

# SIMULACIÓN DE EROSIÓN EN UN RECUBRIMIENTO USADO EN INDUSTRIAS GENERADORAS DE ENERGÍA

Darío Yesid Peña Ballesteros<sup>1</sup>, Henry Arguello Fuentes<sup>2</sup>, Carlos Eusebio Laguado Fernández<sup>3</sup>

## RESUMEN

En este trabajo se realiza la descripción del fenómeno de erosión en un recubrimiento multicapas de fases dúctil y frágil, expuesto a impactos sucesivos de partículas sólidas. Mediante simulación numérica se representó el fenómeno erosivo y se mostraron los resultados por medio de una animación, tablas y gráficas en la cual se visualizó en tiempo real los diferentes perfiles de espesor formados en un recubrimiento. Además, se creó un escenario de simulación que genera un recubrimiento con distribución aleatoria de granos de refuerzo WC (Carburo Wolframio) con características diferentes para cada simulación. La simulación permitió al Ingeniero Metalúrgico encargado de crear el recubrimiento, obtener información del mismo y dar una idea de qué tipo de distribución inicial debía tener este con concentraciones %WC. A su vez permitió al Ingeniero Metalúrgico observar cómo fue la tendencia de deterioro de este recubrimiento a medida que el tiempo de exposición aumenta.

**Palabras clave:** Simulación, Fenómeno de Erosión, Modelo Base Ajustado, Recubrimiento Multicapa.

## ABSTRACT

In this paper it is described the phenomenon of erosion in a multi-layer coating of ductile and brittle phases when exposed to successive impacts of solid particles. By numerical simulation was performed the erosion phenomenon and results were shown by means of an animation, tables and graphics with different profiles of thickness that it get formed in the coating and that are visualized in real time. However, a simulation scene can be created in which a coating with distribution of reinforcement grains WC (tungsten carbide) with different characteristics is generated for each simulation. The simulation allowed the metallurgical engineer that is in charge of creating the coating, obtain information about it and give an idea of the type of initial distribution of the coating that must have this with the concentrations of %WC. In turn it allowed the metallurgical engineer observe as was the deterioration tendency of this multi-layer coating as the exposure time increases.

**Keywords:** simulation, phenomenon of erosion, adjusted base model, multi-layer coating.

1 Ph.D. en Corrosión. Profesor Asociado Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga - Colombia. e-mail: dypena@uis.edu.co

2 Máster en Potencia Eléctrica. Profesor Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga - Colombia. e-mail: henarfu@uis.edu.co

3 Ingeniero de Sistemas e Informática. Grupo de Investigaciones en Corrosión (GIC) y Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB), UIS. Bucaramanga - Colombia. e-mail: carlos.laguado@correo.uis.edu.co

## 1. INTRODUCCIÓN

En muchas aplicaciones industriales, en particular, las petroleras y aquellas empresas de generación de energía que implementan sistemas de combustión en lechos fluidizados utilizados en las centrales térmicas europeas exponen parte de su infraestructura a entornos erosivos siendo este un mecanismo de daño muy serio que desencadena fallas estructurales de los materiales y perjuicios financieros, al recurso humano y al ambiente.

Las partículas sólidas presentes en el fluido de lechos fluidizados (arena caliente como material de suspensión para quemar combustible y mejorar la eficiencia de su combustión) golpean en el material generando la remoción de este. Para proteger el metal de la erosión es necesario contar con un sistema de recubrimientos con alta resistencia a la erosión, que pueden ser materiales dúctiles (suaves) ó frágiles (duros) con diferentes velocidades de erosión [1].

Una solución alternativa es contar con un recubrimiento multicapas compuesto por un material dúctil reforzado con un material frágil de granos WC (*Carburo Wolframio ó Carburo Tungsteno*) dispersados en la matriz dúctil con concentraciones que varían ascendentemente desde el material base hasta la superficie de recubrimiento que va a estar expuesto al entorno erosivo [2], este tipo de recubrimiento que puede ser utilizado en un lecho fluidizado permite proteger el material de la erosión y a su vez prolongar el tiempo de vida útil [9].

Usar simulación numérica para estimar la erosión en un recubrimiento multicapas, sirve para estudiar el fenómeno de erosión y su vez, se convierte en una nueva alternativa de prolongar la vida útil del material y disminuir daños en su estructura. Esta alternativa de estimación se hace más eficiente, utilizando en la simulación un nuevo modelo de erosión llamado Modelo Base Ajustado (MBA), que calcula pérdidas de espesor de la superficie del recubrimiento a diferentes tiempos de exposición y se analizan los resultados simulados con los obtenidos en el laboratorio para establecer la eficiencia del modelo y la aproximación de los datos.

En la primera parte de este trabajo se presenta la revisión bibliográfica de modelos de erosión, se identifican las variables características de la partícula erosiva, el material expuesto a la erosión, se analiza el uso de un Modelo Base y los resultados que se obtiene al ser utilizado en la simulación; en la segunda parte se plantea una función matricial que permite relacionar la velocidad de erosión, tiempo de ejecución del modelo,

tiempo de exposición del recubrimiento, diámetro de la partícula, se encuentra una Región Base Ajustada (RBA) que es utilizada en el Modelo Base Ajustado (MBA) citado más adelante, se establece una relación de proporcionalidad para los modelos de erosión dúctil, frágil y dúctil-frágil (multicapa) y se describen los diferentes eventos de impacto posibles en la simulación; y en la última parte se describe la composición del recubrimiento, los elementos de la animación y sus dimensiones, se evalúan los resultados simulados, y se analiza su proximidad mediante funciones lineales y una prueba de ajuste mediante la distribución t-student.

## 2. METODOLOGÍA

Como parte inicial del trabajo de investigación se realizó una revisión bibliográfica para estudiar los diferentes modelos de erosión y la relación que existe entre la velocidad de erosión y el tipo de material que será erosionado. En un recubrimiento multicapas las velocidades de erosión de un material dúctil y un material frágil son diferentes bajo las mismas condiciones [1].

El modelo base para este trabajo de investigación y que más adelante será descrito en la ecuación (2) se basó en estudios realizados por Ian Finnie [7] en la universidad de California, que han servido como principio para modelar la erosión de materiales frágiles y dúctiles. Este estudio consistió en la obtención de una fórmula que relaciona la pérdida de material (pérdida de peso) y el ángulo con que impactan las partículas sólidas al material metálico. La expresión usada para calcular la velocidad de erosión bidimensional [7] es.

$$E=K*(v^n)*f(90^\circ) \quad (1)$$

$K$  es una constante,  $v$  es la velocidad de la partícula,  $n$  es el exponente de velocidad (2 a 3 para dúctiles, 3 a 5 para frágiles) y  $f$  es la función del ángulo de impacto (relativo a la superficie). Según Ian Finnie [7] la erosión de materiales dúctiles (la mayoría de los metales) muestra un máximo de ángulo de impacto de 20°-30°, mientras que la erosión de materiales frágiles es muy alta a una incidencia normal (ángulo de 90°).

### 2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el modelo trabajado por J. Alban. y C. Christian [2] y que fue implementado en la simulación de esta

investigación, se encontraron dos problemas muy significativos:

- Para diámetros de partícula en intervalos de [300-590]  $\mu\text{m}$  y para velocidades de partícula [1-20] m/s los valores calculados de la velocidad de erosión no representan apropiadamente los valores obtenidos en la parte experimental. Se tenía conocimiento de la aproximación de los valores simulados a los experimentales con errores muy bajos para datos específicos (diámetros de 50, 150, 280, 600  $\mu\text{m}$ ), pero para valores intermedios (280-600)  $\mu\text{m}$  los resultados no coincidían con los obtenidos en las pruebas de laboratorio del trabajo de Doctorado de Peña D. [9].
- El modelo matemático encontrado solo calcula la pérdida de espesor para un material dúctil y no se tiene un modelo de erosión para un material frágil, debido a que la solución alternativa es contar con un recubrimiento multicapa (material dúctil y frágil) y sus correspondientes modelos de erosión.

## 2.2 PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

Se estudió el efecto que tiene el tiempo de exposición del recubrimiento en el desgaste del mismo, y así establecer un patrón de tiempo de ejecución del modelo (milisegundos) que permitiese predecir la erosión a cualquier tiempo de exposición (horas) definido este al inicio de la simulación. Una vez establecido un patrón de tiempo para los datos específicos de diámetro (50, 150, 280, 600  $\mu\text{m}$ ) y de velocidad (1, 3, 5 m/s), se encontraron tendencias lineales para valores intermedios de [50-150]  $\mu\text{m}$ , de [150-280]  $\mu\text{m}$ , y una tendencia logarítmica de [280-600]  $\mu\text{m}$ . Una vez identificadas las tendencias, se creó una función matricial que relaciona la velocidad de erosión a medida que incrementa el tiempo de exposición con el diámetro de la partícula, y el tiempo de ejecución del modelo. Además, se mantuvieron valores de pérdida de espesor aproximados a los experimentales entre [50-280]  $\mu\text{m}$ , y se obtuvo una región de estabilidad progresiva para valores entre [280-600]  $\mu\text{m}$  que indicó una leve tendencia creciente de la velocidad de erosión a medida que incrementa el diámetro de la partícula, así como ocurre en las pruebas realizadas en el laboratorio. De esta manera, se cuenta con una función con respecto al tiempo de ejecución que predice velocidades de erosión para cualquier tiempo de exposición, y se menciona en el Modelo Base Ajustado (MBA) de la ecuación (3) [Laguado Carlos].

Una vez ajustado el modelo de erosión dúctil (MBA) con una tendencia de erosión muy aproximada a la obtenida en el laboratorio, se generó la posibilidad de encontrar una relación en el cálculo de erosión para materiales dúctiles y frágiles por medio de un factor de proporcionalidad entre estos modelos matemáticos apoyados por los resultados obtenidos en las investigaciones [3] y [5] que son mencionadas en la sección 2.6.

## 2.3 MODELO BASE (MB)

En la Figura 1 se muestra el problema encontrado al utilizar este modelo base que representa una tendencia de erosión dúctil poco aproximada a la obtenida en las pruebas de laboratorio, para una velocidad de 1 m/s es poco apreciable el incremento de la erosión, a una velocidad de 3 m/s la erosión es mayor para diámetros menores de 600  $\mu\text{m}$  y a una velocidad de 5 m/s esta tendencia se hace mayor indicando que para valores mayores de 600  $\mu\text{m}$  disminuye la erosión hasta llegar a velocidades de erosión más bajas.

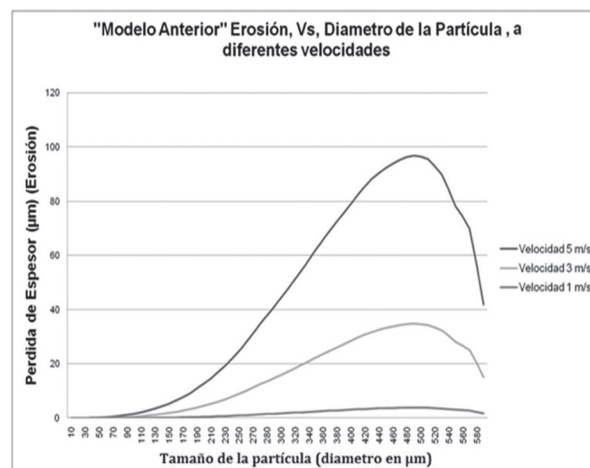


Figura 1. Tendencia de desgaste para el Modelo Base [Laguado C.].

El modelo base [2] se expresa en la ecuación 2 y es utilizado para calcular la tasa de erosión en un material dúctil.

$$E = K * (D^m) * (v^n) * f(90^\circ) \quad (2)$$

$K$  es la constante del material,  $D$  es el diámetro de la partícula,  $m$  es el exponente de diámetro (2 a 6 para dúctiles y para frágiles),  $v$  es la velocidad de la partícula,  $n$  es el exponente de velocidad (2 a 3 para dúctiles, 3 a 5 para frágiles) y  $90^\circ$  es el ángulo de impacto (Incidencia normal).

## 2.4 FUNCIÓN MATRICIAL DE AJUSTE E(D)

Al implementar la función matricial en el modelo base descrito anteriormente, se utilizaron valores de la región triangular superior llamada Región Base (a), como se muestra en la Figura 2. Una vez, identificado este problema se planteó construir una multifunción que ajuste el modelo base mediante una región factible de valores cuya cantidad es infinita, pero estos valores fueron acotados progresivamente con los valores de erosión generados a medida que aumenta el diámetro de la partícula. Como se muestra en la región triangular inferior de la Figura 2 llamada Región Base Ajustada (b).

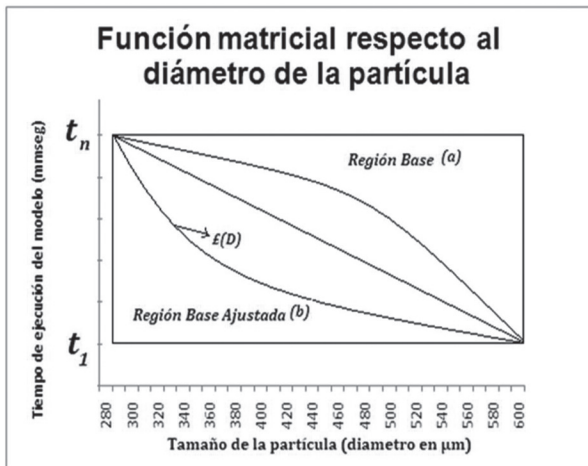


Figura 2. Región de valores para la función matricial del tiempo de ejecución del modelo [Laguado C.]

## 2.5 MODELO BASE AJUSTADO (MBA)

Este modelo es apropiado para un ángulo de impacto de 90°, donde se asumen las características principales de la partícula que está en contacto con la superficie del recubrimiento durante la erosión en un material dúctil, la función matricial del tiempo de ejecución del modelo respecto al diámetro de la partícula y el tiempo de exposición del recubrimiento, así como se expresa en la ecuación (3) [Laguado Carlos].

$$E = K * (D^m) * (v^n) * E(D) * t_{exp} * f(90^\circ) \tag{3}$$

K es la constante del material, D es el diámetro de la partícula, m es el exponente de diámetro (2 a 4 para dúctiles y para frágiles), v es la velocidad de la

partícula, n es el exponente de velocidad, E(D) es la función matricial del tiempo de ejecución del modelo respecto al diámetro de la partícula y  $t_{exp}$  es el tiempo de exposición del recubrimiento y 90° es el ángulo de impacto (Incidencia normal).

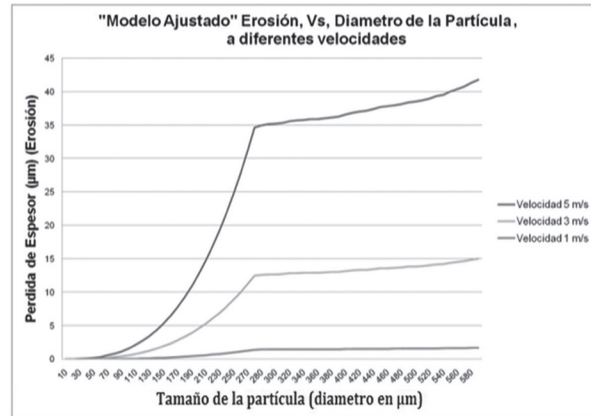


Figura 3. Tendencia de desgaste utilizando patrones de comparación (Desgaste-Diámetro-Iteración por miliseg) [Laguado C.].

Como se observa en la Figura 3, a velocidades de 1 m/s, 3 m/s y 5 m/s se obtuvo una región de estabilidad progresiva para valores entre [280-600] µm indicando una leve tendencia creciente de la velocidad de erosión a medida que incrementa el diámetro de la partícula, así como ocurre en el laboratorio. Esta tendencia aproximada del nuevo modelo respecto a los datos experimentales mejora la estimación de la erosión para cualquier tiempo de exposición, cualquier diámetro de la partícula y para velocidades de partícula pequeñas.

## 2.6 PROPORCIONALIDAD DE MODELOS

En investigaciones realizadas en el estudio de erosión de partículas sólidas sobre la superficie de algún tipo de material compuesto, se encontró una relación de proporcionalidad entre la velocidad de erosión dúctil y la velocidad de erosión frágil para impactos de partículas sólidas con ángulos de incidencia normal (90°). Para este ángulo, la erosión es mayor en un material frágil que en un material dúctil.

Se encontró una relación de proporcionalidad para los modelos de erosión dúctil y frágil, como se indica en la ecuación (4).

$$E_{Frágil} = K * E_{Dúctil} \tag{4}$$

Donde,  $E_{\text{Frágil}}$  es la velocidad de erosión frágil,  $K$  es el factor de proporcionalidad y  $E_{\text{Dúctil}}$  es la velocidad de erosión dúctil

En la investigación de Q. Chen, D. Y. Li [3] se presentan variaciones en la erosión de material dúctil y frágil con una proporción equivalente  $K_1$ , utilizado este valor para encontrar un nuevo factor en la simulación.

En la investigación de Rebecca Stubbs [5] se presentan variaciones en la erosión de material dúctil y frágil con una proporción equivalente  $K_2$ , utilizado este valor para encontrar un nuevo factor en la simulación.

Estos factores de proporcionalidad para este ángulo de impacto son muy aproximados, y de esta manera se obtiene un factor de proporcionalidad promedio como se muestra en la ecuación (5).

$$K_3 = (K_1 + K_2) / 2 \quad (5)$$

Donde el factor de proporcionalidad obtenido  $K_3$  en esta relación, tendrá una magnitud con un error relativo del 1.38% con respecto a la proporción encontrada por Rebecca Stubbs [5] siendo esta la fuente de estudio para este trabajo de investigación. De esta manera, haber encontrado una buena aproximación de los coeficientes de proporcionalidad de erosión dúctil-frágil, se implementa la ecuación (4) utilizando el factor de proporcionalidad  $K_3$  y se obtiene un modelo matemático específico para materiales frágiles dependiendo este, del evento de impacto que se presente en el momento de chocar la partícula sólida erosiva sobre la superficie del recubrimiento multicapa.

## 2.7 EVENTOS DE IMPACTO POSIBLES

Un evento de impacto es un instante de tiempo en que la partícula erosiva y la superficie del recubrimiento chocan, y se crea una región de contacto donde la energía suministrada por el impacto de la partícula es almacenada en esta región. El tipo de erosión depende significativamente del tipo de material impactado (dúctil / frágil / dúctil-frágil) y en consecuencia sus velocidades de erosión son totalmente diferentes.

Un evento de impacto sobre cualquier fase depende de:

- Porcentaje de material de refuerzo WC.
- Porcentaje de material dúctil de la matriz  $\lambda$ .
- Tamaño de la partícula erosiva.

- Tamaño promedio de refuerzo.
- Relación entre el tamaño de la partícula erosiva y la trayectoria media libre de la matriz (distancias entre granos frágiles).

Además, se identificaron posibles escenarios de evento de impacto y se obtuvo un perfil de acción que ayuda a identificar factores importantes en el momento de establecer una relación de selección en la simulación:

- Región de contacto.
- Propagación de la energía.
- Almacenamiento de la energía en el recubrimiento.
- Probabilidad de desgaste (dúctil / frágil / dúctil-frágil).
- Tipo de desgaste.
- Cálculo de desgaste.
- Borrado de material en la animación dependiendo del desgaste.
- Actualización del recubrimiento.

Cada actividad es convertida en algoritmos secundarios que permiten llevar un flujo de trabajo condicionado, evitando comportamientos inapropiados en la erosión.

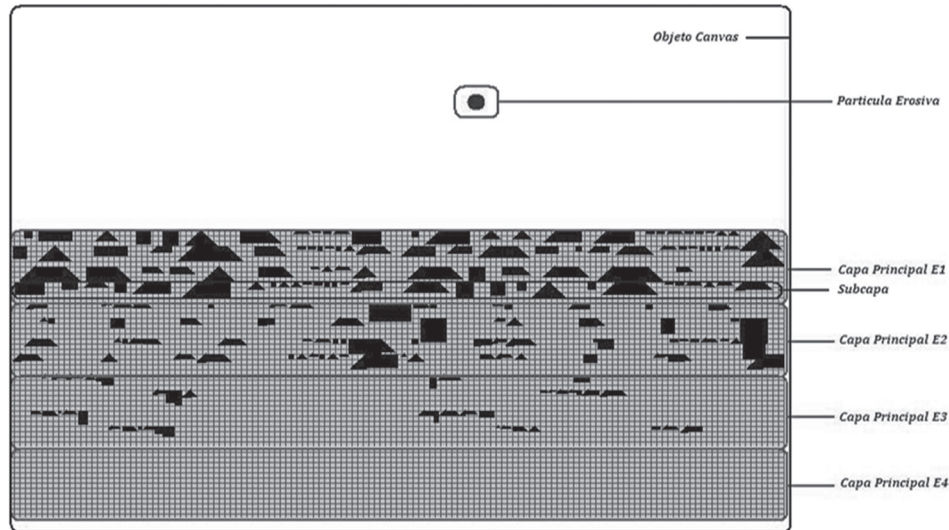
### 2.7.1 DESCRIPCIÓN DEL RECUBRIMIENTO Y LA PARTÍCULA EROSIVA

Para realizar la simulación se estudió el modo de representar el recubrimiento multicapa compuesto por dos fases, la matriz (fase dúctil) y los granos carburo de refuerzo (fase frágil). La composición del recubrimiento de material dúctil (NiCrB) y material frágil (WC) para cada subcapa esta descrita en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de composición química y dureza de las capas que componen el recubrimiento [3].

Recubrimiento	Composición	% Volumétrico de WC
Capa principal E1	25% NiCrB, 75% WC	34
Capa principal E2	50% NiCrB, 50% WC	19
Capa principal E3	75% NiCrB, 25% WC	9
Capa principal E4	NiCrB (Cr 13%,B)	0

Como se observa en la Figura 4, el recubrimiento está dividido en 4 tipos de capas principales con concentraciones de %WC que varía desde la superficie del metal (ubicada en la parte inferior de la imagen) hasta la superficie que está expuesta al flujo de partículas sólidas del lecho fluidizado (ubicada en la parte media de la imagen junto al espacio blanco).



**Figura 4.** Representación del recubrimiento por capas, sub capas, y de la partícula erosiva [Laguado C.].

El modelo de erosión ajustado se utilizó en un modelo de representación de erosión de partículas sólidas en dos dimensiones 2D para representar al recubrimiento (es decir, los granos de refuerzo (material frágil) y la matriz dúctil) y además para representar la partícula y la región de impacto. El valor de cada píxel es de  $1.0 \times 10^{-5}$  m ( $10 \mu\text{m}$ ) y en la Tabla 2 se encuentra las dimensiones para las figuras geométricas que representan a los granos de refuerzo WC.

Tabla 2. Dimensiones de los granos de refuerzo WC [Laguado C.].

Dimensión	Ancho (píxeles)	Alto (píxeles)
Máxima	60	15
Media	40	10
Mínima	20	5

**Representación de la fase dúctil:**

Es la matriz de color gris incluyendo las líneas de color gris oscuro que separan un cuadro del otro, las líneas de color gris claro que separan las capas principales.

**Representación de la fase frágil:**

Son las diferentes figuras geométricas de color negro que representan los granos de carburo de refuerzo. Se especificaron 6 tipos de figuras con generación de dimensiones aleatorias cada vez que se genere un nuevo grano, a su vez con áreas de espesor independiente una de la otra.

Además, cada capa principal tiene subcapas que deben ser uniformemente distribuidas, para que su concentración acumulada obtengan el %WC requerido para cada capa  $E_i$ , donde  $i=1, 2, 3, 4$ , ya descritas en la Tabla 1.

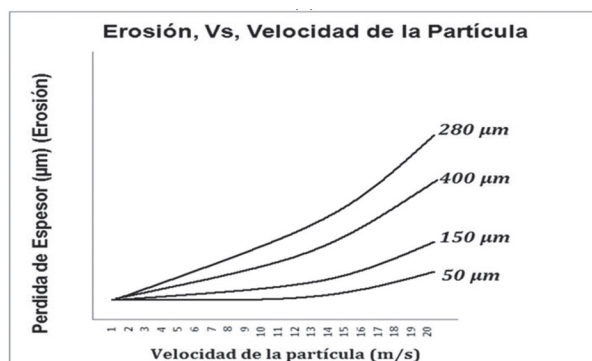
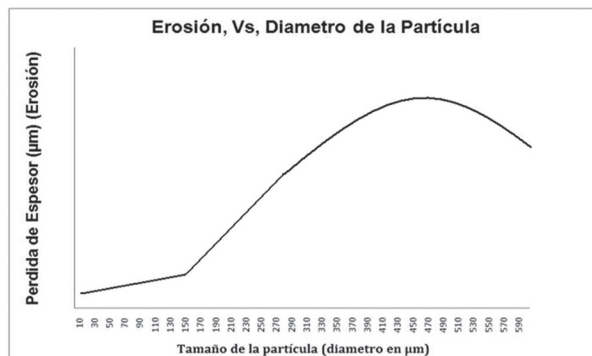
La partícula erosiva tiene dimensiones, masa y coordenadas iniciales de movimiento mutuamente excluyentes cada vez que se genere una nueva partícula, una vez que la partícula erosiva haya chocado con la superficie del recubrimiento. La partícula se representa como una figura circular que se mueve a medida que el tiempo de exposición se incrementa.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 INFLUENCIA DE LA FUNCIÓN MATRICIAL DE AJUSTE EN EL MODELO BASE (MB)

Se utilizaron los valores de la Región Base (a) de la Figura 2, y se obtuvieron efectos muy diferentes a los obtenidos en la parte experimental. Por ejemplo, al analizar el efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión se obtuvieron valores máximos en intervalos menores de  $600 \mu\text{m}$  y tendencias decrecientes para diámetros muy grandes, como se muestra en la Figura 5 (a). Al analizar el efecto de la velocidad de la partícula en la velocidad de erosión se obtuvo una pérdida de espesor menor para partículas mayores de

280  $\mu\text{m}$ , y esta tendencia contradice lo experimental, como se muestra en Figura 5 (b).



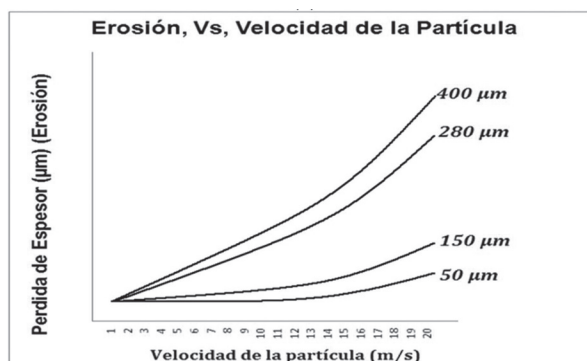
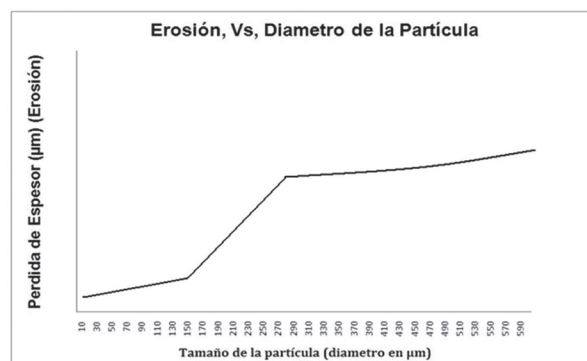
**Figura 5.** Valores de la Región Base (a). (a) el efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión. (b) el efecto de la velocidad de la partícula en la velocidad de erosión [Laguado C.].

### 3.2 INFLUENCIA DE LA FUNCIÓN MATRICIAL DE AJUSTE EN EL MODELO BASE AJUSTADO (MBA)

Se utilizaron los valores de la Región Base Ajustada (b) de la Figura 2, y se obtuvieron efectos aproximados a los obtenidos en la parte experimental.

Al analizar el efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión se obtuvo una leve tendencia creciente en la pérdida de espesor a medida que aumenta el diámetro de la partícula, como se muestra en la Figura 6 (a).

Al analizar el efecto de la velocidad de la partícula en la velocidad de erosión se obtuvo una pérdida de espesor mayor para partículas mayores de 280  $\mu\text{m}$ , y esta tendencia valida lo experimental, como se muestra en Figura 6 (b).



**Figura 6.** Valores de la Región Base Ajustada (b). (a) el efecto del diámetro de la partícula en la velocidad de erosión. (b) el efecto de la velocidad de la partícula en la velocidad de erosión [Laguado C.].

Una vez ajustado el modelo base y encontradas las tendencias que concuerdan con el comportamiento de la erosión bajo estos efectos como se muestra en la Figura 6, se obtuvo un modelo computacional más confiable para cualquier diámetro de partícula y velocidades de partícula menores de 4 m/s, este modelo fue descrito en la ecuación (3).

### 3.3 EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE EROSIÓN PARA VALORES SIMULADOS Y VALORES EXPERIMENTALES.

En la Figura 7 se observa la similitud de los valores de la velocidad de erosión (pérdida de espesor) generados al usar el Modelo Base de erosión Ajustado (MBA) y los obtenidos en las pruebas de laboratorio evidenciadas en el trabajo de Doctorado de Peña D. [9].

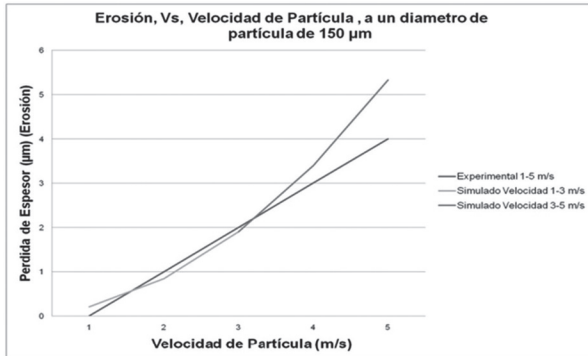


Figura 7. Efecto de la velocidad de la partícula para un diámetro de 150 µm [9].

A bajas velocidades, menores o iguales a 3 m/s la velocidad de erosión medida en su pérdida de espesor del modelo ajustado es muy aproximada a los datos experimentales, y al linealizar la función para estos valores se obtiene un coeficiente de linealidad  $R^2=0,979$  indicando que valores intermedios (2 m/s) son muy cercanos a los reales.

A velocidades mayores a 3 m/s, la velocidad de erosión del modelo ajustado es relativamente aproximada pero su diferencia comienza a incrementar con el aumento de la velocidad de la partícula. Al linealizar la función se obtiene un coeficiente de linealidad  $R^2=0,994$  indicando que valores intermedios (4 m/s) son aproximados a los reales en este intervalo.

Como se observa en la Figura 7 existe dos tendencias relativamente lineales para velocidades de 1-3 m/s y de 3-5 m/s, lo que indica que al crear dos funciones en estos intervalos, se puede aproximar significativamente valores de velocidad de erosión para velocidades intermedias de 2 m/s y 4 m/s. Además, el coeficiente lineal para cada función es mayor que 0,97 como se muestra en la Tabla 3, lo que indica una mejor aproximación de los datos simulados con respecto a los datos experimentales. De este modo, se tienen estimaciones de pérdida de espesor (erosión) muy aproximadas para velocidades de 1-4 m/s lo que indica una mejora en el modelo base, validando por medio de estos resultados el modelo base ajustado (MBA).

Tabla 3. Funciones lineales de pérdida de espesor (erosión) en función de la velocidad de la partícula [Laguado C.].

Velocidad de la Partícula	Función Lineal	Coficiente $R^2$
Experimental 1-5 m/s	$y= x - 1$	1
Simulado Velocidad 1-3 m/s	$y= 0,846x - 0,708$	0,979
Simulado Velocidad 3-5 m/s	$y= 1,712x - 3,306$	0,994

A una velocidad de partícula de 1 m/s se obtiene una velocidad de erosión de  $0,2098 \pm 0,20\%$  aumentando su eficiencia al disminuir el error absoluto en un 0,01% en comparación al modelo anterior.

A una velocidad de partícula de 5 m/s se obtiene una velocidad de erosión de  $5,3282 \pm 33,2\%$  aumentando su eficiencia al disminuir el error relativo en un 0,55% en comparación al modelo anterior.

### 3.4 DISTRIBUCIÓN T-STUDENT

Para estudiar la proximidad de los valores mediante las diferencias de cada par de valores, evaluar y comparar para cada velocidad de la partícula las velocidades de erosión calculadas en la simulación y las obtenidas en la parte experimental se utilizó la distribución T-Student y se validó el modelo ajustado utilizado en la simulación e implementado para estudiar el fenómeno de erosión en recubrimientos multicapas con las características previamente establecidas en la Tabla 1.

Para realizar el análisis se plantean las siguientes hipótesis:

Ho (Hipótesis nula):  $\bar{x}$  igual a cero. (Promedio de las diferencias iguales a cero).

Ha (Hipótesis alterna):  $\bar{x}$  diferente de cero. (Promedio de las diferencias diferentes a cero).

Con un nivel de confianza del 95% y 2 Grados de Libertad (para cada intervalo de velocidades). Utilizando las tablas de la distribución t [10] para dos colas el valor de la variable  $t_{0,025;2}$  es 4,303 por lo tanto, si la diferencia promedio para cada par de valores (experimental / simulado) es mayor a 4,303 significa que se rechaza la hipótesis nula planteada y los datos estarán muy dispersos y poco aproximados.

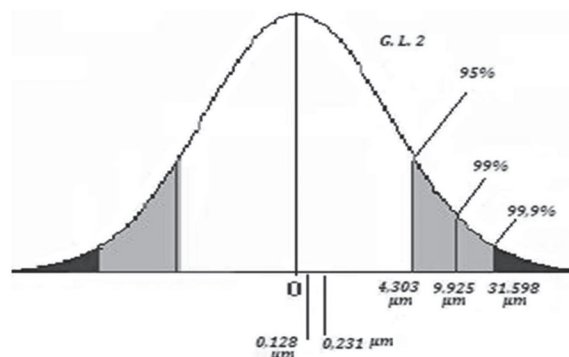


Figura 8. Valores t-student calculados y ubicados fuera de la región crítica o de rechazo para intervalos de confianza del 95%, 99% y 99,9% [Laguado C.].



Como se muestra en la Figura 8, para velocidades de partícula menores de 3 m/s se obtiene una  $t = 0,128$  que se ubica fuera de la región crítica y dentro de la región de confianza, esto indica que no hay suficiente evidencia para rechazar  $H_0$ , es decir, los valores comparados varían poco siendo estos muy aproximados. Además, se obtuvo un  $p\text{-value} = 0,909$  que es mayor al nivel de confianza de 5% lo que indica que no se rechaza  $H_0$ <sup>11</sup> (es decir, la diferencia es casi nula).

Además, se puede observar en la Figura 8 que para velocidades de partícula mayores de 3 m/s se obtiene una  $t = 0,231$ , quedando dentro de la región de confianza pero más cerca a la región crítica en comparación con el valor de  $t$  obtenido para velocidades de partícula  $< 3$  m/s, estos resultados indican que no hay suficiente evidencia para rechazar  $H_0$ , es decir, los valores en comparación varían un poco más, siendo estos relativamente aproximados a los experimentales.

El  $p\text{-value}$  obtenido para  $t=0,231$  fue de 0,070 que es un poco mayor que  $p\text{-value} = 0,05$  (Nivel de significancia del 5%) lo que indica que no se rechaza  $H_0$  pero se evidencia que a medida que aumenta la velocidad de la partícula el  $p\text{-value}$  será menor y se rechazará  $H_0$ , esto quiere decir que existe una variación significativa de los datos y el modelo no será tan preciso para velocidades mayores.

**Tabla 4.** Diferencias de t-student y los niveles de significancia (Calculados, Vs, Teórico) [Laguado C.].

	Velocidad 1-3 m/s	Velocidad 3-5 m/s
t-Student Calculado ( $\mu\text{m}$ )	0,128	0,231
t con 2 G.L. Tablas( $\mu\text{m}$ ) para un 95% de Confianza	4,303	4,303
<b>Dif (t)</b>	<b>4,175</b>	<b>4,072</b>
P-Value Calculado ( $\alpha$ )	0,9092	0,0701
( $\alpha$ por Definición) descartar aproximación de datos	0,05	0,05
<b>Dif (<math>\alpha</math>)</b>	<b>0,8592</b>	<b>0,0201</b>

En la Tabla 4 se observa, en resumen, que la diferencia entre el t-student calculado y el obtenido en las tablas para velocidades de partícula de 1-3 m/s es mayor que la diferencia para velocidades de 3-5 m/s, es decir, se encuentra más retirado de la región de rechazo indicando que son más aproximados los valores calculados al utilizar el modelo de erosión para velocidades pequeñas.

Además, se observa que la diferencia de los Niveles de Significancia calculados y el definido con un intervalo

de confianza mínimo del 95% (N.S.  $\alpha$  del 5%, 0.05) es mayor para velocidades de 1-3 m/s lo que indica que los valores calculados de la erosión son más aproximados a los experimentales. La diferencia ( $\alpha$ ) para velocidades de 3-5 m/s es más cercana al 0,05 indicando que a medida que se incremente la velocidad de la partícula, la estimación de la velocidad de erosión con este modelo tendrá una diferencia más significativa con respecto a los valores experimentales y no será confiable su uso.

## 4. CONCLUSIONES

Al implementar el nuevo modelo, ajustando intervalos de diámetro de partícula [300-590]  $\mu\text{m}$  se mejoró significativamente la tendencia creciente que tiene la velocidad de erosión y observar este comportamiento a medida que incrementa la velocidad de la partícula.

Se evaluó y se comparó la erosión simulada y la experimental y se obtuvo funciones lineales para velocidades pequeñas con un coeficiente de linealidad  $R^2$  por encima del 0,97, lo que indica que ya se pueden calcular por medio de la simulación velocidades de erosión para velocidades de partícula intermedias como 2 m/s y 4m/s con diferentes diámetro de partícula [1-600]  $\mu\text{m}$ .

Por medio del estadígrafo t-student se encontró que los valores simulados y experimentales son muy aproximados cuya diferencia promedio es muy cercana a cero, dejando evidencia que para velocidades menores de 4 m/s el modelo es confiable pero a medida que incrementa la velocidad los valores pueden no ser tan aproximados a los experimentales.

Se cuentan con modelos matemáticos que calculan velocidades de erosión dúctil, erosión frágil y erosión multicapa con un factor de proporcionalidad entre estos para ángulos de impacto de 90° (incidencia normal).

Se estableció una matriz patrón del tiempo (tiempo de ejecución del modelo en milisegundos) en la que se puede calcular la erosión en el recubrimiento para intervalos de tiempo [1-20] horas, y así estimar el desgaste al que fue expuesto el recubrimiento por el impacto sucesivo de partículas sólidas.

Con este ajuste al modelo, se mejora la estimación de la velocidad de erosión del modelo base anterior ya que este solo podía estimar a velocidades de partícula menores o iguales de 2 m/s, y diámetros menores de 280  $\mu\text{m}$ .

Luego, se llega a la conclusión que utilizar el modelo base ajustado es confiable debido a que los valores simulados son muy aproximados a los experimentales para cualquier diámetros de partícula [1-600]  $\mu\text{m}$ , y a velocidades de partícula menores de 4 m/s.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el respaldo y la orientación del Grupo de Investigaciones en Corrosión (GIC), del Grupo de Investigación en Ingeniería Biomédica (GIIB), del convenio semillero 006 de 2006 UIS - ICP y de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

## 6. REFERENCIAS

1. Stubbs, Rebecca, 1994, "Modelling the Erosion of Multilayered coatings", Corrosion and Protection Centre, UMIST Manchester, 1-5.
2. Jaimes S., Alban., Correa M., Christian M., 2002, "Simulación por computador del proceso de erosión de un recubrimiento multicapa de Ni-Cr-Fe-WC a bajas temperaturas", UIS Bucaramanga, 39-46.
3. Q. Chen, D. Y. Li, 2003, "Computer Simulation of solid-particle erosion", Wear (254), 205-206.
4. Q. Chen, D. Y. Li, 2003, "Computer Simulation of solid-particle erosion of composite materials", Wear (255), 82-83.
5. Stubbs, Rebecca, 1994, "Modelling the Erosion of Multilayered coatings", Corrosion and Protection Centre, UMIST Manchester, 44-45.
6. Hutchings, I. M., Arnold., Edward, 1992, "Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials".
7. A. Levy., 1983, "Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact", Proc. 6th Int, 39.
8. LAWN B., 1993, "Fracture of Brittle Solids", Second Edition, Cambridge University Press.
9. PEÑA B, Dario Y., 1998, "Erosion – corrosion of composite based materials in laboratory simulated fluidized bed conditions", Corrosion and Protection Centre, UMIST Manchester, 68.
10. Dpt. Estadística I Inv. Operativa Universitat de Valencia, [En línea], "Tabla de cuantiles de la distribución t de Student", Disponible: <http://oromeroeii.blogcindario.com/ficheros/t-studentdoscolas.pdf>.
11. Dr. Ada Ray, [En línea] , "Prueba de hipótesis en una población", Disponible: <http://www.arayl.com/docupdf/hipotesis.pdf>.

---

*Recepción: 3 de Octubre de 2011*  
*Aceptación: 20 de Diciembre de 2011*