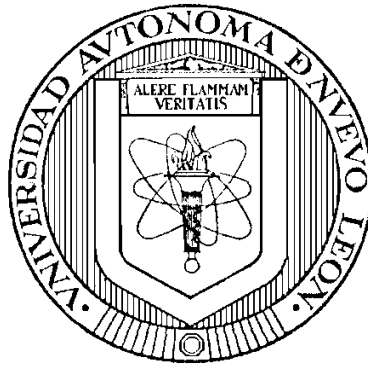


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



TITULO

**DESGASTE EROSIVO EN CAJAS DE CORAZONES USADAS EN LA
INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA EN
MATERIALES**

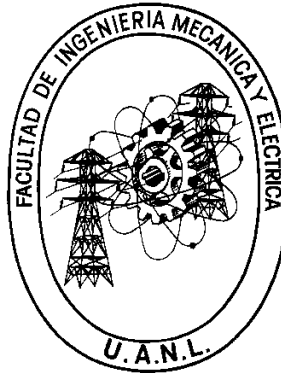
PRESENTA

JULIÁN RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA

MAYO DE 2014.

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



TITULO

**DESGASTE EROSIVO EN CAJAS DE CORAZONES USADAS EN LA
INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA EN
MATERIALES**

PRESENTA

JULIÁN RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA

MAYO DE 2014

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

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “DESGASTE EROSIVO EN CAJAS DE CORAZONES USADAS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ”, realizada por el alumno Julián Rodríguez Hernández, matrícula 784023, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El Comité de Tesis



Asesor

Dr. Alberto Javier Pérez Unzueta

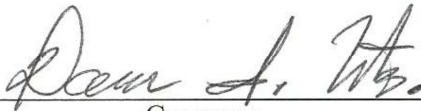


Coasesor

Dr. Rafael Colás Ortiz

Coasesor

Dr. Salvador Valtierra Gallardo



Coasesor

Dr. Dora Irma Martínez Delgado

Coasesor

Dr. Andrés Fernando Rodríguez Jasso

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N. L. Mayo 2014

DEDICATORIA

A María Magdalena, María Julia y Renata Valeria

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por darme la oportunidad de obtener una preparación profesional y humana.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo para la realización de mis estudios.

A la empresa Nemark por todas las facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

Al Dr. Alberto Pérez por su valiosa participación y sobre todo en la dirección de este trabajo

Al Dr. Salvador Val tierra por el apoyo y sus consejos durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Rafael Colas por apoyarme durante toda mi estancia en el posgrado de FIME.

A la Dra. Dora Martínez y al Dr. Andrés Rodríguez por el apoyo de revisión de esta tesis así como sus valiosos consejos y comentarios.

Al Dr. Alejandro González, al Dr. José Talamantes, al Dr Rodrigo González y al M.C. Efrén Carrera por el apoyo y la caracterización durante la investigación realizada en este trabajo

A mis compañeros de Tesis el Dr. Eduardo Rodríguez de Anda y al M.C Alvaro Treviño
Por su bonita amistad y apoyo durante la época de mis estudios de doctorado.

A todos mis compañeros, amigos y maestros que participaron y aportaron a este trabajo.

A mi Madre Josefa quien siempre me impulso a superarme y ser una mejor persona, a mi Padre José Antonio que me enseñó a tenerle afecto y dedicación al trabajo.

A María Magdalena mi esposa y madre de mis dos hermosas hijas por apoyarme y alentarme a cerrar este ciclo.

INDICE

Prologo	v
Resumen	1
Introducción	3
Capítulo 1 Erosión por partículas duras.	
1.1 Desgaste erosivo por partículas duras	6
1.2 Efecto del ángulo de impacto	11
1.3 Efecto de la velocidad de la partícula	17
1.4 Efecto de las propiedades de la partícula erosiva	19
1.4.1 Dureza de la partícula.	19
1.4.2 Morfología de la partícula	22
1.4.3 Tamaño de la partícula.	24
1.4.4 Razón del flujo de partículas (g/s).	25
1.5 Efecto de las propiedades de los materiales expuestos a erosión	27
1.5.1 Efecto de la dureza en la resistencia a la erosión	27
1.5.2 Endurecimiento por deformación en la superficie impactada	33
Capitulo 2 Fabricación de corazones de arena silica en el proceso de caja fría	
2.1 Introducción	40
2.2 Fabricación de moldes de arena para vaciado	41
2.2.1 Sistema Fenol-uretano-amina de caja fría	43

2.3	Arena silica empleada en los moldes y corazones de vaciado	44
2.3.1	Forma del grano de la arena	45
2.3.2	Distribución del tamaño de grano de arena	45
2.4	Componentes del proceso caja fría para elaboración de corazones.	47
2.4.1	Tubos de soplado	48
2.4.2	Ventilas de escape	50
2.5	Materiales empleados para la elaboración de los moldes de caja fría	50
2.6	Resistencia al desgaste de las cajas de corazones.	52
Capitulo 3 Diseño de la máquina para pruebas desgaste por erosión.		
3.1	Introducción	54
3.2	Prototipo de un equipo para pruebas de desgaste erosivo	55
3.3	Materiales seleccionados para la evaluación del prototipo	57
3.3.1	Vidrio	57
3.3.2	Acero al carbono	58
3.3.3	Aceros AISI H13, AISI 4140 y AISI 9840 tratados térmicamente	60
3.4	Equipos para pruebas de desgaste erosivo.	64
3.5	Ensayos de desgaste erosivo en el equipo erosionador.	65
3.5.1	Acero del tipo AISI 4140.	67
3.5.2	Acero del tipo AISI H13	71
3.6	Medición de la presión dentro de las cavidades de una caja de corazones	73
3.7	Ensayo de erosión a bajas presiones.	76
3.7.1	Acero AISI H13 con endurecimiento superficial por Nitruado	76
3.7.2	Acero del tipo AISI P20	79
3.7.3	Acero de bajo carbono AISI 1020	81
3.8	Desgaste en la boquilla de soplado.	84
Capitulo 4 Procedimiento Experimental		
4.1	Introducción	86
4.2	Caracterización de los aceros AISI H13 y AISI P20	86
4.2.1	Análisis microestructural y composición química	87

4.2.2	Ensayo de microdureza	88
4.3	Caracterización de las partículas erosivas	88
4.3.1	Análisis Granulométrico	89
4.3.2	Homogenización de la arena	89
4.4	Ensayos de desgaste erosivo	91
4.4.1	Presión del aire comprimido	91
4.4.2	Ángulos de impacto	92
4.4.3	Distancia de impacto	93
4.4.4	Diámetro interno y longitud de la boquilla	94
4.4.5	Dimensiones de las probetas.	95
4.4.6	Partículas Erosivas	95
4.4.7	Durezas de las probetas	96
4.5	Análisis de las probetas erosionadas	97
4.5.1	Preparación de las probetas	97
4.5.2	Parámetros de rugosidad	99
4.5.3	Análisis metalográfico	100
4.5.4	Microscopia óptica	101
4.5.5	Microscopia electrónica	102
4.5.6	Ensayo de microdureza	104

Capítulo 5 Resultados y Discusión

5.1	Caracterización de los aceros AISI H13 y AISI P20	105
5.1.1	Composición química	105
5.1.2	Análisis Microestructural	106
5.1.3	Medición de parámetros de rugosidad promedio (Ra) en la superficie de las probetas de los aceros AISI H13 y AISI P20	110
5.2	Tipo y distribución de diámetros de partícula	111
5.3	Registó de presión 0.69 y 1.38 bares.	114
5.4	Análisis Visual de las probetas erosionadas.	116
5.5	Resultados del desgaste en los acero AISI H13 y AISI P20.	119

5.5.1 Efecto de la dureza del acero AISI H13 y AISI P20 sobre el desgaste erosivo.	119
5.5.2 Efecto del ángulo de impacto contra la razón de erosión	127
5.6 Resistencia a la erosión de los aceros.	132
5.7 Análisis de las superficies erosionadas.	134
5.7.1 Análisis de la superficie del acero AISI H13.	134
5.7.2 Análisis de la superficie del acero AISI P20.	141
5.7.3 Parámetros de rugosidad.	145
5.8 Análisis del área debajo de la superficie erosionada.	148
5.9 Perfil de dureza en el acero H13 y P20	156
Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones para estudios posteriores	
Conclusiones	161
Recomendaciones para estudios posteriores.	163
Referencias	164
Lista de Figuras	170
Lista de Tablas	185

PRÓLOGO.

Una de las grandes preocupaciones de hoy en día es el deterioro de nuestro medio ambiente. La industrialización, el crecimiento de las ciudades, la generación de energía eléctrica, el amplio uso de medios de transporte con motores de combustión interna, entre otros muchos factores, donde la fuente principal de energía es a través de combustibles fósiles que generan una gran cantidad de gases tipo invernadero. Entre muchos y variados esfuerzos, la industria automotriz busca reducir las emanaciones de gases al diseñar automóviles y motores mucho más eficientes, que entreguen más kilometraje por litro de combustible empleado. Ya en muchos países se están dando directrices por parte de agencias gubernamentales que pondrán requisitos de alta eficiencia de combustible, con el objetivo de contaminar menos. Para lograr lo anterior, la industria automotriz está continuamente innovando sus productos y procesos. Este es el caso de la empresa NEMAK. Para la fabricación exitosa de cabezas y monobloques de motor en aleaciones aluminio, se debe tener un estricto control dimensional de los corazones. Esto se puede lograr conociendo con mucha precisión y teniendo las herramientas de pronóstico del desgaste de las cajas de corazones donde son fabricados. El presente trabajo realizado en colaboración con la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León por el M.C. Julián Rodríguez Hernández logra exitosamente determinar los mecanismos básicos de desgaste en los aceros utilizados para este tipo de herramientas, los aceros AISI H13 y P20 a diferentes condiciones de tratamiento térmico, dureza y microestructura. Para su investigación, fue necesario diseñar y construir un equipo de pruebas tribológico “ad-hoc” a las necesidades intrínsecas del proceso. Con este trabajo de investigación, no solo se

obtuvieron resultados que le permiten a la industria innovar sus procesos, mejorar la calidad de sus productos y alcanzar las metas de motores de mayor rendimiento y menor impacto ambiental. También se refuerzan los vínculos de colaboración entre la industria y la academia y la formación de recursos humanos altamente especializados, como es Julián Rodríguez. Valió la pena el tiempo invertido.

Prof. Dr. Alberto Pérez Unzueta.

Cd. Universitaria, Mayo, 2014.

RESUMEN.

La fabricación de moldes de arena silica es parte importante del proceso de obtención de piezas vaciadas. En este trabajo se presenta una serie de pruebas y análisis en los acero herramienta tipo AISI H13 y P20 empleados para la fabricación de moldes metálicos para la obtención de corazones de arena utilizados en la construcción de moldes complejos para piezas de aluminio para la industria automotriz, principalmente cabezas y monobloques. Debido al proceso de llenado a alta presión con arena silica en las cavidades de los moldes metálicos, se origina un daño por desgaste erosivo. Este daño puede generar múltiples defectos, principalmente dimensionales en las piezas vaciadas. Para desarrollar esta investigación se hizo una intensa revisión bibliográfica de los principales factores que promueven el desgaste en componentes metálicos y principalmente en aquellos en los que su sistema incluye la presencia de partículas duras que producen daño por erosión. Se evaluaron los materiales de principal uso para la fabricación de moldes como lo son aceros 4340, 4140, H13 y P20. Se elaboraron una serie de prototipos mecánicos que mediante un chorro de arena a alta presión impactaban la superficie de los aceros a diferentes ángulos y diferentes velocidades, provocando el daño por erosión. En base a estos prototipos y las variables empleadas se definió y diseñó un equipo tribológico para pruebas de erosión, identificado como “ERO-FIME II”. En este equipo se utilizaron variables como cantidad de partículas erosionantes, presión a la que se inyecta el flujo de arena, el ángulo de impacto y la distancia de impacto, entre otras. En este estudio, se seleccionaron los aceros H13 y P20, a partir de los cuales se fabricaron una serie de probetas planas con diferentes tratamientos térmicos

y durezas. La Índice de Erosión se calculó en base a la masa perdida en las probetas ensayadas y la masa utilizada de material erodente en cada ensayo. La caracterización de las probetas ensayadas fue mediante microscopia óptica y electrónica. En base a los ensayos realizados se encontró que el acero H13 presentó un comportamiento del tipo dúctil donde el mayor índice de erosión se presentó entre los ángulos de impacto de 30° y 40°. En el caso del acero P20 la condición de mayor dureza mostro un comportamiento frágil siendo la mayor erosión a un ángulo de impacto de 90° En ambos casos se observaron mecanismos de desgaste por micro-corte y deformación como consecuencia del impacto de las partículas. Las probetas de menor dureza mostraron un incremento de la dureza en la sub-superficie impactada. Este trabajo aportó información tecnológica sobre las condiciones a las que están sujetas las cajas de corazones cuando son impactadas por un flujo de arena a alta presión. El conocimiento aquí generado, puede ser aplicado a condiciones reales de operación de plantas de fundición, con el objetivo de incrementar la vida útil de las cajas de corazones, mejorar los diseños geométricos y de selección de los materiales, incrementar la calidad de las piezas fundidas, evitar rechazos por secciones fuera de especificación dimensional, y sobretodo, proponer protocolos de mantenimiento de las cajas de corazones donde pueda predecirse su índice de erosión, optimizar el número de soplos reales antes de mantenimiento, mejorar la práctica de reparación. De esta manera contribuir en una mejora en la industria nacional productora de piezas fundidas de aluminio para el mercado nacional e internacional.

INTRODUCCION

El fenómeno de desgaste por erosión es un problema que afecta a diversos sistemas de ingeniería. Un gran número de factores están involucrados en el desgaste erosivo, algunos de ellos son las características de las partículas; la distribución de tamaños, forma y dureza, ángulo de impacto, velocidad de la partícula y tipo del fluido y sobre todo las propiedades físicas de la superficie expuesta a la erosión tal como la tenacidad, ductilidad, microestructura y dureza. Todos estos factores tienen una influencia directa sobre los mecanismos de desgaste. Los materiales dúctiles y frágiles tienen comportamientos diferentes, siendo el ángulo de impacto un factor esencial en dichos comportamientos. Los materiales dúctiles tienen una mayor erosión a bajos ángulos mientras que en los frágiles, la mayor erosión se presenta a ángulos de impacto cercanos a la normal. Sin embargo, dependiendo de los factores involucrados, un material dúctil ó frágil puede experimentar ambos comportamientos de desgaste erosivo.

Los corazones de arena sílica son empleados para formar moldes de vaciado semi permanentes (partes metálicas y corazones de arena) o moldes de vaciado compuesto totalmente de piezas y corazones de arena. Los corazones son esenciales en la obtención de piezas vaciadas ya que generan cavidades o geometrías irregulares que difícilmente se obtendrían en un proceso de maquinado. La fabricación de corazones es un proceso relativamente sencillo en donde una mezcla de arena sílica con resinas son inyectadas en la cavidad de un molde utilizando aire seco comprimido. Posteriormente un gas catalizador es inyectado con el propósito de acelerar el endurecimiento de las resinas y el corazón pueda ser extraído del molde sin riesgo a desmoronarse. El proceso en el que

la arena es inyectada al molde se le conoce como soplo. La naturaleza abrasiva de la arena sílica produce un alto índice de desgaste erosivo en los moldes metálicos afectando la calidad del producto final a obtener. La vida útil de un molde se mide en el número de soplos que pueden recibir sin llegar a producir corazones fuera de especificación. En el presente trabajo de investigación se estudia el desgaste erosivo que presentan dos aceros grado herramienta utilizados para fabricar moldes. Una de las aplicaciones de estos moldes es la elaboración de corazones de arena sílica en la industria de la fundición.

Objetivo

Este trabajo de investigación tiene como objetivo caracterizar los mecanismos de desgaste erosivo en dos aceros grado herramienta tipo AISI H13 y AISI P20, tratados térmicamente a diferentes valores de dureza y variando los ángulos de impacto de 20° a 90°, en ensayos de erosión acelerados utilizando una maquina tribológica, diseñada y construida específicamente para este propósito en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FIME-UANL), en colaboración con la empresa Nematik, S.A. de C.V.

Hipótesis

El ángulo de impacto, la microestructura y la dureza en los aceros AISI H13 y AISI P20 tienen una correlación cualitativa y cuantitativa con los mecanismos de erosión en dichos aceros.

Metodología

Para realizar este estudio se utilizó una maquina tribológica diseñada y construida específicamente para esta investigación (llamada Ero-Fime II), que emplea variables del proceso industrial en la elaboración de corazones. Se prepararon diferentes probetas de acero AISI H13 y AISI P20 con diferentes tratamientos térmicos con el propósito de

obtener un amplio rango de valores de dureza. Las probetas son sometidas a impacto por una carga de 1000 g de arena sílica entre ángulos de 20° a 90°. La masa removida de las probetas es expresada como la razón de erosión con respecto a la masa o cantidad en masa de partículas impactadas. La razón de erosión es analizada con respecto al ángulo de impacto y la dureza para cada probeta. Se realizaron dos pruebas por cada ensayo arrojando un total de 216 ensayos entre los dos tipos de aceros. La superficie de prueba se prepara y caracteriza en cuanto a su rugosidad antes y después de los ensayos de erosión. Para determinar los mecanismos de erosión las probetas son seccionadas y preparadas metalográficamente, su análisis se realiza por medio de microscopía óptica y electrónica de barrido. Además se determinaron los perfiles de dureza en la sub-superficie de las probetas erosionadas con el propósito de observar efectos de endurecimiento por el impacto de las partículas.

CAPITULO 1

EROSION POR PARTICULAS DURAS.

1.1 Desgaste erosivo por partículas duras.

Cuando una superficie sólida está expuesta a múltiples impactos de partículas duras, experimenta una forma de desgaste llamada erosión, la cual genera pérdida del material en la superficie como consecuencia de la interacción mecánica con las partículas. El impacto de las partículas duras provoca deformación, fractura y remoción de material en la superficie dañada. En la Figura 1.1 se muestra un diagrama esquemático de las fuerzas al momento del contacto de una partícula contra una superficie sólida. La partícula experimenta la fuerza de la gravedad en su centro de masa, fuerzas de contacto causadas por el contacto con otras partículas, fuerza de reacción de la superficie al momento del impacto y la fuerza de arrastre obtenida del medio que transporta la partícula (algún fluido). Sin embargo la fuerza dominante en una partícula erosiva, la cual es la principal responsable de su desaceleración desde su velocidad de impacto inicial, es generalmente la fuerza de contacto ejercida por la superficie. [1-4].

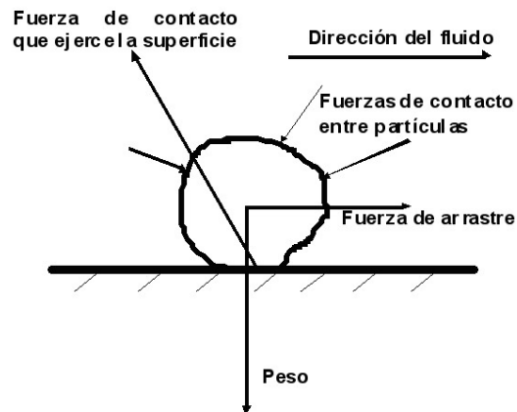


Figura 1.1 Diagrama esquemático de las fuerzas que experimenta una partícula al hacer contacto con una superficie sólida [2].

Para analizar la fuerza de contacto ejercida por la superficie consideremos una partícula sólida, homogénea, rígida e indeformable y un análisis de impacto quasi-estático (por ejemplo ignorando los efectos dinámicos tales como la propagación de ondas y la sensibilidad a la razón de deformación). Además consideraremos que la deformación de la superficie es perfectamente plástica, con una presión de penetración constante (dureza) H . En la Figura 1.2 se presenta el momento en que una partícula con masa (m), viajando a una velocidad (V), toca la superficie en un tiempo $t = 0$ después a un tiempo determinado t , la partícula ha penetrado la superficie sólida una distancia (x) y ha formando una área de contacto $A(x)$. La partícula llega al punto de reposo en un tiempo $t = T$ y ha penetrado una distancia total (d).

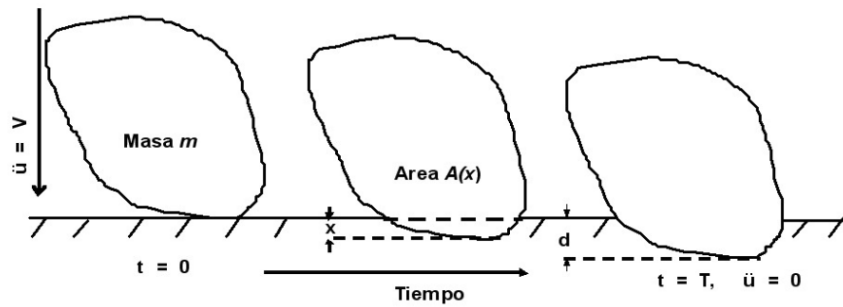


Figura 1.2 Proceso de penetración de una partícula rígida dentro de la superficie de un material deformable plásticamente a un ángulo de impacto normal. El contacto inicial ocurre a un tiempo $t = 0$, y la partícula alcanza el punto de reposo en un tiempo de $t = T$ [2].

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:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -HA(x) \quad 1.1$$

El trabajo realizado por la fuerza retardante será igual a la energía cinética inicial de la partícula, la cual se considera que tiene una velocidad inicial:

$$\int_0^d HA(x) dx = \frac{1}{2} m V^2 \quad 1.2$$

El volumen final de la penetración (vol) será:

$$vol = \int_0^d A(x) dx \quad 1.3$$

y considerando H como constante, el volumen del material desplazado será:

$$vol = \frac{mV^2}{2H} \quad 1.4$$

El material desplazado por la penetración, puede ser acomodado por deformación elástica del material lejos de la penetración, o puede formar un “labio” de material plásticamente deformado alrededor o bien puede ser removido en forma de una viruta. Más adelante se discutirá la forma en que el material puede ser removido mientras tanto consideraremos solamente K como alguna fracción de material removido en forma de viruta. Debido a esta consideración la ecuación de la masa removida quedaría de la siguiente manera.

$$\text{Masa de material removido}(m_r) = K\rho \frac{mV^2}{2H} \quad 1.5$$

Donde ρ es la densidad del material erosionado y K es un factor de proporcionalidad. La suma de una gran cantidad de impactos en la ecuación 1.5 sugiere que el total de la masa de material removido de la superficie debiera ser proporcional al total de la masa de las partículas erosivas las cuales la han golpeado. La Figura 1.3 muestra como la masa removida de una superficie varia con respecto a la masa total de partículas erosivas las cuales la han golpeado. Para algunos materiales las partículas pueden ser embebidas en la superficie y causan una ganancia en peso al inicio, tal como se muestra en la curva (b). Este periodo de incubación, el cual es observado principalmente en materiales suaves tiende a hacer más pronunciado a altos ángulos de impacto. Después del periodo de incubación, la erosión presenta una tendencia lineal con la masa de partículas abrasivas que golpean la superficie. Para muchos de los materiales dúctiles el período de incubación es despreciable y la masa perdida en la superficie es aproximadamente proporcional a la masa total de las partículas erosivas que la han golpeado, línea (a) en la Figura 1.3. La relación lineal (estado estable) de la erosión permite una simple definición de la erosión (E) ampliamente empleada.

$$E = \frac{\text{masa de material removido}(m_r)}{\text{masa de las partículas que golpean la superficie}(Mp)} \quad 1.6$$

E es adimensional y la ecuación 1.6 puede describirse como:

$$E = \frac{K\rho V^2}{2H} = \frac{mr}{Mp} \quad 1.7$$

Esta ecuación establece que la relación de erosión es inversamente proporcional a la dureza de la superficie, H . K puede ser considerada como una medida de la eficiencia del proceso de remoción de material; si todo el material desplazado por la partícula erosiva fuera eliminado K debería tener el valor de 1. Para la erosión de metales, se ha encontrado que K presenta valores dentro del rango de 5×10^{-3} a 10^{-1} .

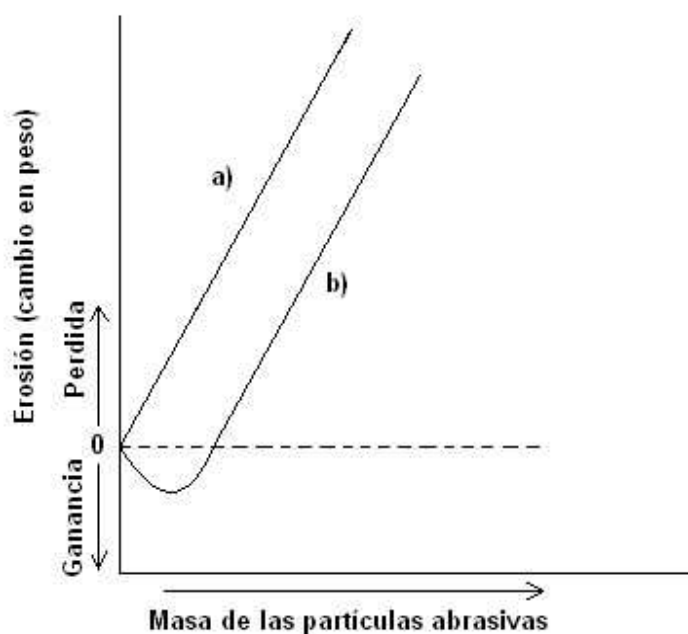


Figura 1.3 Dependencia típica de la masa removida de la superficie con respecto a la cantidad de masa total de partículas erosivas las cuales la han golpeado. Línea (a) corresponde al comportamiento lineal de la erosión, sin incubación. Bajo algunas condiciones, la incubación es observada tal como se muestra en la curva (b) [2].

El comportamiento del desgaste erosivo en los materiales depende en gran medida de las condiciones de impacto de las partículas duras sobre la superficie, así como de las propiedades de esta última. Finnie [3,4] quien fue uno de los pioneros en las investigaciones del desgaste erosivo divide en tres grupos los factores que interviene en

la erosión de un sistema determinado. En primer grado se encuentran las condiciones del flujo del fluido; ángulo de impacto, velocidad de la partícula, rotación de la partícula, concentración de las partículas en el fluido, la naturaleza del fluido y su temperatura. En segundo grado se encuentran las propiedades de la partícula; tamaño, forma, dureza resistencia (resistencia a la fragmentación). Y en el tercer grado las propiedades de la superficie; la resistencia como función de la deformación, razón de deformación y temperatura, dureza, tenacidad a la fractura, microestructura (una o más fases). Debido a la gran cantidad de factores que intervienen en el fenómeno de desgaste erosivo en los materiales, es necesario estudiar cada factor para determinar su influencia en cada material.

1.2 Efecto del ángulo de impacto.

Se entiende por ángulo de impacto a la orientación del movimiento del flujo de las partículas que se dirigen contra una superficie sólida. Al variar el ángulo de impacto la razón de erosión de un material cambia, como se observa en la gráfica esquemática de la Figura 1.4. La mayor razón de erosión en los materiales dúctiles se encuentra entre los ángulos de 20° y 30°, mientras que para los materiales frágiles la mayor erosión se presenta a 90°.

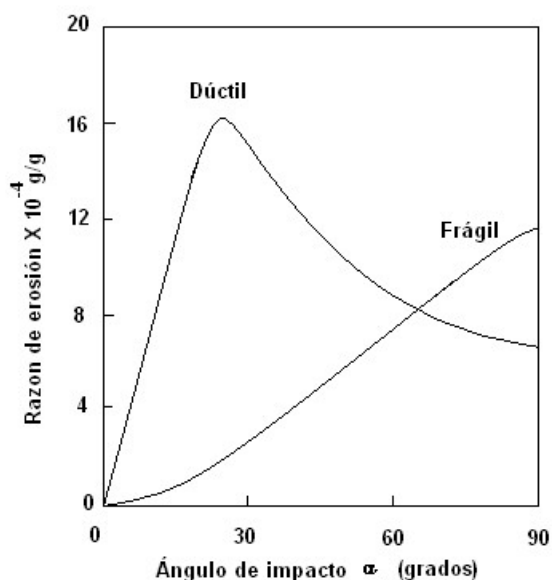


Figura 1.4 Resistencia a la erosión relativa para materiales dúctiles y frágiles [4].

La diferencia en la razón de erosión entre cada ángulo de impacto en los materiales de comportamiento dúctil y frágil depende de los mecanismos de arranque de viruta en la superficie impactada. Para entender los mecanismos presentes en la remoción de material de una superficie erosionada se considerará primero el impacto a altos ángulos. Además debe considerar que no todos los impactos ocupan su energía en eliminar material (Ecuación 1.2), sino que primero ocasionan una deformación plástica en el área de contacto dentro de la superficie sólida. En el caso de un material dúctil la penetración de una partícula desplaza el material apilándolo en la periferia del impacto dando origen a un “cráter”, una vez que la partícula deja la zona de impacto, ver Figura 1.5. Posteriores impactos removerán el material apilado en forma de “labios” (material laminado) [5,6]. Este proceso es cíclico, provocando una baja razón de erosión a ángulos alrededor de 90°.

La Figura 1.6 muestra la microestructura de un acero de 0.6% de carbono con tratamiento térmico de recocido por esferiodización, el cual fue expuesto a impactos de partículas de Al_2O_3 de $355\ \mu\text{m}$, a un ángulo de 90° [7]. La presencia de material deformado es evidente debajo de la superficie expuesta a la erosión (sub-superficie) así como el material desplazado y apilado hacia las orillas del cráter formado por el impacto de la partícula abrasiva.

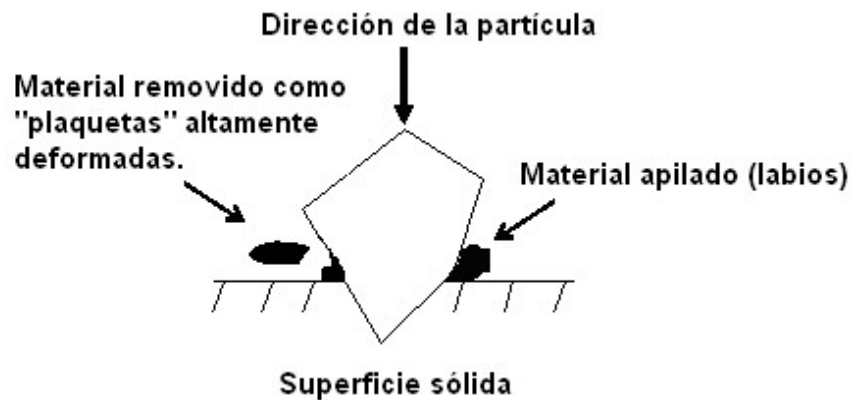


Figura 1.5 Mecanismo de eliminación de material a altos ángulos, por formación de material altamente deformado en forma de “labios” [8].

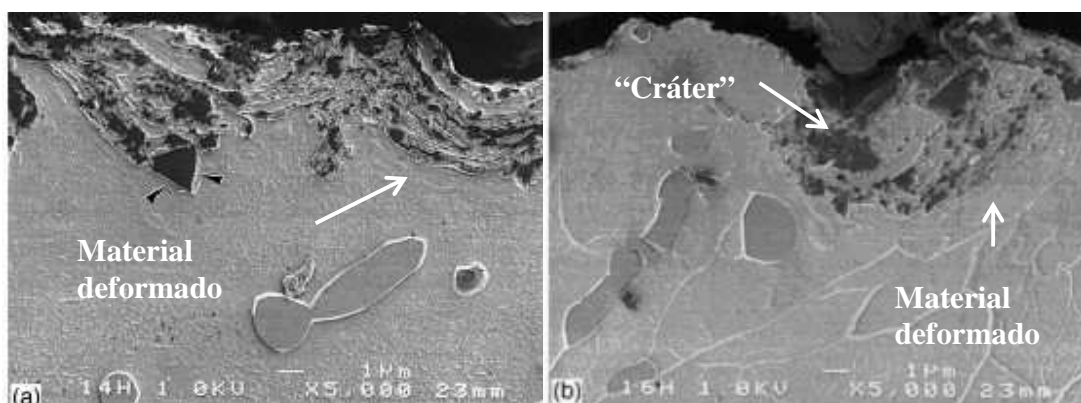


Figura 1.6 Microestructura de un acero con 0.6% C, con tratamiento térmico de esferoidización. El material deformado se observa en el cráter y en las orillas, formado por el impacto de las partículas de Al_2O_3 de $355\ \mu\text{m}$, a un ángulo de 90° , velocidad de impacto de a) 30 m/s, b) 64 m/s. [7].

En el caso de los materiales frágiles, durante el impacto de una partícula, el área de contacto en la superficie es deformada y debido a la alta compresión y esfuerzos de corte, se forma una grieta radial después del impacto a altos ángulos. La deformación plástica induce altos esfuerzos de tensión que resultan en grietas laterales acelerando la remoción del metal. La cantidad de material removido será mayor para los materiales con muy baja ductilidad, particularmente a altos ángulos de impacto, ver Figura. 1.7.

En la Figura 1.8 se muestra la microestructura de un acero de 0.6% C con martensita templada, en donde los impactos de partículas de Al_2O_3 de $355 \mu\text{m}$, a un ángulo de 90° , generan grietas laterales que promueven la remoción del material [7].

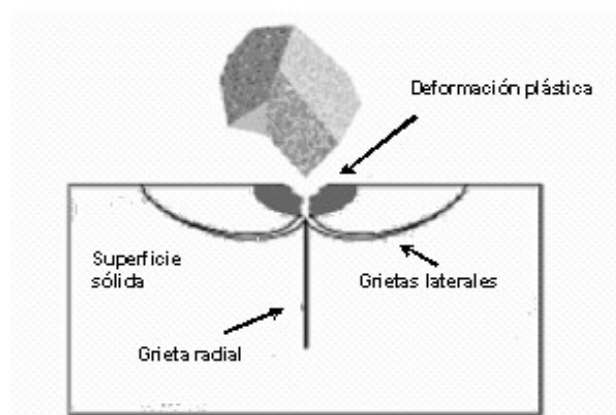


Figura 1.7 Esquema de la formación de grietas por el impacto de una partícula rígida en un material frágil [9].

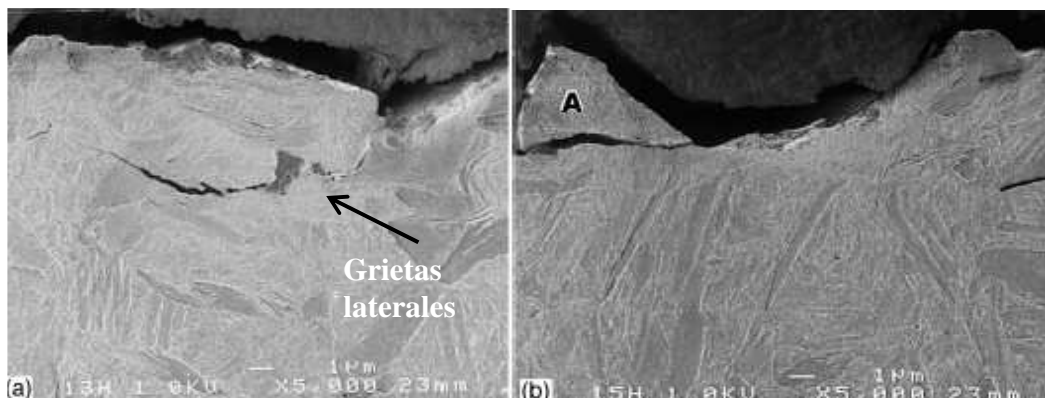


Figura 1.8 Microestructura de un acero de 0.6% de C en condición de temple sin revenido. Las grietas se forman por impacto de partículas de Al_2O_3 de $355 \mu\text{m}$, a un ángulo de 90° , velocidad de impacto de a) 30 m/s , b) 64 m/s [7].

En ambos casos la deformación plástica está presente en la superficie erosionada con lo cual algunos autores han relacionado este factor con la ductilidad del material y la tenacidad a la fractura [8-10].

A bajos ángulos se pueden distinguir tres tipos de daño en una superficie erosionada, ver Figuras 1.9 (a), (b) y (c). Dos de ellos son los principales promotores de eliminación de material por procesos de corte dejando en ocasiones la formación de surcos y virutas adheridas a la superficie (b) y (c). En el caso (a), el proceso es conocido como “arado” (*ploughing*), en donde la superficie el material fluye hacia el frente o bien hacia los lados del surco. En ocasiones este tipo de mecanismos no genera el desprendimiento de material. En el caso (b) el impacto de la partícula genera una penetración provocando la deformación del material formando una silueta en forma de labio, el cual es eliminado por subsecuentes impactos. El caso (c) es una de las formas que produce mayor daño ya que la partícula provoca la deformación de la superficie durante el impacto y además elimina el material en forma de viruta en donde una o varias caras de la partícula actúan como una herramienta de corte. Este proceso es conocido como corte verdadero y rara vez se presenta a muy bajos ángulos de impacto. Estos tipos de daño dependerán en gran medida de las características de la partícula (Sección 1. 4) así como también del movimiento y la rotación de la partícula que le proporciona el fluido que la transporta.

T. Deng y colaboradores [11] encontraron que existe un mayor daño por erosión cuando partículas angulares y esféricas tienen un movimiento de rotación extra, provocando una mayor erosión en el material. En la Figura 1.10 se muestra la superficie erosionada de un metal expuesto a un ángulo de impacto de 12.5° donde diferentes tipos de rotación en la partícula resulta en superficies erosionadas con topografías diferentes. En las Figuras, 1.10 (c) y (d) se muestra el daño en la superficie y el perfil seccionado respectivamente, donde las partículas con rotación inversa a las manecillas del reloj generan cráteres profundos con virutas triangulares esto evidencia un mecanismo de erosión agresivo como el del tipo I.

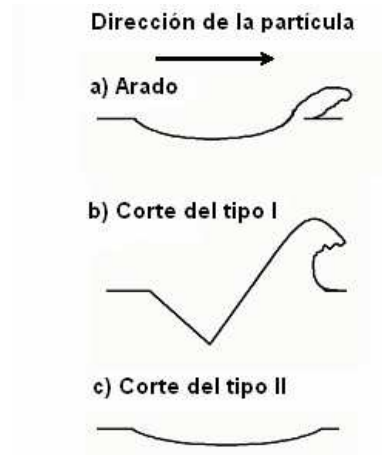


Figura 1.9 Daño de una superficie por el impacto de partículas de diferente forma. a) Deformación por arado. b) Corte del tipo I por el impacto de una partícula angular con movimiento de rotación hacia delante. c) Corte del tipo II de una partícula angular rotando hacia atrás durante el impacto [2].

Partículas con rotación normal a las manecillas del reloj generan una superficie con cráteres pocos profundos y poca evidencia de viruta Figuras 1.10 (a) y (b), lo cual puede compararse con el mecanismo de arado (*ploughing*). Este mismo autor reconoce que los mecanismos de erosión pueden estar influenciados también por el equipo empleado para realizar los ensayos acelerados de erosión.

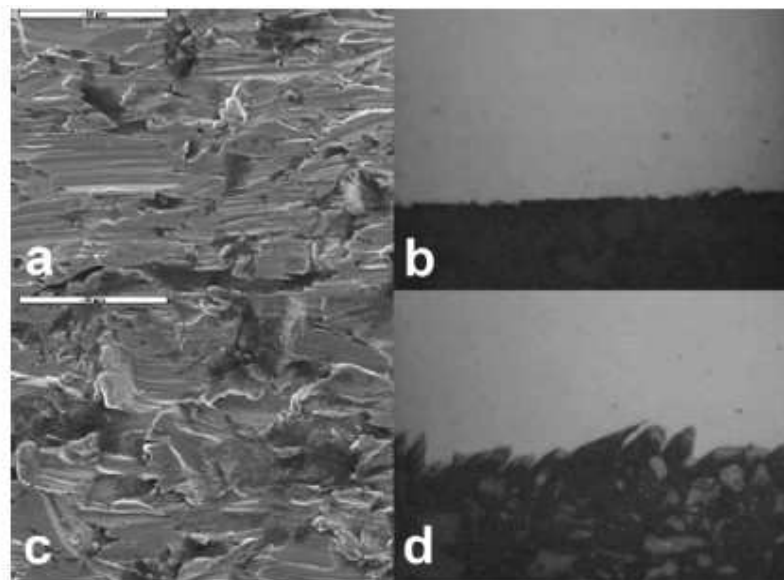


Figura 1.10 La rotación de la partícula puede producir diferente daño en una superficie erosionada. En a) y b) se considera un tipo de arado mientras que c) y d) pertenece al corte del tipo I. [11]

1.3 Efecto de la velocidad de la partícula.

En el estudio de la erosión de materiales se ha encontrado que existe una relación muy fuerte con la velocidad de la partícula. Esta dependencia frecuentemente es expresada en la forma de:

$$E = k v^n \quad 1.8$$

Donde v representa la velocidad de la partícula, k una constante del material, y n un exponente que varía dependiendo del tipo de material; por ejemplo para los metales se obtienen valores de n entre 2 y 3.5 y en el caso de los materiales cerámicos, los valores de n son entre 2 a 6.5 [12]. Algunos trabajos realizados en aceros con estructura esferodizada y martensita, han mostrado valores de $n = 2$ [13]. Lindsley y colaboradores [7] encontraron valores de n de aproximadamente 2.6 para latones y aceros con microestructura de martensita y ferrita. El exponente de la velocidad muestra una influencia de las propiedades del material sin embargo, también el ángulo de impacto y las características de las partículas influyen en la erosión.

Es importante evaluar los efectos que produce la velocidad de la partícula en la erosión de los materiales. En la gráfica de la Figura 1.11 se muestra el comportamiento que presenta un material al ser expuesto a diferentes valores de velocidad bajo un flujo constante de partículas. Una velocidad de la partícula de 20 m/s necesita más de 30 min para pasar el tiempo de incubación, a partir del cual las partículas empiezan a remover material de la superficie que impactan, mientras que para una velocidad de 64 m/s, el tiempo de incubación es muy cercano a cero [7]. Una posible explicación a la diferencia en el tiempo de incubación se debe al endurecimiento por deformación que las partículas generan durante los impactos, a bajas velocidades el endurecimiento por deformación es lento y no produce la remoción del material hasta que éste no se fracture. A mayor velocidad de la partícula el endurecimiento en la superficie impactada también se incrementa y por lo cual la fractura del material se presenta más rápido, dando inicio al estado estable de la remoción de material [13]. Además se observa también una mayor

pérdida de material cuando la velocidad de la partícula se incrementa. Esto es una consecuencia de la energía cinética que la partícula conserva hasta antes del impacto (Ecuación 1.2).

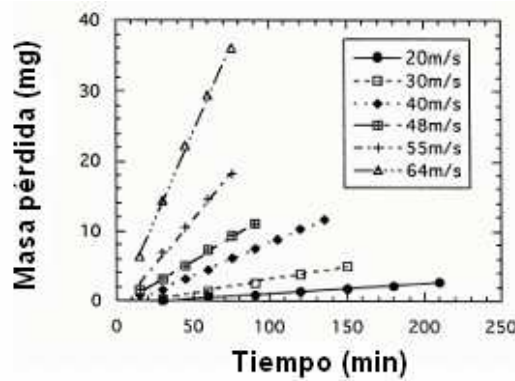
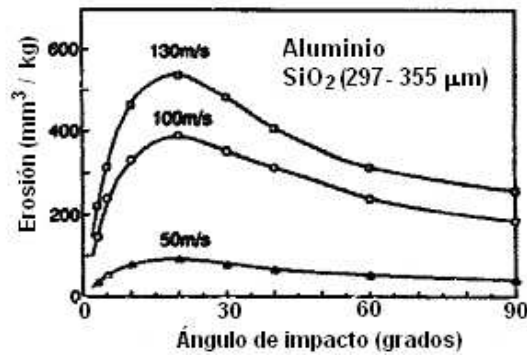
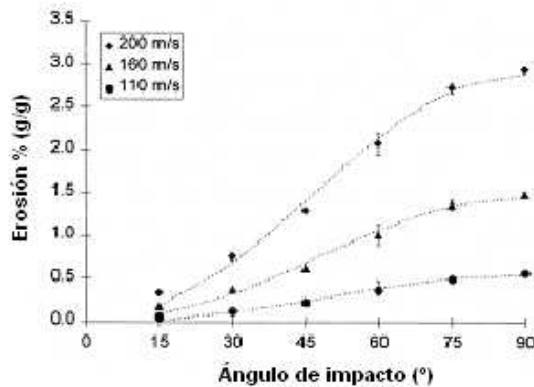


Figura 1.11 Efecto de la velocidad de la partícula en el tiempo de incubación. [7]



a)



b)

Figura 1.12 Efecto de la velocidad de impacto a) en una aleación de aluminio erosionada con partículas de SiO₂ (297-533 μm) [14], b) en un vidrio erosionado con Al₂O₃ de 23 μm [15].

En la Figura 1.12 (a) se observa que un aumento en la velocidad de las partículas arroja una mayor erosión sin afectar la dependencia del ángulo de impacto en un aluminio erosionado con partículas de silicio. Esto es, a las tres velocidades, los ángulos de impacto presentan la mayor razón de erosión entre 20 y 30°, siendo más notorio en las velocidades de mayor magnitud. Un efecto similar es observado en vidrio erosionado con partículas de alúmina. El comportamiento frágil se presenta independientemente de la velocidad de la partícula. Sin embargo la razón de desgaste se incrementa con la velocidad Figura 1.12 (b).

Lo anterior muestra que un incremento en la velocidad de las partículas provoca un incremento en la energía cinética, principal responsable de la deformación y fractura en una superficie, arrojando una alta razón de la erosión en los materiales.

1.4 Efecto de las propiedades de la partícula erosiva.

1.4.1 Dureza de la partícula.

Las propiedades mecánicas de las partículas, especialmente la dureza, son de gran interés en la resistencia a la erosión en los materiales. Partículas con dureza menor a la de la superficie causan menos daño que partículas de mayor dureza. La razón de desgaste depende mucho de la relación que existe entre la dureza de la partícula abrasiva, H_p , y la dureza de la superficie H_t , (H_p/H_t). En la Figura 1.13 se muestran 7 materiales cerámicos erosionados cada uno con diferentes tipos de partícula, la relación de dureza entre la partícula y la superficie del material muestra que cuando H_p/H_t es menor a 1 (en el caso del carburo de silicio, PSZ y carburo de boro) la razón de erosión es baja; sin embargo cuando $H_p/H_t > 1$ (Silica SiO_2 , Vidrio borosilicato, soda lime y alúmina) la razón de erosión es alta [16].

Por otro lado, en un estudio reciente, el desgaste erosivo en un vidrio expuesto al impacto de diferentes tipos de partícula muestra un comportamiento un poco diferente, la razón de erosión para una relación de dureza $H_p/H_t < 1$, es muy alta Figura 1.14, donde las partículas de granalla de acero con menor dureza a la del vidrio (Tabla 1.1) lo impactan a una velocidad de 45 m/s, produciendo un daño tan severo como las partículas de carburo de silicio y alúmina. Una explicación a este último comportamiento es atribuida en primer lugar a la densidad de la partícula (Tabla 1.1), que aunada a la velocidad impacto golpea la superficie del vidrio con una mayor energía cinética (Ecuación 1.2). En segundo término, se debe a la alta tenacidad que presenta con respecto a las demás partículas [16,17], con lo cual también hace ver estas propiedades de la partícula, como un factor que interviene en la resistencia a la erosión de los materiales. La Figura 1.15 muestra imágenes de las partículas mencionadas en la Tabla 1.1.

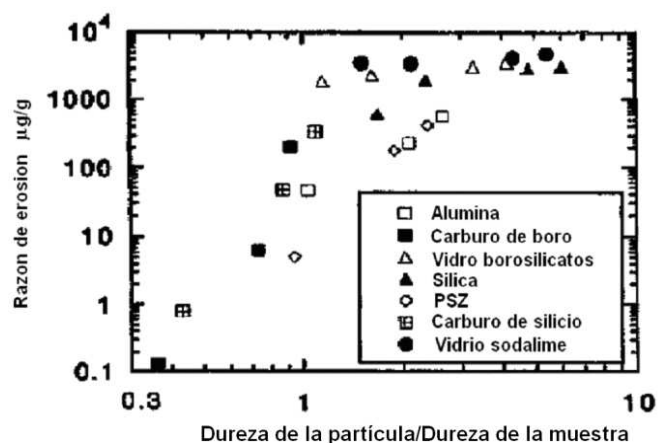


Figura 1.13 Gráfica de razón de erosión Vs Dureza de la partícula/Dureza de la muestra de 7 materiales erosionados con partículas de diferente dureza a una velocidad de impacto a 60 m/s [16].

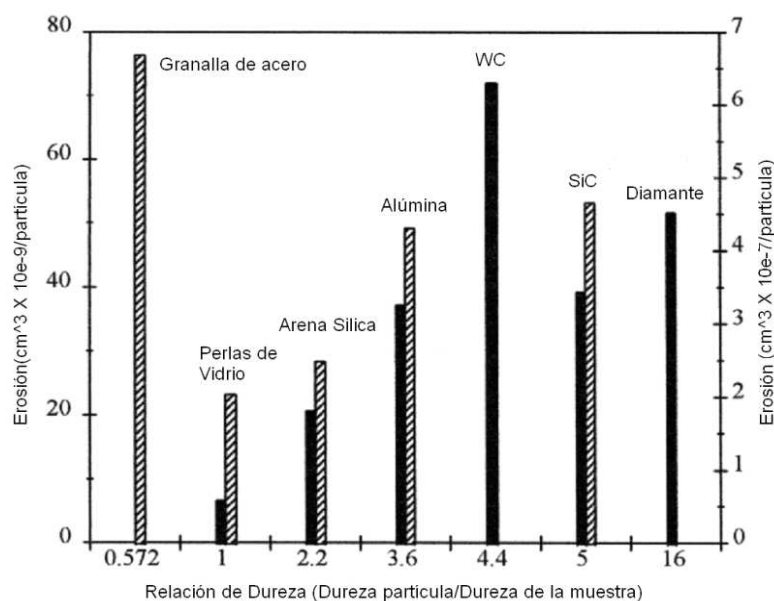


Figura 1.14 Gráfica de la razón de erosión de un vidrio en función de Dureza de la partícula/Dureza de muestra, a un ángulo de impacto de 90°. La escala del eje y a la izquierda corresponde a las barras oscuras, las cuales representan una velocidad de 57 m/s con tamaño de partícula entre (180-250 μm). La escala del eje “y” a la derecha corresponde a las barras de rayas, en la prueba realizada a una velocidad de 45 m/s con tamaños de partícula entre (400-500 μm) [17].

Tabla 1.1 Propiedades de partículas abrasivas [17].

<i>Partículas abrasivas</i>	<i>Dureza (HV)</i>	<i>Tenacidad (MPa m^{0.5})</i>	<i>Densidad (g/cm³)</i>	<i>Forma</i>
<i>Granalla de acero</i>	286	50	7.8	Esférica
<i>Perlas de vidrio</i>	540	0.2-0.7	2.55	Esférica
<i>Sílice</i>	1100	1.2	2.67	Irregular
<i>Alúmina</i>	1800	3-3.5	3.99	Irregular
<i>Carburo de tungsteno</i>	2200	5.0	15.7	Irregular
<i>Carburo de silicio</i>	2500	3.5-4.5	3.2	Irregular
<i>Diamante</i>	8000	7-11	3.5	Block

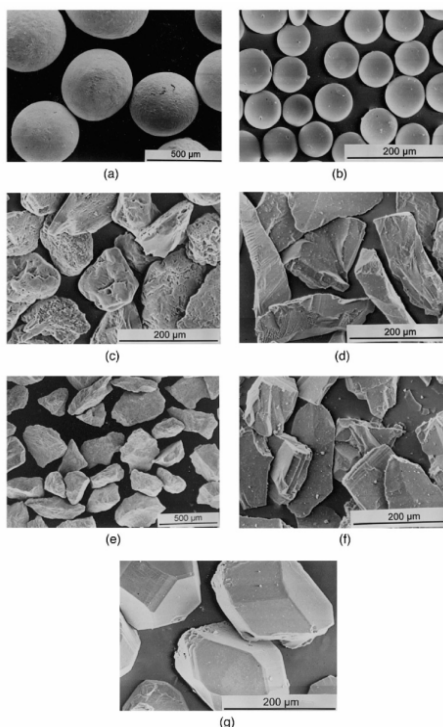


Figura 1.15 Imágenes de partículas obtenidas en el SEM. a) Granalla de acero (400-500 μm). b) Perlas de vidrio (63-106 μm). c) Arena silica SiO_2 (106-125 μm). d) Alúmina Al_2O_3 (106-125 μm). e) Carburo de tungsteno WC (212 μm). f) Carburo de silicio (106-125 μm). g) Diamante, (106-125 μm) [17].

1.4.2 Morfología de la partícula

La forma de la partícula también afecta la razón de desgaste. Aunque es difícil cuantificar este efecto se ha encontrado que las partículas angulares muestran un mayor daño que partículas de forma esférica, ver Tabla 1.2. Las partículas esféricas corresponden a perlas de vidrio y las angulares a carburos de silicio [18], las cuales según la Tabla 1.1 tienen diferentes propiedades. Existen otros trabajos que muestran diferencias en la erosión cuando se emplean partículas esféricas y angulares [1]. En la Figura 1.16, se muestra la erosión de un acero inoxidable impactado con perlas de vidrio en forma esférica donde la masa removida es baja pero al quebrar las perlas la masa removida aumenta.

Tabla 1.2 Efecto de la forma de la partícula en la erosión de un acero 1018, a un ángulo de 30° [10]

Tamaño de la partícula μm	Razón de alimentación g/min	Masa removida en mg.			
		20 m/s		60 m/s	
		Esférica	Angular	Esférica	Angular
250-355	6.0	0.2	1.6	3.0	28.0
	0.6	0.2	2.0	4.5	32.7
495-600	6.0	0.1	---	1.2	---
	2.5	---	2.0	---	42.4

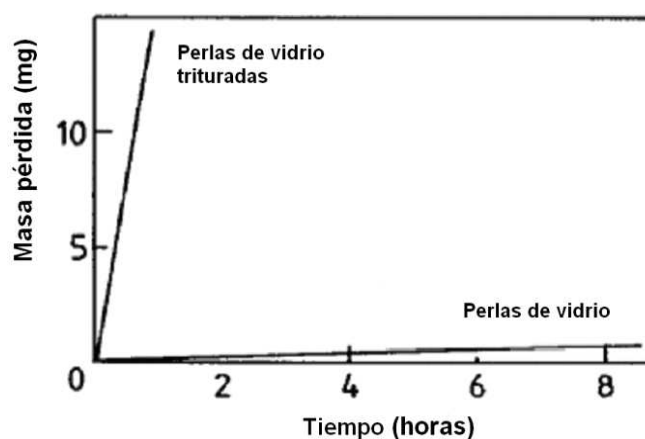


Figura 1.16 Efecto de la forma de la partícula con respecto a la masa removida en un acero inoxidable [1]

Con el propósito de explicar el efecto de la forma de la partícula se han realizado diversos estudios mediante modelación por paquetes computacionales [19-22], estos generalmente involucran los esfuerzos de deformación que las diferentes formas de partículas ejercen sobre el área de contacto en la superficie sólida, de lo que depende los mecanismos de remoción de material.

1.4.3 Tamaño de la partícula.

El tamaño de la partícula al igual que la velocidad de impacto son dos de los parámetros de mayor importancia en la resistencia a la erosión ya que de estos depende la cantidad de energía cinética que la partícula contenga antes del impacto en una superficie.

El incremento en el tamaño de la partícula genera una mayor erosión, tal como lo muestra la Figura 1.17 (a). Después de alcanzar el tamaño crítico de la partícula, (50 μm) la erosión ya no se ve afectada. Sin embargo otros investigadores atribuyen que este tamaño crítico depende de la velocidad de la partícula tal como lo muestra la Figura 1.17 (b) donde el intervalo del diámetro crítico de la partícula oscila de entre 50 y 100 μm para tres velocidades diferentes.

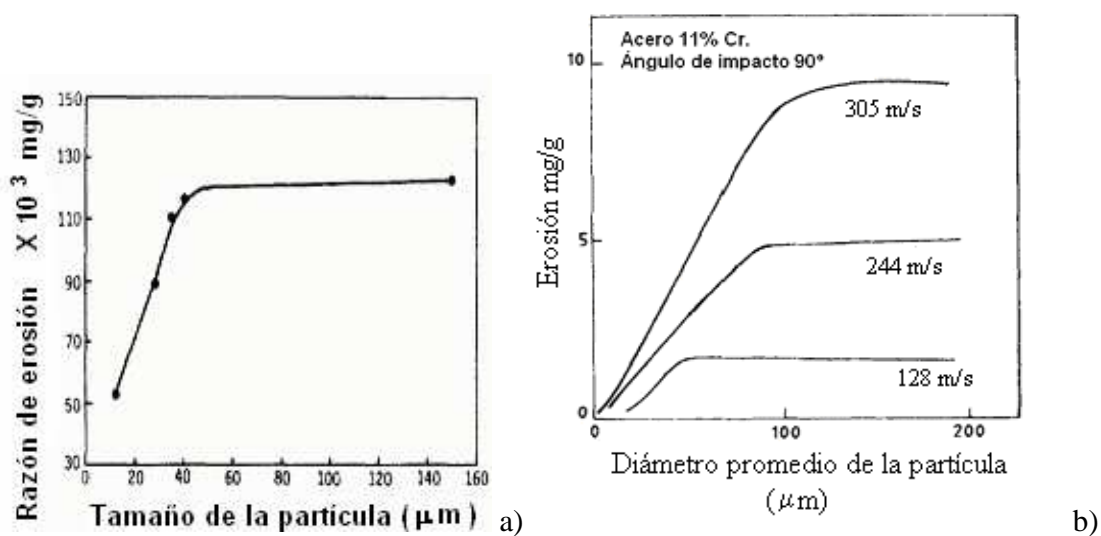


Figura 1.17 Efecto del tamaño de la partícula sobre la resistencia a la erosión de los materiales a) a una velocidad de impacto constante [18] b) tamaño crítico de la partícula (50 y 100 μm) a diferente velocidad de impacto [12]

Otro efecto que produce el tamaño de la partícula en el caso del vidrio consiste en modificar su comportamiento frágil a un comportamiento dúctil como se observa en las gráficas de la Figura 1.18 (a) y (b), donde partículas de $17.1 \mu\text{m}$ a una velocidad de 150 m/s provocan una mayor erosión a un ángulo de 90° (a) y al emplear partículas de $5 \mu\text{m}$ a la misma velocidad la mayor erosión se presenta a un ángulo de 30° (b), comportamiento típico en un material dúctil. Una explicación a este comportamiento se debe a que partículas muy pequeñas generan esfuerzo de fluencia muy altos, disminuyendo la escala de deformación y a la misma vez la generación de grietas laterales. Otro factor que contribuye a este comportamiento se debe a la baja magnitud de la energía cinética que contienen las partículas de menor volumen [2, 9]. Aunque esta explicación ayuda a entender este comportamiento no existen estudios que determinen las consecuencias exactas de este fenómeno conocido como transición dúctil-frágil por el impacto de partículas de diferente tamaño.

1.4.4 Razón del flujo de partículas (g/s).

Generalmente la razón del flujo (g/s) de partículas erosivas no tiene gran influencia en la erosión de materiales metálicos. Sin embargo, a altas razones de flujo la razón de la erosión disminuye, debido al contacto y choque entre partículas [12]. En un estudio enfocado a determinar el efecto de la razón de flujo con respecto a la erosión de varios materiales se encontró que a altos valores, la razón de erosión es menor, como consecuencia de la interacción y rebote entre partículas, Figura 1.19. Además atribuyen la interacción de las partículas a una distancia relativa entre partículas en la cual se evita, esta distancia depende en mucho también, de la velocidad y la distribución de tamaños. [19, 23, 24].

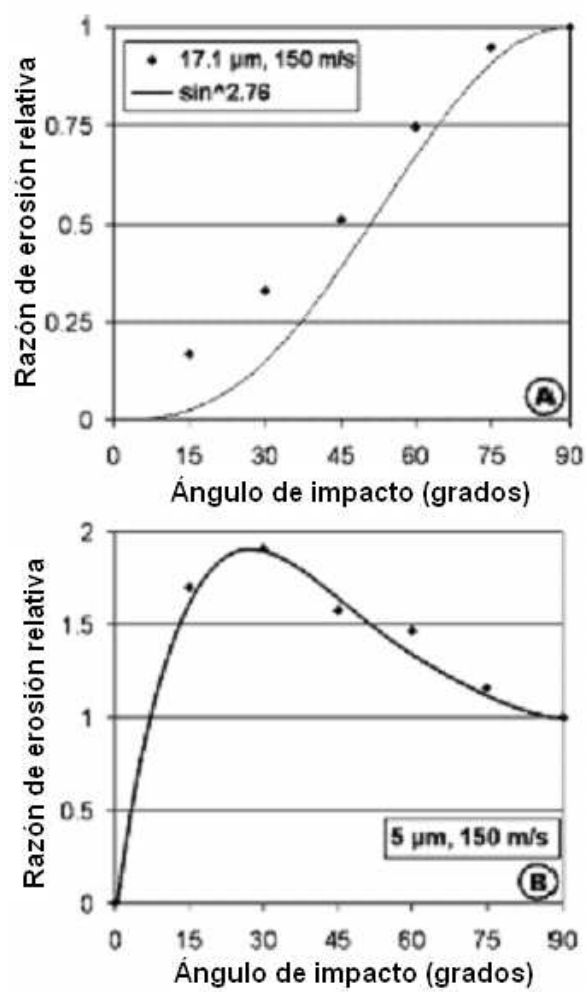


Figura 1.18 Erosión relativa contra el ángulo de impacto para un vidrio a) frágil b) dúctil. [9].

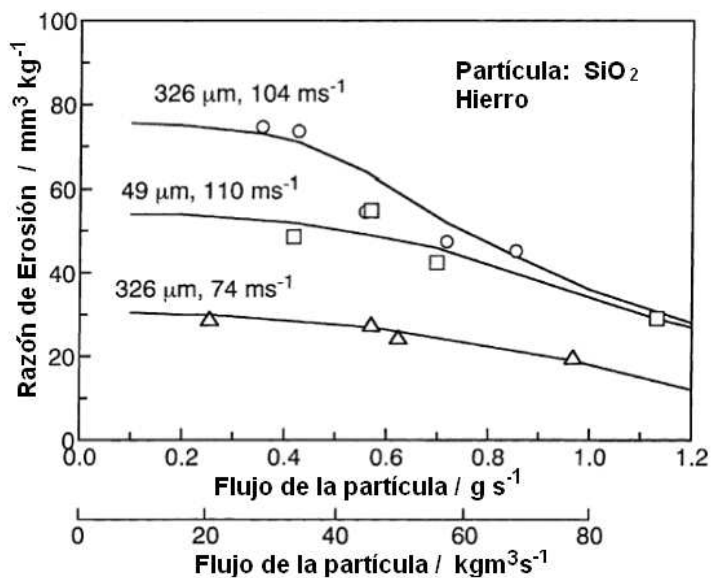


Figura 1.19 Efecto del flujo de la partícula con respecto a la razón de erosión [23]

1.5 Efecto de las propiedades de los materiales expuestos a erosión.

Los materiales difieren en su respuesta al desgaste erosivo y también los mecanismos por los cuales ocurre el desgaste (Sección 1.2). La erosión en la superficie de un material metálico ocurre por deformación plástica y fractura. Por lo tanto la razón de erosión dependerá de la microestructura y propiedades mecánicas tales como el punto de cedencia, dureza, capacidad de endurecimiento por deformación, ductilidad y tenacidad del material a ser erosionado.

1.5.1 Efecto de la dureza a la resistencia a la erosión.

La dureza de los materiales ha sido fuertemente relacionada con la resistencia al desgaste, derivándose un gran número de investigaciones sobre esta propiedad. Una de las primeras relaciones fue la mostrada en la sección 1.4.1, donde se estipula que partículas de mayor dureza con respecto a la superficie sólida provocan un mayor desgaste que las de menor dureza, determinando una relación $H_p/H_t = 1$, a partir del cual la razón de erosión aumenta o disminuye dependiendo de las propiedades tanto de

la partícula como del material [17]. Se ha observado que, en el caso de los materiales metálicos, al incrementar su dureza, no produce efectos significativos en su resistencia a la erosión tal como se muestra en la Figura 1.20. En el caso de tungsteno (W), molibdeno (Mo) tantalio (Ta) en estado recocido, presentan un alta dureza y también una muy buena resistencia a la erosión lo cual hace pensar que al incrementar la dureza en un metal mejoraría su resistencia a la erosión. Al aumentar la dureza por trabajo en metales como cobre (Cu), níquel (Ni) y aluminio (Al), no logran una mejor resistencia a la erosión. En el caso del los aceros, tratados térmicamente con diferentes valores de dureza la resistencia a la erosión no se ve favorecida. Una posible causa a este comportamiento se debe a la diferente razón de endurecimiento que los metales presentan arrojando diferente respuesta a la erosión. [1,2 y 4].

Otra relación de la erosión se ha propuesto con respecto a los elementos químicos que forman las aleaciones ferrosas. Un estudio comparó la pérdida en masa por erosión con diferentes niveles de carbono en algunos aceros. Se observó una disminución conforme el nivel de carbono disminuía, Figura 1.21 (a). Posteriormente estos aceros fueron tratados térmicamente con el propósito de aumentar su dureza y después del ensayo de erosión, se encontró que el acero con el nivel de carbono más alto (AISI 1080) y dureza de 680 HV, fue el que mostró la más alta erosión. Con estos resultados los autores atribuyen este efecto a la diferente microestructura que los aceros generaron como consecuencia de los tratamiento térmicos, por ejemplo, la condición de normalizado presenta una mezcla de ferrita (fase suave) y perlita (microconstituyente de ferrita y cementita frágil) que al aumentar el contenido de carbono la perlita es mayor y por su naturaleza frágil acelera la erosión (Figura 1.21 (a)), en el caso de los aceros templados (AISI 1080) con intervalo de dureza de 150 a 300 HV, la pérdida en masa es muy similar, pero en el de mayor dureza 680 HV, la erosión aumenta; esto se debe a que al aplicar un segundo tratamiento de revenido a 650 °C y al ir variando el tiempo de calentamiento de 15 min a 24 hrs, la microestructura empieza a modificarse a tal grado que a 15 minutos la difusión del carbono a esta temperatura provocó la precipitación de carburos muy finos que aumentan la dureza disminuyendo la resistencia a la erosión, conforme el tiempo aumenta y la temperatura se mantiene constante los carburos

coalescen y crecen de tamaño produciendo una estructura de carburos esferoidizados y bajos valores de dureza en la matriz, después de las 24 hrs de recocido, con lo que muestra una pérdida en masa tan baja como la observada en un acero normalizado (Figura 1.21 (b)) [25]. Resultados similares fueron encontrados por otros investigadores donde afirman que un acero con microestructura de perlita fina y gruesa presenta una mayor erosión que un acero con una microestructura de carburos esferoidizados [5].

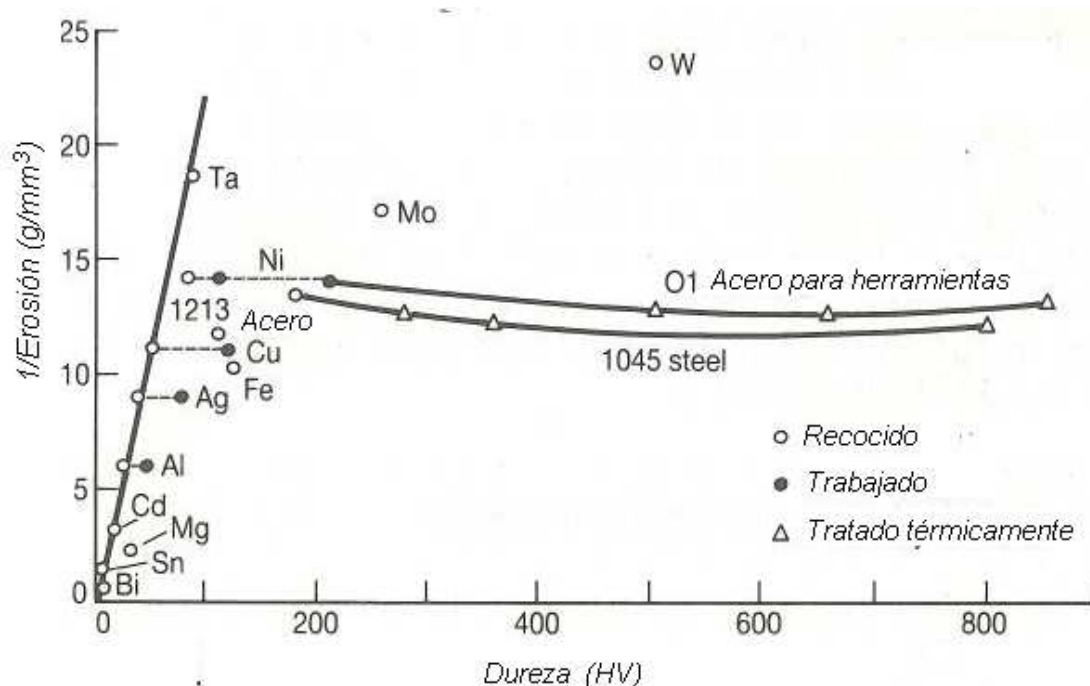
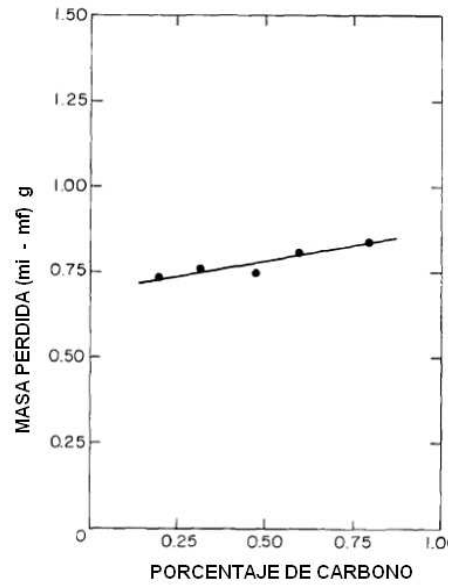
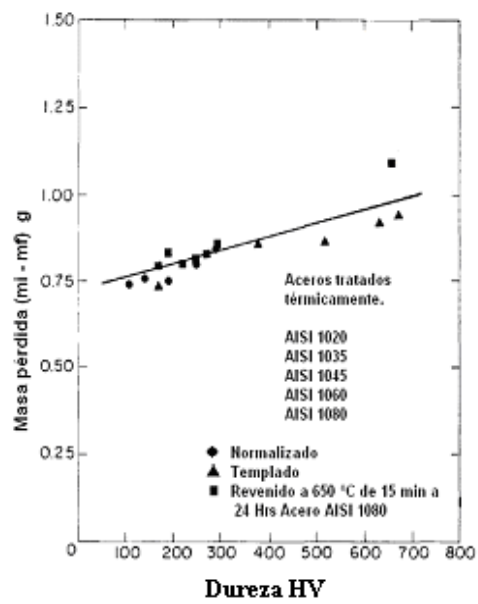


Figura 1.20 Resistencia a la erosión en función de la dureza Vickers (HV), después de ser erosionado con SiC a un ángulo de 20° y una velocidad de impacto de 76 m/s [1].



a)



b)

Figura 1.21 Pérdida en peso en función de la dureza de aceros al carbono con contenidos de carbono de 0.2 hasta 0.8; los triángulos representan condición de templado y los círculos condición de normalizado en el caso de los cuadros se trata de un acero 1080 una temperatura de revenido 650 °C y tiempos que variaron de 15 min hasta 24 hrs [25].

Otros investigadores han empleado técnicas de endurecimiento en la superficie de metales con el propósito de incrementar la resistencia a la erosión. Roa y colaboradores [26] estudiaron el comportamiento a la erosión de un acero AISI 4340 con tratamientos térmicos de templado, a una temperatura de 850 °C y revenido con dos temperaturas 200 °C y 650 °C obteniendo valores de dureza de 550 HV (200T) y 350 HV (650T) respectivamente. Además, otras muestras de este tipo de acero con las mismas condiciones fueron sometidos a un endurecimiento superficial por láser [27], la dureza obtenida por esta técnica se incrementó hasta 600 HV (L200T antes con 550 HV) y 500 HV (L650T, antes con dureza de 350 HV). Los resultados mostraron que la dureza obtenida por el tratamiento convencional y la técnica de endurecimiento superficial no favorecieron a la resistencia a la erosión, ver Figura 1.22. Una de las explicaciones de este comportamiento se atribuyó a la pobre ductilidad y a la baja razón de endurecimiento por deformación durante el impacto de las partículas [26].

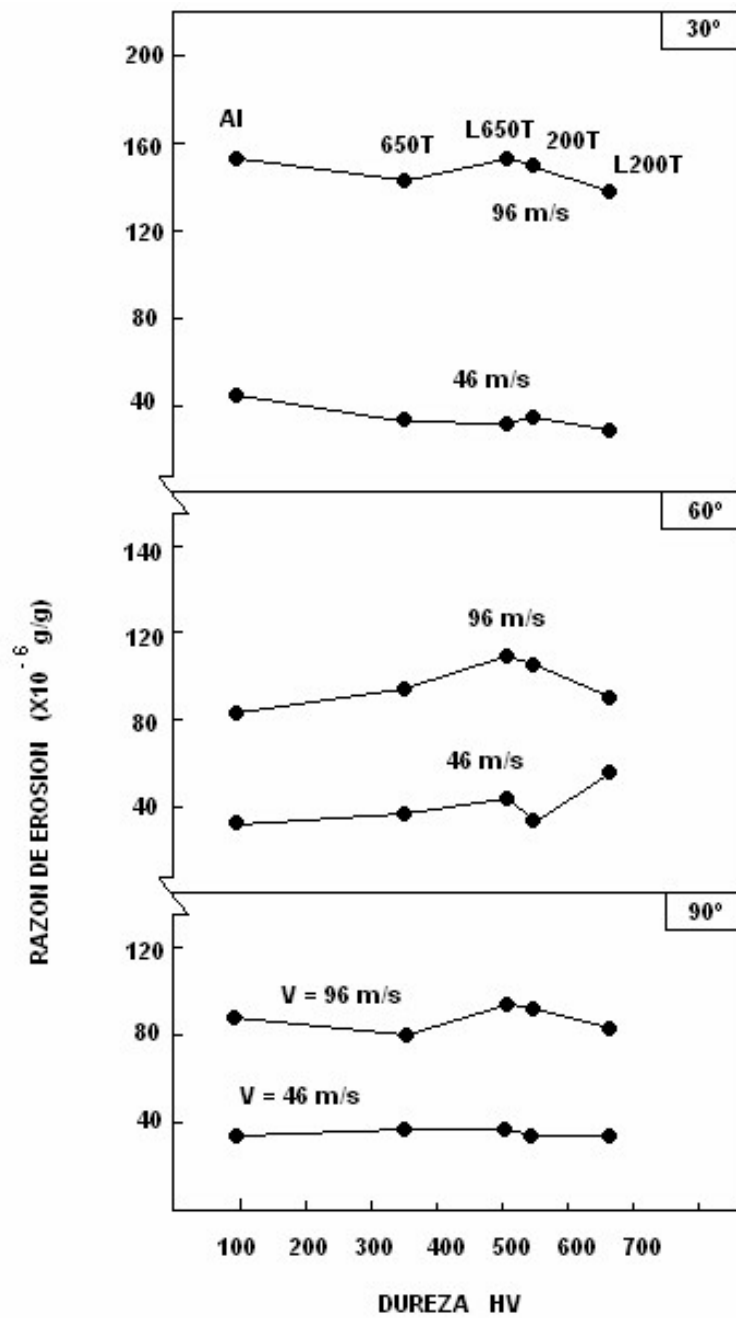
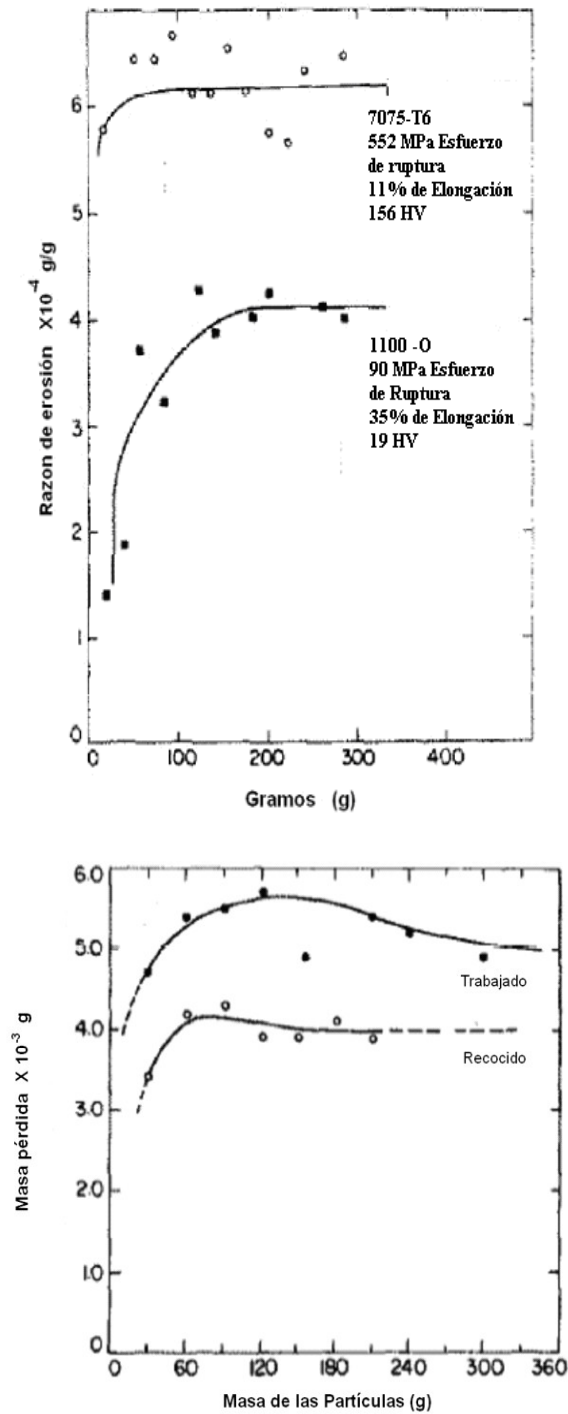


Figura 1.22 Comportamiento de la erosión para un aluminio (Al), aceros tratados térmicamente (650T y 200T) y aceros tratados térmicamente y endurecidos por fusión láser de la superficie (L650T y L200T) a dos velocidades de impacto (46 y 96 m/s) y a tres ángulos de impacto (30°, 60° y 90°) [26].

1.5.2 Endurecimiento por deformación en la superficie impactada.

Durante la erosión de una superficie, el impacto de las partículas duras produce altos esfuerzos localizados y como consecuencia endurecimiento por deformación debajo de la superficie afectando sus propiedades mecánicas. En el caso de aluminio sometido a trabajado en frío, donde el material es deformado muy por debajo de su temperatura homóloga ($0.5T_m$), con una dureza a 156 HV, presenta una alta erosión, ver Figura 1.23 (a), cuando se compara con un aluminio libre de trabajo en frío y dureza de 19 HV. Esta diferencia puede relacionarse con la diferencia en la ductilidad que presentan, la cual puede ser mayor a 35% en el caso del aluminio de menor dureza y que presenta menor erosión. Por otra parte el aluminio de mayor dureza, con una ductilidad del 11 % presenta una mayor erosión. Un efecto similar también es observado en un acero inoxidable del tipo 304, ver Figura 1.23 (b) el cual fue ensayado en la condición de recocido y trabajado en frío mediante un proceso de laminación. La dureza de la condición trabajada fue de 202 HV mientras que la condición recocida fue de 163 a 178 HV. Al igual que el aluminio, la condición libre de trabajo en frío presenta la mayor resistencia a la erosión. Esto conduce a la idea de que el comportamiento de la erosión de un cierto número de aleaciones puede ser más dependiente en las propiedades de la ductilidad, y aunque en estos trabajos no se menciona, también de la tenacidad, o mejor dicho la capacidad del material a deformarse plásticamente sin fracturarse [28-32]. En la Tabla 1.3 se muestra el efecto de las propiedades mecánicas de un acero 1020 con respecto a su resistencia a la erosión en la condición de laminado en frío y en caliente. Se observa que el acero laminado en frío con un valor de elongación de 15% se erosiona más que el laminado en caliente con 25 % de elongación. En la Tabla 1.4 se muestran las propiedades mecánicas y la resistencia a la erosión de un acero AISI-SAE 4330 tratado térmicamente mediante templado, templado y revenido, y recocido por esferoidización.



a)

b)

Figura. 1.23

a) Comportamiento a la erosión de dos aleaciones de aluminio 1100-O y 7075-T6, partículas de carburo de silicio de $280 \mu\text{m}$ y una velocidad de 30 m/s. b) Comportamiento a la erosión de un acero del tipo AISI 304, partículas de alúmina Al_2O_3 a un ángulo de 30° y velocidad de 60 m/s. [28].

Aunque muchos investigadores concluyen que los materiales con alta ductilidad y alta tenacidad a la fractura presentan una buena resistencia a la erosión muy pocos se han enfocado a investigar estas variables, donde se afirma que durante el impacto de partículas duras sobre un material con buena ductilidad se puede tener altos esfuerzos de fluencia y endurecimiento por trabajo antes que la fractura ocurra mejorando así la resistencia a la erosión [8, 29].

Tabla 1.3 Efecto de la ductilidad, resistencia y dureza en el comportamiento de la erosión de un acero AISI-SAE 1020 [28].

Condición	Resistencia a la tensión (MPa)	Dureza (HV)	Elongación (%)	Masa perdida (mg)
laminado en caliente	379	70	25	2.8
laminado en frío	421	76	15	4.0

Tabla 1.4 Efecto de la ductilidad, resistencia y dureza en el comportamiento a la erosión de un acero AISI SAE 4340 [28].

Tratamiento térmico	Resistencia a la ruptura (MPa)	Dureza (HV)	Elongación (%)	Reducción en área (%)	K_{IC} (MPa/m ^{1/2})	Resistencia al impacto Charpy (J)	Masa perdida por erosión (mg)
Templado	2116	700	8	24	37	14	1.03
Templado y revenido a 200 °C	1882	560	11	36	64	22	0.97
Templado y revenido a 500 °C	1254	380	14	47	68	16	0.97
Recocido por esferoidización	689	≈240	≈25				0.90

La dureza de la superficie de un material generalmente está relacionada con su resistencia a la erosión, debido a que ésta controla la profundidad de penetración de una partícula al impactar la superficie y como consecuencia de esto, el volumen de material removido. Se considera también que la energía cinética que se gasta en el impacto es transformada en energía de deformación necesaria para provocar la deformación y fractura del material. La energía gastada por el impacto de las partículas puede transformarse en dos formas de deformación: elástica y plástica. En la deformación elástica el material deformado recupera sus dimensiones originales una vez que la energía ha sido disipada, mientras que la deformación plástica se presenta cuando el límite elástico es excedido (esfuerzo de deformación) y el material deformado ya no recupera su forma original [8].

Debido a la deformación plástica generada debajo de la superficie, se activa un mecanismo conocido como endurecimiento por trabajo [30], que genera el aumento de las propiedades mecánicas y la dureza, provocando la diferencia de propiedades entre esta zona y el resto del material. La deformación causada por el impacto de las partículas erosivas típicamente ocurrirá a velocidades de deformación de alrededor 10^6s^{-1} . En la Figura 1.24 se muestra la variación de la velocidad de deformación con respecto a la velocidad de impacto obtenida para diferentes tamaños de partícula [2, 31].

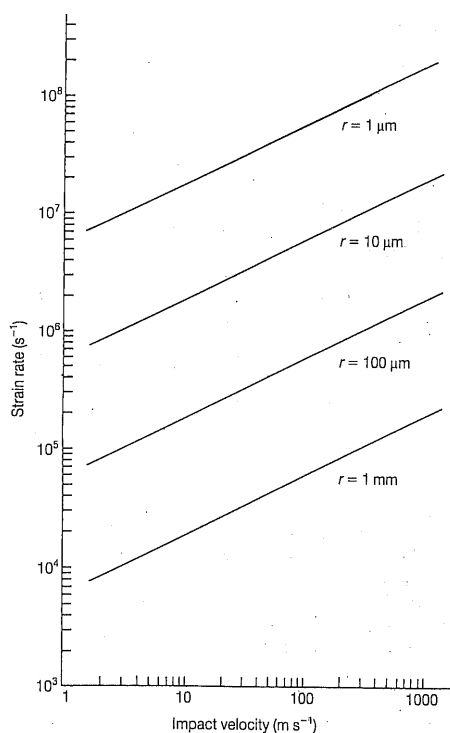


Figura 1.24 Variación de la velocidad de endurecimiento con respecto a la velocidad de partículas con diferente tamaño. [2]

Algunos investigadores han relacionado el efecto de este mecanismo, con las propiedades iniciales de los materiales sujetos a erosión, donde afirman que materiales con alta ductilidad presentan un mayor endurecimiento por trabajo y menor pérdida de material, [8, 28, 31-34] atribuyendo a que si el material está completamente endurecido entonces no podrá generar más endurecimiento por trabajo, fracturándose y permitiendo la eliminación del material por desgaste. Si el material es capaz de endurecerse por trabajo entonces disipará la energía de impacto en forma de deformación hacia la subsuperficie evitando mayor desgaste. Entonces aquellos materiales con mayor coeficiente de deformación n [30] presentarán una menor cantidad de material desgastado. Esto se puede observar en la Figura 1.25, donde se relaciona el estado estable (inicio de la remoción del material) de dos aceros con diferente coeficiente de endurecimiento n y la masa removida. Un acero inoxidable del tipo 304 con valores de n entre 0.54 a 0.55 alcanza el estado estable más rápido que un acero AISI 1020 con valor de n entre 0.05 a 0.15, [28].

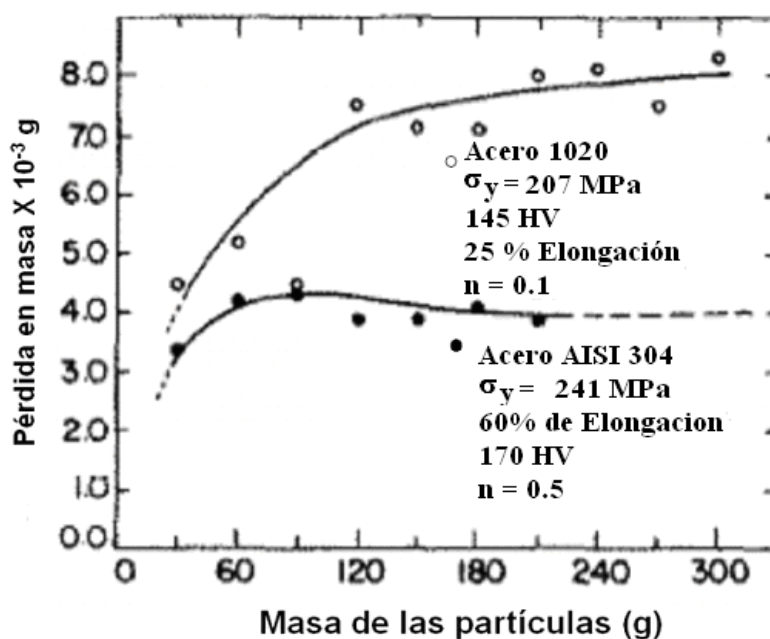


Figura 1.25 Efecto del coeficiente de endurecimiento n , y elongación en la erosión de un acero del tipo AISI 1020 y otro del tipo AISI 304. Erosionado con partículas de Al_2O_3 a un ángulo de 30° y una velocidad de partícula de 60 m/s [28].

Un ejemplo claro del endurecimiento por trabajo es observado en la Figura 1.26 donde materiales con alta ductilidad arrojan un aumento de la dureza debajo de la superficie erosionada [7]. Aquí se observa que un latón libre de esfuerzo mecánico presenta una profundidad de alrededor de $100 \mu m$ con mayor dureza que el resto del material; esto como consecuencia del endurecimiento por deformación durante el impacto de partículas a diferentes velocidades. Lo opuesto ocurre cuando se incrementa el trabajo en frío hay una tendencia a bajar la dureza en promedio 230 debido a que el impacto de las partículas releja los esfuerzos en la superficie [4].

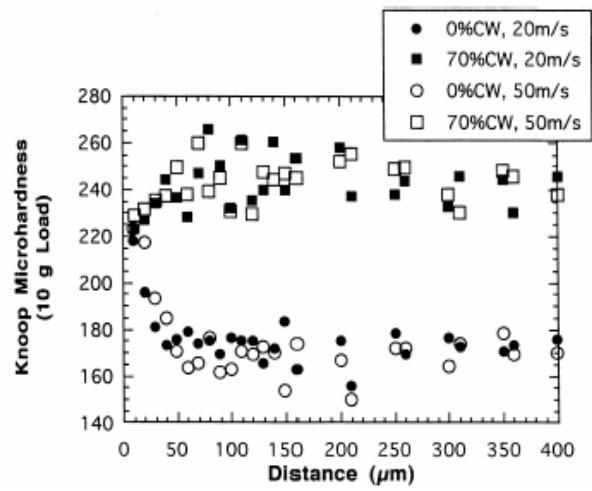


Figura 1.26 Perfil de microdureza Knoop para probetas de un latón con 0% y 70% de trabajo en frío. Las pruebas de erosión fueron realizadas a velocidades de impacto de 20 y 50 m/s a un ángulo de impacto de 90° y partículas de Al_2O_3 de $355 \mu\text{m}$ [7].

CAPÍTULO 2

FABRICACIÓN DE CORAZONES DE ARENA SÍLICA POR EL PROCESO DE CAJA FRÍA.

2.1. Introducción.

Los corazones de arena sílica son ampliamente empleados en la industria de la fundición para obtener formas complejas que difícilmente se obtendrían en un proceso de maquinado. La fabricación de corazones es realizada por diversos procesos, entre ellos el de caja fría. Arena previamente mezclada con resinas de fenol-uretano se introduce con aire a alta presión dentro de las cavidades de un molde y después de un tiempo de curado, el corazón se consolida a una alta resistencia. Este proceso es uno de los más empleados dentro de la industria de la fundición automotriz ya que la alta velocidad de curado en la mezcla de arena y resinas favorece los sistemas de alta producción de las plantas actuales. En ocasiones, los corazones de arena sílica son empleados para formar parte de un molde de vaciado semi-permanente (partes metálicas y corazones de arena)

pero la mayoría de los moldes de vaciado se forman completamente de piezas de arena sílica elaboradas en el proceso de caja fría [35-41]. Los moldes o cajas de corazones empleados en la elaboración de los corazones y piezas de arena sílica generalmente son de aleaciones metálicas, los cuales por la naturaleza abrasiva de la arena están expuestos al fenómeno de desgaste. El desgaste trae como consecuencia el deterioro de las cajas de corazones provocando la obtención de corazones fuera de dimensiones y como consecuencia final, el rechazo de las piezas vaciadas [42, 43]. En este capítulo se analizará el proceso de fabricación de los corazones mediante el proceso caja fría, los diferentes materiales empleados para la fabricación de las cajas y las causas que provocan el desgaste en los moldes.

2.2. Fabricación de moldes de arena para vaciado.

En el vaciado en moldes de arena se pueden distinguir dos grandes grupos: moldes de arena en verde y moldes de arena y corazones con resinas fenolicas. En el primero, arena húmeda es mezclada con arcilla y aglutinantes los cuales se depositan en un molde metálico y se apisona hasta lograr una buena compactación, el enlace entre los granos de la arena se obtiene por medio de los aglutinantes. En el moldeo con resinas, la mezcla es introducida en moldes por medio de aire a presión y después se les aplica un curado o secado; el cual puede realizarse a temperatura ambiente o bien aplicando calor. El enlace de los granos de arena se obtiene por las reacciones químicas de las resinas. En la Figura 2.1 se muestran algunos moldes y corazones para vaciado elaborados de arena sílica.

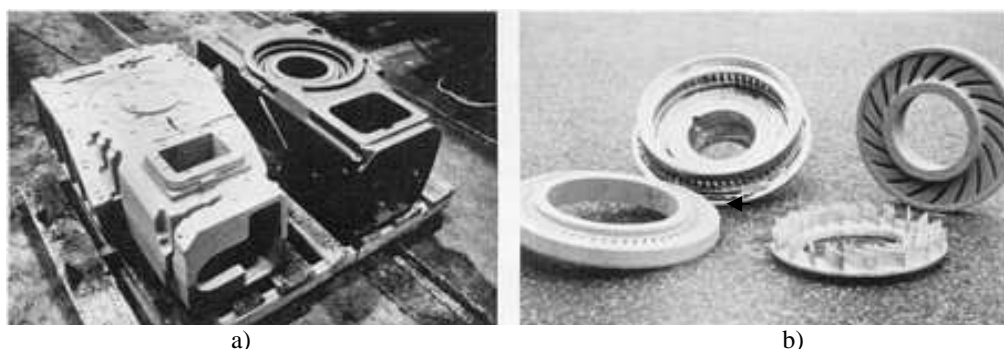


Figura 2.1 a) moldes para vaciado fabricados de arena sílica b) corazones de arena sílica empleados para obtener piezas vaciadas [36].

El vaciado en moldes de arena es el más simple y versátil de los procesos usados en la fundición de aluminio. Este representa el 11% del peso en piezas de aluminio vaciadas en todo el mundo. El molde de arena generalmente es fácil de fabricar, pueden realizarse tantas modificaciones como se requieran y es relativamente simple cambiar el diseño de la pieza final. El proceso de vaciado puede ser empleado para producir una pieza vaciada con forma simple o compleja con el empleo de corazones intrincados. La Figura 2.2 (a) y (b) muestra imágenes de piezas vaciadas de aluminio con formas complejas.

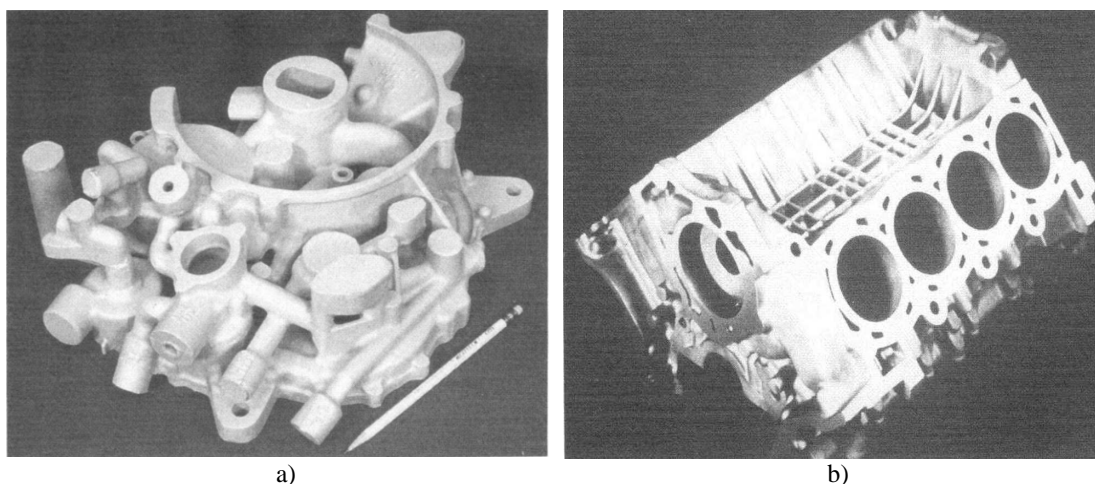


Figura 2.2 Piezas vaciadas de aluminio obtenidas con moldes y corazones de arena sílica (a) Pieza empleada en la industria aeroespacial, b) pieza para la industria automotriz empleado en la configuración de un motor de 8 cilindros [35].

El proceso mediante el cual se obtienen los moldes y corazones de arena es conocido como sistema de caja fría. Este término se le da para diferenciarlo de aquellos que emplean temperatura para obtener formas de arena con adecuada resistencia. Los sistemas de caja fría son usados en la mayoría de las fundiciones de aluminio con alta producción. La clasificación de caja fría incluye:

Silicatos/CO₂

Fenol/uretano/amina

Acrílico/epóxica/SO₂

Fenol/formato de metileno

Fenol/CO₂

Uno de los más importantes es el sistema fenol-uretano-amina y del cual se mencionan a continuación algunos aspectos de importancia.

2.2.1 Sistema fenol-ureteano-amina de caja fría

El sistema de caja fría fenol-uretano-amina está compuesto de dos partes de resinas. La primera es del tipo fenólica disuelta con un solvente orgánico. La segunda es del tipo isocianato disuelto en un solvente similar.

Para la elaboración de corazones, la mezcla de este sistema típicamente usa un nivel de alrededor del 1% con respecto al peso de la arena. La relación en peso de la Parte1:Parte2 es usualmente de 60:40 para mejorar su eliminación en las piezas vaciadas, reducción de costos y minimizar la generación de gases en las piezas vaciadas. Arena limpia del tipo zirconio, olivita o sílica puede ser usada para la elaboración de moldes y corazones de vaciado. Después de que la arena es recubierta con las dos partes del sistema, la mezcla es soplada dentro de las cavidades de un molde metálico por

medio de tubos sopladores localizados en la parte superior del molde metálico. Posteriormente las resinas son curadas por un catalizador amina en forma de vapor el cual se introduce dentro del molde a través de ventilas colocadas en la parte superior del molde metálico o bien a través de los tubos sopladores. En la Figura 2.3 se muestra un esquema de las reacciones químicas que producen el curado del componente de arena sílica. Después de que el catalizador amina ha sido introducido dentro de las cavidades del molde, aire de purga seco es introducido. La corriente de aire viaja a través del corazón distribuyendo la amina a todas las cavidades del molde metálico. El aire de purga frecuentemente se calienta para aumentar su efectividad.

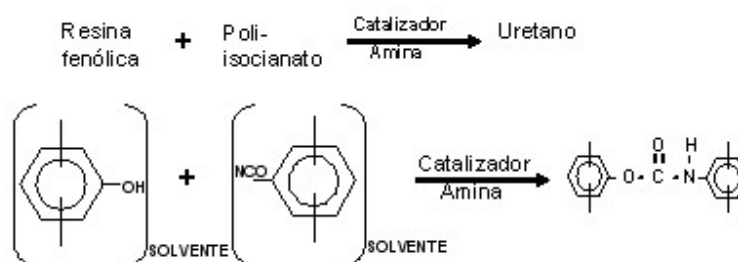


Figura 2.3 Reacción típica en el proceso de caja fría fenol-uretano [37].

2.3 Arena sílica empleada en los moldes y corazones de vaciado.

Es de vital importancia controlar la calidad de la arena empleada en la elaboración de moldes y corazones ya que el éxito del proceso radica en propiedades como morfología de la arena, distribución de tamaños y pH entre otras. La mayoría de las arenas para fundición están compuestas de sílice, sin embargo otros tipos como olivita, zirconio o cromita, también son empleadas.

2.3.1 Forma del grano de la arena.

Todas las arenas de fundición se agrupan dentro de cuatro categorías en cuanto a la forma de grano: redonda, subangular, angular y compuesta. En la Figura 2.4 se muestran imágenes de la forma de partículas de arena. La forma de la arena influye en las propiedades físicas del molde de vaciado, por ejemplo granos redondos presentan una menor área superficial por lo tanto menos resina para recubrirlos. Otra característica es la fluidez la cual es alta en granos con forma redonda arrojando como resultados un producto denso y de buena resistencia.

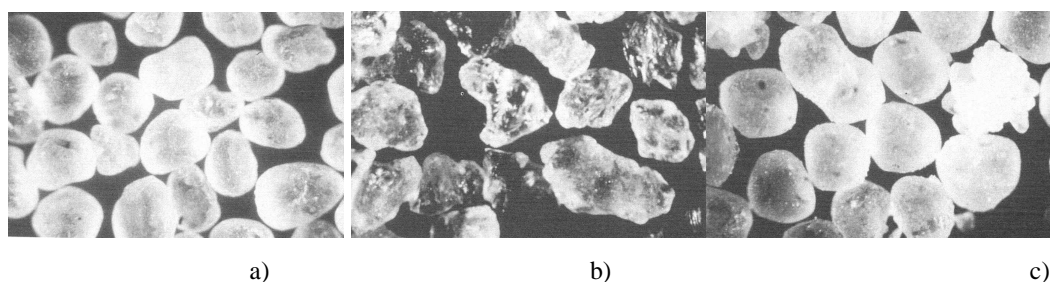


Figura 2.4 Diferentes forma de granos de la arena sílica a) granos redondos, b) granos angulares y c) granos compuestos [35]

2.3.2 Distribución del tamaño de grano de arena.

El tamaño del grano de una arena es determinado mediante un análisis granulométrico. Con esta prueba se puede determinar la fineza del tamaño de grano AFS GNF (Sociedad Americana de Fundidores, por sus siglas en ingles AFS y el número de fineza del grano GNF) y la distribución de los tamaños de grano. El tamiz, con forma de tambor, tiene una malla de alambre por donde pasa la arena según la abertura de esta malla, el número de cada tamiz se determina por la cantidad de aberturas en una pulgada lineal (2.54 cm). En la Tabla 2.1 se muestra el número de algunos tamices y las aberturas que cada una de sus mallas emplea.

Tabla 2.1 Escala de las mallas en tamices empleados para determinar la distribución de tamaños de grano y número de fineza AFS GFN [35].

# de Serie del tamiz	Aberturas por pulgada lineal	Apertura (mm)	Apertura (pulgadas)	diámetro alambre (pulgadas)	Apertura (μm)
4	4	4.699	0.1870	0.0650	4699
6	6	3.327	0.1320	0.0360	3327
8	8	2.362	0.0937	0.0350	2362
12	10	1.651	0.0661	0.0320	1651
16	14	1.167	0.0469	0.0250	1167
20	20	0.833	0.0331	0.0172	833
30	28	0.589	0.0232	0.0125	589
40	35	0.414	0.0165	0.0122	414
50	48	0.295	0.0117	0.0092	295
70	65	0.208	0.0083	0.0072	208
100	100	0.147	0.0059	0.0042	147
140	150	0.104	0.0041	0.0026	104
200	200	0.074	0.0029	0.0021	74
270	270	0.053	0.0021	0.0016	53

El tamaño promedio del grano en un banco de arena puede tener efectos pronunciados en la superficie de acabado de las piezas vaciadas. En la Tabla 2.2 se muestra un ejemplo de cómo determinar la finura del tamaño del grano. Los tamices se ordenan empezando del número menor hasta el mayor y un plato extra, pan, el cual se coloca en la parte inferior. Posteriormente es colocado en un mecanismo vibrador donde se promueve la criba de la arena. La cantidad de arena puede variar, pero generalmente se utilizan 100 g. El resultado del análisis granulométrico indica si una arena es gruesa, media o fina. La arena con número AFS GFN, menor a 45 y contenidos de finos menores a 3% se considera gruesa. La ventaja de emplear una arena con el número AFS GFN 45 para la elaboración de los corazones es que requiere una menor cantidad de resina para recubrir los granos, tiene mayor fluidez y mejor permeabilidad. Por otro lado una arena con AFS GFN mayor a 55 y un porcentaje de finos de 7% presentará una

mayor área superficial mostrando propiedades contrarias a una arena gruesa. El porcentaje de granos finos se obtienen de los tamices mayores a 140.

Tabla 2.2 Ejemplo para calcular el AFS GNF[35].

ASTM E11 Tamiz	Peso Retenido (g)	Porcentaje Retenido X Multiplicado	AFS GFN por tamiz Producto
12	0.0	0.0 X 0.05	0.0
20	0.0	0.0 X 0.10	0.0
30	0.0	0.0 X 0.20	0.0
40	0.3	0.4 X 0.30	0.12
50	1.5	1.7 X 0.40	0.68
70	10.3	11.9 X 0.50	5.95
100	39.3	45.6 X 0.70	31.92
140	22.7	26.3 X 1.00	26.3
200	9.4	10.9 X 1.40	15.26
270	1.9	2.2 X 2.00	4.40
PAN	0.8	0.9 X 3.00	2.70
Total	86.2	99.9	87.33
		AFS GFN = 87.33	

2.4 Componentes del proceso caja fría para elaboración de corazones.

En la Figura 2.5 se muestran las características esenciales del proceso para elaboración de corazones mediante caja fría. La mezcla de arena recubierta con las resinas es soplada dentro de la caja de corazones. La caja de corazones está situada entre una entrada de gas múltiple en la parte superior y una salida múltiple en la parte inferior. El gas catalizador (amina) entra a la caja de corazones a través de los tubos sopladores o ventilas y pasa a través del corazón promoviendo el endurecimiento instantáneo de la resina que recubre los granos de arena. Entonces el corazón está listo para ser expulsado de la caja de corazones después de haberlo limpiado con el aire de purga en unos cuantos segundos.

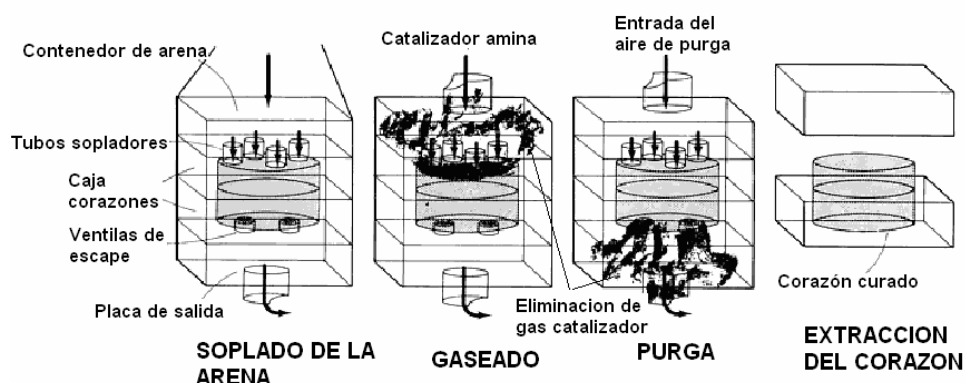
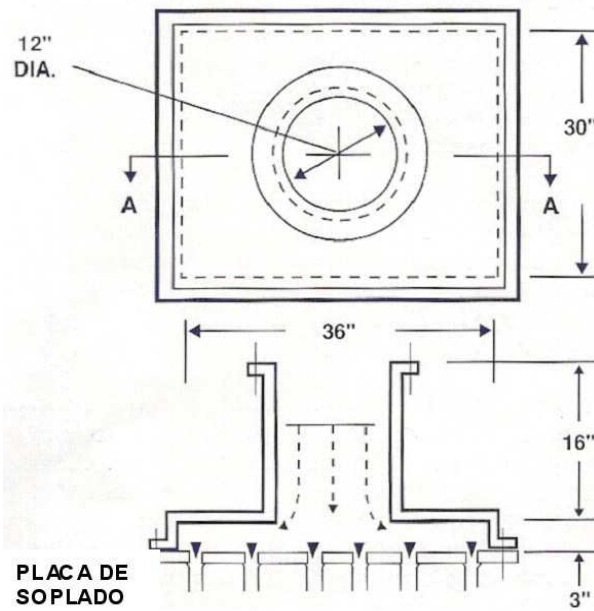


Figura 2.5 Procedimiento para elaboración de un corazón por caja fría [36].

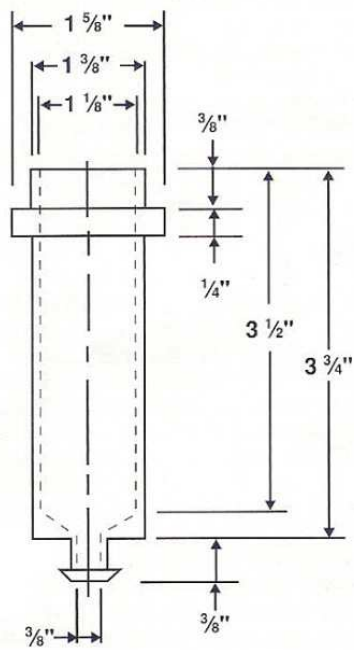
El mejor método para formar corazones es el de soplado o disparo. Una buena compactación puede ser obtenida a presiones de soplado de 35 a 45 psi. La presión de soplado juega un papel importante ya que puede provocar una alta cantidad de rechazos de corazones por baja densidad o por problemas de adherencia a las paredes del molde.

2.4.1 Tubos de soplado.

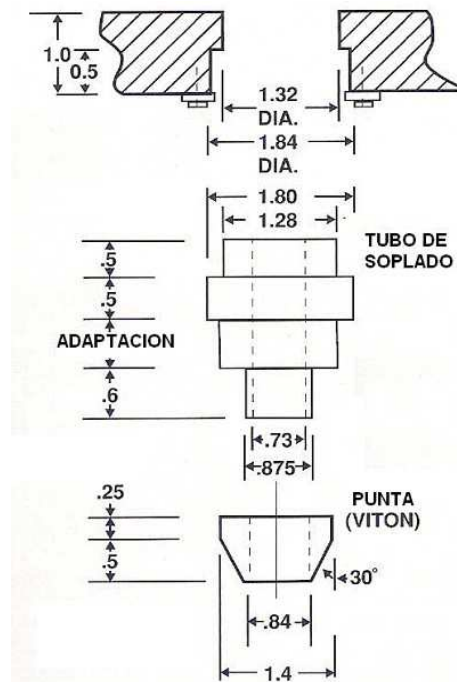
Los tubos sopladores se encuentran en la parte superior del molde debajo del contenedor de arena conocido como “magazine”, la serie de tubos se encuentran en la placa de soplado, ver Figura 2.6 (a). La adecuada posición y diámetros de los tubos sopladores permiten obtener corazones con una densidad uniforme necesaria para el fácil curado y la resistencia a la penetración del metal. Además de asegurar la adecuada operación sin problemas de obstrucción en los tubos sopladores. Tubos de soplado largos reduce la velocidad de impacto de las partículas de arena contra la superficie del molde y reducen la adherencia de resina dentro de la caja, los tubos deben colocarse en las zonas más profundas y de mayor densidad. Los materiales empleados para la fabricación de los tubos sopladores son generalmente aceros al carbono, los cuales son maquinados para obtener diámetros internos que van desde 15.8 mm ($\frac{5}{8}$ ”) a 31.75 mm ($1\frac{1}{4}$ ”). Algunos tubos emplean un anillo de polímero conocido como “viton” en la parte interior del tubo, ver Figura 2.6 (c).



a)



b)



c)

Figura 2.6 Tubos sopladores, dimensiones en pulgadas, a) placa donde se soportan los tubos de soplado. b) dimensiones de un tubo de soplado, c) tubos de soplado con punta de viton [41].

2.4.2 Ventiladas de escape.

Una parte esencial del molde son las zonas de escape conocidas como ventiladas (Figura 2.7) las cuales son de tamaños tan pequeños que permiten que el catalizador amina sea eficaz generando una presión positiva. El catalizador amina y el aire de purga viajan a todas las partes de las cavidades del molde antes de que salgan a través de las ventiladas de escape. Estas generalmente se ubican en la parte inferior del molde y al igual que los tubos de soplado debe haber una adecuado arreglo para evitar problemas de mal llenado. Los diámetros de las ventiladas pueden variar dependiendo del tamaño del corazón. Diámetros de 6.35 a 25.4 mm ($\frac{1}{4}$ a 1"), generalmente son empleados. Para mantener la presión positiva, el área total de venteo no debe ser mayor del 70% del área de entrada.

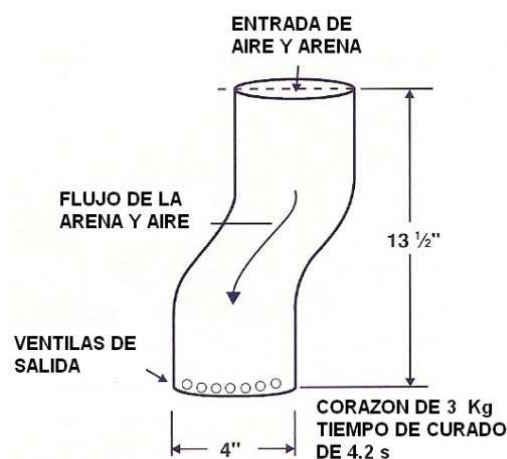


Figura 2.7 Esquema del empleo de ventiladas en la elaboración de un corazón tubular, dimensiones en pulgadas [41].

2.5. Materiales empleados para la elaboración de los moldes de caja fría.

Una de las ventajas del proceso de caja fría es que no emplea calor, con lo que se permite que no se tenga limitaciones en los materiales empleados para elaborar los moldes para corazones. Aunque el hierro gris es por mucho la aleación más popular en elaboración de las cajas, otros materiales como aleaciones de aluminio, compuestos a

base de resinas epóxicas y madera son buenos candidatos para esta aplicación. Las cajas metálicas tienen un alto costo inicial pero a la larga esto se ve sobrepasado por la buena resistencia que presentan al ataque de las sustancias empleadas. En la Tabla 2.3 se muestran datos de la vida útil de algunas cajas construidas con diferentes materiales. Los datos mostrados pueden variar dependiendo del tipo de materiales y configuraciones de corazones elaborados en estas cajas. En la Figura 2.8 se muestra la fotografía de una sección de un molde metálico elaborado con un acero del tipo AISI H13, empleado para la elaboración de moldes y corazones de arena sílica para vaciado de piezas de aluminio en la industria automotriz.

Tabla 2.3 Vida útil de materiales empleados para la fabricación de cajas de corazones [37].

Material	Ciclos de soplado	Resistencia a los solventes	Extracción del corazón
Acero 4140	250,000	Excelente	Excelente
Hierro gris	70,000	Excelente	Excelente
Aleaciones de aluminio	4,000	Excelente	Buena
Resinas epoxicas	60,000	Buena	Moderada
Uretano	1,000,000	Pobre	Muy buena
Madera dura	2,000	Pobre	Moderada

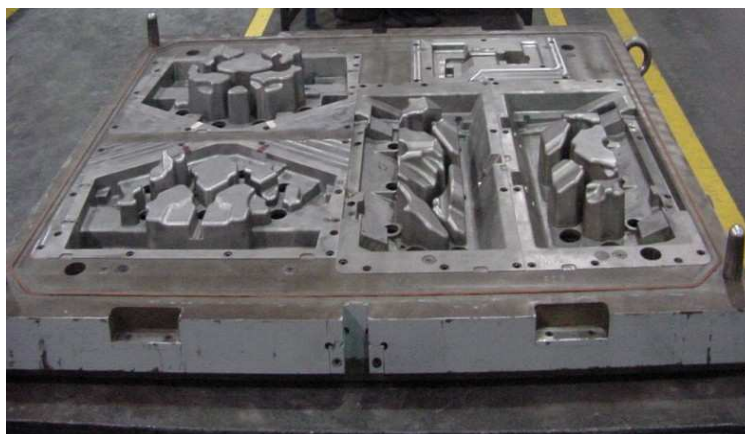
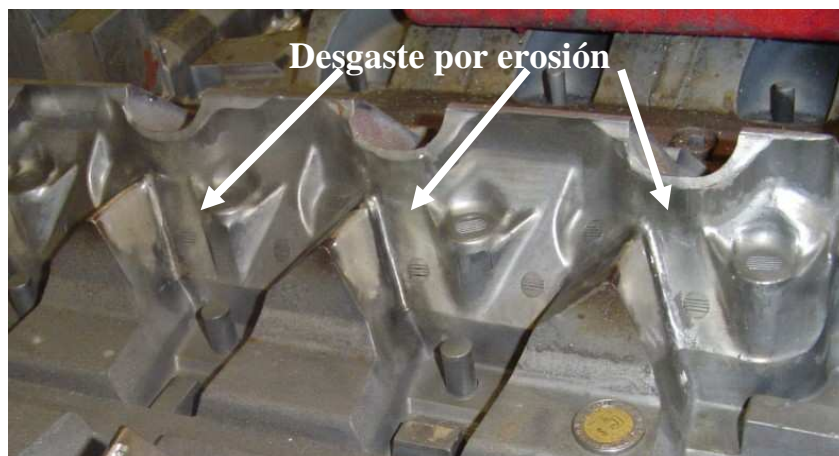


Figura 2.8 Sección de un molde metálico.

2.6 Resistencia al desgaste de las cajas de corazones.

Por la naturaleza abrasiva de la arena y las altas presiones de aire que se emplean en la obtención de los corazones, las cajas están expuestas al fenómeno de desgaste lo cual disminuye su vida útil. Diversos estudios se han realizado para evaluar la resistencia de los diferentes tipos de materiales empleados para la fabricación de las cajas. En los cuales se han encontrado que los aceros del tipo AISI H13 han presentado una mejor resistencia al desgaste que los hierros grises [42,43]. Sin embargo muchos factores deben tomarse en cuenta, tales como la forma y la distribución del tamaño del grano de la arena así como las presiones que pueden variar dependiendo del tamaño y geometría de los corazones y las propiedades mecánicas de los materiales empleados para cajas de corazones.

El desgaste generado en las cajas de corazones trae como consecuencia corazones fuera de dimensiones lo que arroja un alto rechazo en las piezas vaciadas. La variación de unas cuantas milésimas de pulgada son necesarias para que tanto moldes y corazones sean rechazados. En la Figura 2.9 se muestran zonas desgastadas dentro de un molde metálico, fabricado en acero tipo AISI H13. Los análisis previos de caracterización del desgaste de estas cajas muestran un desgaste del tipo abrasivo y que es dependiente del ángulo de impacto del chorro de la arena.



a)



b)

Figura 2.9 Cavidades de un molde para corazones, desgastadas por erosión a) y b) las zonas con mayor daño por erosión son aquellas que reciben el primer impacto de la mezcla de arena y resinas.

CAPITULO 3

DISEÑO DE LA MAQUINA PARA PRUEBAS DESGASTE POR EROSION

3.1 Introducción.

Los estudios realizados a través de la historia sobre desgaste por erosión han usado diversos equipos de prueba con el propósito de evaluar la resistencia a la erosión de ciertos materiales, uno de ellos es el equipo tipo granalladora o soplo de arena [12-14, 23, 44-47]. En los equipos de este tipo, partículas abrasivas son impulsadas por aire a alta presión y se proyectan en la superficie de un material en forma de un chorro promoviendo la pérdida de masa. El equipo de prueba diseñado en este estudio emplea este método ya que el desgaste que se genera en las cajas de corazones es provocado por el impacto de las partículas de arena sílica que impactan las superficies del molde metálico, usado para la elaboración de moldes y corazones de vaciado.

Para su elaboración y diseño se consultó la norma ASTM G76 [48] para la evaluación de la resistencia a la erosión de materiales. También se tomo en cuenta observaciones sobre equipos similares en trabajos realizados por Hutchings [49,50], Y.I. Oka [14, 23] donde

factores como las dimensiones de la boquilla, la cual controla el flujo de la mezcla aire-arena, son importantes. Otras variables como las dimensiones de la probeta y distancia de impacto también fueron consideradas. El diseño se llevó a cabo en dos etapas. La primera consistió en elaborar un prototipo que permitiera explorar diferentes variables como: la presión del aire, ángulos de impacto, el control del flujo de la mezcla aire-arena, la distancia de impacto de las partículas sobre la superficie del material a probar, las dimensiones de la probeta y la masa de arena empleada en cada ensayo. Esto fue logrado mediante ensayos de desgaste erosivo en diferentes materiales frágiles y dúctiles. La segunda etapa consistió en el diseño final del equipo y la elección final de parámetros de prueba mediante diferentes pruebas realizados en aceros tratados térmicamente aquí también se evaluó el efecto de la presión del aire, la dureza y la condición de la superficie.

3.2 Prototipo de un equipo para pruebas de desgaste erosivo.

En la Figura 3.1 se muestra un esquema del equipo empleado como prototipo para los ensayos de desgaste erosivo. La arena sílica en cada ensayo se deposita en el contenedor localizado en la parte superior del aparato, después, se cierra la entrada. La arena se mantiene en el contenedor, mientras el aire comprimido se suministra a una cámara de mezcla localizada en la parte inferior. La cámara de mezcla y el contenedor de arena cuentan con una conexión de aire, permitiendo tener una presión casi homogénea en ambos componentes. La arena es desplazada desde el contenedor de arena hasta la cámara de mezcla empleando tubos de diámetros pequeños y se libera a través de un tubo pequeño de cobre de 5 mm de diámetro interno (Figura 3.2 (b)). Debido a que la presión en el contenedor y la cámara de mezcla es casi homogénea, este tubo no presentó desgaste durante los ensayos realizados. En el siguiente paso la arena es liberada del contenedor y al llegar a la cámara de mezcla la arena se acelera para ser lanzada a través de un tubo de salida o boquilla. La boquilla es una parte crítica del diseño la cual ayuda a controlar el flujo de la mezcla reduciendo la turbulencia [11, 49, 50]. Para este equipo se emplearon dimensiones de 100 mm de longitud y 5 mm de diámetro interno. Esta boquilla está sujeta al efecto de desgaste erosivo ya que es donde

se concentra y acelera el flujo de las partículas de arena sílica. Para controlar el desgaste que sufre la boquilla se utilizó un acero con alta dureza (832 HV) AISI/SAE D2 templado y con doble revenido. La Figura 3.2 (c) muestra una imagen de la boquilla.

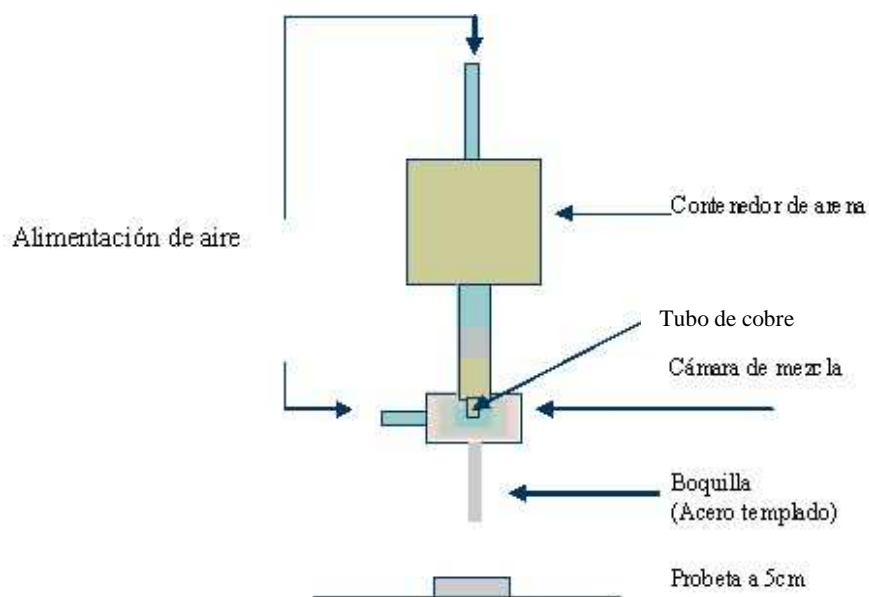


Figura 3.1 Prototipo del equipo para pruebas de desgaste por erosión [51].

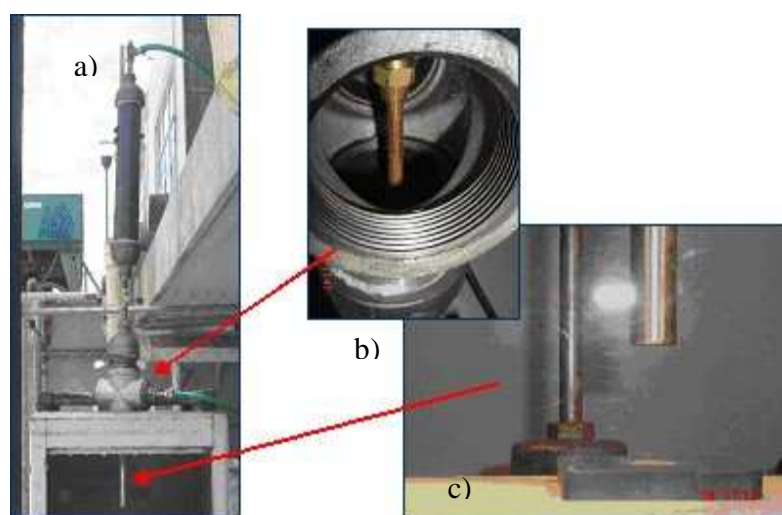


Figura 3.2 Algunas partes importantes del prototipo de erosión a), boquilla interna de cobre b), boquilla externa c) [51].

La distancia entre la probeta y el borde de la salida de la boquilla puede variar dependiendo de la dimensiones de la probeta. Probetas de mayor tamaño requieren una mayor distancia de impacto con el propósito de asegurar el impacto total del chorro de arena [14,23]. En este prototipo se empleó un equipo auxiliar para girar la probeta a diferentes ángulos de impacto, el cual se define por la dirección del chorro de la arena y la orientación de la superficie de la probeta. Ángulos de impacto 0° a 90° , pueden ser empleados con el equipo auxiliar, La presión máxima empleada en este equipo fue de 4.14 bares. Las dimensiones de la boquilla pueden variar dependiendo del tamaño de partícula empleada para provocar la erosión en los materiales en este caso se empleo 5 mm de diámetro para partículas de arena sílica con diámetros de 150 a 425 μm .

En este equipo se realizaron pruebas exploratorias que se llevaron acabo para evaluar y validar parámetros de los ensayos como son: la presión del aire, ángulos de impacto, el control del flujo de la mezcla aire-arena, la distancia de impacto de las partículas sobre la superficie a erosionar, las dimensiones de la probeta y la masa de arena empleada en cada ensayo,[51].

3.3 Materiales seleccionados para la evaluación del prototipo.

3.3.1 Vidrio.

Una de las primeras pruebas de desgaste erosivo fue llevada acabo en un vidrio para aplicaciones arquitectónicas. Las dimensiones de la probeta fueron de 10X10X1.2 cm y la distancia de impacto de 50 mm. Se empleo arena sílica de morfología subangular con tamaños de entre 150 a 425 μm , la masa de arena empleada fue 1000 g. La presión del aire fue 4.14 bares al iniciar la prueba y antes de concluir fue de 2.76 bares esto como consecuencia de la baja capacidad del compresor de aire empleado. El ángulo de impacto fue 90° . En la Figura 3.3 se observa la evidencia del desgaste erosivo en la superficie de la placa y el daño generado a través del espesor. La mayor erosión del

vidrio se obtiene a un ángulo de 90° como consecuencia de su comportamiento frágil [9,10, 52] aunado a la alta cantidad de arena empleada en este ensayo, el resultado fue catastrófico con la perforación total de la placa (Figura 3.3 (b)). Como puede observarse el prototipo presenta un buen control del flujo de la mezcla de aire-arena ya que el daño mayor está concentrado en el centro del halo formado por la dispersión de las partículas (Figura 3.3 (a)).

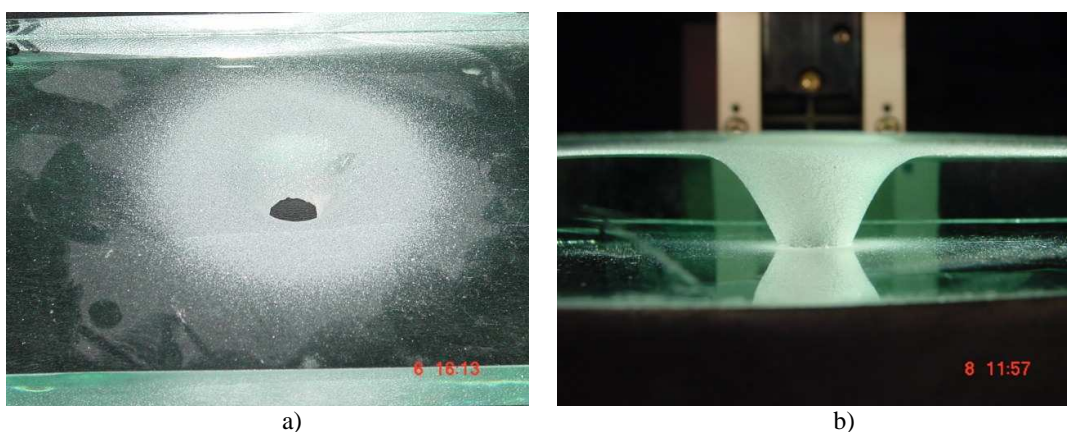


Figura 3.3 Daño por erosión en una probeta de vidrio, a) vista superior. b) vista frontal.

3.3.2 Acero al carbono

Se realizaron ensayos de erosión en placas de aceros al carbono tipo AISI 1020, un material con comportamiento típicamente dúctil [13, 25]. Las dimensiones de las placas fueron de 5 cm de ancho por 10 cm de largo y los ángulos de impacto de 20° , 30° , 40° , 60° , 75° y 90° . La presión presentó un gradiente de 4.14-2.76 bares. Se empleó una masa de 500 g de arena sílica de morfología subangular con tamaños de entre 150 a $425 \mu\text{m}$ y una distancia de impacto de 5 cm. En Figura 3.4 se observa que el área de impacto varía según el ángulo de impacto. A 90° tiende a ser circular y conforme el ángulo decrece, el área tiende a ser elíptica. El área dañada en las probetas ensayadas a bajos ángulos es mayor que a ángulos altos. Se realizó la medición del área dañada en cada una de las probetas ensayadas y con esto se determinó el tamaño de las probetas que pudieran ser ensayadas a una distancia de impacto de 50 mm (Figura 3.5) sin que la arena golpeará fuera de su área.

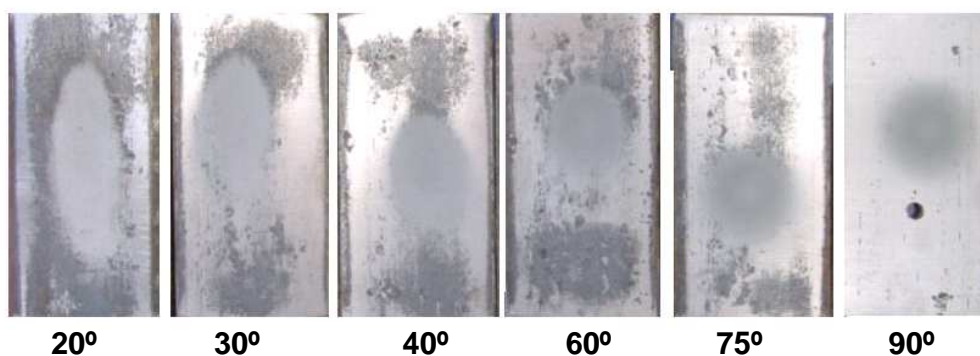


Figura 3.4 Ensayo de erosión en placas de acero de bajo carbono a diferentes ángulos e impacto empleando 500 g de arena sílica.

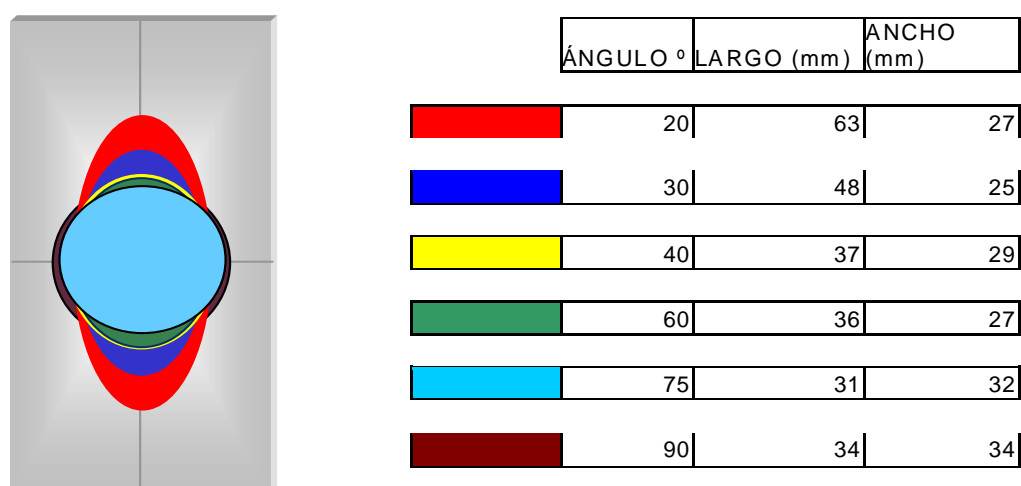


Figura 3.5 Determinación de las dimensiones de las huellas de erosión en placas de acero al carbono.

La probeta ensayada a un ángulo de 90° fue seccionada y preparada metalográficamente. La microestructura de este acero está compuesta de ferrita y perlita con un tamaño de grano ASTM 8. En la Figura 3.6 se muestran imágenes obtenidas en el perfil de la probeta y el daño debajo de la superficie, provocado por el impacto de las partículas de arena sílica, los cuales deforman a la ferrita mediante los esfuerzos de compresión. Los cráteres formados por el impacto de las partículas y la deformación plástica presente en

la ferrita muestran un comportamiento típico en un material dúctil [7,8]. El material deformado posteriormente es eliminado en forma de pequeñas laminillas o plaquetas, esto debido a que ya no pueden soportar más deformación plástica y se desprenden de la superficie por microfractura [5].

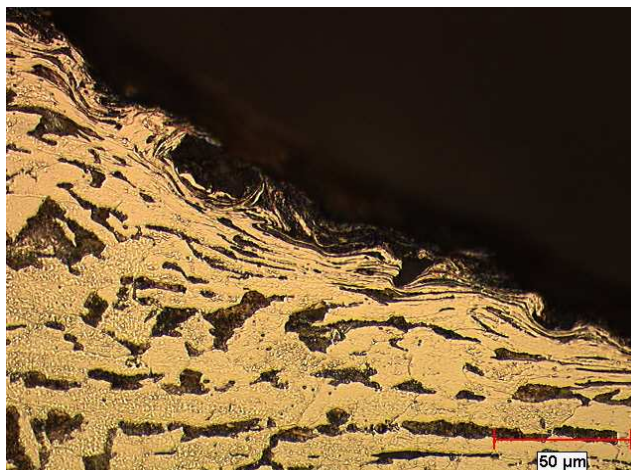


Figura 3.6 Microestructura de un acero al carbono erosionado con arena silicea de morfología subangular con tamaños de entre 150-425 μm y una presión de aire de 4.14-2.76 bares. Atacada con Nital al 3% y Pírcal 4 g en relación 1:1.

3.3.3 Aceros AISI H13, 4140 y 9840 tratados térmicamente.

Se realizaron ensayos de erosión en aceros tratados térmicamente con el propósito de evaluar la cantidad de masa necesaria de partículas erosivas para eliminar material de la probeta. Con el empleo de una balanza analítica se pudo registrar la magnitud de la masa perdida por el daño de erosión en la superficie.

Se emplearon tres tipos de aceros: AISI 4140, AISI 9840 y AISI H13. Del acero tipo 9840 se obtuvieron cuatro probetas, otras dos del tipo 4140 y dos del H13. Posteriormente fueron tratadas térmicamente templándolas en diferentes medios y a diferentes temperaturas de revenido. Las probetas de acero 4140 y 9840 fueron calentadas a una temperatura de 850 $^{\circ}\text{C}$ y enfriadas en aceite (Figura 3.7 (a)), después de esto; tres probetas, dos del acero 9840 y una del 4140 fueron sometidas a un revenido a 205 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.7 (b)) y las otras tres a un revenido de 520 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.7 (c)). En las Figuras 3.8 (a-c) se muestra la secuencia del tratamiento térmico de las probetas del

acero H13, las probetas fueron precalentadas a 815 °C y luego calentadas a una temperatura de 1020 °C, en un horno de resistencias eléctricas tipo mufla y enfriadas en aire a presión. Posteriormente cada probeta fue sometida a un tratamiento de revenido a temperaturas de 520 °C y 605 °C, Figura 3.8 (b) y (c).

Antes de realizar el ensayo de desgaste erosivo las probetas fueron desbastadas con lijas de papel y pulidas con alúmina de 1 µm. Se eligió 1000 g de arena sílica de morfología subangular con tamaños de entre 150 a 425 µm. Los ángulos de impacto fueron de 20° y 90°. La presión fue de 4.14 - 2.76 bares. La distancia de impacto fue de 50 mm.

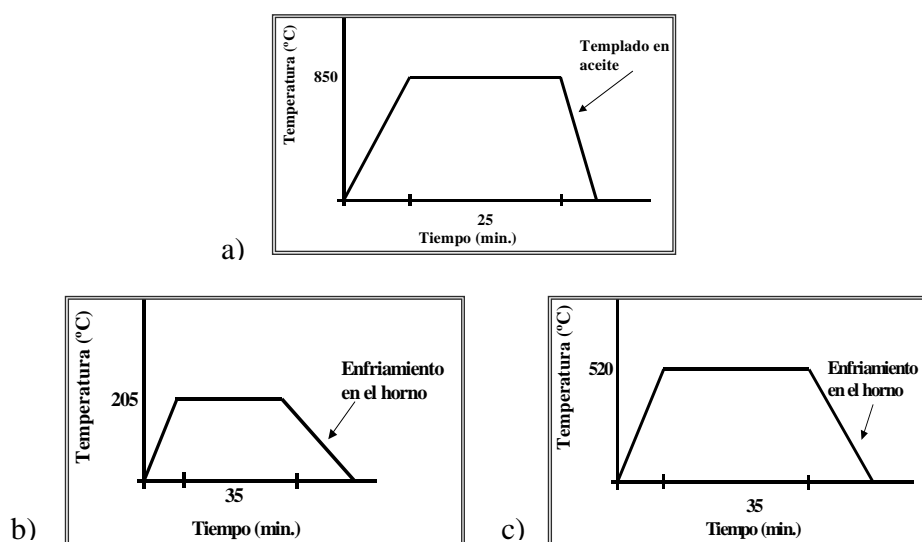


Figura 3.7 Tratamiento térmico de los aceros 4140 y 9840 a) templado en aceite, b) revenido a 205 °C, c) revenido a 520 °C.

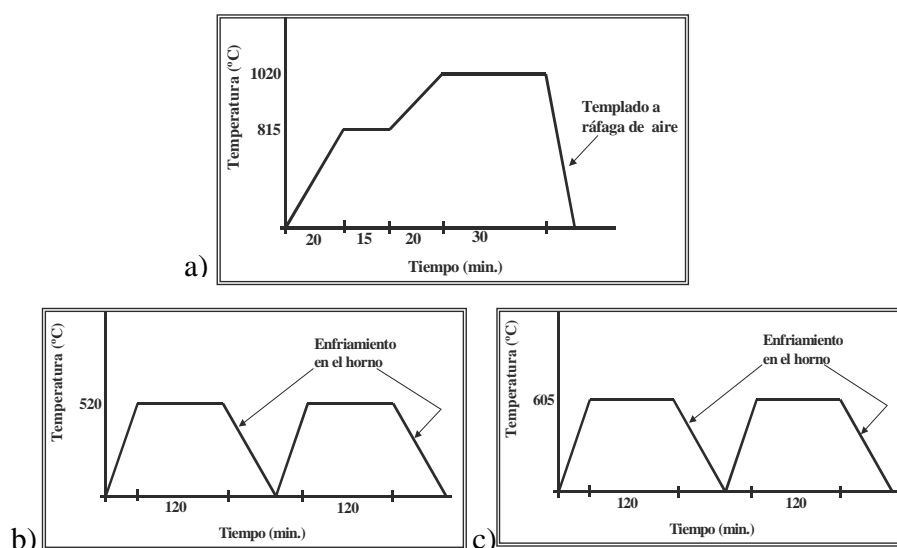


Figura 3.8 Tratamiento térmico del acero H13 a) templado al aire quieto, b) doble revenido a 520 °C, c) doble revenido a 605 °C.

En las Figuras 3.9 (a) y (b) se muestran las probetas del acero H13 y 4140 después del ensayo de erosión. Como consecuencia de la propagación de las partículas y del tamaño de las probetas, algunas de ellas no impactaron la superficie. En las Figuras 3.10 (a) y (b) se muestra el acero 9840 ensayado a 20° y 90°. En la Tabla 3.1 se muestra la dureza de los aceros empleados y la relación de erosión obtenida en los ensayos a diferentes ángulos de impacto. La masa de arena sílica de 1000 gramos y la alta dureza obtenida en los aceros permitieron que la pérdida en masa de las probetas ensayadas pudiera ser registrada en una balanza analítica. En la Figura 3.11 se muestra una imagen de la superficie dañada en la probeta del AISI H13 con dureza de 595 HV a un ángulo de impacto de 20°. La pérdida de material en la superficie fue mediante un proceso de corte, donde se observan las marcas dejadas por las partículas abrasivas y la presencia de virutas adheridas aún a la superficie [2,6]. A pesar de la alta dureza se observa la presencia de deformación plástica del material.

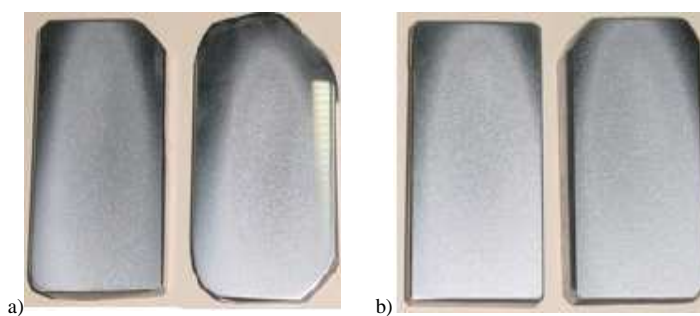


Figura 3.9 Probetas ensayadas a un ángulo de 20° a) acero tipo H13, b) acero tipo 4140.

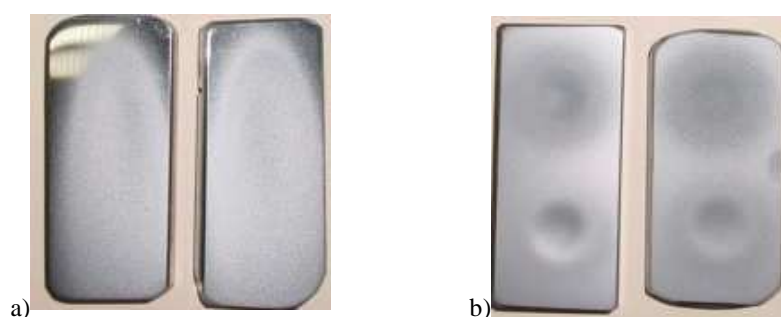


Figura 3.10 Probetas ensayadas a) 20°, acero tipo 9840 y b) 90°, acero tipo 9840.

Tabla 3.1 Variación de masa después del ensayo de desgaste erosivo en aceros del tipo H13, 4140 y 9840.

Material	Temperatura de revenido	Dureza HV	Angulo de Impacto	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Masa perdida (g)
H13	520 °C	595	20°	165.8713	165.2861	0.5852
H13	605 °C	434	20°	208.6100	207.9524	0.6576
4140	520 °C	392	20°	208.2366	207.7236	0.5130
4140	205 °C	577	20°	200.1642	199.5725	0.5917
9840	520 °C	402	20°	207.3315	206.6174	0.7141
9840	205 °C	595	20°	206.9115	206.3170	0.5945
9840	520 °C	402	90°	208.3587	207.9175	0.4412
9840	205 °C	595	90°	206.0331	205.3619	0.6712

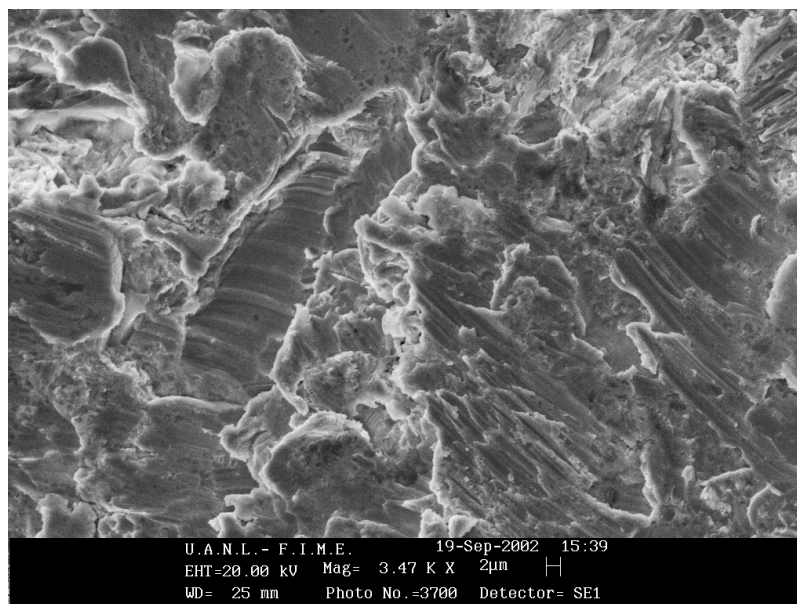


Figura 3.11 Superficie dañada por la acción abrasiva de las partículas de arena sílica de morfología subangular con tamaños de entre 150 a 425 μm , en un acero tipo AISI H13 con dureza de 595 HV. Ángulo de impacto de 20°.

3.4 Equipo para pruebas de desgaste erosivo.

El equipo prototipo original FIME-ERO1 para pruebas de desgaste erosivo permitió desarrollar un nuevo equipo FIME-ERO2 para ensayos de erosión con mejor control de las variables tribológicas. Este equipo tiene condiciones más estables haciendo cada ensayo de una manera repetitiva. En las Figuras 3.12 (a) y (b) se muestra un esquema del equipo. El principio de operación es muy similar al prototipo FIME-ERO1 explicado en la Sección 3.2 de este capítulo. Las partes principales son dos cámaras formadas por bridas; la cámara 1 es donde se libera la arena sílica y se mezcla con aire a alta presión, la cámara 2 corresponde al contenedor de la arena. Otro componente principal es el mecanismo empleado para sujetar la probeta a ensayar, el cual también le permite girar a un ángulo de 5° a 90°, (Figura 3.12 (a)). El sujetador de probetas permite que la distancia de impacto pueda ser regulada hasta 10 cm. Las dimensiones de la boquilla o tubo de

salida de la mezcla de aire a alta presión son de 10 cm de largo por 5 mm de diámetro interior y es fabricada de un acero AISI H13 con una dureza de 679 HV.

La alimentación principal de aire a alta presión inicia en la cámara 1 donde también se alimenta a la cámara 2. En ambas cámaras se colocaron sensores para registrar la presión del aire. En la imagen de la Figura 3.12 se presenta un esquema del equipo con sus componentes principales. Durante los ensayos de desgaste el impacto de las partículas sobre la superficie de la probeta generan una gran cantidad de polvo fino como consecuencia de la fractura de las partículas, para evitar que estos polvos salieran al medio ambiente la zona de impacto fue envuelta en un contenedor tipo tolva con salida a un filtro para atrapar los polvos. Dentro de la tolva también se encuentra el sujetador de las probetas. Con este equipo se tiene un mejor control de los parámetros de ensayo como el ángulo y distancia de impacto lo cual hace confiable y repetible cada prueba realizada [51].

3.5 Ensayos de desgaste erosivo en el equipo erosionador

Se realizaron ensayos de desgaste erosivo en aceros AISI 4140, AISI H13 y AISI P20 con el objetivo de evaluar la efectividad del equipo así como también establecer los parámetros de prueba en este trabajo de investigación. Las dimensiones de las probetas fueron de 100 mm de largo por 50 mm de ancho y un espesor de 5 mm. Las pruebas fueron realizadas en probetas con diferente dureza en los tres tipos de aceros. Antes de registrar el peso inicial de las probetas en la balanza analítica, ver Figura 3.13, éstas fueron sometidas a un proceso de limpieza con una solución de 100 ml de agua destilada y 10 gramos de ácido cítrico con el propósito de eliminar óxidos superficiales. La arena empleada en todos los ensayos fue de morfología subangular con tamaños de entre 150 a 425 μm .

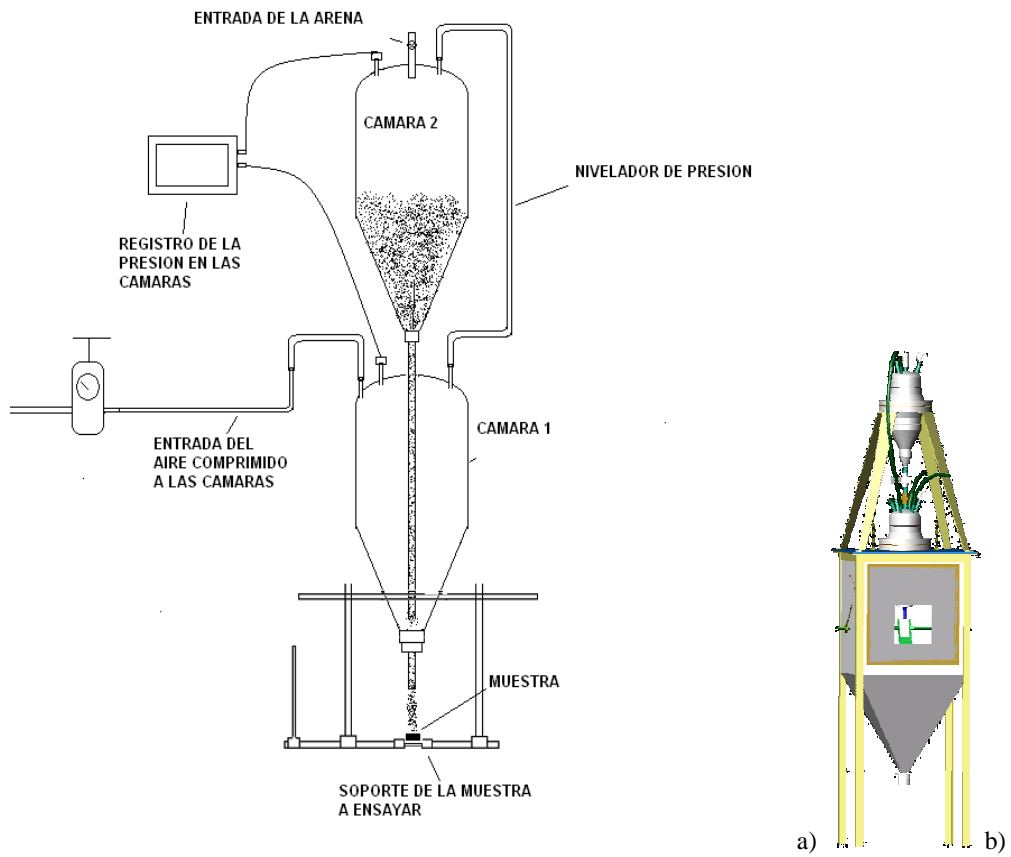


Figura 3.12 Esquema del equipo de pruebas para desgaste erosivo [51]. a) dibujo esquemático, b) dibujo tridimensional



Figura 3.13 Balanza analítica donde se registraron la masa inicial y final de las probetas durante los ensayos de erosión.

3.5.1 Acero tipo AISI 4140.

Para el acero AISI 4140 se realizaron seis ensayos de erosión en probetas con tratamiento térmico de temple y revenido y una microestructura de martensita revenida con diferentes valores de dureza, además una probeta con baja dureza obtenida por un tratamiento de recocido con una microestructura consistente de ferrita y perlita. La masa de arena sílica fue de 2000 g. La presión del aire seco durante el ensayo fue de 4.14 bares, la cual se mantuvo constante y se registró mediante sensores colocados en las cámaras 1 y 2 (Figura 3.14). La duración del ensayo fue de aproximadamente 15 min. Las probetas fueron colocadas en el sujetador a una distancia de impacto de 50 mm (entre la salida de la boquilla y la superficie de la probeta). El ángulo de impacto en todos los ensayos fue de 90°, el cual se obtiene entre el eje de la boquilla y la superficie de la probeta. La Figura 3.15 muestra una imagen de las probetas sometidas a la prueba de desgaste, aquí se observa que la alta presión de 4.14 bares generó daño muy severo en la superficie de todas las probetas siendo la probeta con mayor dureza (572 HV) la que sufrió mayor daño, a tal grado de que la probeta fue perforada. En los cráteres formados por el chorro de la arena se puede observar que se tiene un buen control del flujo de aire-arena ya que la dispersión o halo formado por impacto de las partículas se mantiene muy homogéneo y el mayor daño se presenta en el centro de la probeta esto como consecuencia por la distancia de impacto de 50 mm y las dimensiones de la boquilla que son 100 mm de longitud y 5mm de diámetro interno.

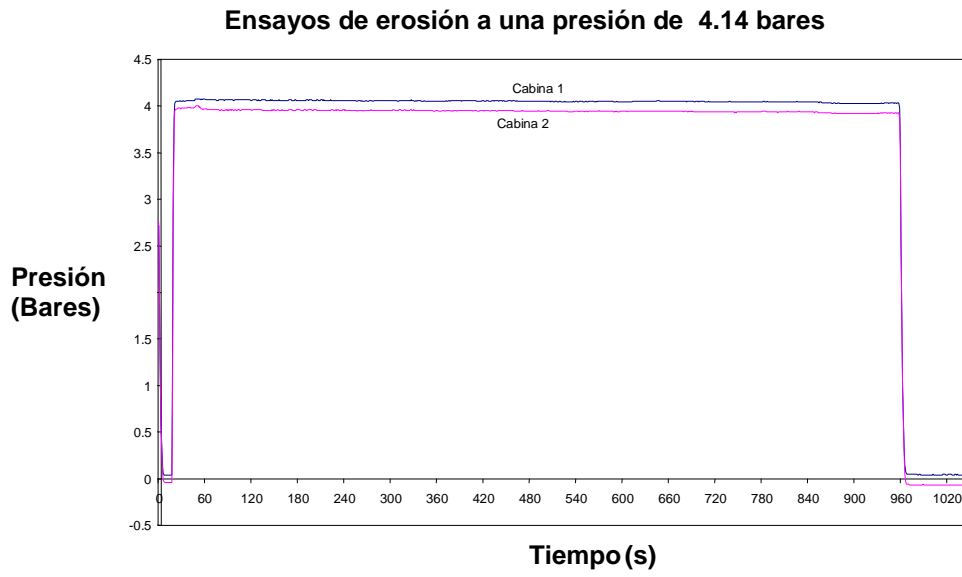


Figura 3.14 Registro de la presión del aire seco durante los ensayos realizados a 4.14 bares.

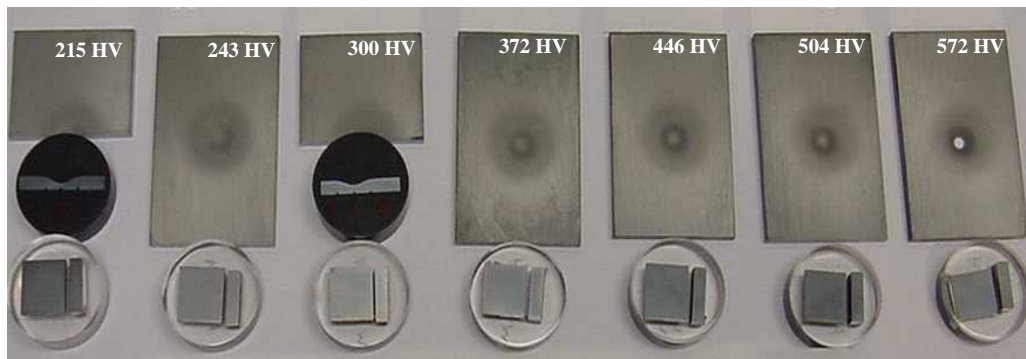


Figura 3.15 Acero AISI 4140 erosionado con 2000 g de arena sílica de morfología subangular con tamaños de entre 150-425 μm . A una presión de 4.14 bares.

Tabla 3.2 Dureza de las probetas del acero 4140 y masa removida después del ensayo.

Dureza (HV)	Masa removida mr (g)	Razón de erosión $E (mr/Mp)$ g/g
215	1.4	7.0E-04
243	1.5	7.5E-04
300	1.4	7.0E-04
372	1.56	7.8E-04
446	1.75	8.75E-04
504	2	10.0E-04
572	2.68	13.5E-04

En la Tabla 3.2 se muestran los resultados de la masa removida (mr) por el impacto de 2000 g de arena sílica (Mp) contra la superficie del acero AISI 4140 en sus diferentes condiciones de dureza. La Figura 3.16 muestra el efecto de la razón de erosión con respecto a la dureza. Para un ángulo de impacto de 90° el aumento de la razón de erosión es directamente proporcional al aumento de la dureza. Este comportamiento ha sido reportados por otros investigadores quienes mencionan que un aumento en la dureza del acero cambia su comportamiento de dúctil hacia frágil, tal como se puede interpretar en este caso [4]. En el caso de la probeta de mayor dureza (572 HV) presentó la razón de erosión más alta. Los mecanismos de pérdida de masa a 90° se dan principalmente por deformación plástica y el desprendimiento de microlaminillas altamente deformadas [5,7]. En las Figuras 3.17 (a) y (b) se observan imágenes de la subsuperficie en una zona dañada por la erosión. La Figura 3.17 (a) corresponde a la probeta con dureza de 215 HV, donde la microestructura esta compuesta de ferrita más perlita. Aquí se observa

como el impacto de las partículas deforman la ferrita mientras que la perlita es desprendida con menor deformación [13]. En la Figura 3.17 (b) se presenta la probeta con una dureza 300 HV la cual muestra martensita revenida deformada por el impacto.

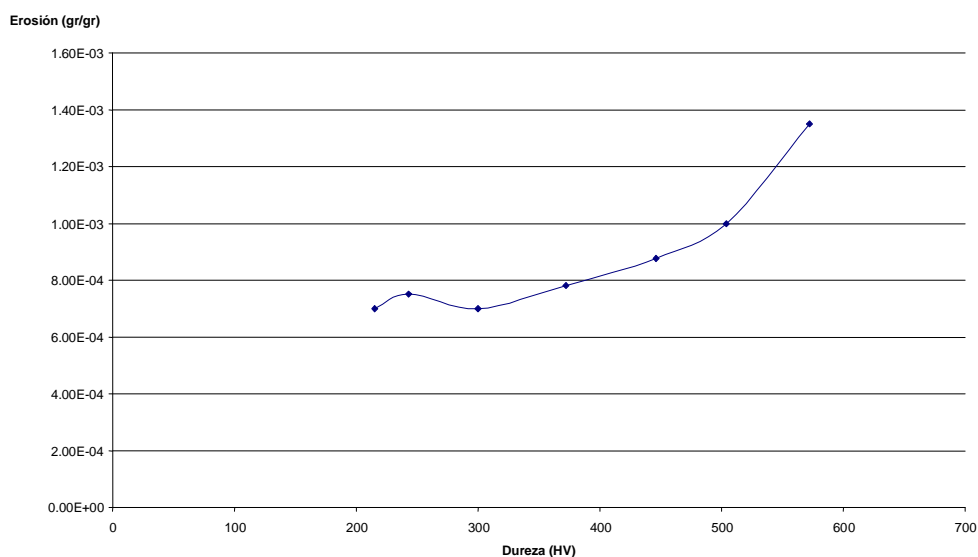
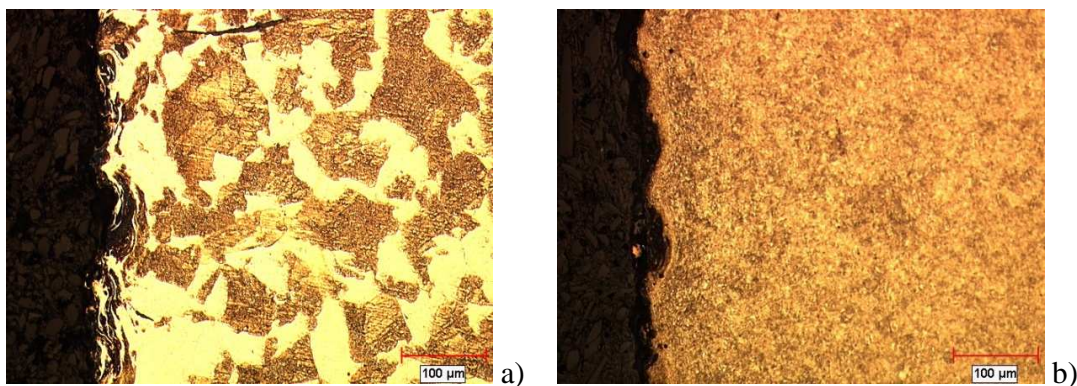


Figura 3.16 Comportamiento del desgaste erosivo en el acero AISI 4140 con respecto a la dureza. Angulo de impacto a 90 ° y presión de 4.14 bares.



Figura, 3.17 Imágenes de la subsuperficie en una zona dañada por la erosión(a) 215 HV y (b) 300 HV, ensayadas a un ángulo de 90°. Atacadas con nítal al 3%.

3.5.2 Acero tipo AISI H13.

Para el acero AISI H13 se tomaron 6 probetas, 5 de ellas con microestructura de martensita revenida a diferente dureza, la otra con microestructura de recocido y esferoidizado. En esta ocasión la masa de arena empleada en los ensayos fue de 1000 g con el propósito de evitar la perforación en probetas de mayor dureza (Figura 3.15), la presión fue de 4.14 bares. En la Tabla 3.3 se muestra la dureza de las probetas y la pérdida en masa obtenida después de los ensayos. El tiempo de ensayo fue menor que en el acero AISI 4140 ya que se empleó la mitad de la masa de partículas erosivas.

Tabla 3.3 Ensayo de erosión en el acero AISI H13

Dureza (HV)	Masa removida m_r (g)	Razón de erosión $E (m_r/M_p)$ g/g
207	0.56	5.6E-04
302	0.58	5.8E-04
386	0.64	6.4E-04
447	0.79	7.9E-04
508	0.89	8.9E-04
603	1.2	12E-04

En la Figura 3.18 se observan las probetas del acero AISI H13 después del ensayo de erosión. La Figura 3.19 muestra la razón de erosión con respecto la dureza en el acero AISI H13. El comportamiento encontrado en este caso es muy similar al obtenido en el acero AISI 4140 donde a mayor dureza la razón de erosión se incrementa para un ángulo de impacto de 90°.

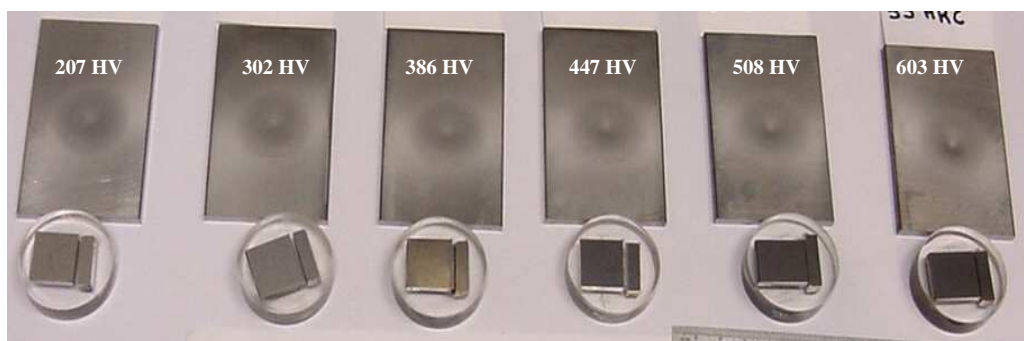


Figura 3.18 Imágenes de las probetas del acero AISI H13 erosionadas con 1000 g de arena sílica de morfología subangular con tamaños de entre 150-425 μm . A una presión de 4.14 bares.

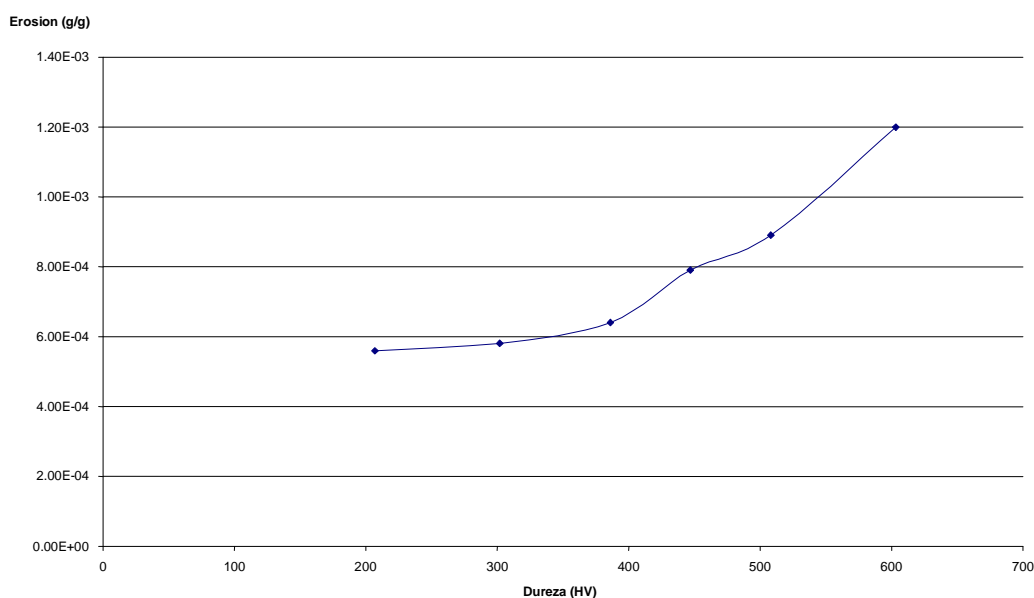


Figura 3.19 Comportamiento del desgaste erosivo en el acero AISI H13 con respecto a la dureza. Angulo de impacto a 90 ° y 4.14 bares.

En la Figura 3.20 se muestra una imagen de la superficie de la probeta con dureza de 572 HV. A pesar de la alta dureza en el acero la deformación plástica es evidente por la formación de cráteres y el apilamiento del material altamente deformado en forma de un labio en sus orillas, el cual es eliminado en forma de microlaminillas durante los siguientes impactos [5-7].

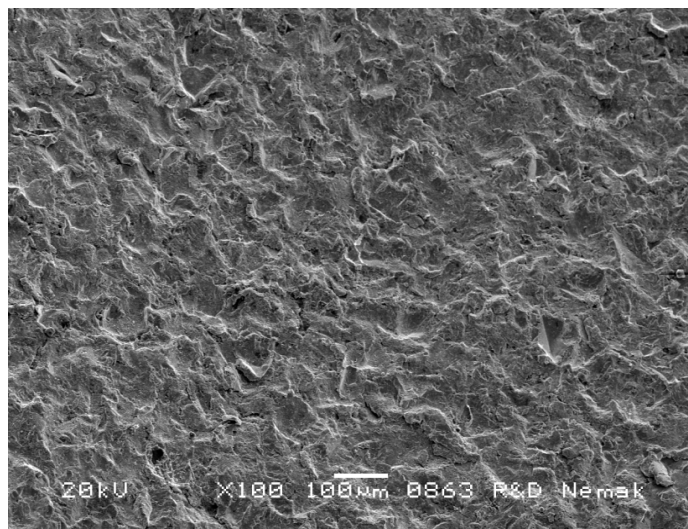


Figura 3.20 Imágenes del acero AISI H13 erosionado con 1000 g de arena sílica a una distancia de impacto de 50 mm con una presión de aire de 4.14 bares.

3.6 Medición de la presión dentro de las cavidades de una caja de corazones.

Una de las variables en el proceso de fabricación de corazones de arena sílica es la presión del aire seco, que es el medio principal que introduce la arena sílica en las cavidades del molde [37-41]. Generalmente la presión empleada en las máquinas sopladoras es de 2.8 a 4.14 bares, la cual se mide en la línea por donde se transporta al aire. Los ensayos de erosión presentados en este capítulo emplean aire comprimido con estos valores de presión sin embargo los resultados obtenidos indican un alto nivel de desgaste en las probetas. En el proceso real durante un soplo la presión de la línea, generalmente 4.14 bares, sufre una pérdida en las diferentes partes del herramental siendo menor en las cavidades del molde (zona del corazón). H. Torres y M. Adamovitis [40] realizaron un estudio para medir la presión real en zona del corazón dentro del molde y en diversas partes de una máquina sopladora como es el magazine y la placa

sopladora. La Figura. 3.21 (a) muestra un esquema de la máquina sopladora empleada en este estudio y en la Figura. 3.21 (b) se presenta una imagen de la geometría de corazón de arena sílica elegido para este experimento



Figura 3.21 Esquema de la máquina sopladora, a) y el corazón de arena sílica, b) [40].

En la Figura 3.22 se muestran los resultados obtenidos de esta medición, donde la presión de la línea de aproximadamente 4.14 bares se mantiene constante durante el soplado mientras que el resto de los componentes muestran valores muy bajos en los primeros instantes. El llenado en el molde se da en 0.7 s. La baja presión en la zona del corazón se debe a la presencia de las ventilas las cuales después de un tiempo de 0.25 s son cubiertas con la arena y es aquí donde aumenta ligeramente la presión en el molde.

La presión en las cavidades del molde es cercana 0.55 bares y se mantiene casi constante durante todo el soplo. Una causa de la baja presión en la zona del corazón se origina en la placa de soplado donde los tubos de diámetros muy pequeños provocan alta velocidad del aire y una gran caída de la presión. La presión registrada en el magazine y en la placa sopladora al inicio es baja y conforme el tiempo de soplado avanza éstas aumentan por la obstrucción que representan los tubos sopladores de diámetros muy pequeños. El incremento de la presión en estos dos componentes de la máquina sopladora provoca altas velocidades del flujo y la caída de presión en la zona del corazón por la obstrucción que representan los tubos sopladores, siendo estos la principal causa de la baja presión en el molde.

Con este trabajo se puede concluir que las partículas de arena se aceleran cuando hay una gran diferencia de presión entre el magazine y las cavidades del molde. De acuerdo al trabajo realizado por H. Torres y M. Adamovitis [40] se planteó en esta investigación tomar valores de aire a presión de 1.38 bares; presión media estimada entre el magazine y zona del corazón dentro del molde como un punto de referencia a un tiempo de 0.25 s. Se propuso usar otra presión de 0.69 bares para comparar y tener un punto de referencia a una presión más baja del aire seco. Aunque la máquina erosionadora diseñada para esta investigación (Figura 3.12) no reúne exactamente la configuración de una máquina sopladora, el principio de llenado del corazón es el mismo [38, 53].

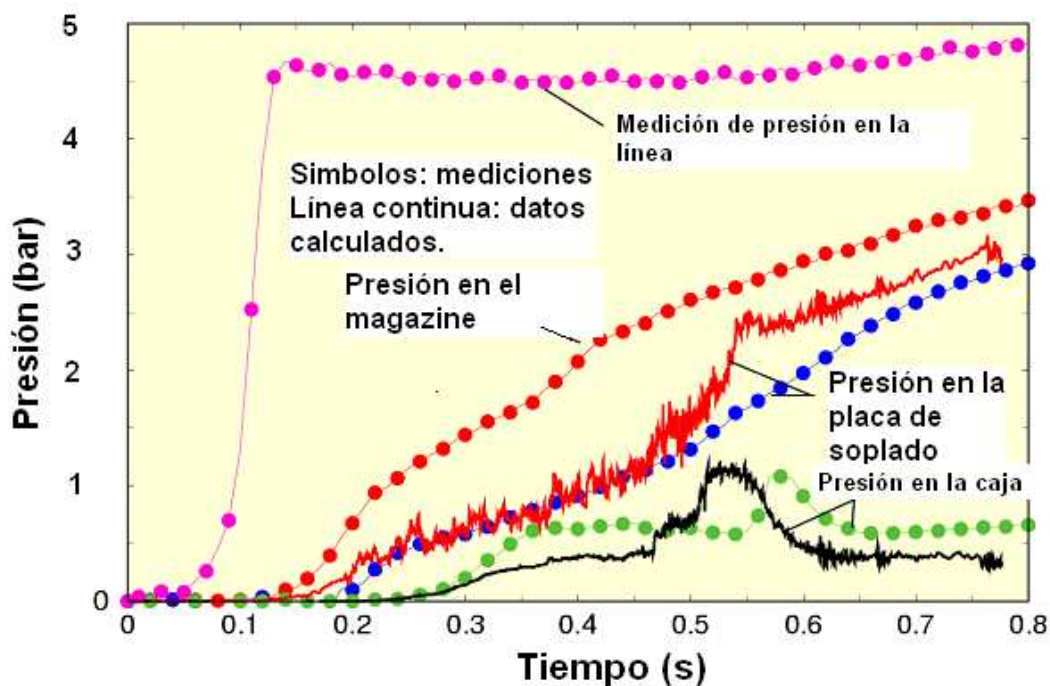


Figura 3.22 Medición de la presión en la caja de corazones, durante el llenado de un molde en [40]

3.7 Ensayo de erosión a bajas presiones.

3.7.1 Acero AISI H13 con endurecimiento superficial por nitrurado

El acero AISI H13 tratado térmicamente con durezas que van desde 302 a 603 HV fueron sometidos a un endurecimiento superficial por un tratamiento termoquímico de nitrurado por plasma iónico [54] a una temperatura de 500°C por 48 horas. Posteriormente se les realizó un perfil de microdureza desde la superficie nitrurada hacia el centro del material. En la gráfica de la Figura 3.23 se muestra los resultados de los perfiles de microdureza donde se observa que la probeta con mayor penetración dureza es la que presenta una capa nitrurada de 170 μm , mientras que la de menor penetración de dureza sólo alcanza un capa endurecida de 70 μm .

Para los ensayos de erosión se empleó una masa de 1000 g de arena sílica de forma subangular con tamaños de partícula de diámetro de 150 a 425 μm . La presión fue 1.38 bares. Las probetas tratadas fueron ensayadas en una de las caras a un ángulo de impacto de 30° mientras que la otra cara se ensayó a un ángulo de 90° . En la Figura 3.24 (a) y (b) se muestran imágenes de las probetas erosionadas a 30° y 90° respectivamente. La distancia de impacto fue de 50 mm. En la Figura 3.25 se compara la razón de erosión contra la dureza del metal base y en el centro del acero AISI H13. Aquí se observa que no hay un cambio significativo en la erosión con respecto a la dureza base a 30° mientras que a 90° se observa un ligero aumento en probetas con dureza base arriba de 392 HV. La razón de erosión mostrada a estos dos ángulos muestra que la dureza base de la probeta no tiene un efecto significativo sobre la resistencia a la erosión mientras que la capa endurecida por nitrurado proporciona un buen control de la erosión a los ángulos de 90° y 30° .

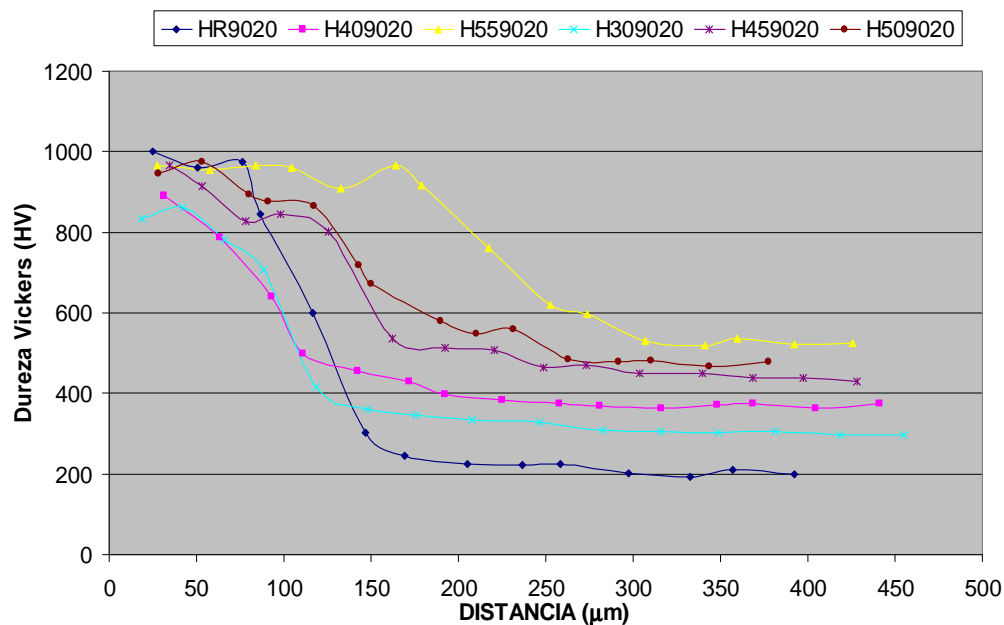


Figura 3.23 Perfil de microdureza en probetas del acero AISI H13 tratadas térmicamente y con endurecimiento superficial por nitrurado.



Figura 3.24 Probetas ensayadas a) ángulo de impacto de 30°, b) 90°

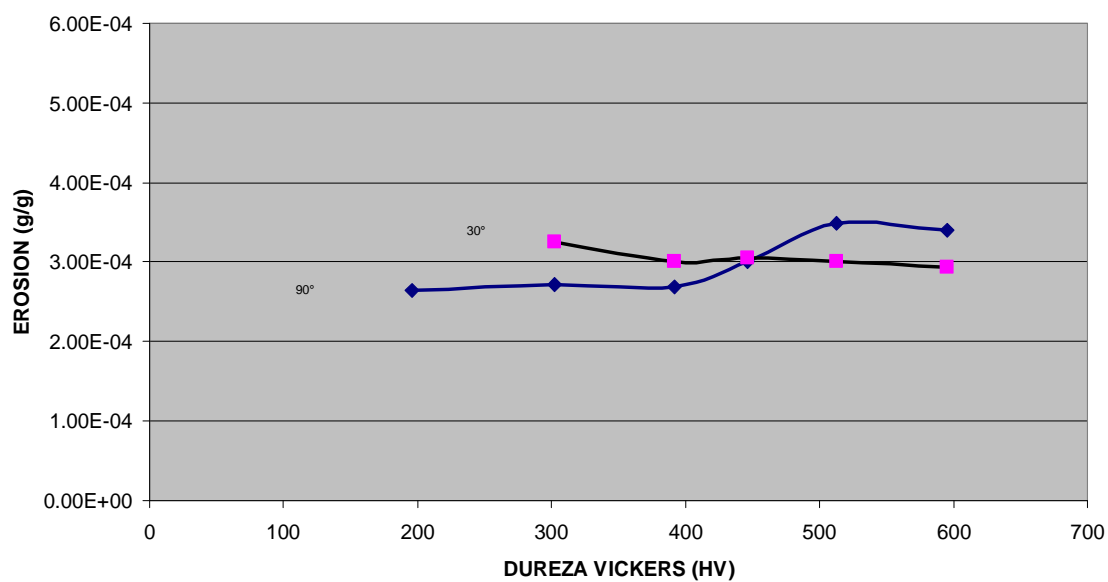


Figura 3.25 Razón de erosión en probetas tratadas térmicamente y nitruradas, ángulo de impacto a 30° y 90° a una presión de 1.38 bares.

3.7.2 Acero tipo AISI P20

Para el acero AISI P20 se prepararon 3 probetas; dos de ellas con microestructura de martensita revenida y una con un tratamiento de carburizado y martensita sin revenir. En este caso la presión del aire seco fue de 1.38 bares y el ángulo de impacto de 90°. La masa de arena sílica fue de 1000 g (M_p). En la Figura 3.26 se muestran las probetas del acero después de haber sido erosionadas. El daño por erosión fue menos severo que en los ensayos realizados en los aceros AISI 4140 y H13 ya que la presión fue relativamente baja, aún así la pérdida en masa fue registrada en la balanza analítica. En la Tabla 3.4 se muestran los datos obtenidos en el ensayo de desgaste. Con estos datos se elaboró la gráfica mostrada en Figura 3.27 donde se observa que a mayor dureza, el material sufre una mayor pérdida de masa (mr).



Figura 3.26 Probetas del acero AISI P20 después del ensayo de erosión a 1.38 bares con una cantidad de 1000 g de arena sílica.

Tabla 3.4 Datos del ensayo de erosión en las probetas del acero AISI P20.

Dureza (HV)	Masa removida mr (g)	Razón de erosión E (mr/Mp) g/g
280	0.174	1.7E-04
408	0.2	2.0E-04
640	0.39	3.9E-04

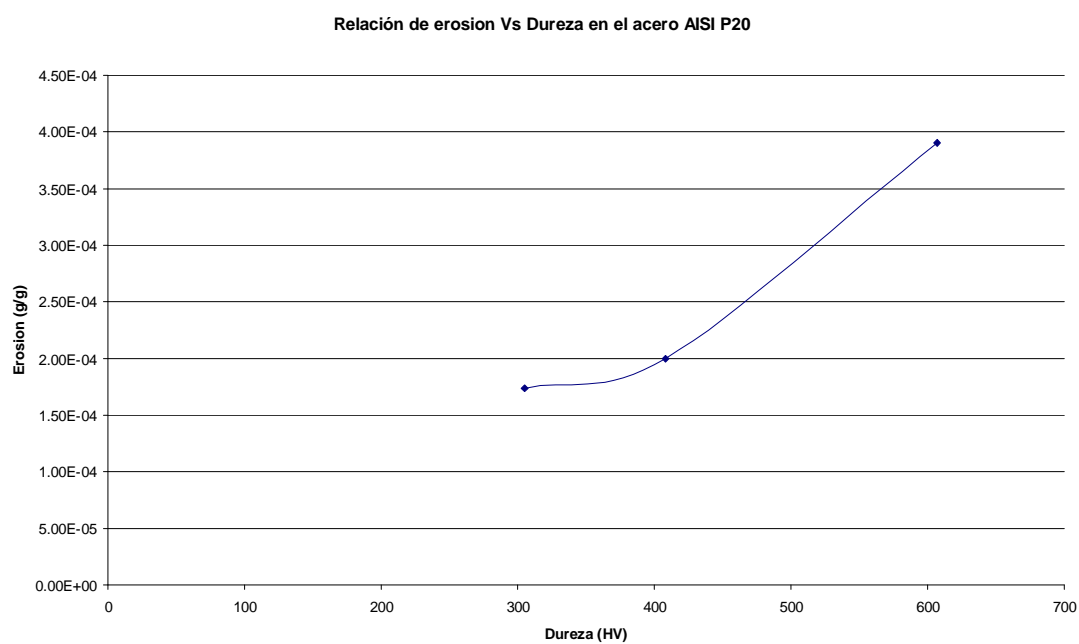


Figura 3.27 Comportamiento en el desgaste por erosión de un acero AISI P20. Ángulo de impacto de 90° y una presión de 1.38 bares.

3.7.3 Acero de bajo carbono AISI 1020

Las pruebas realizadas en el acero AISI 1020 consistieron en variar la presión a 1.38 bares a 0.69 bares, se emplearon 1000 g de arena sílica. El número de probetas ensayadas fue 6 para cada presión y los ángulos de impacto fueron de 20° a 90°. Las dimensiones de las probetas fueron 90 mm de largo por 50 mm de ancho por y 7 mm de espesor. Las distancias de impacto fueron de 50 mm y 80 mm. En las Figuras 3.28 (a) y (b) se presentan las probetas ensayadas a una distancia de impacto de 50 mm para 0.69 y 1.38 bares. En inspección ocular, el cambio en la presión no produce un mayor daño en las placas, sin embargo al realizar el balance de la masa removida (mr) contra la masa de las partículas erosivas (Mr), E [Ecuación 1.6] se encuentra que a una mayor presión genera mayor razón de erosión en todos los ángulos empleados (Figura 3.29). Para cada presión la mayor erosión se presenta entre los ángulos de 20 a 30°, esto es típico en un material con comportamiento dúctil [13, 25].

En las Figuras 3.30 (a) y (b) se presentan imágenes de las probetas erosionadas a una distancia de impacto de 80 mm y a 0.69 y 1.38 bares, el área dañada de las probetas por el impacto es mucho mayor en todos los casos ya que la divergencia del chorro logra impactar todo el ancho de la probeta. En la Figura 3.31 se muestra la gráfica obtenida con la masa removida. Al igual que en la Figura 3.29, se observó un comportamiento dúctil aunque la mayor erosión se presentó entre los ángulos de 30° a 40° y de nueva cuenta la razón de erosión es mayor a una presión de 1.38 bares.

Con estos resultados se puede concluir que el empleo de 0.69 y 1.38 bares generan la remoción de masa que puede ser registrada en una balanza analítica y que la distancia de impacto cuando es mayor influye en el aumento del área dañada.

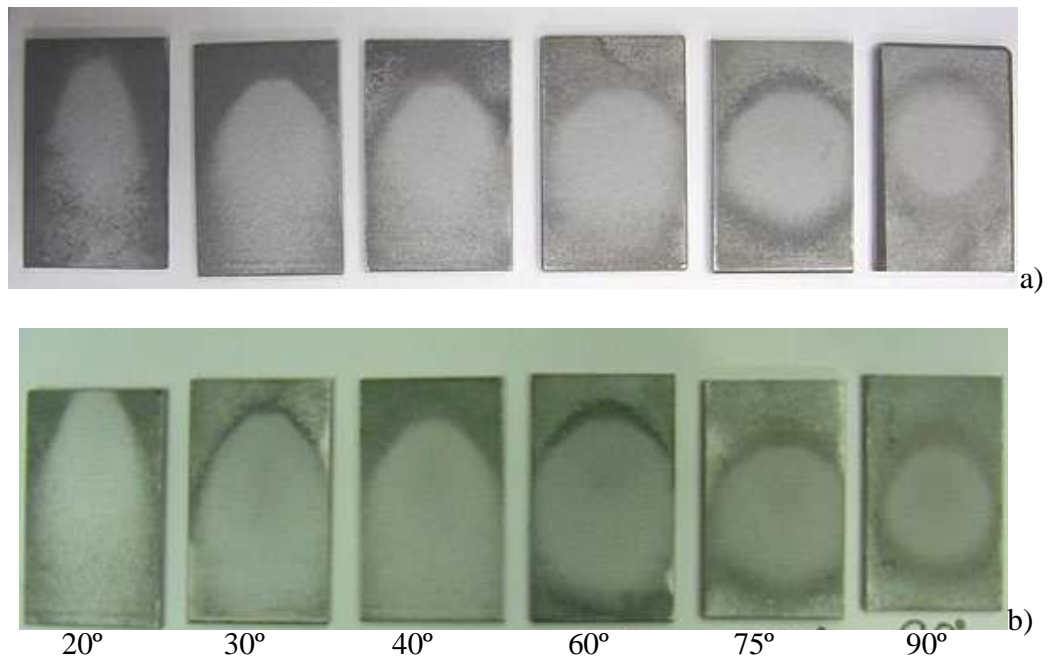


Figura 3.28 Ensayos de desgaste erosivo en el acero tipo AISI 1020 empleando 1000 g de arena sílica con una presión de aire de 0.69 (a) y 1.38 bares (b). La distancia de impacto fue de 50 mm para ambos casos.

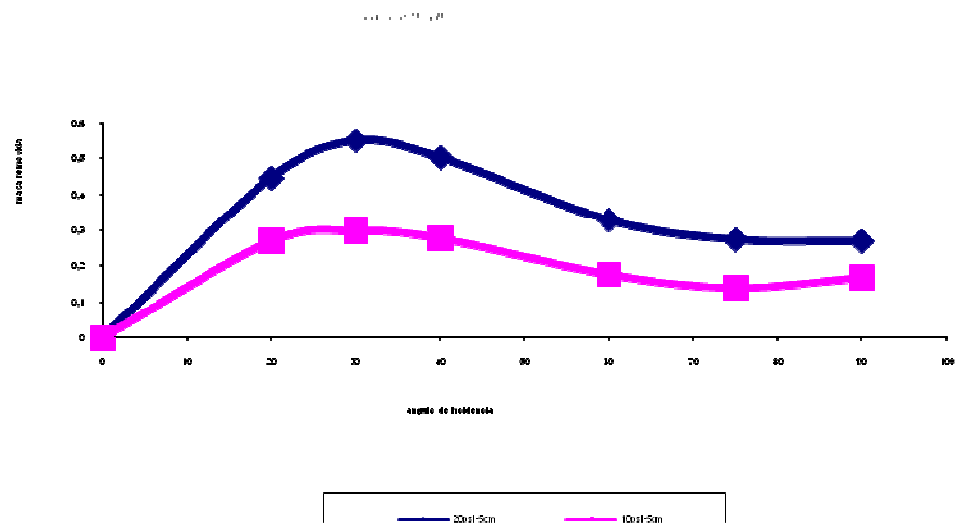


Figura 3.29 Comportamiento al desgaste erosivo de un acero de bajo carbono AISI 1020.

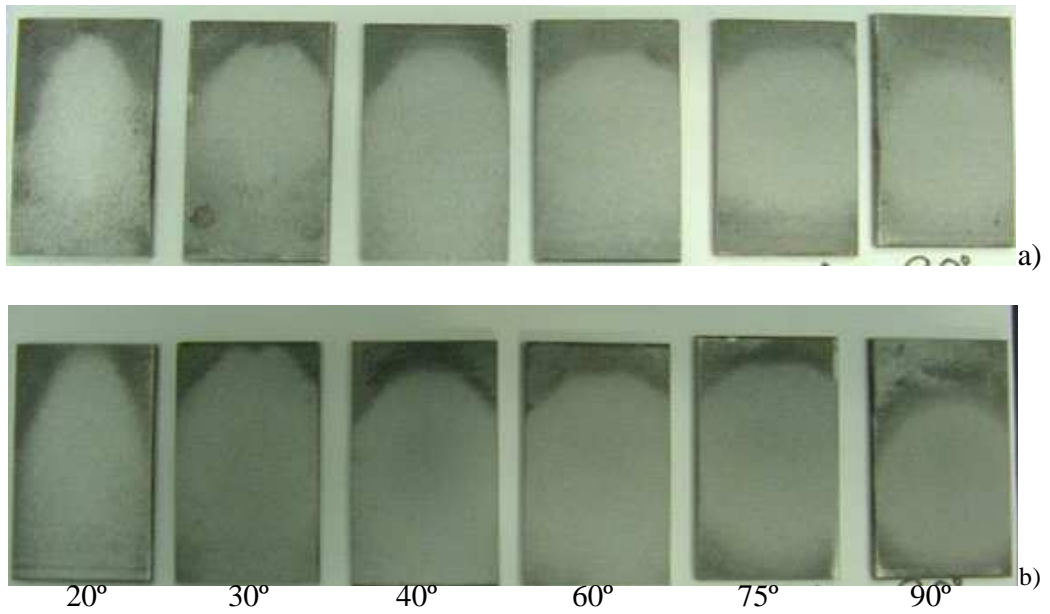


Figura 3.30 Ensayos de desgaste erosivo en el acero tipo AISI 1020 empleando 1000 g de arena sílica con una presión de aire 0.69 (a) y 1.38 bares (b). La distancia de impacto fue de 80 mm para ambos casos.

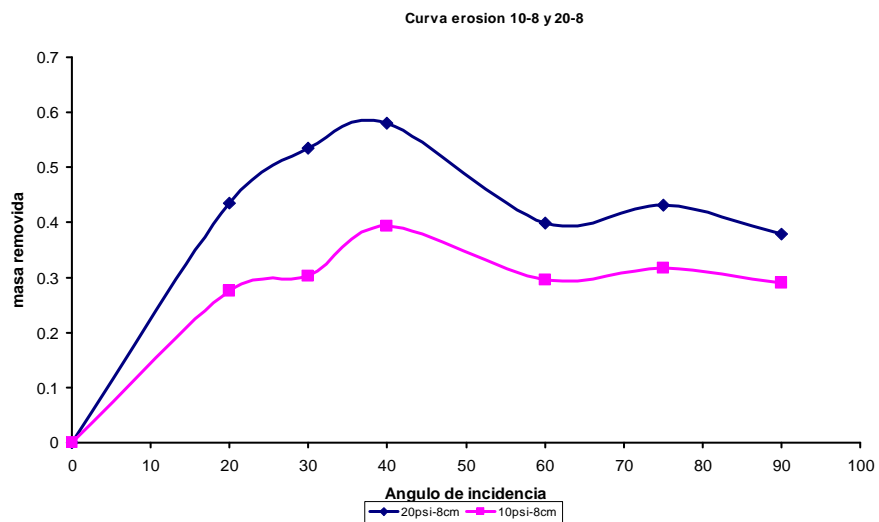


Figura 3.31 Comportamiento al desgaste erosivo de un acero de bajo carbono AISI 1020.

3.8 Desgaste en la boquilla de soplo.

La boquilla está sujeta al desgaste debido al flujo de las partículas a. Para minimizar y controlar el desgaste se diseñó una boquilla con insertos intercambiables. En la Figura. 3.32 (a) se muestra la boquilla original, la cual estaba embebida en la cámara 1 de la máquina erosionadora (Figura 3.12). Posteriormente, la boquilla se maquinó con un diámetro interior mayor para introducir en ella un tubo con diámetro interior de 5 mm fácil de reemplazar (Figuras 3.32 (b) y (c)). Los insertos fueron posteriormente fabricados de un acero AISI H13 en condición de templado a 832 HV. Los insertos fueron reemplazados después de 20 ensayos. Antes y después del uso de los insertos se realizó la medición del diámetro interior no encontrando desgaste, aún así este era reemplazado por uno nuevo.



a)



b)



Figura 3.32 Boquilla inicial a), boquilla adaptada para remplazarla b), insertos fabricados de acero AISI H13 c).

CAPITULO 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 Introducción.

La metodología empleada en el estudio de la resistencia al desgaste erosivo aplicada a las cajas de corazones se enfocó en los aceros tipo AISI H13 y P20; y consistió en ensayar una serie de probetas en el equipo de pruebas de desgaste tipo granalla o chorro de arena (capítulo 3). Se tomaron como parámetros primarios de ensayo la presión del aire, el ángulo de impacto y la dureza de los aceros. La caracterización y evaluación de los aceros erosionados se realizó por medio de análisis microestructural, por microscopía óptica y electrónica de barrido, caracterización del área dañada por la erosión, obtención de parámetros de rugosidad y perfiles de microdureza en la sección transversal.

4.2 Caracterización de los aceros AISI H13 y P20 antes de los ensayos de erosión

Los materiales sujetos a estudio pertenecen al grupo de aceros para herramientas del tipo AISI H13 y P20. Dentro de sus aplicaciones se encuentra la fabricación de moldes para la industria de la fundición de metales de bajo punto de fusión y la industria de los

polímeros [55]. Los aceros fueron proporcionados por la empresa MECANICA BASSI de Italia. En la Tabla 4.1 se muestra la nomenclatura empleada para las probetas de los dos tipos de acero así como su dureza promedio y el tratamiento térmico aplicado a cada probeta. La superficie de las probetas del acero AISI H13 fue maquinada por un proceso de electro erosión [53].

Tabla 4.1 Nomenclatura de los aceros AISI H13 y P20.

Clasificación del acero y dureza.		Endurecimiento por tratamiento térmico
Acero AISI H13	HV	
H13-1A	196	Recocido
H13-1B	313	Templado y revenido
H13-1C	381	Templado y revenido
H13-1D	458	Templado y revenido
H13-1E	530	Templado y revenido
H13-1F	581	Templado y revenido
Acero AISI P20		
P20-1A	307	Recocido
P20-1B	303	Templado y revenido
P20-1C	398	Templado y revenido
P20-1D	640 (superficie)	Carburizado y Templado

4.2.1 Análisis microestructural y composición química.

Para el análisis microestructural se emplearon técnicas de metalografía establecidas en la norma ASTM E3 [56]. El análisis consistió en seleccionar tres probetas de cada condición de dureza. Las probetas fueron cortadas en una máquina de disco abrasivo. De cada probeta se obtuvo una muestra de 2.54 cm^2 de área. Posteriormente las muestras fueron encapsuladas en baquelita y desbastadas, empleando una serie de lijas de carburo de silicio con tamaños de grano de 80, 120, 220, 320, 500, 600, 800 y 1200. En la etapa del pulido se empleo paños de fibras de rayón con alúmina de 1, 0.3 y $0.05 \mu\text{m}$. El ataque químico se realizó por inmersión en una solución compuesta por nital al 3% (3 ml

de ácido nítrico y 97 ml de alcohol etílico) y picral saturado (4 g de ácido pícrico y 100 ml de alcohol etílico) en relación 1:1, el tiempo de ataque fue 3 a 10 s [57].

El análisis de la microestructura se realizó en un microscopio Olympus modelo PMG 3 donde se tomaron una serie de imágenes a magnificaciones de 50X, 100X, 200X y 800X. La composición química fue obtenida en un equipo de espectroscopia de rayos X marca Leco, para el análisis se tomaron 3 probetas de cada dureza.

4.2.2 Ensayo de Microdureza.

El ensayo de microdureza fue realizado bajo la norma ASTM E 92 [58] en un microdurometro de la marca Future Tech FM. El tipo de ensayo elegido fue el Vickers (HV), con un penetrador en forma de pirámide, la carga empleada fue de 300 g y un tiempo de 15 s. Las probetas sometidas fueron preparadas con técnicas de metalografía hasta la etapa del pulido con alúmina de 1 μm . Para cada condición de tratamiento térmico se tomaron tres probetas en los aceros AISI H13 y AISI P20.

En el caso de la probeta con tratamiento de templado y carburizado (P20-1D) se realizó un perfil de microdureza desde la superficie endurecida hacia el centro de la probeta hasta una distancia de 1200 μm . La distancia entre cada huella fue de 40 μm .

4.3 Caracterización de las partículas erosivas.

Se emplearon técnicas de microscopia óptica y electrónica para analizar el tipo y la forma de las partículas erosivas, la cual corresponden a una arena base sílice SiO_2 compuesta por granos subangulares de diferente número de malla. La arena fue cuarteada y separada en bolsas de 1000 g con el propósito evitar sedimentación.

4.3.1 Análisis granulométrico.

La prueba de análisis granulométrico de la arena sílica se realizó de acuerdo al estándar ASTM E118 [59]. Como primer paso se tomó una cantidad de 1000 g de arena y después de cuartearla se tomó una muestra de 50 g. El propósito de cuartear la arena es homogenizar la distribución de los tamaños de partícula. La Figura 4.1 (a) muestra el equipo empleado para homogenizar (cuartear) la arena sílica. Los 50 g de arena sílica se colocan en la parte superior de la serie de tamices con numeración de 40, 50, 70, 100, 140, 200 y 270 además del fondo, Figura 4.1 (b), donde son agitados por un mecanismo durante 15 min para cribar la arena en cada uno de los tamices. La masa de arena retenida en cada uno de los tamices fue pesada en la balanza analítica para determinar la distribución de tamaños de partícula en la arena sílica.

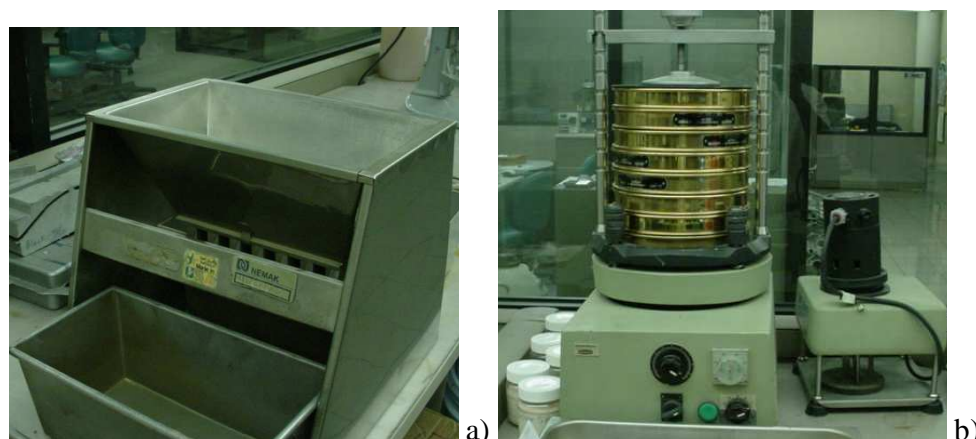


Figura 4.1 Equipo empleado en el análisis granulométrico de la arena a) Cuarteadora de arena b) Serie de tamices y agitador.

4.3.2 Homogenización de la arena

Debido a que el número de ensayos de desgaste demandaría una gran cantidad de arena, se separaron 6 sacos de 50 kg. En la Figura 4.2 se muestra el procedimiento empleado para cuartear la arena con el propósito de homogenizar la distribución de tamaños. Cada costal (costal 1y 2) de arena fue cuarteado y se tomó un muestra para análisis

granulométrico después se dividido en dos partes cada uno (A y B) y posteriormente se mezclaron nuevamente (costal 1' y 2'). La nueva mezcla (costal 1' y 2') se cuarteo y tomó una muestra para análisis granulométrico, después del cuarteo el costal 1' se dividió en dos partes (1A' y 1B'). La parte 1A' se mezcló con una parte 2A' de otro costal (costal 2'), de condición similar. En esta ocasión la mezcla se denominó 12A' la cual se cuarteó y tomó una muestra para análisis granulométrico. Nuevamente se dividió en dos partes y se clasificaron como 12A y 12B, cada una de estas partes fue combinada con las partes 12C y 12D (de otro costal). Finalmente las nuevas mezclas (12AC y 12BD) fueron cuarteadas y sometidas al análisis granulométrico. De esta última mezcla la arena fue separada en bolsas de 1000 g para ser empleada en los ensayos de erosión.

Para la práctica del cuarteo de la arena sílica se utilizó una máquina similar a la mostrada en la Figura 4.1 (a), con capacidad de 3 kg.

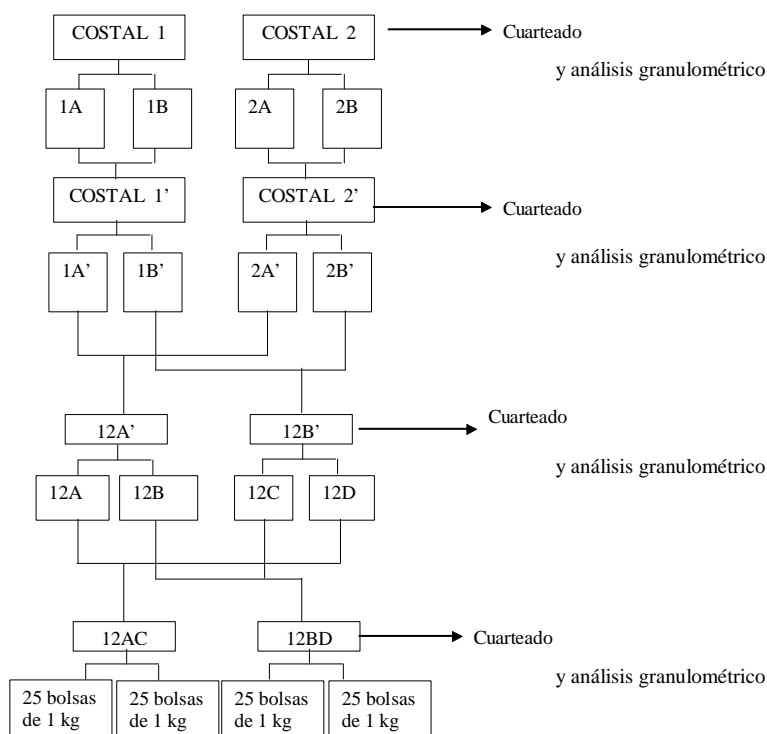


Figura 4.2. Esquema de homogenización de la arena empleada para los ensayos de desgaste erosivo.

4.4 Ensayos de desgaste erosivo.

Los ensayos de desgaste erosivo fueron realizados en el equipo diseñado en los laboratorios del Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL y el cual se describió en el Capítulo 3. Los parámetros seleccionados en este estudio se evaluaron durante estudios exploratorios y diseño del equipo final.

4.4.1 Presión del aire comprimido.

El aire a alta presión es el medio que transporta e introduce las partículas de arena sílica dentro de las cavidades del molde metálico. La presión del aire comprimido empleada en el equipo tipo granalladora o chorro de arena se determinó en base al proceso de fabricación de corazones en caja fría (Capítulos 2 y 3). Para este estudio se eligieron dos valores de presión de 0.69 bares y 1.38 bares. La presión fue monitoreada y registrada en cada ensayo con la ayuda de dos sensores ubicados las cámaras 1 y 2. En la Figura 4.3 se muestra el equipo JUMBO Logoscreen 500, empleado para la medición de la presión del aire comprimido. En la Figura 4.4 se presenta la máquina erosionadora, hacia la derecha de la fotografía se observa el filtro empleado para atrapar los polvos finos que se generan durante los ensayos.



Figura 4.3 Equipo auxiliar usado para el monitoreo y registró la presión del aire que entra al sistema.



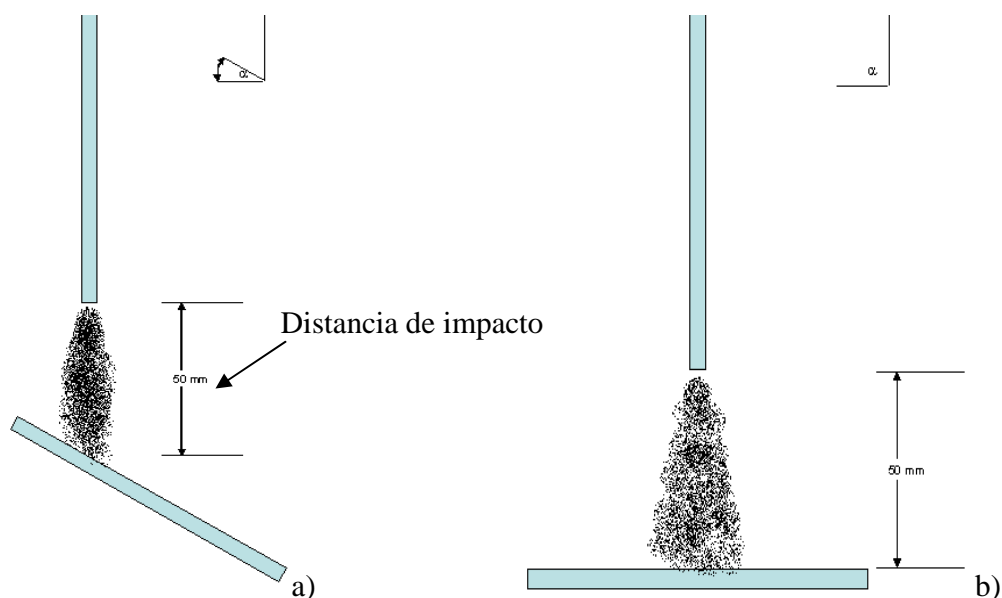
Figura 4.4 Equipo completo de ensayos de desgaste erosivo. El medidor de la presión del aire aparece en el costado izquierdo.

Antes de alimentar el aire comprimido en la máquina erosionadora su presión fue regulada y mantenida constante durante cada ensayo realizado. El aire empleado permaneció libre de humedad lo que facilitó la fluidez de la arena. La duración de cada ensayo fue de aproximadamente 7 min para una cantidad de 1000 g de arena sílica. Este tiempo comprende desde el momento que la arena empieza a impactar la superficie de la probeta hasta que deja de hacerlo.

4.4.2 Ángulos de impacto

El ángulo de impacto entre las partículas de arena sílica y las probetas se determinó entre el eje vertical de la boquilla y la superficie de la probeta. Para este estudio se tomaron 6 ángulos de impacto 20°, 30°, 40°, 60°, 75° y 90°. En las Figuras 4.5 (a) y (b) se muestran

dos representaciones esquemáticas haciendo referencia al impacto de las partículas a un ángulo de 60° y 90° respectivamente.



4.5 Ángulo de impacto referido entre el eje de la boquilla y la superficie de la probeta a) 30° b) 90° .

4.4.3 Distancia de impacto.

La distancia de impacto se refiere a la longitud que el chorro de arena recorre antes de impactar la superficie de la probeta y abarca desde la salida de la boquilla hacia la superficie (Figura 4.5). En base a los estudios preliminares se encontró que la divergencia del chorro de arena al salir de la boquilla aumenta conforme la distancia de impacto es mayor. En este estudio se determinó una distancia de impacto de 50 mm para las probetas con dimensiones de 100 mm x 50 mm x 5 mm. La distancia de 50 mm permite que los 1000 g de arena sílica impacten, en su totalidad, a la superficie de la probeta, provocando el daño y arranque de material por erosión.

El eje sujetador de las probetas (Figura 4.6) se encuentra dentro de la tolva y está sujeto a la parte superior por medio de unos tornillos “sin fin” los cuales le permiten el desplazamiento de 0 a 150 mm. Este aditamento también puede girar de 5° a 90° para posicionar la probeta al ángulo de impacto deseado.

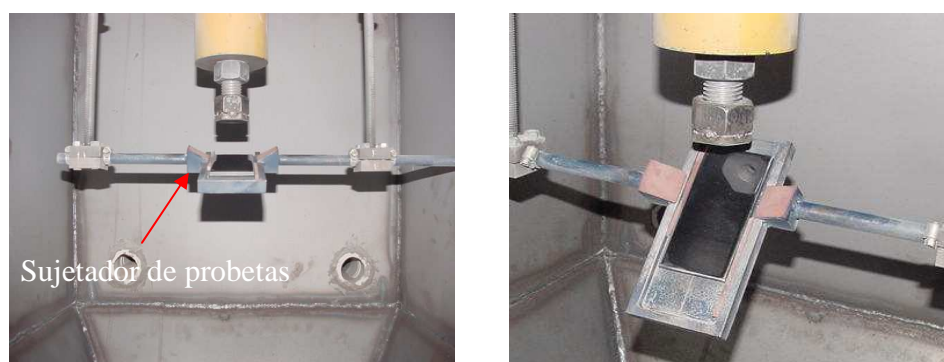


Figura 4.6 Eje del portamuestras colocado en la parte inferior y cubierta con un contenedor tipo tolva.

4.4.4 Diámetro interno y longitud de la boquilla.

La boquilla es uno de los componentes principales de la máquina erosionadora ya que es aquí donde se controla el flujo de la mezcla aire-arena y se evita tener turbulencia, esto se logra con las dimensiones adecuadas y el acabado de la superficie interna libre de protuberancias. [11, 49 y 50]. En la Figura 3.32 se presentó el diseño inicial de la boquilla el cual fue modificado por el alto desgaste que se presentó (Figura 3.32 a). El nuevo diseño es más versátil empleando insertos con longitud de 100 mm y un diámetro interior de 5 mm. Estas dimensiones son recomendadas para una mezcla de aire seco y arena sílica sin resinas.

4.4.5 Dimensiones de las probetas.

La Figura 4.7 muestra dimensiones de las probetas empleadas para los ensayos de desgaste. Las dimensiones de 100 mm de largo x 50 mm ancho x 5 mm de espesor fueron elegidos de acuerdo a la distancia de impacto y al daño estimado anteriormente en ensayos preliminares.

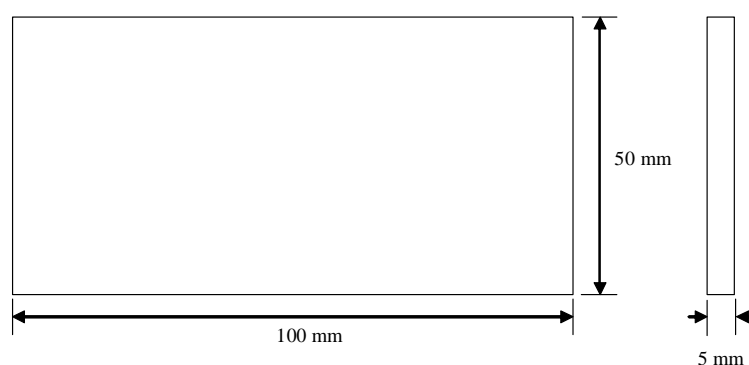


Figura 4.7. Dimensiones de las probetas a ser empleadas en el ensayo de desgaste.

4.4.6 Partículas erosivas.

La masa de las partículas erosivas en cada ensayo fue de 1000 g. El flujo de la mezcla de arena sílica se mantuvo constante y la razón de alimentación fue de 2.5 g/s. La arena empleada en este estudio es de diferentes tamaños, desde 150 a 425 μm (de acuerdo a la series de tamiz empleados en el análisis granulométrico o tamaño de grano de arena AFS). En la Tabla 4.2 se muestra la distribución de tamaños promedio obtenidos en un análisis granulométrico de la arena empleada.

Tabla 4.2. Distribución de tamaños de partícula de arena sílica obtenidos en un análisis granulométrico.

Número de tamiz o malla	Distribución de tamaños (μm)	Gramos retenidos en cada malla
40	425	14.75
50	300	37.25
70	212	31.35
100	150	13.725
140	106	2.75
200	75	0.15
270	53	0
Fondo		0
Total		99.975 g

4.4.7 Dureza de las probetas.

Los aceros sujetos al presente estudio fueron proporcionados por la empresa MECANICA BASSI de Italia, especialistas en la fabricación de moldes para la industria de la fundición. Los tratamientos térmicos en los aceros para lograr los diferentes valores de dureza fueron realizados en dicha empresa, bajo las normas de calidad empleadas en la fabricación de los moldes suministrados a la empresa NEMAK, para el proceso de moldeo en caja fría se templaron en aire a presión a partir de una temperatura de austenización de 1020 °C (Ver figura 3.8a). Posteriormente fueron revenidos a diferentes temperaturas a fin de obtener las siguientes durezas. [35-41]. Para el acero AISI H13 se tomaron valores de dureza de 196, 313, 381, 458, 530 y 581 HV. Similarmente para el acero AISI P20 se obtuvieron las durezas de 307, 303, 398 y 640 HV.

La Tabla 4.3 muestra la clasificación de las probetas a ensayar, su dureza, los ángulos de impacto, la presión del aire y número de ensayos realizados por cada condición. Los

ensayos realizados para el acero AISI H13 fueron 144, mientras que para el P20 la cantidad de 96; lo que arroja un total de 240 ensayos para ambos aceros. La cantidad de arena empleada para cada ensayo fue 1000 g y la distancia de impacto fue 50 mm.

Tabla 4.3. Matriz de ensayos realizados en los aceros AISI H13 y AISI P20 con 1000 g de arena sílica de 150 a 425 μm y una distancia de impacto de 50 mm.

Clasificación de las probetas y su dureza.		Ángulos de impacto: 20°, 30°, 40°, 60°, 75° y 90°	Presión del aire seco: 0.69 bares y 1.38 bares	Número de ensayos	Total de ensayos
Muestra	Dureza (HV)				
H13-1A	196	6	2	2	24
H13-1B	313	6	2	2	24
H13-1C	381	6	2	2	24
H13-1D	458	6	2	2	24
H13-1E	530	6	2	2	24
H13-1F	581	6	2	2	24
P20-1A	307	6	2	2	24
P20-1B	303	6	2	2	24
P20-1C	398	6	2	2	24
P20-1D	640	6	2	2	24
GRAN TOTAL					240

4.5 Análisis de las probetas erosionadas.

4.5.1 Superficie de las probetas.

Antes de realizar los ensayos de desgaste por erosión las probetas del acero AISI H13 se limpiaron con una solución de ácido cítrico (10 g de ácido cítrico y 100 ml de agua destilada) durante 5 min en equipo de ultrasonido para eliminar óxidos superficiales

[57], posteriormente se volvieron a limpiar con acetona para eliminar los residuos de los óxidos y humedad presentes en la superficie de la probeta. En la Figura 4.8 se muestra dos probetas de este acero con diferente condición de tratamiento térmico.

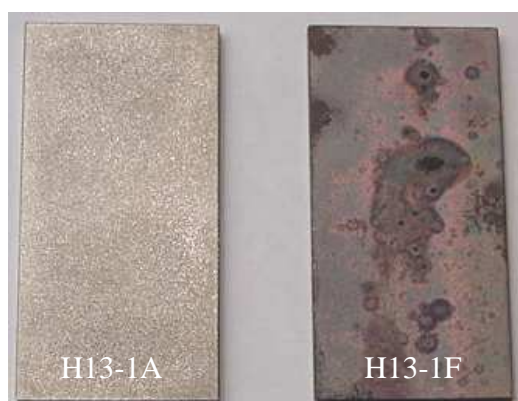


Figura 4.8 Probetas pertenecientes al acero AISI H13. La probeta de la izquierda corresponde a la condición H13-1A y a la derecha H13-1F.

En las probetas del acero AISI P20 la cara a ensayar fue desbastada con papel lija de diferentes tamaños de grano; 80, 120, 220, 320, 500, 600, 800 y 1200, después fueron limpiadas en la solución de ácido cítrico durante 5 min y finalmente en acetona. Para evitar que las probetas se golpearan entre ellas fueron envueltas en un plástico que además las protegía del medio ambiente.

Todas las probetas se pesaron en una balanza analítica con precisión de 0.0001 g, antes y después del ensayo de desgaste erosivo (ver Figura 3.13).

Al finalizar el ensayo de desgaste erosivo las probetas nuevamente se limpiaron con acetona dentro del equipo de ultrasonido. La superficie dañada por la erosión fue cubierta con una película plástica protegiéndola de la corrosión mientras era analizada; la película plástica se disolvió sumergiendo las probetas en acetona.

4.5.2 Parámetros de rugosidad.

El parámetro de rugosidad Ra fue determinado con la ayuda de un perfilómetro de la marca Taylor Hobson. En la Tabla 4.4 se muestra las condiciones seleccionadas en la determinación de la rugosidad. La Figura 4.9 muestra la forma en que se realizaron los barridos para medir la rugosidad; en cada probeta se realizaron cuatro barridos de 10 mm cada uno, 2 en el eje x y 2 en el eje y. El área analizada fue la que estuvo bajo la mayor concentración del chorro de arena. La rugosidad en las probetas se obtuvo antes y después de los ensayos.

Tabal 4.4 Condiciones del ensayo que se tomaron en cuenta para realizar la medición de los parámetros de rugosidad en las probetas.

Acero	Ángulos de impacto (90°, 60°, 40°, 30°)	Presión del aire (0.689 y 1.379 bar)	Total de probetas analizadas
H13-1A	4	2	8
H13-1B	4	2	8
H13-1C	4	2	8
H13-1F	4	2	8
P20-1B	4	2	8
P20-1C	4	2	8
P20-1D	4	2	8
GRAN TOTAL			42

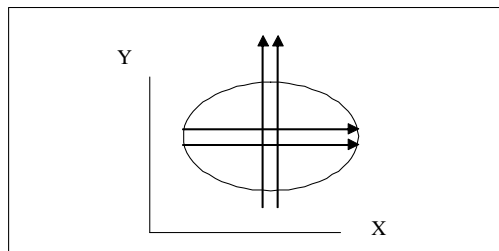


Figura 4.9 Medición de los parámetros de rugosidad R_a , R_q , R_z y R_y en las probetas erosionadas 2 barridos en el eje x y 2 en el eje y de 10 mm.

4.5.3 Análisis metalográfico.

Las probetas ensayadas fueron seccionadas tal como lo muestra el esquema de la Figura 4.10. El área de mayor daño es representada por medio de un círculo, el corte se realizó a lo ancho y largo de la probeta con el propósito de analizar el área de impacto y el perfil en el espesor de la probeta. El corte de las probetas se realizó en una máquina con disco abrasivo de marca Struers Discotom-5 y para seccionar el área dañada se utilizó una cortadora con disco de diamante de la marca Struers Accutom-5, lo anterior con el propósito de evitar deformación durante el corte.

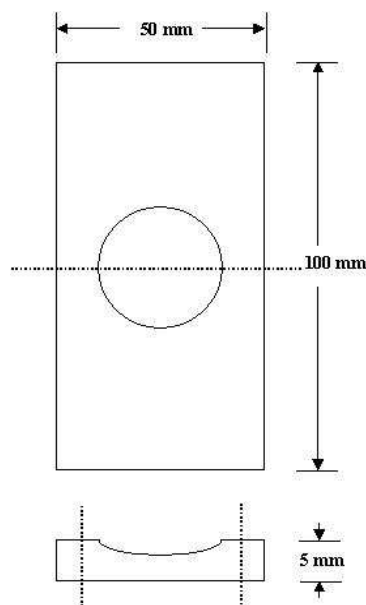


Figura 4.10 Esquema de corte de la muestra erosionada.

La preparación metalografica se realizó de acuerdo a la norma ASTM E 112 [56]. Las probetas seccionadas fueron montadas en baquelita empleando una montadora de la marca Buehler Simplemet 2000, posteriormente desbastadas y pulidas. La Figura 4.11 muestra una probeta seccionada y la forma en que se preparo metalograficamente. El ataque químico para revelar la microestructura fue realizado por inmersión en una mezcla 1:1 de nital al 3% y picral saturado [57].

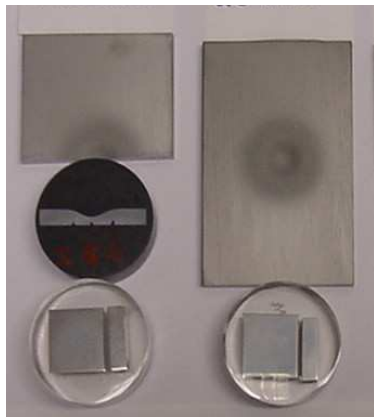


Figura 4.11 Probeta sometida a un ensayo de desgaste erosivo y preparada metalográficamente.

4.5.4 Microscopia óptica.

Se empleo un microscopio óptico de la marca Olympus PMG 3 para tomar una serie de fotomicrográficas a magnificaciones de 100x, 200x y 500x. En la Tabla 4.5 se muestran la cantidad de probetas que fueron analizadas en el microscopio óptico. El análisis consistió en observar el efecto del impacto de las partículas de arena sílica sobre la subsuperficie en el perfil del área dañada.

Tabla 4.5 Probetas sometidas a microscopia óptica.

Acero	Ángulos de impacto (90°, 60° 30°)	Presión del aire (0.689 y 1.379 bar)	Total de probetas analizadas
H13-1A	3	2	6
H13-1B	3	2	6
H13-1C	3	2	6
H13-1D	3	2	6
P20-1B	3	2	6
P20-1C	3	2	6
P20-1D	3	2	6
GRAN TOTAL			42

4.5.5 Microscopia electrónica.

Se empleo un microscopio electrónico de barrido de la marca Joel JSM 6360LV para analizar la superficie del área dañada y su perfil en el espesor. Con el empleo de esta técnica se busca determinar los mecanismos que originan la pérdida del material en la superficie durante los múltiples impactos de las partículas de arena sílica, así como también, evaluar los cambios microestructurales en la subsuperficie (sección transversal). En la Tabla 4.7 se muestran las probetas elegidas para el análisis.

Tabla 4.6 Probetas sometidas a microscopía electrónica de barrido.

Muestra	Ángulos de impacto (90°, 60°, 40° 30°)	Presión del aire(1.379 bar)	Total de probetas analizadas
H13-1A	4	1	4
H13-1B	4	1	4
H13-1C	4	1	4
H13-F	4	1	4
P20-1B	4	1	4
P20-1C	4	1	4
P20-1D	4	1	4
GRAN TOTAL			28

4.5.6 Ensayo de Microdureza.

Se empleó un microdurómetro Microhardness tester FM. En la Tabla 4.7 se muestran las probetas elegidas para el ensayo. En cada una de las condiciones elegidas se realizó un perfil de la dureza desde la superficie hacia el centro del espesor de la placa hasta una profundidad de 800 a 1200 μm . La carga empleada fue de 200 g por un tiempo de 15 s. Las probetas fueron preparadas metalográficamente hasta la etapa de pulido fino.

Tabla 4.7 Probetas sometidas a microdureza HV.

Acero	Ángulos de impacto (90°, 60° 30°)	Presión del aire (0.689 y 1.379 bar)	Total de probetas analizadas
H13-1A	3	2	6
H13-1B	3	1 (1.379bar)	3
H13-1C	3	2	6
H13-1D	3	2	6
P20-1B	3	1 (1.379bar)	3
P20-1C	3	2	6
P20-1D	3	2	6
GRAN TOTAL			36

CAPITULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1 Caracterización de los aceros AISI H13 y AISI P20

5.1.1 Composición química.

La Tabla 1 muestra la composición química de los aceros AISI H13 y P20 sujetos a estudio. El acero tipo AISI H13 muestra al cromo y molibdeno como elementos de aleación de, 5.2 % y 1.16 % respectivamente, estos dos elementos y el contenido de carbono de alrededor de 0.4 % lo favorecen en aplicaciones de trabajo en caliente. Para el acero tipo AISI P20 el principal elemento de aleación es el cromo con un valor aproximado al 2 %. Los elementos de aleación presentes en la composición de ambos aceros promueven una alta templabilidad y buen control de la dureza cuando son sometidos a tratamiento térmico de temple y revenido. [54]. Ambos aceros cumplen con las especificación química internacional AISI.

Tabla 5.1 Composición química del AISI H13 y AISI P20 (% en peso).

Acero	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni	%P
AISI H13 nominal	0.4	1.0	0.35	5.3	1.4		
AISI P20 nominal	0.4	0.5	0.75	1.7	0.4		
AISI H13 bajo estudio	0.417	0.38	1.05	5.2	1.6	0.18	0.008
AISI P20 bajo estudio	0.383	0.29	1.7	1.98	0.24	0.15	0.004

5.1.2 Análisis Microestructural.

El análisis microestructural realizado en el acero AISI H13 presentó estructuras de carburos globulares con una matriz de ferrita ó una matriz de martensita revenida según el tratamiento térmico aplicado. Las Figuras 5.1 (a), (b), (c) y (d) presentan micrografías del acero H13 analizado antes de los ensayos de erosión.

La Figura 5.1 (a) muestra la microestructura de la probeta H13-1A sometida al tratamiento térmico de recocido, donde se puede observar la presencia de carburos muy finos en forma de glóbulos, dispersados en una matriz ferrítica.

La Figura 5.1 (b) presenta la microestructura de la probeta H13-1B sometida a un tratamiento térmico de temple y revenido. En este caso la estructura está compuesta principalmente por martensita revenida y la presencia de carburos muy finos.

Las Figura 5.1 (c) y (d) pertenecen a la microestructura de las probetas H13-1C y H13-1F respectivamente. El tratamiento térmico aplicado a estas probetas fue de temple y revenido y arrojó una estructura de martensita revenida muy fina.

Las probetas del acero AISI H13 con estructura de martensita revenida presentan diferentes valores de dureza como consecuencia del proceso de tratamiento térmico de revenido aplicado a cada una de ellas, ver Tabla 4.3. Las probetas sometidas al tratamiento térmico de recocido presentan la menor dureza debido que la estructura

ferrítica es más suave que la matriz de martensita revenida. El tratamiento de esferodizado en este acero fue propuesto para evaluar su resistencia a la erosión. Trabajos anteriores al presente han mostrado que aceros con microestructura similares presentan una mejor resistencia [28].

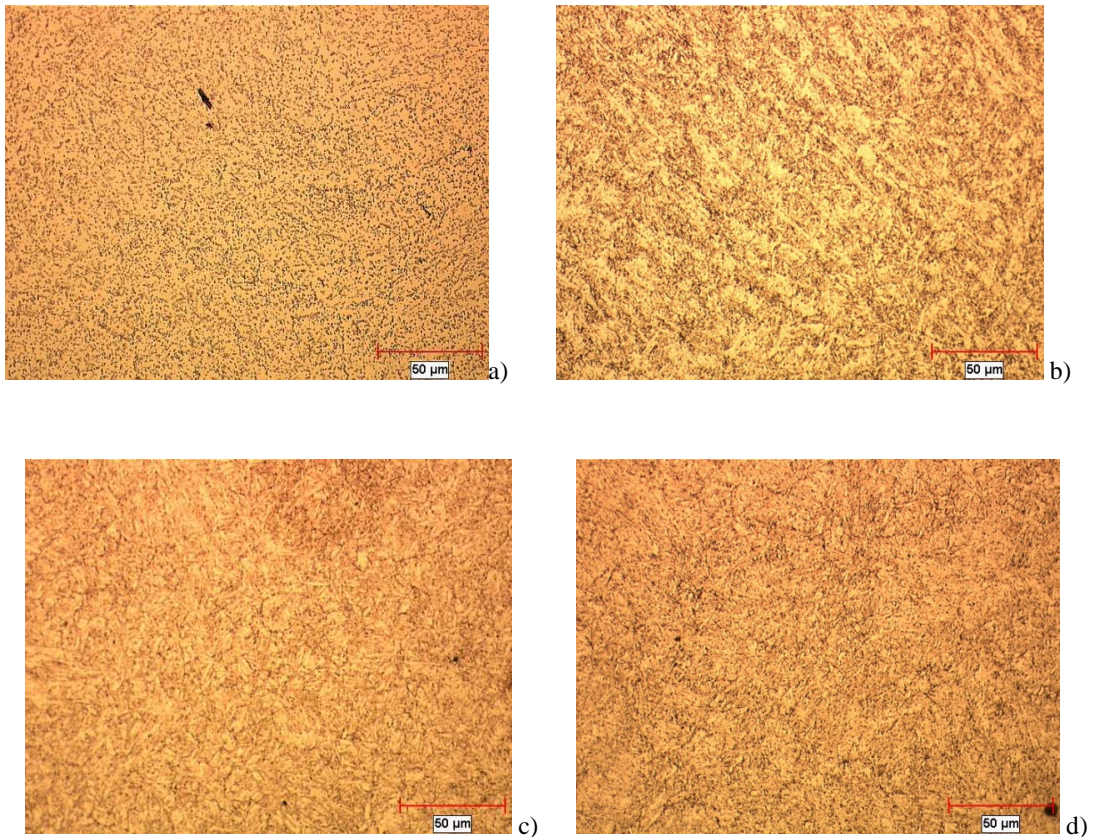


Figura 5.1 Acero AISI H13 a) H13-1A microestructura compuesta carburos globulares en una matriz ferrítica, dureza de 196 HV. b) H13-1B, dureza 313 HV. c) H13-1C, dureza de 381 HV. d) H13-1F, dureza de 581 HV. En éstas últimas tres imágenes la microestructura está compuesta por martensita revenida. El ataque químico de las muestras fue por inmersión 5-10 segundos con nital 3 (ácido nítrico 3 % y alcohol etílico de 97%) y pírcal 10 (ácido pícrico 10 g y 100 ml de alcohol etílico) a una relación 1:1.

El resultado del análisis de la microestructura en el acero AISI P20 se muestra en las Figuras 5.2 (a), (b) y (c). La Figura 5.2 (a) pertenece al acero P20 clasificado como P20-1C, donde se observa la presencia de una matriz de martensita revenida muy fina. No se observó la presencia de ferrita o perlita. Las Figuras 5.2 (b) y (c) corresponden a las probetas del acero clasificadas como P20-1D. En la Figura 5.2 (b) se muestra un área cercana a la superficie del acero, en donde se puede observar una capa carburizada con profundidad promedio de 250 μm , debajo de esta área se observa una estructura compuesta de martensita. En la Figura 5.2 (c) muestra la estructura en un área del centro de la probeta, la cual está compuesta principalmente por martensita sin revenir lo que permite tener un valor alto en la dureza, de hasta 640 HV, ver Tabla 4.3.

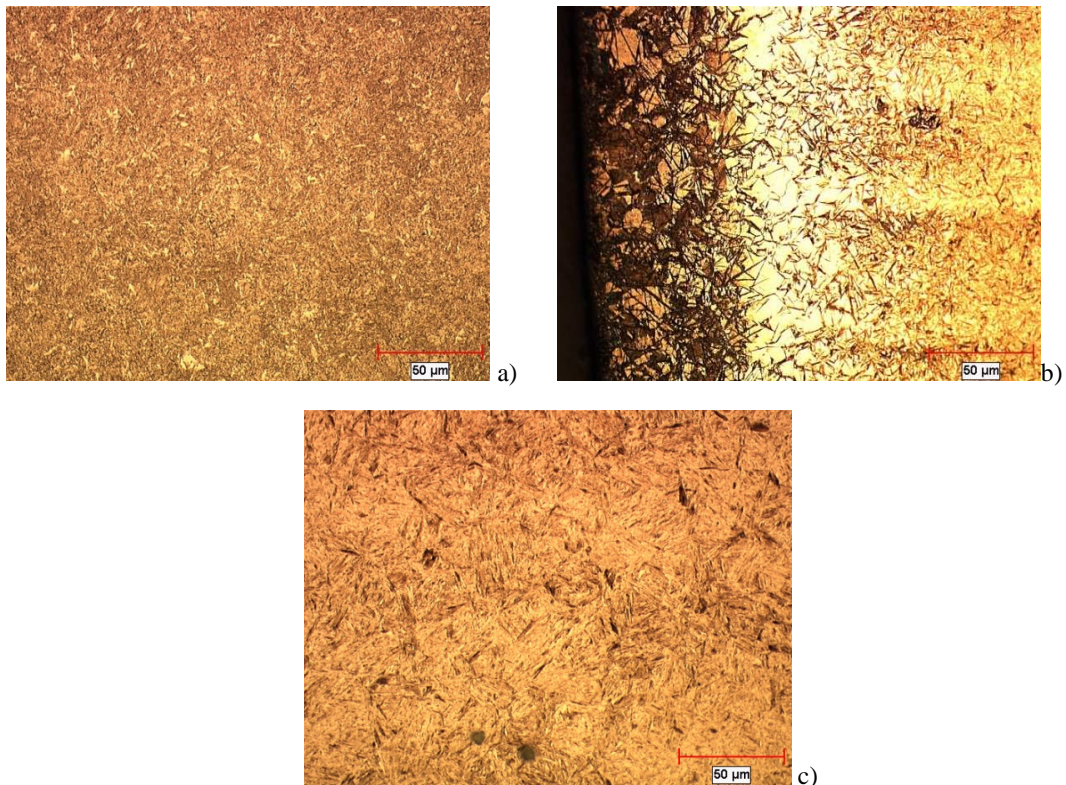


Figura 5.2 Acero AISI P20 a) P20-1C, dureza de 398 HV microestructura compuesta de martensita revenida, b) P20-1D con endurecimiento superficial por medio de carburizado y martensita templada, c). P20 1D en la en la zona central. martensita sin revenir. Todas las muestras fueron atacadas por inmersión de 5-10 segundos con nital 3 (ácido nítrico 3 % y alcohol etílico de 97%) y pírcal 10 (ácido pícrico 10 g y 100 ml de alcohol etílico) relación 1:1

La microestructura en las Figuras 5.2 (a) y (c) tienen cierta similitud, sin embargo los diferentes valores de dureza indican lo contrario. Una estructura con martensita directamente del temple, como en la Figura 5.2 (c), muestra una alta dureza debido a la concentración de esfuerzos durante el enfriamiento acelerado desde la temperatura de austenizado; los esfuerzos residuales desaparecen y como consecuencia la dureza disminuye cuando se somete a un calentamiento por debajo de la temperatura A_{c1} , es decir a la temperatura de revenido, lo cual disminuye la dureza [55].

La Figura 5.3 muestra los resultados del perfil de microdureza realizado en una de las muestras clasificado como P20-1D. La microdureza en la superficie antes de ser expuesta al ensayo de impacto presenta valores que oscilan entre 540 a 660 HV a una profundidad de 500 μm , posteriormente la dureza se mantiene en un valor de 640 HV hasta una distancia de 1400 μm .

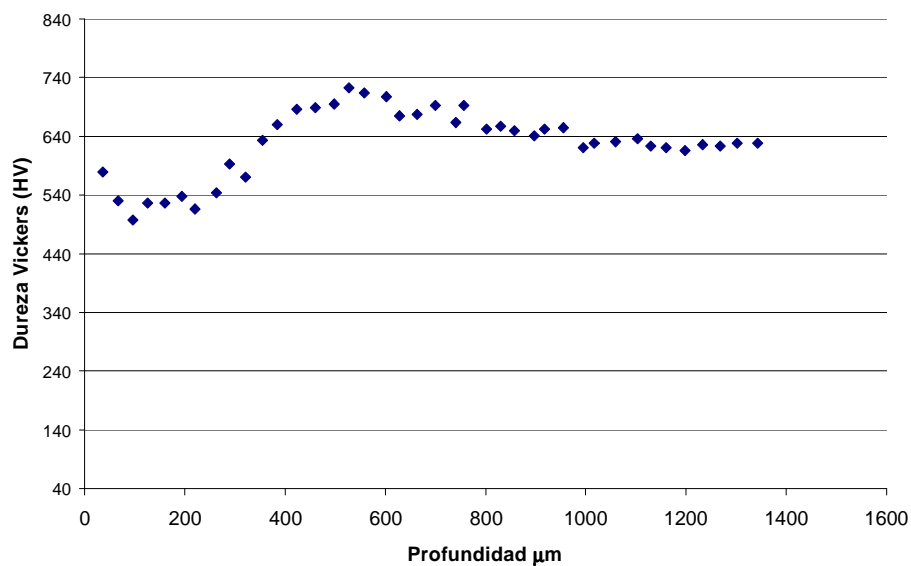
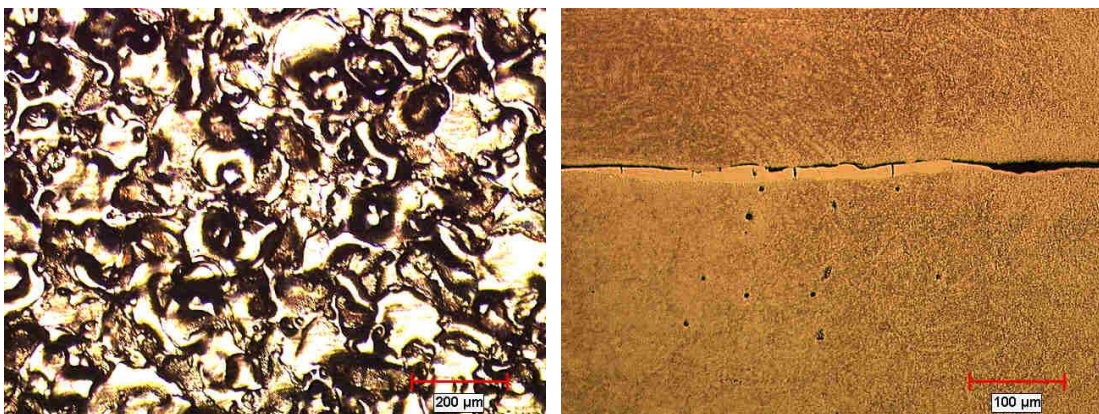


Figura 5.3 Perfil de microdureza en el acero AISI P20 carburizado.

5.1.3- Medición del parámetro de rugosidad promedio (R_a) en la superficie inicial de los acero AISI H13 y AISI P20.

Las Figuras 5.4 (a) y (b) muestran la condición de la superficie maquinada por el proceso de electroerosión en el grupo de probetas del acero AISI H13, En la Figura 5.4 (a) se observa una capa blanca ó distorsionada conocido como capa Bielby [53]. Posteriormente, al realizar un corte para observar el perfil de la probeta se observó que la capa fue de un espesor de entre 5 a 10 μm , ver Figura 5.4 (b). La capa Bielby se originó al realizar descargas eléctricas durante el proceso de maquinado [53]. La capa observada en la Figura 5.4 (b) es muy pequeña (5 a 10 μm) y no provocó efectos en la microestructura ni efectos en la dureza de la superficie.

En la Tabla 5.2 se muestran los valores del parámetro de rugosidad R_a promedio, donde el valor R_a en las probetas electroerosionadas del acero AISI H13 es de aproximadamente 4 μm . Por otro lado los valores de R_a promedio en las probetas del acero AISI P20, varían de 0.1 a 0.6 μm , los cuales se obtuvieron por la preparación previa de desbaste de la superficie de las probetas, antes de someterlas a los ensayos de erosión.



a)

b)

Figura 5.4 Acero AISI H13 a) superficie del acero b) sección transversal atacada con nital al 3%.

Tabla 5.2 Condiciones iniciales de rugosidad en las probetas del acero AISI H13 y AISI P20. Ra promedio.

MATERIAL	Ra $\pm 0.01 \mu\text{m}$
H13-1A	3.66
H13-1B	3.9
H13-1C	4.08
H13-1F	4.32
P20-1A	0.111
P20-1B	0.109
P20-1C	0.204
P20-1D	0.55

5.2 Tipo y distribución de diámetros de la partícula.

La Figura 5.5 presenta una imagen de las partículas de arena sílica tomada en el microscopio electrónico de barrido. En esta imagen se observa una mezcla de partículas de diferentes diámetros con una morfología subangular.

Las gráficas de la Figura 5.6 (a) y (b) muestran la distribución del tamaño de partícula del análisis granulométrico en el proceso de homogenización de la arena. La Figura 5.6 (a) corresponde a la homogenización del costal 3 (Sección 4.3.2) El mayor porcentaje en peso de tamaño de partícula es retenido en el tamiz con apertura de malla de $300 \mu\text{m}$. El mismo efecto presentó el costal 4 durante su homogenización, ver Figura 5.6 (b). El análisis de la distribución de tamaños se mantiene sin mucha variación en cada uno de los pasos analizados.

Se puede considerar que los diámetros de partículas que predominan en la mezcla de la arena se encuentran entre 150 a 425 μm , sin embargo el tamaño de la partícula tiene influencia en los mecanismos de desgaste erosivo tal como se observó en la Sección 1.3. En un estudio realizado por J.R. Zhou [45] se encontró que la razón de erosión, en una prueba de desgaste a una presión de 0.138 MPa, (0.138 bares), varía con respecto al tamaño de la partícula, ver Figura 5.7. Por ejemplo, partículas con tamaño de grano de 600 (16 μm) producen una mayor razón de erosión mientras que partículas con tamaño de grano 120 (102 μm) generan un menor daño. Este efecto puede atribuirse a que partículas con menor tamaño y masa puedan alcanzar una mayor velocidad de impacto y como consecuencia una mayor energía cinética generando un daño por erosión de mayor magnitud que aquellas partículas de mayor diámetro y masa, a una presión dada.

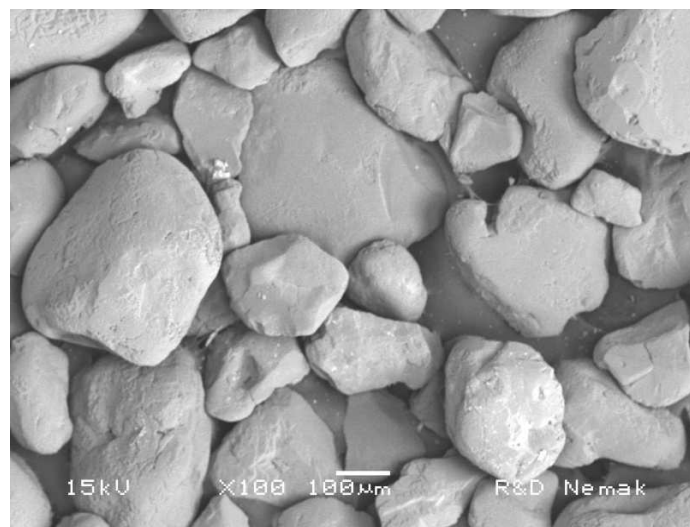
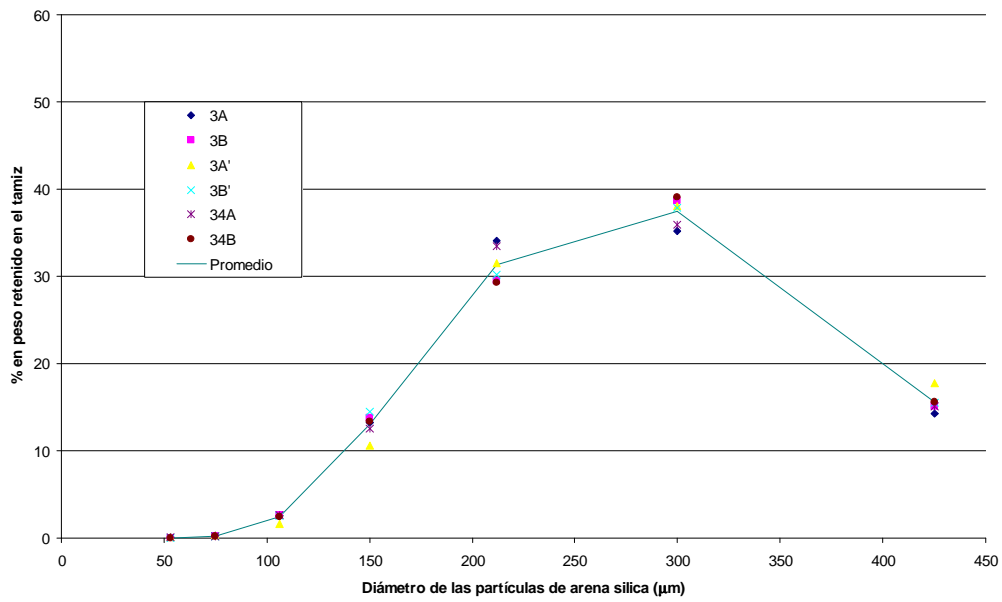
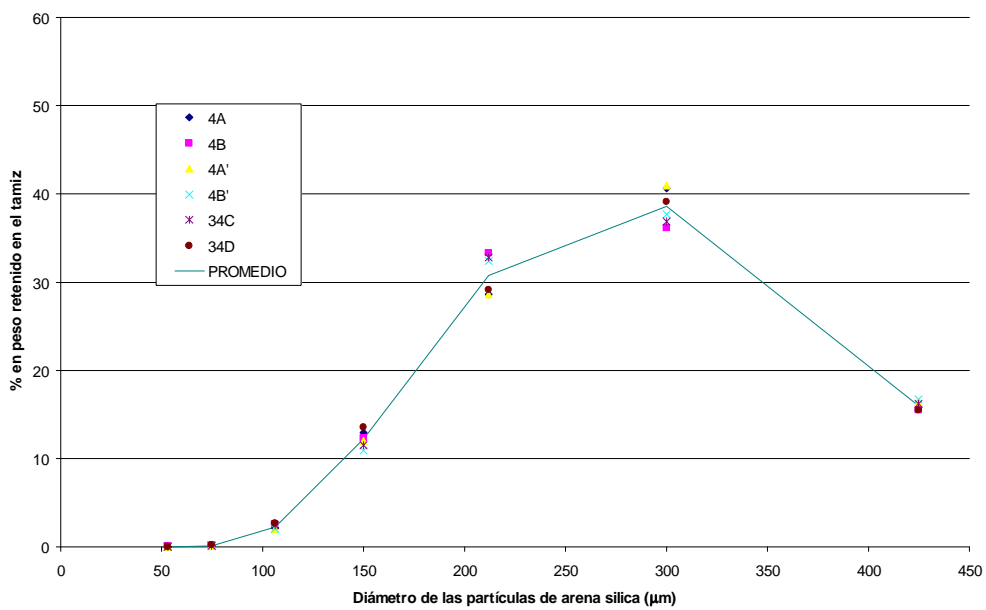


Figura 5.5 Partículas de arena silica (SiO_2) de forma subangular.



a)



b)

Figura 5.6 Análisis granulométrico de la arena sílica durante la homogenización de la arena, a) saco 3 y b) saco 4.

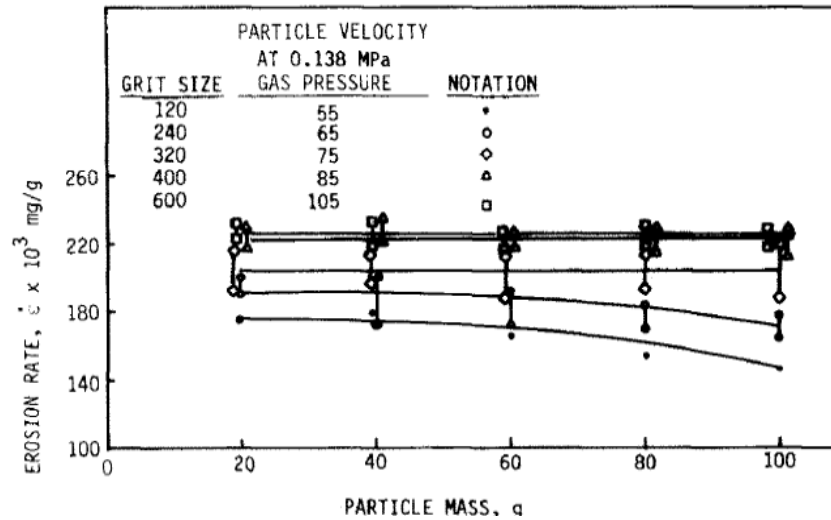
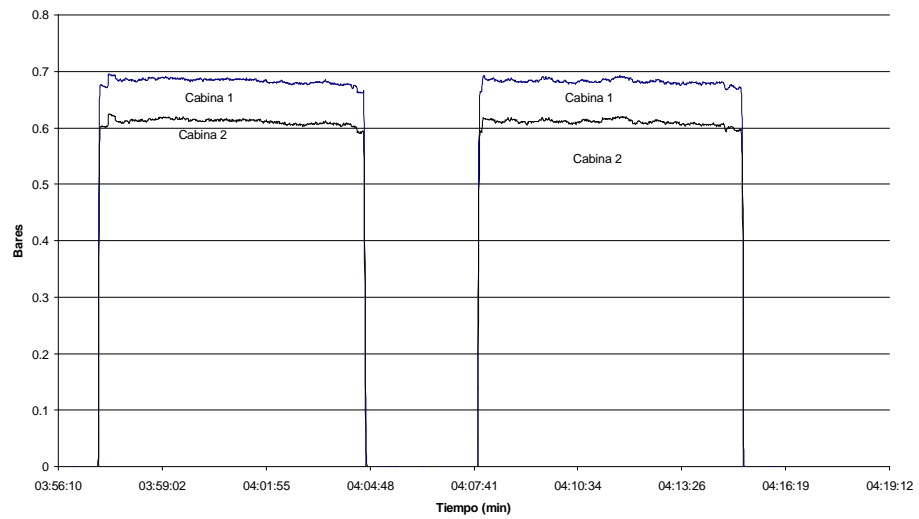


Figura 5.7 Variación de la razón de erosión por el impacto de partículas de diferente tamaño a una presión de 1.38 bares [45].

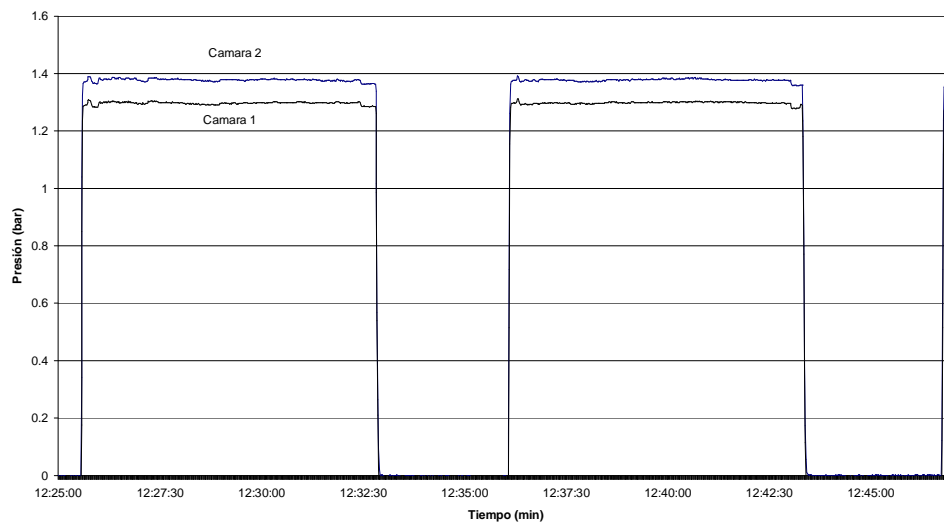
5.3 Registros de presión a 0.69 y 1.38 bares.

Las Figuras 5.8 (a) y (b) muestran las gráficas del registro de la presión del aire seco a 0.69 y 1.38 bares, respectivamente, contra el tiempo de duración del ensayo de desgaste. El tiempo aproximado en que la probeta fue impactada por el flujo arena-aire fue de 7 min, en los ensayos realizados tanto a 0.69 bares como 1.38 bares. La presión en las cámaras 1 y 2 fueron muy similares con una diferencia de presión de 0.08 bares entre ellas, esta condición ayudó a evitar el desgaste en la parte interna de la maquina durante el desplazamiento de la arena y además de fomentar la aceleración de las partículas de arena, exclusivamente en la boquilla de 100 mm.

Por otro lado, la elaboración de estas gráficas constató que la presión durante cada ensayo permaneció constante, lo que generó un flujo uniforme de arena-aire sobre la superficie de la probeta.



a)



b)

Figura 5.8 Gráficas del registro de la presión durante los ensayos de desgaste erosivo. a) Presión de 0.69 bares, b) presión de 1.38 bares.

5.4 Análisis Visual de las probetas erosionadas.

Las Figuras 5.9 (a) y (b) presentan fotografías de las probetas erosionadas del acero H13-1A a una presión de 1.38 bar. La Figura 5.9 (a) corresponde a las probetas ensayadas a los ángulos de 20 a 40° donde se observa la formación de ondulaciones mientras que a los ángulos de 60 a 90°, Fig. 5.9 (b), no hay evidencia de este fenómeno. Al someter las probetas a una presión de 0.69 bares el comportamiento fue similar, las ondulaciones se presentaron sólo en los ángulos de 20 a 40° mientras en el grupo de ángulos de 60 a 90° no se observaron. Este efecto también fue observado en las probetas H13-1B, P20-1A y P20-1B probetas con valores de dureza que oscilan entre 300 HV.

Las Figuras 5.10 (a) y (b) muestran una serie de probetas correspondientes al acero H13-1F, ensayadas a una presión de 1.38 bares. Aquí se observa el efecto de la erosión en la superficie y en esta ocasión las probetas ensayadas a los ángulos de 20 a 40°, Figura 5.10 (a) no presentan ondulaciones, lo mismo que las probetas ensayadas a los ángulos de 60° a 90°, Figura 5.10 (b).

La formación de este tipo de ondulaciones es consecuencia del impacto del chorro de arena sobre una superficie relativamente suave [25] ya que al aumentar la dureza de la probeta este fenómeno ya no fue observado a simple vista. Por otro lado la formación de las estrías u ondulaciones pueden ser consideradas como una característica del impacto a ángulos de 20 a 40° para probetas con baja dureza.

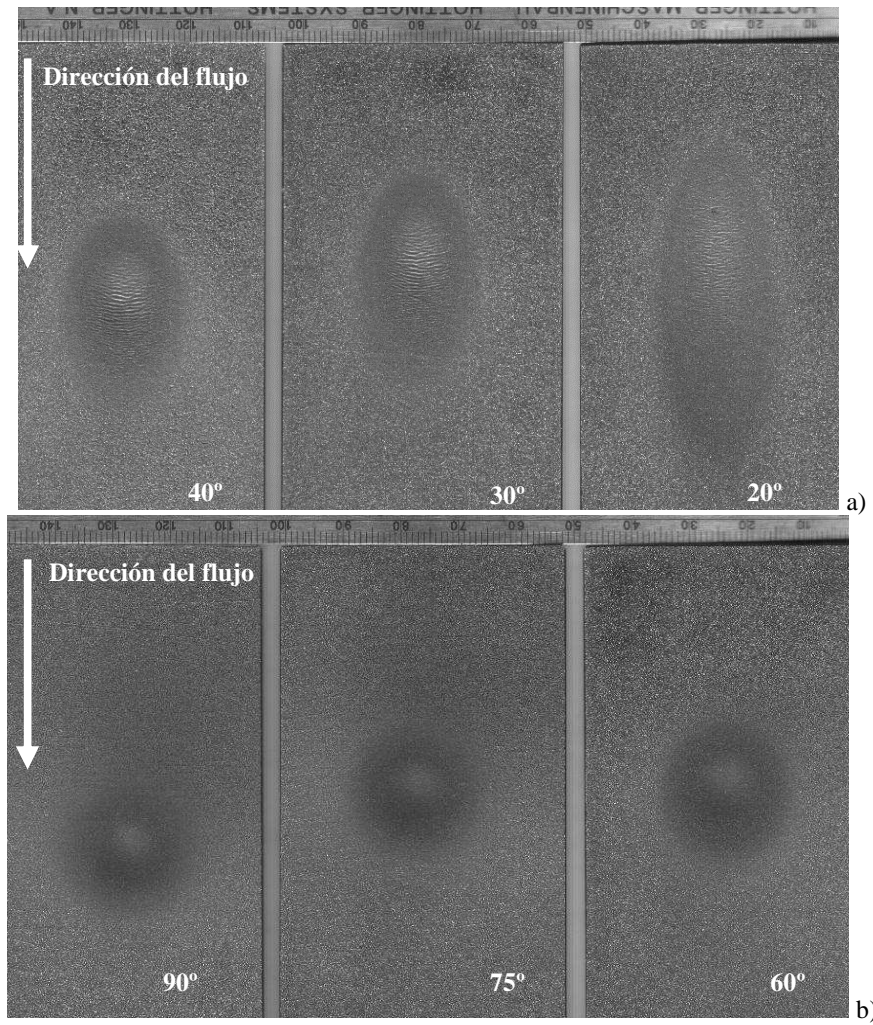


Figura 5.9 Probetas clasificadas como H13-1A ensayadas con aire a una presión de 1.38 bares y arena sílica con dispersión de tamaño de 106 a 425 μm . a) ángulos de impacto de 40, 30 y 20 grados, b) ángulo de impacto de 90, 75 y 60°.

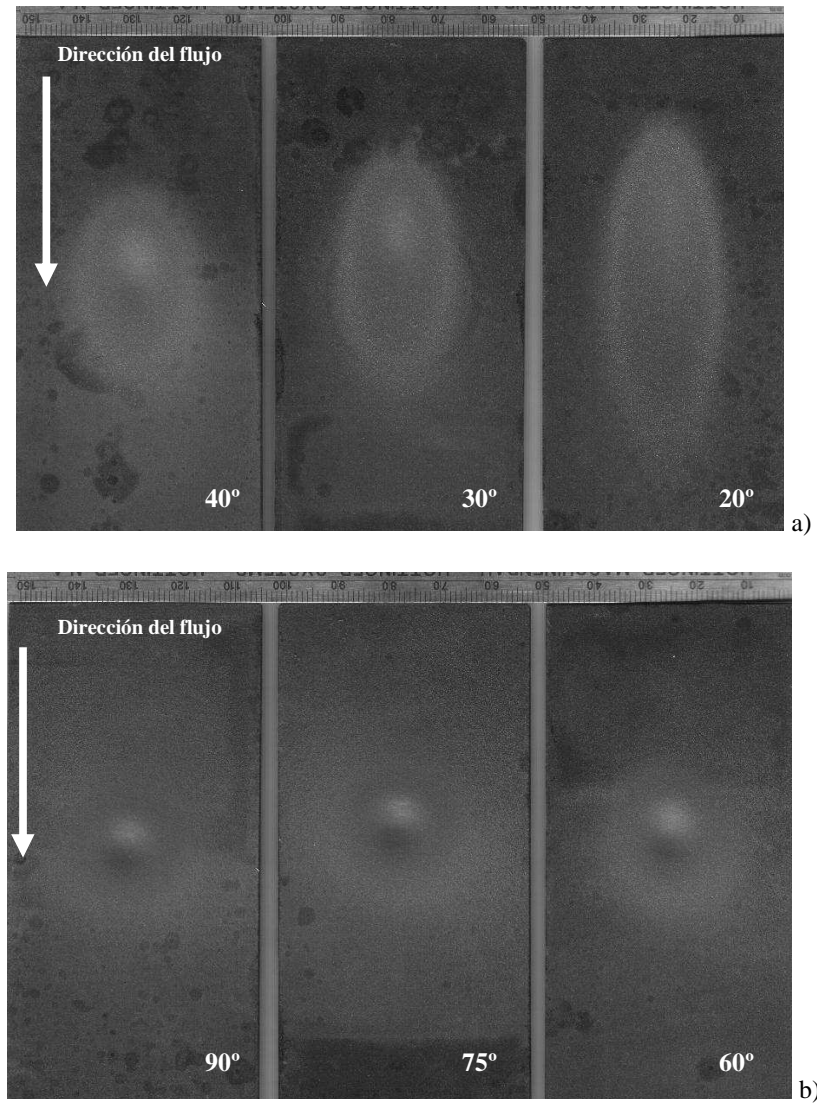


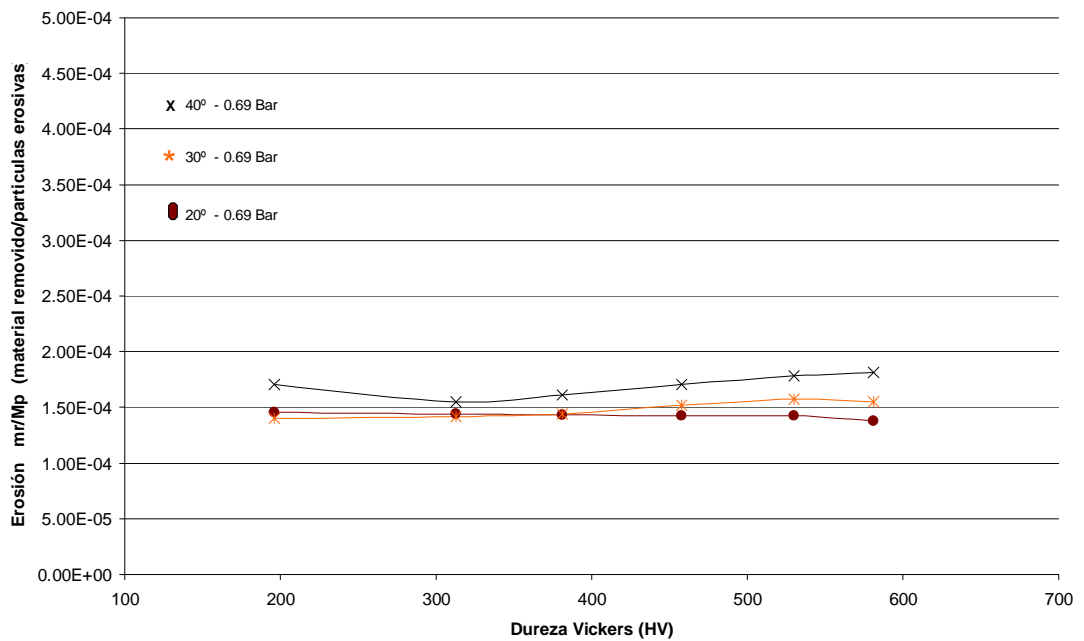
Figura 5.10 Probetas clasificadas como H13-1F ensayadas con aire a una presión de 1.38 bares y arena sílica con dispersión de tamaño de 106 a 425 μm . a) ángulos de impacto de 40, 30 y 20 grados, b) ángulo de impacto de 90, 75 y 60°.

5.5 Resultados del desgaste en los acero AISI H13 y AISI P20.

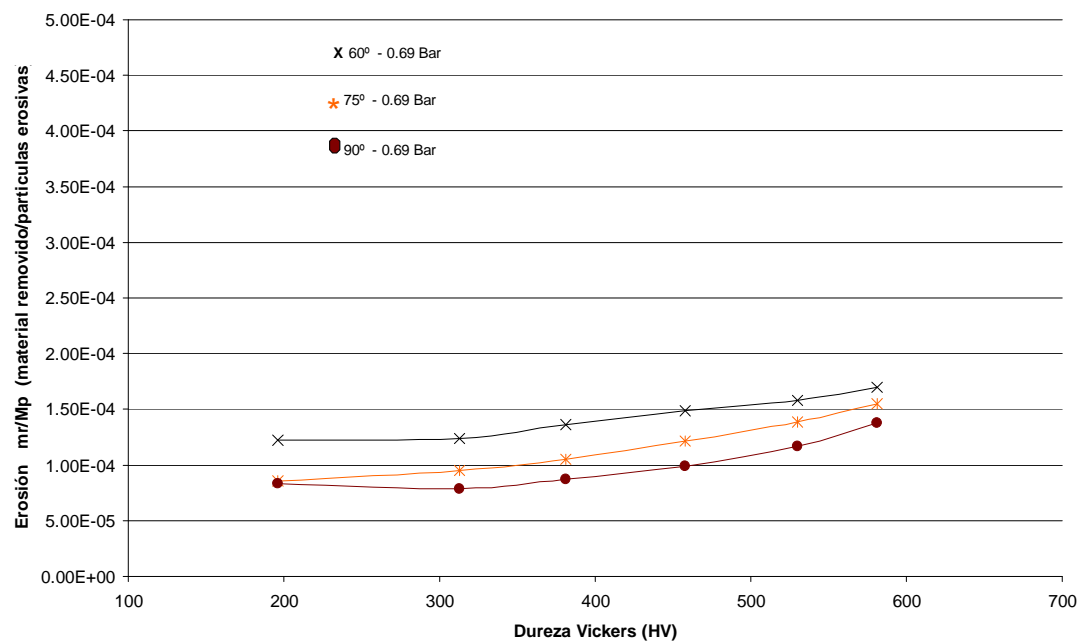
5.5.1 Efecto de la dureza del acero AISI H13 y AISI P20 sobre el desgaste erosivo.

Las Figuras. 5.11 (a) y (b) presentan el efecto de la dureza sobre la razón de erosión en el acero AISI H13 a 6 ángulos de impacto para una presión de aire seco de 0.69 bares. La Figura 5.11 (a) muestra la razón de erosión a los ángulos de impacto de 20° 30° y 40° en probetas con valores de dureza de 196 hasta 581 HV. La razón de erosión que arrojan estos ensayos muestran un comportamiento similar en estos tres ángulos de impacto, por ejemplo en el ángulo de 20° la razón de erosión (E) se mantiene sin variación significativa, con un valor promedio de $1.4 \times 10^{-4} \text{ mg/Kg}$ entre los valores de dureza de 196 hasta 581 HV. Por otro lado, la Figura 5.11 (b) muestra un incremento de la razón de erosión conforme aumenta la dureza en los ángulos de impacto de 60° a 90°. La razón de erosión inicial en el acero con dureza de 196 HV (H13-1A) fue de $8 \times 10^{-5} \text{ mg/Kg}$ para un ángulo de impacto de 90° y al aumentar la dureza a un valor de 581 HV (H13-1F) la razón de erosión aumenta a $1.4 \times 10^{-4} \text{ mg/Kg}$, casi el doble.

Las Figuras. 5.12 (a) y (b) presentan el efecto de la dureza sobre la razón de erosión en el acero AISI H13 ensayado a seis ángulos de impacto y presión de aire seco de 1.38 bares. En La Figura 5.12 (a) se observa que a un ángulo de impacto de 20° la razón de erosión promedio (E) es aproximadamente de $3.3 \times 10^{-4} \text{ mg/Kg}$. en los valores de dureza de 196 hasta 581 HV. Al igual que en los ensayos realizados a la presión de 0.69 bares, el incremento de la dureza en el acero no genera una respuesta positiva a la rapidez de erosión, tal como se puede observar más claro a un ángulo de 30°, donde la razón de erosión promedio es de $3.6 \times 10^{-4} \text{ mg/Kg}$. En la Figura 5.12 (b) se observa un incremento de la pérdida en masa conforme aumenta la dureza en el acero, en los ángulos de 60°, 75° y 90°. En el ángulo de 90° el acero AISI H13 con dureza de 196 HV presenta una erosión de $1.8 \text{ mg/Kg} \cdot 10^{-4}$ y al aumentar la dureza a un valor de 585 HV la razón de erosión aumenta a $3.0 \text{ mg/Kg} \cdot 10^{-4}$. El mismo efecto fue observado en la grafica de la Figura 5.11 (b) a excepción que la razón de la erosión en este caso es mayor como consecuencia del aumento de la presión del aire.

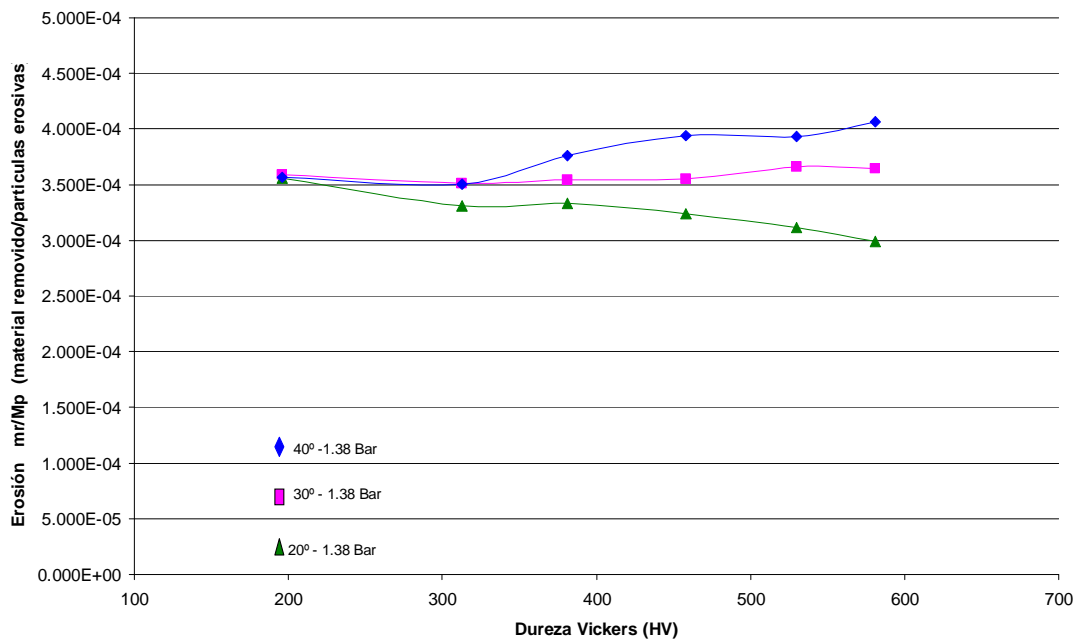


a)

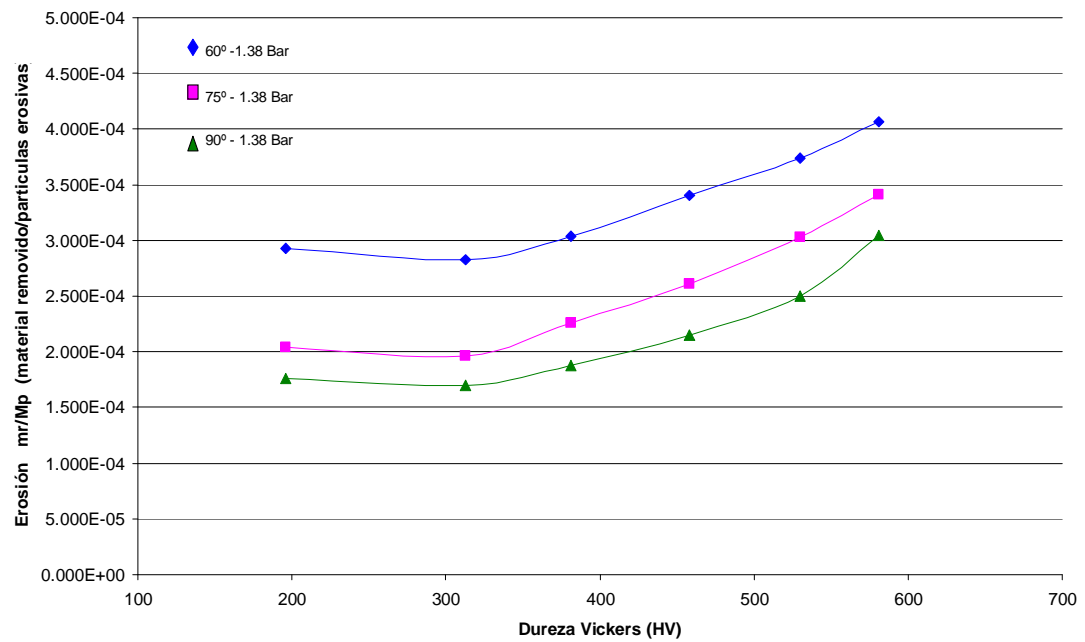


b)

Figura 5.11 Efecto de la dureza con respecto a la razón de erosión a diferentes ángulos de impacto en el acero AISI H13, erosionado con arena sílica (SiO_2) con tamaños de partícula de 106 a 425 μm a una presión con aire seco de 0.69 bares, a) 20°, 30° y 40°, b) 60°, 75° y 90°.



a)



b)

Figura 5.12 Efecto de la dureza con respecto a la razón de erosión a diferentes ángulos de impacto en el acero AISI H13, erosionado con arena sílica (SiO_2) con tamaños de partícula de 106 a 425 μm y presión de aire 1.38 bares, a) 20°, 30° y 40°, b) 60°, 75° y 90°.

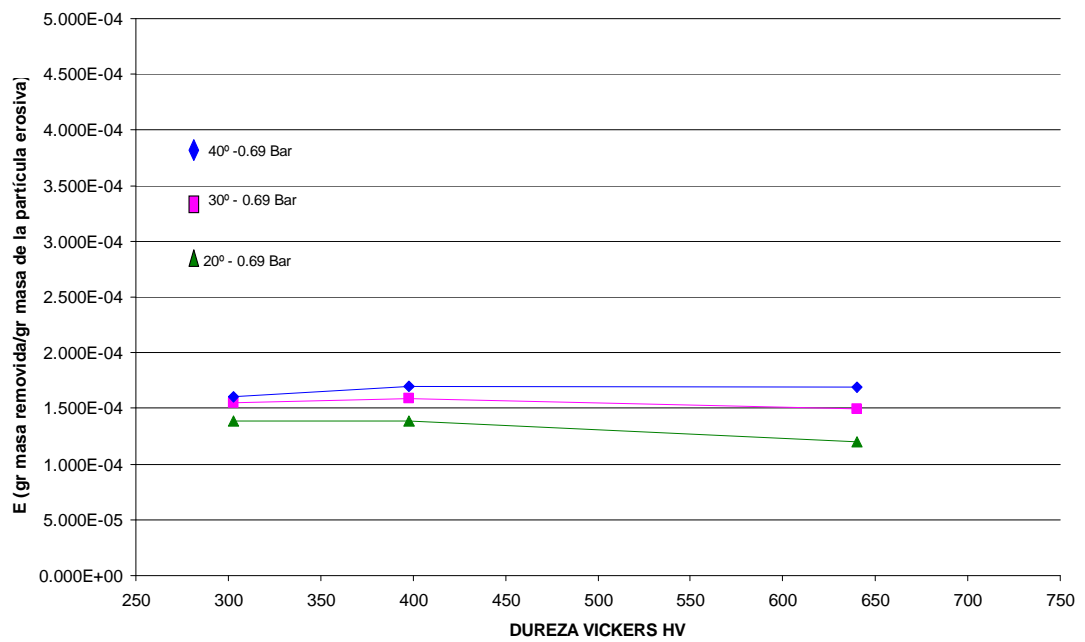
Las Figuras 5.13 (a) y (b) muestran los resultados de los ensayo de erosión en las probetas del acero AISI P20 ensayados con arena sílica y aire seco a una presión de 0.69 bares.

La Figura 5.13 (a) corresponde a la gráfica de la razón de erosión contra la dureza para los ángulos de impacto de 20°, 30° y 40°. Al igual que en el acero AISI H13, el aumento de la dureza en el acero AISI P20 no tiene un efecto significativo sobre la razón de erosión a estos ángulos. En el ángulo de 30° la razón de erosión promedio en las durezas de 303 a 640 HV es de 1.5×10^{-4} mg/Kg lo cual reafirma que al aumentar la dureza no hay un cambio en la erosión para estos tres ángulos de impacto. Por otro lado la condición de mayor dureza presentó una superficie carburizada y una estructura de martensita sin revenir en el centro, cabe aclarar que la alta dureza en esta condición del acero, pertenece a la fase de martensita sin revenir.

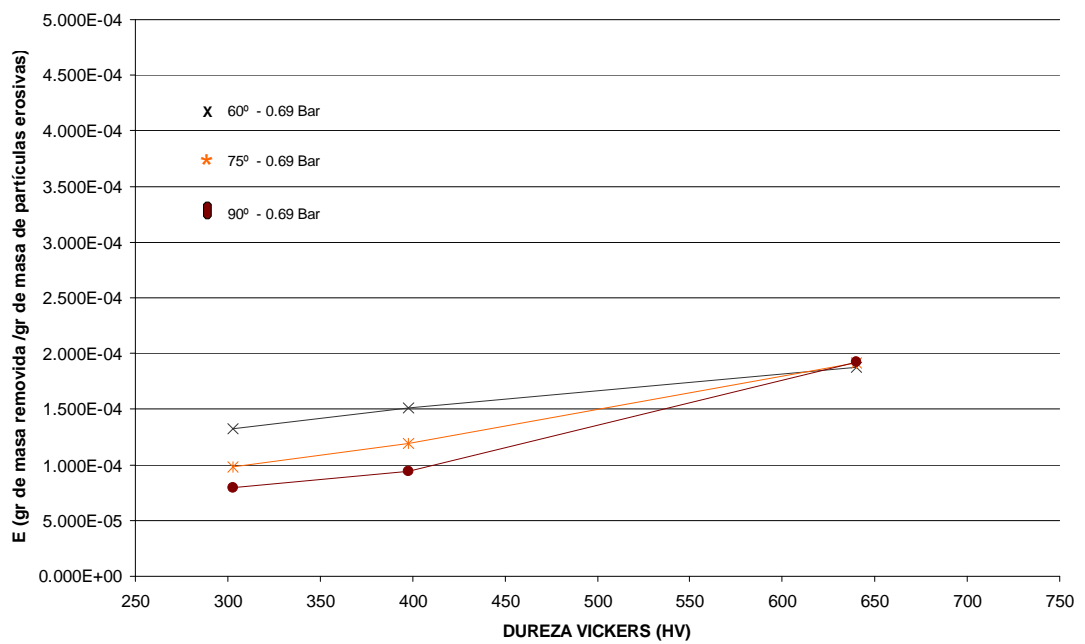
En la Figura 5.13 (b) se presentan los resultados de la razón de la erosión a los ángulos de 60°, 75° y 90° en donde se observa que las probetas con una dureza de 303 HV ensayadas a un ángulo de 90° muestra una razón de erosión de 8×10^{-5} mg/Kg y en la condición de dureza de 640 es de 1.9×10^{-4} mg/Kg con lo cual muestra que para estos ángulos la razón de la erosión se incrementa conforme la dureza en el acero aumenta. Así mismo independientemente del ángulo (60° a 90°), la razón de erosión presenta el mismo valor a la dureza de 640 HV.

Las Figuras 5.14 (a) y (b) presentan los resultados obtenidos con la mezcla de arena y aire seco a una presión de 1.38 bares, en el acero AISI P20, el comportamiento es muy similar al observado en las Figuras 5.13, aunque en esta ocasión, es evidente que la razón de erosión se incrementó conforme la presión de aire fue mayor. En la Figura 5.14 (a) la razón de erosión promedio para las probetas ensayadas a un ángulo de impacto de 30° fue de 3.5×10^{-4} mg/Kg En este caso se observa una ligera reducción en la rapidez de la erosión para las probetas con la dureza de 640 HV ensayadas a 20° y 30°, sin embargo a pesar de esto se puede considerar que la dureza del acero no afecta en gran medida la

pérdida en masa por erosión para dichos ángulos. La Figura 5.14 (b) muestra los resultados para los ángulos de impacto de 60°, 75° y 90°, como se puede ver aquí la mayor razón de erosión a un ángulo de 90° se presenta en la probeta con dureza de 640 HV la cual es de $4.2 \times 10^{-4} \text{ mg/Kg}$ mientras que a una menor dureza de 303 HV, la razón de erosión es de $1.7 \times 10^{-4} \text{ mg/Kg}$. Con estos resultados se muestra que el aumentar la dureza por tratamiento térmico la razón de erosión se incrementa en los ángulos de 60°, 75° y 90°, independientemente de la presión del aire seco.

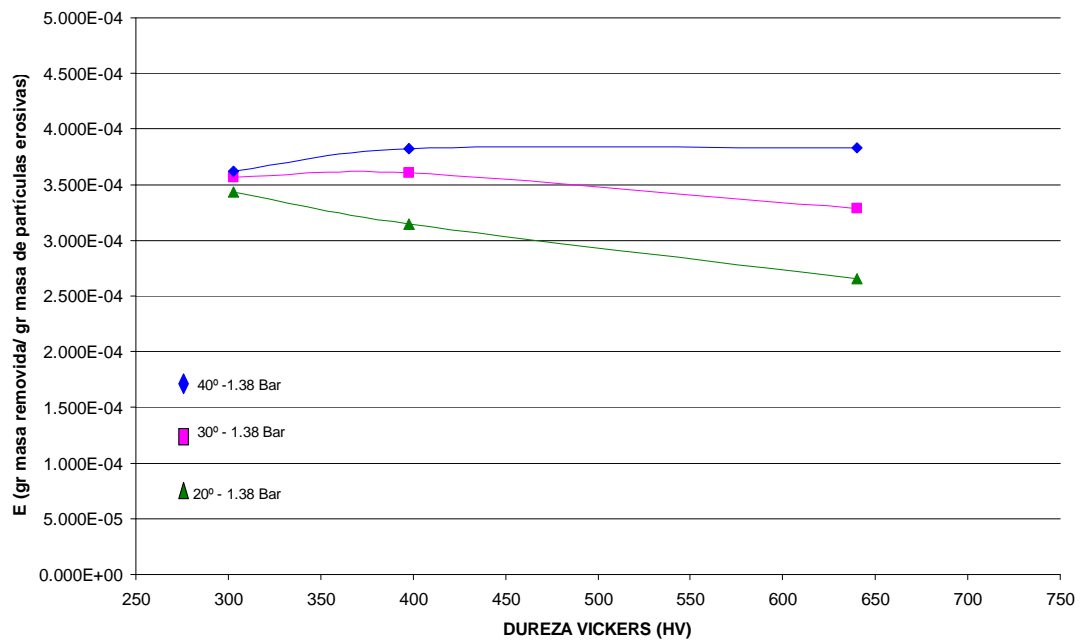


a)

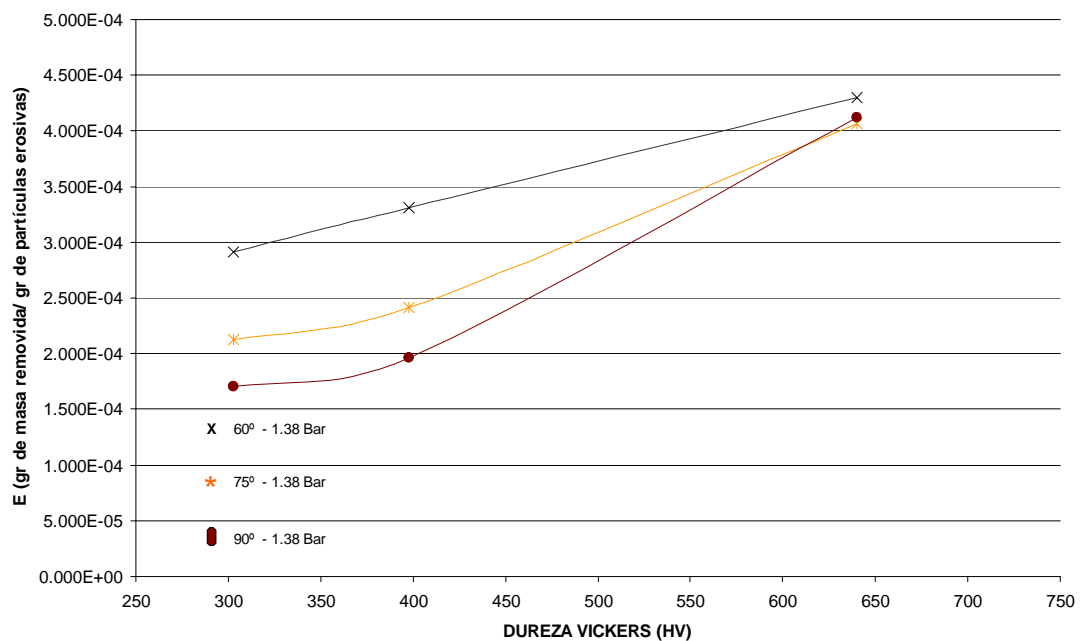


b)

Figura 5.13 Efecto de la dureza con respecto a la razón de erosión a diferentes ángulos de impacto en el acero AISI P20, erosionado con arena sílica (SiO_2) con tamaños de partícula de 106 a 425 μm y presión de aire 0.69 bares, a) 20°, 30° y 40°, b) 60°, 75° y 90°.



a)



b)

Figura 5.14 Efecto de la dureza con respecto a la razón de erosión a diferentes ángulos de impacto en el acero AISI P20. Erosionado con arena sílica (SiO_2) con tamaños de partícula de 106 a 425 μm y presión de aire 1.38 bares, a) 20°, 30° y 40°, b) 60°, 75° y 90°.

Finnie [4] presentó un estudio de la resistencia a la erosión en aceros tratados térmicamente en donde realizó ensayos a un ángulo de impacto de 20° y con alúmina como partículas erosivas; de acuerdo a sus resultados no encontró una relación directa entre la dureza y la rapidez de erosión. Otros trabajos han mostrado también efectos similares [2,5, 6, 8, 28, 31]. En base a los resultados obtenidos aquí y a los mostrados por estos investigadores, este efecto puede deberse en parte a la baja respuesta del endurecimiento por deformación que el acero presenta durante el impacto de las partículas de arena sílica, como consecuencia de la transformación de la microestructura a martensita por el tratamiento térmico aplicado. En el caso de las probetas H13-1A (dureza de 196 HV), con microestructura de carburos muy finos distribuidos en una matriz suave de ferrita, la erosión E debiera ser menor [5]. Sin embargo aquí se observó que la razón de erosión a los ángulos de 20° , 30° y 40° es muy similar al acero con microestructura de martensita lo cual puede deberse a que durante el estado estable de erosión, la superficie impactada se deforma plásticamente y como consecuencia aumenta su dureza (endurecimiento por deformación) y durante los siguientes impactos ya no puede aceptar más deformación y se genera la fractura dando lugar al proceso de eliminación de material. Para que esto suceda la profundidad de endurecimiento debe ser mucho mayor que la que pudieran presentarse en los aceros con microestructura de martensita y una dureza tan alta como la obtenida en el acero templado y revenido.

Se observó también que a un ángulo de impacto de 40° se presenta un ligero incremento en la razón de erosión; una explicación a esto se debe a que a mayores ángulos de impacto la profundidad de penetración de las partículas aumenta [2, 60, 61], dejando por lo tanto una mayor erosión cuando se combina con el proceso de microcorte generalmente a bajos ángulos.

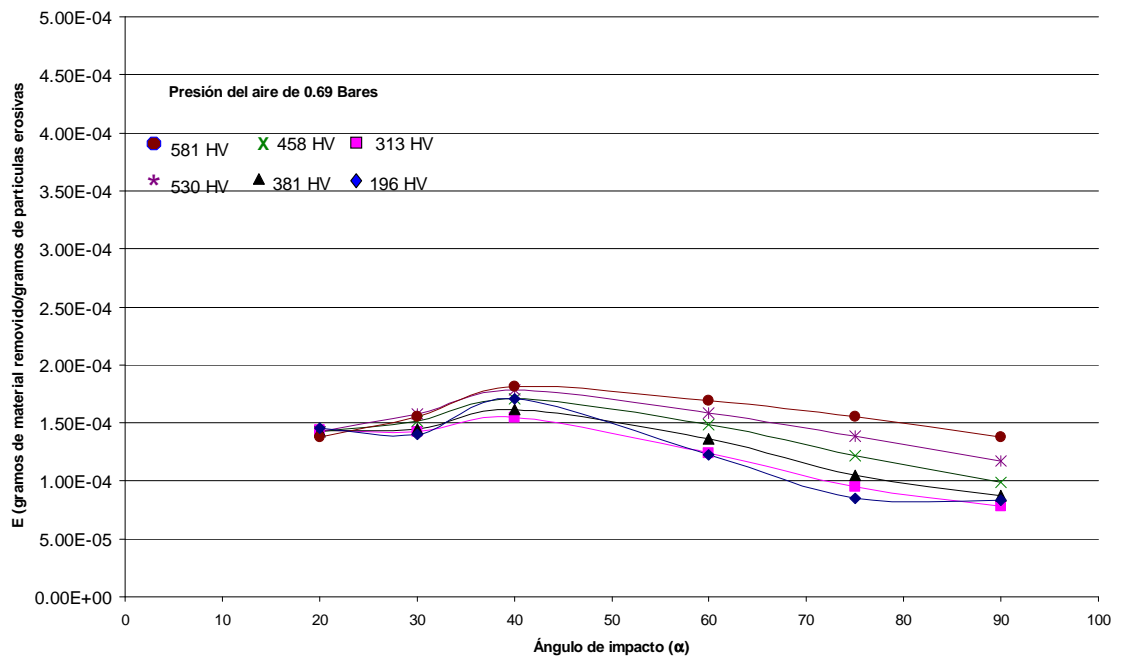
El incremento de la razón de erosión conforme el ángulo aumenta de 60° a 90° se debe en parte a una modificación del comportamiento dúctil-frágil [2,4] de los materiales, donde al ir incrementando la dureza de un acero con comportamiento dúctil puede llegar a mostrar un comportamiento frágil. Los aceros AISI H13 y AISI P20, presentan baja razón de erosión con bajos valores de dureza y al aumentar ésta, la erosión se

incrementa. Aunque el acero AISI H13 no presentó una transición dúctil-frágil completa hay una tendencia hacia este comportamiento y en el caso del acero AISI P20 si se observó la transición dúctil-frágil principalmente en la condición de dureza de 640 HV.

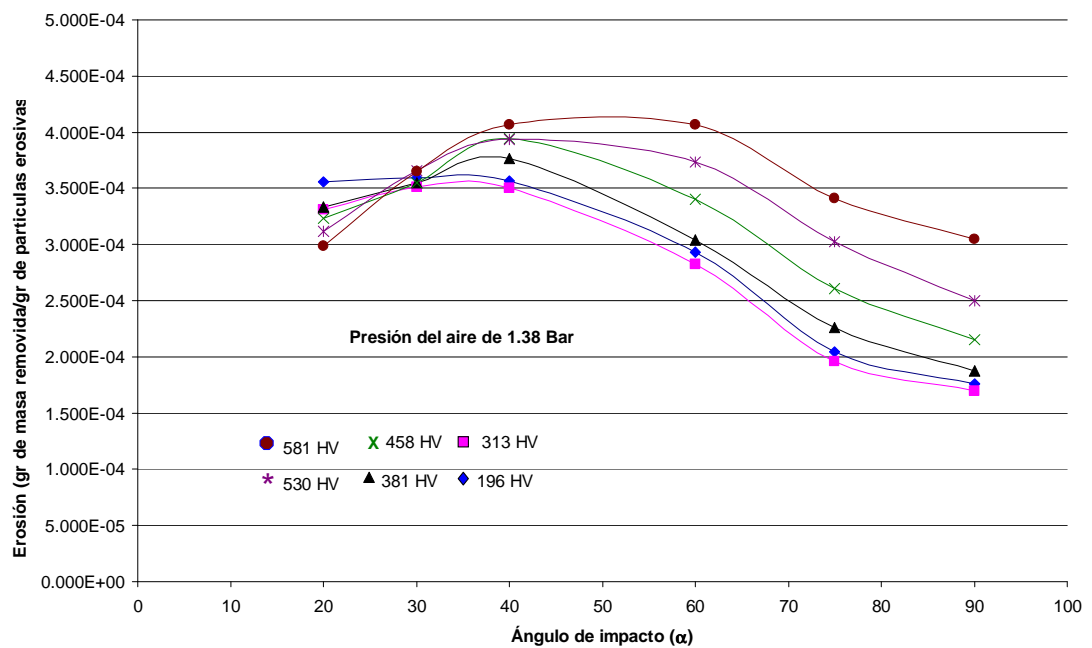
5.5.2 Efecto del ángulo de impacto contra la razón de erosión

Las Figuras. 5.15 (a) y (b) muestran el efecto del ángulo de impacto sobre la razón de la erosión para las probetas del acero AISI H13 con valores de dureza de 196 a 581 HV, impactadas con arena sílica y presiones de aire seco de 0.69 y 1.38 bares. La gráfica de la Fig. 5.15 (a) pertenece a los ensayos de erosión realizados a la presión de aire de 0.69 bares en donde el comportamiento dúctil predomina en todas las condiciones de dureza ya que la mayor razón de erosión se presenta en el ángulo de impacto de 40°. Las probetas H13-1E y H13-1F con 530 y 581 HV respectivamente, muestran la mayor razón de erosión principalmente a 40°, después disminuye ligeramente al incrementar el ángulo de impacto de 60 a 90°.

La Fig. 5.15 (b) presenta la gráfica de los ensayos realizados a una presión de 1.38 bares, como primer análisis se observa una mayor razón de erosión en todas las condiciones de dureza. Las probetas de mayor dureza H13-1E y H13-1F con 530 y 581 HV, respectivamente, muestran una mayor erosión entre los ángulos de 40° y 60°, que luego disminuye ligeramente en los ángulos de 75° y 90°. Las probetas clasificadas como H13-1A y H13-1B con dureza de 196 y 313 HV, respectivamente, muestra la menor razón de erosión entre los ángulos de 20° a 40°. En esta gráfica se puede apreciar que al incrementar de la dureza en el acero se presenta una ligera tendencia al comportamiento dúctil a frágil. Aunque cabe aclarar que este comportamiento no es claro ya que la mayor erosión, incluso en las probetas de mayor dureza sigue siendo a un ángulo de 40° típico en materiales con comportamiento dúctil [13, 46].



a)



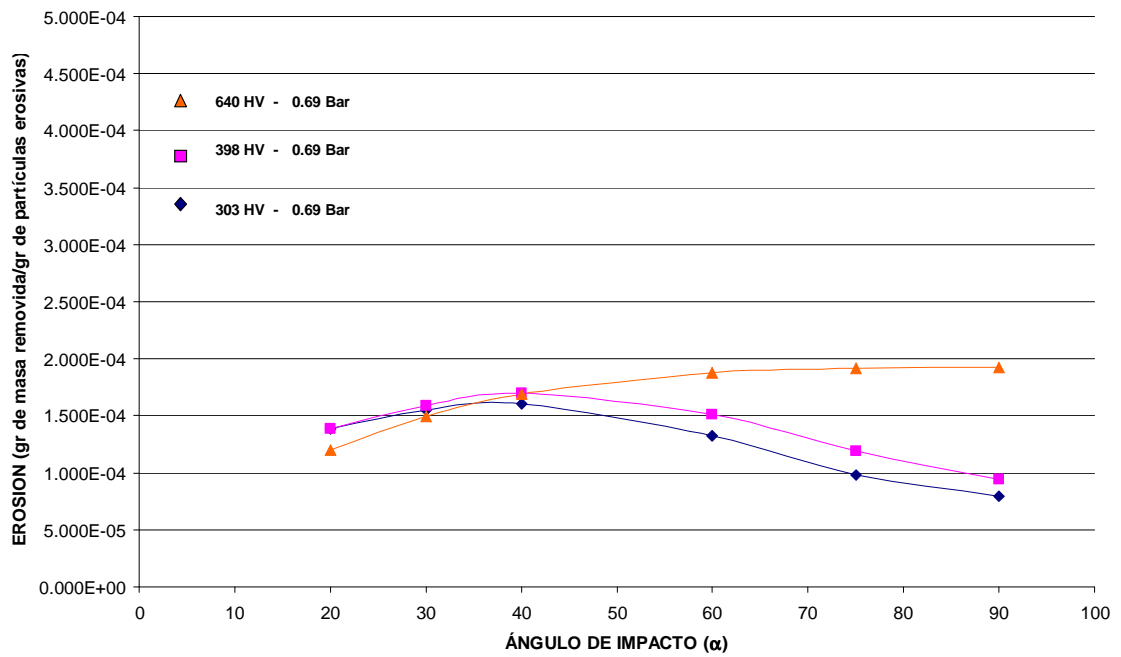
b)

Figura 5.15 Efecto del ángulo de impacto en la razón a la erosión para los diferentes valores de dureza en el acero AISI H13. Erosionado con arena sílica (SiO_2) con tamaños de partícula de 106 a 425 μm y presión de aire a) 0.69 bares b) 1.38 bares.

Las Figuras 5.16 (a) y (b) presentan el efecto del ángulo de impacto contra la razón de la erosión del acero AISI P20 ensayado con arena sílica y aire seco a presión de 0.69 y 1.38 bares, respectivamente.

En la Figura 5.16 (a) se muestra la gráfica obtenida con los resultados realizados a una presión de 0.69 bares; en este caso se obtuvieron tres curvas que corresponden a un valor de dureza. En las probetas P20-1B y P20-1C con durezas de 303 HV y 398 HV, respectivamente, muestran un comportamiento completamente dúctil donde la mayor erosión se obtienen a un ángulo de 40° mientras que la probeta P20-1D con valor de dureza de 640 HV muestra una curva con un comportamiento típico en un material frágil ya que la mayor erosión se obtiene a un ángulo de 90°, por lo cual en este caso se puede suponer un comportamiento de transición dúctil-frágil, aunque cabe aclarar que la probeta P20-1C fue tratada y endurecida en su superficie por un tratamiento de carburizado lo que pudo haber influido en dicho comportamiento. Al analizar la microestructura de la probeta erosionada la capa carburizada fue removida totalmente quedando expuesta la martensita sin revenir lo cual muestra que la capa endurecida por carburización se comporta de forma dúctil.

La Figura 5.16 (b) presenta el comportamiento de las probetas a la erosión respecto al ángulo de impacto ensayadas a una presión de 1.38 bares. El aumento de la presión genera una mayor erosión en todas las condiciones de dureza. El comportamiento dúctil en las probetas P20-1B y P20-1C, se mantiene mientras que en la P20-1D predomina el frágil con esto también se puede decir que la dependencia del ángulo para una mayor presión de aire prevaleció en las tres durezas ensayadas. En esta gráfica se puede observar que la probeta de mayor dureza P20-1D presenta también una menor razón de erosión a bajos ángulos de impacto de 20° y, aunque su comportamiento en este caso es considerado frágil, su mayor erosión la presenta a 60° lo cual es intrascendente ya que su razón de erosión en este ángulo es muy cercano al de 90°.



a)

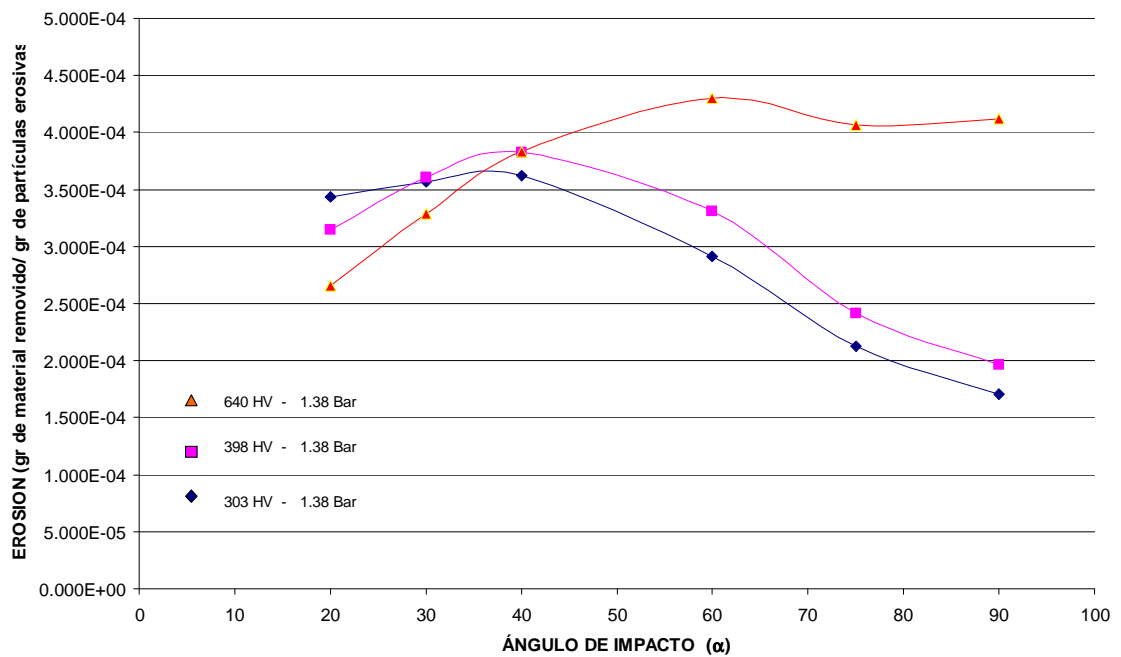


Figura 5.10

b)

Figura 5.16 Efecto del ángulo de impacto en la razón de erosión para los diferentes valores de dureza en el acero AISI P20. Erosionado con arena sílica (SiO_2) con tamaños de partícula de 106 a 425 μm y presión de aire a) 0.69 bares b) 1.38 bares.

El comportamiento dúctil y frágil en los aceros AISI H13 y AISI P20 puede ser explicado en términos de la energía cinética de la partícula y su transformación a energía de deformación. Levin [28] argumentó que la energía cinética que la partícula conserva hasta antes del impacto es disipada en forma de deformación plástica abajo de la superficie y puede retardar el inicio de la fractura para materiales con baja dureza y alta ductilidad. Ahora bien, la magnitud de la energía absorbida por el impacto de las partículas, varía con la velocidad de la partícula y el ángulo de impacto, donde a mayores ángulos hay una mayor cantidad de energía absorbida [62]. Es válido aclarar que aunque la velocidad de la partícula no fue obtenida en este trabajo es evidente que la presión del aire seco produce un efecto similar, ya que es el medio que le imprime velocidad a la partícula [50].

Por lo cual aquellos materiales con baja dureza (196, 303, 313, 381 y 389 HV), pueden disipar bien esa energía por deformación plástica en ángulos de 60° a 90° mientras que los más duros (458, 530, 581 y 640 HV) no lo logran. En los materiales con alta dureza la deformación plástica que se genera debajo de la superficie impactada no es suficiente para evitar la fractura en la zona de contacto de las partículas, dando origen a una mayor remoción de material y, como consecuencia, una mayor razón de erosión. Es evidente que al aumentar la presión del aire a 1.38 bares la energía cinética de las partículas se incrementa también por lo cual las probetas de mayor dureza (530, 581 y 604) no disipan la cantidad de energía cinética suficiente por deformación plástica para evitar la fractura y se acelera la remoción de material. En los ángulos de impacto de 20° y 30° el mecanismo de desgaste implica también deformación plástica, sin embargo, la remoción de material depende en su mayor parte por el proceso de microcorte.

5.6 Resistencia a la erosión de los aceros.

La Figura 5.17 muestra el comportamiento de la resistencia a la erosión para los aceros AISI H13 y AISI P20. La gráfica se elaboró tomando el inverso de la razón de erosión ($1/E$), como resistencia a la erosión, y se graficó contra el ángulo de impacto en las condiciones de menor a mayor dureza en ambos aceros. Aquí se observa que la resistencia a la erosión esta influenciada por la presión del aire, siendo mayor en aquellas probetas ensayadas a 0.69 bares. Con respecto al ángulo de impacto, la menor resistencia se presenta para el ángulo de 40° principalmente en las probetas H13-1A, H13-1F y P20-1B a ambas presiones de aire. Mientras que en el caso de las probetas P20-1C la menor resistencia a la erosión se observa en los ángulos de 60° y 90° , presentando la mayor resistencia a 20° .

El comportamiento dúctil o frágil que presentan los aceros durante el desgaste erosivo puede relacionarse con la resistencia a la erosión como es el caso de las probetas del acero AISI H13, H13-1B con una dureza de 313 HV, la cual presentó un comportamiento completamente dúctil y en la gráfica de la Figura 5.17 muestra muy buena resistencia a la erosión un caso muy similar es el observado en las probetas del acero AISI P20, P20-1B con dureza de 303 HV. Por otro lado las probetas del acero AISI P20, P20-1D presentaron una muy baja resistencia como consecuencia de su comportamiento frágil. Aunque el comportamiento de las probetas del acero AISI H13, H13-1F con dureza de 581 HV muestra un comportamiento ligeramente frágil su resistencia a la erosión tiene el mismo comportamiento que una probeta completamente frágil.

Un factor de vital importancia es sin duda la presión de aire comprimido la cual genera una mayor erosión cuando se incrementa, como consecuencia de la aceleración de las partículas antes de impactar la superficie del acero. Lo cual debe considerarse ser un parámetro crítico en el proceso de elaboración de corazones.

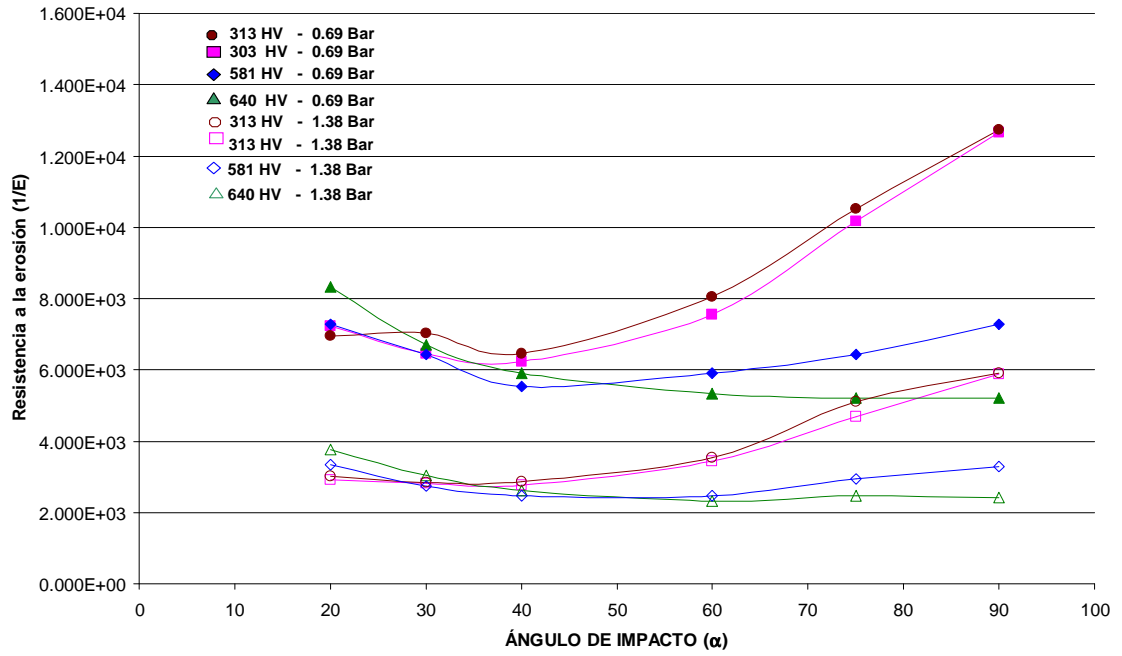


Figura 5.17 Resistencia a la erosión con respecto al ángulo de impacto para los aceros AISI H13 y AISI P20 con diferente valor de dureza.

5.7 Análisis de las superficies erosionadas.

5.7.1 Análisis de la superficie del acero AISI H13.

La probeta H13-1A presentó en su superficie ondulaciones o estrías, principalmente a bajos ángulos de 20°, 30° y 40°, (ver Figura. 5.9 (a)). Una causa de este efecto se debió a la deformación plástica que sufrió la superficie durante el impacto de las partículas de arena sílica. En la Figura 5.18 se muestra una imagen del microscopio óptico obtenida en la sección transversal de la superficie donde se observa las ondulaciones formadas por el impacto de las partículas. Las probetas de menor dureza como H13-1B y P20-1B, también presentaron este efecto en su superficie, el cual no fue observado en el resto de las probetas.

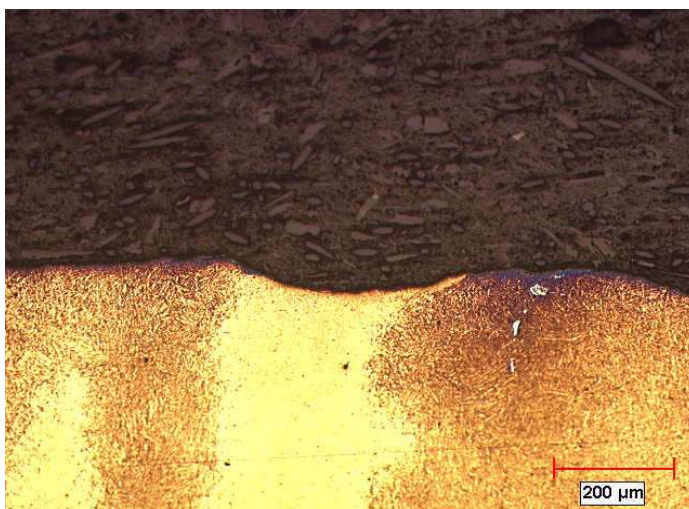


Figura 5.18 Sección transversal de la probeta H13-1A ensayada a un ángulo de impacto de 30° a una presión de aire de 1.38 bares.

En las Figuras 5.19 (a), (b), (c) y (d) se presenta una serie de imágenes por microscopía electrónica de barido obtenidas en la superficie erosionada de las probetas clasificadas como H13-1A y dureza de 196 HV.

Las Imágenes de las Figuras 5.19 corresponden a la superficie erosionada de las probetas impactadas a 30° (a) y (b), 40° (c) y (d). En ambos casos el mecanismo de eliminación del material fue por micro-corte, ya que se observan residuos del material removido en

forma de virutas. Aunque el mecanismo de eliminación de material es por micro-corte en estos dos ángulos no se descarta la presencia de deformación plástica. Las partículas que impactan la superficie generan surcos como consecuencia de la acción abrasiva de las partículas al penetrar en la superficie y arrancar el material, (ver Figuras 5.19 (b) y (d)). Los residuos del material en forma de virutas son eliminados de la superficie por la acción de los siguientes impactos de las partículas abrasivas, con lo cual se acelera la remoción de material. Para el ángulo de 60°, Figura 5.19 (e) y (f), y 90° Figuras. 5.19 (g) y (h) el mecanismo de remoción de material se modifica originando en estos casos una mayor presencia de material deformado, los impactos de la arena forman cráteres con material altamente deformado en las orillas en forma de labios. En esta condición los aceros con baja dureza como por ejemplo H13-1A, 196 HV, presentan baja razón de erosión, ver Figura 5.15. La baja dureza en estas probetas se debe a la microestructura de matriz ferrita con carburos finos lo que le permitió alta deformación durante los impactos y el retardo de la fractura y eliminación de material durante un buen número de impactos [8, 28, 31-34]. En este caso no se observó la presencia de surcos típicos en un proceso de corte, pero sí la presencia de material con deformación plástica y una gran cantidad de material adherido a la superficie en forma de labios.

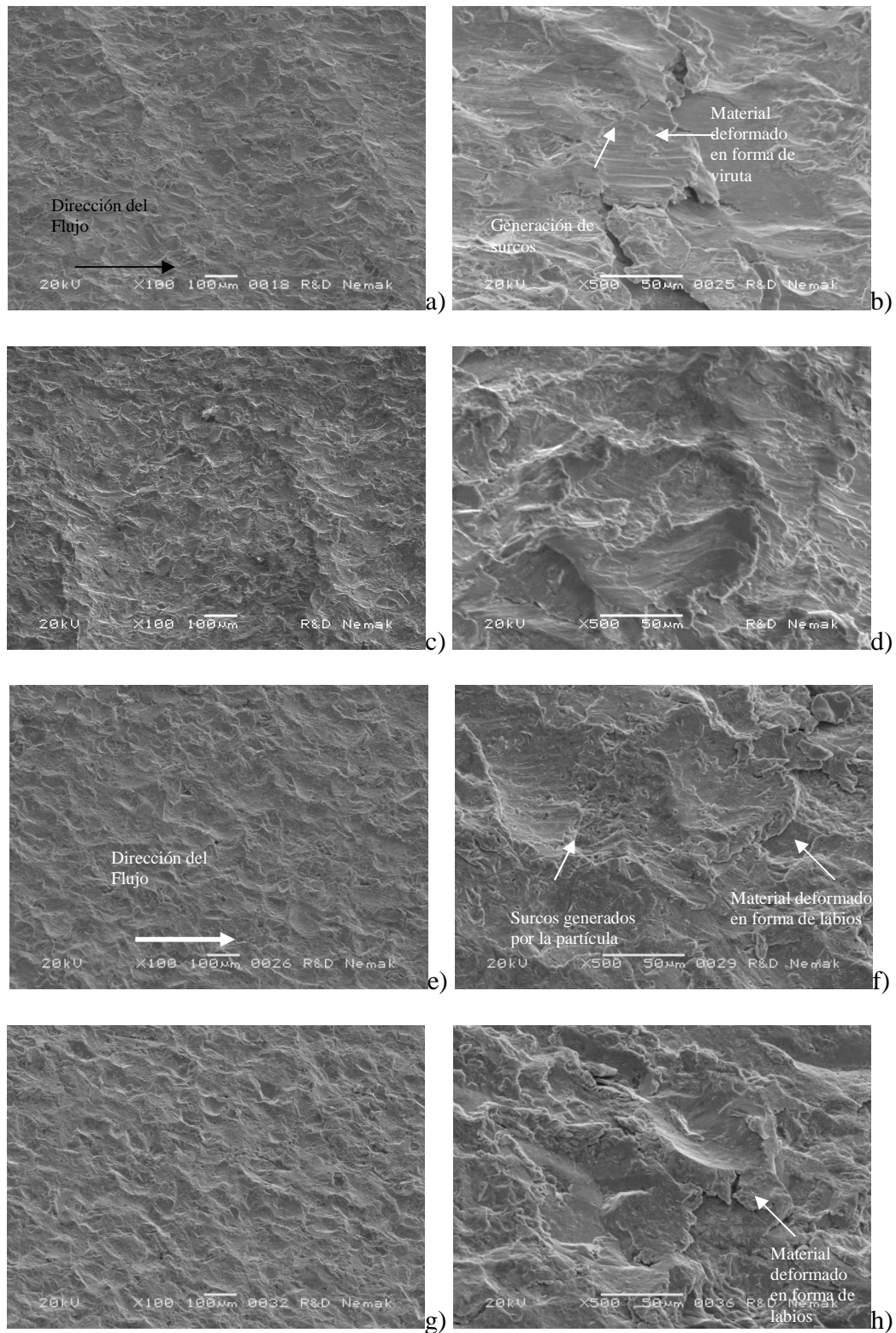


Figura 5.19 Acero H13-1A a diferentes ángulos de impacto 30° a) y b), 40° c) y d), 60° e) y f), a 90° g) y h). Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.

Las Figuras 5.20 muestran imágenes de la superficie erosionada de las probetas H13-1C a los ángulos de impacto de 30°, 40°, 60° y 90°. La microestructura de estas probetas esta compuesta por martensita revenida con una dureza de 381 HV.

Las Imágenes de las Figuras 20 corresponden 30° (a) y (b), 40° (c) y (d). En este caso la dureza de las probetas H13-1C es mayor que la que presenta las H13-1A, sin embargo se observó la presencia de deformación plástica durante su análisis. El mecanismo de desgaste por corte prevaleció en este caso, tal como puede verse por la presencia de virutas que permanecen adheridas a la superficie, originadas por los surcos que dejan las partículas al deslizarse sobre la superficie impactada.

Las Figuras 5.20 pertenecen a 60° (e) y (f) y 90° (g) y (h). En esta ocasión se originaron cráteres y labios como consecuencia del impacto de las partículas sobre la superficie. Adicional a esta acción en el ángulo de 60° se observó la presencia de surcos promovidos por mecanismos de corte de las partículas, una explicación a esto se puede deber al efecto de la rotación de la partícula durante el impacto, tal como lo observó Wellman y colaboradores [11]. A un ángulo de 90° el impacto de las partículas promovió material deformado plásticamente y un desprendimiento de material en forma de plaquetas.

La probeta del acero AISI H13 con la condición de mayor dureza (H13-1F) se muestran en la Figura 5.21, correspondiendo a ángulos de impacto de 30° (a) y (b) y 40° (c) y (d). A bajos ángulos, la eliminación de material fue promovida principalmente por el proceso de corte, en esta caso no se observó una gran cantidad de virutas adheridas a la superficie pero si una gran cantidad de surcos lo cual puede explicarse por la alta dureza de la superficie y que la partícula empleo la mayor parte de su energía en arrancar las virutas sin dejar material altamente deformado, como en los casos de las superficies suaves.

Las Figuras 5.21 a un ángulo de 60° (e) y (f) no muestran surcos por corte, como en los casos anteriores pero si material altamente deformado y a punto de desprenderse, esto

mismo fue observado en la superficie impactada a un ángulo de 90° (g) y (h) donde a pesar de la alta dureza de 581 HV y microestructura de martensita revenida la deformación plástica es evidente. En la superficie no hay evidencia de formación de grietas sin embargo la poca cantidad de material deformado hace suponer que las partículas utilizan un mayor porcentaje de su energía en desprender material de la superficie [61], siendo esta condición de dureza la que presento mayor razón de erosión a 90° , ver Figura 5.15.

Los mecanismos de desgaste en los aceros sujetos a estudio estuvieron influenciados especialmente por el ángulo de impacto de las partículas. A bajos ángulos de impacto, por ejemplo entre 20° a 40° el mecanismo de remoción de material por corte es considerado uno de los más severos en materiales dúctiles ya que promueve la mayor pérdida de material y como consecuencia una mayor erosión [2, 8], tal como se observó en las gráficas de las Figuras 5.15 y 5.16 donde la mayor erosión se presenta en los ángulos de 20° , 30° y 40° .

A los ángulo de 60° y 90° los mecanismos de desprendimiento de material están influenciados por la mezcla de deformación plástica y fractura. Cada partícula que impacta la superficie genera un cráter como consecuencia de la profundidad de penetración. Generalmente el volumen de material deformado es desplazado hacia las orillas del cráter mediante la formación de un labio, posteriormente este material altamente deformado es golpeado de nueva cuenta sufriendo mayor deformación y al no poder seguir deformándose se fractura originando el desprendimiento en forma de plaquetas [5].

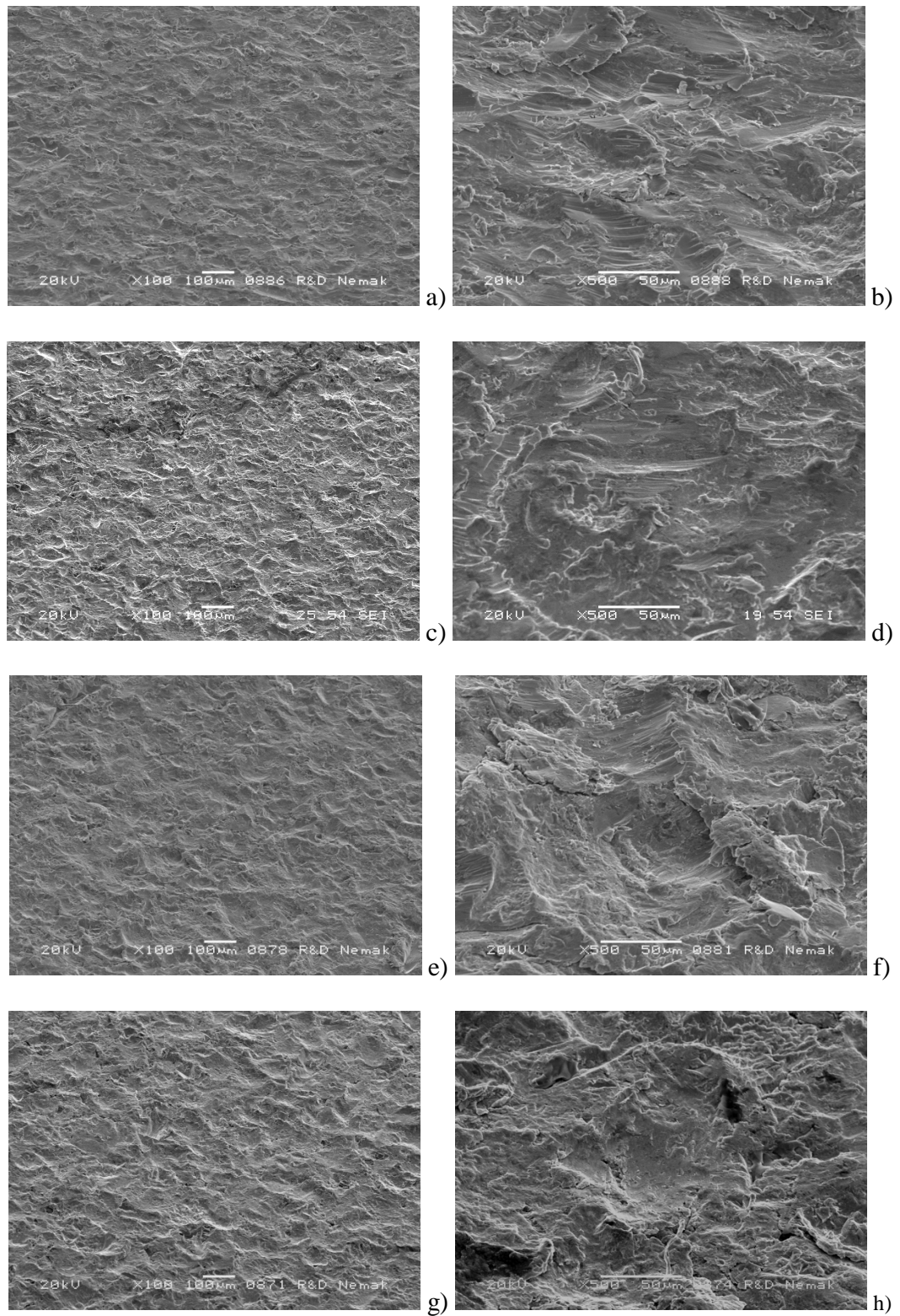


Figura 5.20 Acero H13-1C, a diferentes ángulos de impacto 30° a) y b), 40° c) y d), 60° e) y f), a 90° g) y h). Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.

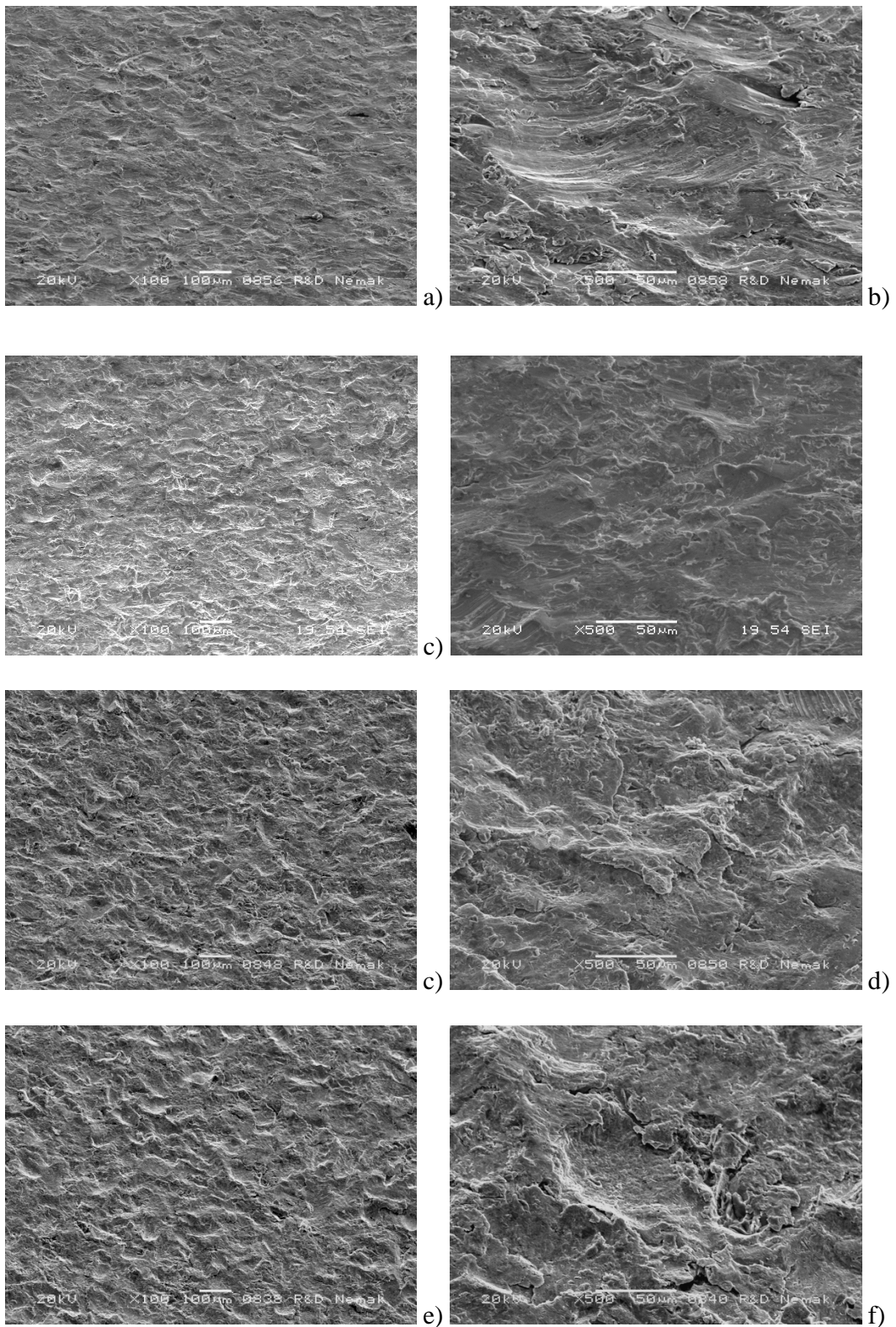


Figura 5.21 Acero H13-1F, a diferentes ángulos de impacto 30° a) y b), 40° c) y d), 60° e) y f), a 90° g) y h). Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.

La profundidad de penetración de la partícula depende de la dureza de la superficie y el ángulo de impacto [60]. Este mecanismo se observó en el caso de mayor erosión presente en el ángulo de 40° , en aceros con comportamiento dúctil. Los mecanismos de desgaste presentes a este ángulo son muy similares a los presentados en Figura 1.9 b), donde el impacto de la partícula genera el desplazamiento de material deformado hacia uno de sus extremos, el cual es eliminado por el proceso de corte de subsecuentes impactos, acelerando la remoción del material. Algunos autores denominan a este efecto como el ángulo crítico de ataque [2,8]. Por otro lado, a un ángulo de 90° las partículas son proyectadas contra la superficie verticalmente ocupando toda su energía para formar el cráter y labio que en esta ocasión es eliminado por el impacto subsiguiente de partículas [8-10].

5.7.2 Análisis de la superficie del acero AISI P20.

En el caso del acero AISI P20 los mecanismos de desgaste tienen el mismo comportamiento que el observado en el acero AISI H13 donde el proceso de corte y deformación plástica se mezclan originando la pérdida de material. En la Figura 5.22 se muestra la superficie de las probetas del acero AISI P20 clasificado como P20-1B con dureza de 303 HV y microestructura de martensita revenida. Este acero presentó un comportamiento típico en un material dúctil, ver Figura 5.16 (b).

Las Figuras 5.22 (a) y (b) muestran imágenes tomadas en la superficie impactadas a un ángulo de 30° , la presencia de surcos y virutas adheridas muestran que el proceso de corte predomina en este caso. Las imágenes de las Figuras 5.22 (c) y (d) pertenecen a un ángulo de 60° , el mecanismo que promovió la pérdida en masa fue la deformación plástica ya que en este caso no se observó la presencia de surcos provocados por las partículas en el proceso de corte. A un ángulo de 90° , Figuras 5.22 (e) y (f), el impacto de las partículas provocó la penetración, dejando un cráter y material con alta deformación plástica en las orillas, posteriormente eliminado en forma de plaquetas.

En la Figura 5.23 se muestra el acero clasificado como P20-1D el cual presenta una microestructura de martensita sin revenir. En la superficie impactada a un ángulo de 30° , no hay una alta presencia de virutas adheridas a la superficie pero si una gran presencia de surcos Figuras 5.23 (a) y (b), lo cual muestra que por la alta dureza de la superficie, el impacto de la partícula produce el desprendimiento de material con poca generación de virutas. A los ángulos de 60° , Figuras 5.23 (c), (d) y 90° (e), (f) se observa la presencia de deformación plástica a pesar de que este acero muestra una dureza de alrededor de 640 HV.

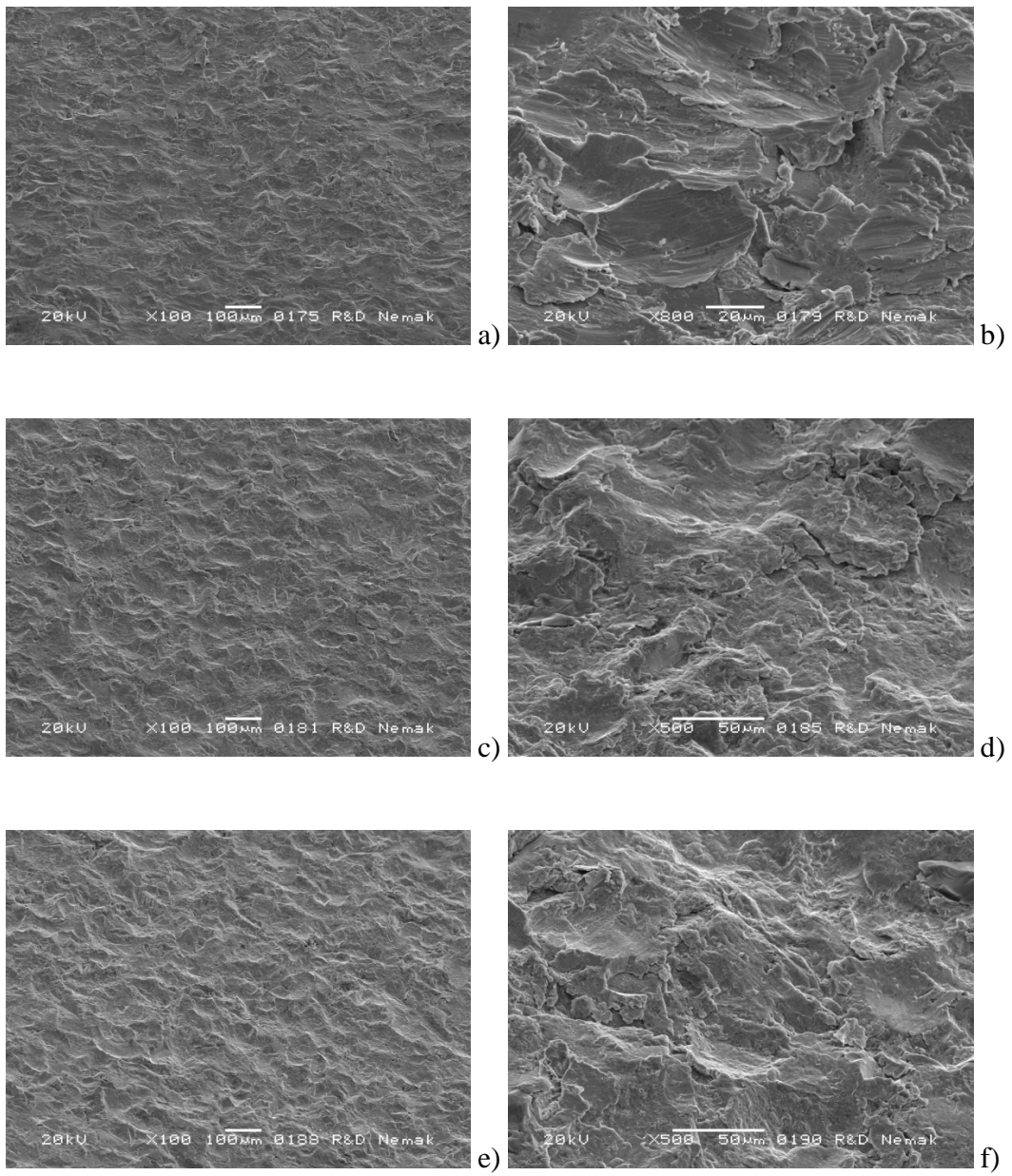


Figura 5.22 Acero P20-1B, a diferentes ángulos de impacto, a 30° a) y b), a 60° c) y d), a 90° e) y f). Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.

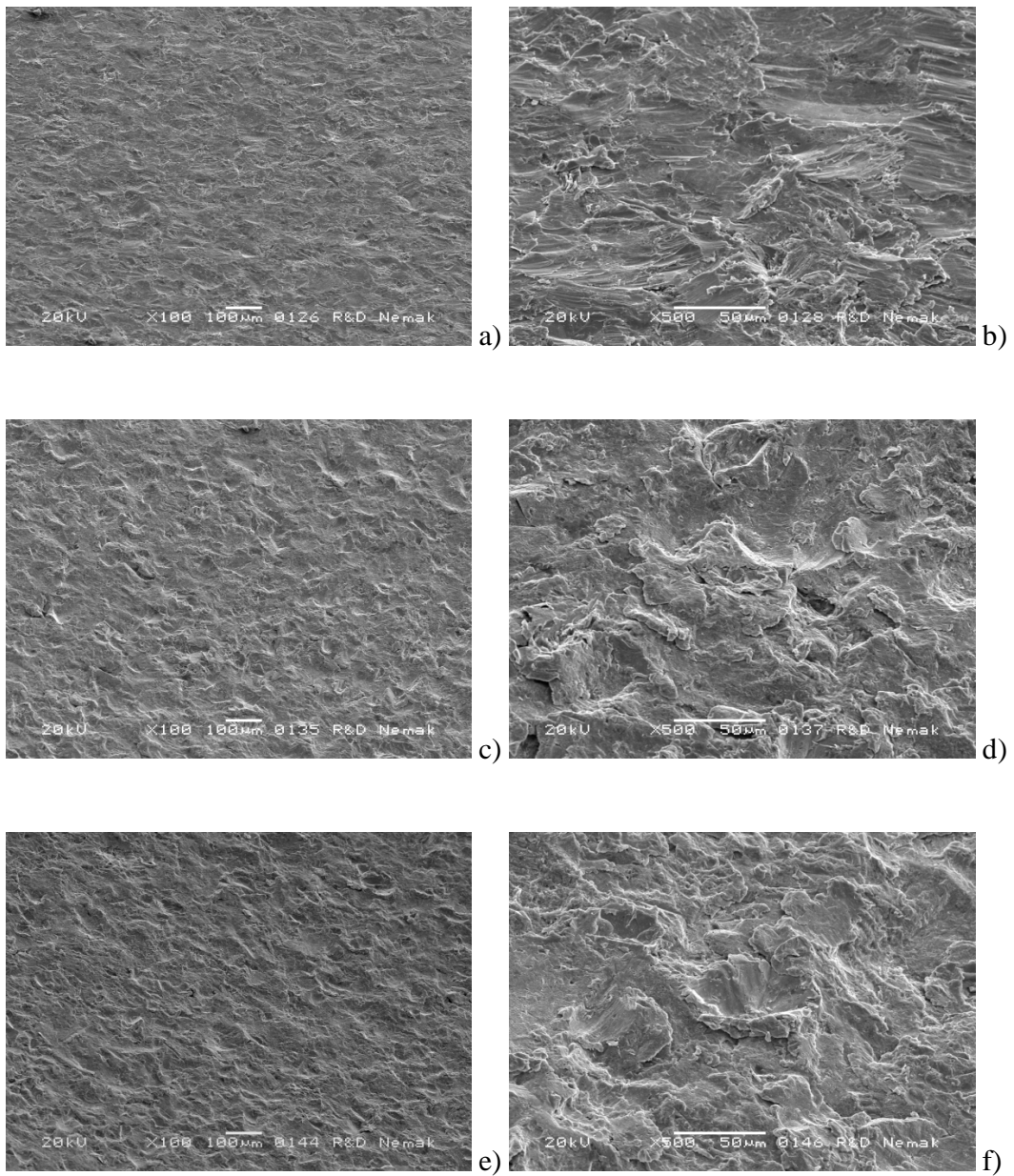


Figura 5.23 Acero P20-1D a diferentes ángulos de impacto, a 30° a) y b), a 60° c) y d), a 90° e) y f). Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.

5.7.3 Parámetros de rugosidad

En la Figura 5.24 se presenta la medición de la rugosidad, Ra promedio, en la superficie erosionada de las probetas del acero AISI H13 ensayadas a los ángulos de impacto de 30°, 40°, 60° y 90°, a la presión de aire de 0.69 y 1.38 bares. El valor mostrado en el eje vertical corresponde al Ra inicial de la superficie electroerosionada y como se puede ver oscila alrededor de un valor de 4 μm . En el caso de las probetas con dureza de 196 y 313 HV ensayadas a los ángulos de 30° y 40° el Ra se incrementa y después a los ángulos de impacto de 60° y 90° la superficie reduce su rugosidad manteniendo un Ra inferior al inicial. El aumento del Ra a estos ángulos está influenciada por la sinuosidad observada en la superficie desgastada (Figura. 5.9 (a)). En el caso de las probetas de mayor dureza 381 y 581 HV el Ra es un poco menor al inicial lo cual hace suponer que la superficie sufre un alisamiento y después se mantienen con un valor de Ra que oscila entre 3.6 y 2.7 μm . El efecto de la dureza contra el parámetro de rugosidad puede verse más claro a los ángulos de 60° y 90° donde la probeta con una dureza de 196 HV tiene un Ra de 3.8 μm , mientras que la probeta con dureza de 581 HV es de 2.7 μm . Al aumentar la presión del aire de 0.69 a 1.38 bares se observó que el parámetro de rugosidad Ra se incrementó en todas las condiciones de dureza.

La Figura. 5.25 muestra la medición del Ra en probetas pertenecientes al acero AISI P20 erosionadas a los ángulos de impacto de 30°, 40°, 60° y 90° con aire a presión de 0.69 y 1.38 bares. El Ra promedio en la condición inicial de las probetas fue menor a 1 μm . En las probetas con la dureza de 303 HV se observa que el Ra aumenta a los ángulos de 30° y 40° y después a los ángulos de 60° y 90° es menor. En las probetas de mayor dureza el Ra se incrementa después de ensayar las probetas a un ángulo de 30° y después se mantiene casi constante. En el caso de la probeta con la dureza de 640 HV ensayada a la presión de 1.38 bares el Ra promedio es de 2.4 μm mientras que en la probeta de menor dureza 196 HV es de alrededor de 4 μm .

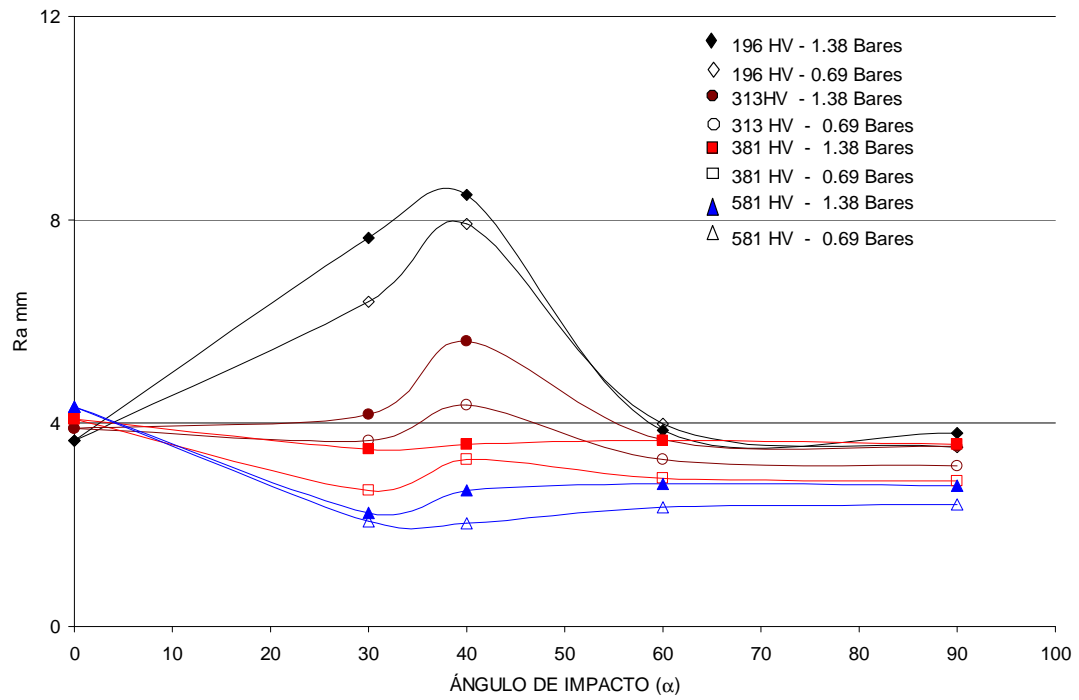


Figura 5.24 Ra promedio en las superficie erosionada de un acero AISI H13, a diferentes ángulos de impacto.

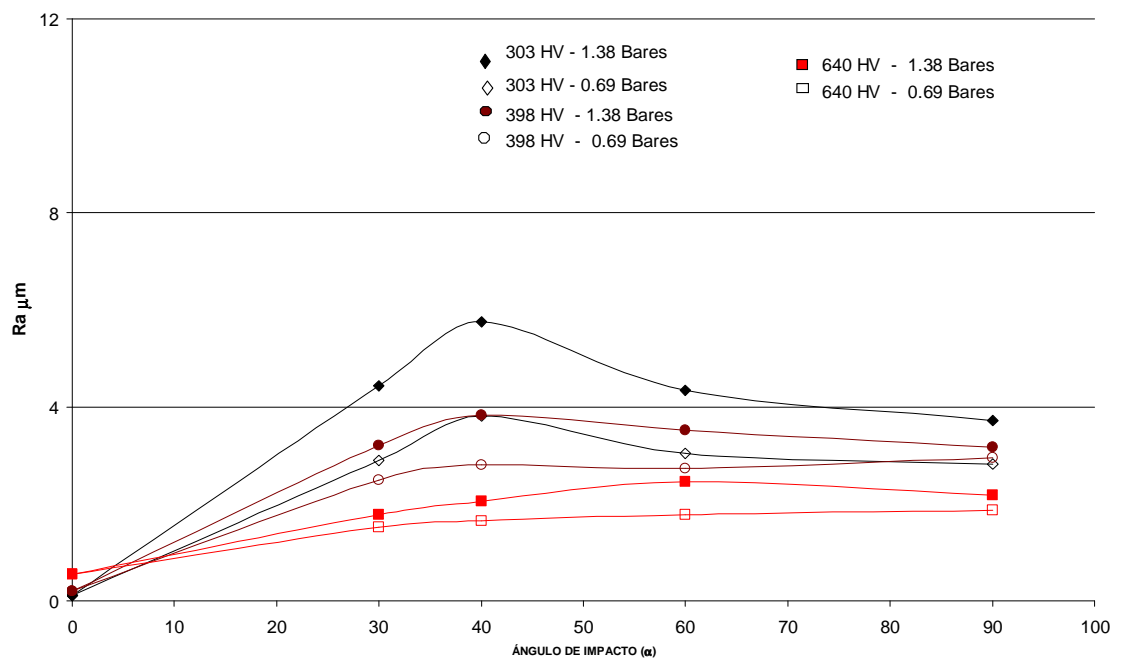


Figura 5.25 Ra promedio en las superficie erosionada de un acero AISI P20, a diferentes ángulos de impacto.

El aumento de *Ra* a presión de 1.38 bares puede atribuirse a que la partícula genera un impacto con mayor fuerza provocando que la profundidad de penetración en la superficie sea un poco mayor, lo que deja partes altas y bajas con un parámetro *Ra* mayor que el obtenido a una presión de 0.69 bares. La diferencia del *Ra* entre las probetas de diferente dureza muestra que la profundidad de penetración en una probeta suave es mayor que en una dura independientemente de la fuerza que la partícula alcance con el ímpetu que le proporciona el aire a presión.

5.8 Análisis del área debajo de la superficie erosionada.

La zona subsuperficial en las probetas erosionadas a los ángulos de 30°, 60° y 90° a una presión de 1.38 bares fue analizada en el microscopio electrónico de barrido, las probetas se seccionaron en la zona de mayor erosión y se preparó por medio de técnicas de metalografía.

Las Figuras 5.26 (a), (b) y (c) presentan la subsuperficie de la probeta H13-1A donde el material deformado plásticamente se orienta de acuerdo a la dirección del flujo de las partículas. A un ángulo de 30° (Figura 5.26 (a)) la pérdida en material está influenciado por el proceso de corte, aunque también se observa una microestructura deformada. La imagen muestra una partícula de desgaste la cual está casi totalmente despegada de la superficie. Parte del material deformado es “embarrado” sobre la superficie. Estas partículas son expuestas a más impactos hasta que son eliminadas completamente de la superficie. Las líneas de flujo plástica son observadas con mayor facilidad a un ángulo de 60° (Figura 5.26 (b)) mientras que A 90° el impacto vertical de las partículas sobre la superficie produce un cráter que genera esfuerzos de deformación en la sub-superficie (Figura 5.26 (c)) en donde pueden distinguirse líneas muy finas que muestran el flujo plástico de la microestructura, mientras que el material acomodado en las orillas del cráter presenta alta deformación y cerca de desprenderse.

En la Figura 5.27 se muestra un acero con microestructura de martensita revenida (H13-1C). Generalmente un acero con esta microestructura muestra baja ductilidad, sin embargo en estas imágenes se observa deformación plástica. A un ángulo de 30°, Figura, 5.27 (a), se observan líneas del flujo plástico de la martensita sin embargo el mecanismo de desgaste predominante fue el proceso de micro-corte en donde el material es eliminado por la formación de virutas.

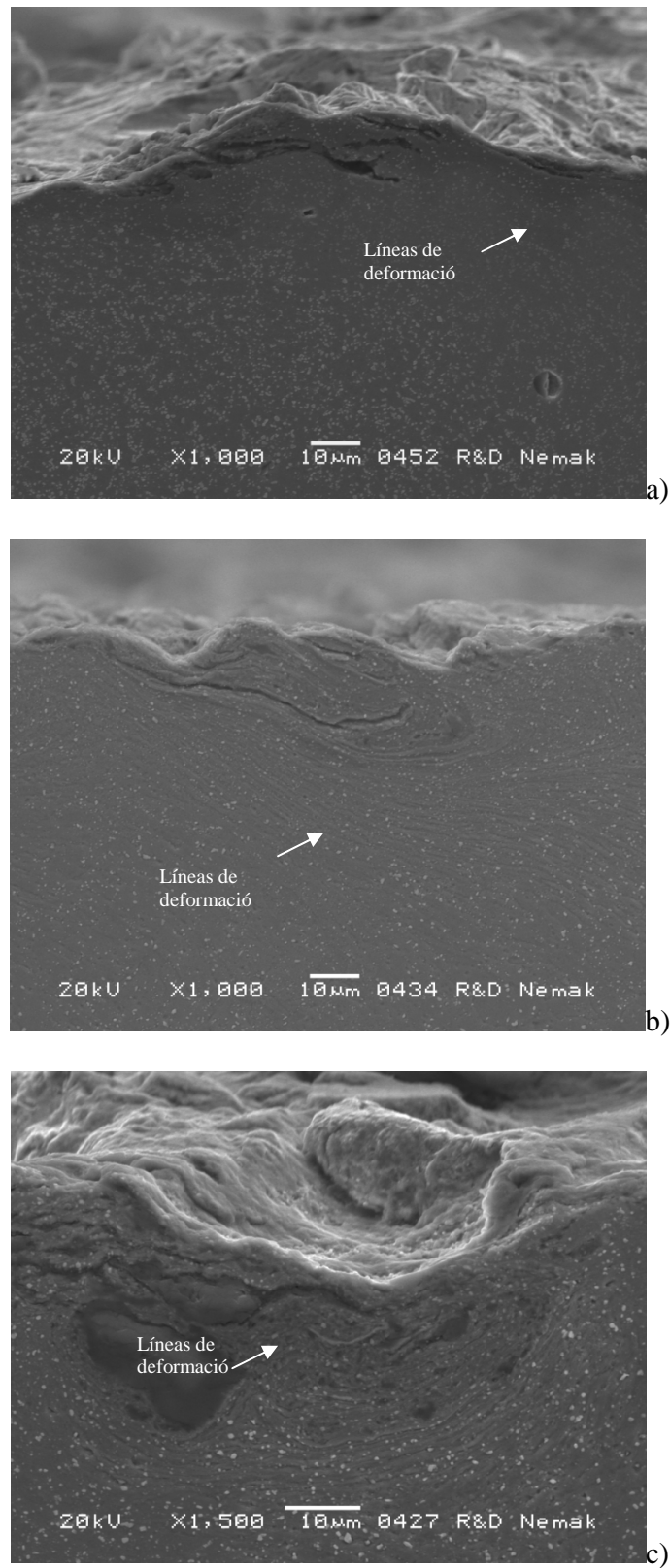


Figura 5.26 Acero H13-1A a diferentes ángulos de impacto a) 30° b) 60° y d) 90°. Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.

Las líneas del flujo plástico están orientadas de acuerdo a la dirección del flujo de las partículas de la arena sílica que impactan a la superficie. La presencia de líneas de flujo plástico en la microestructura de esta probeta muestran que en esta zona se inducen esfuerzos de endurecimiento por deformación lo que trae como consecuencia el aumento de la dureza y resistencia [31,33]. El impacto de las partículas a un ángulo de 60° genera una mayor deformación plástica; la martensita orientada evidencia la deformación debida a esfuerzos causados por el impacto de las partículas de arena sílica (Figura 5.27 (b)), en este caso el desprendimiento de material se origina cuando la superficie erosionada no puede admitir más deformación y empieza a fracturarse desprendiéndose en forma de partículas altamente deformadas.

A un ángulo de 90° , Figura, 5.27 (c), se observa el efecto de deformación sobre la microestructura martensítica por el impacto de una partícula. En el impacto provoca la formación de un cráter como consecuencia de la indentación de la partícula, la zona impactada produce el flujo del material hacia la superficie que posteriormente sufre más deformación o bien la fractura.

En la Figura 5.28 se muestran imágenes de un acero con microestructura de martensita revenida y dureza de 581 HV, H13-1F el efecto de las partículas de arena sílica tiene un comportamiento diferente al mostrado en aceros de menor dureza. En el impacto de la partícula, la microestructura martensítica no puede disipar la energía por deformación plástica, por lo cual la liberación de esfuerzos se origina mediante la formación de bandas de cizallamiento adiabático [63, 64], las cuales promueven una mayor pérdida de material mediante la generación de microgrietas en los siguientes impactos. Las microgrietas se propagan a través de las bandas de cizallamiento adiabático y, posteriormente, se origina el desprendiendo material en esas zonas. Este efecto fue observado en las probetas ensayadas a 30° , 60° y 90° , tal como lo muestran las Figuras 5.28 (a), (b) y (c).

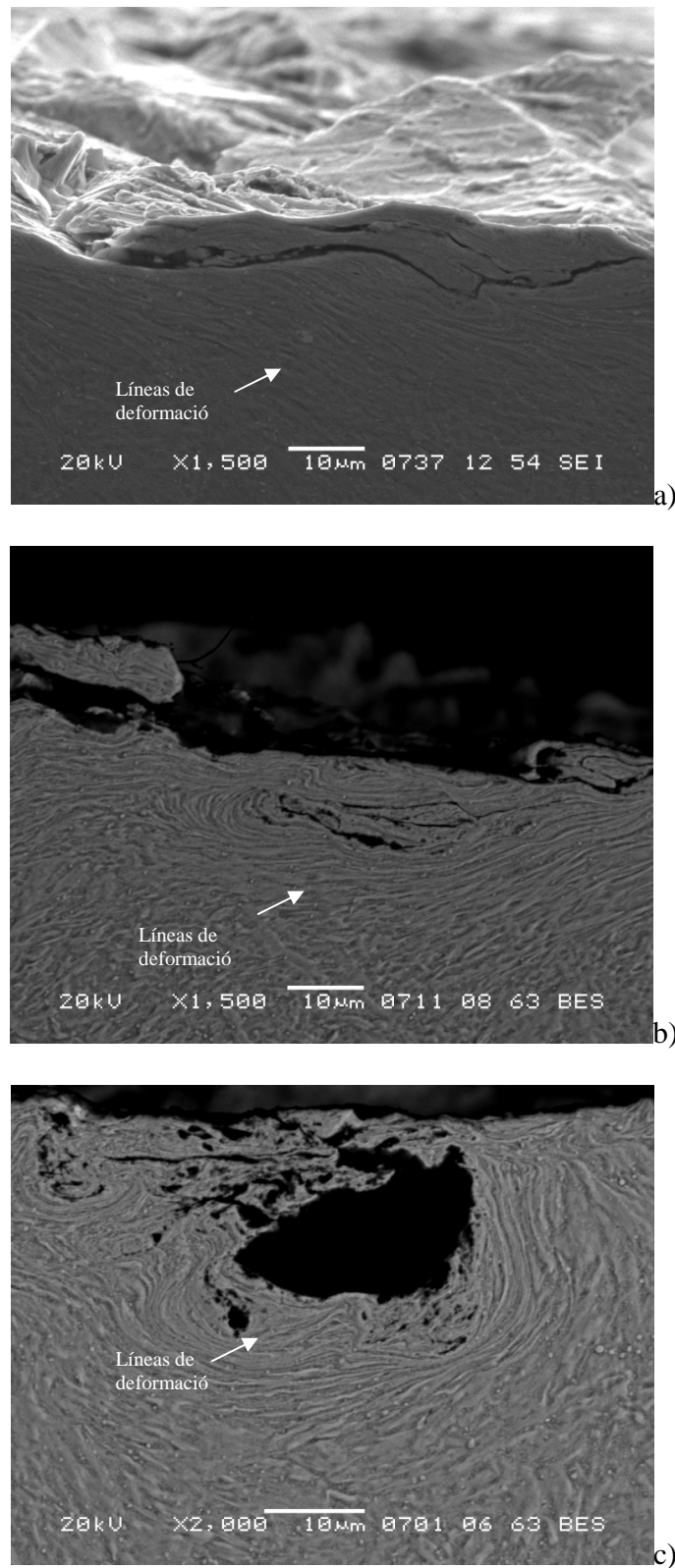


Figura 5.27 Acero H13-1C a diferentes ángulos de impacto a) 30° b) 60° y d) 90°. Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.

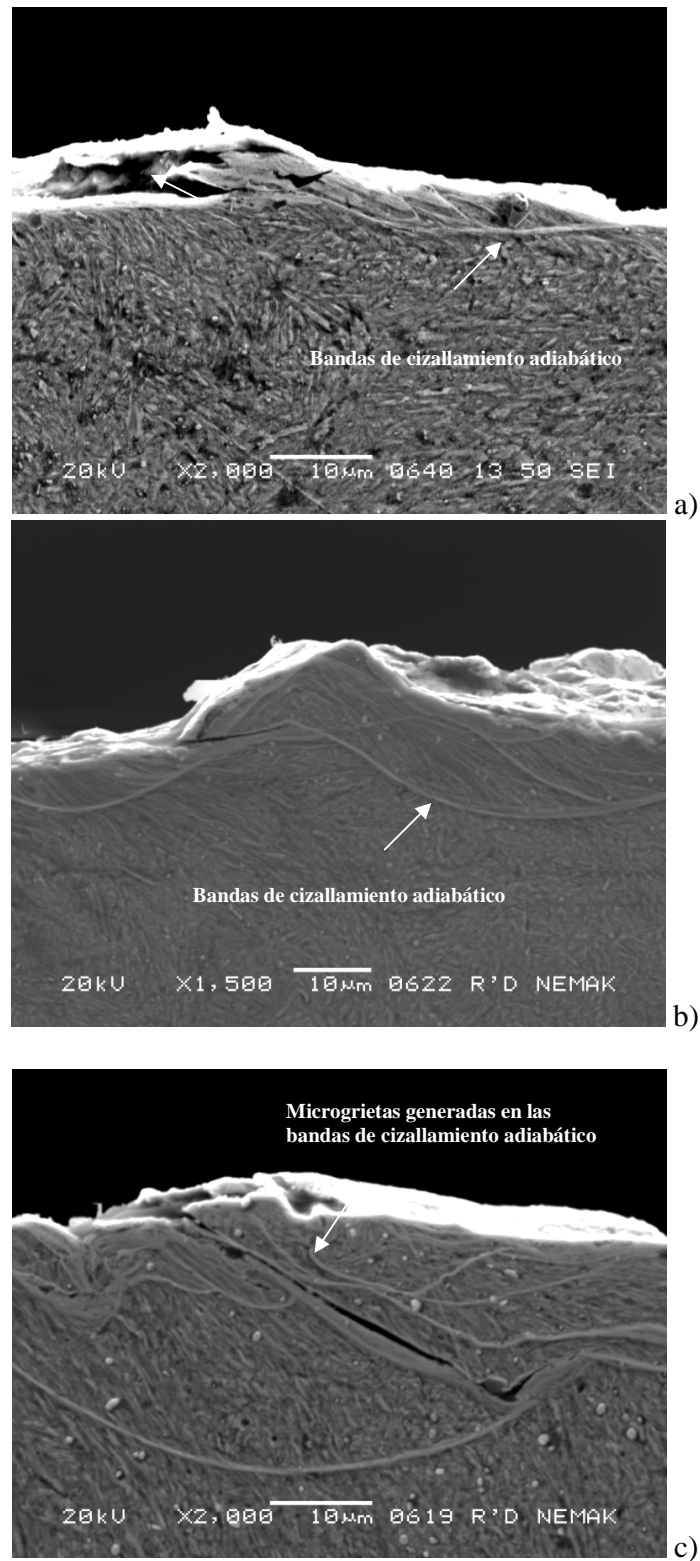


Figura 5.28 Acero H13-1F a diferentes ángulos de impacto a) 30° b) 60° y d) 90°. Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.

Las Figuras 5.29 (a), (b) y (c) muestran el análisis de la sub-superficie en las probetas P20-1B del acero AISI P20 a los ángulos de impacto de 30°, 60° y 90° respectivamente a una presión de 1.38 bares. El impacto de las partículas de arena generó deformación plástica en los tres ángulos. El flujo plástico se orienta de acuerdo al flujo de las partículas, como se observa a un ángulo de 30°, Figura 5.29 (a), las partículas deforman la subsuperficie y a la vez arrancan material en forma de viruta en el instante en que interactúan con la superficie. A un ángulo de 60° se observa la deformación de la sub-superficie, compuesta por una microestructura martensítica, en esta ocasión el impacto de las partículas producen un cráter con material deformado en sus orillas el cual es laminado por otros impactos hasta que es arrancado en forma de plaquetas. A un ángulo de 90°, Figura 5.29 (c), las partículas generan una mayor profundidad y mayor deformación en la sub-superficie como consecuencia de la dirección del impacto. Después que el cráter es formado el material deformado en forma de labio se elimina en forma de plaquetas, tal como se observa en la imagen.

En la Fig 5.30 (a), (b) y (c) se presenta el acero AISI P20, P20-1D ensayado a los ángulos de impacto de 30°, 60° y 90° la microestructura de este acero está compuesta de una superficie carburizada y estructura de martensita sin revenir con dureza de 640 HV. El mecanismo de desprendimiento de material en los tres ángulos de impacto se origina por la generación de grietas, típico en materiales con comportamiento frágil, en este caso no se observa una orientación de la martensita por lo cual se atribuye que el impacto de las partículas generan una menor cantidad de bandas de cizallamiento adiabático y una mayor cantidad de microgrietas sin embargo a un ángulo de 90°, Figura 5.30 (c) se apreciaron bandas de cizallamiento adiabático y la generación de microgrietas a través de ellas.

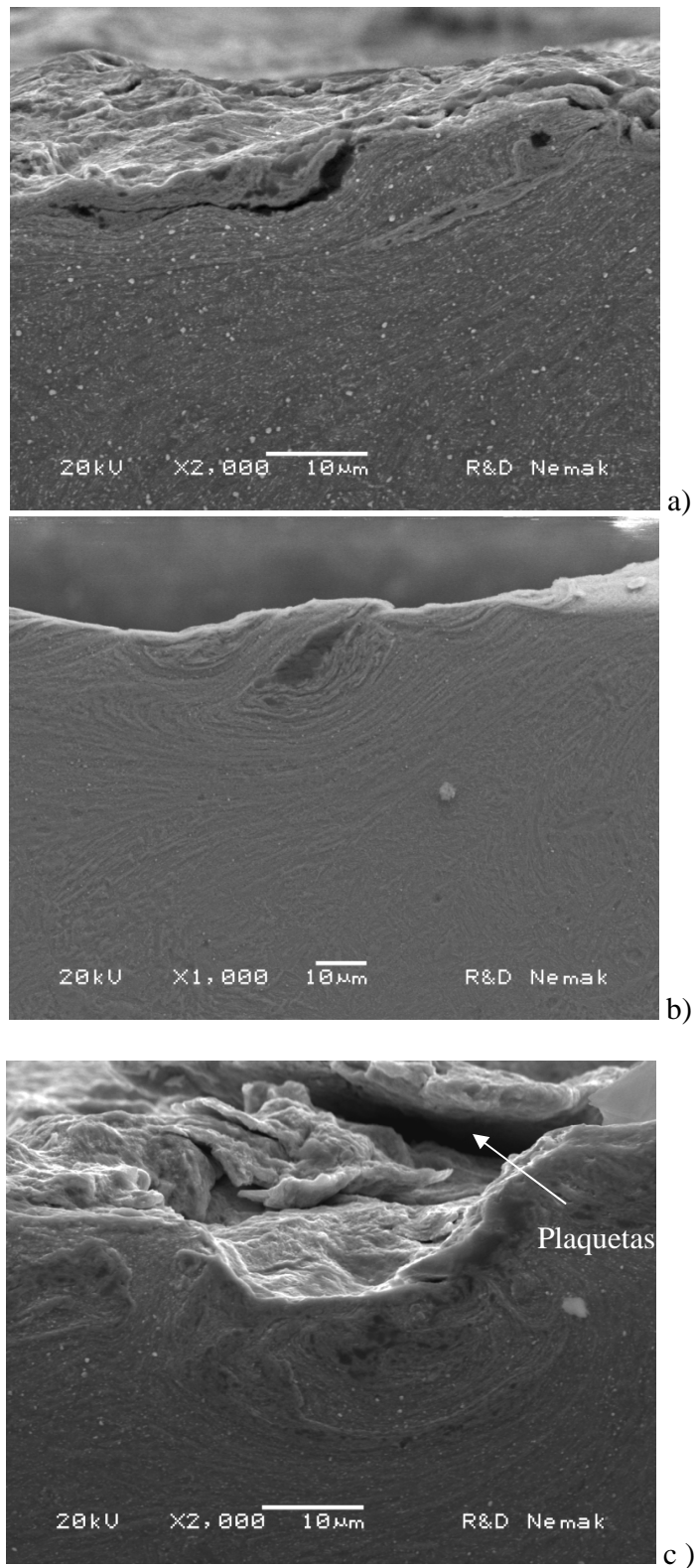


Figura 5.29 Acero P20-1B a diferentes ángulos de impacto a) 30° b) 60° y d) 90°. Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.

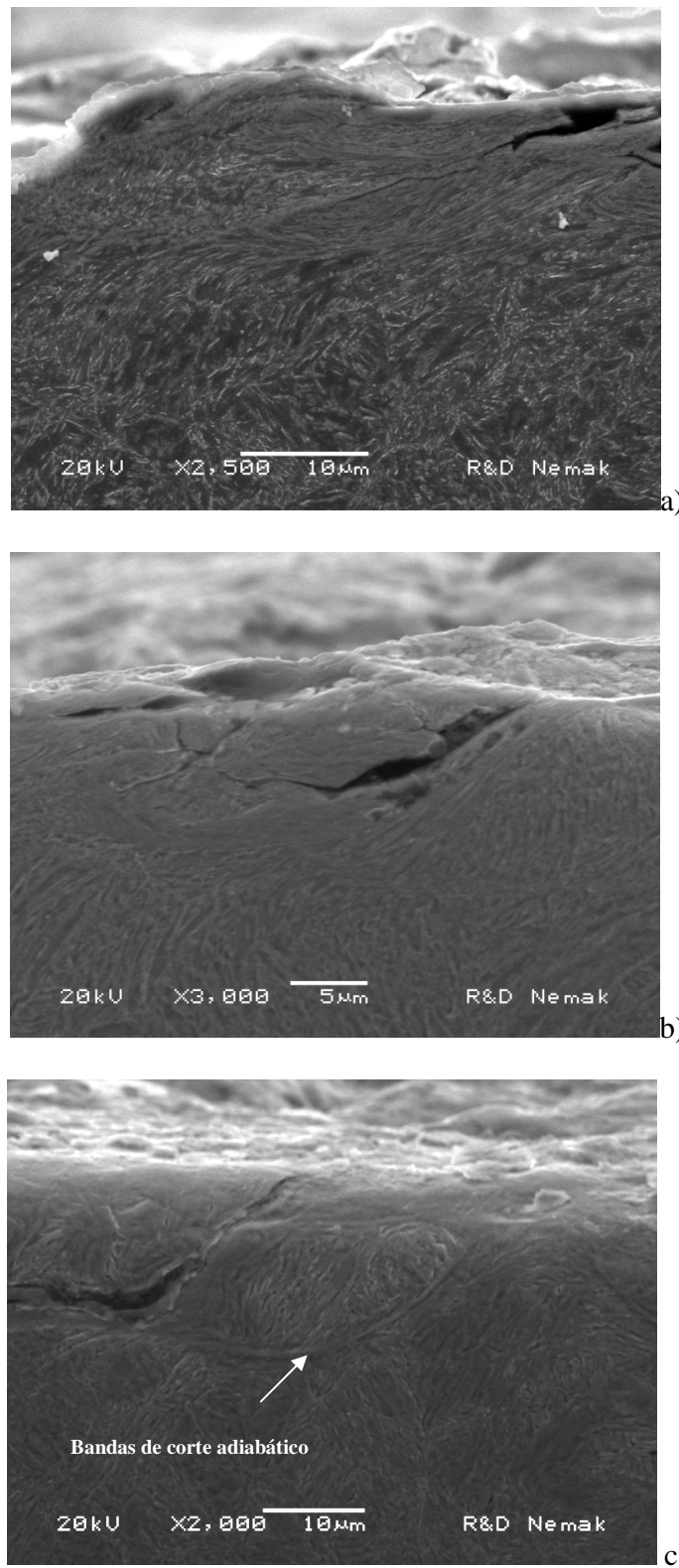
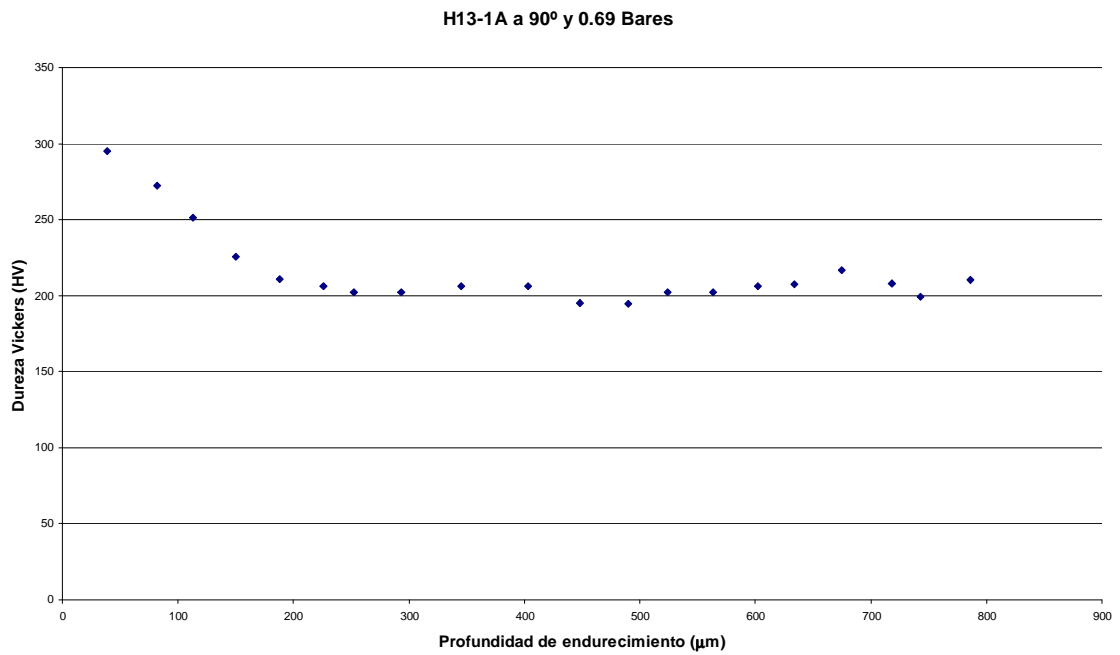


Figura 5.30 Acero H13-1A, a diferentes ángulos de impacto a) 30° b) 60° y d) 90°. Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.

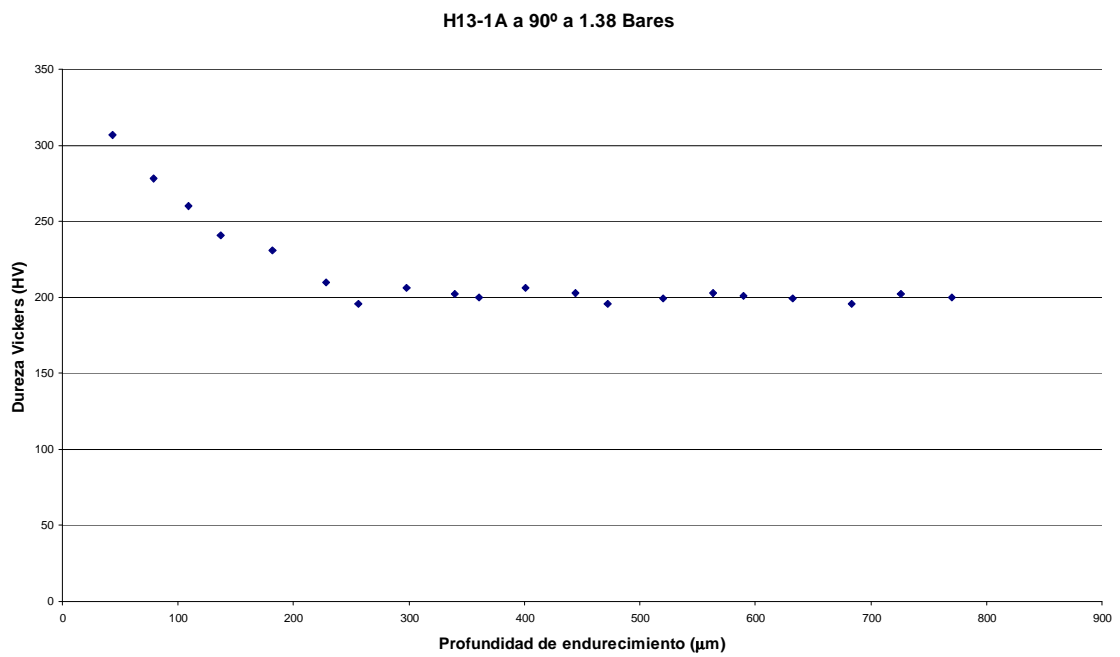
5.9 Perfil de microdureza en el Acero H13 y 20

Los impactos generados por las partículas en la superficie provocaron incremento de la dureza. En la Figura 5.31 a y b se muestran los perfiles de dureza del acero H13 con una dureza promedio de 200 HV y un ángulo de impacto de 90°, aquí se observa que independiente de la presión del ensayo (0.69 y 1.38 bares) la dureza en la superficie alcanza un valor cercano a los 300 HV y después tiende a disminuir hasta alcanzar la dureza promedio de 200 HV esto a una profundidad de 200 μm . La relación entre la dureza de la superficie y microestructura muestran la habilidad de endurecimiento en la superficie impactada [7 y 28], en este caso como ya se ha explicado la condición de 200 HV en el acero H13 está formada por una matriz ferrítica y pequeños carburos en forma globular, típico de un acero con tratamiento de recocido. El impacto de partículas en una superficie relativamente suave permite que la energía se disipe como energía de deformación ó trabajo mecánico que genera deformación plástica en la superficie y por consiguiente un incremento de la dureza. Esto también afecta la cantidad de material removido por erosión, ver Figura 5.15.

La Figura 5.32 a y b presenta el acero H13 con una dureza aproximadamente 600 HV y ensayado a una presión de 0.69 bares y 1.38 bares a un ángulo de impacto de 90°. En este caso el resultado del endurecimiento no se manifestó en la prueba de microdureza a la que fueron sometidas las probetas. La presencia de una dureza alta de 600 HV y una estructura de martensita revenida provocan que la mayor parte de la energía del impacto se oriente en remoción de material debido a la pobre ductilidad en esta condición de la microestructura. En la Figura 5.15 b) se observa como la razón de erosión al ángulo de impacto de 90° se incrementa, generando mayor presión de micro fisuras y poca o nula deformación plástica. El efecto de endurecimiento por impacto de las partículas es función de la dureza y microestructura de la superficie. Por otro lado la presencia de las bandas adiabáticas de corte, Figura 5.28 f) son un ejemplo de la baja capacidad de endurecimiento en esta condición del acero, [64].

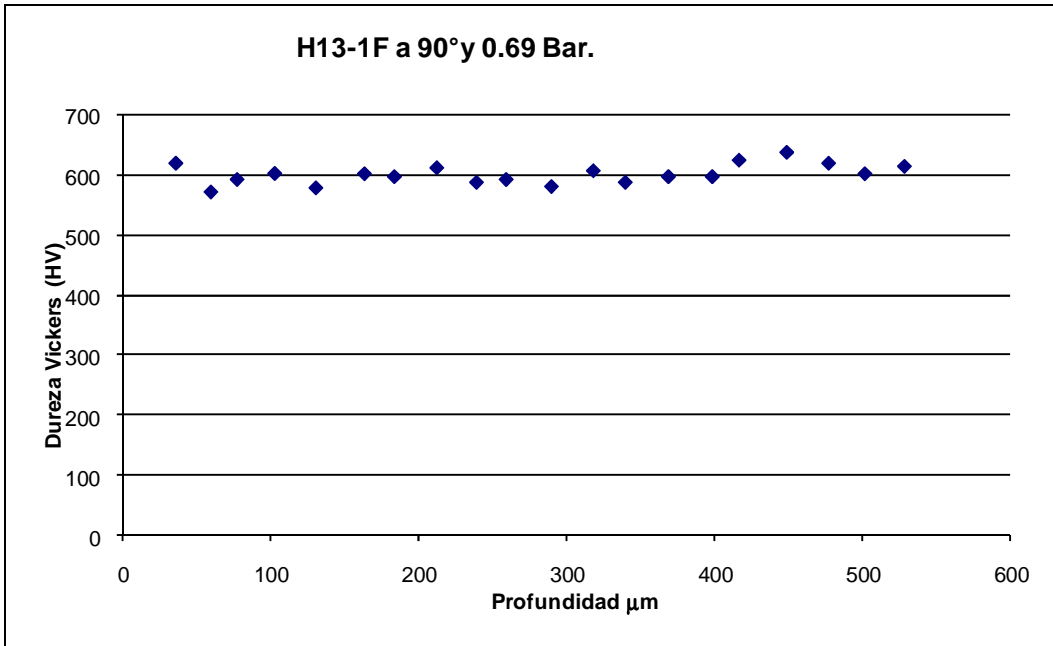


a)

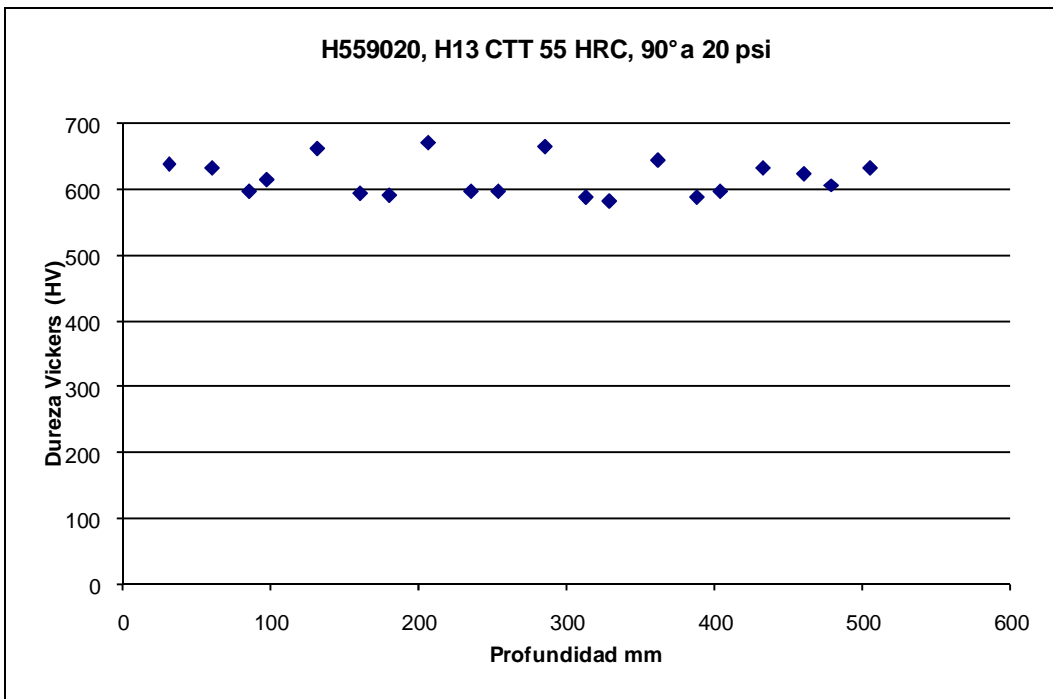


b)

Figura 5.31 Perfil de dureza en el acero H13 con dureza vickers de 200 HV, a) ensayo realizado a la presión de 0.69 bares y b) ensayo realizado a la presión de 1.38 bares.



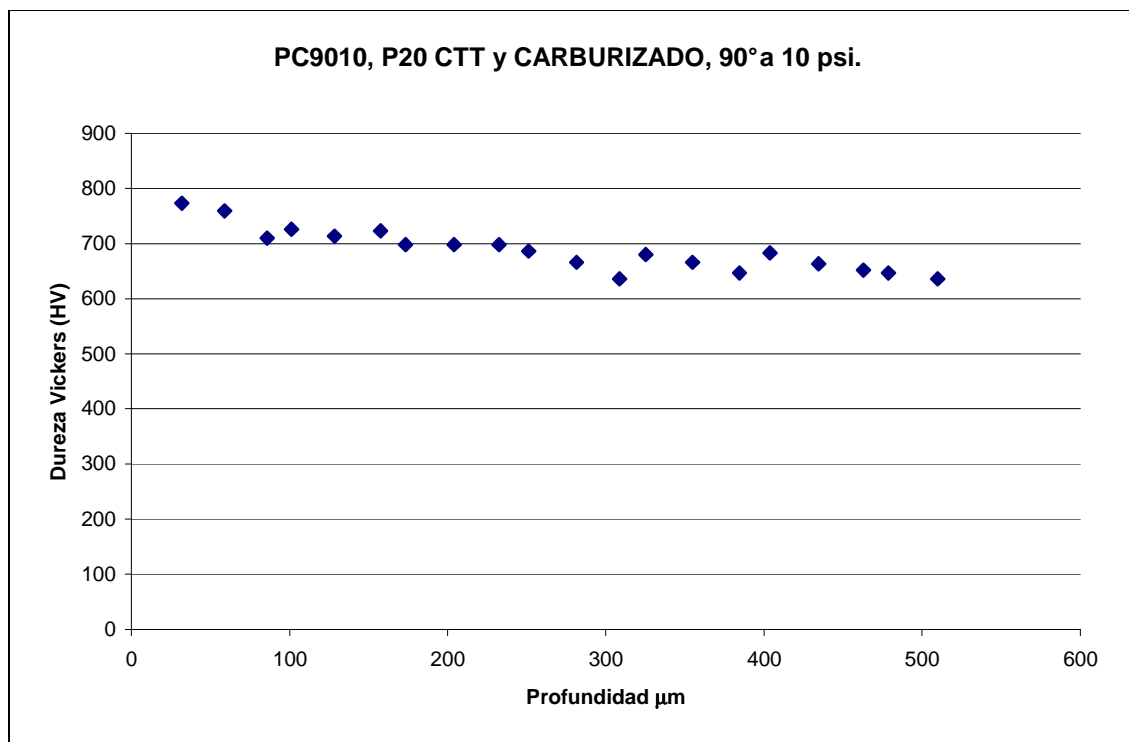
a)



b)

Figura 5.32 Perfil de dureza en el acero H13 con dureza vickers de 600 HV, a) ensayo a al presión de 0.69 bares y b) ensayo a la presión de 1.38 bares.

La Figura 5.33 a y b pertenecen a los perfiles de dureza del acero P20 con dureza de 640 HV ensayado a las presiones de 0.69 y 1.38 bares a un ángulo de 90° . En este caso si se logra identificar una ligera variación en la microdureza de la superficie y la profundidad es de aproximadamente 300 μm logrando tener en dureza en la superficie de 780 HV y tiende a bajar hasta la dureza normal de la probeta. Este comportamiento puede explicarse debido a que el acero P20 tiene baja templabilidad.



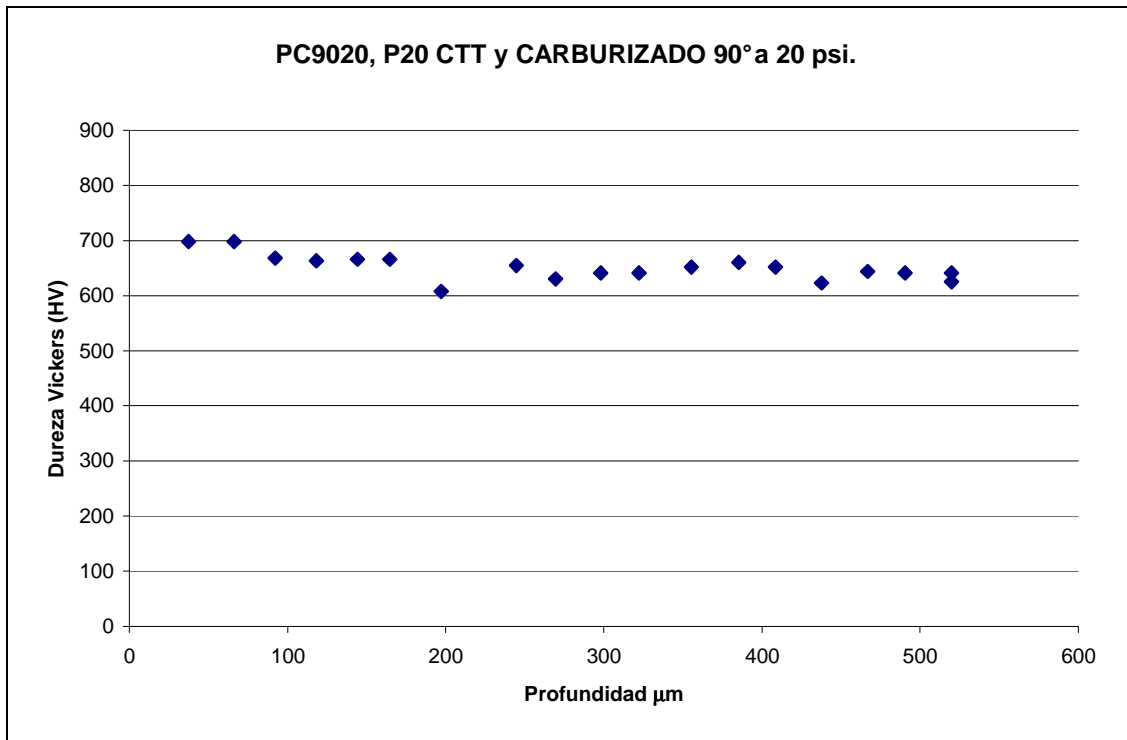


Figura 5.33 Perfil de dureza en el acero P20 con dureza vickers de 200 HV, a) ensayo realizado a la presión de 0.69 bares y b) ensayo realizado a la presión de 1.38 bares.

CONCLUSIONES

El equipo ERO-FIMEII diseñado y construido en FIME-UANL y NEMAK para la ejecución del presente estudio, replica las condiciones de erosión que sufren las cajas en el proceso de fabricación de corazones para los molde de arena sílica.

La mezcla de tamaños de granos de arena así como su morfología permitió la caracterización y definición de los mecanismos de desgaste dúctil y frágil presentes en la superficie de las muestras de los aceros sujetos a estudio, H13 y P20.

El área total de impacto del flujo de arena en la superficie de las muestras ensayadas varía de acuerdo al ángulo de impacto con respecto a la superficie. A un ángulo de 90° se reduce la dispersión de las partículas durante el impacto, mientras que a 20° la divergencia del chorro de arena forma un área de impacto mayor, generando una forma elíptica.

La rapidez de erosión en el acero H13 se mantiene casi constante a bajos ángulos de impacto, de 20° a 40° , esto independientemente de la dureza. Mientras que por otro lado la condición de mayor dureza 581 HV y a un ángulo de impacto de 90° se presenta un mayor rapidez de erosión.

Al incrementar la presión el flujo de arena que impacta a la superficie, también se incrementa la rapidez, de erosión en todos los ángulos y valores de dureza. Este comportamiento se observó en los dos aceros bajo el presente estudio H13 y P20.

El acero H13 presentó un comportamiento tipo dúctil en todas las condiciones ensayadas, presentando el mayor rango de erosión a un ángulo de impacto de 40°. El acero P20 presentó una transición de comportamiento dúctil a frágil cuando presenta alta dureza.

El incremento de la presión de aire, incremento la velocidad de las partículas y su energía cinética, provocando mayores índices de erosión en ambos aceros

El acero AISI H13 ensayado a los ángulos de 20 a 40° la razón de erosión promedio fue de 1.4×10^{-4} para el rango de dureza de 196 a 581 Vickers a la presión de inyección de 0.69 bares. Para una presión de 1.38 bares la razón de erosión se incrementó más del doble arrojando un valor de 3.3×10^{-4} .

Debido a la capa carburizada en el acero AISI P20 y a la estructura de martensita sin revenir con dureza de 640 HV el mecanismo de microp-corte presente al ángulo de impacto de 20 ° es muy severo siendo este la principal forma de pérdida de material. En este caso el arranque de viruta por corte deja la presencia de surcos y virutas altamente deformadas adheridas a la superficie. Los mecanismos de desgaste a los ángulos de impacto arriba de 60° se presentan por presencia de cráteres y material altamente deformado generados por los impactos individuales.

Se observó bandas de cortes adiabáticos cerca de la superficie erosionada en un corte transversal al sentido de la erosión este efecto fue observado con mayor claridad en las muestras de mayor dureza 581 HV del acero H13 y 640 HV en el acero P20. Este tipo de defecto se observó cuando la superficie fue impactada a ángulos superiores a 60°. En los casos de daño más severo se observaron micro grietas cerca de las bandas de corte adiabático lo que influyó para una máxima razón de desgaste.

RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS POSTERIORES

En el presente estudio se logró, entre otras cosas, reproducir con un alto nivel de certidumbre, el proceso de erosión existente en cajas de corazones reales, utilizando el dispositivo tribológico para pruebas de erosión ERO-FIME II. La industria automotriz se enfrenta a continuos retos de mejora. Quizá uno de los más importantes es el de lograr motores de combustión interna de mayor eficiencia. Se contemplan motores que puedan proporcionar más de 36 km por litro de combustible. Este reto está influyendo fuertemente en el diseño de los monobloques y cabezas. Cada vez, las paredes del monobloque son más delgadas, las aleaciones de aluminio son más resistentes, entre otras mejoras. Esto requiere de mayor precisión en la fabricación de los corazones. Por lo anterior, se sugiere continuar con la presente investigación, utilizando otro tipo de aceros herramienta y con los ángulos de impacto detectados como los de mayor daño en las cajas utilizadas en la actualidad.

REFERENCIAS

- [1] I.M. Hutchings “Wear by particles” *Chemical Engineering Science*, Vol 42 No 4, (1987), Pp 869-878.
- [2] I.M. Hutchings “Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials” Edward Arnold United Kingdom (1992) pp 133-171.
- [3] Iain Finnie “Erosion of Surfaces by Solid Particles” *Wear* 3 (1960), pp 87-103.
- [4] Iain Finnie “Some Reflections on the Past and Future of Erosion” *Wear* 186-187 (1995), pp 2-21
- [5] Alan V. Levy “The Platelet Mechanism of Erosion Corrosion of Materials” *Wear* 108 (1986) pp 1-21
- [6] Alan V. Levy “Solid Particle Erosion and Erosion Corrosion of Materials” ASM International (1995), pp 2-71.
- [7] B.A. Lindsley and A.R. Marder, “The Effect of Velocity on the Solid Particle Rate of Alloys” *Wear* 225-229 (1999) pp 510-516.
- [8] D.J. O’Flynn, M.S. Bingley, M.S.A. Bradley, A.J. Burnett “A Model to Predict The Solid Particle Erosion Rate of Metals and its Assessment Using Heat Treated Steels” *Wear* 248 (2001), pp 162-177.
- [9] Henk Wensink and Miko C. Elwenspoek “A Closer Look at the Ductile Brittle Transition in Solid Particle Erosion” *Wear* 253 (2002), pp 1035-1043.
- [10] R.G. Wellman and C. Allen “The effects of angle of impact and material properties on the erosion rates of ceramics” *Wear* 186-187 (1995) pp 117-122.

- [11] T. Deng, M.S. Bingley and M.S.A. Bradley “The Influence of Particle Rotation on the Solid Particle Erosion Rate of Metals” *Wear* 256 (2004) pp 1037-1049.
- [12] G. Sundararajan and Manish Roy “Solid Particle Erosion Behaviour of Metallic Materials at Room and Elevated Temperature” *Tribology International* Volume 20 Number 5, 1997
- [13] Laura McCabe, Gordon, A. Sargent and Hans Conrad “Effect of Microstructure on the Erosion of Steel by Solid Particles” *Wear* 105 (1985) 257-277.
- [14] Y.I. Oka, H. Ohnogi, T. Hosokawa and M. Matsumura, “The Impact Angle Dependence of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact”, *Wear* 203-204 (1997) pp 573-579.
- [15] P.J. Slikkerveer, P.C.B. Bouten and F.C.M. de Hass “High Quality Mechanical Etching of Brittle Materials by Powder Blasting” *Sensors and Actuators* 85 (2000), pp 296-303.
- [16] P.H. Shipway and I.M. Hutchings “The Role of Particle Properties in the Erosion of Brittle Materials” *Wear* 193 (1996), pp 105 -113.
- [17] Z Feng and A Ball “The Erosion of Four Materials using Seven Eroducts-Towards and Understanding” *Wear* 233-235 (1999) pp 674-684.
- [18] Markus Lienhard and Alan Levy “The Effect of Eroduct Particle Characteristics On The Erosion of Metals” *Wear* 151 (1991) pp 381-390.
- [19] D. Ciampini, J.K. Spelt, and M. Papini, “Simulation of Interference Effects in Particle Streams Following Impact with a Flat Surface Part I. Theory and Analysis” *Wear* 254 (2003), pp 237-249.
- [20] M. Papini and J.K. Spelt, “Impact of Rigid Angular Particle with Fully-Plastic Targets Part I: Analysis” *International Journal of Mechanical Science* 42 (2000) pp 991-1006.
- [21] M. Papini and J.K. Spelt, “Impact of Rigid Angular Particle with Fully-Plastic Targets Part II: Parametric Study of Erosion Phenomena” *International Journal of Mechanical Science* 42 (2000) pp 1007-1025.
- [22] Q. Chen and D.Y. Li “Computer Simulation of Solid Particle Erosion” *Wear* 254 (2003), pp 203-210.

- [23] Y.I. Oka, M. Nishimura, K. Nagahashi, and M. Matsumura “Control and Evaluation of Particle Impact Conditions in Sand Erosion Test Facility” *Wear* 250 (2001) pp 736-743.
- [24] D. Ciampini, J.K. Spelt and M. Papini “Simulation of Interference Effects in Particle Stream Following Impact With a Flat Surface Part II, Parametric Study and Implications for Erosion Testing and Blast Cleaning” *Wear* 254 (2003), pp 250-264 .
- [25] Gabrielle M. Green, R. Taggart and D.H. Polonis “Influence of Microstructure on The Erosion of Plain Carbon Steels” *Metallography* 14 (1981), pp191-212.
- [26] D.R.K. Rao, B. Venkataraman, M.K. Asundi and G. Sundararajan “The Effect of Laser Surface Melting on the Erosion Behaviour of a Low Alloy Steel”, *Surface and Coating Technology*, 58 (1993), pp 85-92.
- [27] S.J. Na and Y.S. Yang “Influence of Heating Rate on the Laser Surface Hardening of a Medium Carbon Steel” *Surface and Coatings Technology*, 34 (1988), pp 319-330,
- [28] T. Foley and A. Levy “The Erosion of Heat Treated Steels” *Wear* 91 (1988), pp 45-64
- [29] S. Soderberg, S. Hogmark, U. Engman and H. Swahn “Erosion Classification of Materials Using a Centrifugal Erosion Tester” *Tribology International*, (December 1981), pp 333-343.
- [30] George Ellwood Dieter “*Mechanical Metallurgy*” McGraw-Hill, United States of America, 1986.
- [31] G. Sundararajan “The Solid Particle Erosion of Metallic Materials: The Rationalization of the Influence of material Variables” *Wear* 186-187 (1995), pp 129-144.
- [32] M.S. Bingley and D.J. O Flynn “Examination and comparison of Various Erosive Wear Models” *Wear* 258 (2005), pp 511-525
- [33] G. Sundararajan “The Depth of Plastic Deformation Beneath Eroded Surfaces: The Influence of Impact Angle and Velocity, Particle Shape and Material Properties” *Wear* 149 (1991), pp 87-95.

- [34] R.A. Doyle and Ball “On Thermomechanical Effects During Solid Particle Erosion” *Wear* 151 (1991), pp 87-95
- [35] Aluminium Casting Technology 2th Edition “American Foundry Society (1993), USA
- [36] James J. Archibald and Richard L Smith, Ashland Chemical Company “Resin Binder Processes” *ASM Metals Handbook 9th Edition Volume 15 Casting* (1992).
- [37] The Ashland Process, Technical Bulletin No. 1798-2 Ashland Chemical Company, (1998) USA.
- [38] Javier Rodrigo Gonzalez López, “Efecto de la Temperatura Sobre las Propiedades Físicas de Moldes y Corazones Producidos por el Proceso Fenol-Uretano en Caja Fría” Tesis de Maestría, FIME-UANL (2001), México.
- [39] Productivity and Environmental Aspects of Gas-Cured Binder System, Technical Bulletin No. 1826-1 Ashland Chemical Company (1994), USA.
- [40] Hector Torres, Mark Adamovitis, Ken Williams and Dale Snider “Sand Core Engineering: Use of Modern Simulation Software” Ashland Specialty Chemical Company, *Informacion Tecnica* (2001), USA.
- [41] Tooling Design for the Ashland Cold Box Process, Technical Bulletin No. 1711-3 Ashland Chemical Company (1998) USA.
- [42] S.C. Helzer and L.F. Vondra “A Systems Approach for The Selection of Tooling Materials in The Foundry” 97th Casting Congress. American Foundry men’s Society, (April 24-27, 1993), Chicago Illinois.
- [43] L.F. Vondra and M.C. Formanek, “A Further Evaluation of Wear Analysis of Selected Tooling Materials Using Impact Abrasion Testing 100th Casting Congress. American Foundry men’s Society. (April 20-23), 1996 Philadelphia Pennsylvania.
- [44] I. Finnie and D.H. McFadden “On the Velocity Dependence of the Erosion of Ductile Metals by Solid Particle at Low Angles of Incidence” *Wear*, 48 (1978), pp 181-190.
- [45] J.R. Zhou and S. Bahadur “Effect of Blending of Silicon Carbide Particle in Varying Sizes on the Erosion of Ti-6Al-4V” *Wear* 132 (1989), pp 235-246.

- [46] F.Y. Hung, L.H. Chen and T.S. Lui “A Study on the Particle Erosion of Upper Bainitic Austempered Ductile Iron, *Wear* 252 (2002), pp 985-991.
- [47] S.M. Walley, and J.E. Field “The contribution of the Cavendish Laboratory to the Understanding of Solid Particle Erosion Mechanisms” *Wear* 258 (2005), pp 552-566.
- [48] ASTM G76-83 Standard Practice for Conducting Erosion Test by Solid Particle Impingement Using Gas Jet.
- [49] A.N.J. Stevenson and I.M. Hutchings “The Influence of Nozzle Length on the Divergence of the Eroding Particle Stream in a gas-blast Erosion ring” *Wear* 189 (1995), pp 66-69.
- [50] A.N.J. Stevenson and I.M. Hutchings “Scaling Laws for Particle Velocity in the Gas Blast Erosion Test” *Wear* 181-183 (1995), pp 56-62.
- [51] Alvaro Manuel Treviño Acevedo “Desarrollo de una Metodología para Pruebas de Erosión” Tesis de Maestría, UANL Junio 2004
- [52] Y. Ballout, J.A. Mathis and J.E. Talia “Solid Particle Erosion Mechanism in Glass” *Wear* 196 (1996), pp 263-269.
- [53] J.E. Fuller “Electrical Discharge Machining, *Metals Handbook* 9th Ed, Vol 16, USA 1989.
- [53] James M. O'Brien, O'Brien and Associates; Dan Goodman, Surface Combustion, Inc. “Plasma (Ion) Nitriding Of Steel” ” *ASM Handbook Volume 4 Heat Treating*, (1991).
- [54] Torsten Ericsson, Linköping Institute of Technology, Sweden “Principles of Heat Treating of Steels” *ASM Handbook Volume 4 Heat Treating*, (1991).
- [55] Alvaro Manuel Treviño Acevedo “Desarrollo de una Metodología para Pruebas de Erosión” Tesis de Maestría, UANL Junio 2004

- [56] ASTM E3 - 01(2007) E1 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens

- [57] George F. Vander Voort “*Metallography, Principles and Practice*” McGraw-Hill, USA 1984 .

- [58] ASTM E92 - 82(2003) E2 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials
- [59] Manual de Arenas Para Fundición “American Foundrymens Society” Des Plaines Illinois (1963)
- [60] Y.I. Oka, M. Matsumura and T. Kawabata “Relationship Between Surface Hardness and Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact” *Wear* 162-164 (1993), pp 688-695.
- [61] Yoshinori Isomoto Oka and Kazuo Nagahashi “Measurement of Plastic Strain Around Indentations Caused by the impact of Round and Angular Particles and The Origin of Erosion” *Wear* 254 (2003), pp 1267-1275.
- [62] I. Kleis and I Hussainova “Investigation of Particle-Wall Impact Process” *Wear* 233-235 (1999), pp 168-173.
- [63] Marc A. Meyers and Crailg L. Wittman “Effect Of Metallurgical Parameters on Shear Band Formation in Low Carbon (0.2 wt pct) Steels. *Metallurgical Transactions A*, Volume 21A December (1990), pp 3153.
- [64] Bofa Zhang, Yingjie Liu, Wanci Shen, Yuanfei Wang, Xiangyum Tang, Xiaodan Wang “A Study on the Behaviour of Adiabatic Shear Bands in Impact Wear 198 (1996), pp 287 -297.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Diagrama esquemático de las fuerzas que experimenta una partícula al hacer contacto con una superficie sólida [2].
- Figura 1.2 Proceso de penetración de una partícula rígida dentro de la superficie de un material deformable plásticamente a un ángulo de impacto normal. El contacto inicial ocurre a un tiempo $t = 0$, y la partícula alcanza el punto de reposo en un tiempo de $t = T$ [2].
- Figura 1.3 Dependencia típica de la masa removida de la superficie con respecto a la cantidad de masa total de partículas erosivas las cuales la han golpeado. Línea (a) corresponde al comportamiento lineal de la erosión, sin incubación. Bajo algunas condiciones, la incubación es observada tal como se muestra en la curva (b) [2].
- Figura 1.4 Resistencia a la erosión relativa para materiales dúctiles y frágiles [4].
- Figura 1.5 Mecanismo de eliminación de material a altos ángulos, por formación de material altamente deformado en forma de “labios” [8].

- Figura 1.6 Microestructura de un acero con 0.6% C, con tratamiento térmico de esferoidización. El material deformado se observa en el cráter y en las orillas, formado por el impacto de las partículas de Al_2O_3 de $355 \mu\text{m}$, a un ángulo de 90° , velocidad de impacto de a) 30 m/s, b) 64 m/s. [7].
- Figura 1.7 Esquema de la formación de grietas por el impacto de una partícula rígida en un material frágil [9].
- Figura 1.8 Microestructura de un acero de 0.6% de C en condición templado sin revenido. Las grietas se forman por impacto de partículas de Al_2O_3 de $355 \mu\text{m}$, a un ángulo de 90° , velocidad de impacto de a) 30 m/s, b) 64 m/s [7].
- Figura 1.9 Daño de una superficie por el impacto de partículas de diferente forma. a) Deformación por arado. b) Corte del tipo I por el impacto de una partícula angular con moviendo de rotación hacia delante. c) Corte del tipo II de una partícula angular rotando hacia atrás durante el impacto [2].
- Figura 1.10 La rotación de la partícula puede producir diferente daño en una superficie erosionada. En a) y b) se considera un tipo de arado mientras que c) y d) pertenece al corte del tipo I. [11]
- Figura 1.11 Efecto de la velocidad de la partícula en el tiempo de incubación. [7]
- Figura 1.12 Efecto de la velocidad de impacto a) en una aleación de aluminio erosionada con partículas de SiO_2 ($297\text{-}533 \mu\text{m}$) [14], b) en un vidrio erosionado con Al_2O_3 de $23 \mu\text{m}$ [15].
- Figura 1.13 Grafica de razón de erosión Vs Dureza de la partícula/Dureza de la muestra de 7 materiales erosionados con partículas de diferente dureza a una velocidad de impacto a 60 m/s [16].

- Figura 1.14 Grafica de la razón de erosión de un vidrio en función de Dureza de la partícula/Dureza de muestra, a un ángulo de impacto de 90°. La escala del eje y a la izquierda corresponde a las barras oscuras, la cuáles representan una velocidad de 57 m/s con tamaño de partícula entre (180-250 μm). La escala del eje “y” a la derecha corresponde a las barras de rayas, en la prueba realizada a una velocidad de 45 m/s con tamaños de partícula entre (400-500 μm) [17].
- Figura 1.15 Imágenes de partículas obtenidas en el SEM. a) Granalla de acero (400-500 μm). b) Perlas de vidrio (63-106 μm). c) Arena silica SiO_2 (106-125 μm). d) Alúmina Al_2O_3 (106-125 μm). e) Carburo de tungsteno WC (212 μm). f) Carburo de silicio (106-125 μm). g) Diamante, (106-125 μm) [17].
- Figura 1.16 Efecto de la forma de la partícula con respecto a la masa removida en un acero inoxidable [1]
- Figura 1.17 Efecto del tamaño de la partícula sobre la resistencia a la erosión de los materiales a) a una velocidad de impacto constante [18], b) tamaño crítico de la partícula (50 y 100 μm) a diferente velocidad de impacto [12].
- Figura 1.18 Erosión relativa contra el ángulo de impacto para un vidrio a) frágil b) dúctil. [9].
- Figura 1.19 Efecto del flujo de la partícula con respecto a la razón de erosión [23].
- Figura 1.20 Resistencia a la erosión en función de la dureza Vickers (HV), después de ser erosionado con SiC a un ángulo de 20° y una velocidad de impacto de 76 m/s, [1].

- Figura 1.21 Pérdida en peso en función de la dureza de aceros al carbono con contenidos de carbono de 0.2 hasta 0.8; los triángulos representan condición de templado y los círculos condición de normalizado en el caso de los cuadros se trata de un acero 1080 una temperatura de revenido 650 °C y tiempos que variaron de 15 min hasta 24 hrs [25].
- Figura 1.22 Comportamiento de la erosión para un aluminio (Al), aceros tratados térmicamente (650T y 200T) y aceros tratados térmicamente y endurecidos por fusión láser de la superficie (L650T y L200T) a dos velocidades de impacto (49 y 96 m/s) y a tres ángulos de impacto (30°, 60° y 90°) [26].
- Figura. 1.23 a) Comportamiento a la erosión de dos aleaciones de aluminio 1100-O y 7075-T6, partículas de carburo de silicio de 280 μm y una velocidad de 30 m/s. b) Comportamiento a la erosión de un acero del tipo AISI 304, partículas de aluminio Al_2O_3 a un ángulo de 30° y velocidad de 60 m/s. [28].
- Figura 1.24 Variación de la velocidad de endurecimiento con respecto a la velocidad de partículas con diferente tamaño. [31].
- Figura 1.25 Efecto del coeficiente de endurecimiento n , y elongación en la erosión de un acero del tipo AISI 1020 y otro del tipo AISI 304. Erosionado con partículas de Al_2O_3 a un ángulo de 30° y una velocidad de partícula de 60 m/s [28].
- Figura 1.26 Perfil de microdureza Knoop para probetas de un latón con 0% y 70% de trabajo en frío. Las pruebas de erosión fueron realizadas a velocidades de impacto de 20 y 50 m/s a un ángulo de impacto de 90° y partículas de Al_2O_3 de 355 μm . [7]

- Figura 2.1 a) moldes para vaciado fabricados de arena sílica b) corazones de arena sílica empleados para obtener piezas vaciadas [36].
- Figura 2.2 Piezas vaciadas de aluminio obtenidas con moldes y corazones de arena sílica (a) Pieza empleada en la industria aeroespacial, b) pieza para la industria automotriz empleado en la configuración de un motor de 8 cilindros [35].
- Figura 2.3 Reacción típica en el proceso de caja fría fenol-uretano [37].
- Figura 2.4 Diferentes forma de granos de la arena sílica a) granos redondos, b) granos angulares y c) granos compuestos [35].
- Figura 2.5 Procedimiento para elaboración de un corazón por caja fría [36].
- Figura 2.6 Tubos sopladores, dimensiones en pulgadas, a) placa donde se soportan los tubos de soplado. b) dimensiones de un tubo de soplado, c) tubos de soplado con punta de viton [41]
- Figura 2.7 Esquema del empleo de ventilas en la elaboración de un corazón tubular, dimensiones en pulgadas [41].
- Figura 2.8 Sección de un molde metálico.
- Figura 2.9 Cavidades de un molde para corazones, desgastadas por erosión, a) y b) las zonas con mayor daño por erosión son aquellas que reciben el primer impacto de la mezcla de arena y resinas.
- Figura 3.1 Prototipo del equipo para pruebas de desgaste por erosión.

- Figura 3.2 Algunas partes importantes del prototipo de erosión a), boquilla interna de cobre b), boquilla externa c).
- Figura 3.3 Daño por erosión en una probeta de vidrio, a) vista superior. b) vista frontal.
- Figura 3.4 Ensayo de erosión en placas de acero de bajo carbono a diferentes ángulos e impacto empleando 500 g de arena silica.
- Figura 3.5 Determinación de las dimensiones de las huellas de erosión en placas de acero al carbono.
- Figura 3.6 Microestructura de un acero al carbono erosionado con arena silica de morfología subangular con tamaños de entre 150-425 μm y una presión de aire de 4.14-2.76 bares. Atacada con Nital al 3% y Pírcal 4 g en relación 1:1.
- Figura 3.7 Tratamiento térmico de los aceros 4140 y 9840 a) templado en aceite, b) revenido a 205 °C, c) revenido a 520 °C.
- Figura 3.8 Tratamiento térmico del acero H13 a) templado al aire quieto, b) doble revenido a 520 °C, c) doble revenido a 605 °C.
- Figura 3.9 Probetas ensayadas a un ángulo de 20° a) acero tipo H13, b) acero tipo 4140.
- Figura 3.10 Probetas ensayadas a) 20°, acero tipo 9840 y b) 90°, acero tipo 9840.

- Figura 3.11 Superficie dañada por la acción abrasiva de las partículas de arena sílica de morfología subangular con tamaños de entre 150 a 425 μm , en un acero tipo AISI H13 con dureza de 55 HRC. Angulo de impacto de 20°.
- Figura 3.12 Esquema del equipo de pruebas para desgaste erosivo.
- Figura 3.13 Balanza analítica donde se registraron la masa inicial y final de las probetas durante los ensayos de erosión.
- Figura 3.14 Registro de la presión del aire seco durante los ensayos realizados a 4.14 bares.
- Figura 3.15 Acero AISI 4140 erosionado con 2000 g de arena sílica de morfología subangular con tamaños de entre 150-425 μm . A una presión de 4.14 bares.
- Figura 3.16 Comportamiento del desgaste erosivo en el acero AISI 4140 con respecto a la dureza. Angulo de impacto a 90 ° y presión de 4.14 bares.
- Figura, 3.17 Imágenes de la subsuperficie en una zona dañada por la erosión(a) 215 HV y (b) 300 HV, ensayadas a un ángulo de 90°. Atacadas con nítal al 3%.
- Figura 3.18 Imágenes de las probetas del acero AISI H13 erosionadas con 1000 g de arena sílica de morfología subangular con tamaños de entre 150-425 μm . A una presión de 4.14 bares.

- Figura 3.19 Comportamiento del desgaste erosivo en el acero AISI H13 con respecto a la dureza. Angulo de impacto a 90° y 4.14 bares.
- Figura 3.20 Imágenes del acero AISI H13 erosionado con 1000 g de arena sílica a una distancia de impacto de 50 mm con una presión de aire de 4.14 bares.
- Figura 3.21 Esquema de la máquina sopladora, a) y el corazón de arena sílica, b) [40].
- Figura 3.22 Medición de la presión en la caja de corazones, durante el llenado de un molde.
- Figura 3.23 Perfil de microdureza en probetas del acero AISI H13 tratados térmicamente y endurecimiento superficial por nitrurado.
- Figura 3.24 Probetas ensayadas a) ángulo de impacto de 30° , b) 90°
- Figura 3.25 Razón de erosión en probetas tratadas térmicamente y nitruradas, ángulo de impacto a 30° y 90° a una presión de 1.38 bares.
- Figura 3.26 Probetas del acero AISI P20 después del ensayo de erosión a 1.38 bares con una cantidad de 1000 g de arena sílica.
- Figura 3.27 Comportamiento en el desgaste por erosión de un acero AISI P20. Ángulo de impacto de 90° y una presión de 1.38 bares.

- Figura 3.28 Ensayos de desgaste erosivo en el acero tipo AISI 1020 empleando 1000 g de arena sílica con una presión de aire de 0.69 (a) y 1.38 bares (b). La distancia de impacto fue de 50 mm para ambos casos.
- Figura 3.29 Comportamiento al desgaste erosivo de un acero de bajo carbono AISI 1020.
- Figura 3.30 Ensayos de desgaste erosivo en el acero tipo AISI 1020 empleando 1000 g de arena sílica con una presión de aire 0.69 (a) y 1.38 bares (b) la distancia de impacto fue de 80 mm para ambos casos.
- Figura 3.31 Comportamiento al desgaste erosivo de un acero de bajo carbono AISI 1020.
- Figura 3.32 Boquilla inicial a), boquilla adaptada para remplazarla b), insertos fabricados de acero AISI H13 c).
- Figura 4.1 Equipo empleado en la homogenización de la arena a) Cuarteadora de arena b) Serie de tamices y agitador.
- Figura 4.2 Esquema de homogenización de la arena empleada para los ensayos de desgaste erosivo.
- Figura 4.3 Equipo auxiliar usado para el monitoreo y registró la presión del aire que entra al sistema.

- Figura 4.4 Equipo completo de ensayos de desgaste erosivo. El medidor de la presión del aire aparece en el costado izquierdo.
- Figura 4.5 Angulo de impacto referido entre el eje de la boquilla y la superficie de la probeta a) 30° b) 90°.
- Figura 4.6 Eje del portamuestras colocado en la parte inferior y cubierta con un contenedor tipo tolva.
- Figura 4.7 Dimensiones de las probetas a ser empleadas en el ensayo de desgaste.
- Figura 4.8 Probetas pertenecientes al acero AISI H13. La probeta de la izquierda corresponde a la condición H13-1A y a la derecha H13-1F.
- Figura 4.9 Medición de los parámetros de rugosidad Ra, Rq, Rz y Ry en las probetas erosionadas 2 barridos en el eje x y 2 en el eje y de 10 mm.
- Figura 4.10 Esquema de corte de la muestra erosionada.
- Figura 4.11 Probeta sometida a un ensayo de desgaste erosivo y preparada metalográficamente.
- Figura 5.1 Acero AISI H13 a) H13-1A microestructura compuesta carburos globulares en una matriz ferrítica, dureza de 196 HV. b) H13-1B, dureza 313 HV c) H13-1C, dureza de 381 HV, d) H13-1F, dureza de 581 HV, en éstas últimas tres imágenes la microestructura está compuesta por

martensita revenida. Atacado por inmersión 5-10 segundos con nital (ácido nítrico 3 % y alcohol etílico de 97%) y pírcal (ácido pícrico 10 g y 100 ml de alcohol etílico) relación 1:1.

- Figura 5.2 Acero AISI P20 a) P20-1C, dureza de 398 HV microestructura compuesta de martensita revenida, b) P20-1D con endurecimiento superficial por medio de carburizado y martensita templada, c). Atacado por inmersión 5-10 segundos con nital (ácido nítrico 3 % y alcohol etílico de 97%) y pírcal (ácido pícrico 10 g y 100 ml de alcohol etílico) relación 1:1.
- Figura 5.3 Perfil de microdureza en el acero AISI P20 carburizado.
- Figura 5.4 Acero AISI H13 a) superficie del acero b) sección transversal atacada con nital al 3%.
- Figura 5.5 Partículas de arena sílica (SiO_2) de forma subangular.
- Figura 5.6 Análisis granulométrico de la arena sílica resultado de la homogenización de la arena, a) saco 3 y b) saco 4.
- Figura 5.7 Variación de la razón de erosión por el impacto de partículas de diferente tamaño a una presión de 1.38 bares
- Figura 5.8 Graficas del registro de la presión durante los ensayos de desgaste erosivo. a) Presión de 0.69 bares, b) presión de 1.38 bares.
- Figura 5.9 Probetas clasificadas como H13-1A ensayadas con aire a una presión de 1.38 bares y arena sílica con dispersión de tamaño de 106 a 425 μm . a)

Ángulos de impacto de 40, 30 y 20 grados, b) ángulo de impacto de 90, 75 y 60°.

Figura 5.10 Probetas clasificadas como H13-1F ensayadas con aire a una presión de 1.38 bares y arena sílica con dispersión de tamaño de 106 a 425 μm . a) ángulos de impacto de 40, 30 y 20 grados, b) ángulo de impacto de 90, 75 y 60°.

Figura 5.11 Efecto de la dureza con respecto a la razón de erosión a diferentes ángulos de impacto en el acero AISI H13, erosionado con arena sílica (SiO_2) con tamaños de partícula de 106 a 425 μm a una presión con aire seco de 0.69 bares, a) 20°, 30° y 40°, b) 60°, 75° y 90°.

Figura 5.12 Efecto de la dureza con respecto a la razón de erosión a diferentes ángulos de impacto en el acero AISI H13, erosionado con arena sílica (SiO_2) con tamaños de partícula de 106 a 425 μm y presión de aire 1.38 bares, a) 20°, 30° y 40°, b) 60°, 75° y 90°.

Figura 5.13 Efecto de la dureza con respecto a la razón de erosión a diferentes ángulos de impacto en el acero AISI P20, erosionado con arena sílica (SiO_2) con tamaños de partícula de 106 a 425 μm y presión de aire 0.69 bares, a) 20°, 30° y 40°, b) 60°, 75° y 90°.

Figura 5.14 Efecto de la dureza con respecto a la razón de erosión a diferentes ángulos de impacto en el acero AISI P20, erosionado con arena sílica (SiO_2) con tamaños de partícula de 106 a 425 μm y presión de aire 1.38 bares, a) 20°, 30° y 40°, b) 60°, 75° y 90°.

Figura 5.15 Efecto del ángulo de impacto en la razón a la erosión para los diferentes valores de dureza en el acero AISI H13. Erosionado con arena sílica

(SiO₂) con tamaños de partícula de 106 a 425 μm y presión de aire a) 0.69 bares b) 1.38 bares.

- Figura 5.16 Efecto del ángulo de impacto en la razón de erosión para los diferentes valores de dureza en el acero AISI P20. Erosionado con arena sílica (SiO₂) con tamaños de partícula de 106 a 425 μm y presión de aire a) 0.69 bares b) 1.38 bares.
- Figura 5.17 Resistencia a la erosión con respecto al ángulo de impacto para los aceros AISI H13 y AISI P20 con diferente valor de dureza.
- Figura 5.18 Sección transversal de la probeta H13-1A ensayada a un ángulo de impacto de 30° a una presión de aire de 1.38 bares.
- Figura 5.19 Acero H13-1A a diferentes ángulos de impacto 30° a) y b), 40° c) y d), 60° e) y f), a 90° g) y h). Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.
- Figura 5.20 Acero H13-1B, a diferentes ángulos de impacto 30° a) y b), 40° c) y d), 60° e) y f), a 90° g) y h). Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.
- Figura 5.21 Acero H13-1F, a diferentes ángulos de impacto 30° a) y b), 40° c) y d), 60° e) y f), a 90° g) y h). Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.
- Figura 5.22 Acero P20-1B, a diferentes ángulos de impacto, a 30° a) y b), a 60° c) y d), a 90° e) y f). Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.

- Figura 5.23 Acero P20-1D a diferentes ángulos de impacto, a 30° a) y b), a 60° c) y d), a 90° e) y f). Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.
- Figura 5.24 **Ra** promedio en las superficie erosionada de un acero AISI H13, a diferentes ángulos de impacto.
- Figura 5.25 **Ra** promedio en las superficie erosionada de un acero AISI P20, a diferentes ángulos de impacto.
- Figura 5.26 Acero H13-1A a diferentes ángulos de impacto a) 30° b) 60° y d) 90°. Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.
- Figura 5.27 Acero H13-1C a diferentes ángulos de impacto a) 30° b) 60° y d) 90°. Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.
- Figura 5.28 Acero H13-1F a diferentes ángulos de impacto a) 30° b) 60° y d) 90°. Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.
- Figura 5.29 Acero P20-1B a diferentes ángulos de impacto a) 30° b) 60° y d) 90°. Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.
- Figura 5.30 Acero H13-1A, a diferentes ángulos de impacto a) 30° b) 60° y d) 90°. Acero erosionado con arena sílica y aire seco a una presión de 1.38 bares.
- Figura 5.31 Perfil de dureza en el acero H13 con dureza vickers de 200 HV, a) ensayo realizado a al presión de 0.69 bares y b) ensayo realizado a la presión de 1.38 braes.
- Figura 5.32 Perfil de dureza en el acero H13 con dureza vickers de 600 HV, a) ensayo a al presión de 0.69 bares y b) ensayo a la presión de 1.38 bares.

Figura 5.33 Perfil de dureza en el acero P20 con dureza vickers de 200 HV, a) ensayo realizado a la presión de 0.69 bares y b) ensayo realizado a la presión de 1.38 bares.

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1.1 Propiedades de partículas abrasivas [17].
- Tabla 1.2 Efecto de la forma de la partícula en la erosión de un acero 1018, a un ángulo de 30° [10]
- Tabla 1.3 Efecto de la ductilidad, resistencia y dureza en el comportamiento de la erosión de un acero AISI-SAE 1020 [28].
- Tabla 1.4 Efecto de la ductilidad, resistencia y dureza en el comportamiento a la erosión de un acero AISI SAE 4340 [28].
- Tabla 2.1 Escala de las mallas en tamices empleados para determinar la distribución de tamaños de grano y número de fineza AFS GFN [35].
- Tabla 2.2 Ejemplo para calcular el AFS GNF[35].
- Tabla 2.3 Vida útil de materiales empleados para la fabricación de cajas de corazones [37].
- Tabla 3.1 Variación de masa después del ensayo de desgaste erosivo en aceros del tipo H13, 4140 y 9840
- Tabla 3.2 Dureza de las probetas del acero 4140 y masa removida después del ensayo.
- Tabla 3.3 Ensayo de erosión en el acero AISI H13

Tabla 3.4	Datos del ensayo de erosión en las probetas del acero AISI P20.
Tabla 4.1	Nomenclatura de los aceros AISI H13 y P20.
Tabla 4.2	Distribución de tamaños de partícula de arena sílica obtenidos en un análisis granulométrico la arena sílica.
Tabla 4.3	Matriz de ensayos realizados en los aceros AISI H13 y AISI P20 con 1000 g de arena sílica de 150 a 425 μm y una distancia de impacto de 50 mm.
Tabal 4.4	Condiciones del ensayo que se tomaron en cuenta para realizar la medición de los parámetros de rugosidad en las probetas.
Tabla 4.5	Probetas sometidas a microscopia óptica.
Tabla 4.6	Probetas sometidas a microscopía electrónica de barrido.
Tabla 4.7	Probetas sometidas a microdureza HV.
Tabla 5.1	Composición química del AISI H13 y AISI P20 (% en peso).
Tabla 5.2	Condiciones iniciales de rugosidad en las probetas del acero AISI H13 y AISI P20. Ra promedio.

Participación del autor en publicaciones de relevancia científica y tecnológica.

R. Colas, M. de la Garza, M. P. Guerrero Mata, Julian Rodriguez, y J. Cardenas. Study of Heat Treated Large Hot Rolled Steel Rings. 6th International Quenching and Control of Distortion Conference, September 2012 en Chicago, USA.

J. Herrera, D. Martinez, R. Gonzalez and Julián Rodríguez. Abrasive Wear in Hard Films Coated Dies in Hot Extrusión Aluminum. Quimica Hoy Chemistry Sciences, Volumen 2 No 2 pag 1-5. Enero-Marzo 2012

E. Rodriguez, M. Flores, A. Perez, R.D. Mercado, R. Gonzalez, Julian Rodriguez, S. Valtierra. Erosive Wear by silica sand don AISI H13 and 4140 Steels. Wear Volume 267, Issue 11, 2009.

Julián Rodríguez, D. Martinez, A. Perez, R. González , E. Rodríguez, S. Valtierra. ***“Erosion wear in heat treated tool steels used in core boxes at automotive foundries”***. Congreso Wear Materials. A celebrarse en Abril 2007 en Montreal Canada.

MAL Hernandez-Rodríguez, DI Martínez Delgado, R. González López, AL Pérez Unzueta, RD Mercado Solis, Julián Rodríguez. ***“Corrosive Wear Failure Analysis in a natural gas pipeline”*** A celebrarse en Abril 2007 en Montreal Canada.

Julián Rodríguez, Sergio Haro, Abraham Velasco, Rafael Colás. ***“Aging of cast Ni-base heat resisting alloy”***. International Journal of Cast Metals Research. Vol. 17 No. 3, (2004) pp 188-192 .

S. Haro, C Ramirez, E. Mendoza, Julian Rodríguez, R. Colás., “*Microstructural analysis of heat-resistant welded pipes*”. Materials Characterization. Vol. 51 (2003), pp 21-27.

Julián Rodríguez, Martha P. Guerrero, Rafael Colás, “*Crack Propagation in a hard faced AISI type 304 stainless steel*”. Materials Characterization. Vol. 51 (2003), pp 95-99.

Julián Rodríguez, Martha P. Guerrero, Rafael Colás “*Crack Propagation in Hardfaced AISI 304 Stainless Steel*”. Organizado por la Academia Mexicana de Materiales, Cancún México, Agosto de 2000. International Materials Research Congress.

Julian Rodríguez, S. Haro, A. Velasco, R. Colás., “*A Metallographic Study of Aging in a Cast Heat Resisting Alloy*”. Materials Characterization. Vol. 45 (2000), pp 25-32.

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Julián Rodríguez Hernández nació en la Cd de Monterrey Nuevo León, México el 19 de agosto de 1976 es hijo de José Antonio Rodríguez Martínez y Josefa Hernández Martínez, realizo sus estudios de licenciatura en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL siendo egresado de la carrera Ingeniero Mecánico Metalúrgico en el año de 1999, posteriormente realizo estudios de maestría en la FIME-UANL obteniendo el grado Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales en el año del 2001. Impartió cátedra en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del año 2000 al 2012. Realizo estancias industriales en las empresas HYLSA (ahora Ternium) y en la empresa NEMAK actualmente se encuentra laborando en la empresa FRISA FORJADOS desde el año 2007.