

**ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE LA VELOCIDAD DE
IMPACTO DE MATERIAL PARTICULADO EN ACERO
AISI 1020**

Investigador principal:
Hernan Camilo Pacheco Barragán

Tutor de investigación:
Ph.D., M.Sc., Ing., Ángela Bermúdez Castañeda

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Programa de Ingeniería Mecánica
Bogotá D.C., Colombia
2021

**ESTUDIO DE LA INCIDENCIA DE LA VELOCIDAD DE
IMPACTO DE MATERIAL PARTICULADO EN ACERO
AISI 1020**

Investigador principal:
Hernan Camilo Pacheco Barragán

Tutor de investigación:
Ph.D., M.Sc., Ing., Ángela Bermúdez Castañeda

Trabajo Dirigido

Línea de Investigación:
Desgaste de materiales
Grupo de Investigación:
Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica (DSIM)

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Programa de Ingeniería Mecánica
Bogotá D.C., Colombia
2021

Dedicatoria

A mis padres:

María del Pilar Barragán Bernal

Luis Felipe Pacheco

A mi hermano:

Duvan Felipe Pacheco Barragán

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.”

Albert Einstein

Agradecimientos

Al programa de Ingeniería Mecánica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por interesarse siempre en el bienestar y promover el crecimiento personal y profesional de sus estudiantes.

A la Dra. Ángela Bermúdez Castañeda, por colaborarme a cumplir un sueño personal y familiar, por brindarme su asesoría, comprensión y su amistad.

Al M.Sc. Javier Andrés Urbano Tole, por brindarme su asesoría y apoyo en todo el proceso de diseño.

A DSIM, por promover la investigación y el desarrollo en áreas importantes de la formación universitaria y de la ingeniería.

A mi familia, por todo el apoyo, comprensión y amor, por su ejemplo y educación.

A mis amigos y compañeros de proyecto Alejandra Cárdenas Quiñones y Juan José Triana Chávez, por brindarme su amistad y apoyo en todas las etapas de desarrollo de este proyecto.

Resumen

Colombia es un país cuyo amplio territorio tiene regiones alejadas de centros urbanos donde generalmente no se cuenta con servicios de electricidad, dada la dificultad de hacerlas parte del sistema interconectado por las condiciones geográficas. Por tal motivo, se trabaja en el desarrollo de nuevas iniciativas que buscan suplir dichas necesidades energéticas, a través de la implementación de dispositivos como las turbinas eólicas de eje vertical que requieren poco espacio para su instalación, bajos costos y regímenes de velocidad de viento bajos.

Dado que estos dispositivos se encuentran expuestos a las condiciones ambientales, fenómenos de desgaste y deterioro como la erosión y la corrosión-erosión pueden aparecer y afectar la estructura. Los principales factores que gobiernan dichos fenómenos son la velocidad de viento y de impacto, tamaño, tipo y composición de material particulado, ángulo de impacto y salinidad del ambiente.

Este trabajo estudia el comportamiento de un acero AISI 1020 comúnmente utilizado en estructuras y dispositivos expuestos al ambiente, a condiciones que se asemejan a aquellas presentadas en ambientes como los de La Guajira colombiana.

La variación de las condiciones de ensayo permitió asegurar un acercamiento al fenómeno y comprobar los resultados reportados en la literatura. Los ángulos de impacto de partículas que incrementan el efecto de deterioro superficial y pérdida de material son cercanos a 30° , dado que bajo esta inclinación la superficie disminuye su capacidad de absorber energía del impacto, esto se traduce en una remoción del material base.

En conclusión, el diseño de dispositivos como turbinas eólicas (sus ejes, álabes) o estructuras expuestas a ambientes agresivos, debería evitar la formación de ángulos cercanos a los 30° , dado que en ambientes con alta presencia de material particulado y velocidades de viento similares a 15m/s se presentarán pérdidas apreciables de masa que pueden comprometer la integridad del dispositivo.

Palabras clave: Turbinas eólicas, erosión, ángulo de impacto, velocidad de impacto, partículas sólidas, desgaste, corrosión-erosión.

Abstract

Colombia has an extended territory where some regions are far away from urban centers. The electrical connections in those areas are very scarce because the geographical conditions. Therefore, different initiatives are proposed to develop electrical solutions, such as: vertical axis wind turbines (VAWT). These devices require little space for installation, low costs and low wind speed regimes.

VAWT are exposed to several environmental conditions which lead to degradation phenomena such as erosion and corrosion-erosion. The main factors that interfere and promote these phenomena are wind speed, impact speed, size, type and composition of particulate material, impact angle and salinity of the environment.

This work identifies the behavior of a steel AISI 1020, which is commonly used in structures and devices exposed to the environment. In this study, experimental conditions similar to those of the Colombian Guajira were simulated.

The variation of these conditions approaches the system to the phenomenon and check the results reported in literature. The impact angles of particles close to 30° increase the effect of surface deterioration and material loss, since under this inclination the surface decreases its capacity to absorb energy of the impact, which leads to higher material removal.

In conclusion, the design of devices such as wind turbines (axes, blades) or structures exposed to aggressive environments should avoid designs where materials are under angles closer to 30° even more, where the regimes are around a speed wind rate of 15 m/s, because material loss under this conditions will be significant.

Keywords: Wind turbines, erosion, impact angle, impact speed, solid particles, wear, corrosion-erosion

Contenido

	Pág.
Contenido	IX
Lista de figuras	X
Lista de tablas	XI
Introducción	1
Capítulo 1. Objetivos	3
1.1. Objetivo General	3
1.2. Objetivos Específicos.....	3
Capítulo 2. Marco Teórico	4
2.1. Desgaste	4
2.1.1 Desgaste Erosivo.....	4
2.2. Erosión	6
2.2.1 Parámetros del fenómeno.....	7
Capítulo 3. Materiales y Métodos	12
3.1. Selección del material de la superficie.....	12
3.2. Parámetros del ensayo.....	12
3.3. Mediciones	14
3.3.1 Condiciones de muestreo y repetibilidad	15
3.4. Procedimiento para el ensayo.....	15
Capítulo 4. Resultados	18
4.1. Deterioro superficial.....	18
4.2. Pérdida de masa.....	21
4.3. Fenómeno de corrosión-erosión.....	23
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	26
5.1. Conclusiones	26
5.2. Recomendaciones.....	27
Bibliografía	28

Lista de figuras

<i>Figura 2.1 Repetidos impactos de partículas sólidas sobre una superficie plana</i>	5
<i>Figura 2.2 Impacto de un líquido sobre una superficie plana</i>	5
<i>Figura 2.3 Conducción de lodos en una tubería</i>	6
<i>Figura 2.4 Cavitación. Burbujas colapsando en un material</i>	6
<i>Figura 2.5. Etapas de la Erosión</i>	7
<i>Figura 2.6 Tasa de erosión para diferentes materiales respecto al ángulo de impacto de las partículas</i>	8
<i>Figura 2.7 Condiciones de transporte de partícula</i>	9
<i>Figura 2.8 Mecanismos de erosión en función de la velocidad del flujo, el ángulo de ataque y el tamaño de la partícula</i>	9
<i>Figura 2.9 Ángulo de impacto de una partícula en una superficie plana</i>	10
<i>Figura 2.10 Tasa de erosión respecto a la variación de impacto</i>	11
<i>Figura 3.1 Esquema general del dispositivo</i>	14
<i>Figura 3.2 Condiciones de muestreo</i>	15
<i>Figura 4.1 Acabado superficial tipo espejo</i>	18
<i>Figura 4.2 Micrografía a 50x (izquierda) y a 100x (derecha), antes del ensayo</i>	18
<i>Figura 4.3 Estado superficial posterior al ensayo de erosión</i>	19
<i>Figura 4.4 Micrografías posteriores al ensayo de erosión, a) 50x, b) 100x, c) 500x y d) 1000x</i>	20
<i>Figura 4.5 Micrografía 500x</i>	20
<i>Figura 4.6 Pérdida de masa en función de la presión</i>	22
<i>Figura 4.7 Pérdida de masa en función del ángulo de impacto</i>	22
<i>Figura 4.8 Tasa de erosión del acero AISI 1020 CR</i>	23
<i>Figura 4.9 Pérdida de masa bajo el fenómeno de corrosión-erosión</i>	24
<i>Figura 4.10 Relación de pérdida de masa con respecto a la concentración de salinidad</i>	25
<i>Figura 4.11 Comparación superficial, a) agua+arena y b) agua+arena+sal</i>	25

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Características del material de superficie.</i>	12
<i>Tabla 2. Condiciones de ensayo.</i>	13
<i>Tabla 3. Ensayos y/o procedimientos.</i>	14
<i>Tabla 4 Cambios superficiales post-ensayos.</i>	21
<i>Tabla 5 Parámetros utilizados para un ensayo de corrosión-erosión.</i>	23

Introducción

Colombia es un país cuya ubicación geográfica favorece la diversidad de pisos térmicos y condiciones topográficas, lo que favorece que en ciertas regiones las condiciones áridas y la cercanía al mar produzcan gran cantidad de material particulado y salinidad; mientras que, en lugares de mayor altitud, los accidentes topográficos conducen a menores velocidades de viento y cambios abruptos en el clima, así como en la humedad relativa. Lo anterior, constituye un reto en cuanto a los procesos de selección de materiales y protección de estructuras expuestas, así como del diseño de dispositivos que permitan el aprovechamiento de los recursos eólicos.

La implementación de sistemas de energía limpia como las turbinas eólicas es una alternativa para algunas comunidades en regiones remotas y alejadas de los centros urbanos en el territorio nacional, en dichos lugares las velocidades de viento son generalmente altas y constantes, de tal manera que se analiza crear alternativas como parques eólicos para generar, almacenar y distribuir energía eléctrica en dichos sitios. Este tipo de tecnologías son muy comunes en otros países dada su productividad y alta tasa de aprovechamiento de los recursos eólicos.

Las turbinas eólicas pueden ser de eje horizontal o vertical, siendo las primeras las más utilizadas. Sin embargo, presentan una desventaja respecto a las demás, requieren amplios espacios para su instalación, tienen costos elevados además necesitan regímenes altos de velocidad de viento. Por lo tanto, el diseño de turbinas eólicas de eje vertical es una solución más pertinente y adaptada para el déficit energético en el territorio colombiano en zonas no interconectadas. La región de La Guajira presenta regímenes de viento de entre 3 y 15 m/s, velocidades apropiadas para el uso de este tipo de dispositivos que requieren poco espacio y una baja inversión.

Sin embargo, las condiciones operativas en este tipo de lugares son muy agresivas, por lo que es vital realizar diseños e implementar materiales que permitan soportar dichos ambientes sin disminuir su eficiencia de producción. Un primer paso para determinar la viabilidad de dichos diseños son las simulaciones del comportamiento de los materiales bajo condiciones que repliquen las condiciones

ambientales más críticas. Así mismo, una alternativa es realizar ensayos de campo que resultan ser costoso y de resultados a largo plazo. Mientras que, los ensayos acelerados permiten contrastar de forma controlada los resultados obtenidos de las simulaciones. Por esta razón, es fundamental que dentro del desarrollo de estos dispositivos se considere la evaluación de los materiales bajo fenómenos erosivos y de corrosión-erosión.

La erosión es la pérdida progresiva del material original de una superficie sólida debido a la interacción mecánica entre la superficie y un fluido, un líquido con múltiples componentes, o un choque de partículas sólidas o líquidas [1].

El estudio y análisis del fenómeno de la erosión se ha estudiado constantemente debido a su incurrencia en diversos procesos industriales, bien sea por el deterioro de superficies o de forma constructiva como en el caso de limpieza, sin embargo, esto supone una difícil labor debido a la complicada caracterización de los ambientes de operación, material particulado y su interacción con las superficies.

Este trabajo se centra en determinar los factores de mayor incidencia en el incremento del deterioro superficial de un acero AISI 1020 ampliamente utilizado en diferentes sectores productivos, así como la evaluación de su comportamiento bajo el fenómeno erosivo. Así mismo, se presenta la evaluación de diferentes ángulos de impacto en el material, buscando encontrar aquellos que deben evitarse durante el diseño de dispositivos como turbinas eólicas o cualquier otro elemento metálico expuesto a dichas condiciones.

Capítulo 1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar el impacto de la velocidad, la concentración de partículas y el tipo de fluido en el desgaste bajo condiciones de erosión de un acero AISI 1020 CR.

1.2. Objetivos Específicos

- Determinar a partir de una búsqueda bibliográfica las variables de mayor incidencia en el deterioro del metal bajo condiciones erosivas.
- Observar el comportamiento de acero AISI 1020 CR bajo fenómenos de erosión.
- Realizar ensayos acelerados de erosión, simulando las condiciones de la región norte colombiana variando la velocidad y ángulo de impacto de las partículas en el material de prueba.
- Determinar si el tipo de fluido (seco o húmedo) tiene incidencia sobre la tasa de desgaste de un acero al carbono recubierto bajo condiciones de erosión
- Evaluar el nivel de deterioro superficial del sustrato.
- Determinar la tasa de erosión del metal bajo las condiciones operativas de La Guajira colombiana.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Desgaste

El desgaste es la gradual remoción del material de una o dos superficies en contacto, se considera como la última consecuencia del proceso de interacción entre superficies en movimiento relativo ya sea deslizante o rodante [2].

El comportamiento del material o resistencia al desgaste no es una propiedad intrínseca del material, si no que depende del sistema tribológico en el que opera. Los principales mecanismos de desgaste son la corrosión, la erosión, la adhesión, la abrasión y la fatiga. Otros mecanismos de desgaste como el fretting, las picaduras y la cavitación son abarcados dentro de los principales mecanismos de desgaste.

2.1.1 Desgaste Erosivo

La erosión de una superficie puede producirse de tres formas:

- Por choque de partículas sólidas → Es la pérdida de material en su superficie debido a los repetidos impactos de pequeñas partículas sólidas inmersas en un medio gaseoso. Este mecanismo depende directamente de la forma, tamaño, velocidad y dureza de las partículas, así como de la dureza de la superficie y el ángulo de impacto. En la figura 2.1 se representa una condición de impactos repetidos [1].

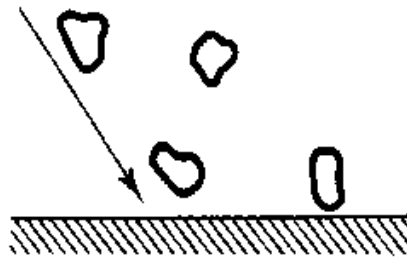


Figura 2.1 Repetidos impactos de partículas sólidas sobre una superficie plana. Imagen adaptada de [1].

- Por choque de líquidos y lodos → Ocurre cuando pequeñas partículas de gotas de un líquido a altas velocidades (alrededor de 100 m/s) inciden en una superficie, las altas presiones experimentadas superan el límite de elasticidad de la mayoría de los materiales por lo tanto las deformaciones plásticas o fracturas pueden resultar sólo de uno o de repetidos impactos generando desgaste erosivo y picaduras, los líquidos no necesariamente necesitan tener partículas sólidas dentro de él para producir el desgaste en las superficies sólidas. En la figura 2.2 se presenta el impacto de un líquido sobre una superficie plana [1].

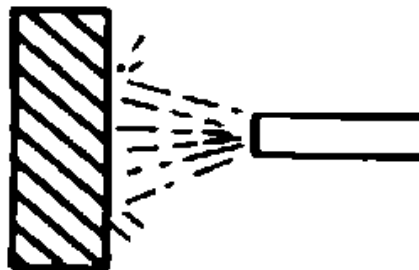


Figura 2.2 Impacto de un líquido sobre una superficie plana. Imagen adaptada de [1].

La erosión por lodos puede definirse como la pérdida de material que experimenta una superficie debido al flujo de una mezcla de partículas sólidas dentro de un líquido a altas velocidades. La figura 2.3 representa lodos conducidos a través de un tubo, la pared del tubo experimentará la pérdida de material en su superficie debido a la interacción con los lodos [1].

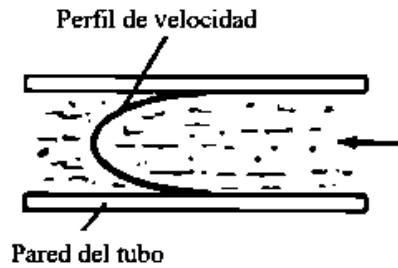


Figura 2.3 Conducción de lodos en una tubería. Imagen adaptada de [1].

- Por cavitación → La cavitación, se define como la continua formación, crecimiento y colapso violento de cavidades o burbujas de aire o vapor dentro de un líquido que se somete a grandes esfuerzos y velocidades considerables. El colapso violento de las burbujas contra la superficie es la responsable del proceso de erosión. La figura 2.4 representa el colapso de burbujas en el material circundante [1].

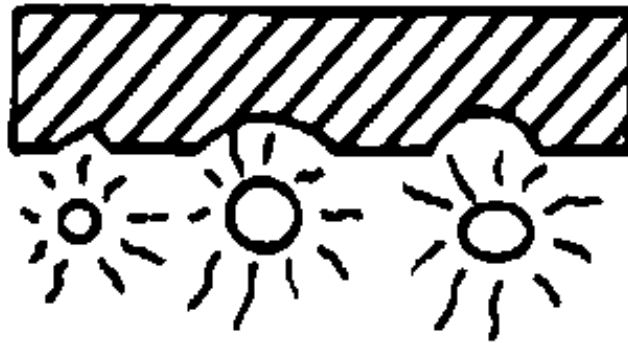


Figura 2.4 Cavitación. Burbujas colapsando en un material. Imagen adaptada de [1].

2.2. Erosión

El fenómeno de erosión describe el proceso de degradación del material donde, el desgaste mecánico se da por medio de partículas líquidas o sólidas transportadas por un fluido que impactan repetidamente con la superficie. Los procesos erosivos ocurren en muchos entornos que van desde ambientes áridos hasta industrias de todo tipo, en donde los materiales están en contacto permanente con fluidos tales como: aire, petróleo, gas, agua, entre otros, que pueden transportar partículas, adicionalmente, a partir de las características del fluido, puede presentarse el fenómeno de corrosión-erosión [3-6].

La erosión es causada por la velocidad de los fluidos a través de la superficie del material, esto se debe al fenómeno abrasivo de las partículas que golpean la superficie, este efecto generalmente retira las capas protectoras del material exponiéndolo a las condiciones que facilitan e incrementan el desgaste y brindan entrada a fenómenos adicionales como la corrosión, el desarrollo del fenómeno erosivo se muestra en la figura 2.5, permitiendo identificar que el desgaste ocasionado incrementa con el tiempo de exposición del material a las condiciones erosivas [7].

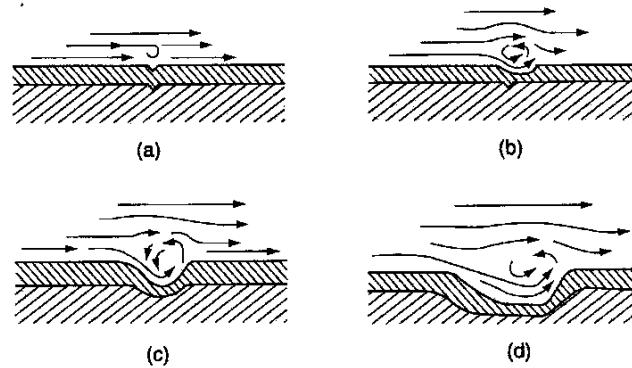


Figura 2.5. Etapas de la Erosión. Imagen adaptada de [8]

La erosión de materiales metálicos es atribuida a dos tipos de daño. Uno es la remoción de material debido a la repetida deformación plástica y el otro es por la fuerza de corte. Estos procesos ocurren al mismo tiempo y la razón de cada contribución al daño total depende tanto del ángulo y la velocidad de impacto, así como las propiedades físicas y mecánicas de las partículas y del material impactado [9].

2.2.1 Parámetros del fenómeno

Debido a que la erosión incrementa el deterioro de los materiales, es importante realizar un análisis de su comportamiento, por lo tanto, han sido identificados una gran cantidad de factores en el fenómeno de erosión los cuales se clasifican en 3 principales categorías [10]. Las cuales son:

1. **Condiciones del flujo de fluido** → Ángulo de impacto, velocidad de la partícula, concentración de partículas en el fluido, rotación de la partícula, naturaleza del fluido y su temperatura.
2. **Propiedades de la partícula** → Tamaño, forma, dureza, fragilidad (resistencia a la fragmentación), densidad.

3. **Propiedades de la superficie** → Esfuerzos como función de la deformación; velocidad de deformación, temperatura, tenacidad a la fractura; dureza, nivel de esfuerzos y esfuerzos residuales, micro-estructura, topografía, ductilidad, fatiga y punto de fusión, entre otras [10].

En estudios sobre el efecto de la corrosión-erosión en condiciones acuosas, los efectos del ángulo de impacto son frecuentemente ignorados. Esto ocurre a pesar del hecho de que esa erosión está en función del ángulo de impacto y puede variar con frecuencia dependiendo de la naturaleza de las interacciones partícula / material. La figura 2.6 presenta la tasa de erosión en función del ángulo de impacto, mostrando el comportamiento hacia este fenómeno de varios metales dúctiles. [11-15]

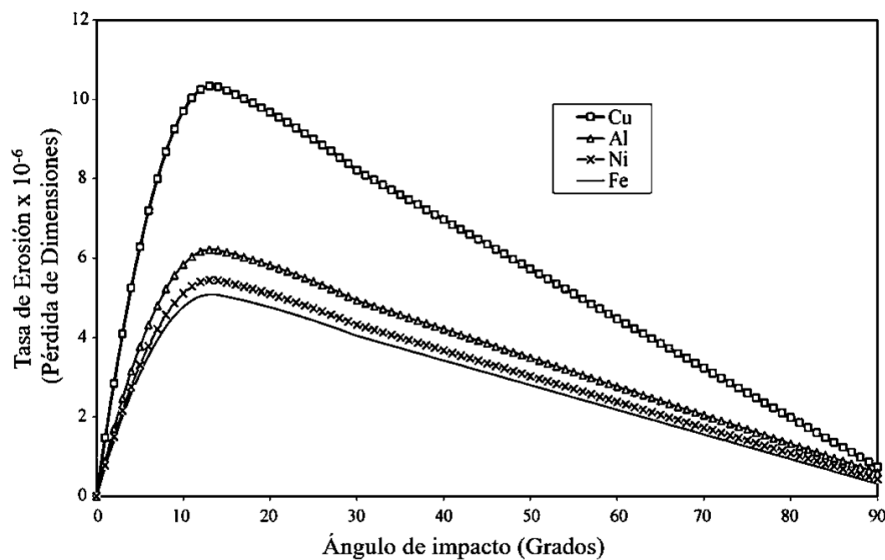


Figura 2.6 Tasa de erosión para diferentes materiales respecto al ángulo de impacto de las partículas. Imagen adaptada de [15]

La tasa erosiva de un material está directamente relacionada con la velocidad de impacto de las partículas que interactúan en el medio. En este sentido, dado que se relaciona la eliminación de material con la liberación de energía durante dichos choques, el tamaño de las partículas caracteriza un incremento en la energía que se puede generar durante los choques, incrementando el efecto erosivo en el material. Ahora bien, se debe considerar que existe un rango de tamaño, donde el límite mínimo representa la aparición de la erosión y el límite máximo representa el transporte de las partículas mediante el fluido, lo anterior es presentado en la figura 2.7. [16]

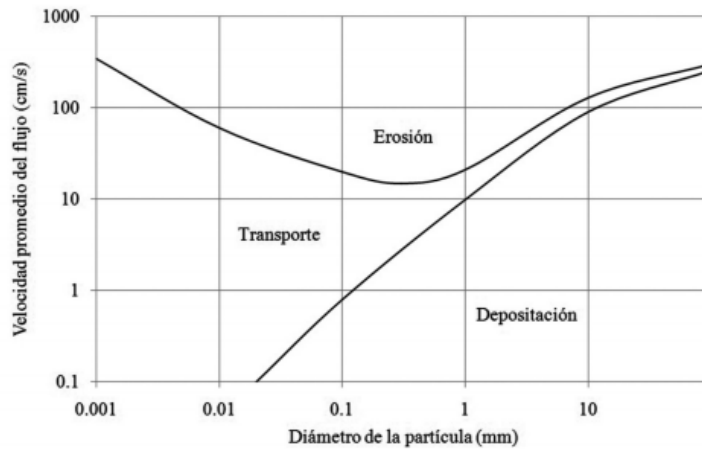


Figura 2.7 Condiciones de transporte de partícula. Imagen adaptada de [16].

En este sentido, entre más grande la partícula el flujo debe tener una velocidad mayor para moverla. Por lo tanto, el impacto provocará unas tensiones sobre la superficie que pueden generar diversos tipos de daño en función de las propiedades superficiales del material y del ángulo de impacto tal como se observa en la figura 2.8.

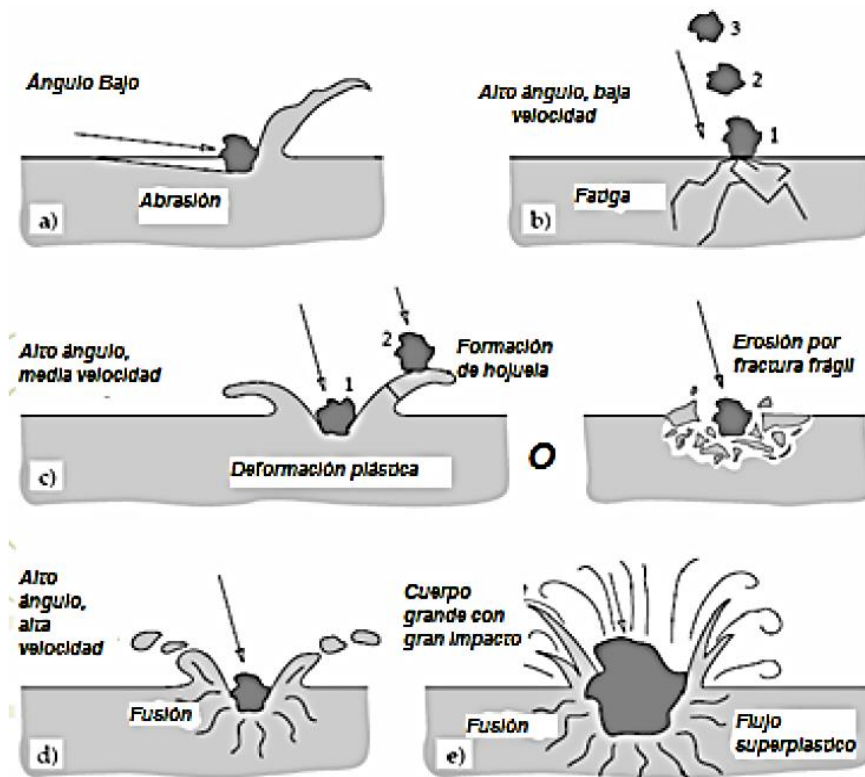


Figura 2.8 Mecanismos de erosión en función de la velocidad del flujo, el ángulo de ataque y el tamaño de la partícula. Imagen adaptada de [17.]

Un factor adicional, es la dureza del material y de las partículas que impactan sobre la superficie, considerando tres efectos principales [17-18]:

1. La partícula solamente deforma la superficie del material y rebota sin remover ninguna capa. En este caso, la superficie puede acumular la energía de deformación y endurecerse progresivamente.
2. La partícula se incrusta en el material sin desprender nada de la superficie. En este caso, las partículas disipan toda la energía en la superficie y no se presenta ningún desprendimiento.
3. Las partículas pueden penetrar en la superficie y liberarse de allí mediante la eliminación de una pequeña hojuela de material en la superficie. En este caso, las partículas penetran fácilmente por encima del límite elástico del material y el proceso de deformación ocurre, ocasionando un desprendimiento de material.

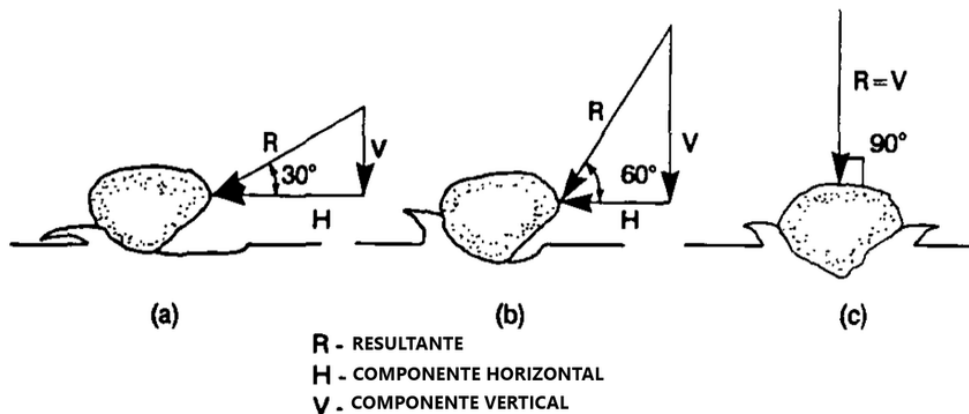


Figura 2.9 Ángulo de impacto de una partícula en una superficie plana. Imagen adaptada de [18]

Estos factores son fundamentales en cuanto a la caracterización de la erosión, puesto que dependiendo la naturaleza del material (dúctil o frágil) se presenta alguna de las acciones anteriormente mencionadas [19]. La resistencia a la erosión no es una propiedad intrínseca del material, la resistencia a la erosión de un material depende del sistema tribológico en el que opere y es diferente para materiales frágiles y dúctiles.

La masa total del material removido es la suma de los impactos de todas y cada una de las partículas erosivas sobre la superficie del material, así que la masa total removida es proporcional a la masa de las partículas erosivas que impactan en él (véase ecuación 1.1).

$$E = \frac{\text{Masa del material removida}}{\text{Masa del erodente}} \quad (1.1)$$

La anterior expresión matemática permite encontrar la relación entre la tasa de erosión y el ángulo de impacto del material particulado, esto se muestra en la figura 2.10.

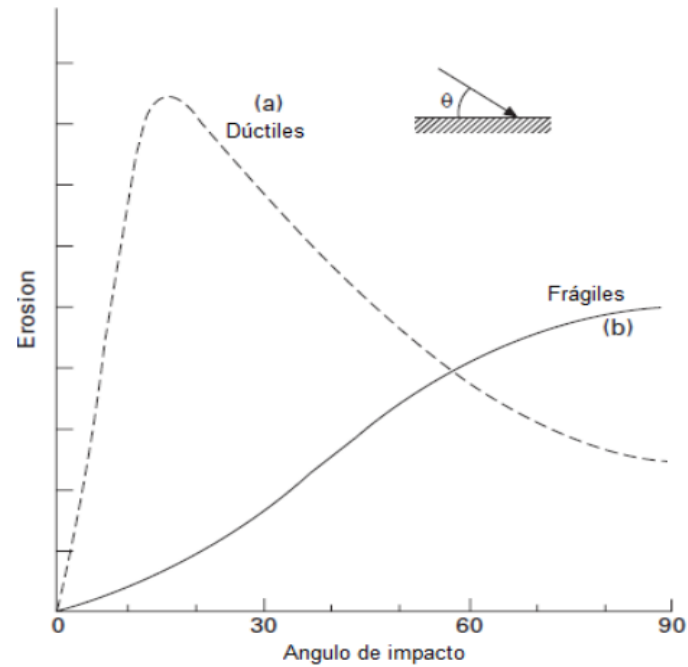


Figura 2.10 Tasa de erosión respecto a la variación de impacto. Imagen adaptada de [19].

Capítulo 3. Materiales y Métodos

3.1. Selección del material de la superficie

El material utilizado en este estudio es acero AISI 1020 rolado en frío, este material se encuentra en un estado de suministro sin tratamiento térmico alguno y comercialmente en perfil circular de 1” (25,4 mm) de diámetro, de esta manera, con el fin de ajustar las probetas de ensayo, se le realizó un mecanizado por arranque de viruta. Las dimensiones de los especímenes de prueba, así como la composición química se presentan en la tabla 1 [20].

Tabla 1. Características del material de superficie.

Material	AISI/SAE 1020 Cold Rolled	
Composición Química	Carbono, C	0,17 - 0,23%
	Hierro, Fe	99,08 - 99,53%
	Manganeso, Mn	0,30 - 0,60%
	Fósforo, P	< = 0,040%
	Azufre, S	< = 0,050%
Dimensiones	Diámetro (mm)	20
	Espesor (mm)	10

3.2. Parámetros del ensayo

Inicialmente, un factor para considerar es la temperatura de operación. En este caso, los ensayos se realizan bajo condiciones normales en laboratorio de temperatura o de humedad. Por lo tanto, el

promedio de temperatura es 14 °C y la humedad promedio es del 76%, para condiciones atmosféricas normales en Bogotá, Colombia [21].

Para la simulación del fenómeno de erosión, es importante determinar si el impacto de las partículas ocurre en flujo húmedo o seco dado que esto modifica la velocidad de impacto de las partículas y el efecto erosivo, en este caso se considera que la velocidad de dichas partículas es la misma que la del fluido que las transporta.

En todo caso, la velocidad del flujo está relacionada directamente con la condición real de exposición de estructuras en diferentes regiones del país. Si el fenómeno que se quiere reproducir es erosión por la exposición a determinados factores ambientales, debe considerarse rangos de velocidad del viento, que, en el caso específico de Colombia, será de 3 m/s hasta 15 m/s, los cuales han sido registrados en la región de La Guajira colombiana (Según datos del IDEAM).

En este caso, el tipo de partícula es arena SiO₂, de 300-600 μm y preferiblemente de geometría redondeada. Se consideró la concentración de dichas partículas en el flujo de aire, puesto que puede incrementar dramáticamente los niveles de desgaste. Así mismo, los ángulos de impacto evaluados fueron 90°, 75°, 60°, 45° y 30° con respecto a la superficie de la probeta.

Las condiciones anteriormente mencionadas, están directamente relacionadas con los mecanismos erosivos donde se da un desgaste de tipo meramente mecánico, dando paso a un fenómeno de corrosión, que deteriora y consume el material base. Por otro lado, la distancia de impacto permite concentrar el chorro abrasivo aumentando el desgaste. De acuerdo con lo anterior, se seleccionó una distancia de impacto de 18 mm. De igual manera, se consideró un tiempo de duración de los ciclos de ensayo, lo que permitió la identificación del nivel de deterioro. En este sentido, los ensayos se hicieron en ciclos de 30 minutos. La tabla 2 resume las condiciones de ensayo.

Tabla 2. Condiciones de ensayo.

Parámetro	Unidad	Rango
Temperatura promedio	°C	14
Humedad relativa promedio	%	76
Presión del fluido	psi	5; 25
Tamaño de partícula (SiO ₂)	μm	300 - 600

Ángulo de impacto	°	90; 75; 60; 45; 30
Distancia de impacto (boquilla - muestra)	mm	18

La ASTM G76 – 07 (Método estándar para realizar pruebas de erosión por choque de partículas sólidas usando inyección de gas) brinda una guía que permite estandarizar los ensayos de erosión. De esta norma, aunque se consideraron los parámetros críticos descritos en la norma, no se puede implementar completamente dado que no se cuenta con los medios para medir el tamaño de las partículas [22]. Lo anterior se recomienda hacer para futuras investigaciones.

Sin embargo, el esquema de operación del dispositivo recomendado a usar en dicho estándar y que se implementó en este estudio se muestra en la figura 3.1.

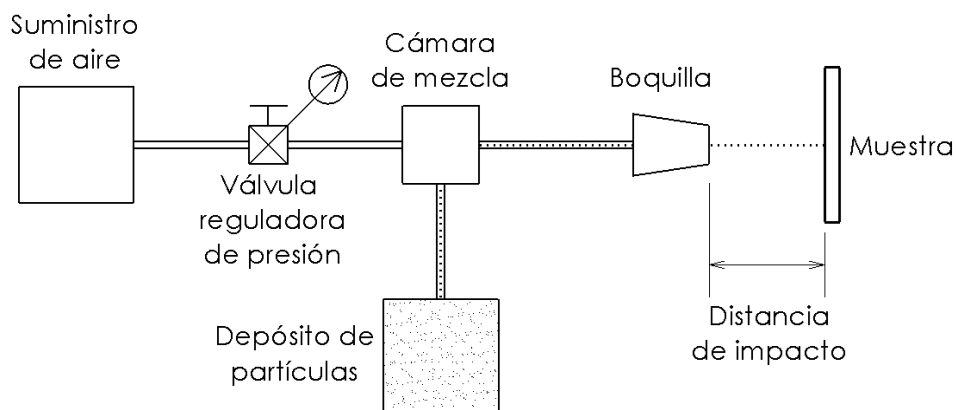


Figura 3.1 Esquema general del dispositivo. Imagen adaptada por el autor.

3.3. Mediciones

Para determinar el efecto de la velocidad de impacto de las partículas, se realizaron los siguientes pasos (ensayos/procedimientos) relacionados en la tabla 3.

Tabla 3. Ensayos y/o procedimientos

Ensayo	Justificación
Metalografía	Determinar la condición inicial de la superficie.

Pérdida de peso	Se determina con el fin de determinar la tasa de erosión, como el peso inicial menos el peso final.
Análisis de falla	Se realiza para determinar la condición final de la superficie.

3.3.1 Condiciones de muestreo y repetibilidad

Considerando las recomendaciones planteadas por la ASTM E122 (Práctica estándar para calcular el tamaño de la muestra para estimar, con precisión especificada, el promedio de una característica de un lote o proceso), se determinó un muestreo de 3 repeticiones por ensayo [23]. La figura 3.2 muestra el esquema de representación y obtención de la cantidad total de ensayos, obteniendo 10 variaciones de las condiciones. Finalmente, se obtuvieron 30 ensayos teniendo en cuenta la repetibilidad de estos.

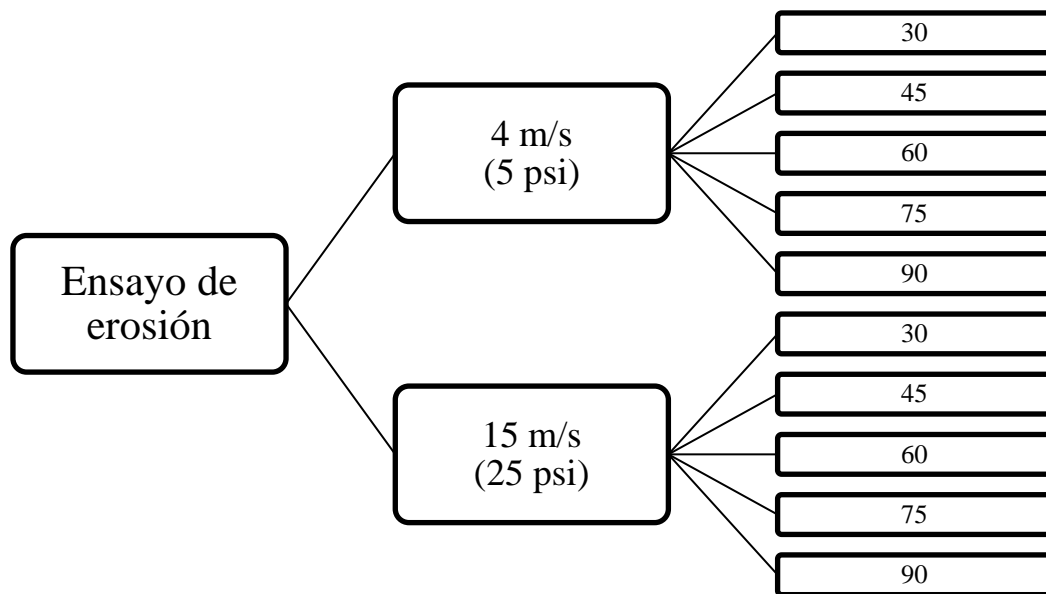


Figura 3.2 Condiciones de muestreo

3.4. Procedimiento para el ensayo

Para asegurar la correcta ejecución de los ensayos, se planteó el siguiente procedimiento:

1. Limpieza de la superficie → Se realizó una preparación de las probetas, con el fin de obtener una superficie libre de imperfecciones e impurezas que puedan afectar el desarrollo de las mediciones tanto iniciales como finales.
 - 1.1. Lijado → Se realizaron mediante la utilización de papel abrasivo desde la lija más gruesa (No. 80) hasta la más fina (No. 2000). Posteriormente, se pasaron todas las probetas por paño hasta alcanzar acabado espejo, retirando las rugosidades de la superficie en lo posible.
 - 1.2. Baño básico → Se realizó para eliminar toda impureza, grasa o agente contaminante externo que pueda estar presente en la superficie
 - 1.3. Limpieza por ultrasonido → Realiza una limpieza más exhaustiva de la superficie, utilizando alcohol para finalizar la limpieza y remover las partículas o suciedad incrustadas en el material.
2. Medición del peso inicial → Se registraron los pesos tomados en una balanza analítica de alta precisión marca OHAUS y precisión 0,0001 gr, con el fin de medir la masa inicial de las probetas.
3. Ajuste de parámetros en la máquina de ensayos → Se realizaba la apertura de las válvulas, por tanto, se configuraba la velocidad del fluido. Posteriormente, se realizó el montaje de los dispositivos asociados al equipo, como la pistola y sus componentes, se configurando la distancia entre la boquilla y la muestra.
4. Montaje de la probeta de ensayo → Se realizaba un ajuste de la probeta, configurando el ángulo de impacto de las partículas y asegurando todo al porta probetas
5. Desarrollo del ensayo → Una vez ajustando todo el sistema, se procedía a accionar la válvula de cierre, permitiendo el paso del fluido y se activaba el contador de tiempo del ensayo.
6. Desmontaje → Una vez cumplido el tiempo, se interrumpe el flujo de material a través de la válvula de cierre, se liberaba la probeta y se retiraba del dispositivo.
7. Medición del peso final → Se realizó la medición de la masa una vez terminado el tiempo del ensayo, esta medición se realizaba en la balanza analítica de alta precisión con el fin de encontrar la pérdida de material. El tiempo entre la finalización del ensayo y la medición de

la masa debía ser el menor posible, evitando al máximo la aparición de óxidos que afecten la medida.

8. Observación al microscopio → Una vez realizada la medición de la masa, cada probeta fue observada en microscopio para determinar los cambios superficiales en la muestra.
9. Registro hoja de ruta → Con el fin de registrar los aspectos superficiales importantes o cambios en la muestra, se llevaba una hoja de ruta que permitía completar la bitácora de los ensayos.
10. Limpieza y finalización en la máquina de ensayos → El ensayo finalizaba limpiando los dispositivos y la máquina, disminuyendo el daño en las superficies.

Capítulo 4. Resultados

4.1. Deterioro superficial

Para identificar el nivel de deterioro superficial, a cada muestra se le realizó una preparación para obtener un acabado tipo espejo, permitiendo disminuir la rugosidad en la superficie. La figura 4.1 muestra el estado de acabado superficial típico de una muestra.



Figura 4.1 Acabado superficial tipo espejo.

Las imágenes de la figura 4.2 corresponden a micrografías a diferentes aumentos donde se observa el estado de la superficie antes de realizarse el ensayo de erosión (las probetas son lavadas mediante ultrasonido con el fin de retirar suciedad y elementos extraños).

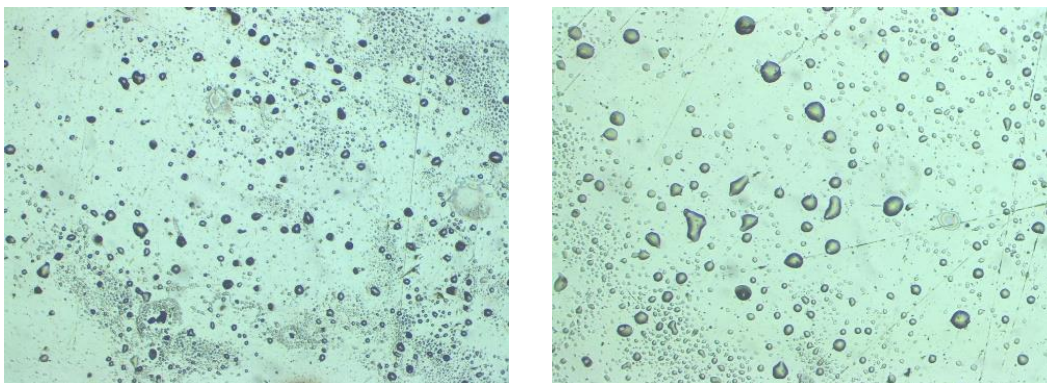


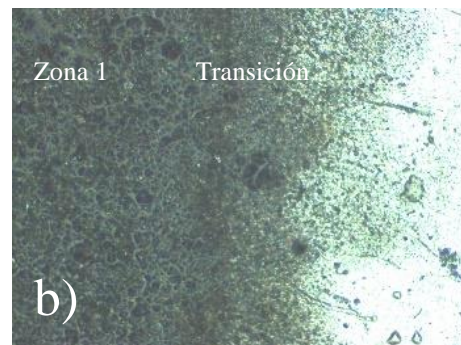
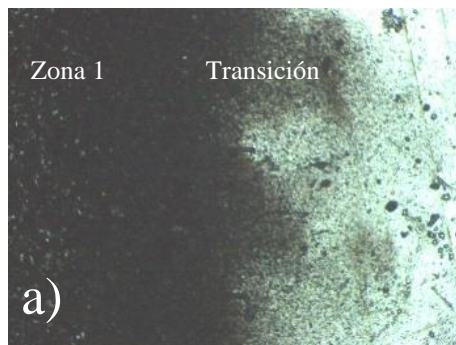
Figura 4.2 Micrografía a 50x (izquierda) y a 100x (derecha), antes del ensayo.

Una vez realizado el ensayo de erosión, la zona degradada de la superficie puede observarse en el centro de la probeta. Así mismo, existe una zona de transición desde el acabado tipo espejo hasta la concentración del chorro abrasivo (gris oscuro), esto se muestra en la figura 4.3, lo que muestra una diferencia en la remoción de material en todo el diámetro la probeta.



Figura 4.3 Estado superficial posterior al ensayo de erosión.

Una vez finalizado el ensayo, se realizaron las micrográficas respectivas bajo diferentes aumentos, incluyendo la zona de transición. La figura 4.4 permite observar ciertos cambios superficiales.



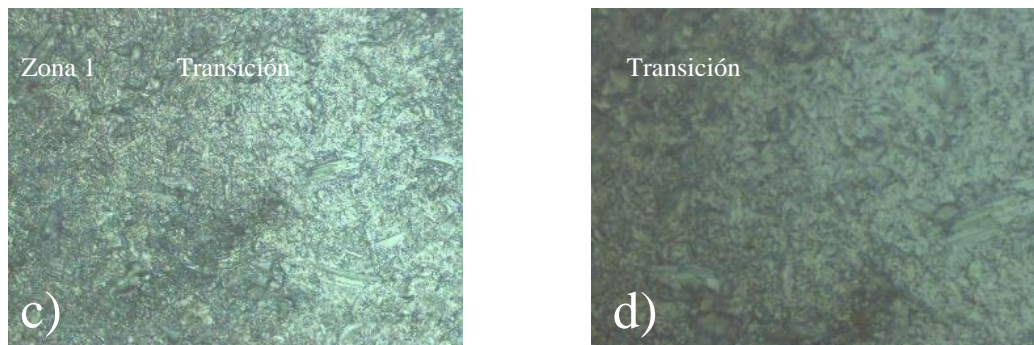


Figura 4.4 Micrografías posteriores al ensayo de erosión, a) 50x, b) 100x, c) 500x y d) 1000x.

En estas imágenes, se logran identificar algunas marcas y fenómenos abrasivos, proporcionando información acerca de los mecanismos de desgaste que se presentan durante fenómenos erosivos. Dentro de ellos se encuentran, arado y marcas de abrasión hecha por partículas.

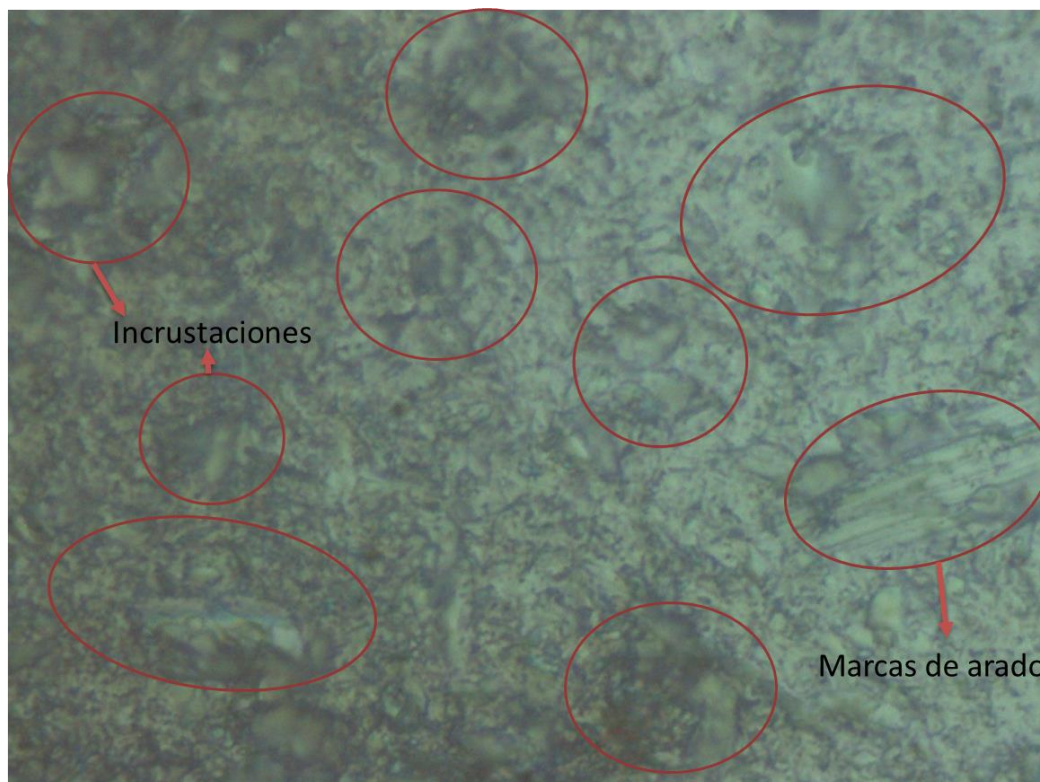












Figura 4.5 Micrografía 500x.

Bajo inspección visual de la superficie, se pudieron identificar ciertas diferencias en cuanto a la variación de la velocidad y el ángulo de impacto. La huella de desgaste aumenta de profundidad al realizar el cambio de velocidad, mientras que al realizar la variación angular adopta una forma

elíptica, donde el eje mayor es horizontal y aumenta conforme disminuye el ángulo de impacto (ángulo recto forma un círculo). Lo mencionado anteriormente se muestra en la tabla 4.

Tabla 4 Cambios superficiales post-ensayos.

m/s \ °	90°	75°	60°	45°	30°
29 m/s (5 psi)					
72 m/s (25 psi)					

Los cambios superficiales bajo los diferentes aumentos no son observables durante la variación de velocidad y ángulo de impacto debido a la resolución del equipo y a la técnica empleada para este fin. Se propone que para futuros trabajos se realicen perfilometrías o mapas de superficie, que permitan determinar la variación en la rugosidad y la remoción de material.

4.2. Pérdida de masa

Para determinar la pérdida de material, se realizó una inspección y medición del peso inicial de cada probeta, donde se determinaron las condiciones iniciales para cada una de las muestras con el fin de determinar cambios promovidos por el fenómeno. La figura 4.6 presenta la variación de peso para cada velocidad (presión), en donde se observa un aumento notable en la pérdida de material para una velocidad mayor.

Así mismo, se observa que a medida que el ángulo de impacto incrementa la pérdida de material disminuye.

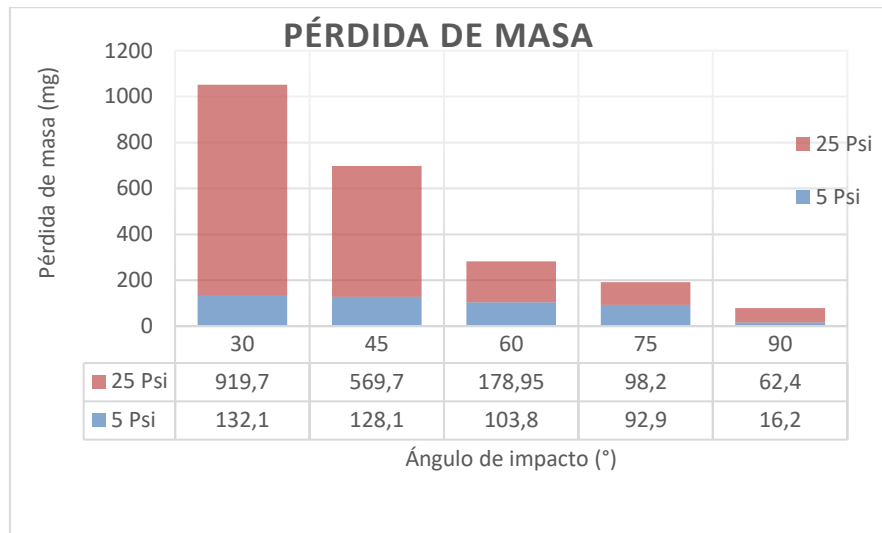


Figura 4.6 Pérdida de masa en función de la presión.

Así mismo, se graficó la pérdida de masa respecto al ángulo de impacto, tal como puede observarse en la figura 4.7 respecto a dos velocidades determinadas por la presión.

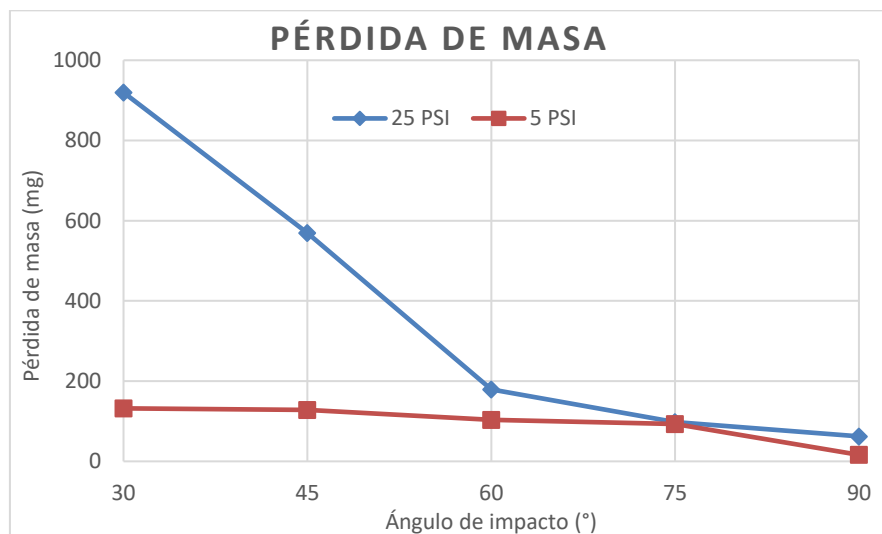


Figura 4.7 Pérdida de masa en función del ángulo de impacto.

Con el fin de verificar lo planteado desde la teoría, se realizó el cálculo de la tasa de erosión, considerando la pérdida de masa del material y el gasto en masa de arena (erodente) para cada una de las velocidades, de esta manera, se obtuvo la figura 4.8 que representa la tasa de erosión respecto a la variación angular de impacto, esta figura permite comparar el comportamiento del metal para las dos velocidades evaluadas.

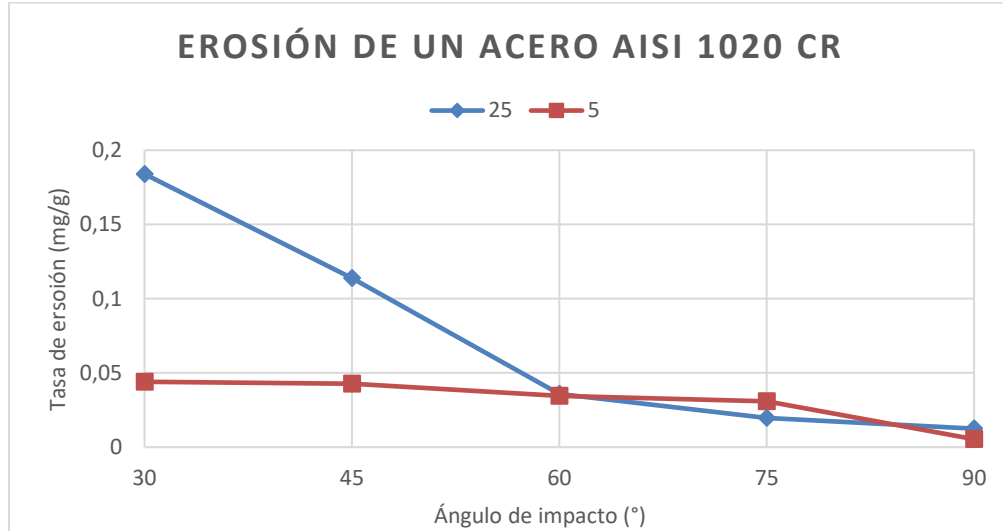


Figura 4.8 Tasa de erosión del acero AISI 1020 CR.

A partir de los resultados dados para un ángulo de impacto de 75°, se encuentra cierta relación en la pérdida de masa (figura 4.7) ya que los valores de pérdida de material son muy cercanos. Así mismo, para este ángulo de impacto la tasa de erosión es mayor en la velocidad de 29 m/s contradiciendo lo esperado.

4.3. Fenómeno de corrosión-erosión

Además de los ensayos erosivos realizados en seco, se realizaron ensayos bajo medio húmedo para identificar el comportamiento del metal bajo el fenómeno de corrosión-erosión, la tabla 5 muestra las condiciones escogidas para este ensayo.

Tabla 5 Parámetros utilizados para un ensayo de corrosión-erosión.

Parámetro	Unidad	Rango
Temperatura promedio	°C	14
Humedad relativa promedio	%	76
Presión del fluido	psi	10
Tamaño de partícula (SiO ₂)	µm	300 - 600
Ángulo de impacto	°	90; 60; 30

Concentración de arena	%	1%
Distancia de impacto (boquilla - muestra)	mm	18

La realización de estos ensayos permitió obtener la figura 4.9 que muestra el comportamiento del material bajo las condiciones anteriormente mostradas.

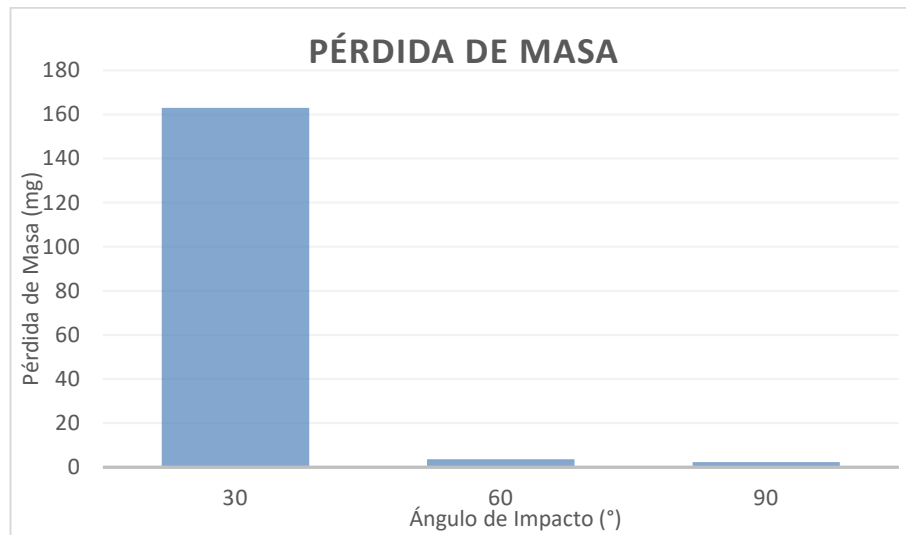


Figura 4.9 Pérdida de masa bajo el fenómeno de corrosión-erosión.

Según lo esperado, para el fenómeno de corrosión-erosión el ángulo de mayor pérdida de material es el de 30°, esto refleja la similitud de deterioro de material con respecto a fenómenos erosivos.

Para evaluar el efecto del fenómeno corrosivo sobre la pérdida de material, se realizaron ensayos donde se adicionó sal en una concentración de 3,5%wt. La figura 4.10 muestra el efecto de dicha adición respecto a la pérdida de masa del ensayo realizado solo con agua y arena.

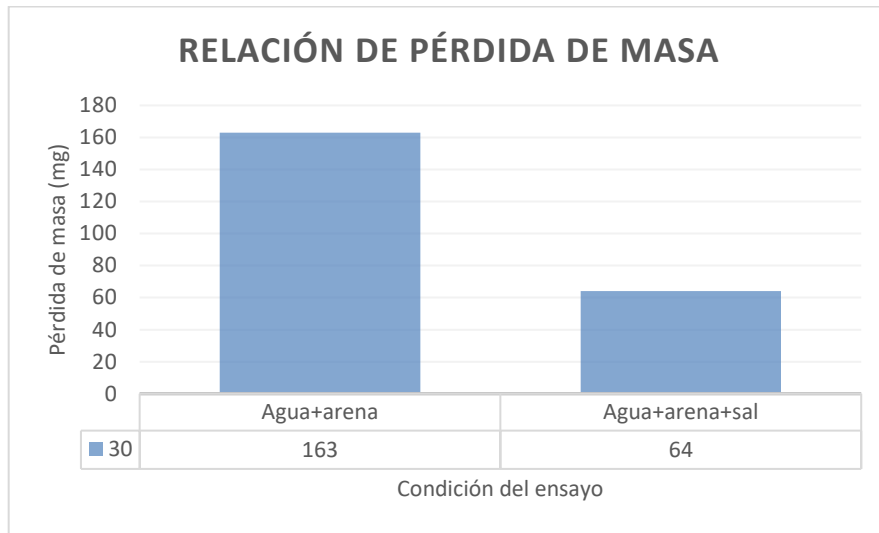


Figura 4.10 Relación de pérdida de masa con respecto a la concentración de salinidad.

A partir de lo observado en la figura 4.10, se logró determinar que las probetas sometidas a la condición de salinidad perdieron menos masa. Lo anterior podría corresponder, a la formación de óxidos en la superficie metálica, que al ser más duros son más difíciles de remover. Otra posibilidad, corresponde a que, al estar formados estos óxidos poco protectores sobre la superficie, el impacto no sea lo suficientemente fuerte para remover dicho óxido o material fresco. Finalmente, se realizó una revisión superficial de las probetas (ver figura 4.11), donde se observa claramente el crecimiento de óxido ferroso en algunas regiones de la superficie señaladas, mientras que en la probeta sometida solo a agua+arena lo que se observa es la superficie erosionada sin presencia abundante o apreciable de óxido.

Este efecto interesante en términos del efecto de la capa límite sobre la fuerza erosiva de las partículas podría ser analizado en trabajos futuros.

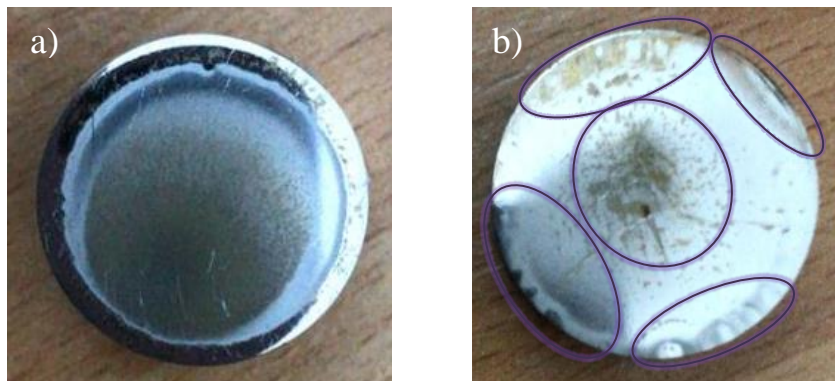


Figura 4.11 Comparación superficial, a) agua+arena y b) agua+arena+sal.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Para altas velocidades del fluido, la tasa erosiva es mayor para ángulos de impacto cercanos a 30° tal como lo reporta la literatura, debido a que el área de impacto es menor impidiendo al material absorber energía y resultando un mayor desprendimiento de material.
- Para ángulos de impacto cercanos a 75° se presenta alta tasa de incrustación de partículas bajo altas velocidades, esto provoca que la tasa de erosión y pérdida de material disminuya bajo esta condición.
- Se debe evitar la formación de ángulos cercanos a 30° durante el proceso de diseño de dispositivos como turbinas de eólicas, ya que esto incrementa notablemente el deterioro de la superficies y a aparición de fenómenos de erosión y corrosión-erosión.
- La salinidad en el medio durante los ensayos de corrosión-erosión disminuyó la pérdida de masa realizando una comparativa entre condiciones, esto se debe al crecimiento de una capa de óxido sobre la superficie que provoca un aumento de dureza y en la masa final.
- El control de las variables para cada uno de los ensayos es una difícil e importante labor, ya que no solo permite la repetibilidad de las pruebas sino también generar variaciones que pueden alterar los resultados esperados, ocasionar incongruencias, entre otras.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda implementar un mejor control de la velocidad de impacto de las partículas, esto con el fin de mejorar los resultados esperados, así como un método que permita comprobar dicha velocidad.
- Se recomienda mejorar el control del caudal de aire y arena, ya que los métodos implementados para realizar dicho control y medición no son los adecuados para este tipo de estudios.
- Se recomienda un rediseño del dispositivo de variación angular, que permita un rango más amplio de impacto, contribuyendo a estudios erosivos más completos.
- Se recomienda la implementación de técnicas más avanzadas que permitan comprobar el estado superficial de las muestras, lo que facilite la identificación de los mecanismos de desgaste presentados una vez terminado cada ensayo.

Bibliografía

- [1] Such and Saka Bhushan, Bharat and Gupta, B. K Handbook of Tribology Materials, Coatings and Surface treatments. pp 2.1, 2.10, 2.13, 2.16, 2.17, 2.19, 2.20, 2.29
- [2] ASM Handbook Volume 18. “Wear”. ASM International Materials Park Ohio 1990 10 th Edition
- [3] Wood, R.J.K., Jones, T.F., Ganeshalingam, J. & Miles, N.J. 2004. “Comparison of predicted and experimental erosion estimates in slurry ducts”. *Wear*, 256 (2004), pp 937-947.
- [4] Hutchings I.M. “Tribology Friction and Wear of engineering Materials”. Edward Arnold U.K. 1 st Edition. (1992). pp 133, 134, 135, 150-152, 171- 173, 175.177, 182-186, 194.
- [5] M. M. Stack, B. D. Jana, y S. M. Abdelrahman, “6 - Models and mechanisms of erosion–corrosion in metals”, en *Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings*, D. Landolt y S. Mischler, Eds. Woodhead Publishing, 2011, pp. 153–187e.
- [6] S. Biswas, A. Cenna, K. Williams y M. Jones, “Subsurface behavior of ductile metal by particle impacts and its influence on wear mechanism”, en 10th International Conference on Mechanical Engineering, The University of Newcastle, Callaghan, Australia, 2014.
- [7] C. Frayne, “4.27 - Environmental Modification for Cooling, Heating and Potable Water Systems”, en *Shreir’s Corrosion*, B. Cottis, M. Graham, R. Lindsay, S. Lyon, T. Richardson, D. Scantlebury, y H. Stott, Eds. Oxford: Elsevier, 2010, pp. 2930–2970
- [8] “CTL-Technical Brief: Erosion Corrosion”. Consultado el 16 de noviembre de 2019. <http://www.corrosionlab.com/papers/erosion-corrosion/erosion-corrosion.html>.
- [9] Yabuki Akhihiro, Matsuwaki Kazuo, Matsumura Masanobu. “Critical Impact Velocity in the Solid Particles Impact Erosion of Metallic Materials”. *Wear*, 233- 235 (1999). 468-475.
- [10] H. Meng, X. Hu, y A. Neville, “A systematic erosion–corrosion study of two stainless steels in marine conditions via experimental design”, *Wear*, vol. 263, núm. 1–6, pp. 355–362, sep. 2007.

- [11] Iain, Finnie. "Some Reflections on the Past and Future of Erosion". *Wear*. 1-10 (1995). 186-187.
- [12] Y. L. Saraswathi, S. Das, y D. P. Mondal, "Influence of microstructure and experimental parameters on the erosion–corrosion behavior of Al alloy composites", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 425, núm. 1–2, pp. 244–254, jun. 2006.
- [13] H. Shahali, H. M. Ghasemi, y M. Abedini, "Contributions of corrosion and erosion in the erosion-corrosion of Sanicro28", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 233, pp. 366–377, may 2019.
- [14] D. López, J. P. Congote, J. R. Cano, A. Toro, y A. P. Tschiptschin, "Effect of particle velocity and impact angle on the corrosion–erosion of AISI 304 and AISI 420 stainless steels", *Wear*, vol. 259, núm. 1–6, pp. 118–124, jul. 2005.
- [15] B. D. Jana y M. M. Stack, "Modelling impact angle effects on erosion–corrosion of pure metals: Construction of materials performance maps", *Wear*, vol. 259, núm. 1–6, pp. 243–255, jul. 2005.
- [16] "Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas", Volumen 1, Programa hidrológico internacional, Documento técnico N° 22, 2010.
- [17] Balaraju, J. N., Kalavati, y K. S. Rajam. "Influence of Particle Size on the Microstructure, Hardness and Corrosion Resistance of Electroless Ni–P–Al₂O₃ Composite Coatings". *Surface and Coatings Technology* 200, núm. 12 (el 31 de marzo de 2006): 3933–41.
- [18] S. Biswas, "Subsurface Behavior of Ductile Material by Particle Impacts and its Influence on Wear Mechanism", *Procedia Engineering*, p. 6, 2014.
- [19] M.M. Stack, B.D. Jana, « Models and mechanisms of erosion–corrosion in metals », 2011
- [20] "Acero AISI 1020, laminado en frío". <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cfffbb&ckck=1> (consultado oct. 19, 2020).
- [21] Y. M. G. d.o.o, "Bogotá, Colombia - Información detallada del clima y previsión meteorológica mensual", *Weather Atlas*. <https://www.weather-col.com/es/colombia/bogota-clima> (consultado oct. 19, 2020).
- [22] ASTM G76-07, Método de prueba estándar para realizar pruebas de erosión por impacto de partículas sólidas mediante chorros de gas, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org

- [23] ASTM E122-17, Práctica estándar para calcular el tamaño de la muestra para estimar, con precisión especificada, el promedio de una característica de un lote o proceso, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org