

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA EROSIÓN DE UN ACERO AISI 1020
EN UN SISTEMA MULTIFÁSICO AGUA-SÍLICE-NITRÓGENO**

ALFREDO ZÚÑIGA LINÁN

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

2006

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA EROSIÓN DE UN ACERO AISI 1020
EN UN SISTEMA MULTIFÁSICO AGUA-SÍLICE-NITRÓGENO**

ALFREDO ZÚÑIGA LIÑÁN

Proyecto de grado para optar el título de ingeniero metalúrgico.

Director

Ph.D Darío Yesid Peña Ballesteros

Co director

Ing. Jesús Machuca Martínez

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

2006

A mis padres (Neyla, Luis R.), por el apoyo, la confianza y la fe irrestrictos.

A mis hermanos (Herme, Lamia, Luisca, Lis), por creer en mi, a pesar de mis errores.

A mis amigos, por estar conmigo cuando los necesité (Uds. saben quienes son).

A moloko, por mostrarme que hasta los seres más salvajes sucumben ante el poder del calor humano.

Con ustedes comparto este tiquete a la inmortalidad.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a los profesores y estudiantes del grupo de investigaciones en corrosión (GIC) de la Universidad Industrial de Santander, especialmente a los ingenieros Darío Yesid Peña, Custodio Vásquez y Jesús Machuca, así como a los ingenieros Luis Emilio Forero y Nubia Mejía.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1 EROSIÓN	16
1.1.1 Parámetros que afectan la erosión	20
1.1.2 Algunos comentarios sobre El modelamiento analítico	29
1.2 ELECTRODO DE CILINDRO ROTATORIO (ECR)	30
1.3 ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO	33
1.4 MAPAS	34
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	36
2.1 OBJETIVO GENERAL	36
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	36
3. METODOLOGÍA	37
3.1 OBJETO	37
3.1.1 Revisión bibliográfica	37
3.1.2 Fabricación de las probetas	37
3.1.3 Preparación de la celda de erosión	40
3.1.4 Condiciones experimentales	43

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	72

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición química del acero AISI 1020	38
Tabla 2. Caracterización de la sílice de alta pureza	41
Tabla 3. Condiciones experimentales utilizadas en los ensayos	43
Tabla 4. Matriz factorial de los ensayos	44
Tabla 5. Valores experimentales de velocidad de erosión a concentración de partículas de 30% en peso	67

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema del desgaste por erosión	16
Figura 2. Efecto del ángulo de impacto en la velocidad de erosión	18
Figura 3. Efecto de la ductilidad sobre la erosión de los aceros AISI 1020 y acero inoxidable tipo 304.	19
Figura 4. Velocidad de erosión en función de la velocidad de partículas de alúmina.	22
Figura 5. Mecanismos de erosión por ataque abrasivo a distintas morfologías.	23
Figura 6. Morfología típica de partículas encontradas en la industria del petróleo y gas.	24
Figura 7. Metodología experimental del proyecto	45
Figura 8. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 50 μm y 1000 rpm	46
Figura 9. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 150 μm y 1000 rpm	47
Figura 10. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 50 μm y 3000 rpm	49
Figura 11. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 150 μm y 3000 rpm	50
Figura 12. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 10% en peso y 1000 rpm	51

Figura 13. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 30% en peso y 1000 rpm	53
Figura 14. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 10% en peso y 3000 rpm	54
Figura 15. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 30% en peso y 3000 rpm	55
Figura 16. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 10% en peso y 50 μm	56
Figura 17. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 30% en peso y 50 μm	57
Figura 18. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 30% en peso y 150 μm	58
Figura 19. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 30% en peso y 150 μm	58
Figura 20. Mapa de erosión del acero AISI 1020 a concentraciones de partícula entre 10 y 30% en peso y 27⁰C	69

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	pág
Fotografía 1. Electrodo de trabajo de acero AISI 1020	39
Fotografía 2. Micrografía del acero AISI 1020	39
Fotografía 3. Sílice de alta pureza	41
Fotografía 4. Celda modificada de erosión	42
Fotografía 5. Celda de erosión en funcionamiento	43
Fotografía 6. Superficie del acero después del ensayo 1 (10%W, 50µm, 1000 rpm)	59
Fotografía 7. Superficie del acero después del ensayo 2 (30%W, 50µm, 1000 rpm)	59
Fotografía 8. Superficie del acero después del ensayo 3 (10%W, 150µm, 1000 rpm)	60
Fotografía 9. Superficie del acero después del ensayo 4 (30%W, 150µm, 1000 rpm)	60
Fotografía 10. Superficie del acero después del ensayo 5 (10%W, 50µm, 3000 rpm)	61
Fotografía 11. Superficie del acero después del ensayo 6 (30%W, 50µm, 3000 rpm)	61
Fotografía 12. Superficie del acero después del ensayo 7 (10%W, 150µm, 3000 rpm)	62
Fotografía 13. Superficie del acero después del ensayo 8 (30%W, 150µm, 3000 rpm)	62
Fotografía 14. Superficie del acero después del ensayo 9 (20%W, 100µm, 2000 rpm)	63

Fotografía 15. Estado inicial de las partículas de sílice. 63

Fotografía 16. Estado final de las partículas de sílice. 64

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA EROSIÓN DE UN ACERO AISI 1020 EN UN SISTEMA MULTIFÁSICO AGUA – SÍLICE – NITRÓGENO. *

AUTOR: Alfredo Zúñiga Liñán.**

PALABRAS CLAVES: Erosión, Acero AISI 1020, flujo multifásico, comportamiento dúctil, electrodo de cilindro rotatorio

DESCRIPCIÓN: Los daños ocasionados por los fenómenos de erosión atribuidos al arrastre de arenas con los flujos multifásicos en la producción de hidrocarburos, representa un problema creciente para la industria del petróleo; estos fenómenos deterioran los diferentes sistemas de operación y control utilizados en la producción y transporte de crudo; en general, la erosión es un problema asociado a la cantidad de sólidos contenidos en el flujo utilizado en estos procesos. Normalmente, los sólidos se presentan en diferentes tamaños, formas, durezas y concentraciones en el hidrocarburo, aumentando la velocidad de erosión y por consiguiente, la pérdida y destrucción del material expuesto, ocasionando paradas no programadas, derrames de crudo, y destrucción del medio ambiente.

A pesar de la importancia del fenómeno erosivo y su incidencia en el transporte de fluidos, la información brindada por la comunidad científica no es la suficiente, especialmente en Colombia, aún cuando las investigaciones relacionadas arrojan detalles relevantes; es por eso que se ha estudiado el fenómeno erosivo en un acero al carbono de aplicación en la industria del petróleo.

Los ensayos se desarrollaron en una celda de erosión junto con un electrodo de cilindro rotatorio a velocidades entre 1.0-5.0 m/s, variando el tamaño de partícula de 50 μ m a 150 μ m y la influencia de la concentración de las mismas en el fluido; con los resultados obtenidos se calculó la velocidad de erosión del sistema, y se construyó un mapa erosivo en el cual se estimó la severidad de este medio sobre el acero estudiado.

* Proyecto de grado

** Facultad de fisicoquímicas, Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de materiales, Ph.D Darío Peña.

TITLE: EVALUATION OF EROSION RESISTANCE OF AISI 1020 CARBON STEEL IN THE WATER – SAND – NITROGEN SYSTEM.*

AUTHOR: Alfredo Zúñiga Liñán. **

ABSTRACT: The damages caused by the erosion phenomena attributed to the sands with multiphase flows in the production of hydrocarbons, it represents a growing problem for the petroleum industry; these phenomena deteriorate the different operation systems and control used in the production and transport of oil; in general, the erosion is a problem associated to the quantity of contained solids in the flow used in these processes. Usually, the solids are presented in different sizes, forms, hardness and concentrations in the hydrocarbon, increasing the erosion rate and consequently, the loss and destruction of the exposed material, causing non-programmed stops, spill of oil, and destruction of the environment.

In spite of the importance of the erosive phenomenon and their incidence in the transport of fluids, the information gathered by the scientific community is not the enough one, especially in Colombia, even though the related investigations throw outstanding details; it is for that reason that the erosive phenomenon has been studied in a carbon steel to the application in the industry of petroleum.

The experiments were developed in an erosion cell together with an rotating cylinder electrode at speeds between 1.0-5.0 m/s, varying the particle size from 50 μ m to 150 μ m and the influence of the concentration of the same ones in the fluid; with the obtained results the rate of erosion of the system was calculated, and the construction of an erosive map in which was considered the severity of this system over the studied steel.

* Grade Project

** Physicochemical Faculty, Metallurgical Engineering and Science of Materials, PhD. Darío Peña.

INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo es en el mundo entero una de las más productivas y prometedoras de los últimos tiempos, la reconocida demanda de este producto en las sociedades actuales, lo convierte en un producto esencial para el desarrollo de las naciones principalmente en aquellos países en donde el avance tecnológico no ofrece las garantías necesarias para empezar a pensar en los posibles combustibles alternativos que, llegado el caso, harían del petróleo un recurso del cual se puede empezar a prescindir. Adicionalmente, la implementación de materiales de ingeniería, especialmente los aceros, permite la fabricación de elementos que facilitan la puesta en marcha de procesos de extracción, transporte y refinación del crudo que constituye el elemento primordial de la industria de este importante recurso.

El efecto erosivo de ciertas sustancias sólidas sobre materiales de ingeniería ha recibido cada vez más atención en los recientes años por la amplia ocurrencia de tal inconveniente en el transporte de fluidos, principalmente del crudo. En tales condiciones, la selección de materiales puede convertirse en un problema serio, más cuando es conocido que en muchos casos, se lleva a cabo sobre la base de la experiencia empírica. La pérdida de material desde la superficie de un metal que está siendo impactado por pequeñas partículas sólidas que son transportadas por un fluido, ocurre como consecuencia de acciones mecánicas, esto traduce en una importante consideración en su diseño y operación. A pesar de la importancia del fenómeno erosivo y su incidencia en el transporte de fluidos, la información brindada por la comunidad científica no es la suficiente, aun cuando las

investigaciones relacionadas arrojan detalles relevantes, el mecanismo de erosión de los materiales de ingeniería se encuentra lejos de ser entendido ampliamente.

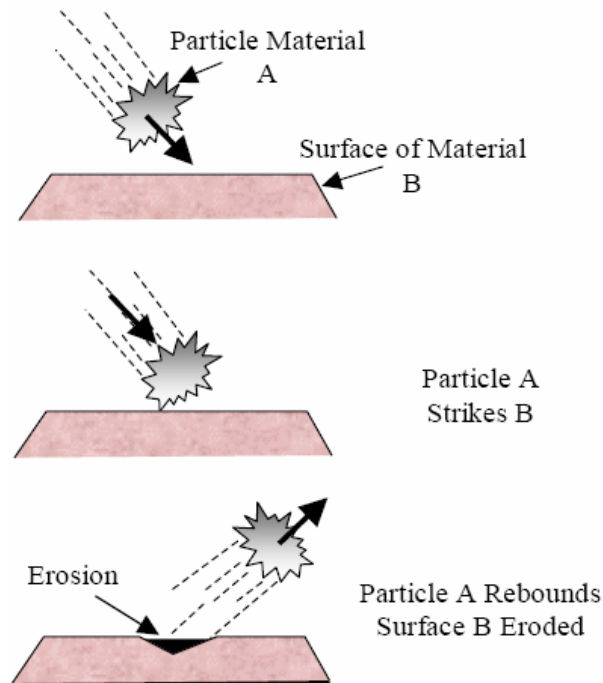
En la presente investigación se evaluará la resistencia a la erosión de un acero AISI 1020 en un sistema multifásico agua-sílice-nitrógeno a temperatura ambiente en una celda modificada de erosión junto con un electrodo de cilindro rotatorio, por medio de análisis gravimétrico. Se escogerán las variables más relevantes en el fenómeno erosivo de este tipo de materiales y se establecerán rangos de valores acordes a las condiciones reales en servicio, al final, se escogerán la o las combinaciones de variables que hacen crítico el deterioro del material y se analizará la respuesta del mismo frente al fenómeno erosivo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 EROSIÓN

La erosión es el proceso de desgaste mecánico ocasionado por el impacto de partículas sólidas en la superficie de un material (figura 1), lo que determina la capacidad del mismo para resistir los esfuerzos de corte a los que es sometido cuando entra en contacto brusco con ellas. El impacto constante de partículas contra la superficie crea un daño localizado permanente y conlleva a la remoción de material por distintos mecanismos, principalmente deformaciones micro mecánicas y fractura, o la combinación de ambos.

Figura 1. Esquema del desgaste por erosión



Fuente: Vincent et al (26)

En el proceso de desgaste por erosión, existen dos mecanismos que constituyen la base del fenómeno, describiendo de esta manera el modo secuencial del daño. En materiales dúctiles, la incidencia del erodente genera una drástica deformación plástica localizada, así como endurecimiento por deformación y formación de “costras”. En tales casos, la geometría de la deformación debido al impacto de las partículas, depende principalmente de la velocidad de impacto. Por otro lado, en los materiales frágiles el deterioro es causado por agrietamiento, fractura y desprendimiento de pequeñas partes del material.²²

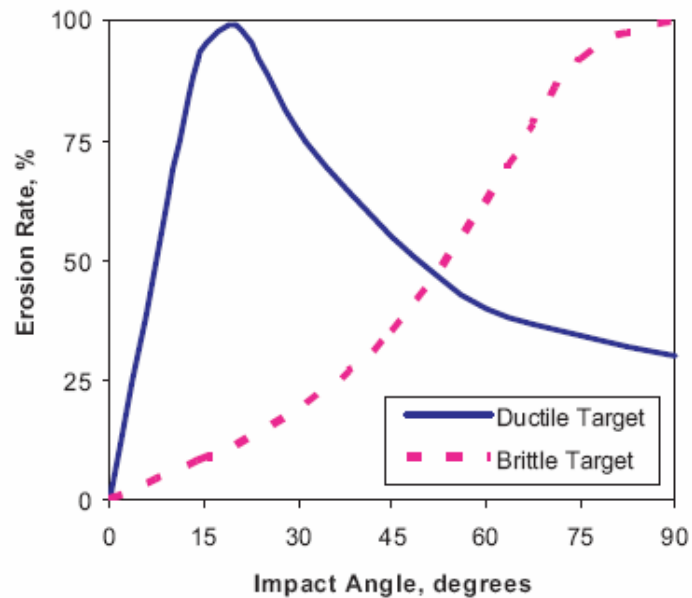
La velocidad de erosión de un material se expresa como la pérdida de peso por unidad de área en la unidad de tiempo. Ésta definición es útil para partes o piezas en servicio, desde que la vida útil de las mismas sea determinada o se establezca la periodicidad del proceso de mantenimiento. El beneficio que se obtiene de incrementar la resistencia a la erosión de los materiales contribuye a reducir los costos de sostenimiento, de igual manera, a mitigar el tiempo de la planta fuera de servicio. El cálculo de la resistencia a la erosión de los materiales para uso industrial por medio de pruebas de laboratorio es una herramienta valiosa en la selección de productos y en la predicción de la vida en servicio.

Existen dos tipos de respuesta de un material frente al fenómeno erosivo, éstas son: dúctil y frágil. La principal diferencia entre estos dos tipos es la manera en la cual la velocidad de erosión varía con el ángulo de impacto. Para materiales frágiles la máxima erosión se obtiene a impactos normales mientras que para materiales dúctiles ésta ocurre a ángulos pequeños (figura 2).

Existe un considerable número de factores que asumen un rol determinante en el proceso erosivo de los materiales de ingeniería, principalmente de los aceros. Datos seleccionados experimentalmente revelan resultados valiosos para las nuevas investigaciones. Rao y Buckley [1985], descubrieron que tanto la energía de superficie, así como la tensión, volumen atómico, punto de fusión, energía

específica de fusión y dureza exhiben buena correlación con la erosión. A pesar de ello, estas propiedades no son satisfactorias en la predicción de la velocidad de erosión relativa de ciertos aceros. Probablemente tales propiedades no son lo suficientemente sensibles como para responder a las pequeñas diferencias que en últimas reflejan sutiles discrepancias en la morfología o susceptibilidad a la fractura de las fases duramente deformadas en la microestructura de los aceros.⁸

Figura 2. Efecto del ángulo de impacto en la velocidad de erosión



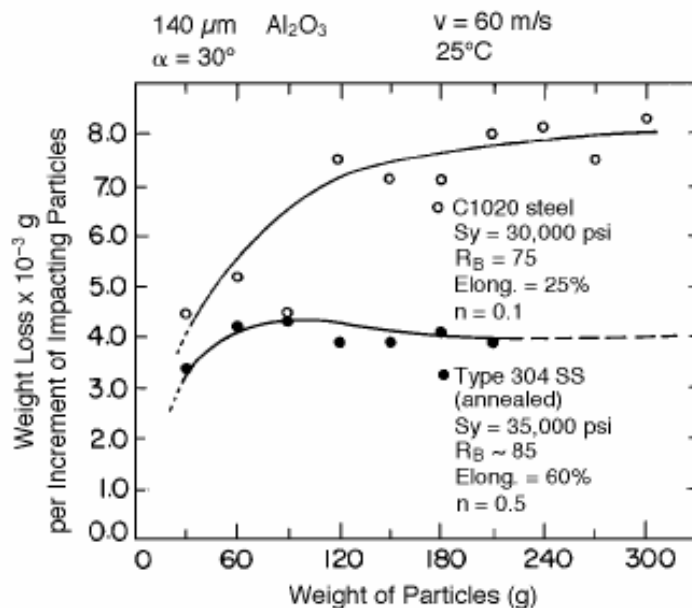
Fuente: Vincent et al (26)

Levy [1985], que investigó en aceros al carbono y aleaciones de aluminio, encontró que los materiales que indicaron valores de dureza y resistencia más altos, presentaron de igual forma las más altas velocidades de erosión. Se piensa entonces que las aleaciones más dúctiles detienen la erosión a través de la distribución de la energía cinética de las partículas por medio de la deformación plástica en la región de la zona de impacto, reduciendo así la concentración de esfuerzos en los puntos de impacto y aminorando a su vez el mecanismo de daño.

Es así que la ductilidad, como medida de la capacidad de elongación, está más íntimamente relacionada con la resistencia a la erosión que otras propiedades mecánicas de los materiales. ¹⁸

La figura 3 muestra el efecto de la ductilidad en la velocidad de erosión de dos aceros, en la que la pérdida por erosión del acero inoxidable es notablemente reducida por presentar una mayor ductilidad. La micro-estructura cúbica centrado en las caras (FCC), comparada con la cúbica centrada en el cuerpo (BCC) del acero al carbono, permite la formación de una mayor cantidad de sistemas de deslizamiento, los cuales facilitan la deformación.

Figura 3. Efecto de la ductilidad sobre la erosión de los aceros AISI SAE 1020 y acero inoxidable tipo 304.



Fuente: Levi (13)

La velocidad de erosión puede ser expresada en gramos por milímetro cuadrado por minuto ($\text{g}/\text{mm}^2/\text{min}$), así como en miligramos por centímetro cuadrado por

minuto ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$). También puede ser definida como la pérdida de masa por partículas que golpean la superficie del material. Ésta definición es útil si el daño ocasionado por las partículas que inciden sobre ésta es de interés primario.

La transferencia de masa es sin duda un parámetro apreciable en el entendimiento del fenómeno erosivo, es esencial establecer el factor que contribuirá a desarrollar una mejor relación de las variables involucradas en el proceso, es así como se ha descubierto que bajo condiciones de erosión, el coeficiente de transferencia de masa es incrementado por:

- La remoción de depósitos en la superficie.
- El incremento en la turbulencia a partir del paso de partículas a través de la capa límite.
- El aumento de la rugosidad resultado de la erosión.

1.1.1 Parámetros que afectan la erosión. El conocimiento de todos y cada uno de los factores que afectan el proceso de erosión es esencial, principalmente cuando se intenta desarrollar un modelo apropiado para el proceso en cuestión. Obviamente, las variaciones en las propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como en el comportamiento dinámico tanto del material que causa como del que sufre la erosión, deben ser consideradas. Los principales factores que afectan la erosión son enunciados a continuación:

1. Concentración de partículas.
2. Velocidad del fluido (velocidad de impacto de las partículas).
3. Angulo de impacto.
4. Tamaño de las partículas.
5. Morfología de las partículas
6. Densidad, dureza y fragilidad de las partículas.

7. Naturaleza del fluido.
8. Tipo de flujo.
9. Naturaleza del material de trabajo.

La influencia de los primeros cinco factores sobre la velocidad de erosión es muy fuerte y cualquier cambio en ellos puede afectar intensamente la velocidad de deterioro del material.¹⁷

- **Velocidad de partículas.** Finnie [1960] reportó que la velocidad de erosión de un acero AISI 1020 es proporcional a la velocidad de impacto, esto es:

$$\varepsilon = b V^n$$

Donde ε es la velocidad de erosión del material, V es la velocidad de las partículas b es una constante de proporcionalidad y n corresponde al valor de 2.²³ Años más tarde se reportaron trabajos sobre otros materiales dando como resultado un rango de valores de n entre 2.05 y 2.44. Goodwin y colaboradores [1970] estudiaron la influencia de la velocidad de impacto sobre la superficie de otros materiales. Tales investigadores analizaron la influencia de la velocidad para rangos entre 200 y 1800 pies/s usando diferentes tamaños de cuarzo de 25 a 210 μm sobre un acero de 11% de cromo, concluyendo posteriormente que la velocidad de erosión es dependiente de la velocidad de impacto según la relación:

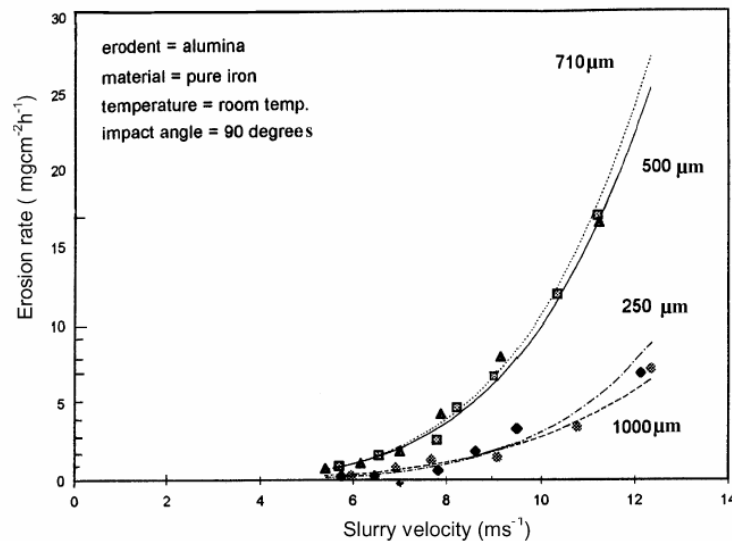
$$\varepsilon = c V^\alpha$$

Donde c es una constante de proporcionalidad y el exponente α varía de 2 a 2.3.²⁴ Posteriores investigaciones, en las que usando tamaños de 125 a 150 μm de cuarzo a distintos ángulos de impacto se encontró que el exponente para la velocidad de erosión se acercaba a 2.3 para todos los materiales ensayados. A

pesar de ello, valores tan altos como 6.5 también han sido reportados, asimismo, pruebas llevadas a cabo en aceros con 11% de cromo usando arenas con tamaños de 10 a 150 μm para ángulos de 20 y 90 grados se confirmó la dependencia de la velocidad y se indicó que esta no fue afectada por el ángulo de impacto. Bitter [1963] reportó que hay una velocidad crítica por debajo de la cual no ocurre erosión, pero los valores calculados son muy bajos (menos de 10 pies/s) para que puedan ser usualmente despreciados.²⁵

La figura 4 muestra la velocidad de erosión como función de la velocidad de impacto para varios tamaños de partículas de alúmina a ángulos normales de impacto sobre una probeta de hierro puro a temperatura ambiente.

Figura 4. Velocidad de erosión en función de la velocidad de partículas de alúmina.



Fuente: Pungwiwat (40)

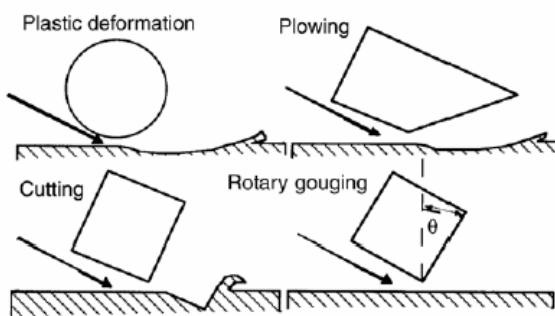
- **Morfología de las partículas.** Tanto para materiales dúctiles como frágiles, se conoce que la erosión más efectiva se encuentra asociada a partículas con morfología angular.³ La erosión en estado estacionario por partículas esféricas

generalmente desarrolla una topografía de superficie de “colinas y valles”, con el área de la misma siendo significativamente mayor que las dimensiones del impacto propiamente dicho. Esto es distinto a la topografía de superficie producida por partículas angulares.

En materiales frágiles, el mayor daño ocurre cuando se concentra la energía de impacto en un pequeño punto. Abrasivos de borde redondeado intensifican la energía en un punto de contacto muy pequeño, mientras que abrasivos labrados en facetas pueden distribuir la energía sobre un área más grande, dependiendo de la orientación en el momento del impacto. En materiales dúctiles, las partículas redondeadas pueden penetrar ligeramente la superficie, creando cráteres sin liberación de material desde la superficie.

En la figura 5 se muestran los mecanismos de erosión en materiales dúctiles por ataque abrasivo, de acuerdo a ciertas formas de partículas, que incluyen deformación plástica, corte, surcado (plowing) y estriado (rotary gouging).

Figura 5. Mecanismos de erosión por ataque abrasivo a distintas morfologías.



Fuente: Vincent et al (26)

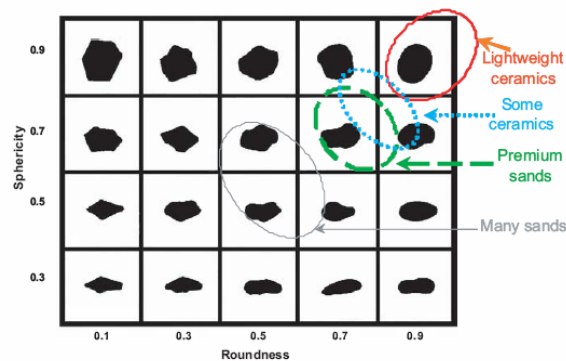
Brown y colaboradores [1981] encontraron que la remoción de material ocurre por la deformación a los lados de las “colinas” y la sustracción de las escamas del material desde los “valles”. Se observó que la penetración considerable de arena

juega un papel importante en la extracción de material en los “valles”, con formación adicional de una capa de metal-arena en la superficie.²¹

Como es de esperarse, y ayudados por la confirmación de resultados aportados por la literatura, las partículas angulares proporcionan una mayor velocidad de erosión que las partículas esféricas. H. Mcl. Clark [1991] demostró que una suspensión de partículas de arena de cuarzo produce erosión en aceros cuarenta veces más que usando suspensiones de la misma masa con partículas de vidrio del mismo tamaño.⁵ El grado de angularidad es también importante, métodos de cuantificación de la angularidad por medio de análisis de imagen y sus efectos sobre la energía de impacto han sido discutidos por Hattori y Nakao [2001], que encontraron que dicha energía incrementa e un factor de 2 a 3 con la angularidad, la cual se ha encontrado también que varía con el tamaño de grano.¹⁴

La figura 6 muestra las formas típicas de los erodentes mas frecuentes en la industria del gas y del petróleo.

Figura 6. Morfología típica de partículas encontradas en la industria del petróleo y gas.



Fuente: Vincent et al (26)

- **Ángulo de impacto.** Es el ángulo de incidencia o ángulo de ataque de las partículas dentro de la superficie ampliamente influenciada por la erosión. La

influencia del ángulo de impacto es dependiente del tipo de material. Para materiales dúctiles la máxima pérdida por erosión ocurre a ángulos cercanos a los 20°. Para materiales frágiles la pérdida por erosión sucede a 90° (incidencia normal). Muchos investigadores han reportado este comportamiento general, como se observó en la figura 2.

- **Tamaño de partículas.** La implementación del criterio de disipación de energía como factor controlante de la pérdida de material por erosión ha permitido investigar el efecto del tamaño de partícula. La comparación de este efecto con respecto a la velocidad de erosión puede hacerse enlazando la energía de disipación con la pérdida de material a través de la determinación de los valores de la energía específica, es decir, la energía cinética de impacto requerida para remover la unidad de volumen del material de prueba.

Para materiales dúctiles, la erosión relativa es esencialmente independiente del tamaño de partícula por encima de cierto valor crítico. Stack y colaboradores [2003] encontraron que, la velocidad de erosión es dependiente del tamaño del erodente en el rango de 50 a 100 μm , pero para valores de tamaño de partícula mayores a 100 μm , la dependencia de la velocidad de erosión se reduce considerablemente.³

- **Propiedades del material y de las partículas**

- **Dureza de las partículas.** Para materiales dúctiles, y siempre que la dureza del material de prueba sea menor que la dureza de las partículas, se espera entonces que halla ciertos efectos, excepto para la fragmentación de las partículas u otros cambios. Se asume por ciertas teorías acerca de la erosión en materiales dúctiles y frágiles que las partículas, por obvias razones, deben tener una dureza

mas elevada que el material de prueba; no obstante, para muchos materiales cerámicos, dicha asunción no tiene validez.

Resultados experimentales sugieren que la dureza de las partículas es una variable sumamente importante que debe ser tenida en cuenta cuando se caracteriza el desgaste por erosión tanto para materiales dúctiles como frágiles. Es necesario tener en cuenta que la velocidad de erosión disminuye considerablemente cuando la dureza de las partículas cae por debajo de la dureza del material sometido a erosión. Esta y otras comparaciones entre los desgastes erosivos y abrasivos han sido discutidas por Misra y Finnie [1981].²⁹ Finnie [1979] comprobó que es realmente posible que el tratamiento térmico del acero pueda tener un efecto prácticamente despreciable sobre su resistencia a la erosión la cual puede ser debida al uso de partículas duras tales como sílica (SiC) y alúmina (AL_2O_3).³⁰

○ **fragilidad de las partículas.** Para materiales dúctiles, el efecto de la fragmentación de las partículas, lo cual proporciona una pérdida adicional por erosión ha sido descrito por Tilly [1973] y posteriormente estudiado por Maji y Sheldon [1978]. El potencial erosivo de las partículas abrasivas incrementado por la solución o por el contenido de impurezas puede resultar en una tendencia a la fragmentación. Por otra parte, la fragilidad de las partículas no ha sido considerada como una variable en la erosión de materiales frágiles, sin embargo, se conoce que ocurre en estos materiales.³¹

○ **Dureza superficial.** La dureza superficial es el parámetro habitualmente escogido para describir la variación en la velocidad de erosión de materiales dúctiles. En una aleación, la dureza no es considerada un parámetro valido para describir las diferencias en la respuesta a la erosión. Sin embargo, Sheldon [1977] sugirió que el endurecimiento por deformación en la superficie es un aspecto que debe ser realmente tenido en cuenta.³² Adicionalmente, la dureza dinámica es

probablemente la variable más apropiada para caracterizar la respuesta a la erosión tanto de materiales dúctiles como frágiles.

○ **Sensibilidad a la tensión.** Estudios sobre partículas en metales realizados por Winter y Hutchings [1975] indicaron que la alta velocidad de tensión asociada con la erosión de partículas puede llevar a diferentes modos de deformación en diferentes materiales. A pesar de ello, las características de los materiales no han sido examinadas completamente para materiales tanto dúctiles como frágiles.³³

○ **Orientación granular y efectos del tamaño de grano.** Hasta la fecha no se tiene conocimiento de estudios sistemáticos sobre los detalles de estas características propias del material para procesos de erosión por partículas sólidas. No obstante, Preece y colaboradores [1978] estudiaron tales efectos micro estructurales sobre la erosión por cavitación.³⁴

○ **Parámetros térmicos superficiales.** Correlaciones entre velocidades de erosión por un lado, y conductividades térmicas y calores específicos por otro, han sido observadas, pero explicaciones detalladas aún no han sido desarrolladas.²⁰

○ **Tenacidad del material.** Debido al hecho de que los materiales se erosionan bajo procesos de deformación elástica y plástica, la tenacidad dinámica (K_c dinámica) entra a jugar un papel importante en el desgaste de los mismos; es así como las medidas de los K_c son necesarias, para caracterizar al material y por consiguiente, lograr un mejor entendimiento de los procesos de erosión.

● **Efectos ambientales.** Algunos aspectos significativos en los efectos ambientales son:

□ Energía de impacto, temperatura de la superficie, y posible fusión local. Los efectos de la temperatura en la deformación pueden ser importantes en algunos casos. Por otro lado, los efectos térmicos pueden ser significativos solo para la erosión a alta temperatura.

□ La unión abrasiva de la superficie erosionada. La posibilidad de ocurrencia de reacciones químicas y la consecuente unión a la superficie erosionada de ciertos productos procedentes de dichas reacciones ha sido reportada por la literatura para procesos de erosión a alta temperatura. Este efecto puede afectar considerablemente la velocidad de erosión, ofreciendo protección contra el daño mecánico a expensas del posible ataque químico sobre la superficie expuesta.

□ Reacción atmosférica. Podría esperarse la formación de películas que se adhieren a las superficies expuestas debido a reacciones químicas en exposiciones a temperatura elevada. Se ha reportado que tales películas pueden alterar las velocidades de erosión, particularmente para bajos tamaños de partícula, los cuales se encuentran en el mismo orden de dimensión en el espesor de las capas formadas.

- **Temperatura.** Young y colaboradores [1977] reportaron varios efectos de la temperatura sobre la velocidad de erosión.³⁵ Ellos demostraron que existe un gran incremento en la velocidad de erosión de un acero inoxidable tipo 310 cuando la temperatura aumenta de 25°C a 975°C. En un posterior estudio del efecto de la temperatura sobre la velocidad de erosión, Hockey y colaboradores [1978] demostraron la ocurrencia de procesos de deformación plástica durante la erosión de materiales frágiles.³⁶ Adicionalmente, La experiencia ha mostrado que la influencia de la temperatura en la velocidad de erosión, en ausencia de complicaciones causadas por el fenómeno corrosivo, no es tan simple como podría esperarse basándose en la disminución de la resistencia del material con el

incremento de la temperatura. Por otro lado, Sundarajan y colaboradores [1990] encontraron que en ciertos casos, la velocidad de erosión presenta incrementos bajo la influencia de la temperatura, mientras que en otros casos, disminuye.³⁷

1.1.2 Algunos comentarios sobre El modelamiento analítico. Desde las últimas cuatro décadas, investigadores han venido llevando a cabo numerosas investigaciones con la firme intención de establecer un modelo capaz de predecir un comportamiento característico de los fenómenos erosivos, muchas de ellas han sido relativamente insuficientes en la búsqueda de un comportamiento generalizado, en otras palabras, los escasos resultados hasta hoy alcanzados arrojan modelos que responden exclusivamente a condiciones específicas.⁵⁻⁷

El problema básico en los modelos de erosión se resuelve alrededor de la serie de eventos que ocurren cuando una superficie es sencillamente impactada por pequeñas partículas sólidas. El mecanismo microscópico que ocurre, como consecuencia, ha sido bien documentado en estudios de microscopia y está muy bien entendido, en contraste, la representación del orden de eventos sucesivos por medio de ecuaciones que incorporen las variables que son activas en el proceso es un aspecto hasta la fecha esquivo. Adicionalmente, a través del campo de la tribología, no ha habido modelos acertados que puedan ser incorporados dentro de un software de diseño que sea capaz de predecir las pérdidas de material dentro de un ambiente erosivo.¹³

El modelamiento de un fenómeno físico que ocurre a escala microscópica generalmente envuelve una simplificación del proceso para que las matemáticas puedan, en efecto, cubrir el mecanismo. La mayoría de los modelos de erosión hasta hoy conseguidos están basados en el concepto de micro corte (microcutting). En este concepto, una partícula erosiva teórica golpea la superficie de un material a bajos ángulos, y sus puntas o extremos actúan como una

herramienta de corte, desbastando la zona del material afectada y trasladándose a lo largo de la superficie. El inconveniente primordial con este modelo es que la erosión de metales dúctiles no ocurre de esta manera física, excepto por algunas situaciones en las que unas pocas partículas en un fluido impactan la superficie justamente a ángulos pequeños (menores de 15°).

Con la microscopía de barrido electrónico SEM (scanning electron microscopy) y su gran aplicación (que en muchos casos no estuvo disponible para los desarrolladores del modelo de micro corte), el mecanismo actual por el que un material es removido, se puede evidenciar plácidamente por medio de la inspección visual de la topografía de la superficie. Con su uso de una manera cuidadosa e intermitente, se puede determinar la secuencia de remoción del material, en esta medida, el proceso de erosión puede ser entendido como un procedimiento escalonado que envuelve deformaciones comunes de los metales que incluyen la extrusión, formación de costras (platelets), remoción y fractura.

La secuencia de eventos físicos que resultan de la remoción superficial de un material por el proceso de erosión exige estar bien documentada. El mecanismo es considerablemente más complejo que el manejado bajo el precepto del micro-corte y no ha sido representado apropiadamente por un modelo de erosión hasta la fecha. Cuando aparece el efecto sinérgico erosión-corrosión, el mecanismo se vuelve aún más complejo que si bien, puede ser entendido como un mecanismo de degradación superficial desde un punto de vista físico, es más complicado de representar matemáticamente.

1.2 ELECTRODO DE CILINDRO ROTATORIO (ECR)

El electrodo de cilindro rotatorio (ECR) es, de los dispositivos útiles para la evaluación de los efectos del flujo mono y multifásico en erosión y corrosión,

probablemente el aparato más sencillo de construir y operar bajo hidrodinámica definida en el régimen de flujo turbulento.

Existen varios aspectos importantes en el uso de este dispositivo para examinar la velocidad de erosión en sistemas multifásico:

- Las numerosas correlaciones que han sido desarrolladas para calcular el número de Sherwood: (coeficiente de transferencia de masa), a partir de los números de Reynolds y Schmidt para una superficie cilíndrica lisa.
- El efecto que la rugosidad causada por la erosión puede tener en las correlaciones.
- Las metodologías y sus limitaciones para estimar las condiciones en el electrodo de cilindro rotatorio que puedan indicar mejor si la transferencia de masa influye la erosión en otras geometrías.

El electrodo de cilindro rotatorio trabaja bajo estas condiciones a números de Reynolds (Re) mayores de 200, no obstante el flujo puede ser complicado por la formación de vórtices aún a números de Reynolds mayores, donde la verdadera turbulencia se desarrolla. A pesar de ello, números de Reynolds mayores de 200 son fácilmente alcanzados a modestas velocidades de rotación y diámetros de cilindro. Así el cilindro puede ser utilizado por el ingeniero de corrosión para simular condiciones de flujo en tuberías. Para el electrodo de cilindro rotatorio con superficie lisa, la correlación para el transporte de masa está dada por Eisenberg.¹¹ Sin embargo, la rugosidad en la superficie incrementa el transporte de masa.

$$Sh = 0.079 Re^{0.7} Sc^{0.36} \quad (1)$$

Donde Sh , Re y Sc son los números adimensionales de Sherwood, Reynolds y Schmidt, respectivamente. Esta correlación es válida dentro del siguiente rango: $1000 < Re < 100000$ y $835 < Sc < 11490$.

Físicamente, el electrodo de cilindro rotatorio está compuesto de dos cilindros concéntricos (entre los cuales reside el fluido), uno de los cuales, por lo general el cilindro interior, se encuentra girando mientras el otro está estacionario.³

Las características principales del ECR son:

- Hidrodinámica definida, que es turbulenta aún a bajas velocidades de rotación.
- Correlaciones empíricas razonablemente bien definidas de cantidades tales como: coeficiente de transferencia de masa (número de Sherwood), velocidad del fluido (número de Reynolds) y propiedades físicas del fluido (número de Schmidt).
- Distribución uniforme de potencial y corriente.
- Características del fluido independientes de la posición de la superficie del electrodo.
- Fácil montaje y uso.
- Velocidad de erosión estimable por pérdida de masa (gravimetría) y por técnicas electroquímicas.
- Facilidad de uso de los resultados para predecir los efectos del fluido en otras geometrías.²

Desde el punto de vista de la mecánica de fluidos, se considera necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La porción del electrodo a ser examinada debe estar totalmente inmersa y lo suficientemente alejada de cualquier interfaz líquida para eliminar alguna influencia de ésta sobre la hidrodinámica y la transferencia de masa en las capas límite.
- El diámetro del electrodo en las partes superior e inferior de la superficie de trabajo es idéntico al diámetro del eje, ésta para minimizar cualquier efecto final.
- El nivel superficial del electrodo es mantenido a nivel con la superficie de trabajo para evitar las hendiduras y la penetración del fluido por detrás del electrodo.
- El electrodo de trabajo debe ser centrado con respecto al cilindro externo y debe girar sin desplazamiento de su propio eje.
- Los componentes adicionales (tubos dispersores de gas, termocuplas, tubo Luggin-Haber) deben estar alejados de la superficie del electrodo para no interferir en las capas límite. ⁴

1.3 ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO

Junto con el análisis volumétrico y los métodos instrumentales, el análisis gravimétrico hace parte del conjunto de técnicas puestas a disposición del análisis cuantitativo; a su vez, el análisis gravimétrico está caracterizado por la medida experimental de masa, magnitud carente de toda selectividad, ya que la poseen todas las especies existentes, es así como en los procesos que involucran pérdida de masa, este método es útil para determinar la reducción de la misma y consecuentemente, facilitar las posteriores observaciones relacionadas con el

fenómeno analizado. A pesar de ser un procedimiento tedioso, la toma de medidas para análisis gravimétrico sigue siendo uno de los métodos más exactos de los existentes hasta la fecha.

En los fenómenos erosivos, el análisis gravimétrico consiste en medir la cantidad de masa que una muestra pierde cuando es sometida al impacto constante de partículas en su superficie, dichas medidas se llevan a cabo en unidades de tiempo previamente determinadas, y una vez establecida el área superficial de la muestra problema, las cuales son un indicio claro de la velocidad a la que el material se erosiona, es decir, la frecuencia con la cual se reduce su masa en la unidad de tiempo, aspecto relevante en la caracterización de materiales de ingeniería y que permite prever el comportamiento de los antedichos bajo condiciones de utilización en la industria .

1.4 MAPAS

Existe un beneficio considerable en la obtención de los mapas de erosión, éstos representan los mecanismos y las velocidades de desgaste de un material, con respecto a las variables independientes del sistema, en los que se incluyen las concentraciones, tamaños y velocidades de partícula, entre otros. Los mapas de erosión constituyen una guía valiosa para el diseñador en la selección de materiales y en la identificación de las condiciones de operación para minimizar los daños en el material, y pueden indicar también como los cambios en éstas pueden influenciar la velocidad, y más importante, el mecanismo dominante. Los modelos teóricos para los principales mecanismos de desgaste, esencialmente el desgaste por erosión, son hasta la fecha un aspecto adusto para la ingeniería, no obstante, algunos investigadores centran esfuerzos en la construcción de diagramas que seas capaces de facilitar la interpretación de las distintas condiciones a las que es expuesto un material en servicio. Stack y colaboradores

[2003] desarrollaron mapas de erosión-corrosión para hierro y acero en ambientes acuosos con partículas abrasivas; en dichos diagramas, se mostraron claramente las condiciones bajo las cuales éstos materiales presentan distintas velocidades de deterioro y las zonas en las cuales la velocidad de erosión es aumentada por la corrosión, y viceversa, así como las condiciones bajo las cuales los fenómenos se presentan en ausencia de efectos sinérgicos.⁴¹⁻⁴²

De una manera bien desarrollada para una combinación particular de sustrato y material abrasivo, los mapas de erosión no sólo pueden indicar el mecanismo predominante de daño en las condiciones expuestas, sino que también señalan los contornos de velocidad de erosión invariable dentro del cual cada régimen permite la predicción de los valores de desgaste.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el comportamiento de un acero AISI 1020 frente al fenómeno de la erosión en un sistema Agua - Sílice – Nitrógeno, por medio de un cilindro rotatorio.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la velocidad de erosión del acero a diferentes concentraciones y tamaños de partícula de sílice y velocidades de rotación.
- Trazar mapas de erosión (tamaño de partícula vs velocidad de erosión y concentración de partículas vs velocidad de erosión) del acero AISI 1020.

3. METODOLOGÍA

3.1 OBJETO

El objeto de estudio en el proyecto fue determinar la velocidad de erosión del acero AISI 1020 en un sistema multifásico agua-sílice-nitrógeno mediante análisis gravimétrico.

Para determinar la velocidad de erosión del acero, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

3.1.1 Revisión bibliográfica. En el transcurso del proyecto, la bibliografía consultada se centró en:

- Problemas de erosión en los sistemas de extracción y transporte de crudo.
- Mecanismos de erosión en materiales dúctiles.
- Técnicas utilizadas para determinar las velocidades de erosión.
- Uso, aplicaciones y ventajas del electrodo de cilindro rotatorio.
- Estado del arte en los tópicos de interés.

3.1.2 Fabricación de las probetas. Se fabricaron 12 probetas de acero AISI 1020 (fotografía 1), acero de baja aleación y de composición química aproximada a los aceros de las normas API 5L grado B y ASTM A 53 grado B, de gran uso en la fabricación de tuberías de control y transporte de crudo. La caracterización del material fue realizada mediante la técnica de Espectroscopía de Emisión Óptica

(EEO), de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM E – 415 de 1999. Los resultados promedio se muestran en la tabla 1. y adicionalmente se relacionaron los valores estipulados para un acero AISI 1020.

Tabla 1. Composición química del acero AISI SAE 1020.

Elemento	Muestra	AISI 1020
C	0.224 ±0.0014	0.18 – 0.23
Mn	0.521 ±0.0071	0.30 – 0.59
P	0.001 ±0.0012	0.040 máx.
S	0.009 ±0.0041	0.050 máx.
Si	0.157 ±0.0031	
Cu	0.322 ±0.0366	
Ni	0.135 ±0.0053	
Cr	0.189 ±0.0017	
Mo	0.023 ±0.0005	
As	0.007 ±0.0008	
Nb	0.013 ±0.0008	
Sn	0.028 ±0.0023	
Fe	Balance	

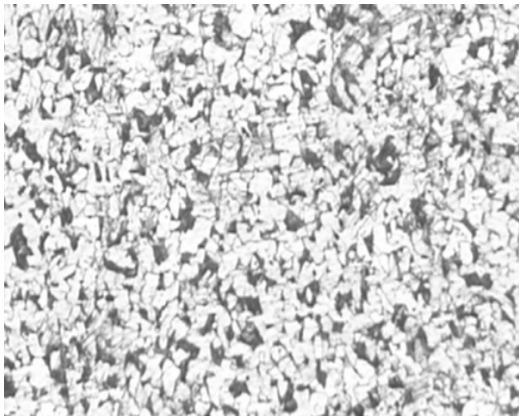
La microestructura observada es característica de los aceros de bajo contenido de carbono en estado normalizado y está compuesta de granos de ferrita en una matriz perlítica (fotografía 2), con un tamaño de grano ferrítico fino No. 8 de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM E – 112 de 1996.

Fotografía 1. Probeta de acero AISI 1020

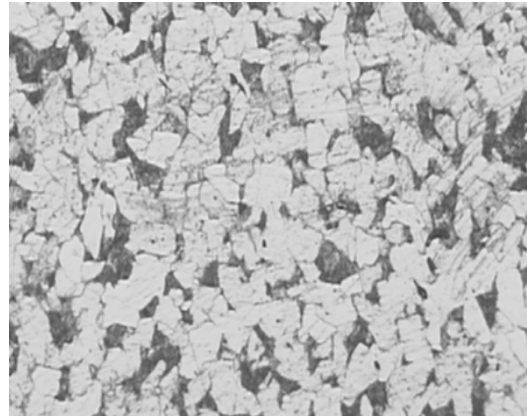


La microestructura del acero es mostrada a continuación (fotografía 2), las fotografías fueron tomadas a 50 y 100 aumentos:

Fotografía 2. Micrografía del acero AISI 1020



50x



100x

Las probetas fueron maquinadas a las siguientes dimensiones:

- 3,8 cm. de diámetro externo.

- 3,2 cm. de diámetro interno.
- 12 cm². de área externa.
- 1 cm. de altura.

Previo a la ejecución de los ensayos, las probetas fueron preparadas de la siguiente manera:

- *Preparación de la superficie.* Las superficies se mantuvieron libres de polvo, humedad y otros agentes contaminantes que pudieran interferir en la realización de las pruebas en la celda de erosión. Las probetas fueron desbastadas con papel de carburo de silicio, números 120, 240, 320, 400 y 600.
- *Método de limpieza.* Posterior al proceso de pulido, las probetas fueron lavadas con agua destilada, desengrasadas con acetona y puestas en un desecador hasta la puesta en marcha de las pruebas, esto con el propósito de evitar la formación de capas de óxido en la superficie, todas las probetas sin excepción, fueron desbastadas nuevamente con papel abrasivo número 600 antes del ensayo respectivo.

3.1.2 Preparación de la celda de erosión. Los ensayos fueron llevados a cabo en una celda modificada de erosión (fotografías 4 y 5), consistente en una coraza de polimetil metacrilato (acrílico) con capacidad de 200 ml de solución, junto con un electrodo de cilindro rotatorio, accionado por un equipo de ensayos dinámicos con velocidad de rotación variable. Las mezclas fueron preparadas con agua destilada y sílice de alta pureza. Las fotografías de la arena son mostradas a continuación:

Fotografía 3. Sílice de alta pureza



10x



20x

La arena fue analizada para su caracterización, el análisis químico y los resultados obtenidos son mostrados a continuación:

La muestra de arena fue sometida a digestión con HF concentrado en crisol de platino y el residuo se disolvió en HCL al 50%. En la disolución obtenida se determinó Al, Fe, K, Na, Mg y Ca por espectrofotometría de absorción atómica de llama usando patrones certificados.

Tabla 2. Caracterización de la sílice de alta pureza

Descripción de la muestra	Sólido, material pétreo						
Informe de resultados	Los resultados se presentan en porcentaje en peso (%) de cada elemento cuantificado						
Nombre de la muestra	Parámetros analizados						
	Al₂O₃ [%]	Fe₂O₃ [%]	MgO [%]	K₂O [%]	Na₂O [%]	CaO [%]	Total [%]
Arena	0,094	0,028	0,033	0,060	0,107	0,027	0,035

Antes de cada prueba, la mezcla fue purgada con nitrógeno para reducir al máximo su corrosividad, de igual forma, la saturación con nitrógeno se llevó a cabo durante la totalidad del tiempo de cada prueba. El caudal de flujo fue de 150 ml/min (según norma ASTM G-1) y el tiempo estimado de inyección del gas fue de 1 hora, tiempo en el cual la concentración de oxígeno en la solución fue menor de 0,2 ppm, nivel permitido para el ensayo. La medición se realizó con ampollas de oxígeno.

Fotografía 4. Celda modificada de erosión



Fotografía 5. Celda de erosión en funcionamiento



3.1.3 Condiciones experimentales. Los ensayos se efectuaron por medio de un diseño factorial a dos niveles y se realizaron según las siguientes condiciones:

Tabla 3. Condiciones experimentales utilizadas en los ensayos

Concentración de partículas (%W)	Tamaño de partículas (μm)	Velocidad de rotación (rpm)
10	50	1000
20	100	2000
30	150	3000

De acuerdo a un programa estadístico, la matriz factorial de los ensayos quedó de la siguiente forma:

Tabla 4. Matriz factorial de los ensayos

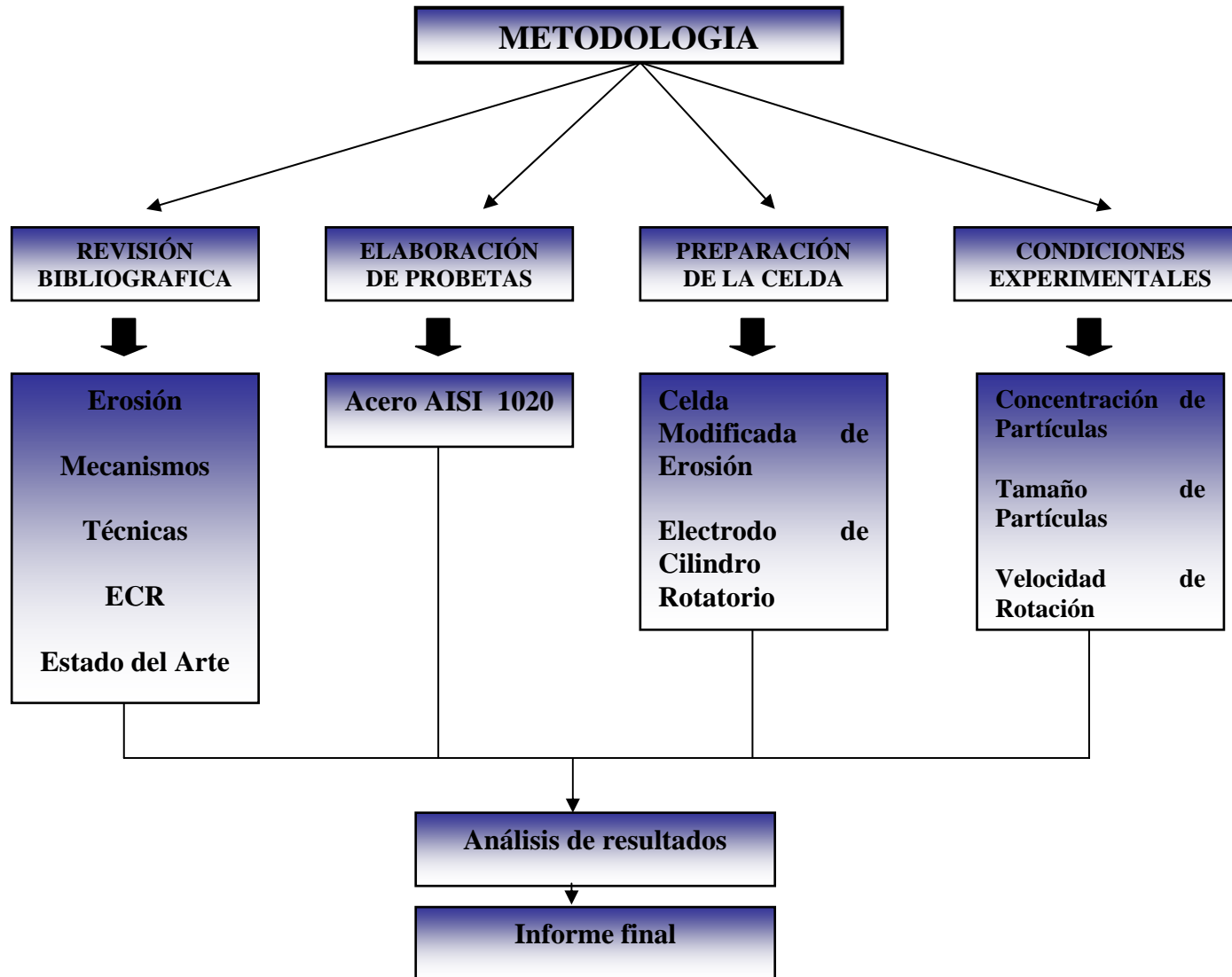
Ensayo	Concentración de partículas (%W)	Tamaño de partículas (µm)	Velocidad de rotación (rpm)
1	10	50	1000
2	30	50	1000
3	10	150	1000
4	30	150	1000
5	10	50	3000
6	30	50	3000
7	10	150	3000
8	30	150	3000
9	20	100	2000
10	20	100	2000
11	10	150	1000

Después de cada hora de ensayo, las probetas de acero fueron desmontadas de la celda, lavadas en agua destilada, desengrasadas con acetona, secadas y puestas en el desecador por un lapso de 5 minutos, posteriormente, se pesaron en una balanza analítica con sensibilidad de 0,01 mg. Después del análisis gravimétrico, las probetas fueron cortadas y analizadas en el microscopio. Una muestra inicial fue utilizada para el análisis de la microestructura.

Todos los ensayos se realizaron a $27^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y a una presión de 1 atmósfera.

A continuación se presenta el diagrama de flujo de la metodología utilizada:

Figura 7. Metodología Experimental del Proyecto.



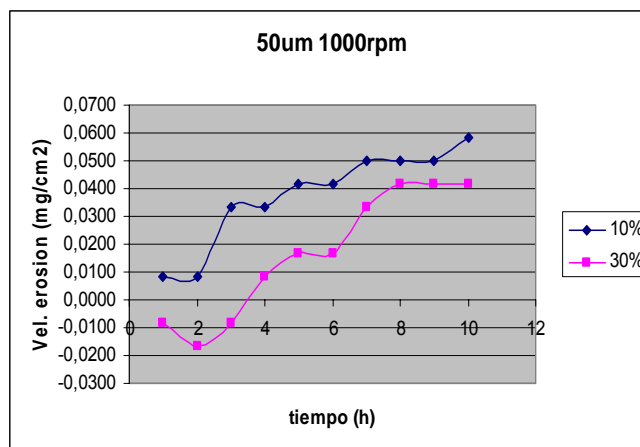
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Tamaño de partículas: 50 μm , velocidad de rotación: 1000 rpm, concentración de partículas: %part. 10%W-30%W

La velocidad de erosión negativa en las primeras horas de ensayo para ambas concentraciones de partícula se atribuye a la ganancia de masa de las probetas de acero debida posiblemente a incrustaciones de arena en las superficies de las mismas, ver figura 7.

Bajo las condiciones establecidas, la velocidad de deterioro del acero es mayor cuando se tienen bajas concentraciones de erodente (ver fotografías 6 y 7), la razón por la cual la velocidad de erosión disminuye con el aumento de partículas en la solución es que a altos porcentajes de arena, existen indicios de interferencia partícula-partícula, de acuerdo a la teoría implementada por Clark, que establece que el porcentaje de impacto en la superficie de la probeta por parte de las partículas de arena se reduce a medida que incrementa la cantidad de sólidos. (5)

Figura 8. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 50 μm y 1000 rpm

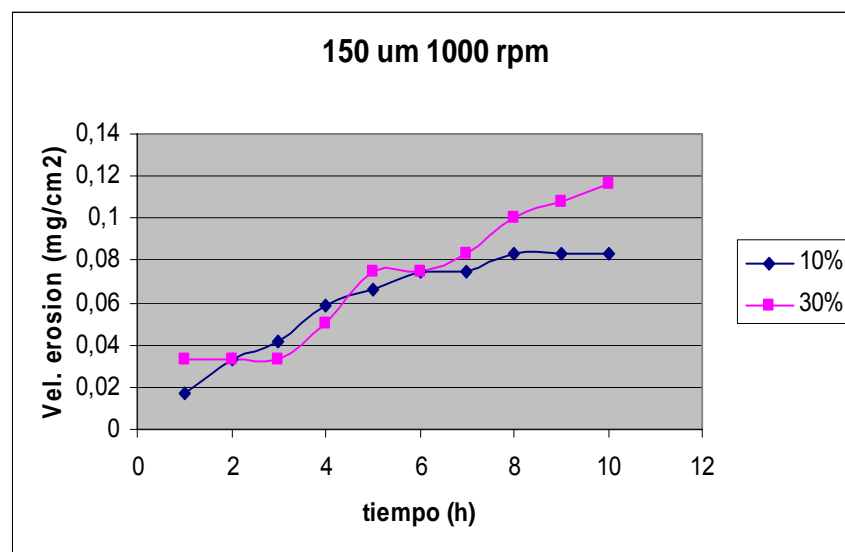


4.2 Tamaño de partículas: 150 μm , velocidad de rotación: 1000 rpm, concentración de partículas: 10%W-30%W

Las curvas de velocidad de erosión vs. Tiempo (figura 8) mostraron que para las condiciones dadas, la disminución en la masa del acero es mayor a valores altos de concentración de partículas (ver fotografías 8 y 9). Para el 10% de partículas, se observó después de la cuarta hora de ensayo una estabilidad en la curva, es decir, que la velocidad de desgaste por erosión se tornó constante a pesar de la continuidad de la prueba. La no linealidad confirma el hecho de que a medida que las partículas impactan la superficie del acero, los bordes inicialmente angulares, tienden a volverse redondeados, disminuyendo así su capacidad de corte.⁵

A mayores concentraciones de partículas, no se observó estabilidad de la curva en el lapso de la prueba, aun cuando los bordes de la arena pierden angularidad, la mayor presencia de partículas impide la reducción de la velocidad de deterioro del acero a medida que transcurre el tiempo.

Figura 9. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 150 μm y 1000 rpm



4.3 Tamaño de partículas: 50 μm , velocidad de rotación: 3000 rpm, concentración de partículas: %part. 10%W-30%W

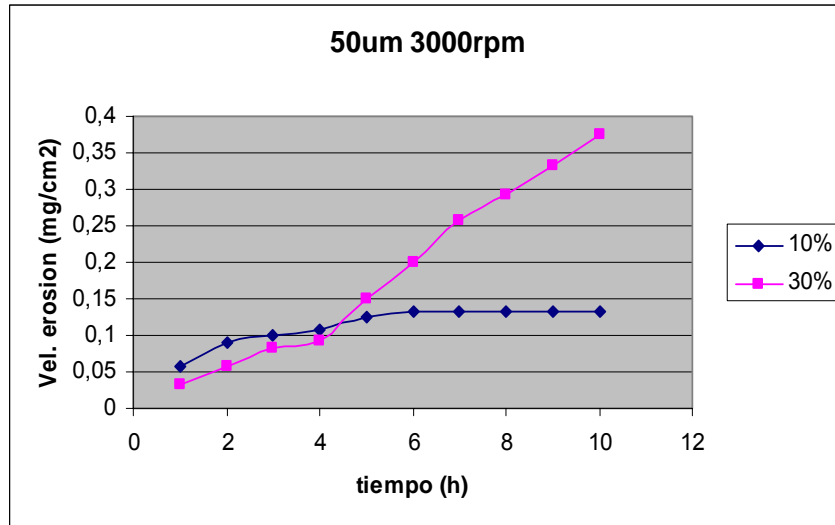
Para concentraciones de 10% en peso, se observó el aumento en la velocidad de erosión del acero con respecto a la velocidad de partículas (velocidad de erosión máxima de $\approx 0,15 \text{ mg/cm}^2$ en contraste con la velocidad de erosión máxima de $\approx 0,06 \text{ mg/cm}^2$ para el mismo tamaño y misma concentración de partículas, pero a velocidad de 1000 rpm), ⁷ ver figura 9.

La curva para velocidad de rotación de 3000 rpm y a 50 μm de tamaño de partícula, presentó mayor uniformidad, indicio de que a bajas concentraciones de partícula, los valores de velocidad de erosión son casi invariantes entre si.

Para el 30 % en peso de arena, se presentó de igual manera aumento en la velocidad de erosión bajo las condiciones dadas. Asimismo, el desgaste por erosión fue proporcional a la velocidad de las partículas, además, éste exhibió mayor linealidad con el tiempo. Cabe anotar que hasta 4 horas de ensayo, para ambas concentraciones de arena, se obtuvieron valores similares de desgaste, lo que indica que para partículas pequeñas existe un umbral por debajo del cual no hay influencia de la concentración de partículas sobre la velocidad de erosión en este sistema en particular.

Con respecto a los valores de concentración de partículas, se notó una mayor velocidad de deterioro para altos porcentajes de erodente (ver fotografías 10 y 11), esto también puede ser atribuido al hecho de que la mayor cantidad de partículas facilita la remoción de material a pesar de la pérdida de la angularidad en los bordes de las partículas. ¹³

Figura 10. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 50 µm y 3000 rpm

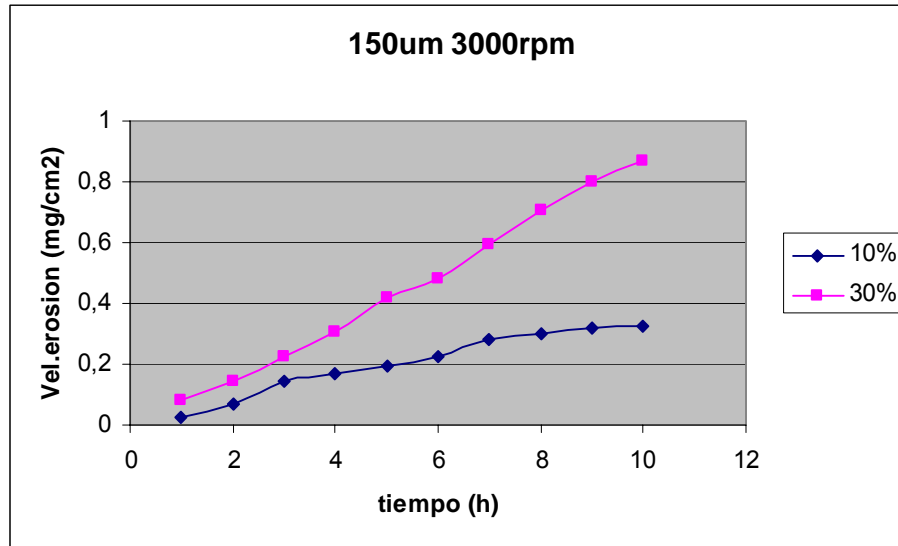


4.4 Tamaño de partículas: 150 µm, velocidad de rotación: 3000 rpm, concentración de partículas: %part. 10%W-30%W

La figura 10 confirma la incidencia de la concentración de partículas en los valores de la velocidad de erosión para las condiciones dadas, se apreció una mayor velocidad de erosión en el material a valores altos de porcentaje de erodente (ver fotografías 12 y 13), de igual manera, la respuesta de la velocidad de desgaste por erosión frente al cambio en la velocidad de partículas es más sensible a las velocidades más altas (3000 rpm), en la gráfica se observaron con claridad los valores mas elevados en la velocidad de erosión (velocidad de erosión máxima de $\approx 0,9 \text{ mg/cm}^2$ en contraste con la velocidad de erosión máxima de $\approx 0,12 \text{ mg/cm}^2$ a 1000 rpm y 30 % en peso, y de $\approx 0,35 \text{ mg/cm}^2$ frente a $\approx 0,08 \text{ mg/cm}^2$ para el 10 % en peso).

Aquí, a diferencia de las condiciones anteriores, los resultados muestran que la concentración de partículas tiene una mayor influencia sobre la velocidad de erosión, debido al aumento en el tamaño de la partícula.

Figura 11. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 150 μm y 3000 rpm

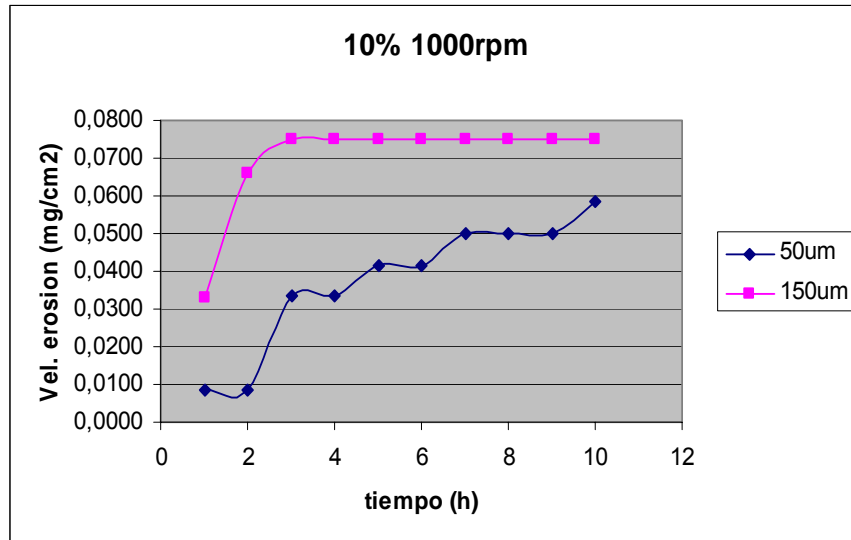


4.5 Concentración de partículas: 10%W, velocidad de rotación: 1000 rpm, tamaño de partículas: 50 μm -150 μm

A 1000 rpm y 10% en peso se apreció una mayor velocidad de erosión del acero para tamaños mayores de partícula (ver fotografías 6 y 8), lo que puede indicar que el área de impacto en la superficie del material fue mayor, por lo tanto el daño fue más severo y condujo a una remoción de metal más alta,¹⁷ ver figura 11.

La dependencia de la velocidad de erosión con respecto al tamaño de partícula se reduce considerablemente después de cierto valor crítico (100 μm), de acuerdo a el concepto de Stack. Para 150 μm , después de 4 horas de ensayo, la velocidad de erosión permaneció constante, mientras que para el tamaño de partícula de 50 μm , ésta continuó aumentando en el transcurso del ensayo. En términos generales, para concentraciones de partícula de 10 % en peso y velocidades de rotación de 1000 rpm, la velocidad de erosión aumenta proporcionalmente con el tamaño de partícula.³

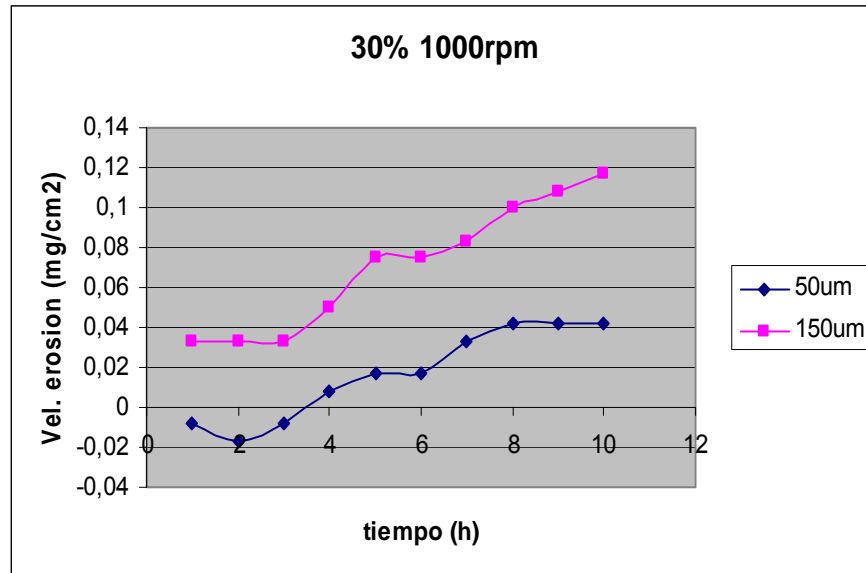
Figura 12. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 10% en peso y 1000 rpm



4.6 Concentración de partículas: 30%W, velocidad de rotación: 1000 rpm, tamaño de partículas: 50 µm-150 µm

En la figura 12 se observó que la tendencia en este ensayo es prácticamente la misma que la del ensayo a concentraciones de partícula de 10 % en peso. La velocidad de erosión del material de prueba es mayor a 150 µm que a 50 µm (ver fotografías 7 y 9). No obstante, en el presente ensayo se notó que no hubo reducción considerable en la dependencia de la velocidad de desgaste por erosión con el tamaño de partícula, es decir que a lo largo de las diez horas de ensayo, no se obtuvo un valor constante de ésta, lo que puede indicar que dicha dependencia es válida solo para bajas concentraciones de erodente, en donde la angularidad de los mismos se reduce notablemente en las primeras horas de ensayo.

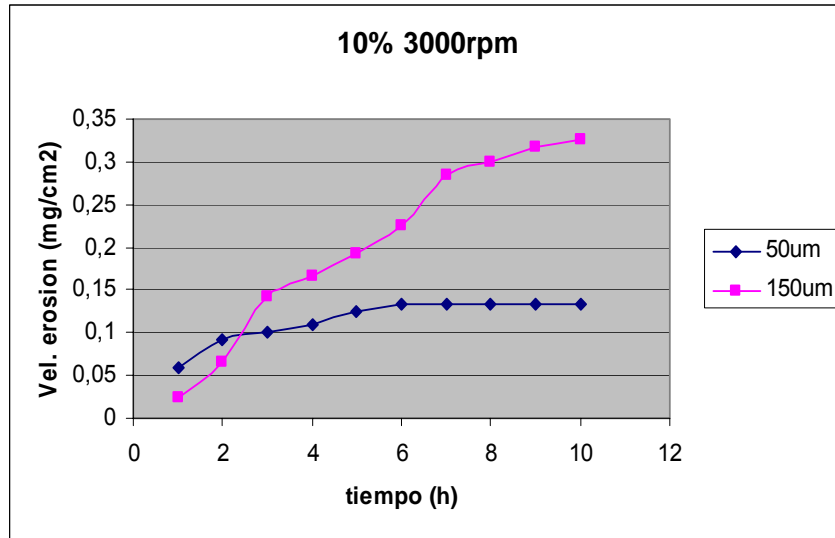
Figura 12. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 30% en peso y 1000 rpm



4.7 Concentración de partículas: 10%W, velocidad de rotación: 3000 rpm, tamaño de partículas: 50 µm-150 µm

Aquí se presentó un caso particular en la que la velocidad de erosión fue mayor para tamaños de partícula de 50 µm durante las primeras dos horas de ensayo (ver figura 13); a medida que el tiempo de prueba transcurrió, la velocidad de erosión aumentó linealmente para 150 µm y se mantuvo mayor que para 50 µm. Desde aproximadamente la sexta hora de ensayo, la velocidad de desgaste por erosión para 50 µm se mantuvo invariable y se asumió nuevamente el hecho de que las partículas de arena pierden angularidad debido al impacto constante sobre la superficie del acero.

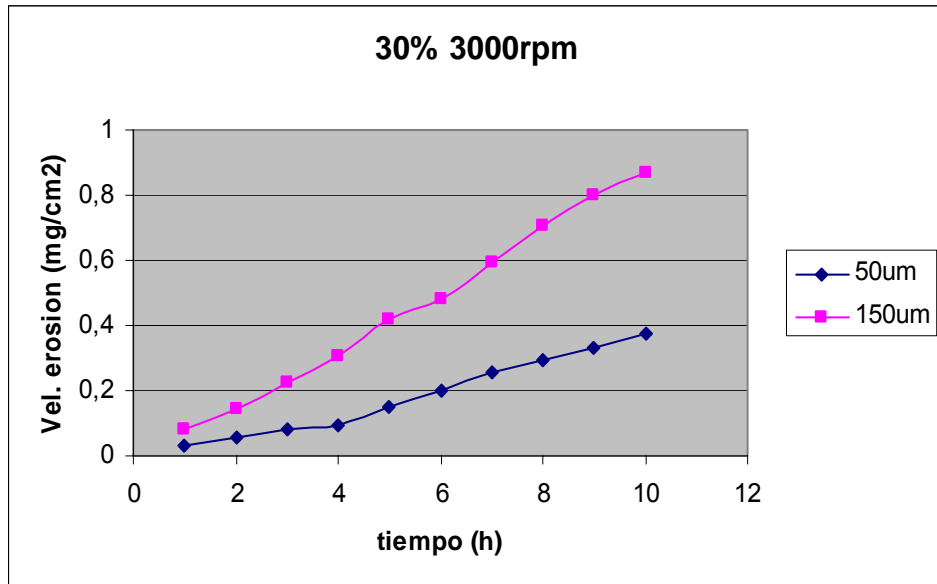
Figura 13. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 10% en peso y 3000 rpm



4.8 Concentración de partículas: 30%W, velocidad de rotación: 3000 rpm, tamaño de partículas: 50 µm-150 µm

A pesar de que en la primera hora de ensayo el valor de la velocidad de erosión es similar para ambos tamaños de partícula, la diferencia entre éstas es considerable, observándose un mayor deterioro de material para tamaños de 150 µm (ver fotografía 13). Con relación a la variación en la concentración de partículas, se notó una mayor linealidad en las curvas de erosión, asumiéndose entonces que a altos porcentajes de arena no hay reducción apreciable en la velocidad de erosión con el tiempo (ver figuras 13 y 14). Adicionalmente, se encontraron velocidades mayores (velocidad máxima de $\approx 0,9 \text{ mg/cm}^2$ para 150 µm a 30 % en peso y 3000 rpm, contra una velocidad máxima de erosión de $\approx 0,35 \text{ mg/cm}^2$ a 10 % en peso. Para 50 µm, velocidad máxima de $\approx 0,4 \text{ mg/cm}^2$ a 30 % en peso y 3000 rpm, en contraste con la velocidad máxima de $\approx 0,15 \text{ mg/cm}^2$ a 10 % en peso y la misma velocidad de rotación.

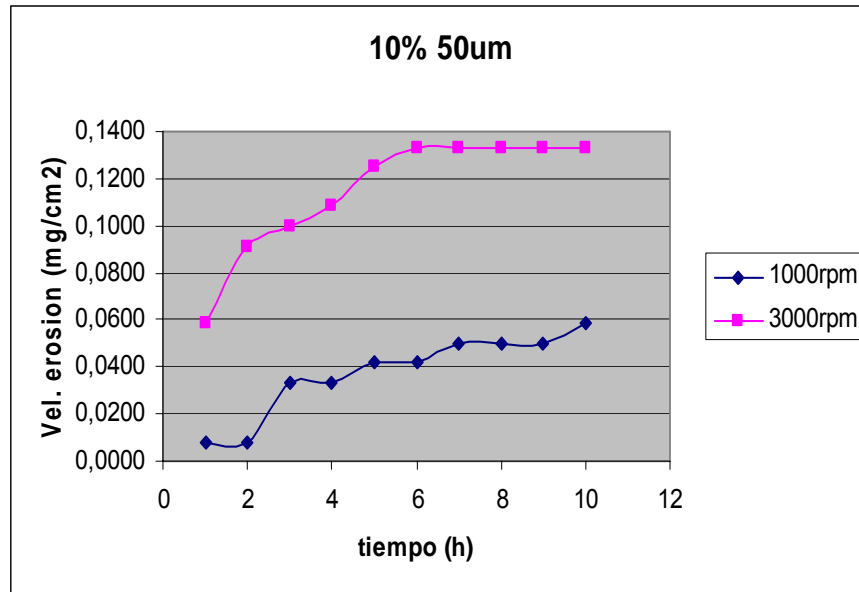
Figura 14. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 30% en peso y 3000 rpm



4.9 Concentración de partículas: 10%W, tamaño de partículas: 50 µm, velocidad de rotación: 1000 rpm- 3000 rpm

Los resultados obtenidos en este ensayo mostraron que a bajas concentraciones y tamaños de partícula, la velocidad de erosión del acero es mayor para 3000 rpm que para 1000 rpm (ver fotografías 6 y 10). Para los dos casos específicos (1000 rpm y 3000 rpm) se observó una reducción en la velocidad de erosión con el tiempo a partir de la quinta hora de ensayo.

Figura 15. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 10% en peso y 50 μm



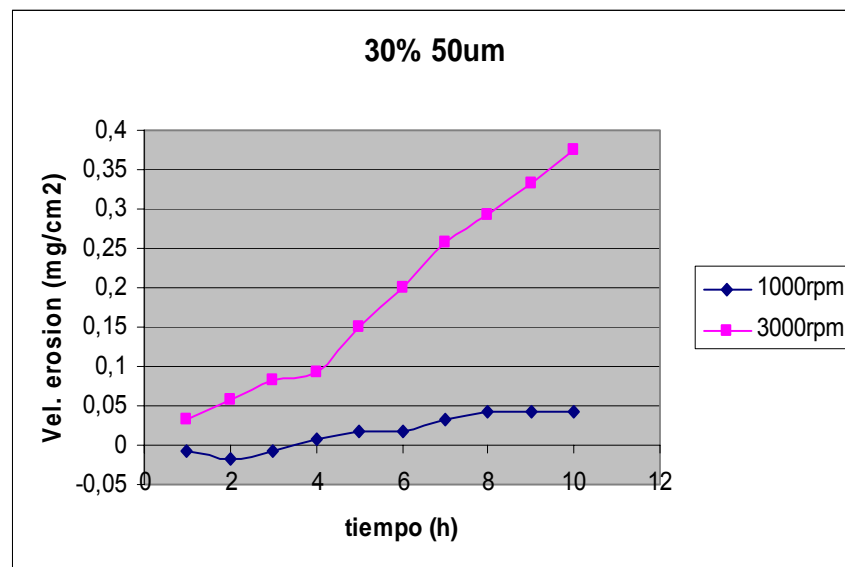
4.10 Concentración de partículas: 30%W, tamaño de partículas: 50 μm , velocidad de rotación: 1000 rpm- 3000 rpm

En la figura 16 se observa la importancia de la velocidad de flujo sobre las velocidades de erosión (ver fotografías 7 y 11). A 1000 rpm el desgaste tiende a ser constante con valores negativos en las tres primeras horas de ensayo, indicio del aumento en la masa de la probeta de acero como resultado de las incrustaciones de partículas de arena en la superficie del material. Después de la séptima hora el valor es constante. Por otro lado, a 3000 rpm, la velocidad de erosión es considerablemente mayor y lineal con el tiempo. A altas concentraciones de partícula y velocidades de rotación, es irrelevante la pérdida de angularidad en los bordes de algunas partículas, en el intervalo de tiempo del ensayo, la cantidad de erodente que pierde esta propiedad no es la suficiente para impedir la incidencia de nuevas partículas sobre la superficie del sustrato.

En lo que respecta al porcentaje de arena, la velocidad de erosión a 1000 rpm, 30 % en peso y 50 μm es menor que la observada a 10 % en peso (ver figura 15), donde se evidencia el fenómeno de interferencia partícula-partícula, producto del mayor contenido de arena en la solución. ⁵

Ahora, a 3000 rpm y 30 % en peso, la velocidad de erosión fue mayor que a 10 % en peso, puesto que la velocidad alta de rotación disminuyó la influencia de la interferencia, facilitando la interacción sílice-acero.

Figura 16. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 30% en peso y 50 μm

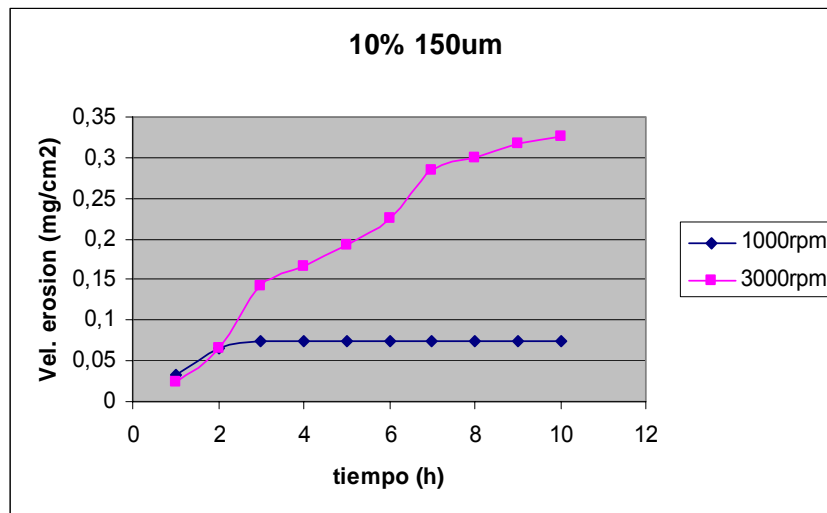


4.11 Concentración de partículas: 10%W, tamaño de partículas: 150 μm , velocidad de rotación: 1000 rpm- 3000 rpm

En la figura 17 se observa que la diferencia en el desgaste por erosión para estas condiciones fue notable, mientras para 1000 rpm la velocidad de erosión del material se mantuvo constante a partir de la tercera hora, para 3000 rpm el desgaste por erosión aumentó con el paso del tiempo. Para bajas

concentraciones de arena de 150 μm , el deterioro fue mayor a 3000 rpm que para 1000 rpm, como se observa en las fotografías 8 y 12.

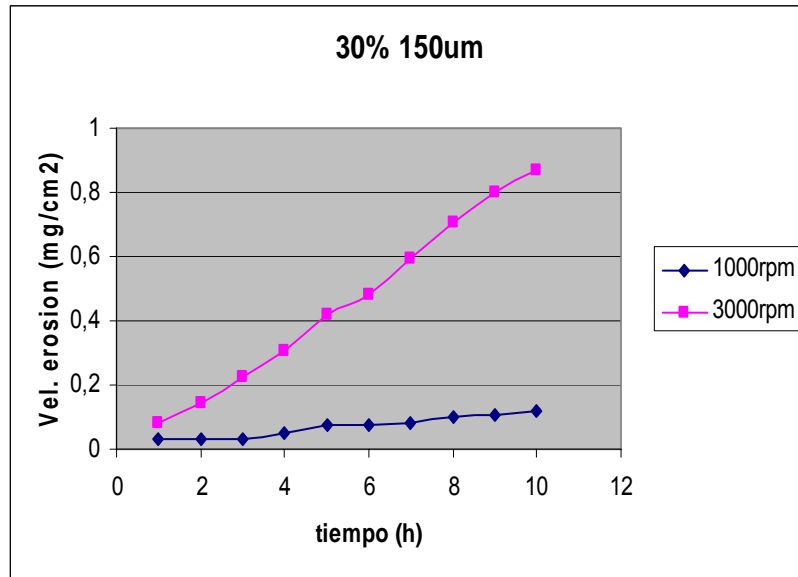
Figura 17. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 10% en peso y 150 μm



4.12 Concentración de partículas: 30%W, tamaño de partículas: 150 μm , velocidad de rotación: 1000 rpm- 3000 rpm

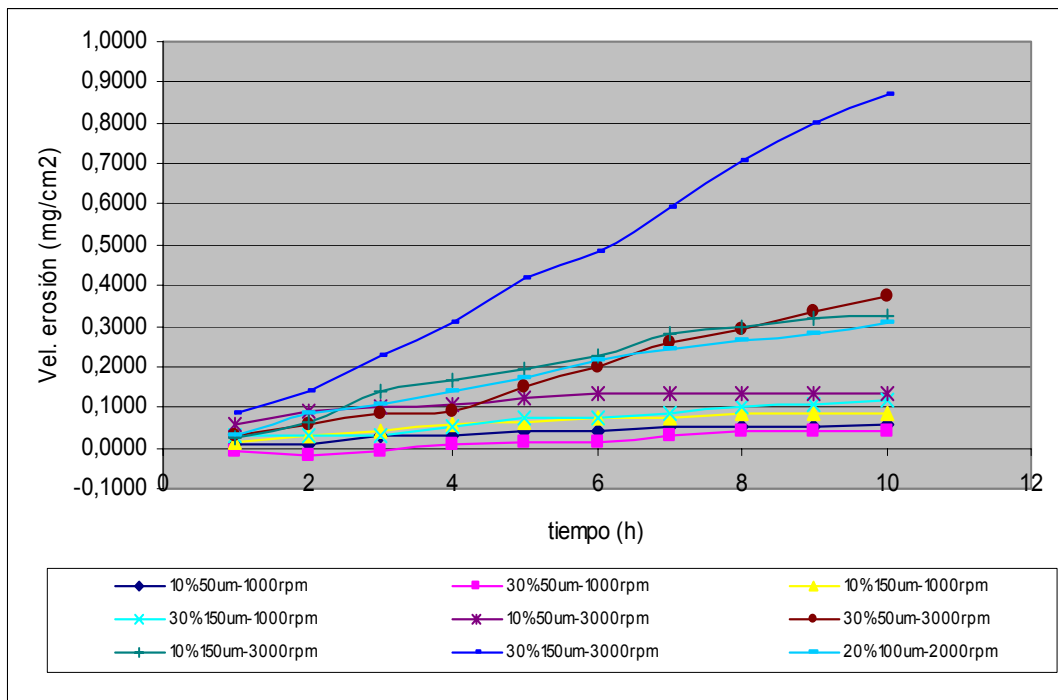
En la figura 18, se hizo apreciable el aumento de la velocidad de erosión con el porcentaje de erodente y se mantuvo la linealidad con el tiempo. Como era de esperarse, el mayor grado de erosión se obtuvo a 3000 rpm (ver fotografías 9 y 13), ya que a esta velocidad de flujo hay mayor oportunidad de que las partículas impacten más veces la superficie del material.

Figura 18. Curvas de erosión del acero AISI 1020 a 30% en peso y 150 μm



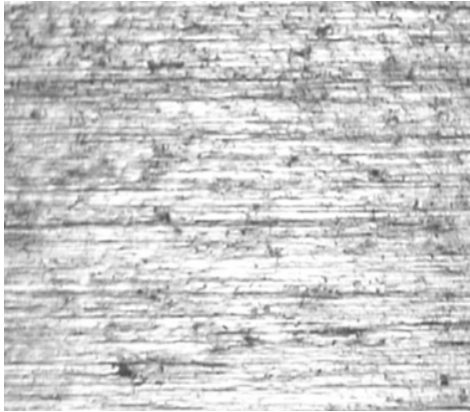
En el siguiente gráfico se muestran a una misma escala las curvas de los ensayos realizados.

Figura 19. Curvas de erosión del acero AISI 1020



Las micrografías de las probetas después de los respectivos ensayos son presentadas a continuación:

Fotografía 6. Superficie del acero después del ensayo 1 (10%W, 50 μ m, 1000 rpm)



50x

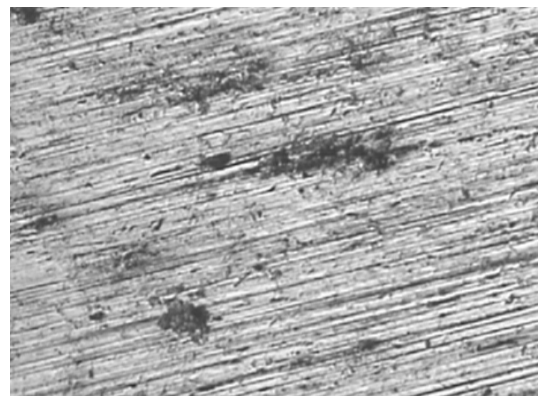


100x

Fotografía 7. Superficie del acero después del ensayo 2 (30%W, 50 μ m, 1000 rpm)

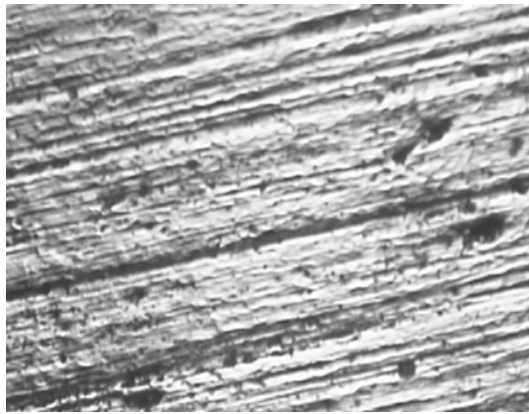


50x

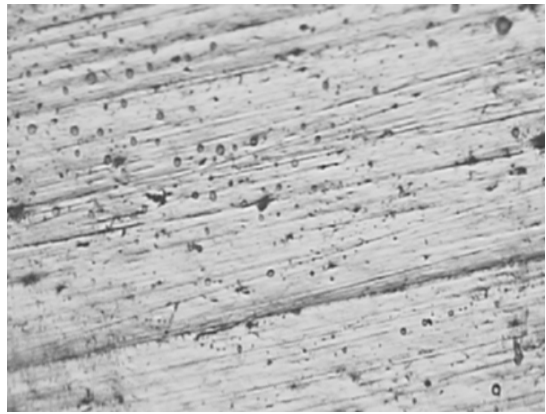


100x

Fotografía 8. Superficie del acero después del ensayo 3 (10%W, 150µm, 1000 rpm)

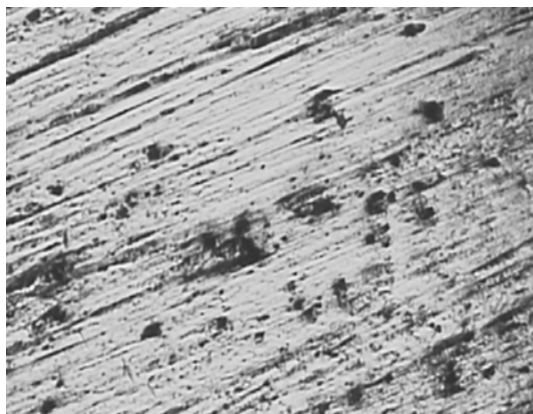


50x



100x

Fotografía 9. Superficie del acero después del ensayo 4 (30%W, 150µm, 1000 rpm)

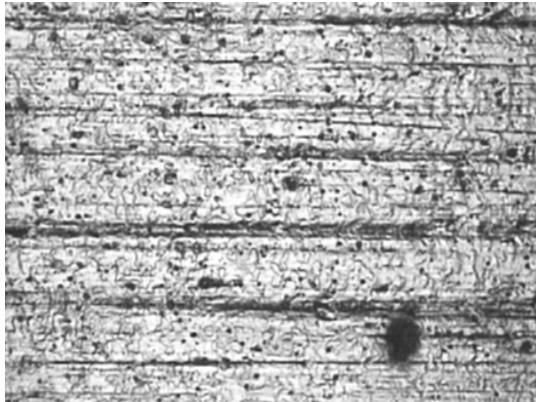


50x

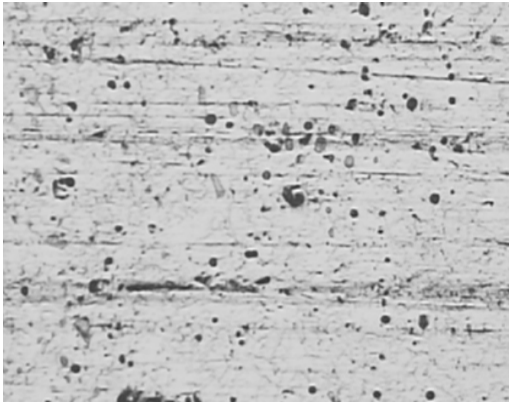


100x

Fotografía 10. Superficie del acero después del ensayo 5 (10%W, 50 μ m, 3000 rpm)



50x



100x

Fotografía 11. Superficie del acero después del ensayo 6 (30%W, 50 μ m, 3000 rpm)



50x



100x

Fotografía 12. Superficie del acero después del ensayo 7 (10%W, 150 μ m, 3000 rpm)

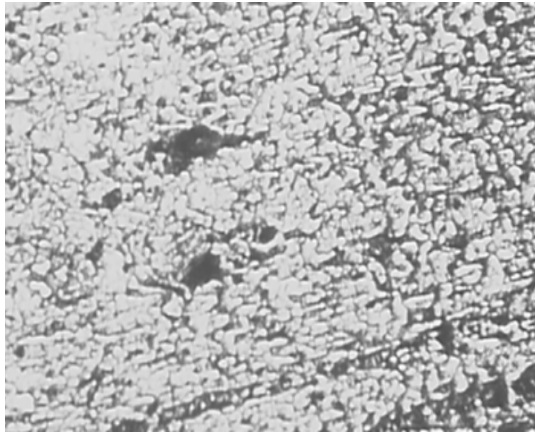


50x

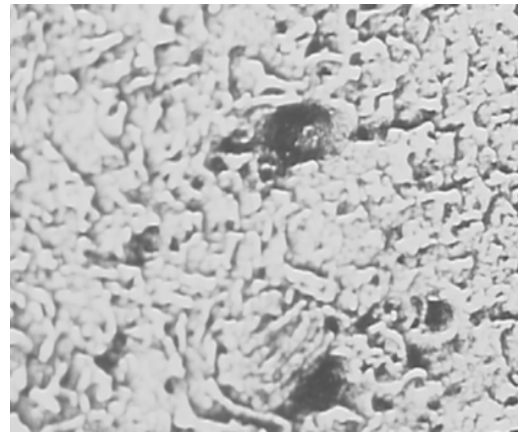


100x

Fotografía 13. Superficie del acero después del ensayo 8 (30%W, 150 μ m, 3000 rpm)

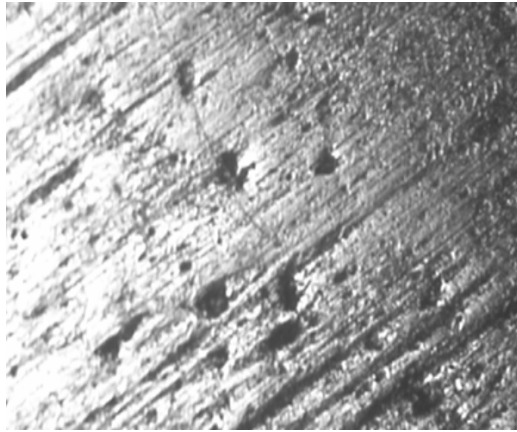


50x

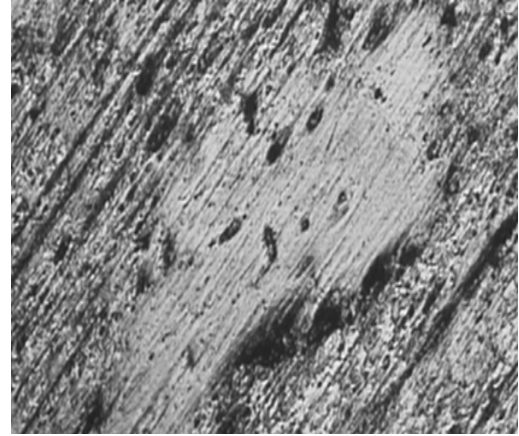


100x

Fotografía 14. Superficie del acero después del ensayo 9 (20%W, 100µm, 2000 rpm)



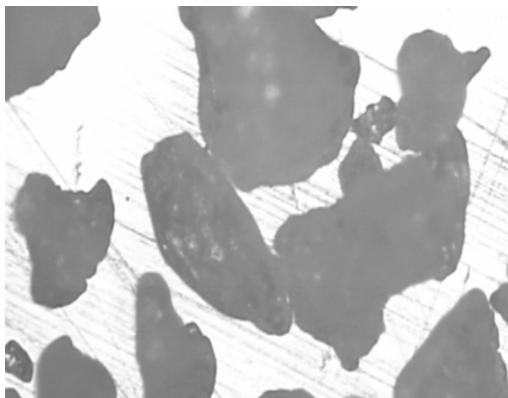
50x



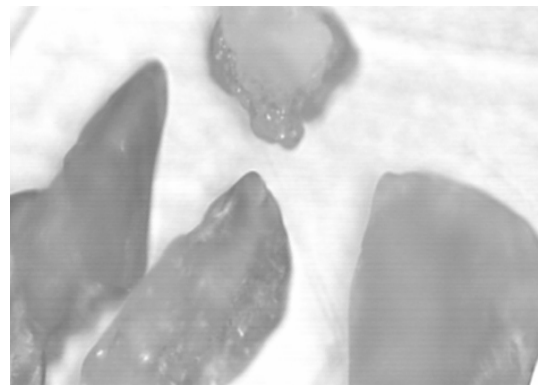
100x

La morfología de las partículas fue analizada después de las pruebas, y se encontró que la angularidad de las mismas se ve reducida considerablemente debido al impacto constante sobre la superficie del acero (ver fotografías 15 y 16).

Fotografía 15. Estado inicial de las partículas de sílice.

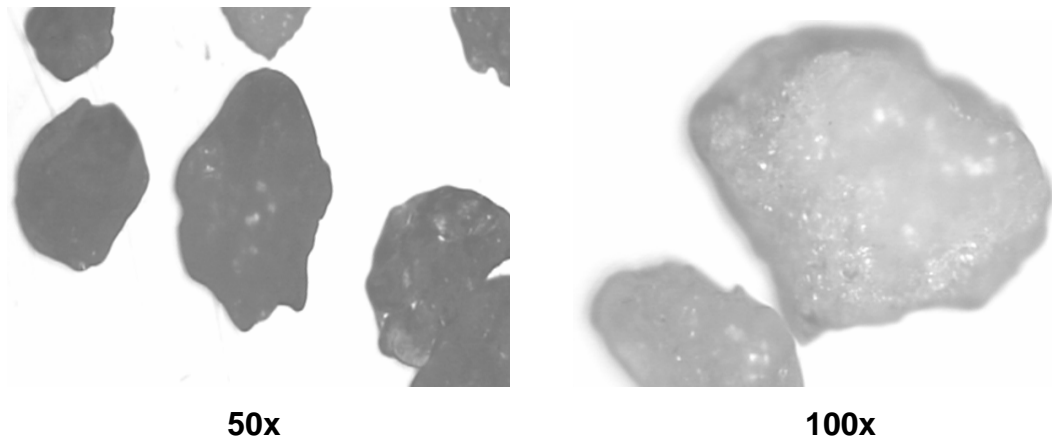


50x



100x

Fotografía 16. Estado final de las partículas de sílice.



Adicionalmente, se realizó un análisis de varianza y una regresión múltiple con la ayuda de un programa estadístico, tomando como variable dependiente o variable respuesta la velocidad de erosión, y como variables independientes, la concentración, tamaño y velocidad de partículas, para los ensayos realizados. El resultado del análisis de varianza, que muestra la varianza de la velocidad de erosión con respecto a los tres componentes mencionados anteriormente, es el siguiente:

Variance Components Analysis

Dependent variable: vel eros

Factors:

conc part

tam part

vel rot

Number of complete cases: 9

Analysis of Variance for vel eros

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	Var. Comp.	Percent
total (corrected)	0,00495691	8			
conc part	0,000472534	2	0,000236267	0,0	0,00
tam part	0,000987625	2	0,000493812	0,0	0,00
vel rot	0,00349675	4	0,000874187	0,000874187	100,00

La tabla del análisis de varianza mostrada divide la varianza de la velocidad de erosión dentro de tres componentes. El objetivo de tal análisis es estimar la cantidad de variabilidad contribuida por cada uno de los factores, llamados los componentes de varianza. En este caso, el factor que contribuye la mayor varianza es la velocidad de rotación (vel rot). Dicha contribución representa el 100% de la variación total en la velocidad de erosión (vel eros).

Por otro lado, el análisis de la regresión múltiple mostró los siguientes resultados:

Dependent variable: VE mg cm² h

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-0,0384889	0,0221197	-1,74003	0,1423
vel rot rpm	0,0000164	0,00000616129	2,66178	0,0448
tam part um	0,0002125	0,000123226	1,72448	0,1452
conc part %W	0,0006925	0,000616129	1,12395	0,3121

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0,00343845	3	0,00114615	3,77	0,0934
Residual	0,00151846	5	0,000303692		
Total (Corr.)	0,00495691	8			

R-squared = 69,3668 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 50,9869 percent

Standard Error of Est. = 0,0174268

Mean absolute error = 0,011279

Durbin-Watson statistic = 2,14256

Los datos mostrados en las anteriores tablas son el resultado de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la velocidad de erosión del acero AISI 1020 y tres variables independientes. La ecuación del modelo es:

$$VE [mg/cm^2/h] = -1,77 \cdot 10^{-2} + 1,64 \cdot 10^{-5} \text{ vel rot [rpm]} + 2,125 \cdot 10^{-4} \text{ tam part [\mu m]}.$$

Para concentraciones de arena entre 10 y 30% en peso, rango en el cual esta variable es irrelevante.

De acuerdo a los resultados obtenidos (P-value en la tabla ANOVA menor que 0,10), existe una relación significativamente estadística entre las variables, con un nivel de confianza del 90%.

La estadística de raíces cuadradas (R-Squared statistic) indica que el modelo como ha sido fijado explica el 69,3668% de la variabilidad de la velocidad de

erosión. La estadística ajustada de la raíces cuadradas (adjusted R-Squared statistic), la cual es mas conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es del 60,9869%. El error estándar, que muestra la desviación de los resultados, fue de 0,0174268. Este valor puede ser usado para construir límites de predicción para nuevas observaciones. El error absoluto fue de 0,011279.

Para la construcción del mapa se obtuvieron las medias de los valores de velocidad de erosión en $\text{mg cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$, así como en mpy (milésimas de pulgada por año).⁴³ Los valores correspondientes a cada ensayo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Valores experimentales de velocidad de erosión a concentración de partículas de 30% en peso.

Tamaño de partículas (μm)	Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de erosión ($\text{mg cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	Velocidad de erosión (mpy)
50	1000	0,0052	2,271
50	3000	0,0375	16,38
150	1000	0,0116	5,066
150	3000	0,0325	37,82

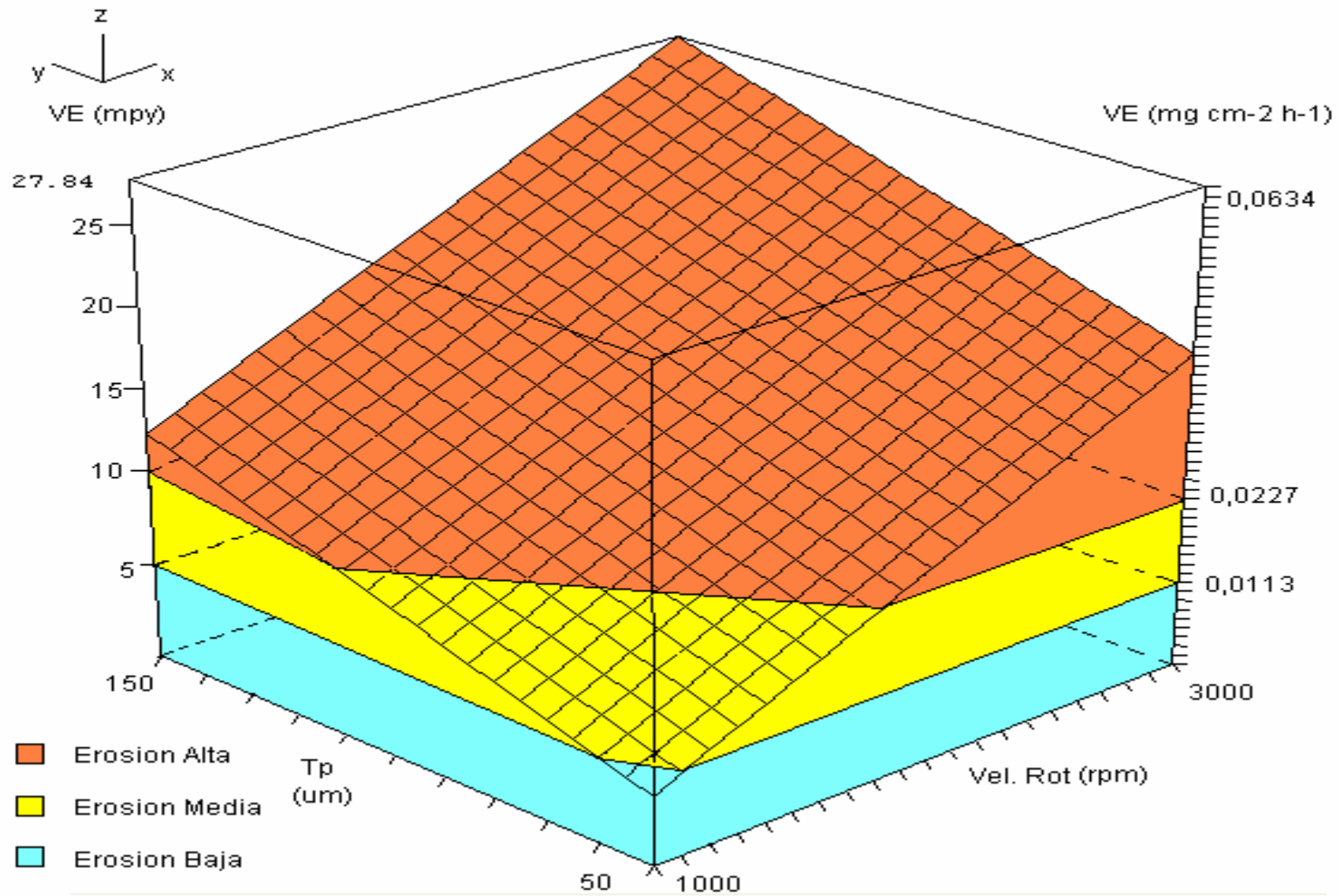
Los niveles de transición de los regimenes de erosión fueron establecidos de acuerdo a los resultados de McLaury, en los que los valores bajo, medio y alto, en mpy, están entre 0, 5 y 10, respectivamente.⁴³

A continuación se muestra el mapa de erosión del acero a las condiciones experimentales. El mapa tridimensional muestra 3 zonas de transición las cuales dependen de las condiciones experimentales y donde la región de baja velocidad

de erosión está limitada a tamaños de partícula hasta 60 μm y velocidades de flujo hasta 1100 rpm.

La utilidad del mapa tridimensional es importante debido a que permite identificar la potencialidad corrosiva de partículas en líneas rectas de tubería sin soluciones corrosivas.

Figura 20. Mapa de erosión del acero AISI 1020 a concentraciones de partícula entre 10 y 30% en peso y 27°C.



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se evaluó la velocidad de erosión del acero AISI 1020 en el sistema multifásico agua-sílice-nitrógeno en una celda modificada de un electrodo de cilindro rotatorio a temperatura ambiente mediante análisis gravimétrico; se establecieron las variables de mayor incidencia (velocidad, tamaño y concentración de partículas) y se determinaron las velocidades de erosión de acuerdo a los valores de las mismas.

Se construyó experimentalmente un mapa tridimensional de erosión del acero a las condiciones establecidas y se obtuvo una ecuación general para describir el fenómeno erosivo, el mapa permite establecer las regiones seguras de desempeño del material a las condiciones experimentales.

La variable más relevante en el proceso fue la velocidad de partículas, los valores de erosión más elevados se obtuvieron a velocidades de flujo altas, independiente de los rangos manipulados para las otras variables (concentración y tamaño de partículas). En los resultados obtenidos, grandes diferencias en las velocidades de erosión se observaron con el aumento de la velocidad de rotación del sistema, ya que la energía cinética de las partículas es lo suficientemente alta para producir las deformaciones plásticas y el posterior deterioro del material.

La concentración de partículas, en el rango utilizado, no presentó un efecto considerable en la velocidad de erosión, los resultados obtenidos se pueden considerar independientes de esta variable.

Para tamaños de partícula mayores de 100 μm la dependencia de la velocidad de erosión con respecto a esta variable se reduce considerablemente, en ciertas investigaciones se hace caso omiso de esta consideración. En el caso específico de esta investigación, se asumió el concepto del límite de tamaño de partícula de

acuerdo a los resultados obtenidos, pero se recomienda a los investigadores interesados en el tema, establecer nuevos rangos de tamaños de partícula, y analizar más a fondo este fenómeno particular.

La morfología de las partículas de arena se vio afectada ampliamente debido al impacto constante sobre la superficie del acero, dicho fenómeno contribuye a la reducción en la velocidad de erosión del material ya que en las partículas, debido a la pérdida inminente de su angularidad, se ve disminuida la capacidad para actuar como herramienta de corte.

Las altas concentraciones de arena incidiendo sobre la superficie de un acero al carbono a gran velocidad son una amenaza latente para la integridad y la vida en servicio del material, es esencial para la protección de las estructuras un riguroso control sobre esta combinación de variables o en su defecto, establecer una acertada periodicidad del proceso de mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. ZHOU, S, STACK, M.M. y NEWMAN, R.C. Characterization of synergistic effects between erosion and corrosion in an aqueous environment using electrochemical techniques. Corrosion, paper. NACE international. 1996.
2. HE, D. JIANG, S. y GUAN, H. Erosion and corrosion behaviors of several stainless steels in dual-phase fluid. Corrosion, paper. NACE international. 2002.
3. STACK, M.M, JAMES J.S y LU, Q. Erosion-corrosion of chromium steel in a rotating cylinder electrode system: some comments of particle size effects. Corrosion, paper. Elsevier. 2003.
4. SILVERMAN, D.C. The rotating cylinder electrode for examining velocity-sensitive corrosion-a view. Corrosion, paper. NACE international. 2004.
5. CLARK, H. Mcl. A comparison of the erosion resistance of casing steels by sand-oil suspensions. Paper, Wear. Elsevier. 1991.
6. CLARK, H. Mcl y LLEWELLYN, R.J. Assessment of the erosion resistance of steels used for slurry handling and transport in mineral processing applications. Paper, Wear. Elsevier. 2001.
7. DA SILVA, P, CEDRIC, B y BERNIS, A. Development of a new rapid method to measure erosion rates in laboratory and pilot plants cyclones. Paper, Wear. Elsevier. 2002.

8. RAO, P.V. Y BUCKLEY, D,H. Characterization of solid particle erosion resistance of ductile metals based in their properties. Paper, Wear. Elsevier. 1985.
9. BIRD, B. STEWART, W. y LIGHTFOOT, E. Transport Phenomena. New York. 1992.
10. HEITZ, E. Chemo-mechanical Effects of Flow on Corrosion. Corrosion. Vol. 47. No. 2. 1991. 135 p.
11. KELLY, R. SCULLY, J. SHOESMITH, D y BUCHHEIT, R. Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering. Marcel Dekker, Inc. New York. 2003.
12. CAMERON, G. y CHIU, A. Electrochemical Techniques for Corrosion Inhibitor Studies. Corrosion, paper. 1990.
13. LEVI, A. Erosion and erosion-corrosion of metals. Corrosion, paper. NACE, international. 1995.
14. HATTORI, S. y NAKAO, E. Cavitation Erosion and Quantitative Evaluation based on Erosion Particles. Paper, Wear. Elsevier. 2001.
15. TORO, A. SINATORA, A. y TSCHIPTSCHIN. Corrosion-erosion of Nitrogen Bearing Martensitic Stainless Steels in Seawater-quartz Slurry. Corrosion, paper. Elsevier. 2001.
16. HAMZAH, R. STEPHENSON, D. y STRUTT, J. Erosion of Material used in Petroleum Production. Paper, Wear. Elsevier. 1995.

17. CLARK, H. Mcl. Particle Velocity and Size Effects in Laboratory Slurry Erosion Measurements or...do you know what your particles are doing?. Paper, Wear. Elsevier. 2002.
18. LEVY, A. The Platelet Mechanism of Erosion of Ductile Metals. Paper, Wear. Elsevier. 1986.
19. FINNIE, I. Some Reflections on the past and Future of Erosion. Paper, Wear. Elsevier. 1995.
20. BALASUBRAMANIYAM, S. Computational Modeling of Brittle Impact Erosion Mechanisms. Tesis de maestría. Universidad de West Virginia, USA. 1998.
21. BROWN, R. JIN JUN, E y EDINGTON, J. Mechanisms of Erosive Wear for 90° Impact on Cooper and Iron Targets. Paper, Wear. Elsevier. 1981.
22. PEÑA, D. Introducción a la Erosión de Materiales. Artículo. Revista Ión, Centro de Estudios de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Vol. 17, No 1. 2001.
23. FINNIE, I. Erosión of Surfaces by Solid Particles. Paper. Wear, Vol 3. 1960.
24. GOODWIN, J.E., SAGE, W., TILLY, G.P. Study of erosion by Solid Particles. Proc. Of Inst. of Mech. Eng. Vol 184. 1970.
25. BITTER, J. G. A. A Study of Erosion Phenomena. Paper. Wear. 1963.

26. VINCENT, M.C., MILLER, H.B., MILTON, D., y KAUFMAN, P.B. Erosion by Proppant: A Comparison of the Erosivity of Sand and Ceramic Proppants during Slurry Injection and Flowback of Proppant. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, U.S. 2004.
27. JOSEPH, G. Collisional Dynamics of Macroscopic Particles in a Viscous Fluid. Tesis de doctorado. California Institute of Technology, Pasadena, California, U.S. 2003.
28. KLEMM, R. Abrasion Resistant Steel Piping Systems for Slurry Transport in Mining Applications. Paper. Wear. 1999.
29. MISRA, A. y FINNIE, I. On the Size Effect in Abrasive and Erosive Wear. Paper, Wear. 1981.
30. FINNIE, I. Erosion of Metals. Proc. of Conf. on Corrosion/Erosion of Coal Conventional System Materials. NACE. 1979.
31. TILLY, G. Wear. Vol 23. 1973.
32. SHELDON, G. Eng. Mat. Tech. Trans. ASME 99. 1977.
33. WINTER, R. y HUTCHINGS, I. Wear 34. 1975.
34. PREECE, C. VIDYA, S. y DAKSHIRAMOORTHY, S. Proc. ASTM Symp. Eros. Prevent Useful. Appl. STP 664. 1978.
35. YOUNG, J. P. y RUFF, A.W. Particle Erosion Measurements on Metals. Trans. of ASME. Journal of Materials and Technology. 1977.

36. HOCKEY, B. WIEDERHORN, S. y JOHNSON, H. Erosion of Brittle Materials by Solid Particle Impact, Fracture Mechanics of Ceramics. Proc. of Intl. Sym. of Frac. Mech. of Ceramics. 1978.
37. SUNDARARAJAN, G. The Solid Particle Erosion of Metallic Materials at Elevated Temperatures. Paper 11. Proc. of Conf. on Corrosion-Erosion-Wear of Materials at Elevated Temperature. Corrosion, paper. NACE. 1990.
38. FOSTER, D. J. LIVINGSTON, W.R. WELLS, J. WILLIAMSON, J. GIBB, W. H. y BAILEY, D. Particle Impact Erosion and Abrasion Wear-Predictive Methods and Remedial Measures. Report No. COAL R241. Mitsui Babcock Energy Limited. 2004.
39. HUTCHINGS, I. M. y WINTER, R. E. The Erosion of Ductile Metals by Spherical Particles. Paper, Wear. 1975.
40. PUNGWIWAT, N. PhD tesis, UMIST, UK. 1999.
41. STACK, M.M. y PUNGWIWAT, N. Erosion-Corrosion Mapping of Fe in Aqueous Slurries: Some Views on a New Rationale for Defining the Erosion-Corrosion Interaction. Wear, paper. Elsevier, 2003.
42. STACK, M.M. CORLETT, N. y TURGOOSE, S. Some Thoughts on Modelling the Effects of Oxygen and Particle Concentration on the Erosion-Corrosion of Steels in Aqueous Slurries. Wear, paper. Elsevier, 2003.
43. McLAURY, B y SHIRAZI, S. An Alternative Method to API RP 14E for Predicting Solids Erosion in Multiphase Flow. Paper. Journal of Energy Technology, ASME. 2000.