

# INTRODUCCIÓN A LA EROSIÓN DE MATERIALES

D. PEÑA

Grupo de Investigaciones en Corrosión-GIC, Universidad Industrial de Santander  
Bucaramanga, Colombia  
e-mail: dypena@uis.edu.co

---

## RESUMEN

En este artículo se examinan los dos principales mecanismos de erosión analizando a su vez, los principios básicos de remoción del material, los cuales contribuyen posteriormente a una falla catastrófica del material bajo condiciones específicas. Estos mecanismos de desgaste del material por remoción dúctil y frágil fueron analizados a la luz de un estudio experimental con recubrimientos de Ni-Cr-WC en un lecho fluidizado con partículas de alúmina de 150  $\mu\text{m}$  de diámetro promedio.

---

## INTRODUCCIÓN

La erosión es una forma de desgaste de un material que se produce cuando un flujo de partículas golpea una superficie. El impacto de cada partícula contra la superficie produce un daño local permanente, el cual conlleva la remoción del material por medio de diferentes mecanismos. Esto puede ser por deformación micromecánica, por fractura ó por una combinación de ambos.

El proceso de erosión esta influenciado por varios factores, entre los cuales se cuentan las propiedades y microestructuras del material, las condiciones de exposición, y las características físicas y químicas del abrasivo. La combinación de todos esos factores da como resultado que las velocidades de erosión sean peculiares para un conjunto de condiciones.

En la industria, se han reportado diferentes situaciones donde la erosión ha sido un problema: turbinas a gas y vapor, equipos neumáticos y en procesos con lechos fluidizados. Los costos generados por estos problemas alcanzan millones de dólares al año en todo el mundo y por lo tanto, es vital entender el comportamiento de los materiales y los

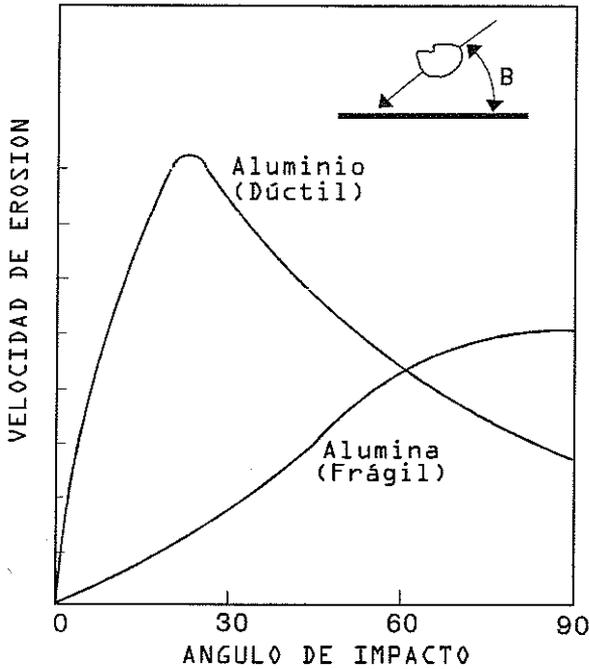
mecanismos de daño, para así poder seleccionar el material correcto y reducir costos en un determinado proceso.

## EROSIÓN POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA

En principio, hay dos mecanismos simples que son la esencia de este proceso. En materiales dúctiles (metales), el impacto de una partícula causa severa deformación plástica localizada y en materiales frágiles, la fuerza del agente erosionante causa el agrietamiento, fractura y desprendimiento de pequeñas partes del material.

Para el primer caso, el mecanismo es común para materiales dúctiles y la geometría de la deformación, debido al impacto del abrasivo, depende de la velocidad de impacto (esta puede estar entre 1 y 600 m/s), la forma y orientación de la partícula y del ángulo de impacto.

Generalmente se dice que la velocidad máxima de erosión ocurre a bajos ángulos de impacto, entre 15 y 30°, para materiales dúctiles (dependiendo del tipo de aleación) y de 90° para materiales frágiles<sup>1</sup>. La Figura 1 muestra cómo es este comportamiento para aluminio y alúmina.



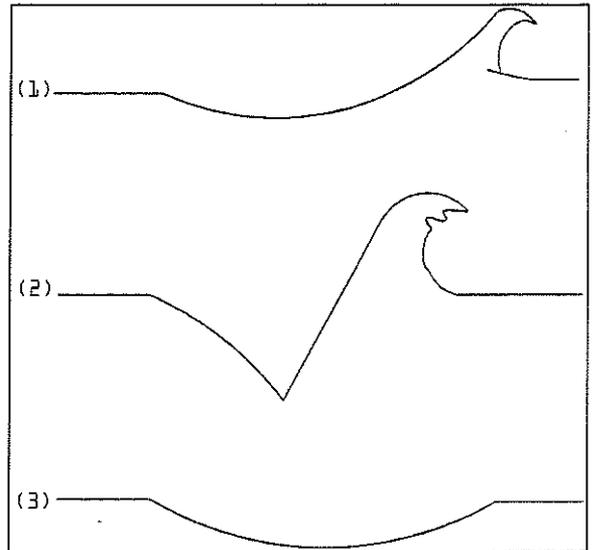
**FIGURA 1.** Variación esperada de la velocidad de erosión con el ángulo de impacto <sup>1</sup>.

El anterior comportamiento no necesariamente se cumple para algunos materiales cerámicos y “frágiles” bajo determinadas condiciones. En un estudio<sup>2</sup> se observó que reduciendo el tamaño del abrasivo (carburo de silicio) desde 125 μm a 9 μm, el ángulo de máxima erosión se movió desde 90° a cerca de 25°.

El daño que resulta de un simple impacto del erodente puede ser clasificado en tres grupos<sup>3,4</sup>: (a) cráteres en forma de indentación (ángulos entre 45 y 90°), donde un ángulo de impacto de 90° favorece este tipo de daño, (b) cráteres que causan desprendimiento de fragmentos del material, esto sucede cuando el ángulo está entre 20 y 45° y (c) cráteres con formación de bordes o labios, para ángulos menores de 20°.

En un estudio realizado en metales<sup>5</sup>, a un ángulo de impacto de 30°, se observaron tres tipos básicos de daño, como se puede ver en la Figura 2. En este caso, las partículas redondas deforman la superficie por medio de un desplazamiento del material hacia un lado y al frente de la partícula. Para un abrasivo en forma angular, hay dos modos de deformación: el corte tipo I, el cual se debe a la rotación hacia adelante de la partícula, por lo tanto la remoción del material se debe a la formación de un

“borde”, el cuál es vulnerable a posteriores impactos. En el corte tipo II, el abrasivo rota hacia atrás, causando una acción de maquinado en la superficie. En general, el tipo I es más común que el tipo II.



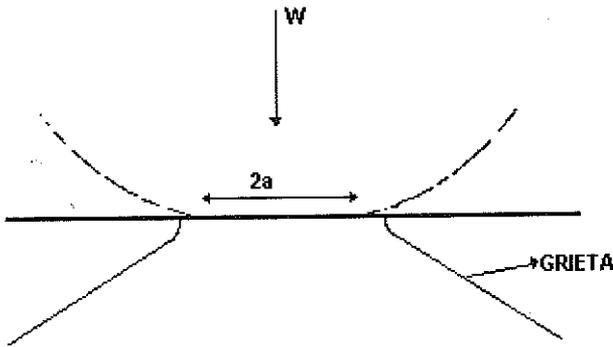
**FIGURA 2.** Sección transversal mostrando las típicas formas de daño. Dirección de impacto de izquierda a derecha. (1) deformación rasante, (2) corte tipo I y (3) corte tipo II <sup>5</sup>.

Cuando numerosas partículas golpean un metal, en ángulos normales, se produce una superficie rugosa, por lo tanto, la situación se complica aún más. Algunos mecanismos han sido sugeridos para describir esta situación, los cuáles incluyen endurecimiento por trabajado y fragilización, fractura de las partículas con flujo radial de los fragmentos, extrusión de la superficie, delaminación de la subsuperficie, rotación inicial de las partículas, fatiga a bajos ciclos y fusión entre otros.

Finnie<sup>6</sup> describió este proceso como una continua “demolición” de la superficie, causando que la remoción del material vulnerable sea por fractura dúctil. El material extruido es similar a hojuelas, o según la descripción de Levy<sup>7</sup>, costras (platelets), lo cuál es consistente con los conceptos de delaminación en el estudio del desgaste avanzado.

### EROSIÓN POR FRACTURA FRÁGIL

En este mecanismo, el material es removido de la superficie por la formación e intersección de grietas. La extensión de la grieta debido al impacto del erodente es más severa cuando el impacto es normal y la erosión bajo estas condiciones se acelera. La Figura 3 muestra un caso típico de formación de una grieta, donde la erosión ocurre por fractura frágil.



**FIGURA 3.** Geometría de una grieta de cono Hertziana formada por una esfera cargada normalmente sobre la superficie de un material frágil<sup>7</sup>.

Existen dos modelos propuestos para describir la erosión de materiales frágiles<sup>8</sup>. En el primero, la pérdida de material ocurre principalmente por el desarrollo y unión de grietas de cono Hertziana (para el caso de indentadores romos) y en el segundo modelo la pérdida ocurre por la unión de grietas laterales (para el caso de indentadores puntiagudos).

Para el primer caso, cuando una esfera presiona una superficie plana bajo una carga normal W, producirá un área de contacto de radio a, y la ecuación de Hertz, en este caso es la siguiente:

$$a = (3wa/4E)^{1/3} \quad (1)$$

donde E es el módulo elástico. El esfuerzo de tensión alcanza un máximo valor en el borde del círculo de contacto como sigue:

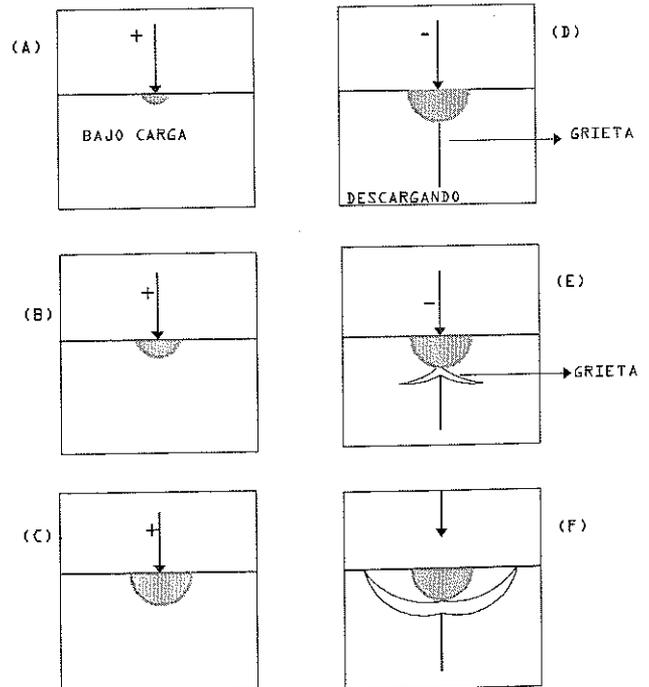
$$\sigma_{max} = (1 - 2\nu)p_{mean} \quad (2)$$

Donde  $P_{mean}$  es el esfuerzo normal principal ejercido sobre el área de contacto ( $p_{mean} = w/\pi a^2$ ) y  $\nu$  es el radio de Poisson.

Cuando el esfuerzo normal alcanza un valor crítico, una grieta se inicia fuera del círculo de contacto, y rápidamente se propaga para formar un grieta de cono Hertziana; este comportamiento se puede apreciar con ayuda de la Figura 3.

El volumen removido por el impacto de una partícula es proporcional al volumen confinado por el anillo exterior de la grieta y la profundidad de la grieta del anillo inicial<sup>9</sup>.

En el segundo caso, la formación y crecimiento de zonas plásticas determina los tipos de grietas que se forman durante el impacto<sup>10</sup>. Bajo carga, una zona deformada plásticamente se forma bajo el indentador, y eventualmente a una carga límite, una grieta promedio se propagará hacia abajo desde la base de la zona plástica, ver Figura 4.



**FIGURA 4.** Diagrama esquemático del crecimiento de una grieta durante el impacto de una partícula aguda. El signo (+) indica bajo carga y el signo (-) descarga<sup>10</sup>.

La grieta no remueve material, pero degrada la resistencia del material. Cuando se descarga, los esfuerzos residuales provocan la propagación de grietas laterales. Estas grietas se inician desde la zona plástica, crecen paralelamente a la superficie del material y luego se propagan hacia la superficie libre, causando la pérdida de un pequeño pedazo de material (chip).

Estas son las grietas que cuentan para la mayoría de pérdida del material durante la erosión. Estas grietas sólo se forman cuando la carga normal sobre el indentador excede un valor crítico,  $W^*$ , de acuerdo a:

$$W^* \propto (K_c / H)^3 K_c \quad (3)$$

donde  $K_c$  es la tenacidad a la fractura y  $H$  la dureza.

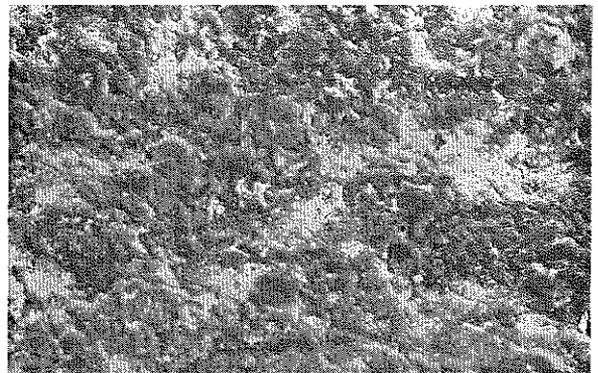
Cabe anotar que la deformación plástica no sólo se observa en materiales dúctiles sino también en materiales duros frágiles. Este fenómeno ha sido observado en la erosión de cerámicos, y recientemente se ha empezado a estudiar su importancia en la formación de grietas y pérdida de material desde la superficie, especialmente para el caso de partículas erosivas angulares.

## EROSIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ METÁLICA

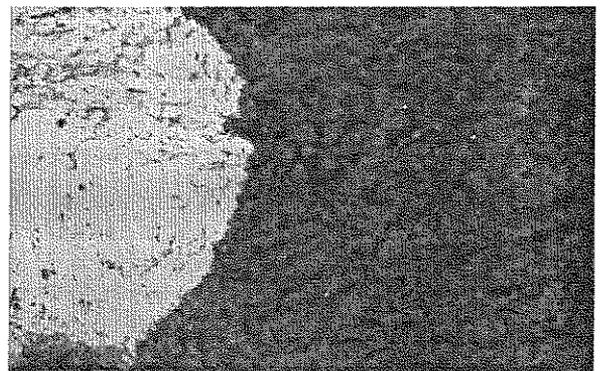
Estos tipos de materiales están siendo utilizados a elevadas temperaturas donde los efectos sinérgicos del desgaste por erosión y corrosión pueden ocasionar grandes daños en los equipos. Tales recubrimientos tienen el potencial de reducir el desgaste erosivo debido a que incorporan partículas duras cerámicas en una matriz resistente a la corrosión.

En un estudio<sup>11</sup> llevado a cabo con un compuesto de matriz metálica que consistió de partículas de carburo de tungsteno (diámetro promedio de 150  $\mu\text{m}$ ) en una matriz de 13%Ni-Cr-B-Si fabricado por Eutectic-Castolin S.A., expuesto a un flujo de partículas erosivas de alúmina a un ángulo de impacto normal y a velocidades entre 1 y 5 m/s, se observó la transición de un comportamiento dúctil a uno frágil para el carburo de tungsteno y un severo daño para la matriz metálica.

En la Figura 5 se observa el efecto del impacto del abrasivo sobre el mecanismo de erosión a diferentes velocidades de impacto. A bajas velocidades de impacto se observa que la matriz sufre una deformación plástica (comportamiento dúctil) y altas velocidades de impacto, aunque no cambia el aspecto del daño producido sobre la matriz, existe un aumento en la velocidad de erosión debido a que las partículas de refuerzo (carburo de tungsteno) sufren fractura frágil debido a la continua formación de grietas de tipo Hertziano, las cuales debilitan el material, y por subsecuentes impactos, producen la remoción del material protector.



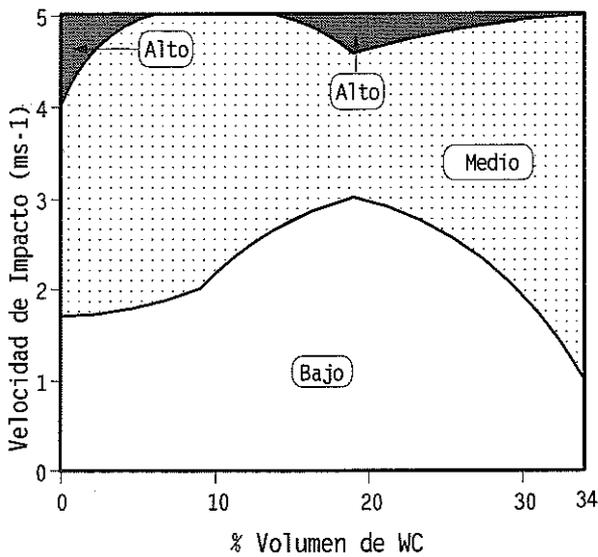
(a) Matriz metálica de 13%Ni-Cr-B-Si. 2500x.



(b) Partícula de carburo de tungsteno en una matriz de 13%Ni-Cr-B-Si. 1000x.

**FIGURA 5.** Superficie de un recubrimiento de 13%Ni-Cr-B-Si-9%WC erosionado por partículas de alúmina a temperatura ambiente y diferentes velocidades de impacto. (a) 1 m/s, (b) 5 m/s.

VARIABLES como la temperatura del proceso, velocidad de impacto, tamaño y tipo de abrasivo y ángulo de impacto influyen grandemente sobre la naturaleza del daño producido sobre el material. Stack y Peña<sup>12</sup> identificaron varios regímenes de erosión para materiales compuestos, con los que propusieron una serie de "mapas de erosión", los cuales mostraron la transición entre los diferentes regímenes como función de las variables utilizadas en el estudio; uno de esos mapas se puede observar en la Figura 6.



**FIGURA 6.** Mapa de erosión que muestra las transiciones entre las diferentes áreas de daño como función de la fracción de volumen de WC y la velocidad de impacto de la alúmina a 25°C.

Los niveles de daño fueron divididos en tres categorías (los límites son puramente subjetivos y dependen sólo de los requerimientos del proceso de operación), bajo, medio y alto. En cierta forma, el mapa sugiere, de acuerdo a las condiciones de exposición, que existen fracciones de volumen de WC donde la velocidad de erosión fue "alta" y por lo tanto, el refuerzo sufrió alto grado de fractura, contribuyendo así, a la pérdida total de material.

Estos límites pueden cambiar como función de la temperatura debido a la influencia del tipo de óxido que se forma, de las propiedades de las partículas erosivas y del medio ambiente corrosivo, lo cual será tema de investigación en el futuro.

## CONCLUSIONES

La remoción de material desde un material compuesto expuesto a la acción de partículas erosivas duras, se realiza por deformación plástica de la matriz a bajas y altas velocidades de impacto del abrasivo.

En cuanto al refuerzo (carburo de tungsteno, WC), la remoción se realiza por deformación plástica a bajas velocidades de impacto y por fractura frágil a altas velocidades de impacto.

Un mapa de erosión para el desempeño de compuestos de matriz metálica, construido a partir de datos experimentales es una herramienta sencilla para optimizar los parámetros de los materiales compuestos a temperatura ambiente.

Existe un gran potencial de aplicación de los mapas de erosión para cualquier material y bajo condiciones "específicas" del proceso. Además, otros mapas de desempeño se pueden construir teniendo en cuenta el tamaño del abrasivo, temperatura y tipo de material.

## ABSTRACT

Solid particle erosion occurs on exposed components in many different types of equipment such as heat exchangers in fluidized bed combustors and pulverized coal boilers, steam-turbine blades in electric generation plants, coal gasifier internals, etc. Costs caused by erosion problems reach millions of dollars a year all over the world, therefore, it is important to know the behaviour of the materials and the mechanisms of damage to choose the right material and reduce the production costs in the process.

This paper reviews the two main mechanisms of damage under erosion conditions and the basic removal of material from the surface which, contribute to catastrophic failure of the component in service.

Ni-Cr-WC coatings were tested in laboratory simulating the fluidized bed conditions, using alumina particles as erodent, to study and prove the material damage for ductile and fragile mechanisms.

**BIBLIOGRAFÍA**

1. I.M. Hutchings, Tribology, Edward Arnold Ed., :171- 102, 1992.
2. I.M. Hutchings, Transitions, Threshold effects and erosion maps, Key Engineering Materials, 71:75-92, 1992.
3. I. Finnie, Erosion of metals, Proceedings Corrosion-Erosion of Coal Conversion System Materials Conference, :429-443, A. Levy Ed., Berkeley (California), 1979.
4. P. Hedenqvist, M. Olsson, Solid particle erosion of titanium nitride coated high speed steel, Tribology International, 23(3): 173-181, 1990.
5. I.M. Hutchings, Mechanisms of the erosion of metals by solid particles, Erosion: Prevention and Useful Applications, 59-76, ASTM STP 664, W.F. Adler Ed., 1979.
6. I. Finnie, A. Levy, D.H. McFadden, Fundamental mechanisms of the erosive wear of ductile metals by solids particles, Erosion: Prevention and Useful Applications, ASTM STP 664, :36-58, W.F. Adler Ed., 1979.
7. A. Levy, Solid particle erosion and erosion-corrosion of materials, ASM international, :13-21, 1995.
8. H. Conrad, D. McCabe, G.A. Sargent, Effects of microstructure on the erosion of WC-Co alloys, Proceedings of the conference: Science of Hard Metals, : 775-796, 1981.
9. I. Finnie, Some Reflections on the past and future of erosion, Wear, 186-187(1): 1-10, 1995.
10. S.M. Wiederhorn, Erosion of ceramics, Proceedings of the Corrosion/Erosion of Coal Conversion System Materials Conference, :444-479, A. Levy Ed., Berkeley (California), 1979.
11. M.M. Stack y D. Peña, Temperature and volume fraction effects on the erosion-oxidation of Ni-Cr/WC metal matrix composite, Microscopy of oxidation 3, : 757-765, S.B. Newcomb and J.A. Little - The Institute of materials, 1997.
12. M.M. Stack y D. Peña, Solid particle erosion of Ni-Cr/WC metal matrix composites at elevated temperature: construction of erosion mechanism and process control maps, Wear, 203-204: 489-497, 1997.