CAPÍTULO 4

EROSIÓN

4.1. Introducción.

La palabra "erosión" se deriva del latín "rodene", que significa roer o desgastar gradualmente [18].

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

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

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

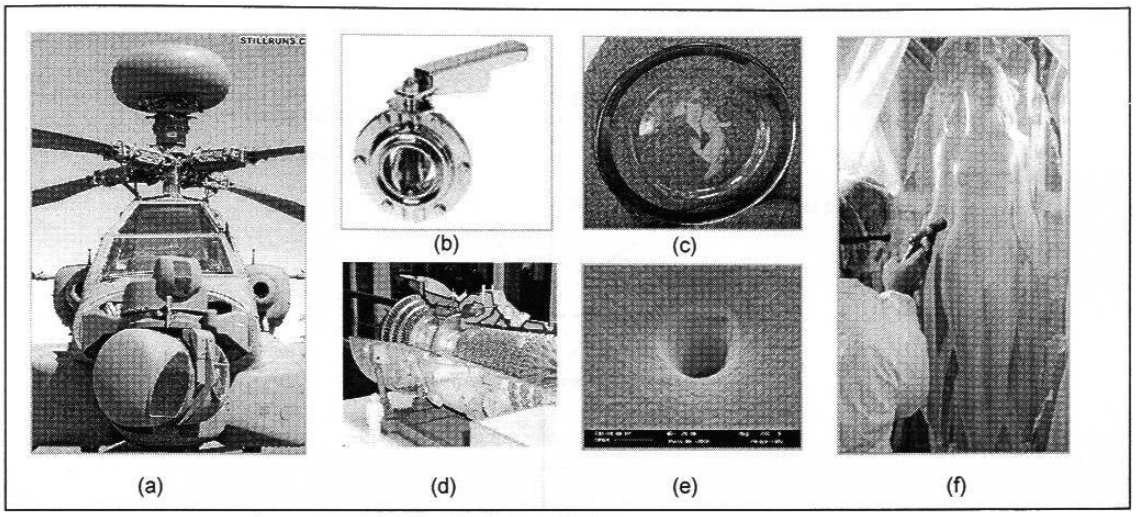


Fig. 4.1 Áreas donde se presenta la erosión.
(a) Desarrollos militares, (b) Manejo de fluidos con partículas, (c) Decoración, (d) Turbinas, (e) Micro maquinados, (f) Esculturas.

4.2 Desgaste erosivo por partículas sólidas.

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

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

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

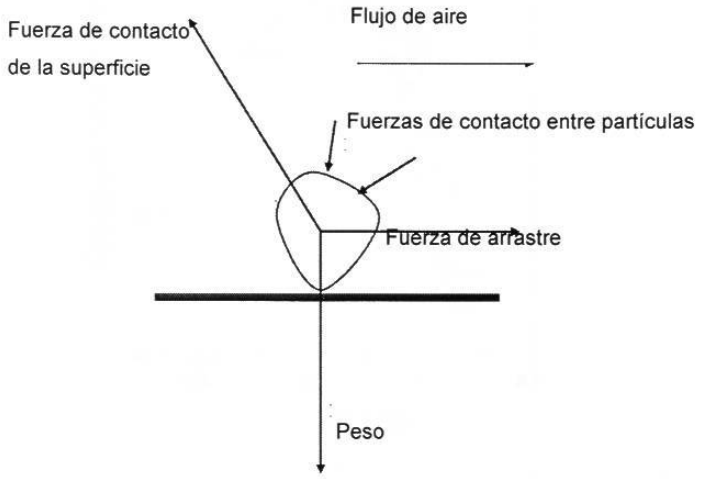


Fig. 4.2 Fuerzas de contacto partícula-superficie.

4.3 Propiedades de la partícula.

4.3.1 Dureza.

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

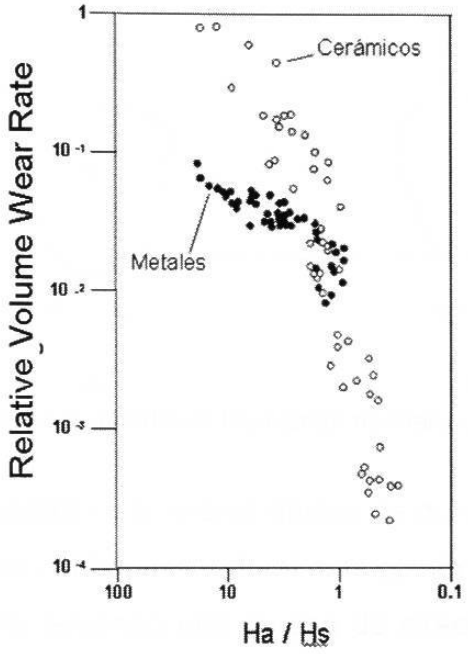


Fig.4.3 Desgaste para la relación de dureza partícula (Ha) – superficie (Hs) [12].

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

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

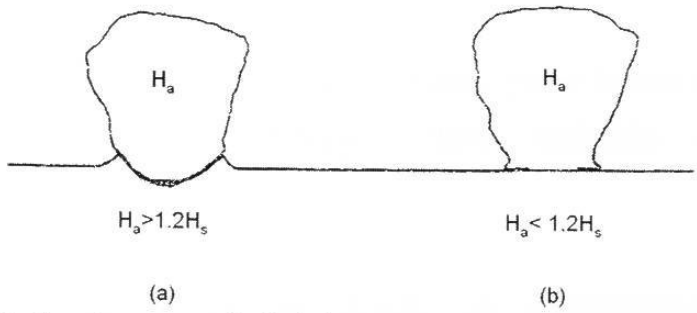


Fig. 4.4 Contacto entre una partícula bajo carga normal y una superficie plana [12].

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

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

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

4.3.2 Forma.

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

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

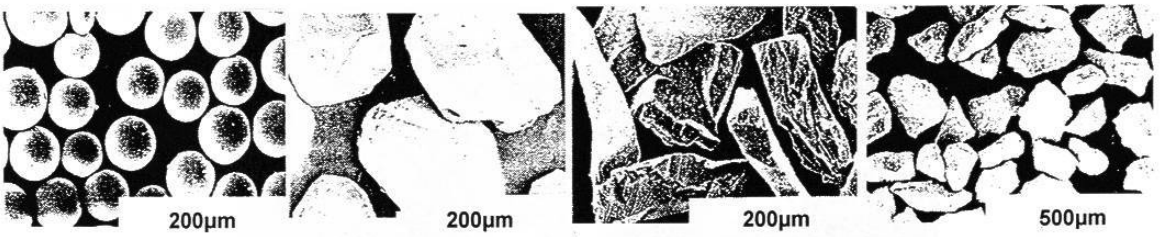


Fig. 4.5 Partículas Erosivas.
(a) Esferas de vidrio, (b) Carburo de Tungsteno, (c) Alumina, (d) Diamantes [22].

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

$$F = \frac{4\pi A}{P^2} \tag{4.1}$$

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

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

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

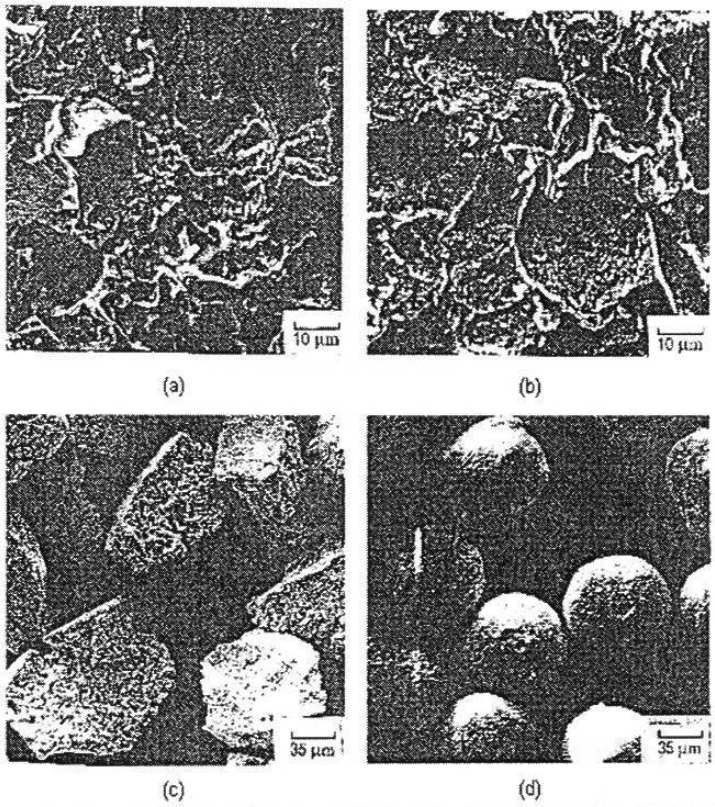


Fig. 4.6 Superficies de acero AISI 1020 erosionado [18].
a) Por partículas de acero angulares b) por partículas de acero esféricas. c) morfología de la partícula angular, d) Morfología de la partícula esférica.

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

Métodos como el "Spike Parameter–Quadratic fit" (SPQ) ha sido uno de los propuestos para describir la partícula por parámetros numéricos [23].
Stachowiak [23] realizó ensayos de erosión a ángulos de 90º en muestras de vidrio, utilizando cuatro formas de partículas. La angularidad de cada uno de los grupos de partículas fue clasificada por el método SPQ, en donde, los valores muy bajos pueden ser traducidos a partículas redondeadas, mientras que para partículas angulares corresponden valores altos de SPQ. La figura 4.7 muestra la correlación entre la angularidad de la partícula y la erosión obtenida [23].

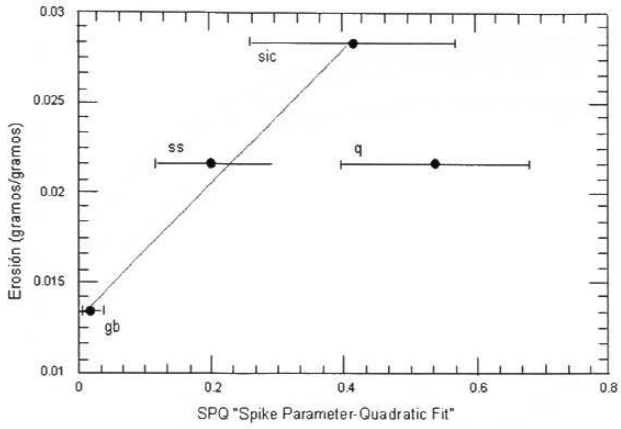


Fig. 4.7 SPQ "Spike-Parameter-Quadratic fit
(gb) Esferas de vidrio, (ss) Arena sílica, (q) Cuarzo (SiC) Carburo de Silicio.
(Tamaño de partículas en el intervalo de 250-300μm, partículas fueron de similar densidad)

4.3.3 Tamaño de la partícula.

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

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

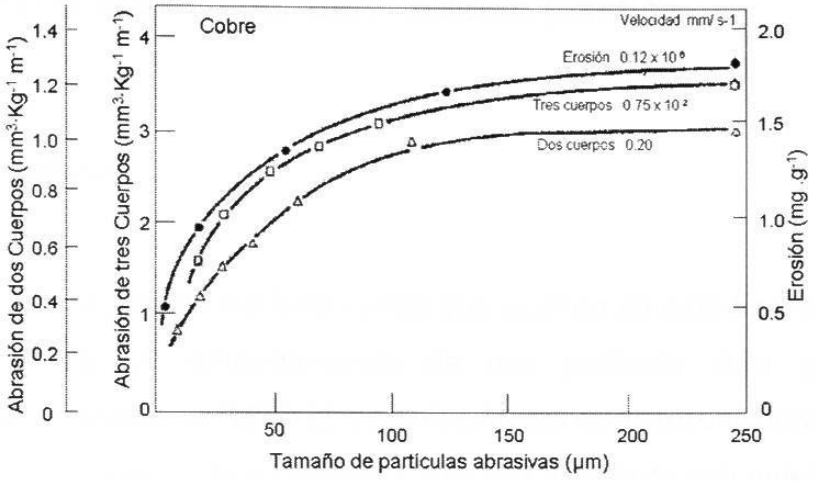


Fig. 4.8 Desgaste en función del tamaño de la partícula [24].
Desgaste de Cobre por partículas de SiC bajo los sistemas erosión (masa perdida / masa de abrasivo) y en abrasión de dos y tres cuerpos (volumen removido / (carga x distancia))

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

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

.

4.4 Desgaste erosivo por deformación plástica.

4.4.1 Mecanismo.

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

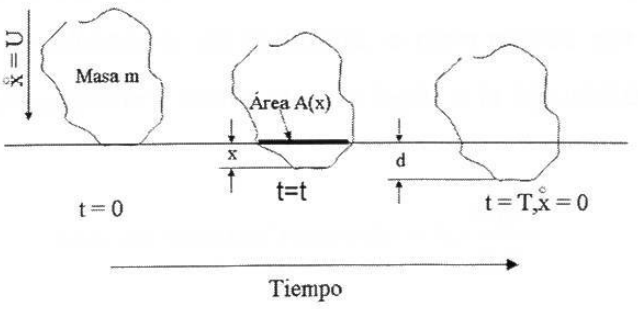


Fig. 4.9 Proceso de penetración de una partícula rígida sobre una superficie plana. Deformación plástica de la superficie, contacto inicial a un tiempo t=0, partícula en reposo a un tiempo t=T [12].

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

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

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

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

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

$$V = \int_0^d A(x)dx \tag{4.4}$$

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

$$V = \frac{mU^2}{2H} \tag{4.5}$$

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

$$masa\,del\,material\,removido = k\rho\frac{mU^2}{2H} \tag{4.6}$$

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

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

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

Donde la E es adimensional y la ecuación 4.7 será:

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

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

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

4.4.2 Ángulo de impacto.

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

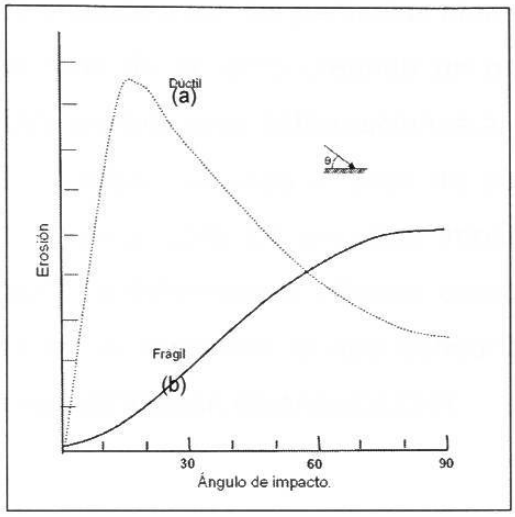


Fig. 4.10 Erosión con respecto al ángulo de impacto.
(a) Comportamiento dúctil, (b) comportamiento frágil [12].

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

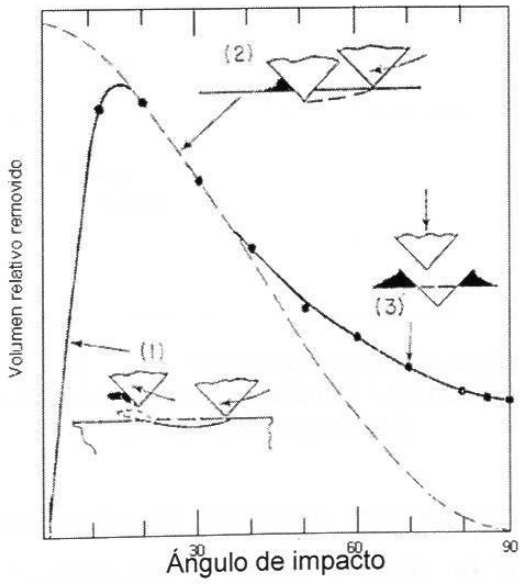


Fig.4.11 Mecanismos dúctiles propuestos con respecto al ángulo de impacto.
(1) microcorte, (2) apilamiento, (3) identación [24].

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

4.4.3 Daños causados en ángulos oblicuos.

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

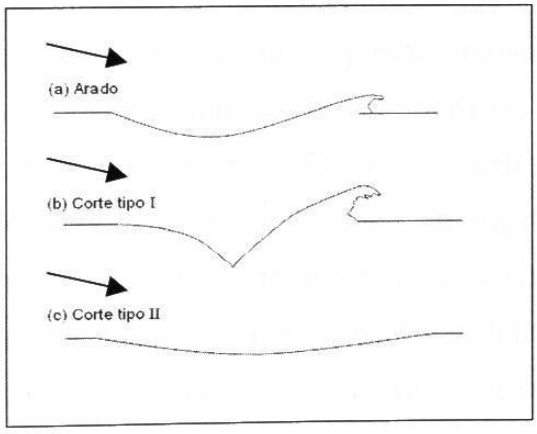


Fig. 4.12 Daño causado en materiales dúctiles.
(a)Arado causado por partícula esférica, (b) Corte tipo I por partícula angular, (c) Corte tipo II por partícula angular [12].

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

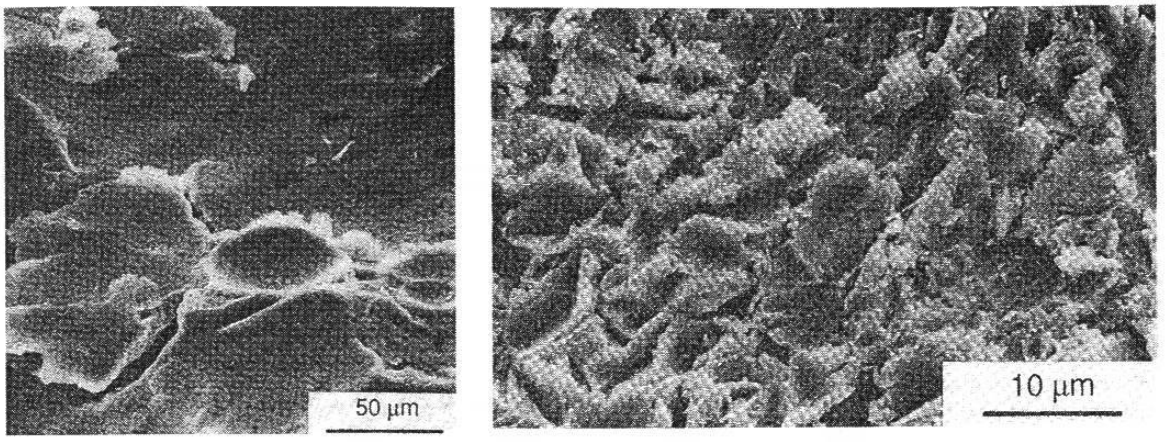
queda fuertemente deformado y futuros impactos de partículas en áreas cercanas, conducirán a la separación del material.

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

4.4.4 Forma de la partícula y ángulo de impacto.

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

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



(a) (b)

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

4.4.5 La dureza de la superficie

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

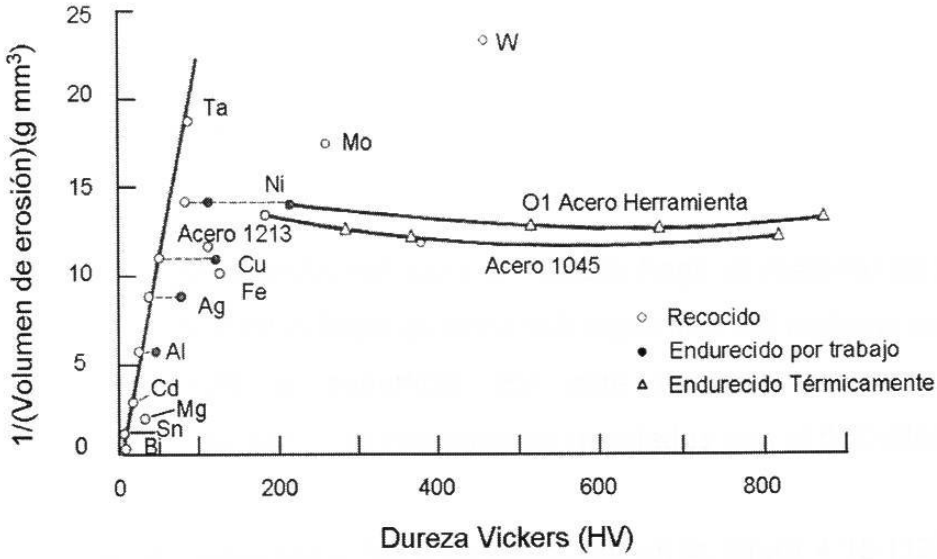


Fig. 4.14 Resistencia a la erosión contra dureza del material.
Metales puros y aceros con varios estados de endurecimiento por deformación y tratamiento térmico [24].

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

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

4.5 Desgaste erosivo por fractura frágil

4.5.1 Mecanismo.

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

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

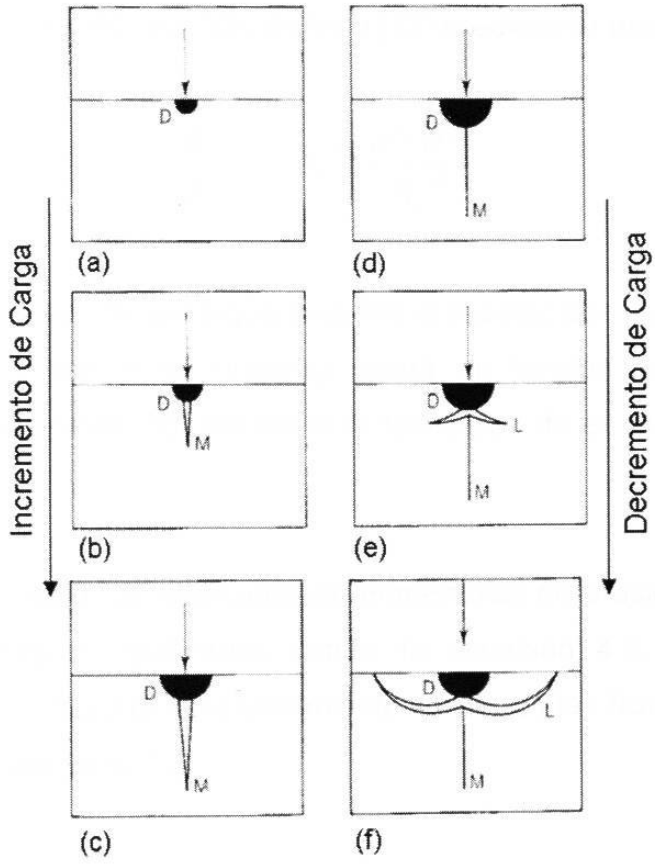


Fig. 4.15 Secuencia del mecanismo por fractura frágil [12].

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

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

150052

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

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

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

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

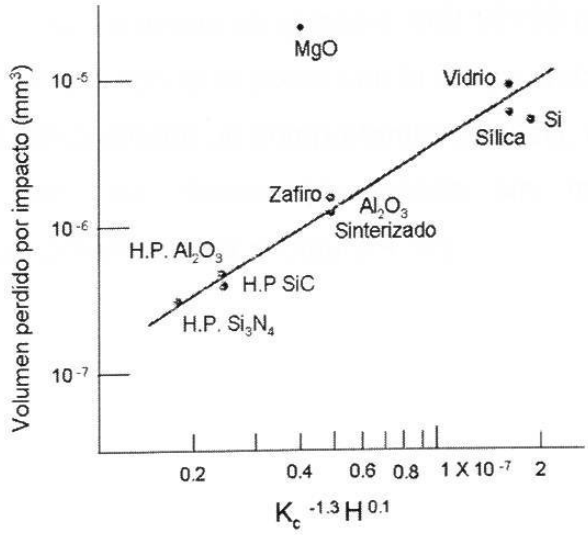


Fig. 4.16 Erosión en materiales frágiles.
Comparación de datos experimentales con el modelo analítico [12].

4.6 Transición dúctil-frágil

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

4.6.1 La dureza de la superficie.

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

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

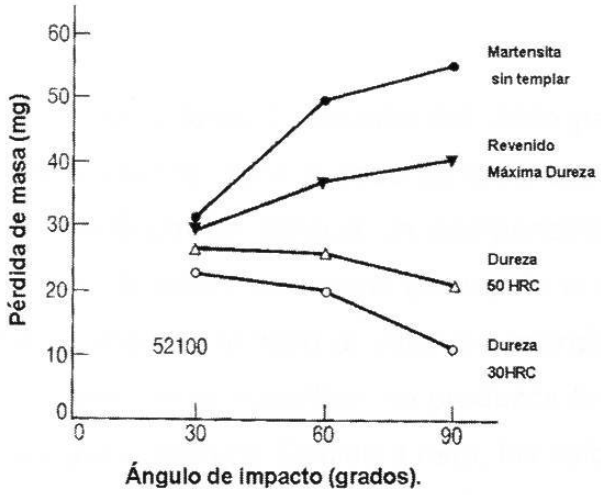


Fig. 4.17 Transición dúctil-frágil en acero AISI 52100
(1% C, 1.5 % Cr) con diferentes tratamientos térmicos en función del ángulo de impacto.
(Partículas de arena sílica impactadas a 153 m-s^{-1})

4.6.2 Energía Cinética.

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

Finnie [24] realizó un estudio de las erosiones en probetas de vidrio causadas por partículas de carburo de silicio en tamaños de 9, 21 y 127 μm. La prueba

fue realizada a ángulos de impacto de 0 a 90º y a una velocidad de partícula de 136 $m \cdot s^{-1}$.

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

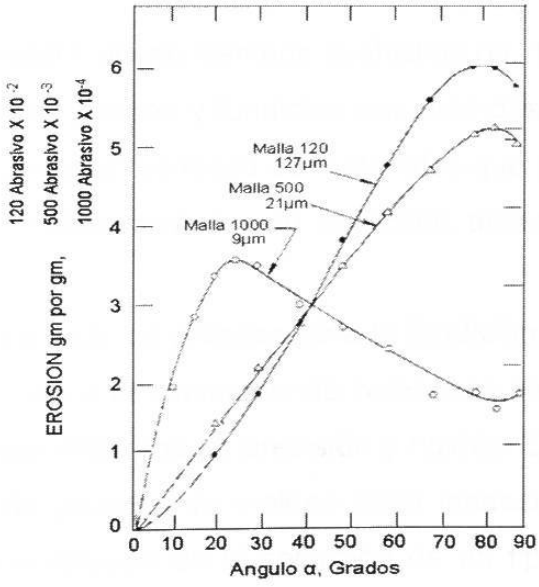


Fig.4.18 Transición dúctil frágil.
Escala de erosión 9 µm (malla 1000), $X10^{-4}$. Escala de erosión 21 µm (malla 500), $X10^{-3}$. Escala de erosión 127 µm (malla 127), $X10^{-2}$ [24].