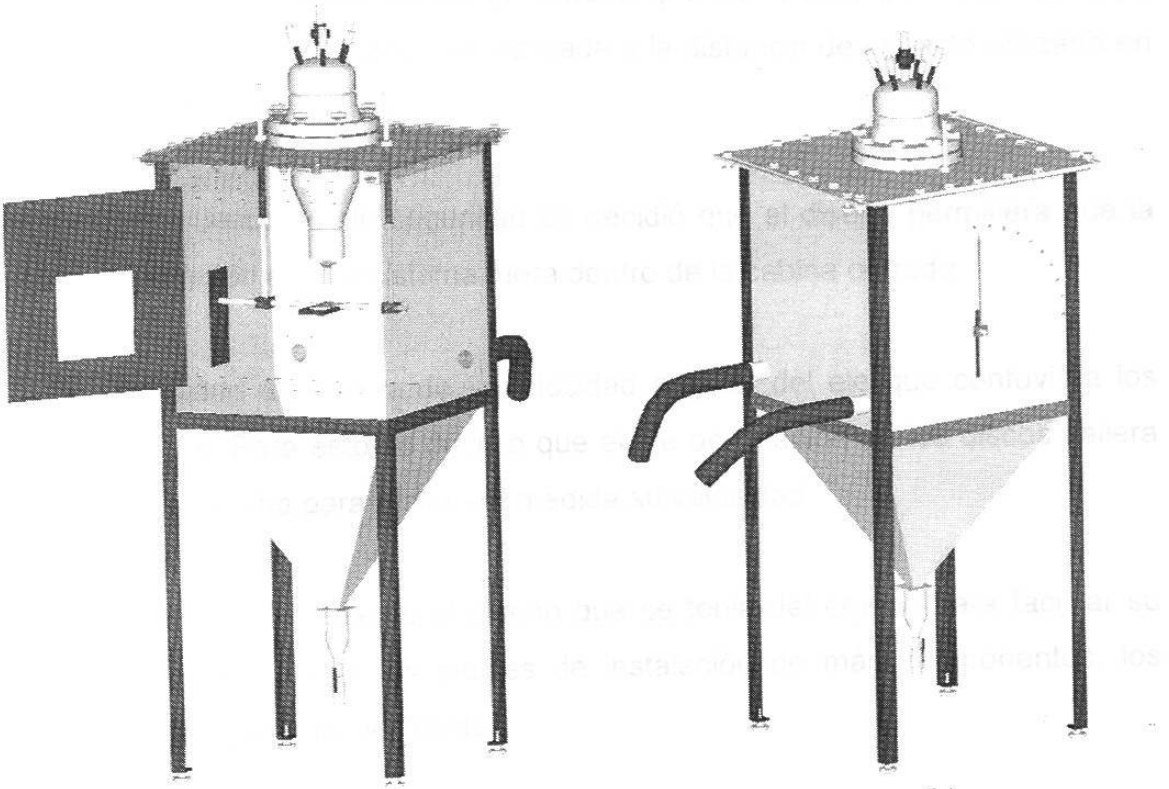


Fig.7.13 Subsistema Cabina.
(a) Perspectiva frontal, (b) Perspectiva trasera.

7.4.4 Subsistema velocidad de la partícula.

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

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

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

- La distancia entre discos (L) tendría que ser menor a 50 mm debido a que la medición debe ser realizada a la distancia de impacto utilizada en las pruebas.

- Por cuestiones de seguridad se decidió que el diseño permitiera que la operación del subsistema fuera dentro de la cabina cerrada.

- Facilidad de lectura de la velocidad angular del eje que contuviera los discos. Para esto se decidió que el eje de rotación de los discos saliera de la cabina para poder ser medida su velocidad.

- Optimizar al máximo el diseño que se tenia del equipo para facilitar su montaje y evitar los ajustes de instalación de más componentes, los cuales elevarían los costos.

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

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

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

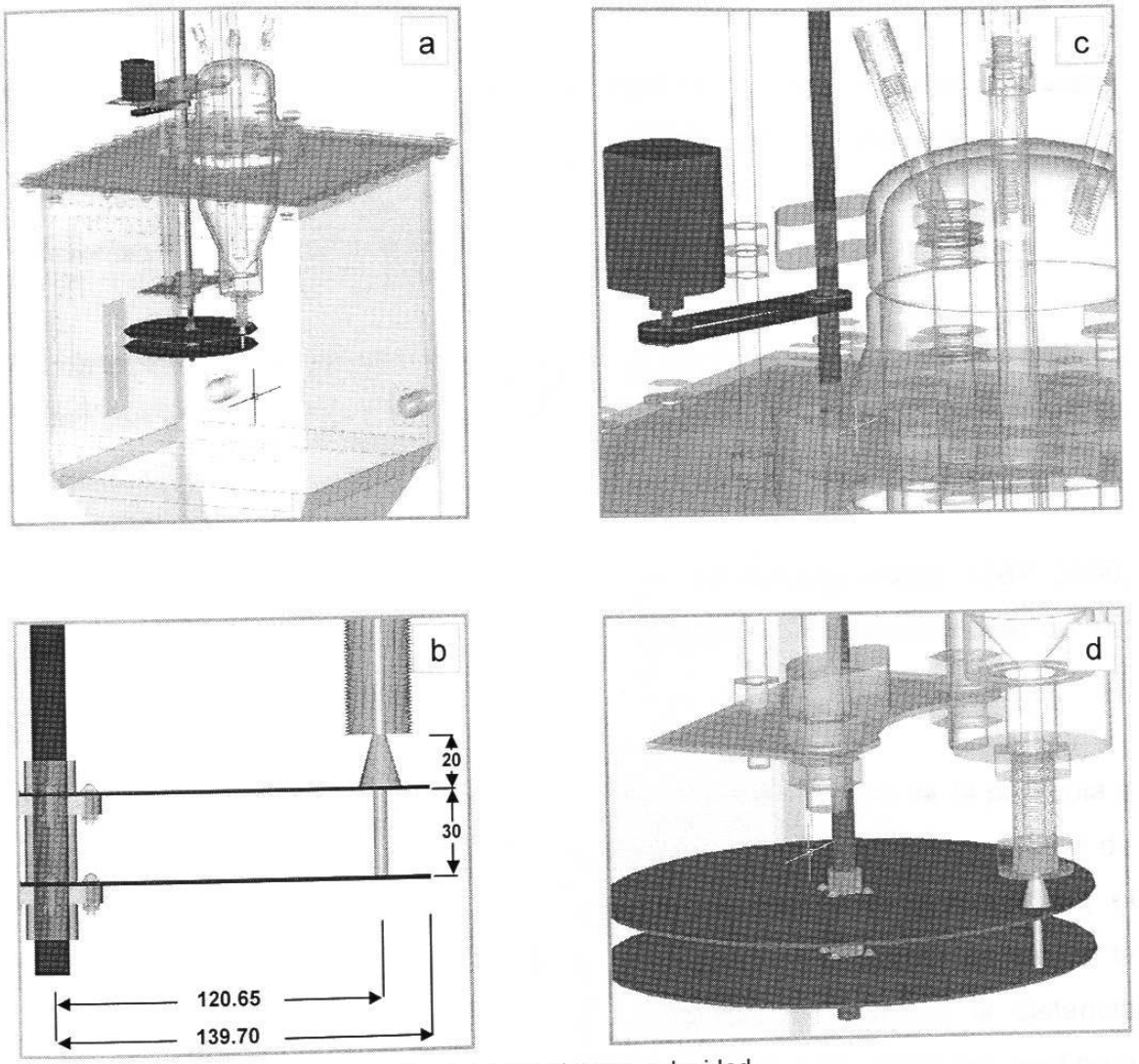


Fig. 7.14 Subsistema velocidad.
(a) Representación del sistema instalado en el equipo, (b) Dimensiones principales en el diseño del (DD) en mm, (c) juego de poleas y motor, (d) zona inferior arreglo de los discos.

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

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

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

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

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

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

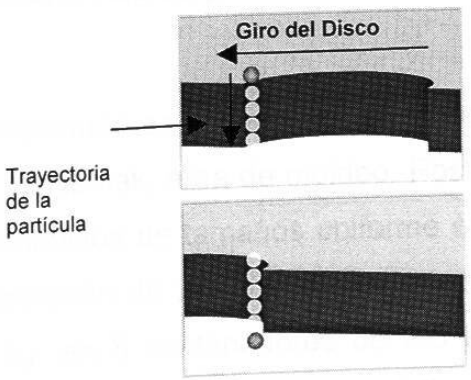


Fig. 7.15 Representación del paso de una partícula por el orificio del disco superior. (a) Tiempo inicial, partícula arriba de la superficie superior del disco, (b) Tiempo final, la partícula se encuentra debajo del disco superior continuando con su trayectoria para se impactada en la superficie del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

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

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

Las principales consideraciones fueron:

Partículas erosivas.

Distribución de tamaños, morfología, dureza.

Material a impactar.

Caracterización microestructural, dureza, análisis químico, rugosidad.

Condiciones de impacto.

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

7.5.1 Caracterización de la partícula erosiva.

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

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

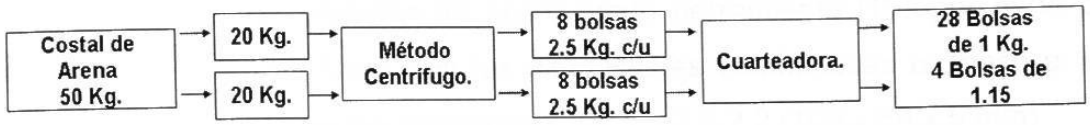
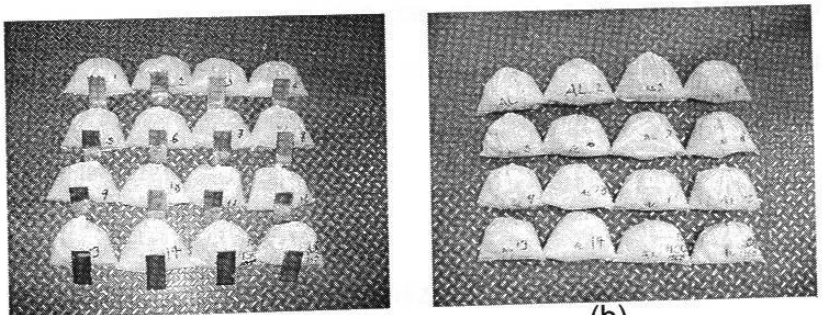


Fig.7.16. Procedimiento para la obtención de la arena.

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



(a) (b)

Fig. 7.17. Arena utilizada para los ensayos (Proporcionada por la empresa Nemak). (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 determinadar su diámetro y perímetro en el analizador de imágenes y por medio de la ecuación 4.1 obtener el factor de redondez de las partículas.

7.5.2 Caracterización del acero a ensayar.

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

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

Una vez identificadas las probetas se realizó su caracterización tomando aleatoriamente 1 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 realizo 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.

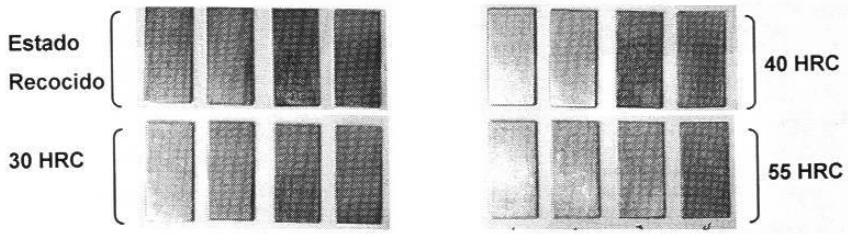


Fig.7.18 Piezas pulidas utilizadas en la prueba de erosión.

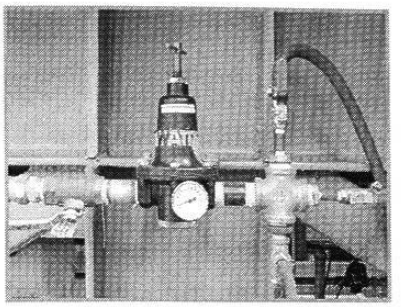
Una vez concluído el proceso de pulido se realizaron las mediciones de rugosidad en la superficie, dos corridas en el eje "*x*" (ancho) y dos en "*y*"(longitudinal), cada medición fue de una longitud de 4 mm y fueron realizadas a una separación de 10 mm entre ellas.

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

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

Presión de las cámaras.

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



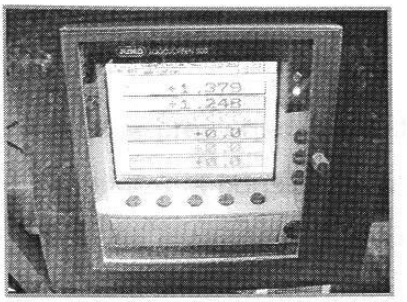


Fig.7.19 Evaluación de la presión.
(a) Control de presión en las cámaras, (b) registro de presiones durante la prueba

Ángulos y distancia de impacto.

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

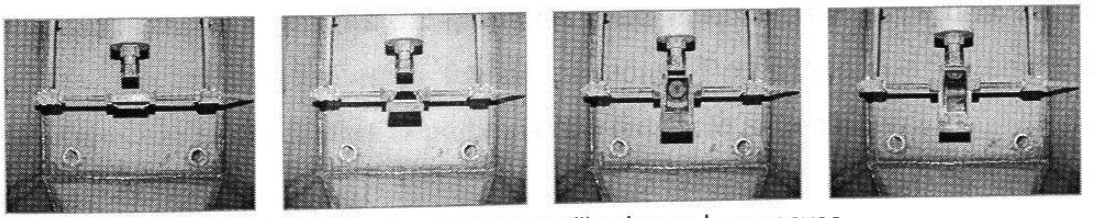


Fig.7.20 Ángulos de prueba utilizados en los ensayos.
Angulo 90,75,40,20° de izquierda a derecha.

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

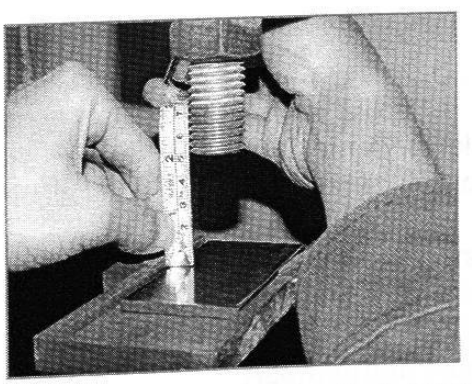


Fig.7.21 Medición de la distancia de impacto.

Alimentación de la partícula.

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

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

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

7.5.4 Pruebas en el acero grado herramienta H-13.

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

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

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

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

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

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

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

Tabla 7.1. Diseño de experimentos en el acero H13.

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

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

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

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

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